



**FAPAC – FACULDADE PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS  
INSTITUTO TOCANTINENSE PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS PORTO LTDA.  
ENGENHARIA CIVIL**

**LARISSA MARTINS SANTOS  
VITOR HUGO SANTOS FERREIRA**

**AVALIAÇÃO ANALÍTICA DE VIGAS À FLEXÃO REFORÇADAS COM POLÍMERO  
REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO (PRFC)**

**PORTO NACIONAL – TO**

**2017**

**LARISSA MARTINS SANTOS**  
**VITOR HUGO SANTOS FERREIRA**

**AVALIAÇÃO ANALÍTICA DE VIGAS À FLEXÃO REFORÇADAS COM POLÍMERO  
REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO (PRFC)**

Projeto de Pesquisa submetido ao Curso de Engenharia Civil do Instituto Tocantinense Presidente Antônio Carlos Porto – ITPAC PORTO NACIONAL, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Douglas Freitas Augusto dos Santos

**PORTO NACIONAL – TO**  
**2017**

**LARISSA MARTINS SANTOS  
VITOR HUGO SANTOS FERREIRA**

**AVALIAÇÃO ANALÍTICA DE VIGAS À FLEXÃO REFORÇADAS COM POLÍMERO  
REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO (PRFC)**

Projeto de pesquisa submetido ao curso de Engenharia Civil do Instituto Tocantinense Presidente Antônio Carlos Porto Ltda., como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Apresentado e defendido em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_ ( ) APROVADO ( ) REPROVADO  
Banca examinadora constituída pelos professores:

---

Orientador (a): Prof.<sup>o</sup> Me. Douglas Freitas Augusto dos Santos

---

Prof.<sup>a</sup> Me. Silvia Barroso Gomes Souto

---

Convidado: Prof.<sup>o</sup> Me. Adauto Cezar Rosa do Nascimento

**PORTO NACIONAL - TO**

**2017**

## RESUMO

A ocorrência de falhas de projeto ou de execução, e a necessidade de readequação de estruturas têm contribuído para a crescente demanda por atividades de inspeção, reforço e reabilitação de estruturas de concreto armado. Visando diminuir a deformabilidade de vigas devido aos esforços de momento fletor tem se empregado o uso de polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC), por ser um material que possui excelente resistência à corrosão, fácil aplicabilidade e o baixo peso adicionado à estrutura quando comparado com o encamisamento de concreto. Porém uma das principais dificuldades no projeto de reforço é a falta de normas com recomendações diante das diferentes técnicas disponíveis. Com base nisso, este trabalho avalia o reforço à flexão de vigas de concreto armado sob aspectos de desempenho estrutural utilizando o PRFC. Sendo assim, foi montado um banco de dados, a partir de pesquisas na literatura, com resultados de 40 ensaios de vigas com PRFC. Estes resultados serão comparados com resultados teóricos obtidos segundo as normas ACI 440-R (2008) e FIB BULLETIN 14 (2001), a fim de verificar a confiabilidade destas normas pelo método de COLLINS (2001).

**Palavras – chaves:** Flexão. Reforço. Viga. PRFC.

## ABSTRACT

The occurrence of design or execution fault, and the necessity for readjustment of structures have contributed to the growing demand for strengthening and rehabilitation of reinforced concrete structures. Aiming to decrease the deformability of beams due to bending moment efforts, the use of carbon fiber reinforced polymers (CFRP) has been employed, since it is an excellent corrosion resistance, easy applicability as a reinforcement element and the low weight added to the structure when compared to the concrete casing. However, one of the main difficulties in the reinforcement project is the lack of standards with recommendations regarding the different techniques available. Based on this, this work evaluates the flexural reinforcement of reinforced concrete beams under aspects of structural performance using the CFRP. Thus, a database was assembled, based on researches in the literature, with results of 40 beams with PRFC. These results will be compared with the FIB BULLETIN 14 (2001), in order to verify the reliability of these standards by the method of COLLINS (2001).

**Keywords:** Flexural. Strengthening. Beam. CFRP.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de viga biapoiada e diagrama de esforços internos .....	10
Figura 2 – Diagramas de tensão e de deformação no Estádio I.....	11
Figura 3 – Comportamento do concreto no Estádio II .....	12
Figura 4 – Fases do Estádio II e as respectivas tensões principais de tração .....	13
Figura 5 – Comportamento do concreto à flexão pura e os digramas de tensões e deformações.....	14
Figura 6 – Comportamento de uma viga reforçada à flexão com PRFC .....	16
Figura 7 – Comportamento de uma viga reforçada à flexão com PRFC .....	21

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Escala de Demérito .....	28
-------------------------------------	----

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Orçamento do projeto .....	29
Quadro 2 – Cronograma do projeto .....	30

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	7
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA .....	8
1.2. HIPÓTESE .....	8
1.3. JUSTIFICATIVA .....	8
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	9
2.1 COMPORTAMENTO DE VIGAS SUBMETIDAS À FLEXÃO .....	9
<b>2.1.1 Estádio I</b> .....	10
<b>2.1.2 Estádio II</b> .....	11
<b>2.1.3 Estádio III</b> .....	13
2.2 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO.....	14
<b>2.2.1 Composição</b> .....	15
2.2.1.1 Fibra .....	15
2.2.1.2 Matriz.....	15
2.3 REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS COM PRFC .....	16
<b>2.3.1 Recomendações da norma ACI 440-R (2008)</b> .....	16
<b>2.3.2 Recomendações da FIB BULLETIN 14 (2001)</b> .....	21
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	25
3.1 OBJETIVO GERAL .....	25
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	25
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	26
4.1 METODOLOGIA DE COLETA DOS ELEMENTOS DO BANCO DE DADOS .....	26
4.2 METODOLOGIA DE CÁLCULO .....	26
4.3 METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	27
<b>4.3.1 Metodologia de Collins (2001)</b> .....	27
<b>5. ORÇAMENTO</b> .....	29
<b>6. CRONOGRAMA</b> .....	30
<b>7. RESULTADOS ESPERADOS</b> .....	31
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	32
<b>ANEXOS</b> .....	34

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil, isto ocorre devido ao seu baixo custo, versatilidade geométrica e mão de obra barata. Segundo a NBR 6118 (2014), as estruturas em concreto devem respeitar algumas condições mínimas de desempenho, resistência e durabilidade durante a construção e a utilização de uma obra para, desta forma, garantir uma maior segurança ao usuário. Contudo, fatores como a falta de inspeção, novas condições de ocupação, carregamentos excepcionais e falhas na concepção e execução de projetos têm levado a estrutura de concreto armado a uma degradação precoce, diminuindo assim a sua vida útil.

Com isto, foram sendo desenvolvidas várias técnicas para reabilitar e reforçar estas estruturas, aumentando sua resistência sem precisar modificar as dimensões dos elementos estruturais. Alguns dos métodos mais utilizados atualmente é a colagem de chapas metálicas, o encamisamento e a aplicação de materiais compósitos. Porém dentre estes, tem se destacado a aplicação de materiais compósitos, que mesmo sendo um método relativamente novo, tem demonstrado ser vantajoso devido a sua fácil aplicabilidade, baixo peso específico e uma alta resistência.

Sendo que, as fibras sintéticas de carbono, entre os materiais compósitos, é a mais promissora, por causa da grande força de ligação entre os seus átomos. Esse tipo de sistema é indicado para promover reforço de vários tipos de estruturas, no qual têm se destacado aquelas que estão sob efeito de momentos fletores. Esse método é conhecido no meio técnico como Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (PRFC), sendo encontrado em várias formas como manta, laminado e tecido.

Seguindo este contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar e verificar a taxa de incremento de resistência à flexão utilizando o PRFC em vigas retangulares de concreto armado, além de averiguar a confiabilidade das prescrições normativas estabelecidas nas normas ACI 318 (2014) e a FIB BULLETIN 14 (2001).

### 1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

A perda de desempenho em vigas de concreto armado submetidas a esforços de flexão é provocada pela fadiga, falta de manutenção periódica, mudança de utilização para qual foi dimensionada, exposição a ambientes agressivos e até devido causas acidentais, gerando assim, uma necessidade de utilizar técnicas de reforço na mesma, para que haja um acréscimo de resistência na estrutura e desse modo possa atingir a vida útil à qual foi projetada.

### 1.2. HIPÓTESE

Atualmente, há disponíveis diversas técnicas para reforço estrutural como o encamisamento, colagem de chapas metálicas e a aplicação de materiais compósitos. Esses métodos são utilizados para aumentar a resistência de uma estrutura sem precisar modificar suas dimensões.

Sendo que, a utilização de materiais compósitos, como o PFRC, para reforçar vigas de concreto armado submetidas a esforços de flexão, tem demonstrado ser promissor em relação às técnicas tradicionais, devido a fácil aplicabilidade, baixo peso específico e a alta resistência.

### 1.3. JUSTIFICATIVA

Dentre as ocorrentes patologias nas estruturas, a mais comumente encontrada é a deformação excessiva de vigas de concreto armado devido aos esforços de momentos fletores. Assim, há uma busca constante para encontrar métodos que possam aumentar a capacidade de carga e durabilidade de uma estrutura e ao mesmo tempo ter um bom custo-benefício. O reforço com PRFC, apesar de ser uma técnica relativamente nova, tem demonstrado ter grande potencial para preencher esses requisitos.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

As vigas são elementos lineares utilizados para distribuir os carregamentos recebidos das lajes nos pilares, tendo a flexão como esforço predominante (ABNT, 2014). É importante salientar que o concreto tem uma alta resistência à compressão, em contrapartida, uma baixa resistência à tração, sendo desprezada a contribuição dela e, com o intuito de combater ambos os esforços se adotam, há décadas, a junção de concreto e aço como elementos solidarizados para que as características mecânicas do aço supram as deficiências do concreto à tração (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2013).

Nessa seção será abordado o comportamento das vigas, as peculiaridades que o concreto e as armaduras de aço sofrem nas diversas fases de carregamento sofridas pela viga, as características do Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (PRFC) usado como reforço e as vigas reforçadas com o PRFC.

### 2.1 COMPORTAMENTO DE VIGAS SUBMETIDAS À FLEXÃO

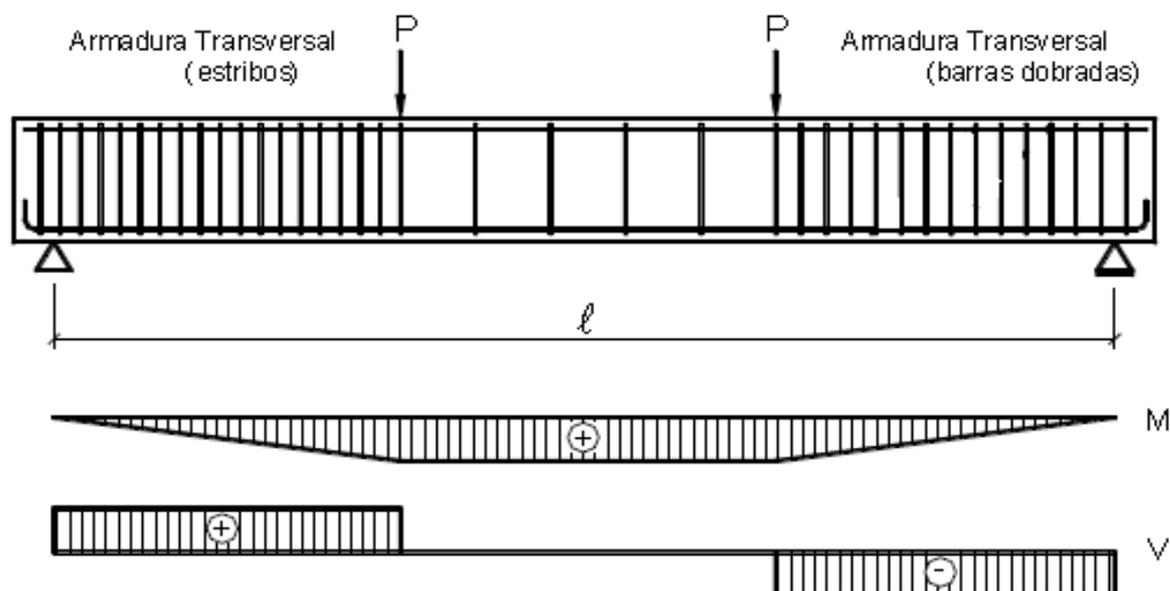
De acordo com Silva (2003), as fissuras em vigas, pilares e lajes de concreto armado ocorre devido à baixa resistência à tração que o concreto apresenta, mesmo sendo um fenômeno indesejável o processo de fissuração é próprio, quando dentro de limites, do concreto armado. Barbosa (2010) afirma que o grau de fissuração depende da intensidade em que um carregamento é aplicado na peça, e que as fissuras podem fechar com a diminuição do carregamento, mas nunca deixaram de existir.

De acordo com Araújo (2010), considera-se um procedimento para um modelo experimental de análise dos esforços atuantes onde se configura uma viga de concreto armado biapoiada submetida a duas forças pontuais crescentes e equidistantes de seus apoios como podemos observar na Figura 1 que demonstra a viga biapoiada e diagramas de esforços solicitantes.

Segundo Pinheiro (2007) esse procedimento tem o intuito de caracterizar as fases do comportamento da seção de concreto, e essas fases são nomeadas como estádios, que se diferem em três: Estádio I, Estádio II e Estádio III. Carvalho e Figueiredo Filho (2013) as chamam de níveis de deformação e situações em que a

seção transversal apresenta, onde determinam os comportamentos distintos da peça até a ruína, dependendo do grau das solicitações.

Figura 1 – Esquema de viga biapoiada e diagrama de esforços internos



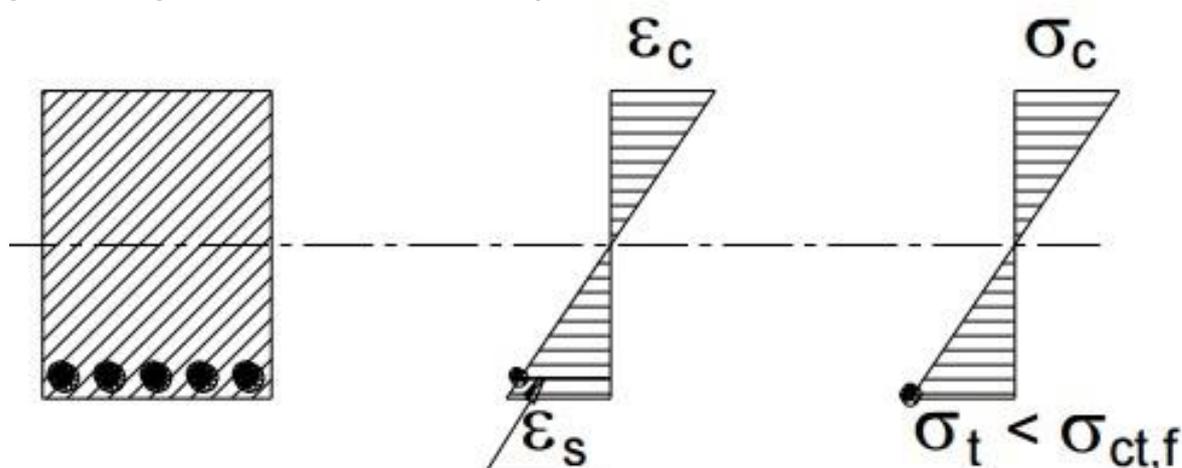
Fonte: Adaptado de Leonhardt e Mönnig (1982).

### 2.1.1 Estádio I

Na primeira situação, Carvalho e Figueiredo Filho (2013) descrevem a atuação de um momento fletor ( $M_I$ ) de baixa magnitude em que a resistência característica do concreto à tração ( $f_{tk}$ ) é suficiente para combater as tensões de tração ( $\sigma_t$ ) em que a viga está sendo submetida, apresenta diagrama de tensão normal de forma linear por toda a seção transversal da viga, a proporcionalidade que apresenta os diagramas de tensão e de deformação, e a peça se encontra em estado elástico, conforme se observa os diagramas de tensão e deformação do Estádio I na figura 2.

Tem-se um diagrama linear de tensões, ao longo da seção transversal da peça, sendo válida a lei de Hooke. Levando-se em consideração a baixa resistência do concreto à tração, se comparada com a resistência à compressão, percebe-se a inviabilidade de um possível dimensionamento neste estágio (PINHEIRO, 2007, p. 50).

Figura 2 – Diagramas de tensão e de deformação no Estádio I



Fonte: Adaptado de Bastos (2015).

A inviabilidade de dimensionamento no Estádio I se constata também no que Adão e Hemerly (2010) descrevem como sendo antieconômico para fins de dimensionamento onde o concreto resiste sem a presença de armaduras às tensões de tração. Araújo (2010) complementa a descrição desse Estádio ao afirmar que o mesmo se finda e que o segundo Estádio se inicia no aparecimento de fissuras visíveis na região do concreto tracionado onde já é possível determinar o momento de fissuração.

### 2.1.2 Estádio II

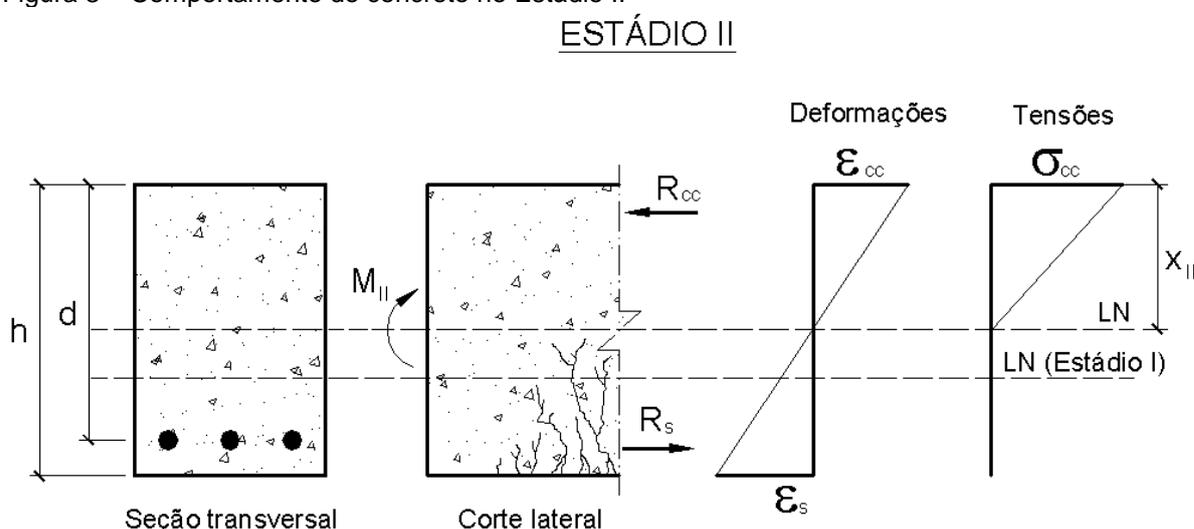
Araújo (2010) afirma que o Estádio II se inicia com o surgimento das fissuras visíveis. Ao se elevar o momento aplicado inicialmente ( $M_{II} > M_I$ ) consequentemente a tensão de tração abaixo de linha neutra (LN) se eleva e essa se torna superior à resistência à tração do concreto levando ao Estádio II, também chamado de estado de fissuração ao atingir o momento de fissuração (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2013).

Adão e Hemerly (2010) consideram o Estádio II como sendo o que o dimensionamento do concreto armado é feito no primeiro despertar das tensões de tração nas armaduras, desconsiderando qualquer colaboração da resistência à tração do concreto.

Duas considerações são feitas quanto ao Estádio II, sendo a primeira uma situação-limite, o início do Estádio II, em que se despreza o concreto da região tracionado onde se encontra fissurado e que apenas a armadura resiste aos

esforços internos de tração, onde existe uma específica linearidade no concreto com relação às tensões e deformações em todos os pontos da seção transversal. A segunda consideração feita diferencia-se da primeira chamando de Estádio II Puro, que se caracteriza pela atuação do momento maior que o momento de fissuração e que esse atua na seção até o momento em que o escoamento da armadura ocorre e/ou o concreto entra em estado de plastificação, e a tensão de compressão no concreto permanece linear, como se observa na figura 3 o comportamento do concreto no Estádio II (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2013).

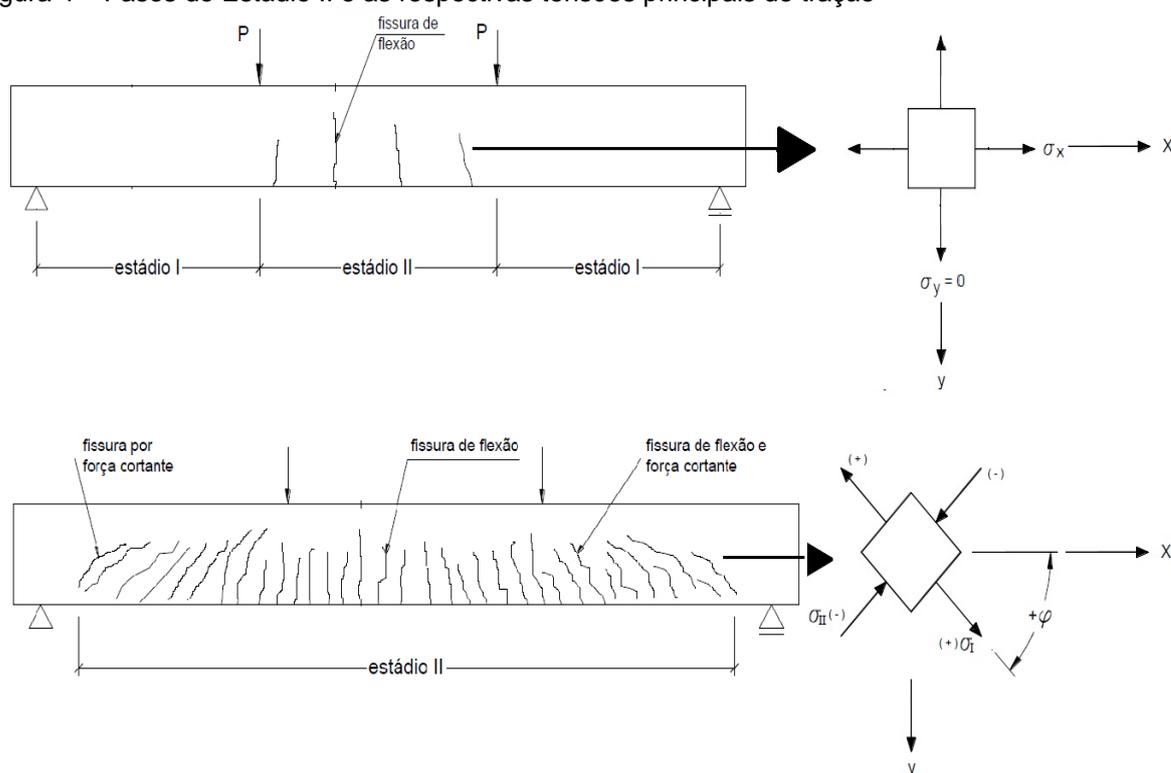
Figura 3 – Comportamento do concreto no Estádio II



Fonte: Adaptado de Pinheiro (2007).

O Estádio II tem duas fases, ilustradas na figura 4, com diferentes características, sendo a primeira caracterizada pela presença simultânea do Estádio I nas regiões próximas aos apoios e do Estádio II localizado na região central da viga com fissuras de flexão na seção transversal de forma verticalizada, já a segunda situação se descreve como Estádio II Puro onde toda a peça está em Estádio II, essa fase se diferencia da primeira pela atuação de um momento superior ao de fissuração provocando fissuras perpendiculares à viga no centro do vão e também fissuras de flexão com força cortante que surgem de forma inclinada nas regiões próximas aos apoios, onde a inclinação se explica pela influência que a força cortante produz nas trajetórias das tensões principais de tração ( $\sigma_1$ ) inclinando-as (BASTOS, 2015).

Figura 4 – Fases do Estádio II e as respectivas tensões principais de tração



Fonte: Adaptado de Bastos (2015).

Pelo que também afirma Pinheiro (2007) o Estádio II tem como função a verificação da peça no Estado Limite de Serviço (ELS) onde cita os Estados Limites de Abertura de Fissuras (ELS-W) e o de Deformações Excessivas (ELS-DEF), e esse estágio se finda com o início da plastificação do concreto.

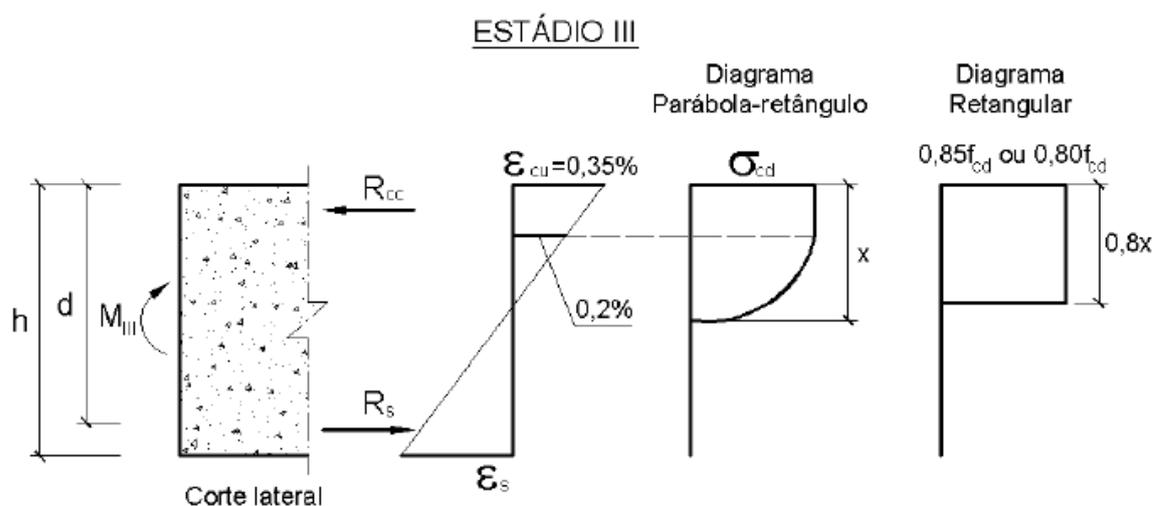
### 2.1.3 Estádio III

Para esse estágio, aumenta-se o momento fletor ( $M_{III}$ ) para um valor bem próximo ao de ruptura ( $M_U$ ) onde toda a zona comprimida está plastificada, e o concreto está em iminência da ruína (PINHEIRO, 2007). O mesmo autor nomeia o dimensionamento nesse estágio como sendo “cálculo na ruptura” ou “cálculo no Estádio III”. Adão e Hemerly (2010), com relação à caracterização do Estádio III, afirmam que nele a resistência à tração do concreto é levada além do limite forçando o aço a resistir às tensões de tração impostas.

Conforme se pode observar na figura 5, que exhibe o comportamento do concreto à flexão pura no Estádio III e os digramas de tensões e deformações, e com que afirmam Carvalho e Figueiredo Filho (2013) nesse estágio o diagrama de

tensões está com praticamente todas as fibras trabalhando no seu limite máximo, as deformações em quase todas as fissuras são de valores maiores que 2‰ e ocorre o escoamento do concreto a partir dessa mesma deformação chegando a atingir 3,5‰.

Figura 5 – Comportamento do concreto à flexão pura e os digramas de tensões e deformações



Fonte: Adaptado de Pinheiro (2007).

O Estádio III se caracteriza por ser o que a viga é dimensionada minorando as resistências e majorando as solicitações, Estado Limite-Último (ELU), e que segundo um diagrama parábola-retângulo a distribuição de tensões está ocorrendo no concreto. Também afirmam que a peça apresenta-se altamente fissurada e que a profundidade está diminuindo, conseqüentemente, a região do concreto comprimido, com as fissuras se aproximando da LN.

## 2.2 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO

Os PRFC são utilizados para reforçar lajes, pilares, vigas e paredes. Sua aplicação em estruturas de concreto possibilita a limitação de fissuras, reduz as deformações por flexão, além de aumentar a resistência da estrutura. O seu custo, comparado ao aço, é elevado, mas pode ser compensado pela economia gerada na aplicação simples, rápida e limpa do reforço (ARAÚJO, 2002).

## 2.2.1 Composição

O PRFC é um compósito formado por dois elementos que se complementam. Um destes componentes é a fibra de carbono que apresenta resistência à tração e módulo de elasticidade elevados, além disso, possui baixa densidade e comportamento frágil, ou seja, não tem um patamar de escoamento. O segundo elemento é a matriz, que tem por finalidade englobar as fibras de carbono, e que ao contrário desta, apresenta um comportamento dúctil (DIAS, 2001).

Ainda segundo o mesmo autor, a união das propriedades das fibras com a matriz proporciona ao compósito uma elevada rigidez, resistência à corrosão, baixo peso específico, possibilitando uma maior facilidade no transporte e manuseio durante sua aplicação, além de não ter restrições no comprimento do reforço, evitando assim emendas.

### 2.2.1.1 Fibra

As fibras de carbono são derivadas de processos térmicos em fibras precursoras orgânicas como o poliácridonitril (PAN), o alcatrão e as fibras *rayon*. Sua produção consiste na oxidação dessas fibras e posteriormente são submetidas a elevadas temperaturas (variando de 1000°C a 1500°C). Com isso, os átomos de carbono apresentam um alinhamento perfeito ao longo da sua fibra precursora, o que garante ao produto final uma elevada resistência mecânica (MACHADO, 2010).

De acordo com Araújo (2002) as fibras de carbono são as mais rígidas e resistentes dentre as fibras utilizadas para o reforço de polímeros, sendo que o tamanho, grau e disposição das fibras na matriz afetam diretamente nas propriedades do compósito.

### 2.2.1.2 Matriz

A matriz polimérica é responsável por unir e manter a disposição correta das fibras, além de servir como uma camada protetora contra a abrasão, umidade e ambientes agressivos. A escolha da resina que irá compor a matriz influenciará as suas propriedades térmicas, elétricas e químicas (BEBER, 2003).

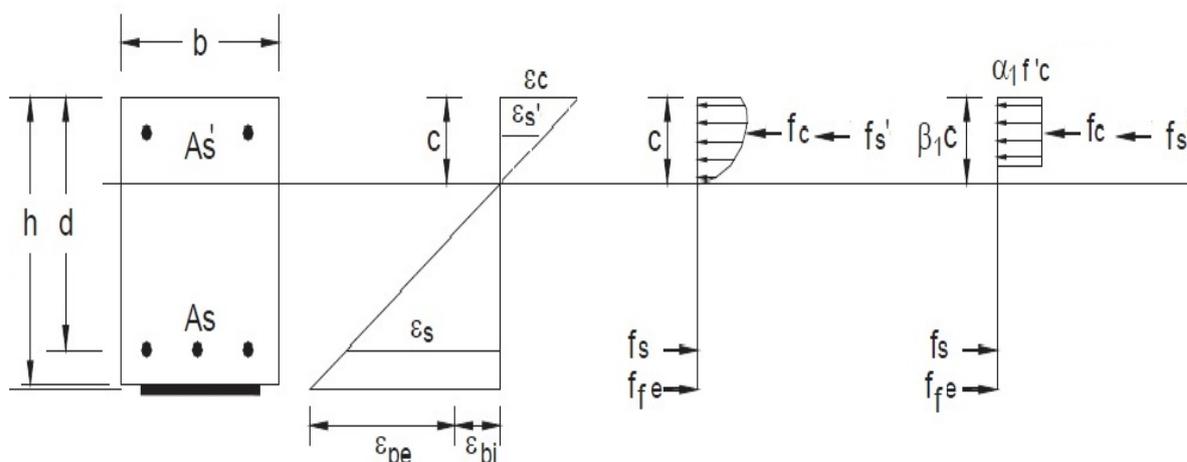
Segundo Machado (2010) a matriz é responsável por fazer a transferência de tensões do concreto para a fibra. Elas podem ser baseadas em resinas termoplásticas ou termoendurecíveis, sendo que as resinas mais utilizadas no reforço com PRFC são as termoendurecíveis da classe dos poliésteres, vinilésteres e dos epóxidos (ARAÚJO, 2002).

## 2.3 REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS COM PRFC

### 2.3.1 Recomendações da norma ACI 440-R (2008)

Segundo a ACI 440-R (2008), são consideradas as seguintes premissas para o cálculo que prevê o dimensionamento e o comportamento, mostrado na figura 6, de uma estrutura de concreto armado reforçada à flexão com PRFC:

Figura 6 – Comportamento de uma viga reforçada à flexão com PRFC



Fonte: Adaptado de Tataje (2011).

- Para o cálculo de projeto o mesmo se baseia nas dimensões, na disposição interna de aço, nas propriedades do material da peça que está sendo reforçada;
- As deformações do aço e do concreto são diretamente proporcionais à distância da LN. Isto é, a seção plana permanece nessa condição após o carregamento;
- Não existe deslizamento relativo na região entre o reforço e o concreto;
- Devido à camada adesiva ser de espessura fina e com pequenas variações considera-se desprezada a deformação por cisalhamento nessa camada;

- Considera-se um valor de 3‰ para a deformação máxima no concreto;
- A resistência à tração do concreto é desprezada; e
- O material do reforço tem comportamento linear-elástico até a ruptura.

Para o ELU da estrutura a ACI 440-R (2008) determina que seja satisfeita a verificação pela aplicação da Equação 1:

$$\phi M_n \geq M_u \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo:

$M_n$  - Momento resistente de cálculo, obtido a partir do equilíbrio de forças internas, da compatibilidade de deformações e do controle do modo de ruína;

$M_u$  - Momento solicitante de projeto, obtido pela envoltória das combinações de ações atuantes;

$\phi$  - Coeficiente de minoração para a contribuição da resistência à flexão do reforço com PRFC.

A utilização desse tipo de reforço à flexão em elementos de concreto armado provoca uma redução da ductilidade que a peça apresenta originalmente sendo necessário se precaver quanto a perda dessa característica dúctil do elemento aplicando o coeficiente de minoração do momento resistente de cálculo, estabelecido pela Equação 2, sendo igual a 0,90 para seções dúcteis e igual a 0,65 para seções frágeis onde o aço não rompe e também fornece um intervalo linear entre esses dois extremos.

$$\phi = \begin{cases} 0,90 \xrightarrow{se} \varepsilon_t \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25 \cdot (\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{0,005 - \varepsilon_{sy}} \xrightarrow{se} \varepsilon_{sy} \leq \varepsilon_t \leq 0,005 \\ 0,65 \xrightarrow{se} \varepsilon_t \leq \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo:

$\varepsilon_t$  - Deformação última do aço;

$\varepsilon_{sy}$  - Deformação de escoamento do aço.

A Equação 3 expressa a capacidade resistente ao momento fletor do elemento reforçado com PRFC:

$$M_n = A_s \cdot f_s \cdot \left( d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \cdot \left( h - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + A'_s \cdot f'_s \cdot \left( \frac{\beta_1 \cdot c}{2} - d' \right) \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo:

$A_s$  - Área de aço tracionada;

$f_s$  - Tensão última do aço tracionado;

$d$  - Altura útil da viga;

$\beta_1$  - Parâmetro do bloco de tensões no concreto podendo ser igual a 0,85;

$c$  - Altura da LN;

$\psi_f$  - Coeficiente de minoração da contribuição da resistência à flexão pelo reforço;

$A_f$  - Área da fibra;

$f_{fe}$  - Tensão última da fibra;

$h$  - Altura da viga;

$A'_s$  - Área de aço comprimida;

$f'_s$  - Tensão última do aço comprimido; e

$d'$  - Altura desde o eixo da armadura de compressão até a face superior.

A ACI 440-R (2008) define que para determinação de  $M_n$  deve-se encontrar primeiramente a altura da LN ( $c$ ), estabelecendo a compatibilidade das deformações e o equilíbrio das forças internas, sendo aplicada a Equação 4 para este fim:

$$c = \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fê}}{\alpha_1 \cdot f_c' \cdot \beta_1 \cdot b + A_s' \cdot f_s'} \quad (\text{Equação 4})$$

Sendo:

$\alpha_1$  - Parâmetro do bloco de tensões no concreto calculado pela Equação 5; e

$f_c'$  - Resistência à compressão do concreto.

Há quatro situações de ruptura distintas que podem ocorrer em peças de concreto armado:

- Ruptura devido ao escoamento do aço antes do concreto sofrer esmagamento;
- Ruptura pelo escoamento do aço antes que rompa;
- Ruptura por esmagamento do concreto antes da ruptura por escoamento do aço; e
- Ruptura do sistema compósito CFC antes da ruptura por escoamento do aço.

Sendo que as duas primeiras caracterizam, de forma aceitável, um comportamento da estrutura como dúctil, e as situações 3 e 4 caracterizam um comportamento frágil da estrutura, sendo menos desejável que a ductilidade.

Segundo a ACI 440-R (2008), os parâmetros  $\alpha_1$  e  $\beta_1$  são adotados quando o concreto sofrer ruptura por esmagamento do concreto do bloco de tensões, o primeiro parâmetro calcula-se aplicando a Equação 5, já o segundo pode ser utilizado para concretos com resistência até 28 MPa (4.000 psi) um valor igual a 0,85 e para resistências superiores  $\beta_1$  deve ser diminuído de forma constante 0,05 para cada 7 MPa de acréscimo na resistência, mas o valor do primeiro parâmetro é calculado aplicando a Equação 5:

$$\alpha_1 = \frac{3 \cdot \varepsilon_c' \cdot \varepsilon_c - \varepsilon_c'^2}{3 \cdot \beta_1 \cdot \varepsilon_c'} \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo:

$\varepsilon'_c$  - Deformação última do aço comprimido;

$\varepsilon_c$  - Deformação última do aço tracionado;

A deformação última do aço comprimido é definido na aplicação da Equação 6:

$$\varepsilon'_c = \frac{1,7 \cdot f'_c}{E_c} \quad (\text{Equação 6})$$

$E_c$  - Módulo de elasticidade do concreto.

De acordo com a ACI 440-R (2008), quando os esforços aplicados não forem absorvidos pelo concreto e esses ocorrerem nas fibras, pode ocorrer tanto a delaminação do concreto do cobrimento quanto o descolamento do sistema de reforço. Como prevenção do descolamento das fibras de carbono para essas situações dever ser incluída no nível de deformação do sistema de reforço uma limitação, determinando o coeficiente  $k_m$ , pela Equação 7:

$$k_m = \begin{cases} \frac{1}{60 \cdot \varepsilon_{cu}} \cdot \left( 1 - \frac{n \cdot E_{fc} \cdot t_{fc}}{360000} \right) \leq 0,90 \xrightarrow{\text{para}} n \cdot E_{fc} \cdot t_{fc} \leq 180000 \\ \frac{1}{60 \cdot \varepsilon_{cu}} \cdot \left( 1 - \frac{90000}{n \cdot E_{fc} \cdot t_{fc}} \right) \leq 0,90 \xrightarrow{\text{para}} n \cdot E_{fc} \cdot t_{fc} \leq 180000 \end{cases} \quad (\text{Equação 7})$$

Sendo:

$\varepsilon_{cu}$  - Deformação de ruptura do reforço;

$n$  - Número de camadas do reforço;

$E_{fc}$  - Módulo de elasticidade do reforço; e

$t_{fc}$  - Espessura da camada do reforço.

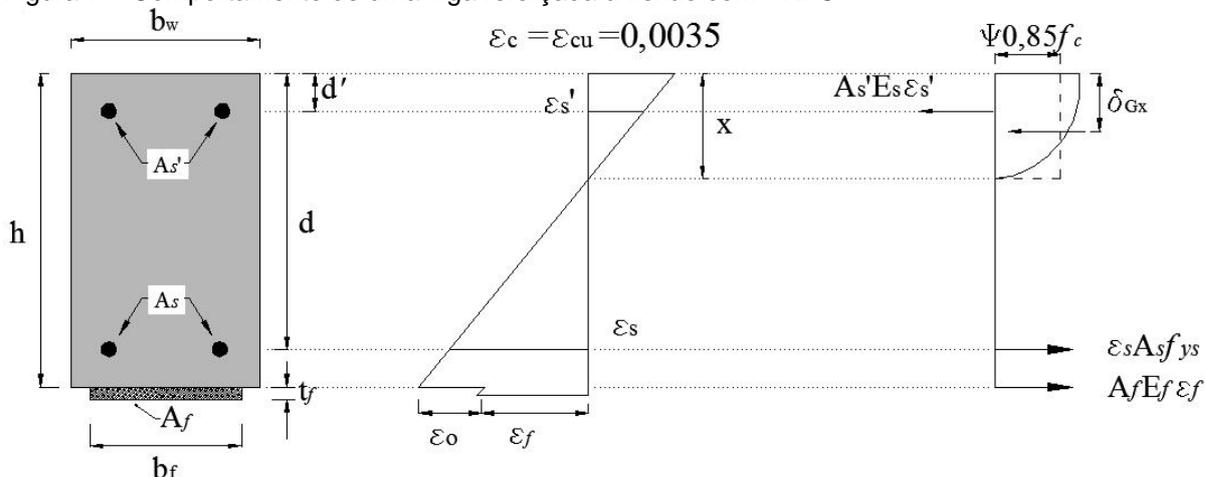
A ACI 440-R (2008) afirma que o coeficiente  $k_m$ , definido acima, tem valor menor ou igual a 0,90 e deverá ser multiplicado pela deformação de ruptura do sistema de reforço para que se defina a limitação da deformação prevenindo o descolamento. Essa expressão reconhece como mais suscetíveis à delaminação os laminados cujas espessuras são maiores.

### 2.3.2 Recomendações da FIB BULLETIN 14 (2001)

Para o dimensionamento de vigas reforçadas com PRFC à flexão, a FIB BULLETIN 14 (2001) desconsidera qualquer perda das características mecânicas do PRFC devido à ruptura prematura da viga, ou seja, não atinge a deformação de projeto, ao se aplicar a equação 10, que ocorre por meio dos modos de ruptura. Nas estruturas de concreto armado reforçadas à flexão os modos de ruptura ocorrem pelo escoamento da armadura de tração antes do esmagamento do concreto ou quando o PRFC rompe depois que a armadura tracionada escoou, sendo o segundo modo de ruptura mais desejável.

As vigas de concreto armado reforçadas com PRFC devem ser dimensionadas no Estado Limite Último, a figura 7 demonstra o comportamento de uma viga reforçada a flexão, sendo que o modo de ruína mais indicado é devido à ruptura por escoamento da armadura tracionada seguido do esmagamento do concreto ou pelo escoamento da armadura tracionada seguido da ruptura do reforço.

Figura 7 – Comportamento de uma viga reforçada à flexão com PRFC



Fonte: Barros, Costa e Filho (2014).

O primeiro modo de ruptura, escoamento do aço seguido do esmagamento do concreto, se determina primeiramente pela aplicação da Equação 8 para se obter a altura da LN:

$$0,85 \cdot \psi \cdot f_c \cdot b \cdot x + A_s' \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} = A_s \cdot f_{ys} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_f \quad (\text{Equação 8})$$

Sendo:

$\psi$  - Coeficiente de área do bloco de tensões do concreto = 0,8;

$f_c$  - Resistência à compressão do concreto;

$b_w$  - Largura da viga;

$x$  - Altura da LN;

$A_s'$  - Área de aço comprimida;

$E_s$  - Módulo de elasticidade do aço;

$\varepsilon_{s2}$  - Deformação do aço na compressão;

$A_s$  - Área de aço tracionada;

$f_{ys}$  - Resistência à compressão do concreto;

$A_f$  - Área de aço comprimida;

$E_{fu}$  - Módulo de elasticidade do aço;

$\varepsilon_f$  - Deformação do PRFC;

$h$  - Altura útil da viga.

A deformação do aço na compressão é calculada ao se aplicar a Equação 9:

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_{cu} \cdot \left( \frac{x - d'}{x} \right) \quad (\text{Equação 9})$$

Sendo:

$\varepsilon_{cu}$  - Deformação última do concreto;

$d'$  - Distância do centróide da amadura comprimida e a face superior da viga.

E a deformação do PRFC é calculada ao se aplicar a Equação 10:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \left( \frac{h - x}{x} \right) - \varepsilon_0 \quad (\text{Equação 10})$$

Sendo o momento resistente de projeto definido pela aplicação da Equação 11:

$$M_n = A_s \cdot f_{ys} (d - \delta_G \cdot c) + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \cdot (h - \delta_G \cdot x) + A_s' \cdot E_s \cdot (\delta_G \cdot x - d') \quad (\text{Equação 11})$$

Sendo:

$d$  - Altura útil da viga;

$\delta_G$  - Coeficiente de centróide do bloco de tensões do concreto = 0,4;

$E_f$  - Módulo de elasticidade do PRFC;

$\varepsilon_f$  - Deformação do aço na compressão, calculada pela Equação 9.

As equações dadas acima serão validadas checando o escoamento da armadura e a deformação do PRFC deverá ser limitada pela deformação última ( $\varepsilon_{fu}$ ).

Prossegue-se verificando o modo de ruptura descrito como escoamento do aço seguido da ruptura do PRFC, aplicando-se as Equações 8 e 11 trocando  $\varepsilon_{cu}$  por  $\varepsilon_c$  e  $\varepsilon_f$  por  $\varepsilon_{fu}$  juntamente com a aplicação das Equações 12 e 13 que definem os termos  $\psi$  e  $\delta_G$ , respectivamente:

$$\psi = \begin{cases} \varepsilon_c \cdot \left( 0,5 - \frac{1000}{12} \cdot \varepsilon_c \right) \rightarrow \varepsilon_c \leq 0,002 \\ 1 - \left( \frac{2}{3000 \cdot \varepsilon_c} \right) \rightarrow 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad \text{(Equação 12)}$$

$$\delta_G = \begin{cases} \left( \frac{8 - 1000 \cdot \varepsilon_c}{4 \cdot (6 - 1000 \cdot \varepsilon_c)} \right) \rightarrow \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \left( \frac{1000 \cdot \varepsilon_c \cdot (3000 \cdot \varepsilon_c - 4) + 2}{2000 \cdot \varepsilon_c \cdot (3000 \cdot \varepsilon_c - 2)} \right) \rightarrow 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad \text{(Equação 13)}$$

Sendo:

$\varepsilon_c$  - Deformação do concreto;

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GERAL**

Verificar a contribuição que o polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) dá ao desempenho estrutural de vigas submetidas à flexão e as formulações matemáticas existentes para o seu uso em vigas de concreto armado.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar e verificar a taxa de incremento de resistência à flexão utilizando o polímero reforçado com fibra de carbono em vigas de concreto armado;
- Avaliar de forma analítica a confiabilidade das prescrições normativas estabelecidas nas normas ACI 440-R (2008) e a FIB BULLETIN 14 (2001), e;
- Propor adequações matemáticas nas prescrições normativas a fim de melhorar a confiabilidade no uso dessa técnica de reforço em vigas à flexão.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os resultados de cálculo da resistência á flexão de vigas reforçadas são analisados comparativamente com os dados obtidos em ensaios com a ruptura da mesma, de acordo com os parâmetros das normas ACI 440-R (2008) e FIB BULLETIN 14 (2001). Nesta seção será apresentada a metodologia para a coleta de dados, o método de cálculo e análise dos resultados.

### 4.1 METODOLOGIA DE COLETA DOS ELEMENTOS DO BANCO DE DADOS

Para formar um banco de dados com os resultados de ensaios de vigas reforçadas com Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC) sob esforços de flexão, optou-se por fazer uma revisão bibliográfica entre os diversos autores com pesquisa nessa área.

A metodologia utilizada na seleção dos elementos foi com base em vigas retangulares subarmadas, com o reforço executado na superfície inferior (parte tracionada) da estrutura, que as vigas estivessem biapoiadas durante o ensaio e que o carregamento fosse aplicado posteriormente à execução do reforço.

### 4.2 METODOLOGIA DE CÁLCULO

Os elementos estruturais reforçados a flexão são dimensionados no Estado Limite Último (ELU), a fim de calcular a capacidade resistente da seção pela compatibilização das tensões, pela combinação das condições de equilíbrio das deformações e pelo comportamento reológico do concreto e dos demais materiais que constituem o compósito no momento da ruptura.

Segundo o ACI 440-R (2008) a quatro maneiras diferentes de ocasionar a ruptura dos sistemas de concreto armado: a ruptura por escoamento do aço antes do esmagamento do concreto, ruptura por escoamento do aço antes da ruptura do reforço, ruptura por esmagamento do concreto antes da ruptura por escoamento do aço e a ruptura do sistema compósito PRFC antes da ruptura por escoamento do aço. A primeira e a segunda condição são os modos de ruína mais indicados pelo ACI 440-R (2008), e também são os tipos de ruptura considerados pela FIB BULLETIN 14 (2001).

### 4.3 METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para averiguar a confiabilidade do dimensionamento de vigas reforçadas com PRFC sob esforços de flexão proposto pelas normas mencionadas nas prescrições normativas, serão analisados os resultados experimentais e os parâmetros das normas medindo a razão entre os momentos de ruptura e os momentos resistentes,  $M_{uexp}/M_{uteo}$ , respectivamente.

O momento  $M_{uexp}$  é caracterizado como o esforço de ruptura à flexão medida em ensaios laboratoriais, enquanto o momento resistente  $M_{uteo}$  é determinada no Estado Limite Último, segundo os critérios estabelecidos pelas normas.

Serão adotados fatores estatísticos como: a média,  $M$ , a mediana,  $M_d$ , o desvio padrão,  $DP$ , e o coeficiente de variação,  $CV$ , para realizar a comparação analítica dos esforços de flexão definidos pelas normas: ACI 440-R (2008) e FIB BULLETIN 14 (2001). Sendo que, a média confere a linha conservativa da equação e o coeficiente de variação é utilizado como indicador de precisão dos resultados.

No estudo comparativo entre as equações normativas de dimensionamento de vigas de concreto armado submetidas a esforços de flexão, será aplicado o método de COLLINS (2001), onde é considerada a classificação dos diferentes critérios normativos de acordo com a segurança, economia e precisão no dimensionamento da estrutura.

#### 4.3.1 Metodologia de Collins (2001)

A assimetria na distribuição dos resultados gerados pela razão das resistências  $M_{uexp}/M_{ucalc}$  de acordo com cada norma, dificulta a análise dos dados, sendo assim será aplicado o método de COLLINS (2001) que transforma essa distribuição assimétrica em simétrica. Através desta técnica, é possível comparar os diferentes tipos de dimensionamento normativos e classificá-los segundo uma linha graduada de demérito, verificando o coeficiente de variação dos dados superiores e inferiores da mediana.

A classificação dos diferentes tipos de processos de dimensionamento, segundo a escala de demérito, considera aspectos de segurança, economia e precisão. Conforme a escala da Tabela 1, é atribuído um escore para cada faixa da relação  $M_{uexp}/M_{ucalc}$ , admitindo os valores menores que 0,5 extremamente perigosos

em relação à segurança e valores maiores que 2,0 muito conservadores e antieconômicos. O valor do demérito de cada processo é obtido através do somatório dos resultados entre as porcentagens dos valores de  $M_{uexp}/M_{ucalc}$  presente em cada intervalo e segundo seu escore. Quanto maior for o valor do somatório, pior será a classificação do procedimento.

Tabela 1: Escala de Demérito

$M_{uexp}/M_{ucalc}$	Escore	Classificação
< 0,50	10	Extremamente Perigosa
0,50 ----0,65	5	Perigosa
0,65 ----0,85	2	Baixa Segurança
0,85 ----1,30	0	Segurança Adequada
1,30 ----2,00	1	Conservativa
2	2	Extremamente Conservativa

Fonte: Adaptado de Collins (2001).

## 5. ORÇAMENTO

QUADRO 1: Orçamento do Projeto

<b>GASTOS COM RECURSOS MATERIAIS</b>			
<b>Item</b>	<b>Quantidade (unid.)</b>	<b>Valor Unitário (R\$)</b>	<b>Valor Total (R\$)</b>
Impressão	120	1,00	120,00
Resma de Papel A4	1	20,00	20,00
Encadernação	3	2,50	7,50
Notebook	1	1100,00	1.100,00
Transporte	32	5,00	160,00
<b>Total</b>			<b>1.415,50</b>



## **7. RESULTADOS ESPERADOS**

De acordo com o que foi exposto nessa pesquisa, espera-se verificar a confiabilidade do dimensionamento em vigas de concreto armado reforçadas com PRFC, oriundo das normas técnicas: ACI 440-R (2008) e FIB BULLETIN 14 (2001). Caso os resultados forem insatisfatórios serão propostas adequações que visem à melhoria das formulações nas prescrições normativas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 318. **Building Code Requirements for Structural Concrete**. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2014.

ACI, 2008, **Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI 440.2R-08**, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

ADÃO, F. X. **Concreto Armado: Novo Milênio: Cálculo Prático e Econômico**. 2.ed., Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2010.

ARAÚJO, C. M. **Reforço à Flexão e ao Cisalhamento de Vigas de Concreto com Tecidos de fibra de Carbono**. Tese de mestrado- Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro 2002, pg. 4-8.

ARAÚJO, J. N. **Curso de Concreto Armado – Volume 1**. 3.ed., Editora DUNAS, 2010.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS NBR 6118 (2014). **Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro.

BARROS, R. N.; COSTA H.D. e FILHO, M.J.M.P. **Avaliação de Diferentes Técnicas de Reforço à Flexão de Vigas de Concreto Armado**. Instituto Brasileiro do Concreto – 56º Congresso Brasileiro, Natal, Rio Grande do Norte, 2014, pg. 3-6.

BARBOSA, M.D. de A.. **Análise De Flechas Em Vigas De Concreto Armado**. Universidade Federal do Ceará, 2010, pg. 11.

BASTOS, P. S. dos S. **Dimensionamento De Vigas De Concreto Armado À Força Cortante**. Universidade Estadual Paulista, 2015, pg. 1 – 5.

BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com compósitos de fibra de carbono**. Tese de doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003, pg. 21 – 22.

CARVALHO, R. C. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado: Segundo a NBR 6118:2014**. 4.ed. Editora EdUFSCar, São Carlos, 2013.

COLLINS, M, P. **Evaluation of shear design procedures for concrete structures.** A Report Prepared for the CSA technical committee on reinforced concrete design, 2001.

DIAS, S. J. E. **Verificação Experimental do Reforço com CFRP de Estruturas de Betão á Flexão.** Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Porto, 2001, pg. 32 – 36.

EN 1992-1-1/AC (2010). **Corrigendum AC – EUROCODE 2: Design of Concrete Structures—Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings.** CEN, EN 1992-1-1, Brussels, Belgium.

Fédération Internationale du Béton. **Externally bonded FRP reinforcement for RC structures.** fib Bulletin 14, Lausanne, Switzerland, July, 2001.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. **Construções de concreto – Princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado, v. 1.** Rio de Janeiro, Ed. Interciência, 1982, 305p.

MACHADO, A. de P. **Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com fibras de Carbono.** ISO 9001 Viapol, 2010, pg. 6 – 8.

PINHEIRO L. M. **Fundamentos de Concreto e Projeto de Edifícios.** Universidade Estadual de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2007, pg. 50 – 53.

SILVA, R. C. **Vigas de concreto armado com telas soldadas: análise teórica e experimental da resistência à força cortante e do controle da fissuração.** Tese (Doutorado), São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, Departamento de Engenharia de Estruturas, 2003, pg. 80.

**ANEXOS**