

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**MICHAEL MOURA**

**REFORÇO ESTRUTURAL EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

**Alegrete – RS  
2013**

**MICHAEL MOURA**

**REFORÇO ESTRUTURAL EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA, Campus Alegrete, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. André Lubeck

Co-orientador: Prof. EderliMarangon

**Alegrete – RS**

**2013**

**MICHAEL MOURA**

**REFORÇO ESTRUTURAL EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa - Unipampa, Campus Alegrete, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 27 de setembro de 2013

Banca examinadora:

---

Prof. Ms. André Lubeck  
Orientador  
Unipampa

---

Prof. Dr. Ederli Marangon  
Unipampa

---

Prof. Dr. Telmo Deifeld  
Unipampa

---

Ms. Alisson Milani  
Unipampa

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço aos meus pais Rui e Rosa Maria pela educação e apoio sempre.

A minha noiva Thaís pela paciência, apoio e motivação.

Aos mestres pela dedicação, paciência e conhecimento que me fizeram progredir no curso.

Aos meus colegas e amigos da UNIPAMPA, que sempre me acompanharam nos momentos difíceis e nos momentos de alegria.

Ao meu orientador Professor André Lubeck pelos conhecimentos e apoio na área deste trabalho.

“Só pode permanecer na frente aquele que está em constante movimento, fazendo de sua vida uma aprendizagem constante, sem se preocupar com os obstáculos superados, mas focado nos obstáculos que ainda estão por vir.” Luís Alves.

## RESUMO

O elevado crescimento de obras da construção civil, sem o devido acompanhamento na melhoria das técnicas construtivas, no aprimoramento dos projetos estruturais e a falta de manutenção, tem resultado em edificações que sofrem com deterioração precoce, falhas estruturais e acidentes. No entanto, o fato de uma estrutura, em determinado momento, apresentar desempenho insatisfatório, não significa que ela tenha chegado ao fim de sua vida útil. Em alguns casos a estrutura pode voltar a apresentar bom desempenho, desde que seja realizado algum tipo de correção ou reforço estrutural. O emprego dos diferentes tipos de reforços estruturais permite que estruturas que estejam comprometidas possam ser recuperadas ou estruturas inicialmente idealizadas para determinados fins possam ser adaptadas e usadas com outras finalidades. O presente trabalho tem como objetivo apresentar alternativas de reforços estruturais empregados para elementos fletidos e comprimidos. São apresentadas as técnicas de reforço de elementos fletidos através da aplicação de Polímero Reforçado com Fibra de Carbono e Chapa de Aço Colada. Além de elementos comprimidos reforçados com Encamisamento de Concreto Armado (aumento da seção transversal). As técnicas são apresentadas por meio de procedimentos de cálculo, com as devidas aplicações por intermédio de exemplos de dimensionamento com base nos conceitos do estado limite último. A descrição dos procedimentos de cálculo permite o entendimento do passo a passo para o projeto destes tipos de reforço.

Palavras-chave:Reforço estrutural; chapa de aço colada; fibra de carbono; aumento da seção transversal de elementos de concreto.

## **ABSTRACT**

The high growth of the construction works, without proper monitoring in improving construction techniques in the improvement of structural designs and lack of maintenance has resulted in buildings that suffer from early deterioration, structural failure and accidents. However, the fact that a structure at any given time, is performing poorly, does not mean it has reached the end of its useful life. In some cases the structure can again perform well, provided it is done some kind of fix or structural reinforcement. The use of different types of structural reinforcements allows structures that are compromised can be retrieved or structures initially devised for specific purposes can be adapted and used for other purposes. This paper aims to present alternatives to structural reinforcements employed elements flexed and tablets. We present the techniques of reinforcement elements bent by applying Polymer Reinforced with Carbon Fiber and Steel Plate Glued. Besides elements compressed reinforced Concrete jacketing (increase cross section) techniques are presented by means of calculation procedures, with appropriate applications through examples sizing based on the concepts of limit state. The description of the calculation procedures enables the understanding of the walkthrough for the design of these types of reinforcement.

Keywords: Structural reinforcement, steel sheet bonded, carbon fiber, increasing the cross section of concrete elements.

## LISTA DE FIGURAS

<u>Figura 1 – Materiais componentes do sistema do polímero reforçado com fibra de carbono</u> .....	19
<u>Figura 2 – Reforço à flexão com o uso de fibra de carbono em viga de concreto armado</u> .....	21
<u>Figura 3 – Reforço à flexão com o uso de fibra de carbono e proteção externa em laje de concreto armado</u> .....	22
<u>Figura 4 – Sistema de aplicação de fibra de carbono como reforço estrutural</u> .....	23
<u>Figura 5 – Comprimento do transpasse necessário da fibra de carbono quando aderido em uma peça de concreto armado</u> .....	26
<u>Figura 6 – Aplicação de chapa metálica</u> .....	27
<u>Figura 7 – Reforço de laje em concreto armado com o uso de chapa metálica colada</u> .....	28
<u>Figura 8 – Execução de injeção de resina epóxi nas fissuras</u> .....	30
<u>Figura 9 – Substrato de concreto selado</u> .....	30
<u>Figura 10 – Reforço por adição de chapas metálicas</u> .....	31
<u>Figura 11 – Reforço por adição de chapas metálicas</u> .....	32
<u>Figura 12 – Reforço do pilar original envolvido por concreto armado em todas suas faces</u> .....	34
<u>Figura 13 – Reforço por encamisamento de concreto</u> .....	36
<u>Figura 14 – As seções planas permanecem planas após a ocorrência dos carregamentos e as deformações são linearmente proporcionais a sua distância a linha neutra</u> .....	41
<u>Figura 15 – Diagrama esquemático de equilíbrio de seção transversal reforçada</u> ...	42
<u>Figura 16 – Domínios de deformação no estado limite último em uma função transversal</u> .....	44
<u>Figura 17 – Diagrama tensão deformação do aço</u> .....	45
<u>Figura 18 – Diagrama tensão deformação do concreto</u> .....	45
<u>Figura 19 – Domínio 2</u> .....	46
<u>Figura 20 – Domínio 3</u> .....	47



<u>Figura 21 – Domínio 4</u> .....	47
<u>Figura 22 – Diagrama de tensões no concreto no estado limite último</u> .....	48
<u>Figura 23 – Programa para cálculo do equilíbrio de seções de concreto armado</u> .....	54
<u>Figura 24 – Programa para dimensionamento de seções de concreto armado</u> .....	55
<u>Figura 25 – Resultados do programa por meio da superfície de interação</u> .....	56
<u>Figura 26 – Viga de concreto armado</u> .....	57
<u>Figura 27 – Aplicação da fibra de carbono por camadas</u> .....	65
<u>Figura 28 – Seção de concreto avaliada</u> .....	69
<u>Figura 29 – Máximo esforço que a seção original do pilar de concreto armado pode suportar- 175 kN</u> .....	70
<u>Figura 30 – Seção original do pilar de concreto armado – esforço de 200 kN</u> .....	70
<u>Figura 31 – Seção de reforço a ser implantada no pilar original</u> .....	71
<u>Figura 32 – Seção de reforço implantada na seção original do pilar de concreto armado</u> .....	72
<u>Figura 33 – Dados de entrada do programa</u> .....	73
<u>Figura 34 – Seção de concreto avaliada</u> .....	75
<u>Figura 35 – Seção de reforço a ser implantado no pilar original</u> .....	76
<u>Figura 36 – Seção de reforço implantada na seção original do pilar de concreto armado</u> .....	77
<u>Figura 37 – Dados de entrada do programa</u> .....	78

## LISTA DE TABELAS

<u>Tabela 1 – Valores dos coeficientes <math>\gamma_c</math> e <math>\gamma_s</math>.....</u>	39
---	----

## LISTA DE QUADROS

<u>Quadro 1 – Valores dos coeficientes de ponderação das resistências <math>\gamma_m</math></u> .....	66
---	----

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1	Contextualização do problema de pesquisa .....	14
1.2	Justificativa .....	15
1.2.1	Objetivos .....	15
1.2.1.1	Objetivo geral .....	15
1.2.1.2	Objetivos específicos.....	16
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....</b>	<b>18</b>
3.1	Reforço de estruturas com uso de Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (PRFC) .....	18
3.1.1	Materiais compósitos de PRFC .....	18
3.1.2	Agentes naturais sobre PRFC.....	20
3.1.3	Aplicação de PRFC .....	21
3.1.4	Ligação das interfaces.....	24
3.1.5	Vantagens e desvantagens do reforço de estrutura de concreto armado com o uso da fibra de carbono .....	24
3.1.6	Comprimento mínimo para transpasse da fibra de carbono.....	25
3.2	Reforço de estruturas de concreto por meio de chapas de aço coladas...26	
3.2.1	Chapa de aço colada.....	26
3.2.2	Agentes naturais sobre chapa de aço colada.....	28
3.2.3	Aplicação do material .....	29
3.2.4	Considerações para dimensionamento à flexão.....	32
3.3	Reforço de estruturas de concreto (pilares) por meio de encamisamento de concreto ou aumento da seção transversal.....	33
3.3.1	Encamisamento de concreto ou aumento da seção transversal .....	33

3.3.2	Vantagens e desvantagens do reforço de estrutura por meio de encamisamento de concreto .....	36
3.4	Dimensionamento de estrutura .....	37
3.4.1	Dimensionamento em estado limite último .....	38
3.4.2	Esforços atuantes e resistentes .....	38
3.4.3	Coeficientes de ponderação das resistências .....	39
3.5	Reforço de estrutura (fibra de carbono/chapa de aço) .....	40
3.6	Dimensionamento de estrutura com aumento de seção transversal (encamisamento de concreto) .....	53
3.6.1	Dimensionamento e verificação da estrutura de concreto .....	53
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>57</b>
4.1	Exercício de dimensionamento à flexão .....	57
4.2	Solução (reforço com fibra de carbono) .....	58
4.2.1	Dimensionamento da viga no seu estado original .....	58
4.2.2	Deformações iniciais .....	59
4.2.3	Dimensionamento do reforço .....	61
4.2.4	Característica da fibra de carbono .....	63
4.3	Solução (reforço com chapa de aço colada) .....	65
4.4	Exercício de dimensionamento à compressão .....	67
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>79</b>
5.1	Conclusão .....	79
5.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	80
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>81</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização do problema de pesquisa

O elevado crescimento de obras da construção civil, sem o devido acompanhamento na melhoria das técnicas construtivas, no aprimoramento dos projetos estruturais e uso correto dos planos de manutenção, tem resultado em edificações que sofrem com deterioração precoce, falhas estruturais e acidentes.

Entre as possíveis causas de deterioração que podem ocorrer cita-se o envelhecimento natural da estrutura, a falta de manutenção, os erros de dimensionamento e emprego dos materiais, os erros de projeto, a má qualidade da mão de obra, entre outros. Diante disto, o estudo das origens, formas de manifestação, mecanismos de ocorrência das falhas e dos sistemas de degradação das estruturas, e de suas consequências, permitem ao engenheiro avançar no conhecimento dos materiais e estruturas.

Assim, deve-se considerar o desempenho esperado para a obra, analisando o nível de agressividade em que a construção será submetida, a combinação dos carregamentos possíveis na estrutura, lembrando que os materiais envelhecem e necessitam de manutenção ao longo de sua vida útil.

Além disso, as estruturas podem se deteriorar, sendo, talvez, irreversível, mesmo existindo manutenção. O ponto em que cada estrutura atinge níveis de desempenho insatisfatórios, em função da deterioração, varia de acordo com o tipo e uso da estrutura. Algumas estruturas, por falhas de projeto ou de execução, iniciam as suas vidas de forma insatisfatória, enquanto outras chegam ao final de suas vidas úteis de projeto ainda mostrando um bom desempenho.

O fato de uma estrutura, em determinado momento, apresentar desempenho insatisfatório, não significa que ela tenha chegado ao fim de sua vida útil. Em alguns casos a estrutura pode voltar a apresentar bom desempenho, desde que seja realizado algum tipo de correção ou reforço estrutural.

Segundo Souza e Ripper (1998), os motivos pelos quais são necessários trabalhos de reforço em uma estrutura de concreto em um ou mais de seus elementos estruturais são os seguintes: correção de falhas de projeto ou de execução; aumento da capacidade portante da estrutura, para permitir modificações

em seu uso; regeneração da capacidade portante, diminuída em virtude de acidentes (choques, incêndios, entre outros), de desgaste ou deterioração e modificação da concepção estrutural, como o corte ou perfurações de uma viga, por exemplo, por necessidade arquitetônica, elétrica, hidráulica ou alguma outra utilização.

Em função dessas situações, cita-se a necessidade de estudar diferentes tipos de reforço, destacando-se o uso de fibras de carbono coladas, chapas de aço coladas e encamisamento de concreto para reabilitação de estruturas de concreto. Assim, cresce cada vez mais a realização de pesquisas, com o intuito de aprimorar o conhecimento sobre a formulação e o domínio da técnica para o emprego de reforços em estruturas de concreto armado.

## **1.2 Justificativa**

O emprego dos diferentes tipos de reforços estruturais permite que estruturas que estejam comprometidas possam ser recuperadas ou estruturas inicialmente idealizadas para determinados fins possam ser reforçadas (adaptadas) e usadas com outras finalidades (por exemplo: sala de aula, com sua estrutura reforçada para a utilização como biblioteca).

Desta forma, abordar os tipos de reforços estruturais mais empregados se justifica em função de não ser comum ao longo da formação tradicional dos engenheiros o seu estudo, além da dificuldade de encontrar bibliografias que agrupem de maneira prática este tema.

### **1.2.1 Objetivos**

#### **1.2.1.1 Objetivo geral**

Apresentar os tipos de reforços estruturais mais empregados em estruturas de concreto armado, por meio de procedimentos de cálculo e de exemplos, com as devidas aplicações representadas de acordo com as normas técnicas pertinentes a este tipo de estrutura.

### **1.2.1.2 Objetivos específicos**

- a) Analisar os tipos mais comuns de reforços estruturais em estruturas de concreto armado;
- b) Apresentar exemplos de emprego da fibra de carbono, chapa de aço colado como reforço em peças fletidas e encamisamento de concreto em peças comprimidas;
- c) Demonstrar os procedimentos de cálculo mais comuns para cada tipo de reforço de estrutura de concreto armado, apresentando exemplos de dimensionamento com seus respectivos métodos.



## 2 METODOLOGIA

O tipo de reforço a ser aplicado dependerá de uma análise detalhada das causas que o tornaram necessário e de um estudo dos efeitos produzidos. Verificadas essas situações, podem-se aplicar reforços de fibra de carbono e chapa de aço colado para elementos fletidos e encamisamento de concreto para elementos comprimidos. Eventualmente podem-se utilizar reforços para combater esforços de cisalhamento, mas estes não serão aqui descritos. Da mesma forma, pode-se usar fibra de carbono e chapas coladas para combater os esforços secundários de flexão em elementos comprimidos, mas estes também não serão aqui abordados.

Em função disso, serão descritos os métodos de aplicação dos elementos para cada tipo de reforço, com o procedimento de aplicação, equacionamento usado para o dimensionamento à flexão dos reforços com fibra de carbono e chapa de aço e o dimensionamento à compressão dos reforços por encamisamento de concreto.

Devem-se também analisar critérios de dimensionamento para os reforços de estruturas com base nos conceitos do estado limite último (ELU) e seus respectivos domínios.

Além disso, será apresentado um roteiro de cálculo em cada método de aplicação determinado e desenvolvido exemplos de cálculos para os reforços de estrutura de concreto armado, visando aumentar a resistência para elementos fletidos (vigas), elementos comprimidos (pilares) e seus possíveis estados de tensão e deformação da estrutura.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

A qualidade dos serviços de recuperação de estruturas de concreto depende da avaliação de um profissional da área justificando a necessidade de um estudo detalhado para cada caso. Sob essa ótica pode-se definir os tipos de materiais, equipamentos e técnicas adequadas para a execução de cada serviço.

Os serviços de reforço requerem sempre a prévia elaboração de trabalhos de cálculo estrutural, sejam estes derivados de necessidade de alteração na funcionalidade da estrutura, por exemplo, aumento da carga de utilização, ou como consequência de dano sofrido pela mesma, casos em que o reforço estará inserido nos trabalhos de recuperação (SOUZA; RIPPER, 1998).

Deve-se observar também que muitos usuários que contratam serviços de recuperação estrutural acham desnecessário o cálculo da estrutura, esquecendo que só a partir do mesmo pode-se definir ou proceder a um reforço (SOUZA; RIPPER, 1998).

Cada tipo de reforço segue um conjunto de normas para projeto, onde as mesmas orientam no dimensionamento e serão apresentados ao longo da revisão.

#### **3.1 Reforço de estruturas com o uso de Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (PRFC)**

##### **3.1.1 Materiais compósitos de PRFC**

O uso de materiais compósitos já vinha sendo utilizado em grande escala na indústria naval, aeroespacial e automobilística, com grande sucesso, o que promoveu a ideia de se adaptar na construção civil, sendo usado na década passada no Japão para reforço de estruturas do sistema viário, devido a abalos sísmicos (SOUZA; RIPPER, 1998).

Entretanto, sua introdução na construção civil foi obtida mais lentamente na fase inicial devido a poucos conhecimentos técnicos com relação ao uso do material compósito em estruturas de concreto armado, falta de normas técnicas e custo elevado (SOUZA; RIPPER, 1998).

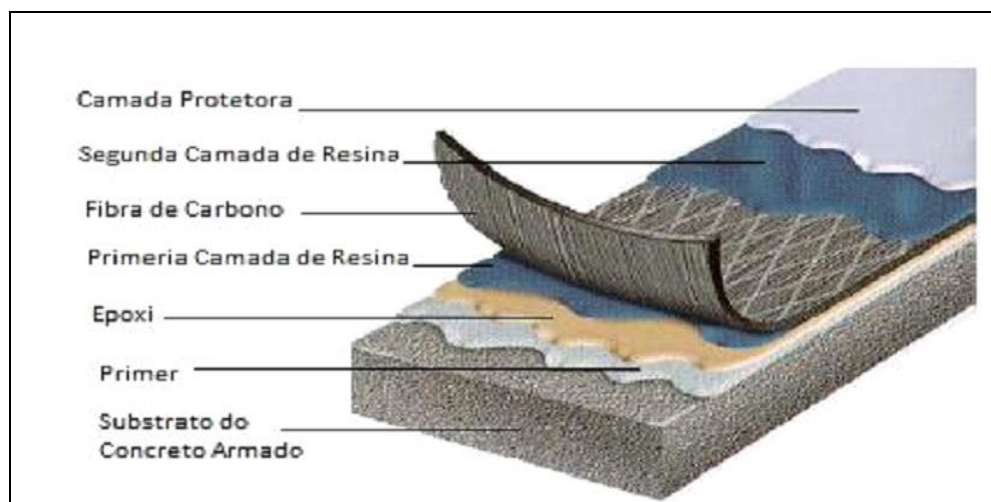
Desde então, muitas pesquisas e estudos com aplicações em campo vem sendo desenvolvidos e documentados em congressos, assim como em normas internacionais do American Concrete Institute (ACI), especialmente na norma ACI 440R (ACI, 2002), da Federation International Du Betón (FIB, 2001) e, mais recentemente, nas normas da Organização Internacional para Padronização (ISO, 2007).

Deve-se destacar também, que os polímeros reforçados com fibra de carbono apresentam resistência à tração e módulo de elasticidade elevada, sem patamar de escoamento, excelentes características de durabilidade, baixo peso específico, o que proporciona facilidade de transporte e manuseio para a instalação. (MACHADO, 2006).

Outro fator importante seria com relação a dimensões ilimitadas, eliminando a necessidade de emendas, o que leva vantagem sobre o uso de chapa de aço colada devido a suas restrições de comprimento.

Por outro lado, com relação a outros materiais de mesma finalidade na área da construção civil, um dos seus limitantes é ainda o seu alto custo. Porém, levando-se em conta, custo *versus* vida útil, a durabilidade pode tornar o material competitivo a depender do ambiente a ser aplicado. A figura 1 apresenta a fibra de carbono em contato com a estrutura de concreto.

**Figura 1 - Materiais componentes do sistema do polímero reforçado com fibra de carbono**



Fonte: Machado (2006 p.37)

### 3.1.2 Agentes naturais sobre PRFC

Os agentes naturais podem influenciar o comportamento do compósito de fibra de carbono, entre eles a temperatura, a umidade, a salinidade e o fogo. Sucintamente, pode-se resumir esta influência em:

a) Efeito da temperatura-umidade:

O coeficiente de dilatação térmica da fibra é muito baixo, quase zero, não sendo constatadas influências de variações de temperatura e nem de umidade sobre o módulo de elasticidade do compósito, assim, a influência deste agente pode ser desconsiderada;

b) Efeito da água salgada e alcalina:

O PRFC apresenta boa resistência com relação a influência da água salgada e a alcalinidade, não havendo relatos de ataque por estes agentes;

c) Efeito da ação do fogo:

A resistência ao fogo do material compósito pode ser determinada pela qualidade da resina que liga a fibra ao elemento reforçado. Essas resinas classificam-se em como termoplásticas e termoestáveis.

As resinas termoplásticas podem se fundir e se solidificar novamente inúmeras vezes quando passam por um processo de aquecimento e resfriamento, enquanto as termoestáveis não podem retornar ao seu estado inicial após sofrer aquecimento.

Essas resinas quando expostas as altas temperaturas passam para um estado frágil na qual fica conhecida como temperatura de transição vítrea, comprometendo a integridade estrutural do sistema composto de fibra de carbono, pois a resina não mais consegue manter inalterada a adesão das fibras individuais no composto.

De modo geral, a temperatura de transição vítrea das resinas epoxídicas bicomponentes, curadas à temperatura ambiente, se situam na ordem de 90°C. Contudo revestimentos de uso comum contra incêndio, não proporcionam isolamento térmico suficiente para manter a temperatura na peça e no sistema composto abaixo da temperatura de transição vítrea (MACHADO, 2006).

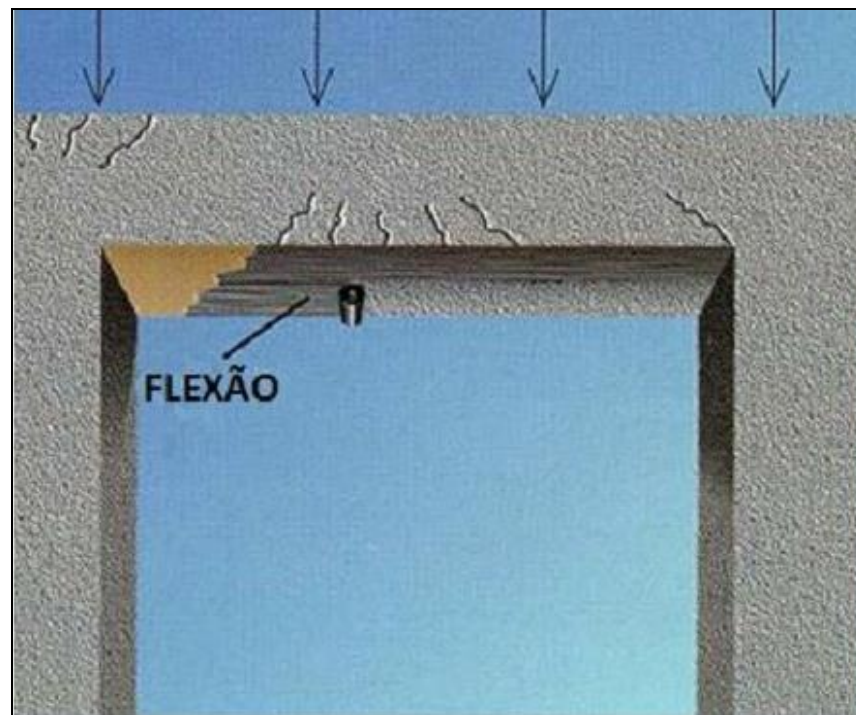
Diante destes fatos é prática entre projetistas, desconsiderarem totalmente a resistência ao fogo desses materiais e depender exclusivamente da resistência da estrutura existente na sua condição não reforçada (MACHADO, 2006).

### 3.1.3 Aplicação de PRFC

O desempenho da estrutura de concreto armada reforçada com fibra de carbono depende diretamente da qualidade de aplicação do produto sobre a superfície e da posição de aplicação do mesmo.

Segundo Machado (2006) as fibras de carbono podem ser utilizadas para absorver os esforços de tração devido aos momentos fletores positivos e negativos, demonstrados na Figura 2.

**Figura 2 - Reforço à flexão com o uso de fibra de carbono em viga de concreto armado**



Fonte: Machado (2006 p.23)

Na Figura 3 apresenta-se o reforço de uma laje em concreto armado com o uso de fibra de carbono, em um estacionamento.

**Figura 3 - Reforço à flexão com o uso de fibra de carbono e proteção externa em laje de concreto armado**



Fonte: Própria

O processo de aplicação da fibra sobre o substrato de concreto pode ser dividido em duas etapas: a preparação da superfície de concreto e a da aplicação do produto. Assim, precisa-se que a superfície de concreto seja limpa por meio de escovão de aço ou esmerilhagem, de maneira a remover a sujeira e a fina camada de argamassa que, geralmente, reveste a estrutura de concreto permitindo, assim, uma melhor aderência. Caso existam irregularidades geométricas, essas deverão ser reparadas com argamassa epoxídicas alisadas a espátula (SOUZA; RIPPER, 1998).

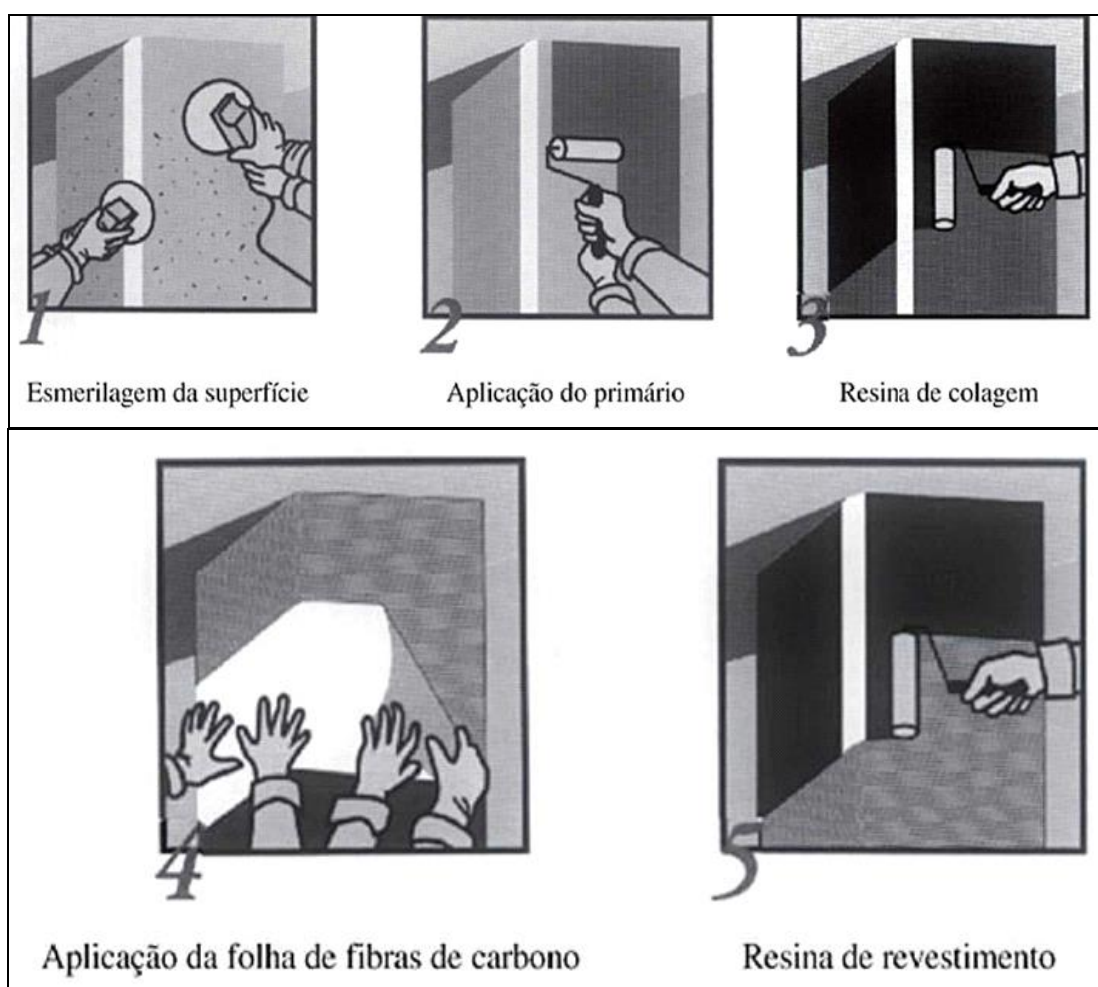
Depois de preparada a superfície, deve-se aplicar o primer imediatamente, cuja função será não só a de melhorar as características do concreto da superfície, através da impregnação, como também garantirá plena adesão do compósito.

Posteriormente a aplicação do primer, num intervalo de aproximadamente sessenta minutos, deverão ser aplicados, sequencialmente, a resina de colagem e a fibra de carbono.

A eventual aplicação de outras camadas é imediata, servindo a camada precedente como base para as seguintes. É, no entanto, possível diferir no tempo a aplicação das sucessivas camadas em até uma semana, desde que se aplique, sobre a resina endurecida, uma nova camada de resina fresca (SOUZA; RIPPER, 1998).

A Figura 4 exemplifica a técnica de reforço que utiliza a colagem de fibras de carbono em estruturas de concreto armado.

**Figura 4 - Sistema de aplicação de fibra de carbono como reforço estrutural**



Fonte: Souza e Ripper (1998, p.155)

### **3.1.4 Ligação das interfaces**

Na interface é que ocorre a transferência de tensão, garantindo ou não a compatibilidade entre os materiais na deformação, dependendo da qualidade da ligação entre o concreto/cola/fibra, afetando o desempenho do elemento reforçado.

Para evitar a incompatibilização entre os materiais na deformação os cantos do elemento estrutural devem ser arredondados. O manual do CEB (2001) propõe o valor de 30 mm para o raio de arredondamento de cantos angulosos na superfície do concreto (MACHADO, 2006).

Segundo a norma ACI 440.2R (ACI, 2002), a resistência do substrato do concreto a tração direta mínima deve ser de 1,4 MPa. Outro fator que deve ser levado em consideração é que não se faz referência quanto ao número de camadas do reforço, mas destaca que a ligação concreto-material de reforço deva ser feita de forma que se garanta a transferência de tensões entre os materiais.

### **3.1.5 Vantagens e desvantagens do reforço de estrutura de concreto armado com o uso de fibra de carbono**

O método escolhido na reabilitação de uma estrutura de concreto armado depende do diagnóstico do problema, das características da região a ser corrigida, das exigências de funcionamento do elemento que será objeto da reabilitação e de uma avaliação dos custos do processo. Durante a avaliação, deve-se garantir que a estimativa total de custos considere a vida útil da estrutura e não somente a seleção da alternativa que apresente o menor custo inicial (MONTEIRO, 2005).

Dentre as diversas técnicas de reforço conhecidas e aplicadas atualmente, a técnica de chapa colada com epóxi é a que mais se assemelha a técnica que emprega compósitos de fibra de carbono. Entretanto o reforço com fibra de carbono, não deve ser considerada uma forma e sim uma técnica promissora que agrega diversas vantagens e benefícios (BEBER, 2003).

As vantagens da aplicação da fibra de carbono, com base em Beber (2003), são:

- a) A fibra de carbono apresenta valores de resistência em média de 3 a 5 vezes maior que a do aço, sendo possível ainda variar as proporções de fibra



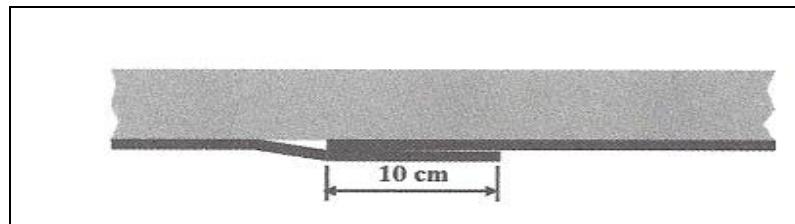
- e resina, modificando as propriedades do compósito para atender a uma aplicação particular;
- b) O seu peso próprio com uma densidade que representa apenas cerca de 20% da densidade do aço;
  - c) Tem-se uma sensível diminuição nos custos com transporte, pois pode ser transportado em veículos de pequeno porte, pois são dispostos em bobinas de diâmetro de 1,5 m;
  - d) Levando-se em conta a dispensa de equipamentos pesados para seu posicionamento e escoramento, o seu custo é menor;
  - e) Os compósitos não possuem limitações de comprimento, podendo ainda, ser aplicados em número variável de camadas para atender a uma situação particular;
  - f) Apresentam menor espessura que chapas de aço com capacidade equivalente.

As limitações do PRFC como reforço de estruturas de concreto armado são o preço do produto e a baixa resistência ao fogo como citado anteriormente.

### **3.1.6 Comprimento mínimo para transpasse da fibra de carbono**

Quando necessário, emendas na fibra de carbono na execução da colagem da fibra à peça de concreto, o transpasse mínimo recomendado é de apenas 5 cm. Porém, a prática recomenda que esse comprimento seja maior quando a ondulação da superfície sobre a qual a fibra será colada seja uma área sensível. Para lâminas de grandes comprimentos a ondulação pode reduzir o comprimento aderido da lâmina em até 15 cm, motivo pelo qual se recomenda um comprimento adicional de 5 cm em cada lâmina para compensar essa ocorrência. Contudo, esse acréscimo dependerá de uma avaliação prévia, considerando-se cada caso em particular. A Figura 5 demonstra o comprimento mínimo do transpasse (MACHADO, 2006).

**Figura 5 - Comprimento do transpasse necessário da fibra de carbono quando aderido em uma peça de concreto armado**



Fonte: Machado (2006 p.163)

## **3.2 Reforço de estruturas de concreto por meio de chapas de aço coladas**

### **3.2.1 Chapa de aço colada**

O uso de chapas de aço coladas vem obtendo bastante aceitação, sendo assim, utilizado com conhecimentos razoáveis de como irá se comportar como reforço no elemento de concreto e os seus devidos métodos de dimensionamento.

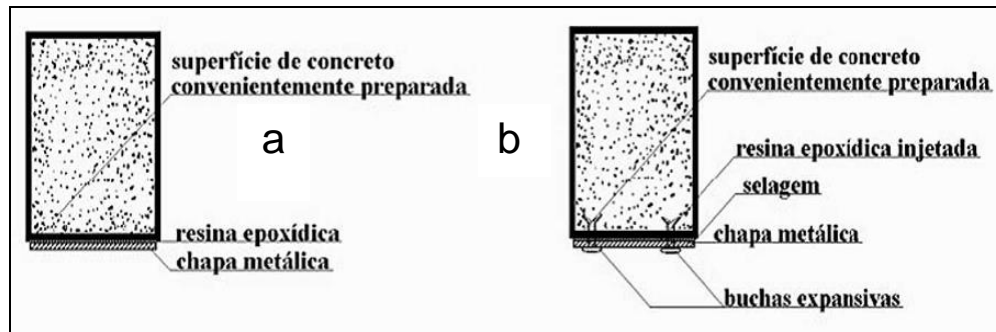
L'Hermet, (1967) e Bresson (1971), apud Garcez (2007), realizaram testes em vigas de concreto armado reforçado com chapas de aço coladas. Já Dussek (1974) aplicou a mesma técnica no reforço de lajes de concreto armado na África do Sul.

Os resultados encontrados foram positivos e incentivaram novas aplicações mostrando que o uso de chapas coladas proporciona uma maior rigidez, diminuindo a fissuração dos elementos reforçados.

Portanto, quando é necessário adicionar capacidade resistente, uma opção eficiente e de rápida execução é a do reforço com o uso de chapa de aço por colagem ou chumbamento (SOUZA; RIPER, 1998).

A Figura 6 exemplifica a aplicação de chapa de aço colada com o uso de resina e chapa de aço colada com o uso de bucha expansiva.

**Figura 6 - Aplicação de chapa metálica**



Fonte: Souza e Ripper (1998, p.148).

Como demonstrada na Figura 6 parte (a), tem-se a aplicação de chapa metálica com o uso de resina e na parte (b) observa-se o uso de resina e bucha expansiva. A execução requer uma cuidadosa preparação da superfície e da chapa, garantindo assim uma boa ligação entre a chapa de aço de reforço e o elemento de concreto.

Quando não forem utilizadas buchas expansivas na ligação, recomenda-se o uso de espessura mínima de 3 mm e uma largura inferior a 300mm das chapas de aço. A espessura da resina deve ser da ordem de 1 a 3 mm para uma melhor eficiência da ligação (SOUZA; RIPPER, 1998).

Deve-se destacar que durante a execução do reforço a estrutura terá de ser aliviada de todas as cargas acidentais, de modo que o reforço possa ser mobilizado para as cargas de serviço.

Além disso, deve-se lembrar de que as vantagens de utilizar chapas coladas estão ligadas ao elevado módulo de elasticidade do aço, ao custo relativamente baixo em relação a outros materiais para reforço e por ser um método relativamente simples.

No entanto, uma das desvantagens do uso da chapa colada seria a elevada massa específica do aço, sendo dificultoso no transporte, manuseio e devido dimensões limitadas necessitando de juntas.

Na Figura 7 apresenta-se o escoramento de uma laje em concreto armado onde se executou o reforço com chapa de aço colada.

**Figura 7 - Reforço de laje em concreto armado com o uso de chapa metálica colada**



Fonte: Própria

### **3.2.2 Agentes naturais sobre chapa de aço colada**

Os efeitos causados pelos agentes naturais sobre a chapa de aço colada, a considerar podem ser:

a) Efeito devido à umidade e temperatura:

A corrosão nas chapas de aço é evidente após um longo período exposto a ambientes agressivos, em especial na interface resina/chapa de aço, diagnosticada em inspeções de rotina. Além disso, a aplicação da resina não deverá ser efetuada com temperatura ambiente inferior a 10°C;

b) Efeito da ação do fogo:

A resistência ao fogo da chapa de aço é relativamente baixa necessitando de proteção por meio de um revestimento isolante.

Canovas (1988) cita que a resistência do aço acima de 400 °C é aproximadamente a metade da resistência à temperatura ambiente. Acima de 800°C a resistência do aço pode ser desconsiderada. Assim, estruturas reforçadas com chapa colada em situações de incêndio podem ter sua resistência em muito diminuída.

Deve-se lembrar também que devido às suas dimensões limitadas, as chapas de aço necessitam de juntas, pois não podem ser soldadas *in situ* devido a altas temperaturas da solda que pode danificar o adesivo que começa a se degradar a 80°C como mostraram os ensaios de Compagnolo (REIS,1998).

### 3.2.3 Aplicação do material

A execução de um reforço com chapa de aço colada pode ser descrita segundo a sequência apresentada por Carmona (2003):

- a) Recuperação do concreto (nivelamento);
- b) Injeção de fissuras;
- c) Preparo de superfície (lixamento /jato de areia);
- d) Regularização (argamassa epóxi);
- e) Marcação das chapas e furação;
- f) Lixamento das chapas;
- g) Limpeza com solvente;
- h) Preparo do adesivo (mecanicamente);
- i) Posicionamento das chapas;
- j) Instalação de escoras e presilhas;
- k) Pintura de proteção das chapas.

A superfície do concreto deve ter uma rugosidade com aspereza significativa, devendo a mesma estar seca e limpa para a aplicação da resina e, posteriormente, da chapa. A Figura 8 apresenta o caso de fissuras na superfície, onde será executado o reforço, a mesma deverá ser selada de modo a impedir a fuga de resíduo.

**Figura 8 - Execução de injeção de resina epóxi nas fissuras**



Fonte: Carmona (2003, p.12)

A figura 9 demonstra a superfície regularizada com resina epóxi, onde posteriormente será aplicado o reforço com chapa de aço colada.

**Figura 9 - Substrato de concreto selado**



Fonte: Carmona (2003, p.12)

A colagem de chapas metálicas ao concreto requer a utilização de resinas com altas capacidades de aderência e resistência mecânica.

Vau Gcmmerlet al. (1983) *apud* Souza e Ripper (1998) levam em consideração que devem ser usados apenas adesivos epoxídicos para esses

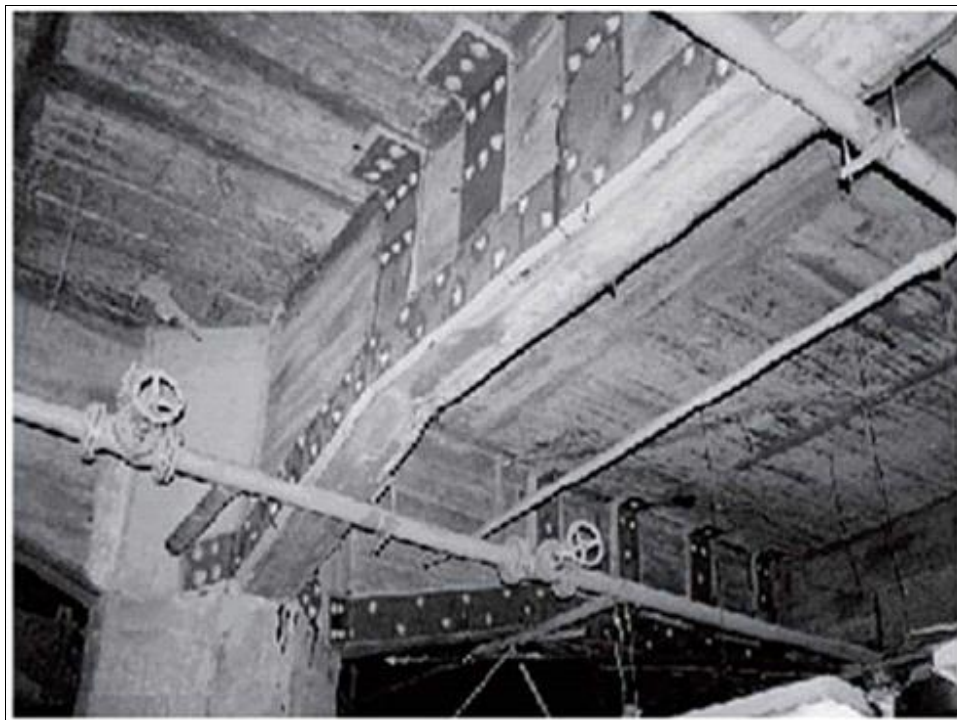
reforços, enquanto o boletim do C.E.B. n° 162 considera que tanto as resinas epoxídicas como as de poliésteres conduzem a resultados seguros.

Segundo Souza e Ripper (1998), citando a Norma Sueca SIS 0020055 - 900 – 67, a superfície da chapa metálica, deve receber um tratamento potencializado a sua máxima aderência, sendo submetida à decapagem a jato abrasivo.

Depois do devido tratamento da chapa, as superfícies a serem coladas deverão ser protegidas com filme autocolante apropriado, prevenindo, assim, contra inconvenientes e agressão ambiental durante o transporte, manuseio e armazenagem e até a hora da aplicação das chapas imediatamente antes da qual, e só então, deverá ser retirada a película (SOUZA; RIPPER, 1998).

A Figura 10 e 11 demonstra o reforço da estrutura por meio de chapa de aço colada.

**Figura 10 - Reforço por adição de chapas metálicas**



Fonte: Souza e Ripper (1998, p.151)

**Figura 11 - Reforço por adição de chapas metálicas**



Fonte: Carmona (2003, p.21)

Após a fixação, as chapas devem ser submetidas a uma ligeira pressão, uniforme, para que o excesso de resina existente seja expulso. Esta pressão poderá ser exercida, com o auxílio de escoras metálicas ajustáveis, que devem ser mantidas até o total endurecimento da resina, sendo que o tempo de endurecimento dependerá diretamente das características da cola não devendo, no entanto, ser inferior a 24 horas (SOUZA; RIPPER, 1998).

### **3.2.4 Considerações para dimensionamento à flexão**

As chapas metálicas podem ser utilizadas para absorver os esforços dos carregamentos exercidos na estrutura de concreto devido aos seus momentos fletores existentes.

Para o dimensionamento devem ser levadas em conta algumas considerações pré-estabelecidas, de acordo com a NBR 6118 (2003), já citadas no dimensionamento à flexão para reforço de estruturas com o uso de fibra de carbono.

Além disso, o reforço por meio de chapas de aço coladas deve ser dimensionado de acordo com a NBR-8800 (ABNT, 2008) ou por métodos de dimensionamento encontrados em normas estrangeiras, tais como: AISI (American Iron and Steel structuralmembers) e CSA (Canadian Standards Association).



As características físicas do aço da chapa podem ser fornecidas pelo fabricante através de certificados, ou encontradas em normas brasileiras e internacionais (SOUZA; RIPPER, 1998).

### **3.3 Reforço de estruturas de concreto (pilares) por meio de encamisamento de concreto ou aumento da seção transversal**

#### **3.3.1 Encamisamento de concreto ou aumento da seção transversal**

O reforço de elementos estruturais, especialmente pilares com o aumento da seção com concreto armado é um sistema muito empregado, devido suas vantagens, principalmente econômicas e de fácil execução, em relação a outros sistemas de reforço.

Se o reforço a realizar-se com concreto for adequadamente construído, a eficiência e garantia que oferecerá é superior, em muitos casos, a dada por outros métodos (CANOVAS, 1988).

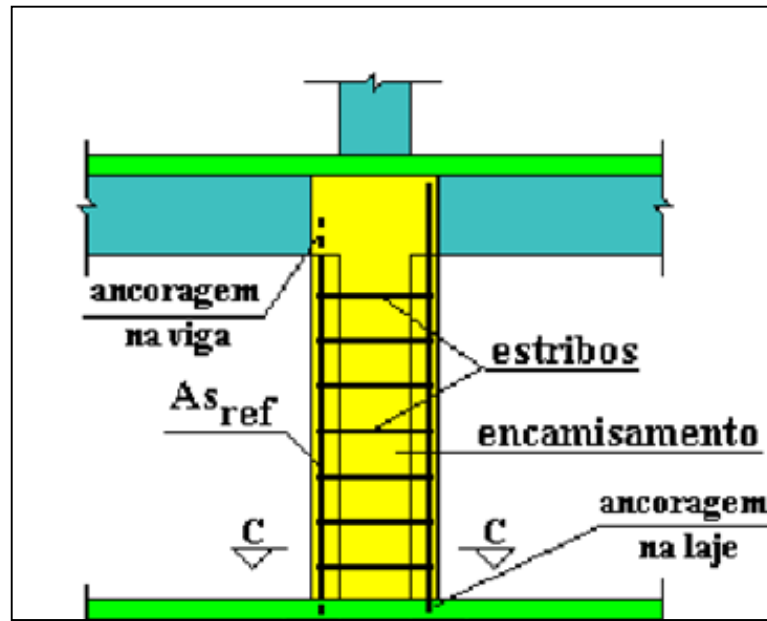
Entretanto, o reforço de pilares do ponto de vista do projeto estrutural é sempre o mais problemático, se comparado ao reforço de vigas e lajes. Isso acontece porque os pilares são os últimos elementos de sustentação das estruturas, antes das fundações, absorvendo as cargas oriundas de outros elementos e diversos pavimentos. A etapa mais complexa ou de mais difícil obtenção é o alívio das cargas que atuam sobre o pilar avariado, de maneira que o reforço seja executado e possa entrar em carga recebendo parte das cargas do elemento original.

Assim, o reforço de pilares é feito na maioria das vezes sem o descarregamento da estrutura, pois para executar o descarregamento da mesma precisar-se-ia de uma estrutura auxiliar que fosse dimensionada de maneira a receber o carregamento existente, o que seria economicamente inviável. Acaba-se por dimensionar o reforço para receber cargas adicionais que venham acontecer na estrutura.

O reforço executado nos pilares pode ser denominado de encamisamento de concreto, que consiste na colocação de uma camada adicional de concreto armado em um elemento estrutural já existente conforme Figura 12. Esse elemento estrutural pode ter suas dimensões resistentes alteradas para elevar sua capacidade

resistente, com o objetivo de produzir um elemento monolítico entre a estrutura existente e a nova camada.

**Figura 12 - Reforço do pilar original envolvido por concreto armado em todas as faces**



Fonte: Helene (1988, p.88)

Deve-se considerar que o reforço de pilares de concreto pode ser feito a partir do aumento de sua seção transversal, com o uso de concreto com resistência e armaduras adicionais adequadas, lembrando que o reforço não precisa ser necessariamente executado em torno de todo o elemento de concreto, podendo ser feito em algumas das suas faces, de acordo com as condições da estrutura. O material de reforço deve ter módulo de elasticidade, coeficiente de dilatação e resistência compatíveis com o do concreto existente.

Recomenda-se que não sejam utilizadas espessuras inferiores a 10 cm, a menos que seja empregado concreto com superplastificante, concretos projetados e que os agregados máximos sejam inferiores a 20 mm (CANOVAS, 1988). Ainda, considerando a necessidade de respeitar os cobrimento especificados na NBR 6118 (2003) e garantir a presença de estribos na região reforçada, as espessuras mínimas de reforço acabam sendo maiores que 10 cm.

Pode-se empregar várias técnicas para o encamisamento de concreto, no caso de grandes volumes, pode-se utilizar o concreto projetado, e para pequenos volumes o método tradicional com o uso de formas (TAKEUTI, 1999).

Antes da execução do reforço deve-se melhorar a aderência do elemento de concreto onde será realizado, garantindo a união entre os concretos, o novo e o antigo. Takeuti (1999) recomenda que, se possível, o reforço deve ser feito em torno de toda a estrutura, usando estribos fechados visando uma melhor ductibilidade.

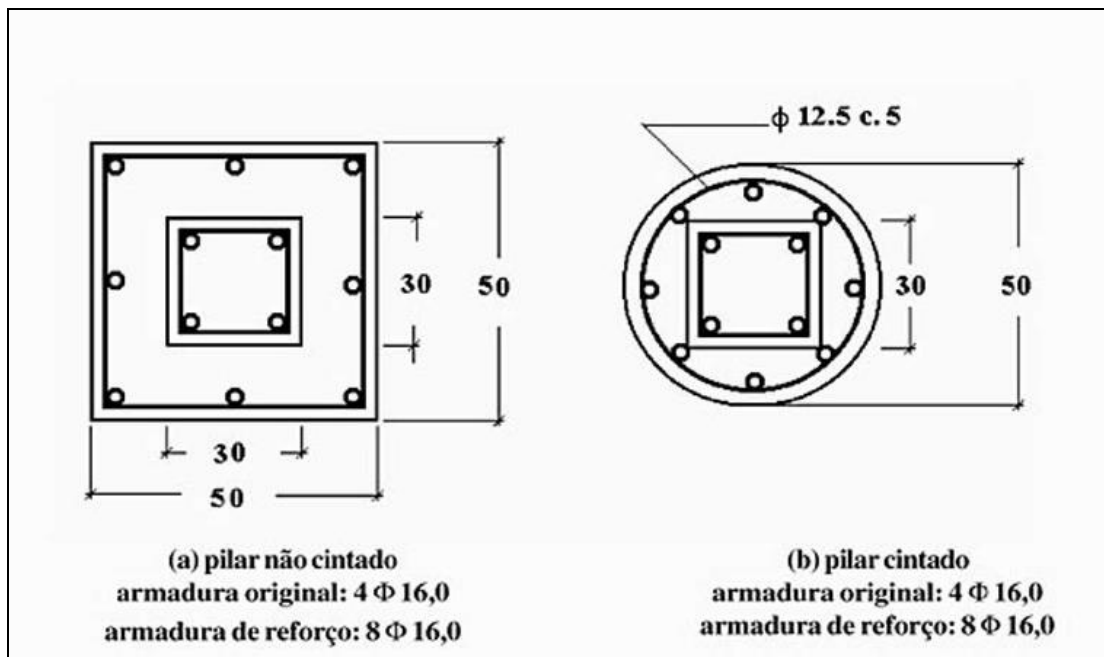
Recomenda-se ainda que o concreto utilizado para o reforço tenha resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) maior que 20MPa e que tenha 5MPa a mais do que o concreto existente diminuindo assim a aparição de fissuras por retração (SOUZA; RIPER, 1998).

Outro processo de reforço é o de encamisamento por cintamento, aumentando a resistência do pilar original por compressão triaxial, podendo ser utilizado seções menores (CANOVAS, 1988). O encamisamento por cintamento consiste em recobrir com uma envoltória cilíndrica, capaz de opor-se as deformações transversais de concreto, quando for submetido a esforços de compressão, podendo a armadura ter forma helicoidal continua de forma a restringir a deformação transversal (TAKEUTI, 1999).

Deve-se notar que a estrutura a ser reforçada geralmente é um pilar de forma quadrada ou retangular, que deve ser transformada em um pilar circular, visando uma eficiência maior para o cintamento e uma grande economia de material.

A Figura 13 demonstra o reforço por encamisamento de concreto.

**Figura 13 - Reforço por encamisamento de concreto**



Fonte: Souza e Ripper (1998, p. 217)

### 3.3.2 Vantagens e desvantagens do reforço de estrutura por meio de encamisamento de concreto

Uma das principais vantagens com relação aos outros tipos de reforços de estrutura seria o baixo custo, se comparado com outros métodos de reforço, principalmente por não necessitar a exigência de mão-de-obra especializada para execução e o emprego de materiais de fácil disponibilidade.

Por outro lado, uma das principais desvantagens seria o aumento da seção transversal, aumento do peso próprio, necessidade de formas para concretagem, o fato de a peça reforçada só poder ser solicitada após o concreto ter atingido a sua resistência de projeto e a retração entre o concreto velho e o novo ocorrendo problemas de fissuração e aderência. Além da necessidade de descarregar os esforços desta estrutura de reforço em algum outro elemento, por exemplo, necessidade de executar uma fundação adicional para receber os esforços deste elemento de reforço. E o que pode ser ainda pior, o comprometimento estético e de uso dos compartimentos afetados.

Recomendações, de acordo com Souza e Ripper (1998) quando à melhoria da aderência e controle à retração são:

- a) Remover o concreto deteriorado ou desintegrado com ponteiro ou talhadeira. Por razões práticas, a espessura mínima da camada a ser adicionada deve ficar em torno de 75 mm a 100 mm, possibilitando que a compactação do novo concreto e o posicionamento da nova armadura possam ser feitos de forma adequada;
- b) Promover uma superfície rugosa deixando os agregados expostos e remover, quando necessário, o concreto que envolve as armaduras, eliminando somente o concreto deteriorado;
- c) Remover a ferrugem das armaduras e óleos do concreto;
- d) Eliminar o pó utilizando água sob pressão;
- e) Saturar o concreto antigo por pelo menos seis horas antes de aplicar o concreto novo;
- f) Evitar bolhas de ar aplicando concreto ou argamassa com uma maior fluidez e a partir de um mesmo lado da fôrma. Muitas vezes, é necessário abrir janelas temporárias na fôrma para lançar o concreto e permitir a passagem do vibrador de imersão;
- g) Promover a cura com umedecimento da superfície ou cobrindo-a com materiais úmidos, tais como areia, espuma, estopa e outros. Este umedecimento deve persistir por dez dias, no mínimo;
- h) Usar concreto de melhor qualidade, com resistência característica de, no mínimo 5 MPa a mais do que a do concreto existente.

### **3.4 Dimensionamento de estrutura**

O cálculo de uma estrutura determina que ela garanta segurança estável de modo a suportar todas as solicitações de utilização. Dessa forma, o dimensionamento consiste em impedir a ruína da mesma, o que não caracteriza apenas a ruptura e sim o desconforto de utilização por causa de fissuras e deformações excessivas.

Em função disso o dimensionamento de determinada estrutura consiste em comprovar que uma determinada seção de dimensões conhecidas resista a esforços solicitantes desfavoráveis atuantes ou o cálculo de uma seção ainda não definida com limites de dimensões impostos a fim de suportar o máximo esforço solicitante.

### 3.4.1 Dimensionamento em estado limite último

O estado limite último é aquele relacionado ao colapso ou a qualquer outra forma de ruína estrutural que determine a paralisação, no todo ou em parte, do uso da estrutura.

Segundo o item 10.3 da NBR 6118 (2003) a estrutura deve estar sempre em conformidade com a segurança da mesma, sendo verificada em relação ao estado-limite último:

- a) Perda de equilíbrio da estrutura;
- b) Esgotamento da capacidade resistente da estrutura;
- c) Provocados por solicitações dinâmicas;
- d) Colapso progressivo;
- e) Outros que possam ocorrer em casos especiais.

### 3.4.2 Esforços atuantes e resistentes

Nos métodos de cálculo na ruptura ou dos estados limites a segurança é garantida fazendo-se com que as solicitações de cálculo sejam menores do que as solicitações últimas, sendo essas que levariam a estrutura à ruptura, se os materiais tivessem suas resistências reais (resistências características) minoradas por coeficientes de ponderação das resistências de cálculo.

Quanto às condições analíticas da verificação de segurança de estruturas de concreto, as resistências não devem ser menores que as solicitações.

Para a verificação do estado limite último de perda de equilíbrio como corpo rígido deve assumir os valores de cálculo das ações estabilizantes e desestabilizantes.

O método dos estados limite é um processo simplificado de verificação da segurança, sendo que uma análise probabilística completa seria difícil e complicada, até mesmo impossível e por isso é chamado de semiprobabilístico. Admite-se que a estrutura seja segura quando as solicitações de cálculo forem, no máximo, iguais aos valores que podem ser suportados pela estrutura no estado limite considerado.

### 3.4.3 Coeficientes de ponderação das resistências

A resistência de projeto ( $R_d$ ) de um determinado elemento é obtida a partir da minoração de sua resistência característica ( $R_k$ ). De acordo com a NBR 6118 (2003), as resistências deverão ser minoradas pelo coeficiente  $\gamma$ .

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma} \quad \text{Equação (1)}$$

Os coeficientes de minoração são apresentados na Tabela 1. Os coeficientes apresentados nesta tabela, conforme a NBR 6118 (2003), são válidos para estados limites últimos.

**Tabela 1 - Valores dos coeficientes  $\gamma_c$  e  $\gamma_s$**

Combinações	Concreto ( $\gamma_c$ )	Aço ( $\gamma_s$ )
Normais	1,4	1,15
Especiais ou de construção	1,2	1,15
Excepcionais	1,2	1,00

Fonte: NBR 6118 (2003, p. 51)

Para obras usuais e situações normais em geral, tem-se para o concreto e aço no estado limite último, os valores respectivos das resistências de cálculo:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

$f_{cd}$ = Resistência de cálculo do concreto;

$f_{ck}$ = Resistência característica do concreto à compressão;

$\gamma_c$ = Coeficiente do concreto para combinações normais.

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1,15} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

$f_{yd}$  = Tensão (resistência) de escoamento de cálculo do aço;

$f_{yk}$  = Resistência característica do aço a tração;

$\gamma_s$  = Coeficiente do aço para combinações normais.

Os valores das resistências características são especificados no projeto estrutural.

### 3.5 Reforço de estrutura (fibra de carbono/chapa de aço)

Para o dimensionamento serão observadas algumas premissas de acordo com a NBR 6118 (2003), que são:

- a) Os cálculos serão efetuados com base nas dimensões existentes das seções, das distribuições das armaduras de aço e suas respectivas quantidades, das propriedades dos materiais que constituem o elemento a ser reforçado;
- b) As seções permanecem planas até a ruptura (Lei de Bernoulli), apresentadas na Figura 14;
- c) Deverá ser desprezada a resistência a tração do concreto;
- d) A deformação máxima do concreto comprimido é de 3,5/1000;
- e) Deformação linear até a ruptura do material compósito;
- f) A aderência entre o reforço e o elemento de concreto, deverá ser perfeita;
- g) O dimensionamento das estruturas reforçadas é feito com base nos conceitos do estado limite último.

Ainda, deve-se considerar que o reforço submetido a um carregamento constante de longa duração podem eventualmente vir a apresentar futuros problemas, conhecido como capacidade de sustentação de tensões. Esse fenômeno é conhecido como ruptura por fluência e é semelhante à fadiga observada nos metais (RELVAS, 2003).

Sucintamente, pode-se descrever o fenômeno denominado fluência como a variação da deformação em um elemento estrutural com o passar do tempo para uma tensão constante aplicada. Este fenômeno indesejável é um fator de redução da

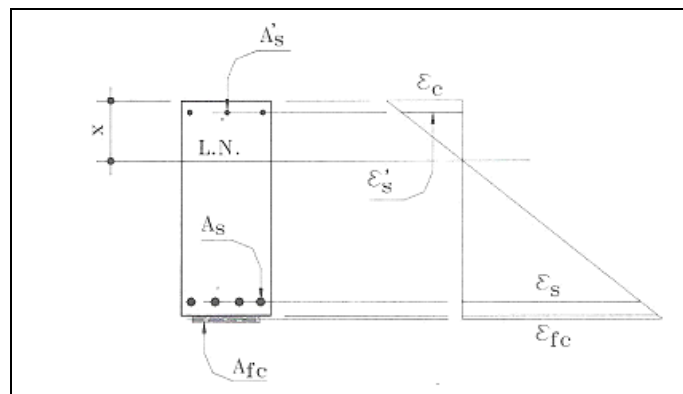


vida útil do material, pois, com as deformações excessivas a utilização do material pode ser prejudicada ou seu uso inviabilizado.

Quando o reforço é aplicado na estrutura de concreto, o mesmo não está submetido a nenhum nível de tensão inicialmente. Porém, o local onde será aderido o reforço está submetido a tensões decorrentes da atuação do seu próprio peso, isto obviamente presumindo que as cargas acidentais foram aliviadas.

Dessa forma, o nível de tensão que está atuando no reforço é diferente do nível que atua na fibra extrema do local onde o reforço será colado.

**Figura 14 - As seções planas permanecem planas após a ocorrência dos carregamentos e as deformações são linearmente proporcionais a sua distância a linha neutra**



Fonte: Machado (2006, p. 42)

Para conhecer o nível de tensão ao qual o reforço será submetido é necessário conhecer previamente o nível de tensão que está ocorrendo na superfície do substrato na aplicação. Conhecendo este nível de tensão, logo se conhece o nível de deformação existente na fibra extrema do concreto a qual será aderido o reforço.

A deformação pré-existente deverá ser subtraída da deformação final encontrada para o reforço para que se possa estabelecer o nível de tensão com o qual o reforço efetivamente trabalhará.

Essa deformação noreforço pode ser demonstrada na seguinte equação (MACHADO, 2006):

$$\varepsilon_{ref} = \varepsilon_f - \varepsilon_i$$

Equação (4)

Onde:

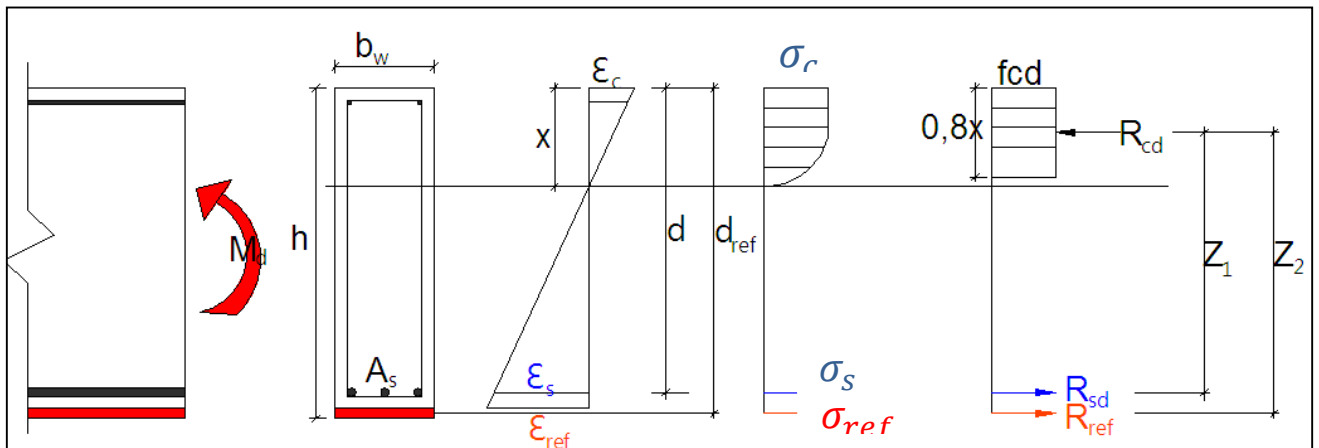
$\varepsilon_{ref}$  = Deformação específica que ocorre no reforço;

$\varepsilon_f$  = Deformação final que ocorre no reforço, considerando o carregamento máximo;

$\varepsilon_i$  = Deformação pré-existente quando da instalação do reforço.

Segundo a NBR 6118 (2003) a avaliação das seções reforçadas deve ser com base no estado limite último (ELU) que estabelecem que a capacidade resistente da peça de concreto deve ser superior aos esforços solicitantes. Na Figura 15 estão demonstradas as distribuições de tensão e deformação de uma seção reforçada.

**Figura 15 - Diagrama esquemático de equilíbrio de seção transversal reforçada**



Fonte: Própria

Na figura 15 as tensões e deformações são representadas pelas forças:

$b_w$  = Largura da viga de concreto;

$h$  = Altura da viga de concreto;

$d$  = Altura útil;

$x$  = Posição da linha neutra;

$A_s$  = Área de aço tracionada;

$\varepsilon_s$  = Deformação específica do aço à tração;

$\varepsilon_{ref}$  = Deformação específica do reforço;

$\varepsilon_c$  = Deformação específica do concreto à compressão;

$z_1$ =Braço de alavanca (distancia entre o centro de gravidade da amadura de tração e o centro de gravidade da região comprimida do concreto);

$z_2$ =Braço de alavanca (distancia entre o centro de gravidade do reforço e o centro de gravidade da região comprimida do concreto);

$R_{cd}$ =Força resultante da seção comprimida do concreto;

$R_{sd}$ =Força resultante da seção tracionada da armadura;

$R_{ref}$ =Força resultante da seção tracionada do reforço;

$\sigma_s$ =Tensão de tração do aço;

$\sigma_c$ =Tensão de compressão do concreto;

$\sigma_{ref}$ = Tensão de tração do reforço.

Segundo Machado (2006), os modos de ruptura à flexão podem ocorrer por:

- a) Ruptura por alongamento excessivo do aço antes do esmagamento do concreto;
- b) Ruptura por alongamento excessivo do aço antes da ruptura do reforço;
- c) Ruptura por esmagamento do concreto antes da ruptura por alongamento excessivo do aço;
- d) Ruptura do reforço antes da ruptura por alongamento excessivo do aço.

O comportamento frágil da estrutura acontece nos casos **c** e **d** apresentados, sendo menos desejáveis que os casos **a** e **b**. Para o reforço de uma estrutura de concreto deve-se verificar o momento fletor de cálculo máximo atuante na estrutura sem o reforço, e o momento resistente da estrutura em função de suas características geométricas e de seus materiais.

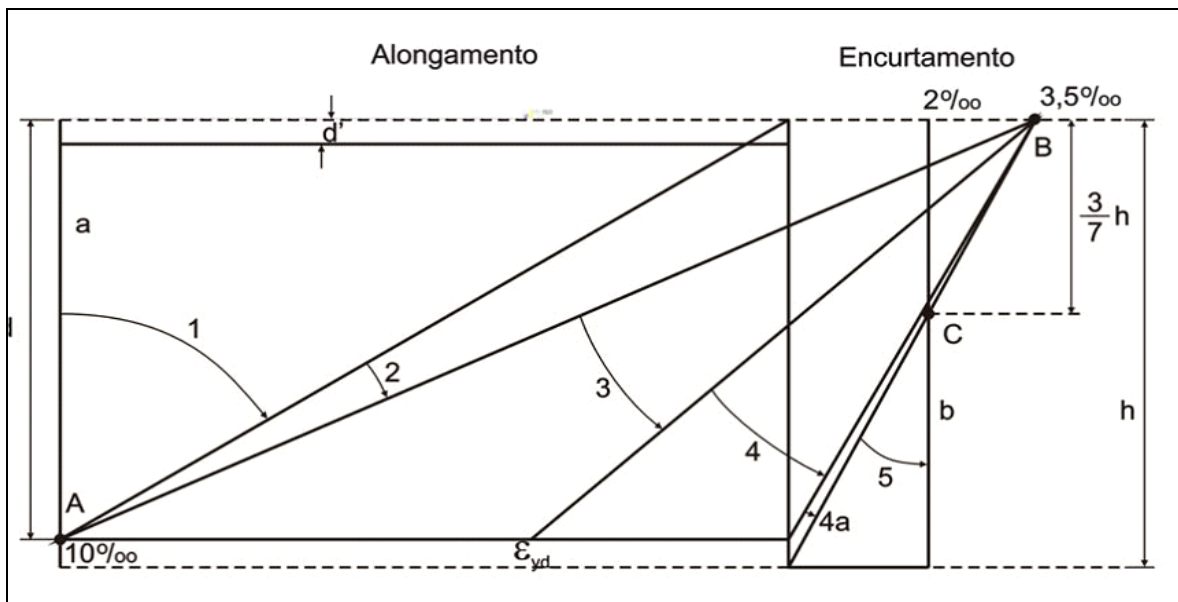
Logo se o momento resistente do elemento de concreto, viga  $Md_{resist}$  é maior que o momento atuante  $Md_{Máx}$ , sendo assim não seria necessário reforço na estrutura, porém se o  $Md_{resist}$  for menor que o  $Md_{máx}$  a viga necessitaria de reforço à flexão.

A ruína de uma peça de concreto para qualquer tipo de flexão no seu estado limite último é caracterizado pelas deformações específicas de cálculo do concreto e

do aço que atingem suas máximas deformações específicas de cada material (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2007).

Para o dimensionamento de peças de concreto à flexão, de acordo com suas deformações específicas determinadas a partir de seus materiais constituintes, são definidos domínios de deformação que apresentam as diversas possibilidades de ruína da seção.

**Figura 16 - Domínios de deformação no estado limite último em uma função transversal**

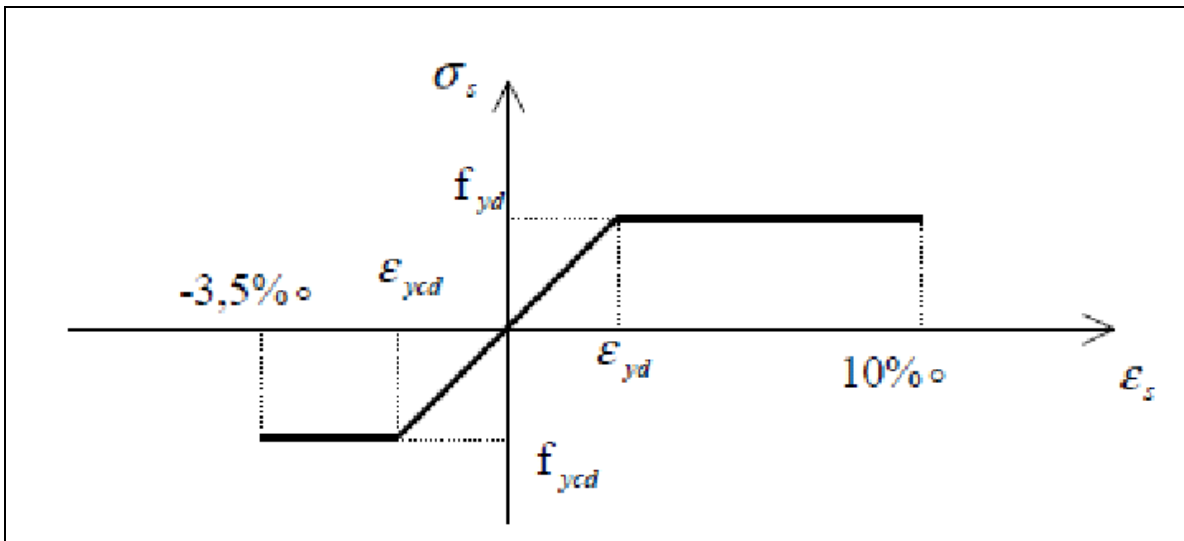


Fonte: NBR 6118 (2003, p.108)

Os conjuntos de deformações específicas do concreto e do aço, ao longo de uma seção transversal retangular com armadura simples (só tracionada) submetida a ações normais, definem seis domínios de deformação. Destes seis domínios existentes serão descritos apenas os domínios dois e três que são indicados para o dimensionamento à flexão simples.

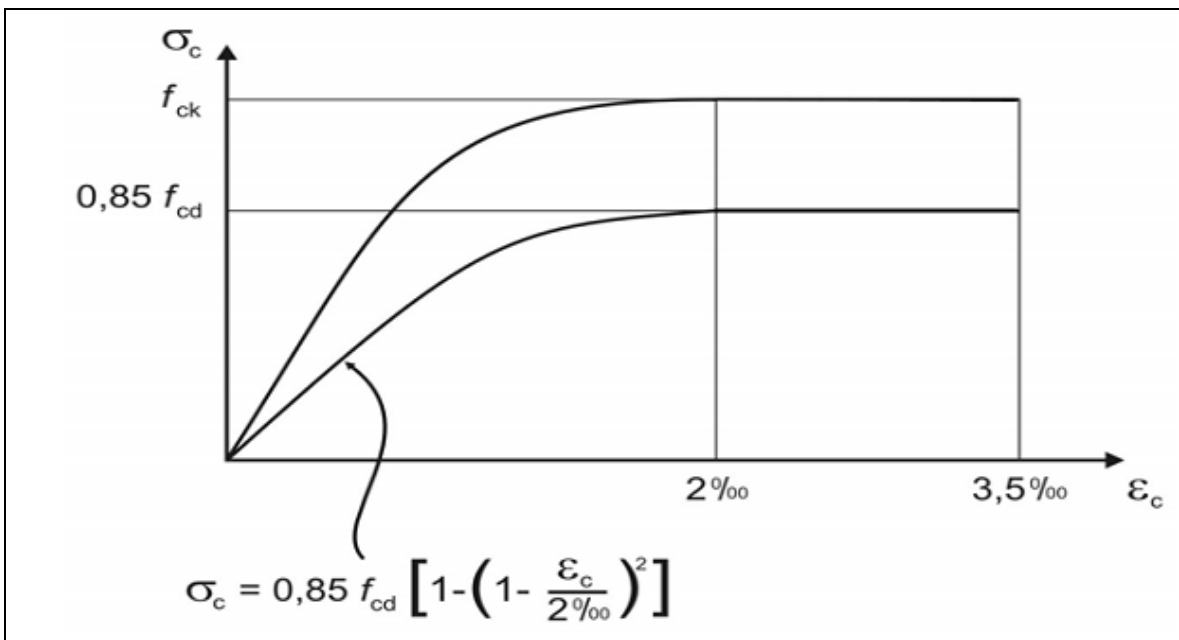
Nesses domínios o concreto comprimido apresenta uma deformação máxima de encurtamento de 3,5/1000 (Figura 18) e para o aço tracionado a máxima deformação de alongamento é de 10/1000 (Figura 17).

**Figura 17 - Diagrama tensão deformação do aço**



Fonte: NBR6118 (2003, p.24)

**Figura 18 - Diagrama tensão deformação do concreto**

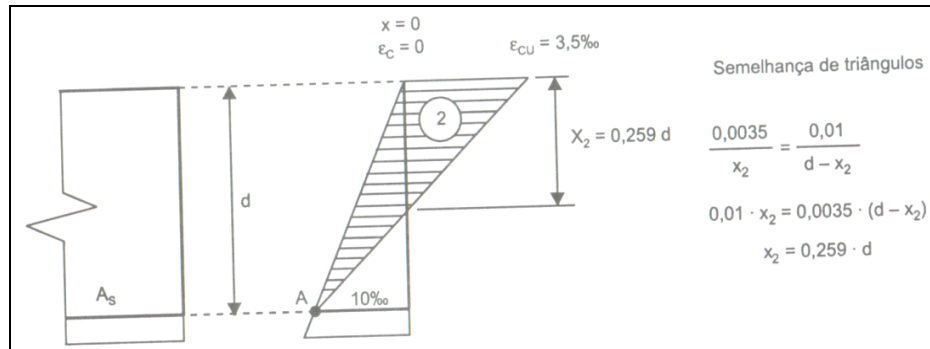


Fonte: Carvalho e Figueiredo Filho (2003, p.25)

Domínio 2: É a situação de flexão simples ou composta. O aço encontra-se com deformação específica máxima,  $\epsilon_s = 10\text{‰}$ . A deformação do concreto varia desde zero até o limite de compressão de  $3,50\text{‰}$ . Por semelhança de triângulos, quando as deformações no concreto e aço são máximas, a profundidade da linha

neutra é  $0,259 \cdot d$ . No domínio 2 o estado limite ainda é alcançado pela deformação do aço, a linha neutra localiza-se dentro da seção e a seção resistente é formada pelo aço tracionado e pelo concreto comprimido.

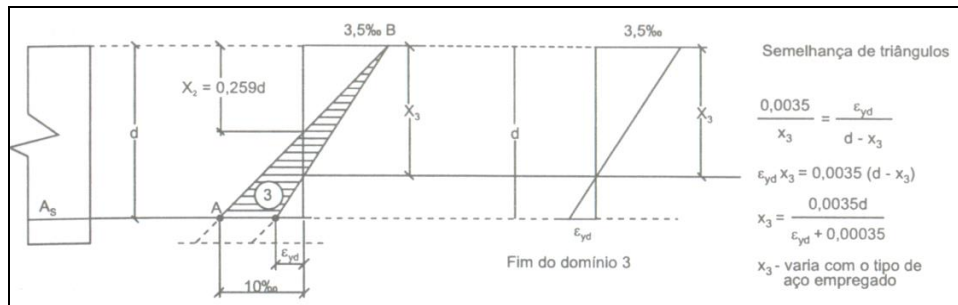
**Figura 19 - Domínio 2**



Fonte: Carvalho e Figueiredo Filho (2007, p. 112)

Domínio 3: Este domínio é de flexão simples com seção subarmada ou composta. A deformação do concreto,  $\epsilon_c = 3,50\text{‰}$ , é o limitante. A deformação do aço varia entre o limite de  $\epsilon_s = 10\text{‰}$  e  $\epsilon_{y,d}$ , deformação específica de escoamento do aço. A linha neutra corta a seção no limite entre os domínios 3 e 4 e a sua profundidade varia em função do tipo de aço. A seção resistente é composta pelo aço tracionado e pelo concreto comprimido. A ruptura da região de concreto ocorre simultaneamente ao escoamento da armadura. Esta situação é a mais econômica de dimensionamento, com os dois materiais trabalhando no limite. Como a seção é subarmada a ruína da seção se dá com aviso, com grandes deformações.

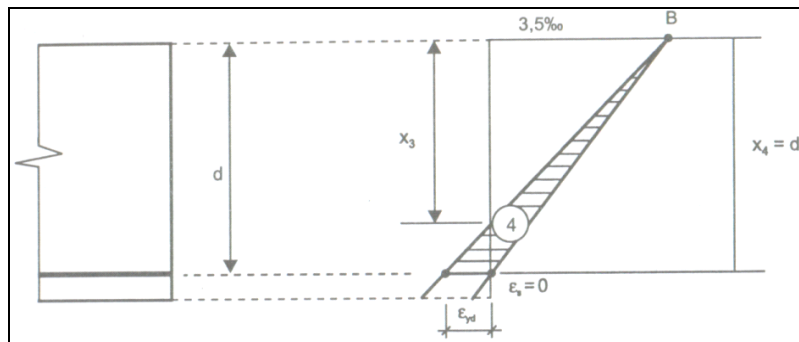
**Figura 20 - Domínio 3**



Fonte: Carvalho e Figueiredo Filho (2007, p. 113)

Domínio 4: Domínio de flexão simples com seção superarmada ou composta. Neste domínio o concreto trabalha na máxima deformação específica,  $\epsilon_c = 3,50\%$ , por compressão e o aço trabalha abaixo da deformação específica de escoamento do material ( $\epsilon_s < \epsilon_{yd}$ ), ou seja, o estado limite último é atingido em função da ruptura do concreto. Sabendo que o concreto é um material não dúctil ou frágil, a ruptura da seção tende a acontecer sem aviso, de maneira brusca.

**Figura 21 - Domínio 4**



Fonte: Carvalho e Figueiredo Filho (2007, p. 114)

Para o dimensionamento à flexão no estado limite último será calculado nos domínios 2 e 3 como será visto. Nos domínio 2 e 3 o diagrama de tensões é demonstrado por um comportamento parabólico retangular, entretanto o diagrama parábola-retângulo, para efeito de análise da seção pode ser simplificado por um diagrama retangular de altura conforme equação (5) e a tensão máxima no diagrama retangular conforme equação (6).

$$y = 0,8x \quad \text{Equação (5)}$$

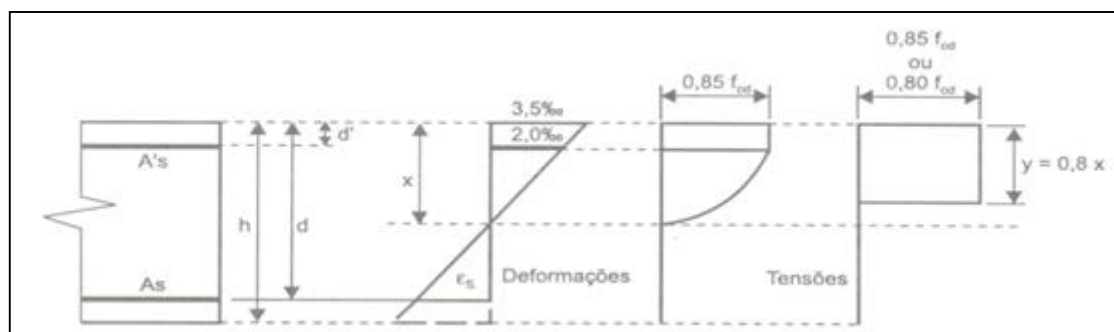
Onde  $x$  é a profundidade da linha neutra.

$$\sigma_c = 0,85 \cdot f_{cd} \quad \text{Equação (6)}$$

O  $f_{cd}$  pode ser determinado pela equação (2).

A figura 22 demonstra a profundidade da linha neutra e a tensão máxima no diagrama retangular para seções de largura constante ou crescente no sentido das fibras mais comprimidas.

**Figura 22 - Diagrama de tensões do concreto no estado limite último**



Fonte: Carvalho; Figueiredo Filho (2007, p. 108)

Sendo assim, o momento resistente de uma viga de concreto armado reforçada é constituída de resultantes na seção comprimida do concreto, na seção tracionada da armadura e na seção tracionada do reforço (Machado, 2006):

$$R_{sd} = A_s \cdot f_{yd} \quad \text{Equação (7)}$$

Onde:



$R_{sd}$  = Força resultante da seção tracionada da armadura;

$A_s$  = Área de aço tracionada;

$f_{yd}$  = Tensão (resistência) de escoamento de cálculo do aço.

$$R_{cd} = 0,85 \cdot b_w \cdot y \cdot f_{cd} \quad \text{Equação (8)}$$

Onde:

$R_{cd}$  = Força resultante da seção comprimida de concreto;

$b_w$  = Largura da seção de concreto;

$f_{cd}$  = Resistência de cálculo do concreto;

$y$  = Altura do diagrama retangular de tensões de compressão no concreto na seção transversal de uma peça fletida.

$$z = d - 0,5y \quad \text{Equação (9)}$$

Onde:

$z$  = Braço de alavanca;

$d$  = Distância entre o centro de gravidade da armadura longitudinal tracionada até a fibra mais comprimida de concreto;

$y$  = Altura do diagrama retangular de tensões de compressão no concreto na seção transversal de uma peça fletida.

O  $f_{cd}$  pode ser determinada pela equação (2),  $f_{yd}$  pela equação (3) e o  $y$  pela equação (5).

O dimensionamento apresenta-se por três equações de equilíbrio, onde são usados as equações simplificadas dos domínios 2 e 3 conforme figura 16:

$$M_d = R_{cd} \cdot z \quad \text{Equação (10)}$$

$$M_d = R_{sd} \cdot z \quad \text{Equação (11)}$$

$$R_{cd} = R_{sd} \quad \text{Equação (12)}$$

Onde:

$M_d$ - Momento resistente de cálculo;

$R_{cd}$ - Força resultante na seção comprimida do concreto;

$R_{sd}$ - Força resultante na seção tracionada da armadura.

Substituindo as equações (8) e (9) na equação (10) obtém-se:

$$M_d = 0,85 \cdot b_w \cdot y \cdot f_{cd} \cdot (d - 0,5y)$$

Substituindo as equações (7) e (9) na equação (11) tem-se:

$$M_d = A_s \cdot f_{yd} (d - 0,5y)$$

Substituindo as equações (7) e (8) na equação (12) chega-se:

$$0,85 \cdot b_w \cdot y \cdot f_{cd} = A_s \cdot f_{yd}$$

O dimensionamento para as peças reforçadas, como já se pode ver anteriormente é feito com base nos conceitos do dimensionamento convencional das vigas de concreto armado à flexão, pelo ELU. Porém agora se introduz um material que ajudará no combate à tração, em conjunto ou não com a armadura já existente (RELVAS, 2003).

Relvas (2003) destaca que o elemento estrutural a ser reforçado deverá estar o mais descarregado possível, não tendo assim deformações específicas iniciais. Se por algum motivo a peça não puder ser descarregada totalmente, ocorrerão deformações específicas iniciais, em função dos esforços internos solicitantes correspondentes. Estas deformações iniciais deverão ser levadas em conta do dimensionamento do reforço, mais especificamente na deformação do mesmo.

Assim, as equações de equilíbrio com o acréscimo do reforço serão:

$$M_d = R_{cd} \cdot z \quad \text{Equação (13)}$$

Onde:

$M_d$ - Momento resistente de cálculo;

$R_{cd}$  - Força resultante na seção comprimida do concreto;

$z$  - Braço de alavanca.

$$M_d = R_{sd} \cdot z_1 + R_{ref} \cdot z_2 \quad \text{Equação (14)}$$

Onde:

$M_d$  - Momento resistente de cálculo;

$R_{sd}$  - Força resultante na seção tracionada da armadura;

$z_1$  - Braço de alavanca (distancia entre o centro de gravidade da amadura de tração e o centro de gravidade da região comprimida do concreto);

$R_{ref}$  - Força resultante da seção tracionada do reforço;

$z_2$  - Braço de alavanca (distancia entre o centro de gravidade da seção tracionada de fibra de carbono e o centro de gravidade da região comprimida do concreto).

$$R_{cd} = R_{sd} + R_{ref} \quad \text{Equação (15)}$$

Onde:

$R_{cd}$  - Força resultante na seção comprimida do concreto;

$R_{sd}$  - Força resultante na seção tracionada da armadura;

$R_{ref}$  - Força resultante da seção tracionada da fibra de carbono.

$$z_1 = d - 0,5y \quad \text{Equação (16)}$$

Onde:

$z_1$  - Braço de alavanca (distância entre o centro de gravidade da amadura de tração e o centro de gravidade da região comprimida do concreto);

$d$  = Distância entre o centro de gravidade da armadura longitudinal tracionada até a fibra mais comprimida de concreto;

$y$  = Altura do diagrama retangular de tensões de compressão no concreto na seção transversal de uma peça fletida.

$$z_2 = h - 0,5y \quad \text{Equação (17)}$$

Onde:

$z_2$  - Braço de alavanca (distancia entre o centro de gravidade da seção tracionada de fibra de carbono e o centro de gravidade da região comprimida do concreto);

$h$  - Altura total da seção transversal de uma peça;

$y$  = Altura do diagrama retangular de tensões de compressão no concreto na seção transversal de uma peça fletida.

$$R_{ref} = A_{ref} \cdot F_{ref} \quad \text{Equação (18)}$$

Onde:

$R_{ref}$  - Força resultante da seção tracionada Do reforço;

$A_{ref}$  - Área necessária do reforço (cm<sup>2</sup>);

$F_{ref}$  - Tensão de tração do reforço.

$$F_{ref} = E \cdot \varepsilon \quad (\text{Obtido pela Lei de Hooke}) \quad \text{Equação (19)}$$

Onde:

$F_{ref}$  - Tensão de tração do reforço;

$E$  - Módulo de elasticidade;

$\varepsilon$  - Coeficiente de deformação.

Substituindo as equações (8) e (9) na equação (13) se obtém:

$$M_d = 0,85 \cdot b_w \cdot y \cdot f_{cd}(d - 0,5y)$$

Substituindo as equações (7), (16), (17) e (18) na equação (14) se tem:

$$M_d = A_s \cdot f_{yd}(d - 0,5y) + A_{ref} \cdot F_{ref}(h - 0,5y)$$

Substituindo as equações (7), (8) e (18) na equação (15) se chega a:

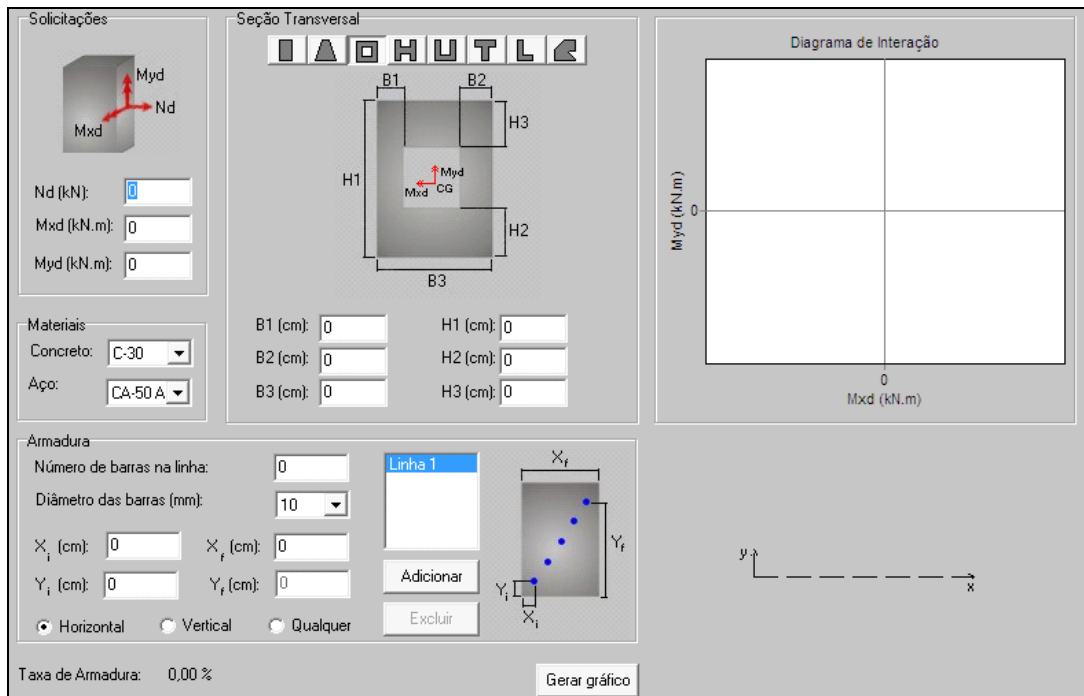
$$0,85 \cdot b_w \cdot y \cdot f_{cd} = A_s \cdot f_{yd} + A_{ref} \cdot F_{ref}$$

### **3.6 Dimensionamento de estrutura com aumento da seção transversal (encamisamento de concreto)**

#### **3.6.1 Dimensionamento e verificação da estrutura de concreto**

O dimensionamento de uma seção composta de concreto sujeita a flexo-compressão oblíqua deve ser realizado pelo equilíbrio da seção pesquisando a inclinação e profundidade da linha neutra na seção e, considerando a posição de cada um dos elementos aço e concreto, obterem os esforços resistentes da mesma. Esta forma de cálculo de seções é conhecida como método geral, pois permite calcular o equilíbrio de qualquer configuração de seção desde que se disponha de ferramenta computacional adequada já que a morosidade do processo torna seu emprego manual proibitivo. Estão disponíveis gratuitamente alguns programas de cunho educacional que resolvem seções pelo método geral. Entre eles o desenvolvido pela Universidade Federal do Paraná, no Centro de Estudos de Engenharia Civil – CESEC pelos professores Marcos Antônio Marinho e Sergio Scheer. Este programa calcula o equilíbrio de seções com formas pré-definidas para qualquer situação de armação e esforços solicitantes. No entanto, não é possível combinar dois diferentes tipos de concreto em uma mesma seção.

**Figura 23 - Programa para cálculo do equilíbrio de seções de concreto armado**



Fonte: Própria

No presente trabalho o programa citado foi usado de maneira combinada com outro desenvolvido na Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelo professor Américo Campos Filho. Este segundo é mais geral, pois permite praticamente qualquer configuração de seção, no entanto seu emprego é mais complexo por depender da criação de arquivo de entrada de dados e interpretação dos resultados.

Figura 24 - Programa para dimensionamento de seções de concreto armado

**DECIV - UFRGS**

## Dimensionamento e Verificação de Seções de Concreto Armado submetidas à Flexão Composta Oblíqua

**Esforços Atuantes**

$N_{Ad} =$                        $M_{Axd} =$                        $M_{Ayd} =$

**Esforços Resistentes**

$N_{Rd} =$                        $M_{Rxd} =$                        $M_{Ryd} =$

**Resultados**

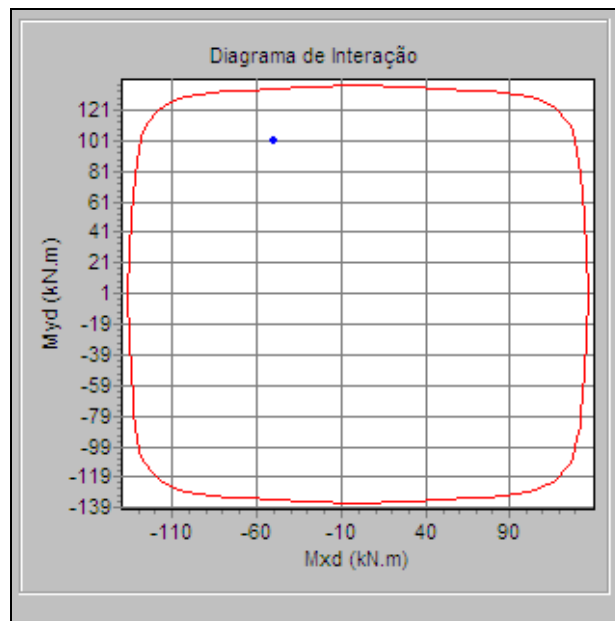
Reserva:  
 Deformação na Fibra Inferior da Seção:  
 Deformação na Fibra Superior da Seção:  
 Inclinação da Linha Neutra:

abrir      desenhar      executar

Fonte: Própria

Assim, aqui se usou o primeiro programa para avaliar a necessidade ou não de reforço, além de testar seções que ficassem próximas de atender os esforços solicitados, e o segundo programa foi usado para estabelecer o equilíbrio final da seção combinada.

Os resultados do primeiro programa são apresentados na forma de uma superfície de interação que aponta os momentos resistentes para um determinado valor de esforço normal solicitante.

**Figura 25 - Resultados do programa por meio da superfície de interação**

Fonte: Própria

Já o programa desenvolvido na UFRGS necessita que seja fornecida a poligonal que forma a seção, regiões e resistência dos concretos envolvidos, distribuição das barras de aço a serem testadas e esforços solicitantes. Na saída de resultados obtém-se a área de aço necessária, as deformações específicas máximas e mínimas nos extremos da seção e inclinação da linha neutra de maneira que a seção com a geometria dada seja capaz de equilibrar os esforços solicitantes.



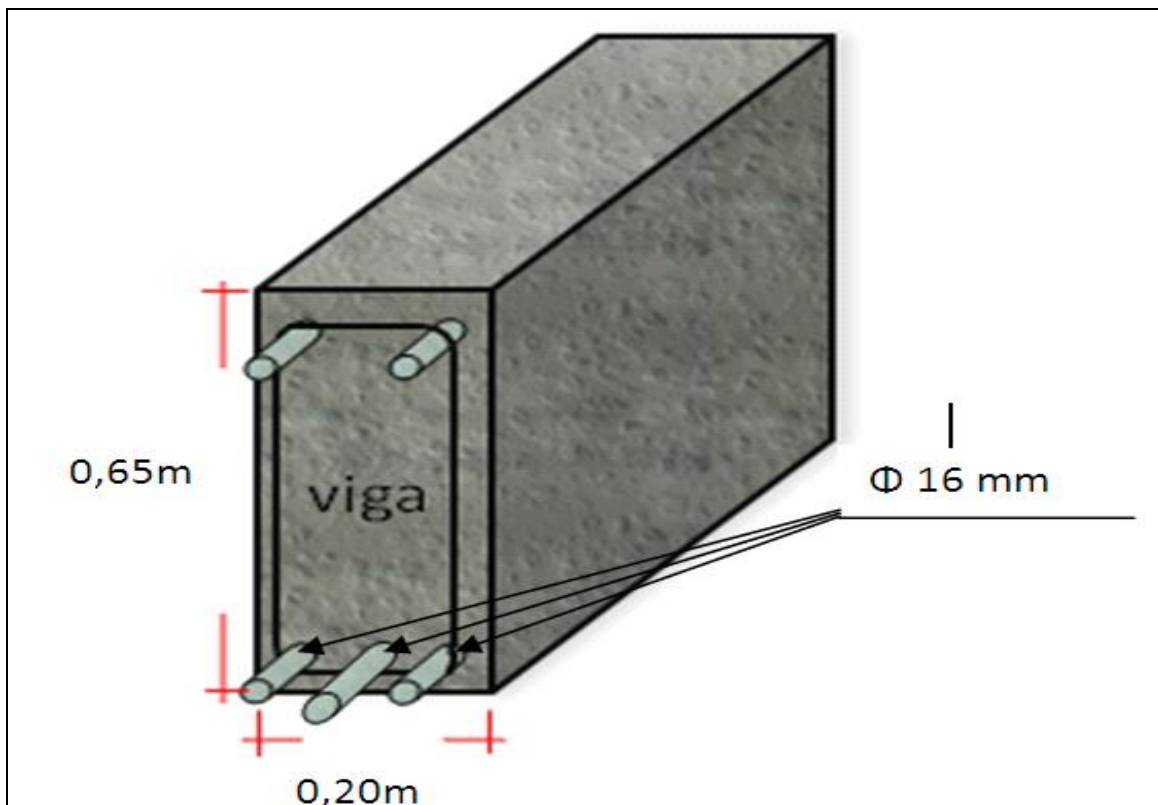
## 4 RESULTADOS

Na sequência serão apresentados exemplos que mostram o emprego da metodologia de cálculo para cada um dos tipos de reforço estrutural apresentados neste trabalho.

### 4.1 Exercício de dimensionamento à flexão

Deseja-se transformar uma sala de aula de uma escola para uso como biblioteca. A sala está localizada no segundo pavimento da escola, com vigas de concreto armado de 6,8 m de comprimento, e seção 0,20 m x 0,65 m, armadura tração existente  $A_s = 6,03 \text{ cm}^2$  (3  $\phi 16\text{mm}$ ) e momento máximo característico atuante na viga (cargas permanentes e acidentais) é de 79 kN.m. A nova sobrecarga para a viga mais carregada irá gerar um momento fletor característico máximo de 190kN.m, na qual se aplicará o reforço.

**Figura 26 - Viga de concreto armado**



Fonte: Própria

Dados:

Resistência característica do concreto aos 28 dias de idade,  $f_{ck} = 25$  Mpa.

Largura da viga, = 20 cm.

Altura da viga, = 65 cm.

Altura útil da viga, = 61 cm.

Tipo de aço - CA-50

## 4.2 Solução (reforço com fibra de carbono)

### 4.2.1 Dimensionamento da viga no seu estado original

Deve-se inicialmente verificar a real capacidade da viga de concreto armado.

Logo, calcula-se a resistência de cálculo do concreto e do aço, com os seus respectivos coeficientes para situações normais de acordo com a Tabela (1).

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1,15}$$

Usa-se a equação (12) pela equação de equilíbrio:

$$R_{cd} = R_{sd}$$

Substituindo obtém-se a profundidade da linha neutra:

$$A_s \cdot f_{yd} = 0,85 \cdot b_w \cdot y \cdot f_{cd}$$

$$6,03 \cdot \frac{50}{1,15} = 0,85 \cdot 20 \cdot y \cdot \frac{2,5}{1,4}$$

$$262,17 = 30,36y$$

$$y = 8,63 \text{ cm}$$

Cálculo do Momento resistente da viga pela equação (10):

$$M_d = R_{cd} \cdot z$$

Substituindo-se:

$$M_d = A_s \cdot f_{yd} (d - 0,5y)$$

$$M_d = 6,03 \cdot \frac{50}{1,15} \cdot (61 - 0,5 \cdot 8,63)$$

$$M_d = 14861,33 \text{ kN} \cdot \text{cm} = 148,61 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_k = \frac{M_d}{\gamma}$$

$$M_k = \frac{148,61}{1,4} = 106,15 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Portanto:

$$M_{k \text{ resist.}} < M_{\text{máximo}}$$

$$106,15 \text{ kN} \cdot \text{m} < 190 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Logo, se constata que será necessário reforço da viga.

#### 4.2.2 Deformações iniciais

Verificando as deformações iniciais da viga para a situação de momento atuante de  $79 \text{ kN} \cdot \text{m}$  (cargas permanentes e acidentais), antes da modificação da sala devido ao uso.

Agora se utiliza a equação (10):

$$M_d = R_{cd} \cdot z$$

Substituindo obtém-se:

$$M_d = b_w \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot y (d - 0,5y)$$

$$M_d = b_w \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot y (d - 0,5y)$$

$$7900kN \cdot cm \cdot 1,4 = 0,85 \cdot \frac{2,5}{1,4} \cdot 20 \cdot y(61 - 0,5y)$$

$$11060kN \cdot cm = 1,52 \cdot 20y(61 - 0,5y)$$

$$11060kN \cdot cm = 1,52 \cdot 1220y - 10y^2$$

$$10y^2 - 1854,4y + 11060 = 0$$

Resolvendo a equação quadrática, obtém-se duas soluções:

$$y_1 = \frac{1854,4 + 1731,01}{20} = 179,27cm$$

$$y_2 = \frac{1854,4 - 1731,01}{20} = 6,16cm$$

Observa-se que o valor de  $y_1$  fica fora da seção retangular da peça, enquanto  $y_2$  permanece na área da seção.

Logo, se usay = 6,16 cm

Com isso pode-se obter:

$$y = 0,8x$$

$$6,16 = 0,8x$$

$x = 7,7cm$ , onde  $x$  é a profundidade da linha neutra.

Conhecendo-se a posição da linha neutra, é possível calcular a resultante das tensões de compressão do concreto  $R_{cd}$ .

$$R_{cd} = 0,85 \cdot b_w \cdot y \cdot f_{cd}$$

$$R_{cd} = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot (0,8x)$$

$$R_{cd} = 0,85 \cdot \frac{2,5}{1,4} \cdot 20 \cdot 6,16 = 187 kN$$

Com isso calcula-se a tensão do aço:

$$\sigma_s = \frac{R_{cd}}{A_s}$$

$$\sigma_s = \frac{187}{6,03};$$

$$\sigma_s = 31,01 \text{ kN/cm}^2$$

Logo, pode-se obter a deformação específica do aço por:

$$\varepsilon_{si} = \frac{\sigma_s}{\varepsilon_s}$$

$$\varepsilon_{si} = \frac{31,01}{2,1 \cdot 10^{-4}}$$

$$\varepsilon_{si} = 14,76 \cdot 10^{-4} = 1,476/1000$$

Posteriormente obtém-se o cálculo da deformação pré-existente do reforço.

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{si} \cdot \frac{(h - x)}{(d - x)}$$

$\varepsilon_i$  - Deformação pré-existente quando da instalação do reforço.

$$\varepsilon_i = \frac{1,476}{1000} \cdot \frac{(65 - 7,7)}{(61 - 7,7)}$$

$$\varepsilon_i = 1,586/1000$$

### 4.2.3 Dimensionamento do reforço

Dimensionamento do reforço de uma estrutura de concreto armado considerando o momento máximo de 190kN m.

Da equação (10):  $M_d = R_{cd} \cdot z$

Substituindo, obtém-se:

$$M_d = b_w \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot y(d - 0,5y)$$

$$19000 \text{ KN} \cdot \text{cm} \cdot 1,4 = 0,85 \cdot \frac{2,5}{1,4} \cdot 20 \cdot y(61 - 0,5y)$$

$$26600 \text{ KN} \cdot \text{cm} = 1,52 \cdot 20y(61 - 0,5y)$$

$$266000 = 1,52 \cdot 1220y - 10y^2$$

$$10y^2 - 1854,4y + 26600 = 0$$

Resolvendo a equação quadrática, obtém-se:

$$y_1 = \frac{1854,4 + 1541,04}{20} = 169,77$$

$$y_2 = \frac{1854,4 - 1541,04}{20} = 15,67$$

Pode-se observar que o valor de  $y_1$  fica fora da seção retangular da peça, enquanto  $y_2$  permanece na área da seção.

Logo,  $y_2 = y = 15,67 \text{ cm}$ .

Com isso pode-se obter:

$$y = 0,8x$$

$$15,67 = 0,8x$$

$x = 19,59 \text{ cm}$ , onde  $x$  é a profundidade da linha neutra.

Obtém-se também a deformação específica do aço à tração:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_c \cdot \frac{(d - x)}{x}$$

$$\varepsilon_s = 3,5 / 1000 \cdot \frac{(61 - 19,59)}{19,59}$$

$$\varepsilon_s = 7,39 / 1000$$

$\varepsilon_s$  = deformação específica do aço à tração

$\varepsilon_c$  = deformação específica do concreto à tração

Posteriormente pode-se calcular a deformação que ocorre no reforço:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_s \cdot \frac{(h - x)}{(d - x)}$$

$$\varepsilon_f = 7,39/1000 \cdot \frac{(65 - 19,59)}{(61 - 19,59)}$$

$$\varepsilon_f = 8,10/1000$$

Portanto:  $\varepsilon_{ref} = \varepsilon_f - \varepsilon_i$

$$\varepsilon_{ref} = \frac{8,10}{1000} - \frac{1,586}{1000}$$

$$\varepsilon_{ref} = \frac{6,51}{1000}$$

Onde:

$\varepsilon_{ref}$  - Deformação específica do reforço;

$\varepsilon_f$  - Deformação no reforço considerando o carregamento máximo;

$\varepsilon_i$  - Deformação pré-existente quando da instalação do reforço.

#### 4.2.4 Características da fibra de carbono

Material: Fibra (Viapol – Carbon CFW 300)

Espessura: 0,166mm

Tensão de ruptura: 2100 Mpa – 210 kN/cm<sup>2</sup>

Módulo de elasticidade: 230 Gpa – 230000 Mpa

De acordo com a Lei de Hooke:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_{ref}}$$

$$\sigma = 23000 \cdot \frac{6,51}{1000}$$

$$\sigma = 149,73 \text{ kN/cm}^2$$

Onde:

$\varepsilon_{ref}$  - Deformação específica do reforço;

$E$  - Módulo de elasticidade;

$\sigma$  - Tensão de tração.

Usa-se a equação (14) para estabelecer o equilíbrio:

$$M_d = R_{sd} \cdot R_{ref} \cdot z_2$$

Onde  $R_{ref}$  é a resistência à tração do reforço, podendo-se calcular por:

$$R_{ref} = A_{ref} \cdot F_{ref}$$

$$\sigma = F_{ref} = \text{Tensão de tração do reforço}$$

$$y = 15,67 \text{ cm (retirado do dimensionamento do reforço).}$$

Substituindo na equação:

$$M_d = A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - 0,5y) + A_f \cdot F_{ref}(h - 0,5y)$$

$$19000 \cdot 1,4 = 6,03 \cdot \frac{50}{1,15} \cdot (61 - 0,5 \cdot 15,67) + A_{ref} \cdot 149,73(65 - 0,5 \cdot 15,67)$$

$$26600 = 13938,48 + 8559,31 \cdot A_{ref}$$

E a área total necessária da fibra de carbono é:

$$A_{ref} = 1,48 \text{ cm}^2$$



Agora se pode calcular a largura necessária da fibra de carbono:

$$L_f = \frac{A_f}{e_f}$$

$$L_f = \frac{1,48}{0,0166}$$

$$L_f = 89,15$$

Como a largura da fibra deve ser a mesma da viga, chega-se a mais de uma camada de fibra.

$$\frac{89,15}{20} = 4,45 \text{ camadas}$$

Solução: a viga precisaria de 5 camadas da fibra de carbono, visto que a largura da viga é igual a 20 cm.

### Figura 27 - Aplicação da fibra de carbono por camadas



Fonte: Própria

### 4.3 Solução (reforço com chapa de aço colada)

Utilizam-se os esforços obtidos anteriormente para que obtenha-se a área de reforço (chapa de aço).

Dados da chapa de aço a serem utilizadas:

ASTM A-36

$$f_{yk} = 2500 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$E = 210 \text{ Gpa}$$

Os valores dos coeficientes de ponderação da resistência da chapa de aço são retirados da NBR 8800 (2008), conforme Quadro 1.

**Quadro 1 - Valores dos coeficientes de ponderação das resistências  $\gamma_m$**

Combinações	Aço estrutural <sup>a</sup>		Concreto $\gamma_c$	Aço das armaduras $\gamma_s$
	$\gamma_a$			
	Escoamento, flambagem e instabilidade $\gamma_{a1}$	Ruptura $\gamma_{a2}$		
Normais	1,10	1,35	1,40	1,15
Especiais ou de construção	1,10	1,35	1,20	1,15
Excepcionais	1,00	1,15	1,20	1,00

<sup>a</sup> Inclui o aço de fôrma incorporada, usado nas lajes mistas de aço e concreto, de pinos e parafusos.

Fonte: NBR8800 (2008, p.23).

Empregando-se os coeficientes para a ponderação da resistência chega-se a tensão de escoamento do aço de reforço, situação de projeto  $f_{ydr}$ .

$$f_{ydr} = \sigma_{rd} = \frac{250}{1,35} = 185,18 \text{ Mpa}$$

$$M_d = A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - 0,5y) + A_f \cdot F_{ref}(h - 0,5y)$$

$$19000 \cdot 1,4 = 6,03 \cdot \frac{50}{1,15} \cdot (61 - 0,5 \cdot 15,67) + A_f \cdot 18,518(65 - 0,5 \cdot 15,67)$$

$$26600 = 13938,48 + 1058,58 \cdot A_{ref}$$

E a área total necessária da chapa de aço é:

$$A_{ref} = 11,96 \text{ cm}^2$$

Adotando-se largura de chapa igual a largura da viga, 20cm, resulta a espessura necessária da chapa.

$$e = \frac{11,96}{20} = 0,5980$$

Logo, se utiliza chapa de aço com 6 mm de espessura e largura de 20 cm, sendo toda viga reforça, pois não foi calculado o comprimento de ancoragem.

#### 4.4 Exercícios de dimensionamento à compressão

Exercício 1:

O exercício proposto foi elaborado a partir da escolha de uma seção composta de concreto armado, formada por duas regiões em concreto com  $f_{ck}$  diferentes, com dimensões e posição das armaduras definidas. Para esta seção definida aplicou-se os esforços solicitantes:  $N_d = 200 \text{ kN}$ ,  $M_x = 0$ ,  $M_y = -50 \text{ kN} \cdot \text{cm}$ .

A seção aqui escolhida buscou simular a situação de reforço de um pilar central de um edifício (pilar quadrado, 30x30cm) reforçado em todo entorno da seção (60x60x15x15cm). O pilar existente foi idealizado com resistência característica de 15 MPa e 8 barras de aço de diâmetro de  $\varnothing 8\text{mm}$ , 4 nos cantos e uma no meio de cada face. O reforço foi idealizado com resistência característica de 30 MPa e 24 barras de aço com diâmetro adotado de  $\varnothing 10 \text{ mm}$ .

O cobrimento das armaduras foi adotado uniforme de 2,5cm em ambas as seções, tanto interna quanto externamente. O diâmetro das armaduras transversais foi adotado como  $\varnothing 5 \text{ mm}$ .

Os dados do problema são resumidos abaixo:

$$f_{ck} \text{ pilar original} = 1,5 \text{ kN/cm}^2.$$

$f_{ck}$  = Resistência característica do concreto à compressão.

$$f_{ck\text{reforço}} = 3,0 \text{ kN/cm}^2$$

$f_{ck}$  = Resistência característica do concreto a compressão.

$$E_s = 21000 \text{ kN/cm}^2$$

$E_s$  = Módulo de elasticidade do aço.

$$f_{yk} = 50 \text{ kN/cm}^2$$

$f_{yk}$  = Resistência característica do aço à tração.

$$\gamma_c = 1,4$$

$$\gamma_s = 1,15$$

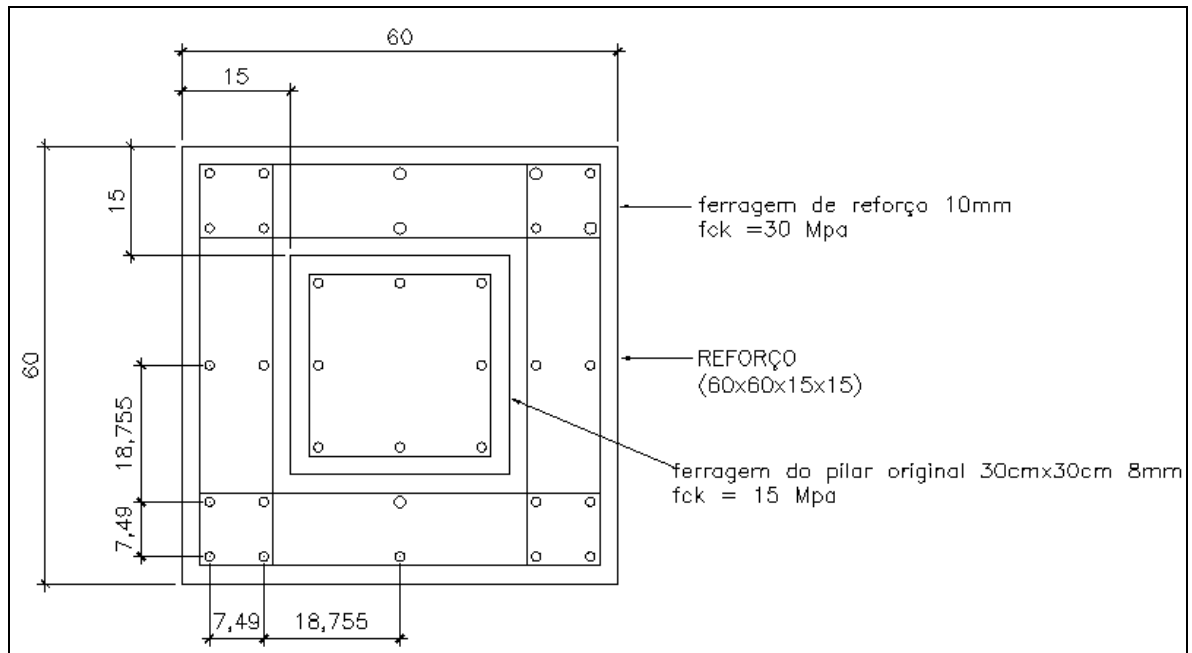
Os valores dos coeficientes de minoração  $\gamma_c$  e  $\gamma_s$  apresentam-se na tabela 1, conforme a NBR 6118 (2003) e são válidos para estados limites últimos.

Dos dados obtém-se:

$$\varepsilon_{yd} = f_{yd} / E_s = [(50 / 1,15) / 21000] = 2,07 \cdot 10^{-3}$$

$\varepsilon_{yd}$  - Deformação de cálculo do aço.

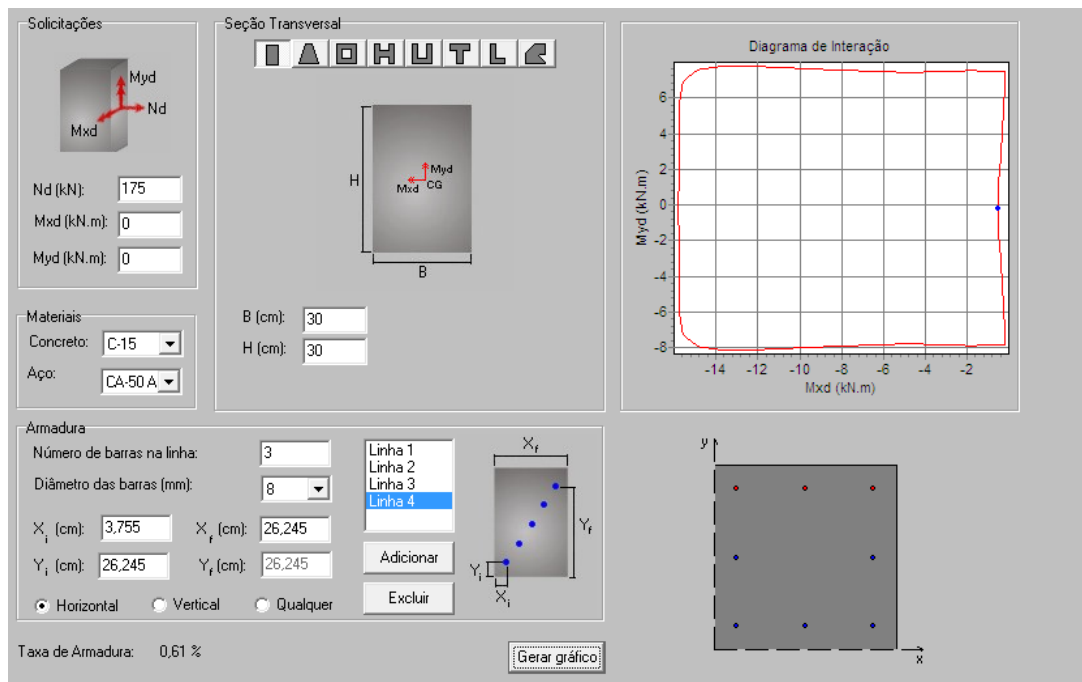
**Figura 28 - Seção de concreto avaliada**



Fonte: Própria

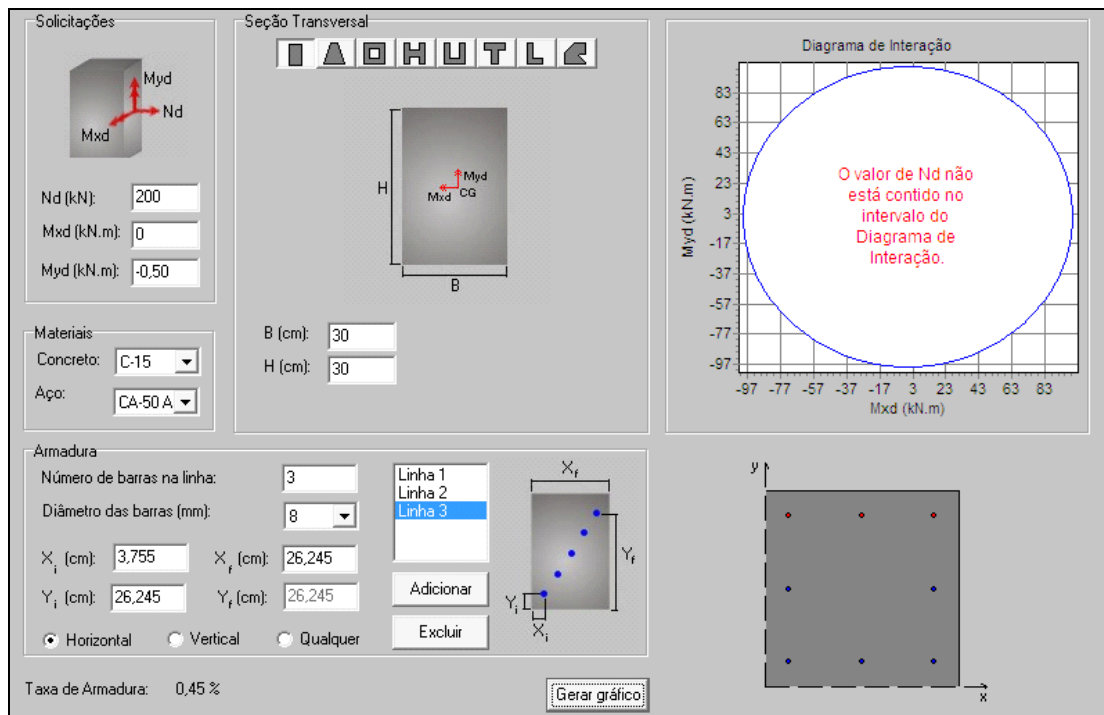
Aplicando-se os dados originais da estrutura de concreto no programa desenvolvido pela Universidade Federal do Paraná, conclui-se que o pilar necessita de reforço, pois não suporta os esforços solicitantes.

**Figura 29 - Máximo esforço que a seção original do pilar de concreto armado pode suportar – 175 kN.**



Fonte: Própria

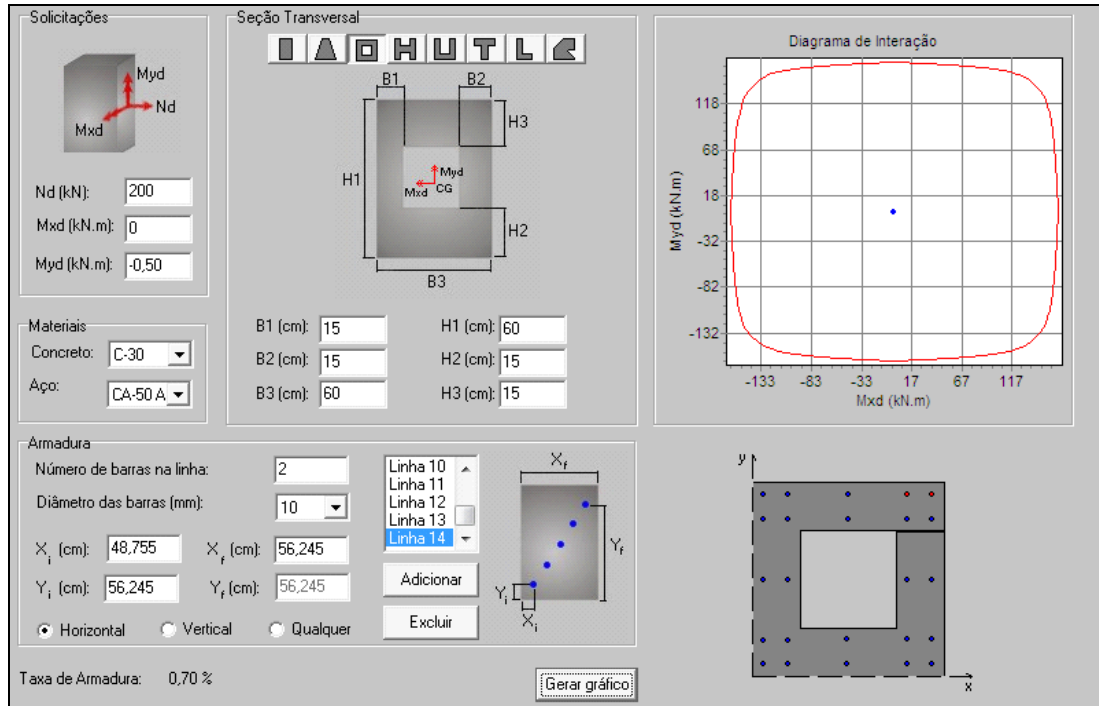
**Figura 30 - Seção original do pilar de concreto armado – esforço de 200 kN**



Fonte: Própria

Testando agora apenas a região de reforço, seção anelar.

**Figura 31 - Seção de reforço a ser implantado no pilar original**



Fonte: Própria

Pode-se observar no diagrama de interação que o reforço a ser implantado atende aos esforços solicitantes mesmo quando é desprezada a seção original.

Depois de demonstrado que a estrutura de reforço suporta os esforços sobre a mesma, aplicou-se as informações de entrada no programa desenvolvido pelo professor Américo Campus Filho da Universidade Federal do RS.

**Figura 32 - Seção de reforço implantada na seção original do pilar de concreto armado**



Fonte: Própria

Analisando os resultados obteve-se a área de aço, deformações da fibra superior e inferior e inclinação da linha neutra.

Resumindo:

Área de aço encontrada = 16,48 cm<sup>2</sup>

Deformação fibra inferior = 5,20 / 1000

Deformação fibra superior = - 3,5 / 1000

Inclinação da linha neutra = - 5,21E+1

Abaixo se transcreve o arquivo empregado para fornecer os dados de entrada ao programa.



Figura 33 - Dados de entrada do programa

1				
1.4	1.15			
18				
0	0			
60	0			
60	60			
0	60			
0	0			
0	60			
60	60			
60	0			
0	0			
15	15			
45	15			
45	45			
15	45			
15	15			
15	45			
45	45			
45	15			
15	15			
2				
3	9			
1.5	18			
32	21000	1		
3.755	3.755	50	0.031	A
11.245	3.755	50	0.031	A
30	3.755	50	0.031	A
48.755	3.755	50	0.031	A
56.245	3.755	50	0.031	A
3.755	11.245	50	0.031	A
11.245	11.245	50	0.031	A
30	11.245	50	0.031	A
48.755	11.245	50	0.031	A
56.245	11.245	50	0.031	A
18.755	18.755	50	0.031	A
30	18.755	50	0.031	A
41.245	18.755	50	0.031	A
3.755	30	50	0.031	A
11.245	30	50	0.031	A
18.755	30	50	0.031	A
41.245	30	50	0.031	A
48.755	30	50	0.031	A
56.245	30	50	0.031	A
18.755	41.245	50	0.031	A
30	41.245	50	0.031	A
41.245	41.245	50	0.031	A
3.755	48.755	50	0.031	A
11.245	48.755	50	0.031	A
30	48.755	50	0.031	A
48.755	48.755	50	0.031	A
56.245	48.755	50	0.031	A
3.755	56.245	50	0.031	A
11.245	56.245	50	0.031	A
30	56.245	50	0.031	A
48.755	56.245	50	0.031	A
56.245	56.245	50	0.031	A
200	0	-50		

Fonte: Própria

A taxa de armadura necessária que se encontrou na seção do pilar de concreto é de 16,468 cm<sup>2</sup>, o que corresponde a 0,51 cm<sup>2</sup> de área de aço por barra. Foram adotadas 24 barras de aço com diâmetro de 10 mm para reforçar a seção original de concreto constituída por 8 barras de 8 mm.

Logo, poderia ser adotado para a seção do reforço barras de aço de diâmetro de 8 mm de acordo com sua área, porém conforme item 18.4.2 da NBR 6118 (2003) o diâmetro das barras longitudinais não deve ser inferior a 10 mm nem superior a 1/8 da menor dimensão transversal.

#### Exercício 2:

A seção aqui escolhida buscou simular a situação de reforço de um pilar de canto de edifício (pilar quadrado, 30x30cm) reforçado nas faces internas ao limite do prédio com uma região em formato de L (45x45x15x15cm). O pilar existente foi idealizado com  $f_{ck}$  de 13,5 Mpa, muito comum na década de 80 em obras de concreto armado, e 8 barras de aço, 4 nos cantos e uma no meio de cada face. O reforço foi idealizado com  $f_{ck}$  de 30 Mpa e 16 barras de aço com diâmetro de 10 mm.

Para esta seção definida aplicou-se os esforços solicitantes:  $N_d = 250 \text{ kN}$ ,  
 $M_x = 150 \text{ kN} \cdot \text{cm}^2$ ,  $M_y = -50 \text{ kN} \cdot \text{cm}^2$ .

O cobrimento das armaduras foi adotado uniforme de 2,5 cm em ambas as seções, tanto interna quanto externamente. O diâmetro das armaduras transversais foi adotado como  $\varnothing 5 \text{ mm}$ .

Os dados do problema são resumidos abaixo:

$$f_{ck \text{ pilar original}} = 1,35 \text{ kN/cm}^2$$

$f_{ck}$  = Resistência característica do concreto à compressão.

$$f_{ck \text{ reforço}} = 3 \text{ kN/cm}^2$$

$f_{ck}$  = Resistência característica do concreto à compressão.

$$E_s = 21000 \text{ kN/cm}^2$$

$E_s$  = Módulo de elasticidade do aço.

$$f_{yk} = 50 \text{ kN/cm}^2$$

$f_{yk}$  = Resistência característica do aço a tração.

$$\gamma_c = 1,4$$

$$\gamma_s = 1,15$$

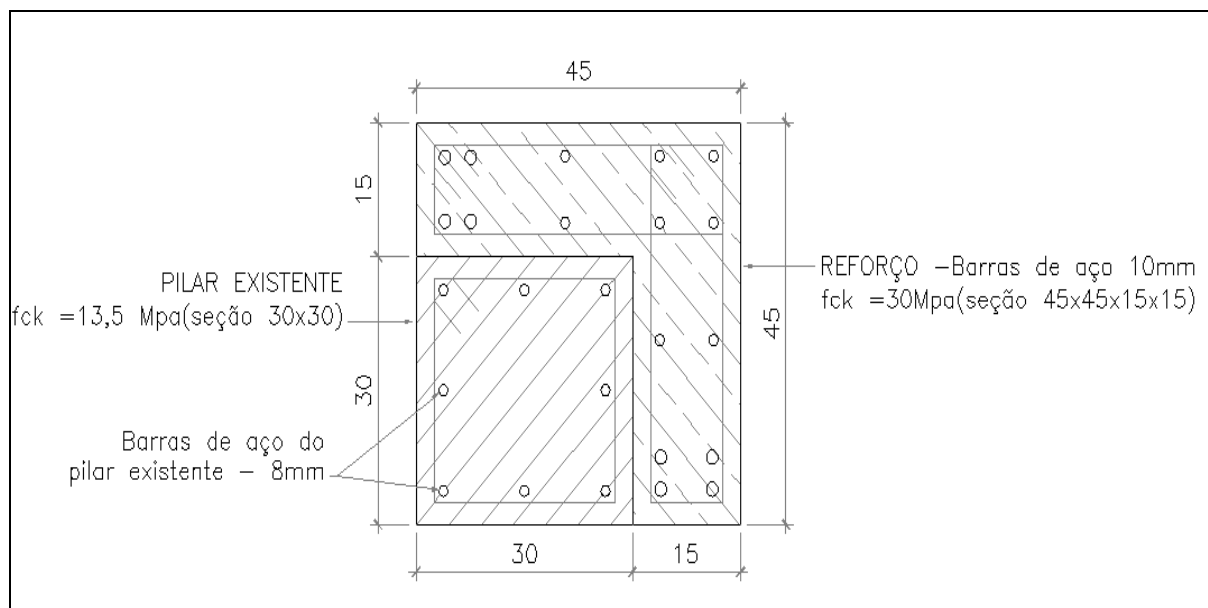
Os valores dos coeficientes de minoração  $\gamma_c$  e  $\gamma_s$  apresentam-se na Tabela 1, conforme a NBR 6118 (2003) e são válidos para estados limites últimos.

Dos dados obtém-se:

$$\varepsilon_{yd} = f_{yd} / E_s = [(50 / 1,15) / 21000] = 2,07 \cdot 10^{-3}$$

$\varepsilon_{yd}$  - Deformação de cálculo do aço.

**Figura 34 - Seção de concreto avaliada**

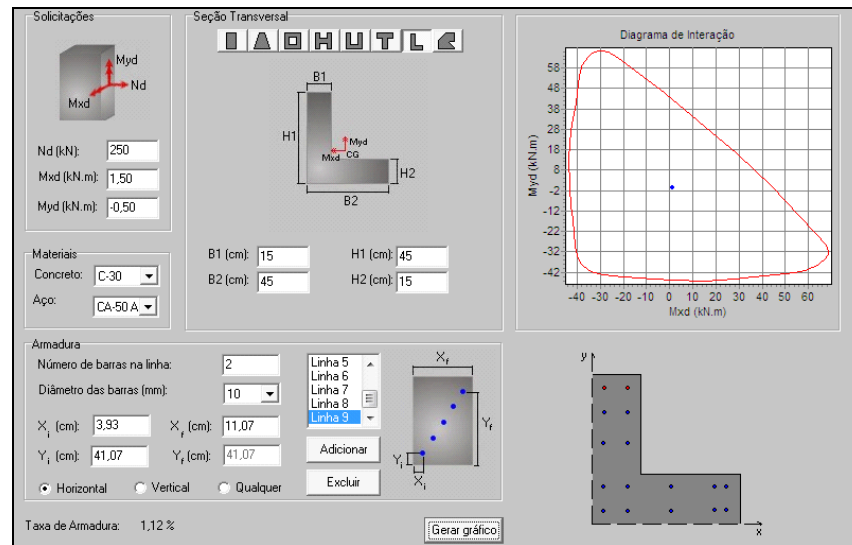


Fonte: Própria

Aplicando-se os dados originais da estrutura de concreto no programa desenvolvido pela Universidade Federal do Paraná, conclui-se que o pilar necessita de reforço, pois não suporta os esforços solicitantes, conforme analisado no exercício anterior, pois a seção idealizada possui as mesmas características porém com  $f_{ck} = 13,5$  Mpa.

Testando agora apenas a região de reforço, Seção L.

**Figura 35 - Seção de reforço a ser implantado no pilar original**



Fonte: Própria

Pode-se observar no diagrama de interação que o reforço a ser implantado atende aos esforços solicitantes mesmo quando é desprezada a seção original.

Depois de demonstrado que a estrutura de reforço suporta os esforços sobre a mesma, aplicaram-se as informações de entrada no programa desenvolvido pelo professor Américo Campus Filho da Universidade Federal do RS.

**Figura 36 - Seção de reforço implantada na seção original do pilar de concreto armado**



Fonte: Própria

Analisando os resultados obteve-se a área de aço, deformações da fibra superior e inferior e inclinação da linha neutra.

Resumindo:

Área de aço encontrada = 5,26 cm<sup>2</sup>

Deformação fibra inferior = 10 / 1000

Deformação fibra superior = 1,055 / 1000

Inclinação da linha neutra = -9,011E+1

Abaixo se transcreve o arquivo empregado para fornecer os dados de entrada ao programa.

**Figura 37 - Dados de entrada do programa**

1				
1.4	1.15			
13				
0	0			
45	0			
45	45			
0	45			
0	0			
0	30			
30	30			
30	0			
0	0			
30	0			
30	30			
0	30			
0	0			
2				
3	9			
1.35	13			
24	21000	1		
3.755	3.755	50	0.039	A
15	3.755	50	0.039	A
26.245	3.755	50	0.039	A
26.245	15	50	0.039	A
26.245	26.245	50	0.039	A
15	26.245	50	0.039	A
3.755	26.245	50	0.039	A
3.755	15	50	0.039	A
33.93	3.93	50	0.061	A
41.07	3.93	50	0.061	A
33.93	7.53	50	0.061	A
41.07	7.53	50	0.061	A
33.755	20.6425	50	0.039	A
41.245	20.6425	50	0.039	A
33.755	33.755	50	0.039	A
41.245	33.755	50	0.039	A
20.6425	33.755	50	0.039	A
7.53	33.93	50	0.061	A
3.93	33.93	50	0.061	A
3.93	41.07	50	0.061	A
7.53	41.07	50	0.061	A
20.6425	41.245	50	0.039	A
33.755	41.245	50	0.039	A
41.245	41.245	50	0.039	A
250	150	-50		

Fonte: Própria

Conforme o item 18.4.2 da NBR 6118 (2003) o diâmetro das barras longitudinais não deve ser inferior a 10 mm nem superior a 1/8 da menor dimensão transversal.

## 5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSÃO

Os métodos que se apresentam dispostos neste trabalho são alternativas de reforço de estrutura em concreto armado.

O presente texto buscou demonstrar o cálculo de reforço de elementos fletidos com emprego de fibra de carbono e chapa colada. Para cada um dos tipos foi descrito o método de execução, vantagens e desvantagens, além da formulação de cálculo. O mesmo exemplo foi calculado para os dois tipos de reforço.

A título de ilustração, traçou-se um comparativo de custo entre os dois tipos de reforço, a partir de dados fornecidos por fabricantes. Deste comparativo concluiu-se que a chapa colada é um reforço mais barato que a fibra de carbono.

No entanto, outros fatores podem levar o profissional a decidir qual a melhor alternativa para reforçar determinada estrutura entre das quais se podem citar: restrição em realizar escoramento, agressividade do ambiente, dificuldades de acesso ao local de reforço, entre outras. Para as situações onde não se tenha restrições para a execução e nem ambiente agressivo é viável o reforço com chapa de aço colada.

Outro tipo de reforço estudado foi o de pilares através do aumento da seção transversal, principalmente por questões econômicas e de facilidade de execução.

Foram descritos dois exemplos de cálculo de reforço, um com seção anelar e outro em seção L. Para ambas as situações o reforço foi dimensionado pelo método geral. Por comodidade mostrou-se o emprego de dois softwares acadêmicos para o desenvolvimento destes exemplos. O reforço por aumento de seção é de dimensionamento simples, e fácil detalhamento, sendo uma alternativa viável de projeto.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As estruturas de concreto se deterioram com o passar do tempo e não alcançam sua vida útil se não são bem projetadas, executadas com eficiência e submetidas a uma manutenção preventiva. Se não cuidado esse fatores a estrutura de concreto resultante será quase certamente de má qualidade e irá se deteriorar de modo precoce, absorvendo gastos de recuperação e de reforço desnecessário para ser mantida em condições de uso.

Como as estruturas de concreto existentes estão envelhecendo, os problemas de deterioração estão cada vez mais acentuados, exigindo com frequência trabalhos de recuperação e de reforço estrutural, visto os resultados obtidos na realização deste trabalho, assim como o conhecimento adquirido no desenvolvimento do estudo, como sugestão para trabalhos futuros sugere-se:

Reforço de vigas para o esforço cortante em vigas de concreto armado com o uso de fibra de carbono e chapa de aço colada.

Reforço de alvenarias à flexão e ao cortante com fibra de carbono.

Reforço de elementos circulares de concreto armado com Fibra de Carbono.



## REFERÊNCIAS

American Concrete Institute. **ACI 440.2R -02**: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI, USA, 2002.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8800**: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

BEBER, A. J. **Avaliação do Desempenho de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Lâminas de Fibras de Carbono**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre CPGEC/UFRGS, 108 pg. Rio Grande do Sul, 1999.

CAMPOS, A. F. **Dimensionamento e verificação de seções poligonais de concreto armado submetidas à flexão composta oblíqua**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul– Escola de Engenharia– Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2000.

CANOVAS, M. F. **Patologia e terapia das edificações**. São Paulo: Editora PINI, 1988.

CARMONA, T. G. **Curso de Reforço de Estruturas**. São Paulo, ABECE, 2003.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Concreto Armado**. 3 ed. São Carlos: EdUFSCar, 2007.

GARCEZ, M. R. **Alternativas para melhoria no desempenho de Estruturas de concreto Armado Reforçadas pela Colagem de Polímeros Reforçados com Fibras**. Porto Alegre. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia– Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

HELENE, P. R. L. **Manual prático para reparo e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Editora Pini Ltda., 1988. 1.º Ed.

MACHADO, A. P. **Fibras de Carbono: Manual Prático de Dimensionamento**. BASF– The Chemical Company Carbono, 2006.

REIS, A. P. A. **Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.

RELVAS, F. J. **Patologias das edificações: Curso Prático de Diagnostico, Preparo, Proteção e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo, ABECE, 2003.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologias, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Editora PINI, 1998.

TAKEUTI, A. R. **Reforço de pilares de concreto armado por meio de encamisamento com concreto de alto desempenho**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.