

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANDERSON GOBBI DRUN
LUANI CRISTINI BASSO FAVERSANI**

**REFORÇO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUJEITAS A
FLEXÃO COM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO: ESTUDO DE
CASO – BLOCO S DA UTFPR-PB**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PATO BRANCO
2016**

ANDERSON GOBBI DRUN
LUANI CRISTINI BASSO FAVERSANI

**REFORÇO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUJEITAS A
FLEXÃO COM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO: ESTUDO DE
CASO - BLOCO S DA UTFPR-PB**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Paôla Regina Dalcanal

PATO BRANCO

2016



TERMO DE APROVAÇÃO

REFORÇO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUJEITAS A FLEXÃO COM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO: ESTUDO DE CASO – BLOCO S DA UTFPR-PB

**ANDERSON GOBBI DRUN
E
LUANI CRISTINI BASSO FAVERSANI**

No dia 20 de junho de 2016, às 14h45min, na Sala de Treinamento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após arguição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº 06-TCC/2016.

Orientador: Prof^a. Dr^a. PAÔLA REGINA DALCANAL (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 1 da Banca: Prof^a. Dr^a. HELOIZA PIASSA BENETTI (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof. Dr. VOLMIR SABBI (DACOC/UTFPR-PB)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecemos a Deus por todas as oportunidades e bênçãos que nos concedeu ao longo da vida, agradecemos pelas pessoas que colocou em nosso caminho e por ter nos guiado até aqui.

Agradecemos aos nossos pais, pelo apoio em todos os momentos de dificuldade ao longo de nossas vidas, por acreditarem em nós e não medirem esforços para que concluíssemos essa etapa importante na nossa vida.

Aos nossos amigos, pela ajuda e compreensão, por todos os aprendizados compartilhados e momentos vividos, com certeza foram essenciais para que chegássemos até aqui.

A UTFPR e ao Departamento Acadêmico de Construção Civil por disponibilizar o *software* CAD/TQS, o qual foi de extrema importância para a realização deste trabalho.

Reverenciamos todos os professores do curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco, pelo comprometimento e a dedicação na arte de ensinar, em especial a Prof. Dra. Heloiza Piassa Benetti e Prof. Dr. Volmir Sabbi, por fazerem parte da banca de defesa, disponibilizando de seu tempo na correção deste trabalho. Agradecemos, também, a Prof. Dra. Paôla Regina Dalcanal pela disponibilidade de orientação, atenção, paciência e apoio, sempre compartilhando seu conhecimento.

Por fim, o nosso sincero agradecimento a todos os envolvidos, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho de conclusão de curso.

RESUMO

DRUN, Anderson G. FAVERSANI, Luani C. B. **Reforço de vigas de concreto armado sujeitas a flexão com compósitos de fibra de carbono:** estudo de caso - Bloco S da UTFPR-PB. 2016. 79f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

A necessidade de reforço estrutural em uma estrutura de concreto armado pode vir de diferentes exigências, entre elas, deficiência de projeto e/ou de execução, falta de manutenção devida na estrutura ou uso diferente do qual foi projetado. Para o reforço podem ser usadas diversas técnicas e materiais, entre elas: adição de armaduras, adição de chapas ou perfis metálicos, reforço com protensão exterior, reforço com concreto de alto desempenho, reforço com fibra de carbono, foco do estudo deste trabalho. Portanto o presente trabalho propõe um projeto de reforço com compósito estruturado de fibra de carbono de uma edificação existente, que apresentou problemas estruturais devido à mudança no seu carregamento por uso indevido, ou seja, solicitada por uma carga maior que a projetada. O reforço atual, das vigas que sofreram deformações excessivas, é com perfis de aço. Portanto, este trabalho apresenta uma solução diferente de reforço. A fim de se obterem os esforços atuantes na estrutura com a nova sobrecarga, lançou-se a estrutura no *software* CAD/TQS. Analisando-se o comportamento das vigas com o novo carregamento, escolheram-se quatro vigas que apresentaram maiores momentos para realizar o reforço e encontrar a área efetiva de fibra de carbono necessária para absorver o carregamento adicional. Esse método de reforço mostrou-se adequado para a maioria das vigas estudadas, não servindo somente para uma viga, por apresentar uma área de fibra elevada, o que levou a 22 camadas de fibra, situação em que a mesma não é indicada.

Palavras-chave: Reforço-estrutural. Fibra de carbono. Concreto armado. CAD/TQS.

ABSTRACT

DRUN, Anderson G. FAVERSANI, Luani C. B. **Reinforcement with carbon fiber composites of reinforced concrete beams under bending stress: a case study applied to the S building at UTFPR-PB.** 2016. 79f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

The need of structural reinforcement in a reinforced concrete structure may come from many requirements, as design and/or execution flaws, the lack of correct maintenance in the structure, or even loads that are different from those that were designed. For the reinforcement process, diverse techniques and materials may be used: the addition of steel bars, or even metal sheets and profiles, reinforcement through external prestressing, or yet high performance concretes. The current work presents a reinforcement plan for an existing edification, which unfolded structural issues after being subjected to a higher load than the one designed. Currently, such structure received reinforcement through steel profiles in many of its beams that presented excessive deformation. The developed design in this work came with the goal of proposing a new reinforcement with another type of material, the carbon fiber structured composite. In order to determine the acting loads in the structure with the new loading, it was designed the structure in the software CAD/TQS. With all required information collected, it was made the choice of four specific beams, which presented structural damage, to proceed with the structure dimensioning and finally determine the effective carbon fiber area needed to resist the excessive load.

Key words: Structure reinforcement. Carbon fibers. Reinforced concrete. CAD/TQS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Quatro níveis de abstração para uma estrutura na análise estrutural	17
Figura 2: Modelo de grelhas para vigas e lajes	25
Figura 3: Modelo de pórtico espacial.....	27
Figura 4: Visualizadores de grelha e pórtico espacial de um <i>software</i> de análise estrutural	29
Figura 5: Hipóteses para reconversão de estruturas com desempenho insatisfatório	31
Figura 6: Diagrama tensão/deformação das principais fibras.....	37
Figura 7: Representação esquemática de um sistema cfc.....	40
Figura 8: Ampliação microscópica de um sistema CFC	40
Figura 9: Materiais componentes do sistema compósito.....	42
Figura 10: Vista do edifício da Cef e detalhes da aplicação do sistema compósito ..	44
Figura 11: Vista geral do edifício e aplicação.....	45
Figura 12: Antena da tv globo do Rio de Janeiro	45
Figura 18: Esquema de cálculo	47
Figura 13: Vista 3D da estrutura do bloco s	53
Figura 14: Vista 3D frontal e lateral da estrutura do bloco s.....	53
Figura 15: V4, V7 e V20 reforçadas com perfis de aço	54
Figura 16: V9 e V15 reforçadas com perfis de aço	54
Figura 17: Vigas reforçadas com perfis de aço e vigas escolhidas para o projeto de reforço	55
Figura 19: Dados da viga V8.....	57
Figura 20: Diagrama de momento fletor atuante na viga V8.....	58
Figura 21: Diagrama de momento fletor da viga V8, considerando apenas seu peso próprio	60
Figura 22: Corte do trecho a da viga V8, com a fibra de carbono aplicada.....	64
Figura 23: Dados da viga V9.....	66
Figura 24: Diagrama de momento fletor atuante na viga V9.....	67
Figura 25: Diagrama de momento fletor da viga V9, considerando apenas seu peso próprio	67
Figura 26: Dados da viga V20	69
Figura 27: Diagrama de momento fletor atuante na viga V20	69
Figura 28: Diagrama de momento fletor da viga V20, considerando apenas seu peso próprio	70
Figura 29: Dados da viga V7	71

Figura 30: Diagrama de momento fletor atuante na viga V7	72
Figura 31: Diagrama de momento fletor da viga V7, considerando apenas seu peso próprio	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valor de coeficiente de dilatação da fibra de carbono conforme sua direção	38
Tabela 2: Característica mecânica de diferentes tipos de fibras de carbono	39
Tabela 3: Tabela de dimensionamento de reforço estrutural com fibras de carbono para o trecho B da viga V8.....	65
Tabela 4: Tabela de dimensionamento de reforço estrutural com fibras de carbono da viga V9	68
Tabela 5: Tabela de dimensionamento de reforço estrutural com fibras de carbono da viga V20	70
Tabela 6: Tabela de dimensionamento de reforço estrutural com fibras de carbono da viga V7	73
Tabela 7: Tabela resumo dos trechos de vigas reforçados.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS

b_w	Base da viga
h	Altura da viga
d	Distância da fibra mais comprimida até o centro de gravidade da armadura inferior
x	Distância da fibra mais comprimida até a Linha Neutra
A_s	Armadura inferior (de tração)
A_r	Área de reforço
A'_s	Armadura superior (de compressão)
ϵ_c	Deformação da região comprimida
ϵ_s	Deformação da armadura inferior
ϵ_r	Deformação do reforço
F_C	Força na comprimida de concreto
F_S	Força resultante da seção tracionada da armadura inferior
$F_{S'}$	Força resultante da seção comprimida da armadura superior
F_R	Força resultante da seção tracionada de reforço
γ_c	Coefficiente de ponderação da resistência do concreto
γ_s	Coefficiente de ponderação da resistência do aço
ψ	Coefficiente de minoração da resistência do concreto
ζ	Fator de correção do diagrama parábola-retângulo de tensão do concreto comprimido
E_R	Módulo de elasticidade
ϵ_{ru}^*	Deformação máxima dada pelo fabricante
e	Espessura do reforço
σ_{ru}^*	Resistência máxima de tração

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivo Geral	14
1.1.2 Objetivos Específicos	14
1.2 JUSTIFICATIVA	15
2. CONCEPÇÃO ESTRUTURAL	17
2.1 ANÁLISE DA ESTRUTURA	17
2.2 PARÂMETROS DE DURABILIDADE SEGUNDO A NBR 6118	18
2.3 AÇÕES E CARGAS NA ESTRUTURA.....	19
2.4 MÉTODOS DOS ESTADOS LIMITES.....	20
2.4.1 Estados-limites últimos (ELU)	20
2.4.2 Estados-limites de Serviço (ELS)	21
3. SISTEMA COMPUTACIONAL	22
3.1 FORMULAÇÕES ADOTADAS	22
3.2 MODELO ESTRUTURAL	23
3.3 MODELOS DE CÁLCULO MAIS USUAIS.....	28
4. ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO E O REFORÇO ESTRUTURAL	30
4.1 PATOLOGIAS DEVIDO AO EXCESSO DE CARREGAMENTO.....	30
4.2 ASPECTOS DECISIVOS PARA RECUPERAR OU REFORÇAR.....	30
4.3 REFORÇO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO.....	32
4.3.1 Complementação ou reforço com adição de armaduras	33
4.3.2 Adição de chapas e perfis metálicos	33
4.3.3 Reforço de pilares por meio de encamisamento com concreto de alto desempenho (CAD).....	34
4.3.4 Reforço com protensão exterior	34
4.3.5 Reforço com polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC).....	35
5. COMPÓSITOS ESTRUTURADOS DE FIBRAS DE CARBONO	36
5.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DA FIBRA DE CARBONO.....	38
5.1.1 Peso específico	38
5.1.2 Coeficiente de dilatação térmica	38
5.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA FIBRA DE CARBONO	38
5.3 SISTEMA COMPÓSITO ESTRUTURAL	39
5.4 PROCESSO CONSTRUTIVO	41
5.5 APLICAÇÕES DOS SISTEMAS COMPÓSITOS	43
5.6 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DOS SISTEMAS CFC NO BRASIL	43
5.6.1 Edifício da Caixa Econômica Federal – Belo Horizonte - MG	44
5.6.2 Secretaria de Estado da Fazenda de Minas Gerais – Belo Horizonte - MG.....	44
5.6.3 Reforço Estrutural da Torre da TV Globo – Rio de Janeiro - RJ	45
5.7 DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO ESTRUTURAL REALIZADO COM FIBRAS DE CARBONO	46
6. METODOLOGIA.....	49

6.1 MÉTODO DE TRABALHO	49
7. LANÇAMENTO ESTRUTURAL NO CAD/TQS.....	51
8. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	54
8.1 PROJETO DE REFORÇO COM LAMINAS DE FIBRA DE CARBONO	56
8.1.1 Procedimento para o Dimensionamento	56
8.1.2 Projeto de Reforço da Viga 8	57
8.1.3 Projeto de Reforço da Viga 9	66
8.1.4 Projeto de Reforço da Viga 20	68
8.1.5 Projeto de Reforço da Viga 7	71
8.1.6 Resumo final do dimensionamento	73
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
9.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
REFERÊNCIAS.....	77

1. INTRODUÇÃO

O grande crescimento populacional e tecnológico faz com que o setor da construção civil se desenvolva e evolua cada vez mais. Atualmente, é possível conhecer novas técnicas e novos processos construtivos com facilidade e isso proporciona a possibilidade de inovar e de buscar por construções mais eficientes e mais econômicas.

A aceitação do concreto como um material de uso estrutural, adveio da superação das limitações que se apresentava no tempo dos romanos. Com o desenvolvimento de ideias, construiu-se o que hoje é chamado de concreto armado ou protendido (ISAIA, 2011).

Sabe-se que o concreto simples resiste muito bem à compressão, mas pouco resiste à tração (cerca de 1/10 do valor da compressão), mesmo que esse esforço esteja presente na maioria dos elementos estruturais. Assim, faz-se uso da armadura de aço que, diferentemente do concreto, resiste muito bem à tração, fazendo-se assim o concreto armado ideal para elementos da Engenharia (NBR 6118, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

As estruturas de concreto armado são largamente utilizadas no Brasil e no mundo, fazendo com que o concreto armado seja o segundo material mais consumido no mundo, perdendo somente para a água (ANDRADE, 2006).

Apesar de juntos, o concreto e o aço formarem uma boa combinação, um resistindo bem a compressão e outro a tração, os problemas estruturais podem acontecer, sejam eles na fase de projeto, erros durante a execução, mau uso da estrutura ou material deficiente. O caso aqui estudado é o de mau uso em uma edificação, onde a mesma foi utilizada para outro fim que não o determinado em projeto, gerando esforços adicionais que não haviam sido previstos. Quando isso ocorre deverá haver uma intervenção na estrutura, visando aumentar a sua capacidade resistente. É neste contexto que o reforço de uma estrutura é empregado (SILVA; HELENE, 2011).

Os serviços de reabilitação de estruturas de concreto envolvem a implementação de uma série de procedimentos, necessários à restituição dos requisitos de segurança estrutural e de durabilidade, originalmente previstos para essas estruturas. O reforço das estruturas objetiva adequá-las a novos requisitos

funcionais, como por exemplo, mudança nos carregamentos de uma edificação ou no trem tipo de uma ponte (TIMERMAN, 2011).

A finalidade deste trabalho é o estudo de uma estrutura em concreto armado, o “Bloco S”, edificação já existente na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Pato Branco. Esta edificação foi projetada em 1988 como bloco estudantil e devido a necessidade da época passou a ser utilizada como depósito de livros. A alteração do seu uso fez com que a sobrecarga fosse muito além do que a prevista em projeto e com que a estrutura apresentasse danos estruturais que poderiam levar a seu colapso. Na época, a estrutura foi reforçada com perfis metálicos. Agora, estuda-se, através de métodos computacionais, como seria o projeto estrutural da edificação para a sobrecarga de uma biblioteca e como seria feito o reforço estrutural empregando outro método, a fibra de carbono.

Normalmente, os sistemas compostos estruturados, que utilizam as fibras de carbono como elemento resistente, apresentam as seguintes características: boa resistência mecânica, boa rigidez, bom comportamento à fadiga e à atuação de cargas cíclicas, material leve, entre outras.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo principal a análise de vigas de concreto armado submetidas a cargas não previstas em projeto, propondo reforço estrutural com fibras de carbono, a partir de um estudo de caso.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Verificar a utilização e o comportamento da fibra de carbono para o uso na construção civil;
- Estudo do projeto estrutural, do Bloco S da UTFPR-PB, a fim de analisar as informações e considerações adotadas;

- Modelagem computacional da mesma estrutura submetida a uma carga maior do que prevista, a fim de comparar as principais diferenças entre os esforços das duas estruturas;
- Propor uma solução de reforço estrutural com fibra de carbono.

1.2 JUSTIFICATIVA

O cálculo estrutural ou projeto estrutural em uma nova edificação se configura como um dos pontos principais no desenvolvimento de um projeto. O projeto estrutural engloba a análise do comportamento da estrutura diante do modelo estrutural adotado e o dimensionamento da mesma, conforme as normas aplicáveis e aos materiais escolhidos. Essa análise é que dará forma e dimensão aos elementos estruturais presentes na obra, sejam eles vigas, pilares, lajes e outros, e é responsável pela segurança contra deslocamentos excessivos, fissuras e colapso parcial ou total da obra.

Um dos pontos principais para a realização do cálculo estrutural é o levantamento correto das cargas que solicitarão essa estrutura, considerando todas elas, sejam permanentes ou acidentais, bem como as combinações previstas na norma NBR 6120 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980). Muitas vezes o cliente que solicita o projeto estrutural de uma edificação não prevê que no futuro o mesmo possa sofrer alguma mudança ou ampliação do seu projeto inicial. É comum a ampliação de um projeto onde há mudanças de utilização da estrutura, como por exemplo, as lajes de cobertura passam para lajes que abrigam residências ou que prédios residenciais se tornem prédios comerciais.

Quando essa mudança de padrão da edificação se verifica podem ser gerados esforços acima dos previstos em projeto, podendo causar sérios danos à estrutura, e em casos mais sérios, até o colapso da mesma (REVISTA TÉCNICA, 2004). Devido a esse cenário, o ramo da Engenharia Civil teve que pensar em solução para esses casos, e uma delas é o emprego da fibra de carbono para reforço de estruturas comprometidas.

A fibra de carbono vem sendo utilizada na reabilitação de estruturas por algumas de suas características, tais como: alta resistência, baixo peso próprio,

grande durabilidade e capacidade de assumir formas complexas. A utilização da fibra de carbono é de fácil instalação, sendo possível, ser instalada sem a necessidade de fechar locais de utilização, como hospitais ou indústrias. Podem resistir a até 4.500 MPa de esforço de tração (aproximadamente dez vezes mais que o aço de construção) e apresentar módulo de elasticidade de 230 GPa (REVISTA TÉCHNE, 2004).

No Brasil o uso da fibra de carbono não é tão difundido, pois está atrelado à cultura local, de pouca exploração em inovações na área da construção civil, e ao custo que chega a ser de 40% a 50% maior que outros tipos de reforço (colagem de chapas metálicas, encamisamento (aumento de espessura), colocação de perfis metálicos), complicando assim sua aplicabilidade. Porém, essa comparação não pode levar em conta apenas o custo do material, mas, principalmente da mão - de - obra e os custos operacionais que envolvem cada uma delas (REVISTA TÉCHNE, 2004).

Considerando-se as boas características mecânicas e econômicas da fibra de carbono, o uso da mesma na construção civil se torna viável, desde que seja bem empregada por empresas ou profissionais que trabalhem com o material.

Em termos gerais, essa pesquisa busca através de análises computacionais a eficácia do uso da fibra de carbono para reparo. A análise será feita no Bloco S da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Pato Branco, que foi projetado em 1988 com intuito de ser um bloco estudantil e com o decorrer do tempo acabou sendo usado para depósito de livros sofrendo danos estruturais consideráveis. A solução adotada na década de 1990 para o reparo foi o uso de perfis metálicos para absorver os esforços adicionais. Agora, o objetivo é fazer a modelagem estrutural da edificação e propor uma nova solução de reforço estrutural, adotando a fibra de carbono como material de reparo.

2. CONCEPÇÃO ESTRUTURAL

2.1 ANÁLISE DA ESTRUTURA

Segundo Gomes e Velho (1998) e Felippa (2001) apud Martha (2010) a análise estrutural trabalha com quatro níveis de abstração para a estrutura que está sendo analisada, indicados na Figura 1.

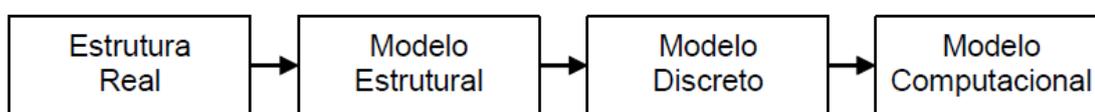


Figura 1: Quatro níveis de abstração para uma estrutura na análise estrutural
Fonte: Martha (2010), p.3

O primeiro nível diz respeito à estrutura real, como ela é construída, diferente do segundo nível que é como a estrutura se representa matematicamente, incorporando todas as teorias e hipóteses para descrever o comportamento da estrutura em diversas solicitações. O segundo nível comporta uma das tarefas mais importantes na análise estrutural e pode ser muito complexa dependendo do tipo da estrutura.

Na concepção do modelo estrutural é feita uma idealização do comportamento da estrutura real em que se adota uma série de hipóteses simplificadoras que podem ser:

- Sobre a geometria do modelo;
- Sobre as condições de suporte (ligação com o meio externo, por exemplo, com o solo);
- Sobre o comportamento dos materiais;
- Sobre as solicitações atuantes.

Os modelos estruturais mais comuns em projetos de edifícios de concreto armado são vigas contínuas; pórticos planos; pórticos espaciais e grelhas (FONTES; PINHEIRO; BITTENCOURT, 2011).

O terceiro nível, chamado modelo discreto, é concebido dentro das metodologias de cálculo dos métodos de análise, que utilizam um conjunto de variáveis ou parâmetros para representar o comportamento de uma estrutura. O método utilizado vai definir os tipos de parâmetros adotados. No Método das Forças os parâmetros adotados são forças ou momentos e no Método dos Deslocamentos os parâmetros são deslocamentos ou rotações.

O quarto nível trata do modelo computacional que ganhou espaço no ramo da Engenharia Civil a partir das décadas de mil novecentos e oitenta e mil novecentos e noventa. Atualmente, a análise de estruturas é feita através de simulações computacionais e a concepção sem este tipo de análise não é mais utilizada.

O método dos elementos finitos é muito utilizado no desenvolvimento de programas de análise estrutural. Porém, outras questões como estruturas de dados e procedimentos de criação do modelo geométrico, geração do modelo discretizado, aplicação de atributos de análise (propriedades de materiais, carregamentos, condições de suporte, etc.) e visualização dos resultados são também fundamentais nesse contexto.

2.2 PARÂMETROS DE DURABILIDADE SEGUNDO A NBR 6118

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO..., 2014) separa em três grupos os requisitos de qualidade de uma estrutura, sendo eles a capacidade resistente, que consiste na segurança a ruptura, o desempenho em serviço, que consiste na capacidade da estrutura em manter-se em condições plenas e de utilização durante a sua vida útil, e a durabilidade, que consiste na capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas pelo autor do projeto.

A agressividade do ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, influenciando diretamente nas decisões e escolhas do projeto. São quatro as classes de agressividade ambiental – fraca, moderada, forte e muito forte – e deve-se fazer a escolha de uma delas para a concepção da estrutura de concreto armado, de acordo com o local onde se fará a obra e o risco de deterioração da estrutura.

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO..., 2014) faz a especificação de alguns critérios que devem ser adotados no projeto visando à durabilidade da estrutura.

No que diz respeito à drenagem, cabe evitar o acúmulo de água sobre as estruturas de concreto armado, portando a presença de ralos e condutores nas superfícies horizontais, como cobertura, pátio e garagem. Fazer a selagem de juntas de movimento e dilatação, de forma que não ocorra percolação da água. Proteger os topos de platibandas e paredes e os beirais devem ter pingadeiras e os encontros em diferentes níveis devem ser protegidos por rufos.

Nas formas arquitetônicas e estruturais devem ser evitadas disposições arquitetônicas que possam reduzir a durabilidade da estrutura e devem ser previstas acessos para a inspeção e manutenção de partes da estrutura que sejam inferiores ao todo, além de prever aberturas para drenagem e ventilação nos elementos estruturais onde há possibilidade de acúmulo de água.

A durabilidade de uma estrutura é altamente dependente das características do concreto e da espessura e qualidade do concreto de cobrimento da armadura. As características do concreto que devem ser adotadas e o cobrimento nominal mínimo variam em função da classe ambiental onde está inserida a estrutura.

O detalhamento das armaduras deve ser feito de tal forma que as barras devem estar dispostas dentro do elemento estrutural de forma que permita a boa qualidade das operações de lançamento e adensamento do concreto. Para permitir um bom adensamento deve-se ficar atento no espaçamento entre as barras, de forma que permita a passagem da agulha do vibrador.

2.3 AÇÕES E CARGAS NA ESTRUTURA

Uma das etapas da análise estrutural é a previsão de carregamentos da estrutura. A NBR 6120 (ASSOCIAÇÃO..., 1980) trata sobre as cargas para o cálculo de estruturas de edificações e determina os valores das cargas que devem ser consideradas no projeto. Essas cargas podem ser permanentes e acidentais. A carga permanente constitui-se do peso próprio de todos os elementos construtivos fixos e também das instalações permanentes, já a carga acidental é toda aquela que

pode atuar sobre a estrutura de edificações em função do seu uso (pessoas, móveis, veículos, entre outros).

Na análise estrutural deve ser considerada a influência de todas as ações que possam produzir efeitos significativos para a segurança da estrutura em exame, levando-se em conta os possíveis estados limites últimos e os de serviço, de acordo com o disposto na NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO..., 2014).

2.4 MÉTODOS DOS ESTADOS LIMITES

Com a origem na metade do século anterior, o método das tensões admissíveis dominou o modelo de cálculo no século XX. Neste método a estrutura é investigada considerando as ações de trabalho (nominais), impondo-se que uma tensão admissível não seja excedida. Porém, em 1990 o método dos estados limites passou a ser o método utilizado (MOTTA; MALITE, 2002). Este método é fundamentado em análise estatística com coeficientes ponderadores, aplicados tanto às ações quanto às resistências dos materiais, porém, admitindo o comportamento estrutural como determinístico.

Um estado limite ocorre sempre que a estrutura deixa de satisfazer um de seus objetivos, que podem ser divididos em estados limites últimos e estados limites de serviço (CARNEVALE, 2012).

2.4.1 Estado-Limite Último (ELU)

Segundo a NBR 6118, o estado limite último é definido como o “estado limite relacionado ao colapso, ou a qualquer outra forma de ruína estrutural, que determine a paralisação do uso da estrutura.” (ASSOCIAÇÃO..., 2014). Logo, uma estrutura jamais pode alcançar o estado limite último, ou seja, a ruína.

Quando a estrutura atinge o seu estado limite último ocorre o esgotamento da sua capacidade de sustentação, podendo ser por: ruptura de seções, colapso da estrutura, deterioração por fadiga ou perda de estabilidade.

As estruturas de concreto armado devem ser dimensionadas neste estado, como se estivessem prestes a romper. Assim, pode-se ter uma margem de segurança, sendo que para ocorrer a ruptura, a estrutura teria que estar submetida a carregamentos superiores dos quais foi projetado.

Utilizando os coeficientes de segurança, de tal forma que as resistências dos materiais sejam minoradas e as ações atuantes na estrutura sejam majoradas, fazemos com que a estrutura trabalhe longe da ruína, longe de seu estado limite último.

Os coeficientes de segurança utilizados são previstos pela NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO..., 2014).

2.4.2 Estado-Limite de Serviço (ELS)

São aqueles relacionados ao conforto do usuário e à durabilidade, aparência e boa utilização das estruturas, sejam em relação aos usuários, seja em relação às máquinas e aos equipamentos suportados pelas estruturas.

Nas estruturas de concreto armado, o ELS serve para verificar o comportamento da estrutura ao longo de sua vida útil, principalmente quanto à abertura de fissuras e ao deslocamento vertical (flecha) máximo.

3. SISTEMA COMPUTACIONAL

A informática está presente em quase todos os setores, desde a mais simples operação à mais complexa, envolvendo o uso de computadores e *softwares*.

Para projetos de edifícios de concreto armado atualmente, é quase impossível pensar na sua elaboração sem o uso de algum *software* do gênero, devido à sua funcionalidade e rapidez, sendo ideal para uma maior produtividade e uma boa garantia de resultados.

Todas as etapas que compreendem a elaboração de um projeto, desde a sua concepção inicial, a análise estrutural, dimensionamento e detalhamento são amplamente influenciados pelo uso dos *softwares* (KIMURA, 2007).

O uso de *softwares* ajuda a solucionar diversos problemas de projeto. Entretanto, nada adianta o uso de um *software* para um engenheiro que não saiba conceitos de engenharia na hora de projetar. França (2001) diz que um *software* sempre trará resultados, mesmo quando um cálculo estiver errado. Inclusive, detalha a solução errada com a mesma qualidade da que foi criada corretamente.

O uso de ferramentas computacionais traz enormes vantagens em um projeto, seja ele de grande ou pequeno porte, desde que feita de maneira responsável. Algumas das vantagens são: produtividade, qualidade e segurança.

Antigamente, sem ferramentas computacionais, era impraticável fazer os cálculos várias vezes a fim de analisar diferentes comportamentos da estrutura, além de se fazer diversas simplificações. Hoje em dia, com a introdução de ferramentas computacionais essas várias simulações são feitas e os resultados são quase imediatos, fazendo com que a estrutura seja mais eficiente.

3.1 FORMULAÇÕES ADOTADAS

Um sistema computacional, nada mais é que uma aplicação direta de conceitos e especificações a fim de processar uma informação e retornar um resultado. No caso de *software* especializado em análise estrutural, os mesmos são

baseados em conceitos da Engenharia Civil, bem como especificações de normas, a fim de retornar ao usuário um produto final com embasamento teórico adequado.

3.2 MODELO ESTRUTURAL

Toda a análise estrutural realizada em sistemas computacionais envolve algum modelo matemático ou numérico. Esse modelo está inserido a fim de simular o comportamento real da estrutura com o carregamento aplicado, para isso se dá o nome de modelo estrutural.

Vários modelos estruturais podem ser usados para análises de estruturas em concreto armado, desde o mais simples até o mais complexo. Para ilustrar melhor o conceito, a seguir serão apresentados alguns modelos estruturais, buscando retratar o avanço do mesmo com o passar do tempo.

3.2.1 Métodos Aproximados + Vigas Contínuas

É o método mais tradicional, e mais conhecido, pois desde a graduação de Engenharia Civil é usado para determinação de esforços em vigas.

A análise estrutural baseada neste modelo é realizada da seguinte maneira:

- Os esforços e as flechas nas lajes são obtidos através de tabelas e métodos aproximados;
- As cargas atuantes nas lajes são transferidas as vigas através da sua área de influência (esquema do telhado);
- Os esforços e flechas nas vigas são calculados de maneira clássica, onde os apoios representam os pilares;
- As reações verticais das vigas são transferidas como cargas concentradas na cabeça do pilar.

Trata-se de um modelo extremamente simples, porém devido às várias simplificações se torna inviável para estruturas mais complexas, tais como:

- Os elementos estruturais são tratados de forma isolada, não é considerada interação entre eles;
- A ligação entre pilares e vigas é articulada, por isso não há transmissão de momento fletor entre eles;
- Os efeitos provocados por cargas horizontais (ex. vento, empuxo) são desconsiderados, apenas é considerada a atuação de cargas verticais.

Segundo Fontes (2005) o modelo de vigas contínuas deve ser utilizado apenas para edifícios de menor porte, onde os tramos (distância entre os apoios) das vigas apresentem uma padronização em termo de vão e carregamento. O modelo tende a ser cada vez menos aplicado nas análises estruturais, pois não permite o cálculo dos esforços decorrentes da ação de cargas horizontais, e a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO..., 2014) torna obrigatória a consideração da atuação da ação de ventos em todas as edificações.

3.2.2 Grelha Somente de Vigas

Modelo direcionado para análise de um pavimento, onde se leva em conta a análise da interação entre todas as vigas. É composto por barras, que simulam as vigas e são submetidas a cargas perpendiculares (cargas verticais) oriunda da transferência das lajes por área de influência.

Já, os pilares são representados por apoios simples. As lajes não são consideradas no modelo e são analisadas por processos aproximados.

Neste modelo, cada barra possui uma seção (área, inércia) e um material (módulo de elasticidade longitudinal e transversal), que são definidos de acordo com a geometria e o material.

Nas intersecções entre as barras é definido um nó, que possui três graus de liberdade (uma translação e duas rotações), onde possibilita a obtenção dos deslocamentos e respectivos esforços oriundos da aplicação das cargas verticais, em todas as vigas do pavimento, bem como a carga nos pilares por meio das reações de apoio. As interpretações dos resultados gerados são de rápida e fácil interpretação (KIMURA, 2002).

Porém o método não analisa efeitos de cargas horizontais na estrutura (ex. vento, empuxo).

3.2.3 Grelha de Vigas e Lajes

Modelo estrutural para análise de um pavimento, também denominado por, análise de pavimento por “analogia de grelha”.

É composto por elementos lineares que são dispostos no plano horizontal do piso e simulam as vigas e lajes, formando assim uma malha. Os pilares são representados por apoios simples. A Figura 2 representa um modelo de grelhas para vigas e lajes.

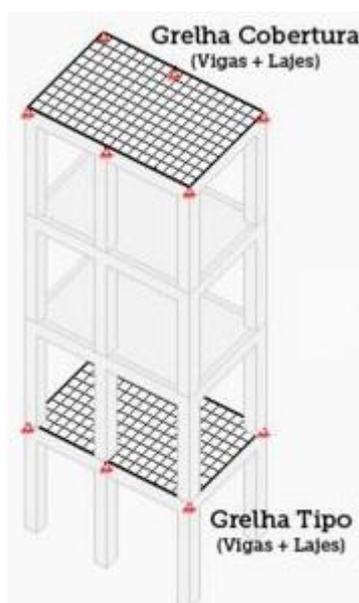


Figura 2: Modelo de grelhas para vigas e lajes
Fonte: TQS Informática LTDA (2015).

A discretização da laje, processo onde se subdivide a laje por elementos de barra, faz com que cada barra represente um trecho da laje. Usualmente, adotam-se barras de laje com comprimento máximo de 50 cm e em regiões onde há concentração de tensões o refinamento da discretização deve ser maior (KIMURA, 2002).

As barras que representam as vigas possuem suas próprias características de seção transversal e material, assim como no modelo anterior. Já, as barras que simulam as lajes dependem da discretização usada.

O modelo contempla uma boa interação entre vigas e lajes. A transferência das cargas das lajes para as vigas é feita de forma automática de acordo com a rigidez de cada barra.

Como no modelo anterior, em cada intersecção é definido um nó que possui três graus de liberdade (uma translação e duas rotações), onde se obtém os esforços devido ao carregamento e os deslocamentos, e as cargas nos pilares são definidas por reações de apoio.

Também não é possível analisar os esforços horizontais, porém, essa analogia de grelha de vigas e lajes é usada até hoje para cálculo de lajes maciças, nervuradas, treliçadas, planas e lajes cogumelo.

3.2.4 Pórticos Planos

Modelo que analisa o comportamento global de um edifício e não apenas de um pavimento, analisa tanto cargas verticais como horizontais. No modelo, vigas e pilares são representados por barras em um mesmo plano vertical de um alinhamento do edifício. A laje não faz parte do modelo.

Cada nó entre os elementos possui três graus de liberdade (duas translações e uma rotação), possibilitando a obtenção de esforços e deslocamentos nas vigas e pilares, com auxílio de gráficos e diagramas de sistemas computacionais.

Antigamente, o pórtico plano era bastante usado a fim de analisar o efeito de cargas horizontais em edifícios, bem como na sua estabilidade global. Atualmente o modelo foi plenamente substituído por modelo de pórtico espacial.

3.2.5 Pórticos Espaciais

É um modelo de barras que representam todos os pilares e vigas existentes em um edifício, por ser assim, gera uma avaliação completa e eficiente da

estrutura, em todas as direções e sentidos. A Figura 3 mostra um modelo de pórtico espacial.

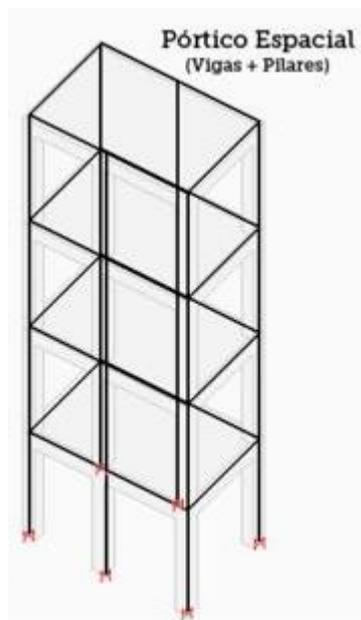


Figura 3: Modelo de pórtico espacial
Fonte: TQS Informática LTDA (2015).

Em pórticos espaciais, as lajes não estão presentes no modelo, entram apenas como diafragmas rígidos, ou seja, extremamente rígidos no seu plano, compatibilizando os deslocamentos em todos os nós do pavimento. Em sistemas computacionais essa simulação é feita através do enrijecimento lateral das vigas (TQS Informática LTDA, 2015).

Cada nó entre os elementos lineares possui seis graus de liberdade (três translações e três rotações), possibilitando assim a obtenção dos esforços internos e deslocamentos nas vigas e pilares.

Atualmente, o modelo de pórtico espacial é amplamente usado em projetos profissionais com o auxílio de ferramentas computacionais. Por retratar melhor a realidade da estrutura, o mesmo é usado para cálculo de edifícios altos e complexos como para de estruturas de pequeno porte.

3.2.6 Elementos finitos

A ideia central do método dos elementos finitos é representar uma estrutura por um conjunto de elementos ou malha. Assim, esse modelo numérico é de grande valia para projetos de estruturas em concreto armado.

Cada elemento finito possui um comportamento particular que é pré-definido, e diversos deles já foram desenvolvidos e testados. Podemos dizer que as barras usadas nos modelos de grelha e pórticos espaciais são elementos finitos que tem por objetivo simular a estrutura analisada. Temos também elementos finitos bidimensionais (placa, chapa) e tridimensionais (sólidos).

Como nos modelos anteriores, o modelo de elementos finitos pode ser usado para análise de um pavimento onde as vigas são representadas por barras similares à grelha. Porém, as lajes não entram mais como uma grelha, ou conjunto de barras, e sim por elementos bidimensionais chamados de placa, onde uma laje é discretizada em diversas placas a fim de simular a situação real.

Esta placa pode ter um formato qualquer (usualmente retângulos e triângulos) e servem para análises de pavimentos em concreto armado.

Porém, sua obtenção de dados é mais complexa que os modelos anteriores, mesmo com o auxílio de gráficos e diagramas disponíveis nos sistemas computacionais. O levantamento das solicitações para dimensionamento da armadura é mais trabalhoso e, requer um conhecimento maior da ideia dos elementos finitos antes de ser usado.

3.3 MODELOS DE CÁLCULO MAIS USUAIS

Kimura (2002) diz que um bom modelo estrutural é aquele que melhor retrata na vida real o comportamento da estrutura, ou seja, o modelo mais realista.

Analisando todos os modelos e suas características gerais, podemos afirmar, analisando o mercado atualmente de *softwares* de análise estrutural que os mesmos se baseiam em dois modelos: grelha de vigas e lajes e pórtico espacial.

O primeiro é usado a fim de obter os esforços e deslocamentos oriundos dos carregamentos verticais das lajes, e o segundo, é usado para análise global da

estrutura, analisando o edifício como um todo, calculando os esforços e deslocamentos nas vigas e pilares oriundos das cargas verticais e horizontais.

Segundo Carvalho e Pinheiro (2009), em um futuro próximo, os *softwares* comerciais já estarão considerando a grelha funcionando junto com o pórtico espacial, pois não há dificuldade teórica para isso, apenas questão de computadores e um preço acessível para que se possa realizar este trabalho. A Figura 4 apresenta exemplos dos visualizadores de grelha e pórtico no CAD/TQS.

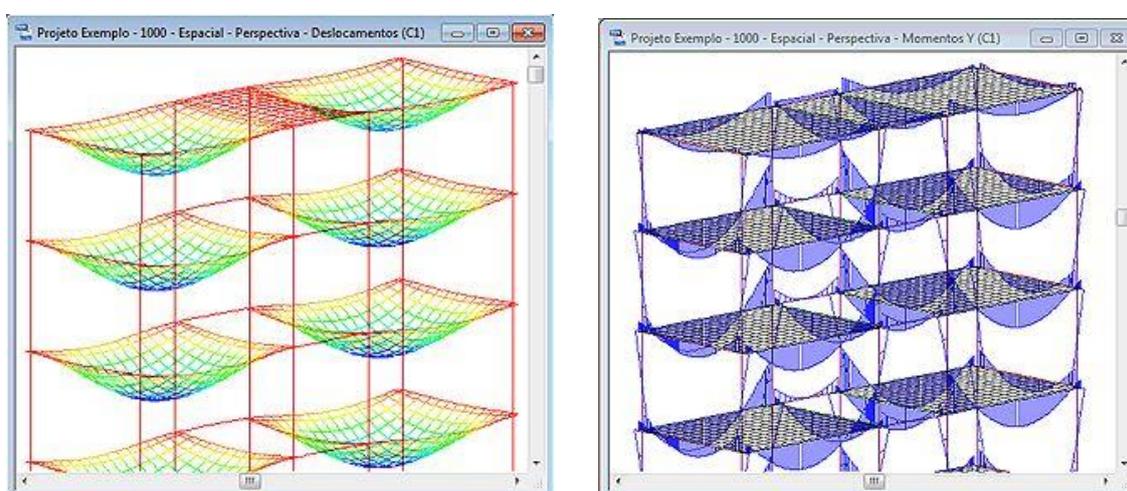


Figura 4: Visualizadores de grelha e pórtico espacial de um *software* de análise estrutural
Fonte: TQS Informática LTDA (2015).

Conclui-se que um bom modelo estrutural deve ser realista, precisando contemplar algumas considerações importantes em uma obra de concreto armado, tais como: heterogeneidade do material (aço+concreto), comportamento não - linear, fissuração do concreto, fluência, rigidez da ligação entre os elementos e tratamento das ações (verticais e horizontais) (TQS Informática LTDA, 2015).

4. ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO E O REFORÇO ESTRUTURAL

4.1 PATOLOGIAS DEVIDO AO EXCESSO DE CARREGAMENTO

Segundo Helene (1992, p. 19), “patologia pode ser entendida como a parte da Engenharia que estuda os sintomas, os mecanismos, as causas e as origens dos defeitos das construções civis, ou seja é o estudo das partes que compõe o diagnóstico dos problemas”.

Esse termo é bastante amplo e abrange todos os elementos que estejam em uma obra de construção civil, mas para o presente trabalho delimitaremos ao estudo de patologias em vigas de concreto armado submetidas a sobrecargas não previstas e suas principais causas.

Quando se realiza um projeto estrutural, uma das primeiras e mais importantes etapas é o levantamento das cargas que atuarão nessa estrutura, sejam elas permanentes ou variáveis. Esse levantamento dará dimensões aos elementos estruturais (vigas, lajes, pilares) e rigidez para que a estrutura se comporte como planejado. Porém, com o passar da vida útil da estrutura mudanças no seu uso podem ocorrer, e tais mudanças podem acabar gerando sobrecargas nas mesmas, fazendo com que algumas patologias venham a aparecer e comprometer o seu uso.

As principais patologias segundo Helene (1992) em vigas sujeitas a sobrecarga, são: fissuras de flexão, fissuras de cisalhamento, fissuras de flexão na parte superior (marquises, balcões), fissuras de flexão e escorregamento da armadura, esmagamento do concreto e fissuras de torção.

4.2 ASPECTOS DECISIVOS PARA RECUPERAR OU REFORÇAR

A recuperação e/ou reforço de uma estrutura é solicitada quando a mesma não está demonstrando um desempenho satisfatório. Em alguns casos mais extremos cabe a limitação de uso da estrutura ou até a sua demolição. Devem ser respeitados os pontos de vista técnico, econômicos e socioambientais. A Figura 5 apresenta intervenções que devem ser seguidas quando a estrutura apresenta um

desempenho insatisfatório, sendo necessário então, a busca por um profissional habilitado que irá instruir o cliente a recuperar, reforçar, limitar a utilização ou até a demolição em casos extremos.



Figura 5: Hipóteses para reconversão de estruturas com desempenho insatisfatório
 Fonte: SOUZA;RIPPER, 1998, p. 21

Segundo Souza e Ripper (1998), desempenho se entende como o comportamento em serviço de cada produto, ao longo de sua vida útil, e a sua medida relativa espelhará, sempre, o resultado do trabalho desenvolvido nas etapas de projeto, construção e manutenção.

A análise da estrutura é essencial para saber a solução ideal para determinado problema ou patologia que a estrutura apresenta. O conhecimento de seus projetos, plantas, bem como seus memoriais de cálculo e os materiais empregados na construção são muito importantes para essa investigação preliminar. A visita à estrutura também é outro ponto essencial, porém, deve-se priorizar a segurança do profissional habilitado para estes fins. Alguns fatores devem ser analisados em uma visita técnica à edificação, como: avaliação do concreto, avaliação da armadura, avaliação da estrutura, previsão de vida útil residual das

estruturas a partir de medidas de taxa de corrosão das armaduras e estimativa da capacidade resistente residual da peça.

Os principais pontos de um projeto de recuperação consideram uma avaliação das condições da estrutura existente a serem reparadas, as soluções cabíveis e proteções adicionais (REIS, 2001).

Existem defeitos estruturais localizados e de pouca importância, como pequenas trincas e fissuras, que não afetam o restante da estrutura. Por este motivo, sua reparação pode ser realizada de forma imediata, sem necessidade de se esperar resultados de análises e pesquisas. Outros defeitos são de tal monta que exigirão um estudo completo da obra (CÁNOVAS, 1988).

4.3 REFORÇO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Existem várias técnicas de reforço que podem ser empregadas no setor da construção civil. Reforço com perfis metálicos, reforço com o emprego de concreto de alto desempenho, reforço com chapas de aço, reforço com sistemas compósitos de polímeros reforçados com fibras (PRFC) e reforço com protensão exterior, são exemplos das técnicas que podem ser utilizadas.

A escolha da técnica que irá ser escolhida para ser utilizado na estrutura depende de alguns fatores, como diz REIS (2001, p. 79).

Qualquer técnica adotada requer como pressupostos principais do projeto a identificação das possíveis soluções, de forma a obter um sistema coerente com o ambiente em que se insere a estrutura, respeitando-se o partido arquitetônico, e balanceando-se quanto aos aspectos relativos aos custos. Devem ser observadas as recomendações existentes para o dimensionamento, os procedimentos para a execução, o controle da qualidade do processo, permitindo inclusive a inclusão de técnicas de monitoramento das estruturas. Considerações quanto à condição de reforço máximo e condições impostas pela capacidade global da estrutura, devem ser observadas.

4.3.1 Complementação ou reforço com adição de armaduras

É muito frequente a necessidade de aumento do número de barras de aço existentes em serviços de recuperação ou de reforço em estruturas de concreto armado. Seja esse aumento devido a serviços de reforço, em casos em que se pretende ampliar a capacidade resistente de uma peça, ou devido a casos de recuperação, quando ocorre corrosão das barras de aço, perdendo sua seção original, havendo a necessidade de complementação para a garantia de segurança.

Em qualquer uma das situações o nível de detalhamento das novas armaduras empregadas é bastante elevado, pois, qualquer descuido poderá acarretar complicações no trabalho de recuperação e no resultado final, principalmente no nível de qualidade (durabilidade) que é um fator indispensável.

Em um projeto de recuperação, utilizando adição ou reforço de armaduras é indispensável o detalhamento gráfico e escrito incluindo: cobrimento das armaduras, espaçamento entre as barras, sistemas de ancoragem e emendas e ângulos de dobramento e curvatura. Esse detalhamento é importante, pois facilita e melhora o trabalho executivo (SOUZA; RIPPER, 1998).

4.3.2 Adição de chapas ou perfis metálicos

A adição de chapas ou perfis metálicos são mais utilizadas quando há a necessidade de aumentar a capacidade resistente de determinada estrutura e principalmente, quando há situações de emergência ou em situações que não permitem grandes alterações na geometria da peça.

É uma opção eficiente e de rápida execução além de ser de baixo custo, comparada com outras técnicas de reforço. Pode ser feita através de reforço exterior por colagem ou chumbamento de chapas metálicas ou de perfis metálicos. Em ambos os casos é uma técnica simples, porém, exigente quando se trata do rigor executivo e do cuidado no método de cálculo.

A preparação da superfície de concreto é indispensável para a aplicação de chapas de aço e perfis metálicos que é feita através da aplicação de resina. A

superfície deve ser preparada de forma que não fique muito rugosa, pois torna difícil a aplicação da resina e nem muito lisa, pois pode implicar em dificuldades em termos de compatibilidade com a estrutura e a superfície de aço. Assim, uma superfície que seja uniformemente rugosa, obtida através de submissão a jatos de areia, por exemplo, é o mais apropriado.

Quando houver a presença de fissuras na superfície em que será feita a aplicação, estas deverão ser seladas antes da execução do reforço (SOUZA; RIPPER, 1998).

4.3.3 Reforço de pilares por meio de encamisamento com Concreto de Alto Desempenho (CAD)

Segundo Takeuti (1999) apud ACI 363 (1991), define-se CAD como o concreto que possui resistência à compressão, medida em corpos de prova cilíndricos, maior que 41 MPa.

Segundo Silva (2006) as principais características desse tipo de reforço são:

- Alta resistência;
- Baixa tenacidade do material;
- Espessura de camisa relativamente pequena, devido às características citadas anteriormente.

4.3.4 Reforço com protensão exterior

Ao se fazer uso da protensão exterior como método de reforço, pretende-se introduzir no elemento estrutural tensões que sejam as limites dos materiais que o constituem. A protensão pode ser utilizada em casos de falha de projeto, falhas devidas a causas acidentais ou em casos que se deseja aumentar a capacidade portante da estrutura.

O cálculo pra este tipo de reforço leva em consideração as normas e procedimentos adotados no cálculo de estruturas de concreto armado e de concreto protendido. A protensão tem o dever de suportar diretamente as cargas, porém, corre-se o risco de surgir novos esforços secundários que são desfavoráveis.

As principais vantagens da protensão externa estão na facilidade de substituir cabos danificados ou velhos e também na redução da complexidade dos trabalhos de execução (SOUZA; RIPPER, 1998).

4.3.5 Reforço com Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC)

Como já citado anteriormente a fibra de carbono tem sido muito utilizada nas indústrias aeronáutica, aeroespacial e automobilística. Na construção civil, a fibra de carbono teve seu desenvolvimento tecnológico no Japão na metade da década de 1990. Essa técnica tem se mostrado um sistema inovador, de fácil execução e com ótimos resultados, tanto em relação ao aumento da ductilidade, quando em relação ao aumento da capacidade resistente dos elementos estruturais (SILVA, 2006).

O próximo capítulo abordará desde as propriedades da fibra de carbono até exemplos de sua utilização.

5. COMPÓSITOS ESTRUTURADOS DE FIBRAS DE CARBONO

Segundo Machado (2002) os sistemas compósitos estruturados de fibra de carbono podem ser utilizados com segurança para:

- Reabilitar ou restaurar elementos estruturais de concreto armado enfraquecido ou fragilizados por patologias específicas;
- Reforçar elementos em boas condições estruturais (sem patologias) para permitir o aumento das cargas solicitantes para atender as mudanças de destinação ou para corrigir e minimizar eventuais riscos decorrentes de vícios de projeto ou construção.

Os sistemas estruturados com fibras são constituídos por resinas, que são os imprimadores primários (*primmers*), regularizadores de superfície (*putties*), saturantes, adesivos, revestimentos e as fibras que os estruturam. Para um melhor entendimento de cada um desses materiais são apresentadas as características de cada um.

- Resinas: uma variedade de resinas é usada, entre elas estão os imprimadores primários, regularizadores de superfície, saturantes e adesivos, entre suas principais características estão: elevada resistência de colagem, resistência a agentes ambientais, preenchimento de vazios e, boa aderência com a fibra para o reforço;
- Imprimadores primários: tem como objetivo penetrar no substrato de concreto criando uma zona de aderência para resina de saturação que virá a ser aplicada posteriormente;
- Regularizador de Superfície: tem como objetivo preenchimento de vazios e correção de imperfeições da superfície, tornando o substrato uma superfície lisa e ideal para aplicação do compósito;
- Resina de Saturação: utilizadas para impregnar as fibras que constituem o reforço estrutural, fixando as mesmas no local desejado a fim de garantir uma melhor transferência de tensões de cisalhamento entre elas, tem como

objetivo proteger a fibra do meio externo, garantir orientação na fibra da matriz, entre outras;

- Adesivos: seu uso principal é a colagem dos sistemas compósitos já pré-impregnados ao substrato de concreto;
- Fibras: o uso das fibras, entre elas fibras de vidro, aramida, e carbono são comumente utilizadas para reforço estrutural. Essas fibras é que dão ao sistema sua característica de resistência e podem ser denominadas o “esqueleto” do sistema compósito. Suas principais características físicas são:
 - Alta resistência mecânica;
 - Elevada resistência a ataques químicos diversos;
 - Não são afetadas pela corrosão por se tratar de um produto inerte;
 - Alta rigidez;
 - Bom comportamento à fadiga e a à atuação de cargas cíclicas;
 - Extrema leveza, a ponto de não ser considerado seu peso próprio nos reforços.

Na Figura 6 pode-se ver o gráfico de tensão/deformação das diferentes fibras utilizadas, podemos notar que para uma mesma tensão aplicada, a deformação na fibra composta por carbono possui um valor muito menor que as fibras de vidro e aramida. Em comparação com o aço, a tensão resistente da fibra se mostra muito maior que o mesmo, justificando assim seu uso para reforço estrutural.

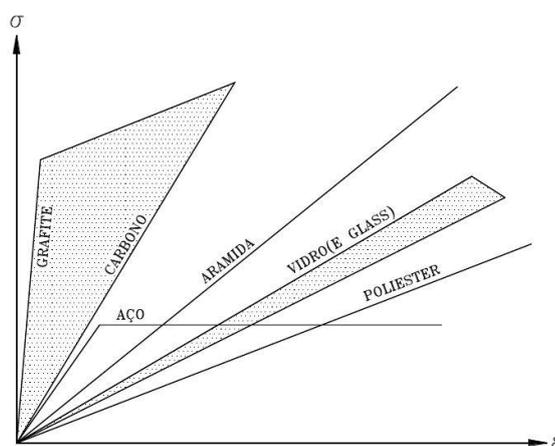


Figura 6: Diagrama Tensão/Deformação das principais fibras
 Fonte: Machado, 2002, p 30.

5.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DA FIBRA DE CARBONO

5.1.1 Peso específico

O peso específico ou densidade da fibra de carbono varia entre 1,6 a 1,9 g/cm³. Em uma comparação direta com o aço tradicional de construção, esse valor é 5x menor, já que o do aço é na ordem de 7,85g/cm³.

5.1.2 Coeficiente de dilatação térmica

Característica que varia conforme a direção que se analisa, seja ela longitudinal ou transversal, do tipo de fibra, resina e do volume de fibra no compósito. A Tabela 1 apresenta os valores de dilatação térmica para um compósito tradicional de fibra de carbono.

Direção	Coeficiente de Dilatação Térmica
Longitudinal (α_L)	$-10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a 0
Transversal (α_T)	$22 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Tabela 1: Valor de coeficiente de dilatação da fibra de carbono conforme sua direção
Fonte: Adaptado Machado (2002).

Sendo que o valor negativo de dilatação térmica indica um encurtamento do material com o aumento de temperatura e expande com a diminuição da mesma.

5.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA FIBRA DE CARBONO

A maioria das fibras de carbono disponíveis hoje no mercado se caracteriza por possuir um baixo módulo de elasticidade e uma alta resistência à tração. Na Tabela 2 pode-se analisar essa informação com diferentes tipos de fibras.

Tipo da fibra de carbono	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência Máxima a tração (MPa)	Deformação de ruptura (%)
De uso geral	220-235	<3790	>1,2
Alta Resistencia	220-235	3790-4825	>1,4
Ultra-alta resistência	220-235	4825-6200	>1,5
Alto módulo	345-515	>3100	>0,5
Ultra alto módulo	515-690	>2410	>0,2

Tabela 2: Característica mecânica de diferentes tipos de fibras de carbono
Fonte: Adaptado Machado (2002).

5.3 SISTEMA COMPÓSITO ESTRUTURAL

Segundo Machado (2002) os sistemas compósitos estruturados com fibras de carbono (CFC) são construídos com dois elementos distintos e fundamentais:

- A matriz polimérica, cuja função é manter as fibras da estrutura coesa, propiciando assim uma boa transferência das tensões de cisalhamento entre dois elementos estruturais, no caso, o concreto e a fibra;
- E o elemento estrutural, constituído pelas fibras de carbono. As fibras são dispostas unidirecionalmente dentro da matriz polimérica e com isso absorve as tensões de tração decorrente dos esforços solicitantes na estrutura.

A Figura 7 esquematiza um sistema compósito com fibra de carbono:

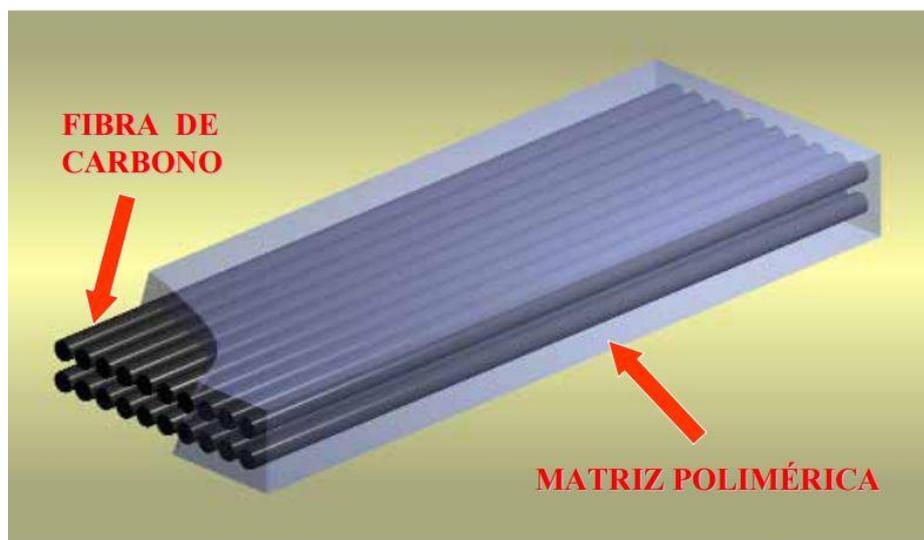


Figura 7: Representação esquemática de um sistema CFC
 Fonte: ABECE, 2015.

Nesta figura 7, os bastonetes são a representação das fibras de carbono imersas na matriz polimérica. Na prática as fibras são responsáveis pela resistência mecânica do sistema, cabendo à matriz polimérica a função de transferir as tensões de cisalhamento do substrato de concreto para o sistema composto.

A Figura 8 mostra uma ampliação com um microscópio eletrônico da matriz polimérica do sistema composto estruturado MBrace™. Pode-se observar que os bastonetes da fibra de carbono se encontram impregnados pelas resinas da matriz polimérica, como visto antes.



Figura 8: Ampliação microscópica de um sistema CFC
 Fonte: ABECE, 2015.

5.4 PROCESSO CONSTRUTIVO

Uma das características dos sistemas compósitos estruturados com fibra de carbono (CFC) é serem aderidas externamente as estruturas que irão reforçar. Devido a isso, para que esse reforço seja eficiente, o substrato que irá receber esse material precisa estar íntegro e são de forma a receber e transmitir os esforços de maneira mais eficiente (MACHADO, 2002).

Caso o mesmo substrato não esteja em perfeita condições, torna-se imprescindível a recuperação do mesmo, para habilitá-lo a receber o esforço proposto.

A seguir, são apresentadas as etapas de recuperação e preparação normalmente feitas para a aplicação de sistemas CFC.

- Recuperação do substrato de concreto: processo que procura corrigir possíveis falhas no substrato de concreto, para uma melhor aplicação do sistema compósito. Nesse caso entra a remoção do concreto desagregado, a regularização da superfície, limpeza das armaduras submetidas a corrosão e o fechamento com concreto ao fim do processo;
- Recuperação de fissuras e trincas estruturais: todas as trincas existentes na estrutura devem ser reforçadas e recuperadas com a injeção de seladores ou resinas a fim de evitar futuras corrosões.

Concluído o processo de recuperação do substrato de concreto, parte-se para a aplicação do CFC propriamente dita, cujas etapas estão descritas a seguir:

- Aplicação do imprimador primário: com o objetivo de penetrar nos poros do concreto preenchendo os vazios para uma melhor aderência;
- Aplicação do regularizador de superfície: utilizadas para vedar e/ou regularizar a superfície de concreto, para que seja uma superfície desempenada e lisa;
- Corte e imprimação das fibras de carbono: as dimensões (comprimento e largura) a serem cortados de fibra estarão indicadas no projeto de reforço estrutural bem como a posição que devem ser instaladas;

- Imprimação da lâmina: a imprimação da lâmina na resina pode ser feita em bancada, aplicando diretamente na fibra, ou fazer o mesmo processo no substrato do concreto, porém, práticas indicam o primeiro processo como mais rápido e mais eficaz.

Independentemente do tipo de imprimação adotada, a colocação da fibra de carbono deve ser imediata, uma vez que o tempo de aplicação da resina saturante gira em torno de 25 a 30 minutos. Dentro desse intervalo de tempo é possível fazer modificações e possíveis alinhamentos da fibra para seu correto posicionamento.

Terminando o processo de posicionamento das fibras é feita a segunda imprimação, por sobre a lâmina instalada, processo feito para garantir que a fibra esteja totalmente imersa na sua matriz polimérica.

Na Figura 9 pode-se visualizar no fim da execução o aspecto do sistema compósito com fibras de carbono.



Figura 9: Materiais componentes do sistema compósito
Fonte: MACHADO, 2002, p 37.

5.5 APLICAÇÕES DOS SISTEMAS COMPÓSITOS

O sistema compósito estruturados com fibra de carbono pode ser utilizado em diversos tipos de estrutura, especialmente onde existam tensões de flexão e cisalhamento, sendo assim, o sistema CFC pode ser utilizado em:

- Reforço de vigas à flexão e ao cisalhamento: em vigas e lajes, pode ser usada para absorver esforços de momentos fletores, positivos e negativos, bem como esforços de cisalhamento;
- Reforço de lajes a flexão: similar ao caso de vigas, pode ser usada a fibra para reforço à flexão seguindo suas direções;
- Reforço de pilares e colunas: para reforço de pilares, podem ser usados de duas formas: aumento da resistência a flexão ou aumento da resistência a compressão por confinamento de seção;
- Adaptação de estruturas existentes de concreto armado a novos carregamentos: em caso de uma estrutura receber um carregamento diferente do projetado inicialmente a aplicação localizada do sistema CFC redistribui os esforços compatibilizando a estrutura a essa alteração.

5.6 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DOS SISTEMAS CFC NO BRASIL

As aplicações dos sistemas compósitos no Brasil abrangem diversos tipos de obras, sejam elas residenciais, industriais e pontes. O objetivo da aplicação do sistema vem da necessidade de reforçar ou até mesmo corrigir patologias que estejam afetando a estrutura. No caso desse trabalho verificaremos a aplicação do compósito em casos onde se havia a necessidade de resistir a uma carga maior do que a projetada inicialmente.

5.6.1 Edifício da Caixa Econômica Federal – Belo Horizonte - MG

Foram aplicados 1830m² do sistema compósito estrutural para possibilitar o acréscimo de sobrecarga no edifício Compensação Regional da Caixa Econômica Federal na cidade de Belo Horizonte - MG. A Figura 10 mostra o edifício reforçado e detalhe da aplicação do sistema CFC. Observa-se que não precisou a retirada do sistema de ar-condicionado e das bandejas elétricas para aplicação do sistema.



Figura 10: Vista do edifício da CEF e detalhes da aplicação do sistema compósito
Fonte: MACHADO, 2002, p 75.

5.6.2 Secretaria de Estado da Fazenda de Minas Gerais – Belo Horizonte - MG

Esse edifício teve 13 dos seus pavimentos reforçados com a utilização do sistema compósito para permitir o acréscimo de sobrecarga de 150kgf/m² para 300kgf/m² assim como corrigidas deficiências estruturais observadas com relação a ação do vento. Foram utilizados 705m² de sistema compósito CFC para o reforço. A Figura 11 mostra o edifício reforçado bem como detalhes de aplicação do sistema.

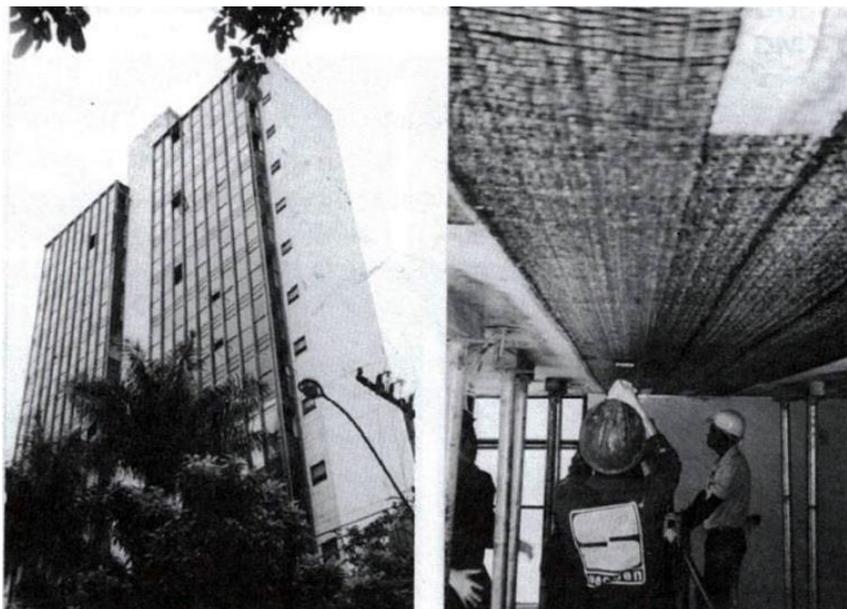


Figura 11: Vista geral do edifício e aplicação
Fonte: MACHADO, 2002, p 76.

5.6.3 Reforço Estrutural da Torre da TV Globo – Rio de Janeiro - RJ

Para permitir a colocação de novos equipamentos de transmissão de sinais, a Rede Globo de Televisão escolheu o sistema compósito com fibras de carbono para reforço de sua torre de transmissão na cidade do Rio de Janeiro - RJ.

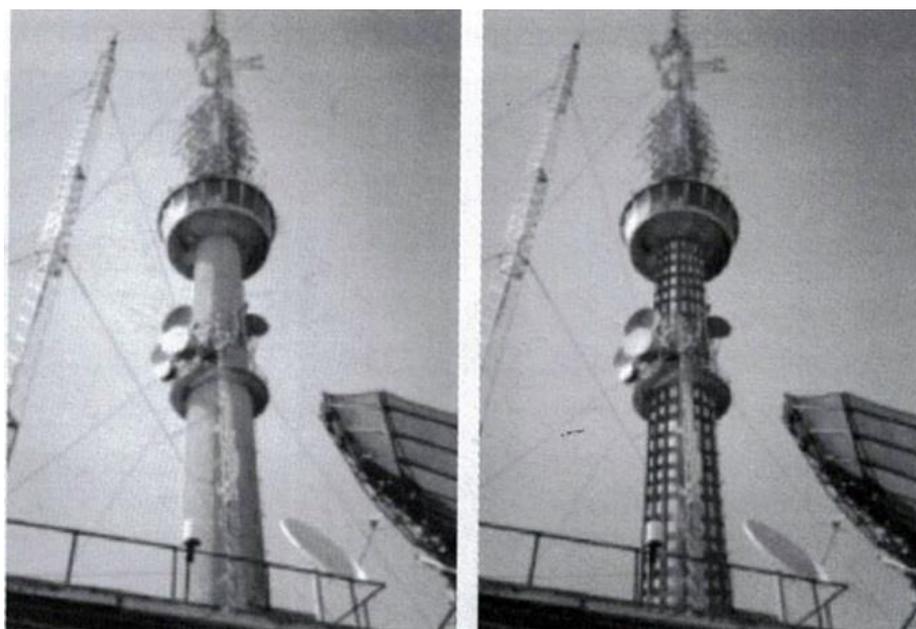


Figura 12: Antena da TV Globo do Rio de Janeiro
Fonte: MACHADO, 2002, p 79.

5.7 DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO ESTRUTURAL REALIZADO COM FIBRAS DE CARBONO

Para o presente trabalho, será realizado apenas o dimensionamento do reforço submetido aos esforços de flexão, desconsiderando os demais esforços que possam estar atuando, como cisalhamento ou torção.

Para realizar o dimensionamento de reforço de uma viga de concreto armado algumas informações são importantes de serem conhecidas antes do início do cálculo, estão entre essas informações a geometria da peça a ser reforçada, cargas solicitantes, propriedades dos materiais empregados, a disposição das armaduras na seção transversal. Tais informações podem ser conhecidas em análise *in loco* ou por meio do projeto estrutural da edificação a ser analisada (SOUZA; RIPPER, 1998).

Segundo Machado (2002) algumas considerações devem ser tomadas no dimensionamento, tais como:

- Obedecer aos critérios de Bernoulli, onde as seções permanecem planas após a incidência de esforços e sua deformação é proporcional a sua distância à linha neutra;
- Os cálculos devem ser feitos de acordo com as dimensões, propriedades dos materiais e taxa de armadura da peça em questão, a ser reforçada;
- Deformação linear até a ruptura do compósito, seguindo a Lei de Hooke para deformações;
- O concreto pode deformar até 0,0035cm/cm, segundo critérios da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO..., 2014);
- Considera-se aderência ótima entre o reforço e a peça original.

A Figura 18 ilustra o esquema de cálculo utilizado para o dimensionamento.

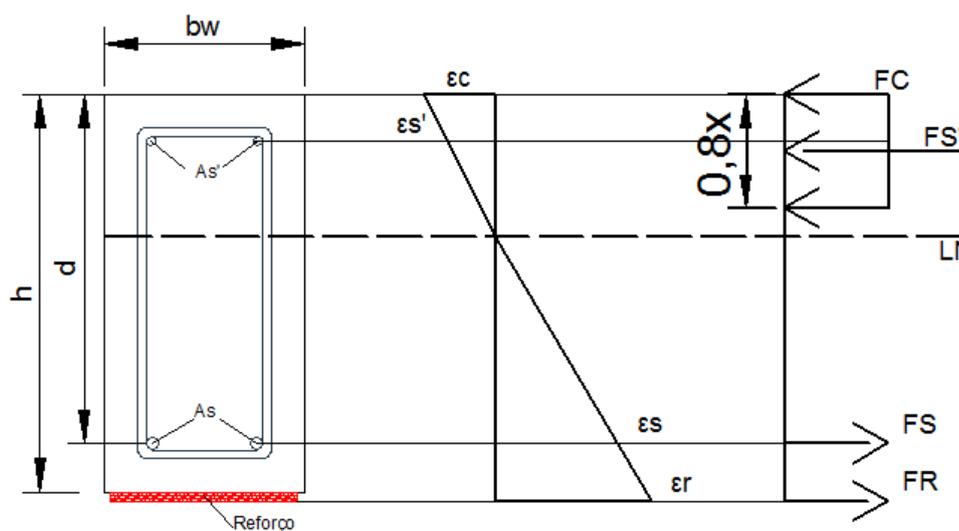


Figura 13: Esquema de cálculo
Fonte: Adaptado Machado (2002).

Os coeficientes de majoração e redução são usados para o dimensionamento, onde:

γ_c – coeficiente de ponderação da resistência do concreto, que de acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO..., 2014), pode ser considerado como 1,4;

γ_s - coeficiente de ponderação da resistência do aço, que de acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO..., 2014), pode ser considerado como 1,15;

ψ – Coeficiente de minoração da resistência do concreto, que de acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO..., 2014) tem valor igual a 0,80 (para seções transversais que aumentam a largura conforme se aproxima da LN) ou a 0,85 (para o contrário ou para seções retangulares), devido ao efeito Rüsç (que considera a variação da resistência do concreto frente a velocidade de carregamento da peça), ao ganho de resistência do concreto ao longo do tempo e a influência da forma cilíndrica do corpo de prova;

ξ – Fator de correção do diagrama parábola-retângulo de tensão do concreto comprimido que, de acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO..., 2014), pode ser admitido como 0,8 para concretos com f_{ck} de até 50MPa.

O processo de dimensionamento do reforço é iterativo, e segue as seguintes etapas:

Encontra-se o valor de y (altura do retângulo de tensões de compressão) da seção, considerando o diagrama parábola-retângulo;

Através do valor de y é encontrada a capacidade resistente da peça, caso essa capacidade seja menor que o novo carregamento, a viga precisara de reforço e o dimensionamento do mesmo segue, caso contrário, a viga não necessita ser reforçada;

Com a necessidade de reforço da viga, deverão ser verificados os valores da posição da linha neutra (x), força resultante da seção tracionada da armadura inferior (F_S), tensão na armadura tracionada (σ), deformação na armadura tracionada (ϵ_{si}) e deformação total da peça (ϵ_{ti}) da viga descarregada, ou seja, apenas com atuação das cargas oriundas do seu peso próprio;

Faz-se o mesmo processo do item anterior agora com o novo carregamento desejado;

Diminui-se o valor calculado de deformação para a viga com o carregamento da deformação da viga com apenas o carregamento de peso próprio;

A partir da Lei de Hooke, encontra-se a tensão em que o reforço estará submetido;

Por fim encontra-se a área efetiva de fibra de carbono (A_f) e o número de camadas necessárias para reforçar a viga estudada.

6. METODOLOGIA

Para o presente trabalho, o objetivo se enquadra no caráter de uma pesquisa exploratória, segundo Sampieri, Collado e Lucio (2006) dizem que estes acontecem quando existe o objetivo de oferecer um quadro de referência para futuras aplicações, se enquadrando assim com os objetivos iniciais da pesquisa.

Com relação à classificação quanto aos procedimentos técnicos, podem definir a mesma como pesquisa bibliográfica e estudo de caso. Segundo Gil (2002) os trabalhos científicos têm o seu início delimitado por uma pesquisa bibliográfica, pois têm embasamento em referências teóricas como livros, artigos e meios eletrônicos. O mesmo autor define, ainda, estudo de caso como um estudo aprofundado de um ou mais objetos, a fim de obter um conhecimento amplo e detalhado.

Por fim, sua abordagem, a pesquisa classifica-se como pesquisa quantitativa, que segundo Lima (2001), tem sua base científica oriunda do positivismo do século XIX, como uma pesquisa com finalidade específica. Dessa forma, segue-se um padrão linear, estabelecendo cada passo de seu desenvolvimento, obtendo resultados passíveis de serem verificados e reverificados em sua confiabilidade e fidedignidade.

6.1 MÉTODO DE TRABALHO

Após a revisão bibliográfica e a maior familiaridade com o assunto, iniciam-se as primeiras análises da estrutura estudada, define-se o modelo estrutural de análise e faz-se o lançamento da mesma no *software* e as avaliações da mudança de carregamento.

O Bloco S da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Pato Branco foi projetado em 1988 pela Construtora Proalto Ltda, a fim de ser um bloco estudantil. Após a sua construção, o mesmo bloco passou a ser utilizado como depósito de livros, fazendo com que toda sua concepção inicial de projeto fosse

modificada. Após essa mudança, o bloco começou a sofrer danos, estruturais, desde grandes fissuras até o desconforto de grandes deslocamentos em algumas vigas.

Em entrevista com o Prof. Dr. Mário Irrigaray, membro do Departamento de Construção Civil (DACOC) da UTFPR, e responsável pelo projeto de reforço da estrutura, o mesmo disse que pela gravidade dos problemas apresentado pela estrutura, como grandes fissuras e deslocamentos excessivos e devido ao pouco tempo que tinham para solucionar o problema, foi decidido pelo uso de perfis de aço para reforço dessas vigas e a retirada imediata do acervo de livros, motivo da sobrecarga do bloco.

Em posse dos projetos estruturais originais do bloco, fez-se a análise e interpretação dos mesmos, a fim de retirar informações importantes, tais como: fck do concreto usado, cargas consideradas, armaduras dimensionadas, bem como as normas vigentes na época em que foi projetado.

Após essa análise, foi realizado o lançamento da estrutura no *software* CAD/TQS, obedecendo à locação dos pilares e vigas originais bem como as normas vigentes, para sobrecarga de utilização como depósito de livros. Os resultados dos esforços serão comparados com os dados do projeto original para cada viga, e com base no comportamento final da viga e sua localização no projeto, selecionaram-se algumas delas para estudo e projeto do reforço estrutural com a utilização dos compósitos de fibra de carbono.

7. LANÇAMENTO ESTRUTURAL NO CAD/TQS

Para verificar o comportamento das vigas solicitadas pelos dois carregamentos a fim de comparar a diferença de momento fletor nas vigas que precisaram de reforço, foi feito o lançamento da estrutura do Bloco S utilizando o *software* de análise e cálculo estrutural CAD/TQS versão 18.

Para o lançamento foi utilizada a planta de fôrmas, original do projeto, datado de 1988, obedecendo toda sua concepção e medidas.

O primeiro passo para o lançamento, foi a criação do edifício novo, onde são inseridas as informações do projeto, tais como: nome do edifício, endereço – localização, tipo de estrutura, parâmetros, que variam conforme o tipo e o local da estrutura e a norma utilizada, no caso, a NB1-78 pois era a norma vigente quando o edifício foi projetado.

Quanto ao modelo estrutural, foi definido como modelo de vigas e pilares, flexibilizados conforme os critérios. Logo após, fez-se a interação solo-estrutura, ativando o comando que faz essa relação.

Após, fez-se o lançamento do *layout* da estrutura, como a fundação e seus pavimentos, definindo o pé-direito de cada pavimento e os diferentes níveis. Para o estudo de caso, foram lançados a fundação, o pavimento térreo e a cobertura. Definiu-se também os materiais que seriam utilizados em função da classe de agressividade ambiental. Para o Bloco S, a edificação se enquadra na Classe II – Moderada Urbana, definindo então o f_{ck} mínimo de vigas, lajes, pilares e fundações como C25, ou seja, concreto de 25 Mpa. Definiu-se também os cobrimentos mínimos para a classe ambiental exigida, no caso, 3 centímetros.

Para a definição das cargas, o programa exige a separação de cargas permanentes e variáveis. É preciso definir o valor da carga de vento, que age sobre a edificação, que segundo o mapa das isopleias para a região de Pato Branco, fica em cerca de 47m/s.

É preciso definir também a categoria de rugosidade, parâmetro que relaciona as condições do terreno, para a categoria escolhida temos como base terreno planos ou ondulados, com obstáculos, definindo assim como categoria 3. Já a classe da edificação se encaixa como classe B, onde a maior dimensão horizontal ou vertical entre 20 e 50m. O fator estatístico é classificado como 1, que engloba

edificações em geral, como hotéis residências, comércio e indústrias com alta taxa de ocupação.

Após fazer a definição de todos os dados iniciais e parâmetros pode-se então começar com o lançamento da estrutura, iniciando pelos pilares.

Para o lançamento dos pilares, foi seguido a planta original de fôrmas, obedecendo a seção, a direção e a localização dos mesmos. Considerou-se que o pilar nasce na fundação, no caso, nas sapatas para que houvesse interação entre os dois elementos, de infraestrutura e superestrutura.

Após lançar os pilares, fez-se o lançamento das vigas, seguindo também a localização segundo a planta original de fôrmas, bem como os valores indicados da seção transversal de cada viga e sempre obedecendo o eixo dos pilares. Para as vigas foram definidas as cargas atuantes sobre cada uma, sendo elas: peso próprio e carga de laje (já calculados pelo programa). Em alguns casos fez-se o lançamento do peso da alvenaria sobre a viga, pois nem todas as vigas possuem alvenaria sobre ela.

Para lançamento das sapatas, foi obedecido também às dimensões dadas em projeto dando o travamento das mesmas através das vigas baldrames, identificadas em projeto também.

Para o lançamento das lajes, diferente dos outros elementos da estrutura, não se teve acesso ao projeto e detalhamento dos mesmos. Desta forma, foi considerada laje do tipo pré-moldada com o uso de vigotas de concreto com altura 7 cm e com o material de enchimento de tabelas cerâmicas e capa de concreto de 5 cm, totalizando uma altura de 12 cm. Outro parâmetro que se faz necessário foi a carga permanente e acidental que atuam na laje. Como carga permanente definiu-se 150kgf/m² referente aos revestimentos de piso e teto e como carga acidental fez-se o estudo com dois tipos de carregamentos. Usando a NBR 6120 (ASSOCIAÇÃO..., 1980) adotou-se o valor de carga acidental de 300kgf/m² para o caso de serviço e manutenção da laje de cobertura. E para a laje do primeiro pavimento foi lançada uma carga acidental de 300kgf/m² que evidencia um bloco de salas de aula. Após fazer o processamento da estrutura, obtiveram-se os gráficos dos esforços atuantes nas vigas e as áreas de aço necessárias em cada uma delas. Após a obtenção destes esforços mudou-se então o carregamento acidental para 400kgf/m², carregamento correspondente a um bloco de biblioteca com depósito de livros.

Processou-se novamente a estrutura obtendo-se agora novos esforços atuantes nas vigas e as novas áreas de aço.

Para o lançamento da escada, fez-se um novo patamar localizado no centro do pavimento térreo, conforme as dimensões do projeto, porém usando o tipo de laje maciça com 12 cm de espessura e carga acidental de 300kgf/m², correspondente as escadas com acesso ao público. Foi realizado também, vigas no mesmo local, para o apoio do patamar e então se lançou a escada conforme as dimensões em projeto, pisada de 28,5 cm espelho 16,5 cm.

As Figuras 13 e 14 mostram o modelo 3D com ferramenta de visualização do *software* CAD/TQS, com todos os elementos da estrutura lançada: sapatas, vigas, pilares, lajes e escada.

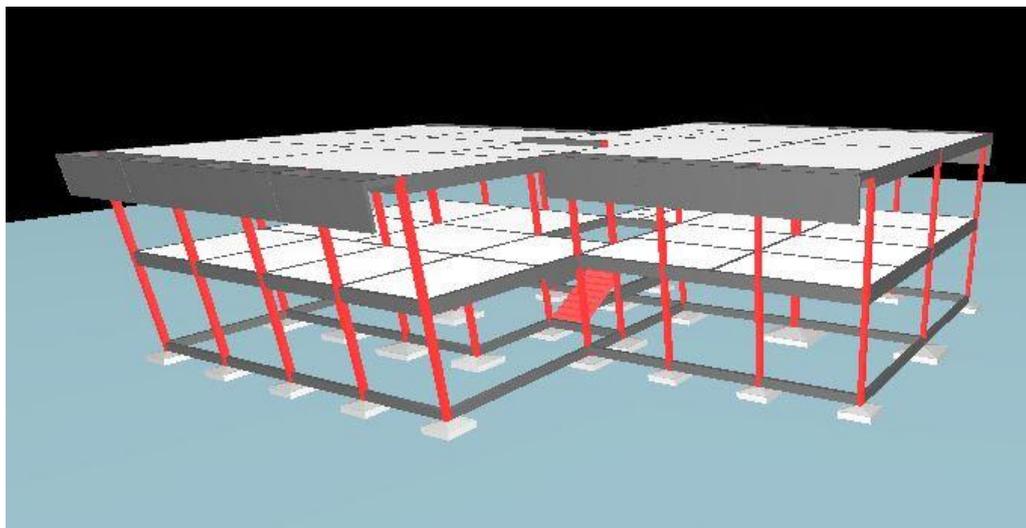


Figura 14: Vista 3D da estrutura do Bloco S
Fonte: Autores (2016).

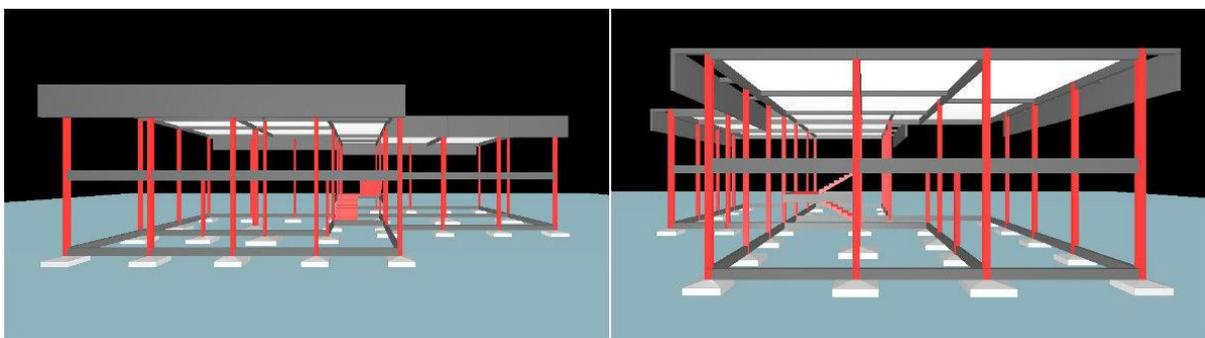


Figura 15: Vista 3D frontal e lateral da estrutura do Bloco S
Fonte: Autores (2016).

8. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O uso do Bloco S para depósito de livros, ao invés de abrigar salas de aula como projetado, provocou danos estruturais. Assim fez-se um reforço estrutural utilizando perfis de aço nas vigas do pavimento térreo: V4 (trecho B e C), V7 (trecho E e F), V8, V9 (trecho A e B), V15, V19 (trecho D e E) e V20. As vigas reforçadas eram as mais solicitadas e as que apresentaram grandes aumentos em seus momentos fletores positivos, observados na análise neste trabalho.

As Figuras 15 e 16, mostram algumas das vigas do Bloco S que foram reforçadas com perfis de aço.



Figura 16: V4, V7 e V20 reforçadas com perfis de aço
Fonte: Autores (2015).



Figura 17: V9 e V15 reforçadas com perfis de aço
Fonte: Autores (2015).

As vigas escolhidas para análise e projeto de reforço com compósitos de fibra de carbono foram as vigas: V7, V8, V9 e V20, destacadas em negrito na Figura 17.

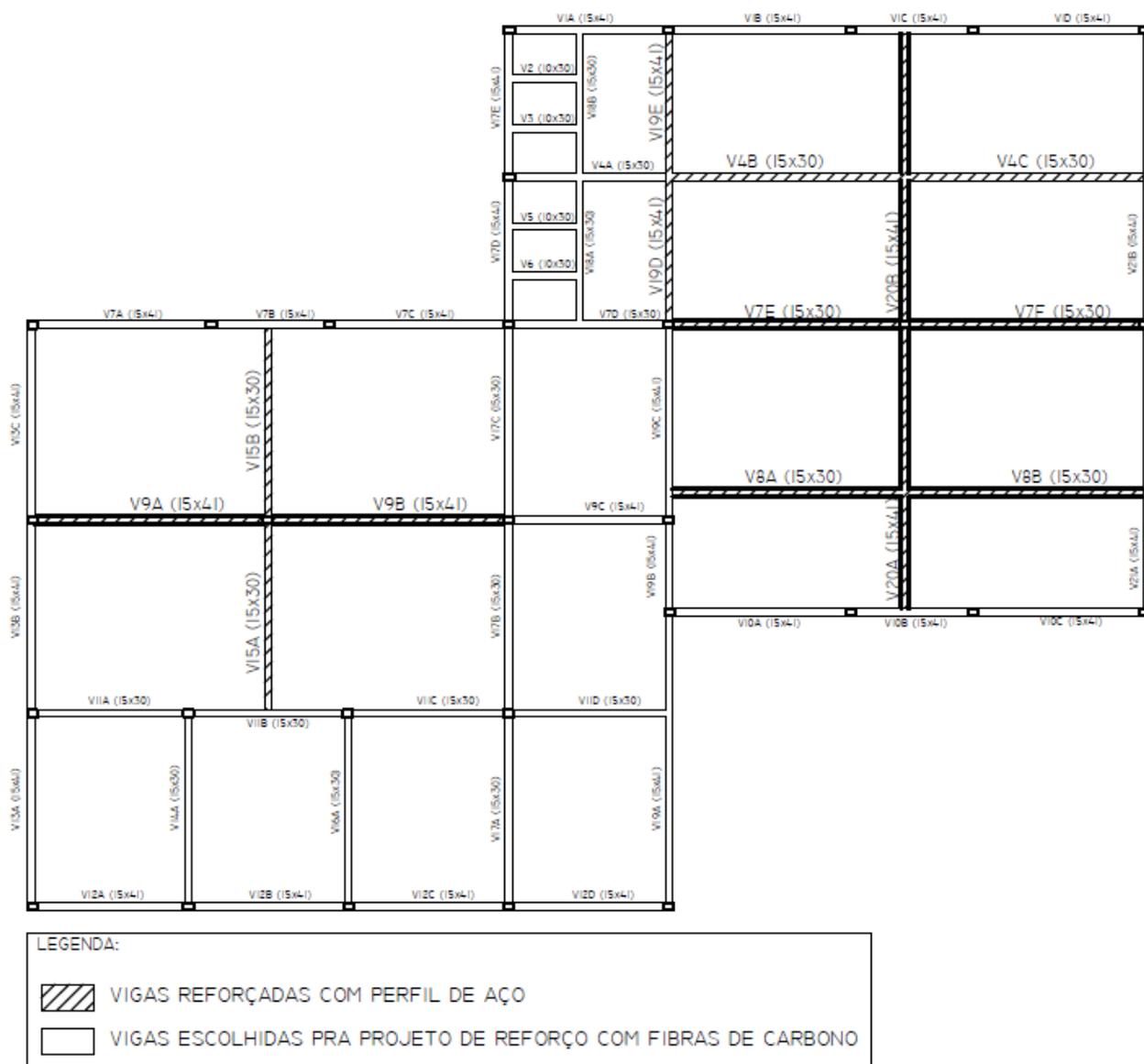


Figura 18: Vigas reforçadas com perfis de aço e vigas escolhidas para o projeto de reforço
Fonte: Autores (2016).

Pode-se notar que a maioria das vigas, reforçadas com perfis de aço e selecionadas para o estudo, encontram-se no lado direito da edificação. Isso se deve a redução do número de pilares em relação ao lado esquerdo e conseqüentemente ao aumento dos vãos entre os pilares, solicitando ainda mais as

vigas e fazendo com que as mesmas apresentem maiores momentos, principalmente quando do aumento da carga accidental, além da projetada.

A viga 7 possui seis trechos e dois deles foram reforçados devido ao excesso de carregamento. Pode-se notar que, nesses trechos reforçados, a viga teve uma redução significativa na sua altura e também um grande aumento no vão em relação aos outros trechos não reforçados. A redução da altura foi de 11 cm, passando de 41 cm nos primeiros quatro trechos para 30 cm nos dois últimos. O vão das vigas que nos primeiros trechos possuíam em média 3,0m passou a ter aproximadamente 4,5 m, o que, em um pré-dimensionamento, acarretaria uma altura de 45 cm, o que pode justificar o reforço sendo utilizado somente nos dois últimos trechos.

A viga 8 e a viga 9 são semelhantes a viga 7, porém, a viga 9 possui uma altura maior, de 41 cm. Elas também possuem grandes vãos e recebem cargas de lajes de ambos os lados o que faz com que elas sejam muito solicitadas.

A viga 20 possui dois trechos e ambos apresentam vãos maiores de 5,0 m e recebem cargas provenientes do descarregamento da viga 4 e da viga 8, além do carregamento proveniente do descarregamento das lajes, o que faz com que a viga 20 seja mais solicitada.

8.1 PROJETO DE REFORÇO COM LÂMINAS DE FIBRA DE CARBONO

8.1.1 Procedimento para o Dimensionamento

Para o dimensionamento do reforço das quatro vigas, escolhidas para estudo, foram elaboradas planilhas eletrônicas, onde dados da estrutura são inseridos e o valor do momento resistente com o reforço é calculado, juntamente com a área de reforço, a se aplicar. O dimensionamento segue o esquema que é explicado em Machado (2002).

8.1.2 Projeto de Reforço da Viga 8

Para um melhor entendimento de todo o dimensionamento do reforço, serão apresentadas as etapas de cálculo de uma das vigas que foram reforçadas no Bloco S: O trecho A da Viga 8; o trecho B e as demais vigas estudadas serão apresentados nos próximos tópicos por meio de tabelas contendo as informações relevantes ao dimensionamento.

A Viga 8 do Bloco S da UTFPR – Câmpus Pato Branco é uma viga contínua que possui como apoios as vigas 19, 20 e 21. Apresenta uma base de 15 cm, altura de 30 cm, resistência característica do concreto de 20 MPa, armadura composta por 2 ϕ 10mm como armadura de tração (área total de 1,57 cm²) e 2 ϕ 8,0mm como armadura de compressão (área total de 1,0 cm²). A tensão de escoamento do aço é de 500 MPa, a altura útil (d) é de 26,37 cm e a distância entre a fibra mais comprimida até o centro de gravidade da armadura superior é de 3,63 cm.

Os principais dados iniciais da viga em análise estão ilustrados na Figura 19:

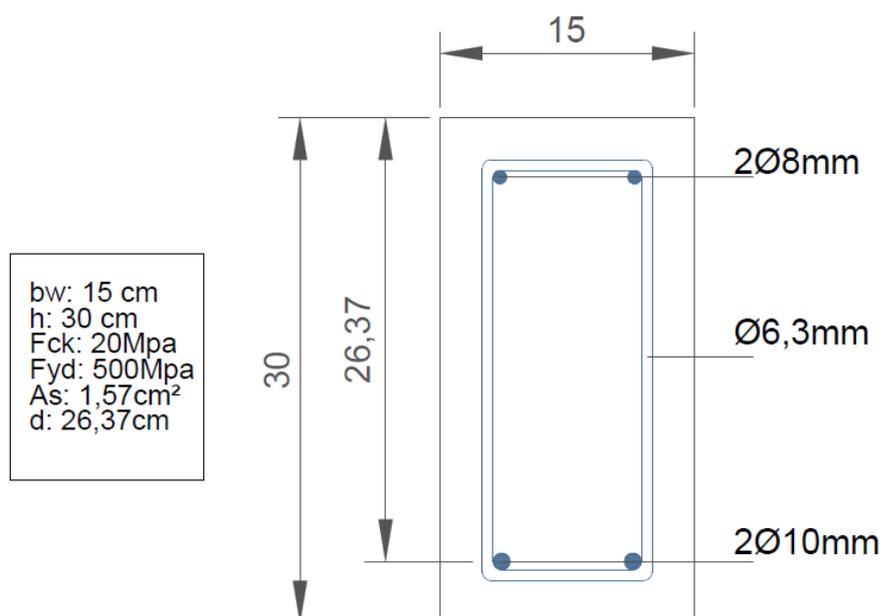


Figura 19: Dados da viga V8
Fonte: Autores (2016).

O material usado para o reforço desta viga foi: Compósito de Fibra de Carbono MBrace CF130, que possui as seguintes propriedades:

- Módulo de elasticidade (ER) de 22700 KN/cm²;
- Deformação máxima dada pelo fabricante (ϵ_{ru}^*) de 1,7%;
- Espessura do reforço (e) de 0,165 mm;
- Resistência máxima de tração, dada pelo fabricante (σ_{ru}^*) de 3800 MPa.

Através do lançamento estrutural realizado no CAD/TQS, foi obtido o diagrama de momento fletor da viga, projetado com a carga de biblioteca, com seus valores máximos. Tal diagrama pode ser observado na Figura 20:

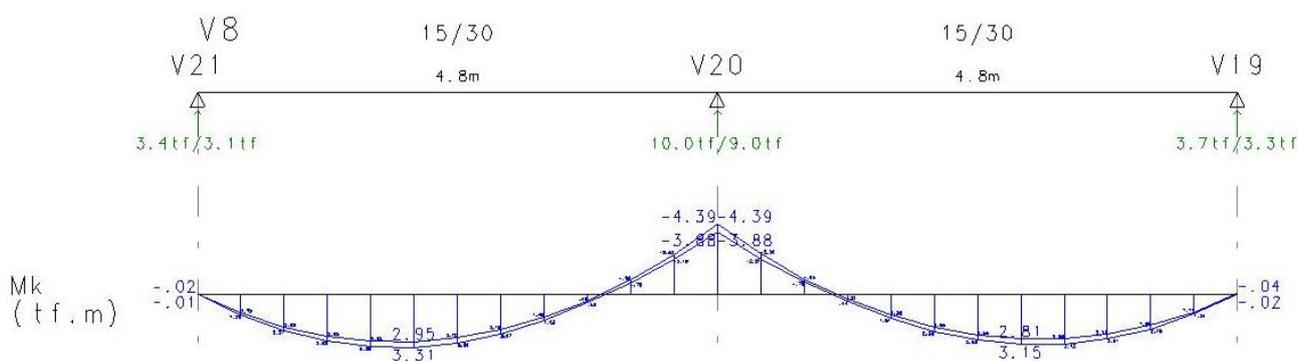


Figura 20: Diagrama de momento fletor atuante na Viga V8
Fonte: Autores (2016).

Para calcular a capacidade resistente original da viga foi necessário o uso de duas equações. A Equação 1 que fornece o valor da altura do retângulo do diagrama TensãoxDeformação (y), e a Equação 2, onde encontra-se o valor, de projeto, do momento resistente da viga (M_{di}). O valor da área de aço utilizada, foi a original, que estava em projeto.

$$A_s * f_{yd} = \psi * b_w * y * f_{cd} \quad (1)$$

$$1,57 \text{ cm}^2 * \left(\frac{50}{1,15} \right) \text{ KN/cm}^2 = 0,85 * 15 \text{ cm} * y * \left(\frac{2}{1,4} \right) \text{ KN/cm}^2$$

Isolando y , chega-se ao valor de $y = 3,74\text{cm}$.

Esse valor, substituído na Equação 2.

$$M_{di} = A_s * f_{yd} * (d - 0,5y) \quad (2)$$

$$M_{di} = 1,57\text{cm}^2 * \left(\frac{50}{1,15}\right) \text{KN/cm}^2 * (26,37\text{cm} - 0,5 * 3,74)$$

Resulta em:

$$M_{di} = 1672,39 \text{KN.cm}$$

Logo, a viga original possui uma capacidade resistente de 1672,39 KN.cm. Este valor, comparado com o esforço encontrado no dimensionamento do CAD/TQS para o trecho 1 da Viga V8, como momento solicitante $M_{df} = 3310 \text{KN.cm}$, tem-se que:

$$M_{di} < M_{df}$$

$$1672,39 \text{KNcm} < 3310 \text{KNcm}$$

Logo, a viga precisa ser reforçada.

8.1.2.1 Cálculo da deformação existente na viga com a utilização do descarregamento

Segundo Machado (2002) precisamos conhecer o nível de tensão já existente na estrutura a ser reforçada, para que, assim, seja possível conhecer o nível de tensão a que o reforço será submetido. A deformação preexistente na peça estrutural deve ser calculada a partir de seu peso próprio, quando a peça na aplicação do reforço é escorada ou a partir de toda sua carga atuando, onde não houver escoramento.

Como para o caso estudado não há pretensão de executar o reforço, serão feitas as duas verificações para analisar o comportamento de cada uma das duas situações.

A fim de verificar os valores do gráfico do momento fletor da viga com apenas seu peso próprio atuando, foi usado o *software Ftool*, onde a carga lançada na viga foi o produto entre a base e altura da seção com a massa específica do concreto de 2500Kg/m³.

$$Pp = \gamma_{con} * bw * h \quad (3)$$

$$Pp = 2500 \text{ Kg/m}^3 * 0,15\text{m} * 0,30\text{m} = 1,125 \text{ KN/m}$$

Com esse valor de carga distribuída em toda a extensão da viga, chega-se ao diagrama de momento fletor, que pode ser visto na Figura 21.

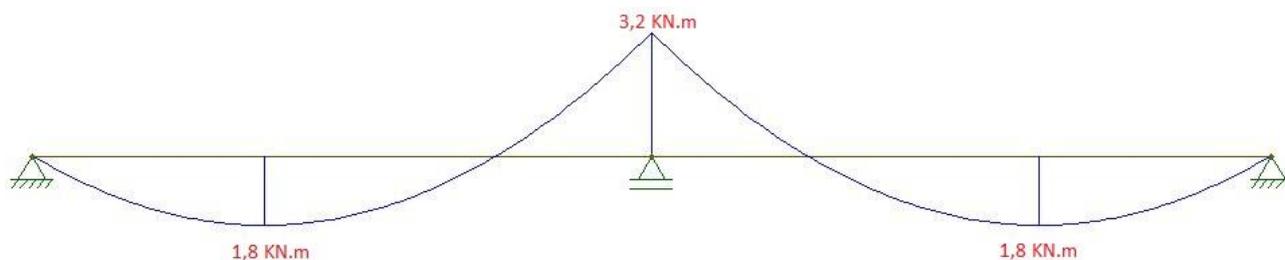


Figura 21: Diagrama de momento fletor da viga V8, considerando apenas seu peso próprio
Fonte: Autores (2016).

O valor obtido para o momento máximo positivo no primeiro trecho foi de 1,8 KNm. Com este valor pode-se agora encontrar a posição da linha neutra da mesma. É possível encontrar a posição da linha neutra, por equilíbrio, através de uma equação do segundo grau de modelo $ax^2+bx+c=0$ onde x é a posição da linha neutra, tem-se então que:

$$a = bw * \psi * fcd * \frac{\zeta^2}{2} \quad (4)$$

$$a = 15\text{cm} * 0,85 * \left(\frac{2}{1,4}\right) \text{KN/cm}^2 * \frac{0,8^2}{2} = 5,82 \text{ KN/cm}$$

$$b = -(bw * \psi * fcd * \zeta * d)$$

$$b = -(15\text{cm} * 0,85 * \left(\frac{2}{1,4}\right) \text{KN/cm}^2 * 0,8 * 26,37\text{cm}) = -384,24 \text{ KN}$$

$$c = Md_{pp}$$

$$c = 180 \text{ KNcm} * 1,4 = 252 \text{ KNcm}$$

Resolvendo com a equação de segundo grau, tem-se:

$$x = 0,66 \text{ cm}$$

Com o valor da linha neutra encontrado calcula-se a força referente à armadura inferior:

$$FS = \psi * f_{cd} * b_w * \zeta * x \quad (5)$$

$$FS = 0,85 * \left(\frac{2}{1,4}\right) \text{ KN/cm}^2 * 15 \text{ cm} * 0,8 * 0,66 \text{ cm} = 9,61 \text{ KN}$$

Com a força na armadura inferior calculada pode-se encontrar a tensão que a mesma está submetida, dividindo a força pela área de aço da viga.

$$\sigma_s = \frac{FS}{A_s} = \frac{9,61 \text{ KN}}{1,57 \text{ cm}^2} = 6,15 \text{ KN/cm}^2 \quad (6)$$

Com a tensão que a armadura está submetida, admitindo um módulo de elasticidade para o aço de 21000KN/cm², tem-se a deformação na armadura inferior.

$$\varepsilon_{si} = \frac{\sigma_s}{E_R} = \frac{6,15 \text{ KN/cm}^2}{21000 \text{ KN/cm}^2} = 0,00029 = 0,029\% \quad (7)$$

Sendo assim, pode-se agora encontrar o valor da deformação inicial na base inferior da viga por semelhança de triângulo, onde essa deformação deverá ser subtraída da deformação referente ao esforço, que será calculada no item 8.1.2.2.

$$\varepsilon_{ti} = \varepsilon_{si} * \left(\frac{h-x}{d-x}\right) = 0,029 * \left(\frac{30 \text{ cm} - 0,66 \text{ cm}}{26,37 \text{ cm} - 0,66 \text{ cm}}\right) = 0,033\% \quad (8)$$

8.1.2.2 Cálculo da deformação existente na viga com a utilização do carregamento

O processo para encontrar o valor da linha neutra para esse caso é análogo ao caso interior, sendo “c” o único termo que sofre alteração da equação de segundo grau, onde se tem:

$$c = 3310 \text{ KNcm}$$

Refazendo a equação encontra-se outro valor para a linha neutra:

$$x = 10,19 \text{ cm}$$

Agora, pode-se encontrar a força, tensão e deformação na armadura inferior da viga.

$$FS = 0,85 * \left(\frac{2}{1,4}\right) \text{ KN/cm}^2 * 15 \text{ cm} * 0,8 * 10,19 \text{ cm} = 148,47 \text{ KN}$$

$$\sigma_s = \frac{FS}{A_s} = \frac{148,57 \text{ KN}}{1,57 \text{ cm}^2} = 94,57 \text{ KN/cm}^2$$

Pode-se perceber que a tensão na armadura inferior foi superior ao valor de escoamento do aço que é de $50/1,15 = 43,47 \text{ KN/cm}^2$, isso se deve ao fato que para o dimensionamento de reforço com fibra de carbono a ação da armadura de compressão é desconsiderada. Segundo Perelles (2013), as armaduras de compressão não influenciam de maneira significativa na posição da linha neutra, deste modo, são desconsideradas.

Considerando a deformação no concreto (ϵ_c) de 0,35%, calcula-se a deformação na armadura inferior.

$$\epsilon_{si} = \epsilon_c * \left(\frac{d-x}{x}\right) = 0,35 * \left(\frac{26,37-10,19}{10,19}\right) = 0,556\% \quad (9)$$

E por afim encontrar a deformação na base inferior da viga sujeita ao carregamento proposto.

$$\epsilon_{ti} = \epsilon_{si} * \left(\frac{h-x}{d-x}\right) = 0,556 * \left(\frac{30 \text{ cm} - 10,19 \text{ cm}}{26,37 \text{ cm} - 10,19 \text{ cm}}\right) = 0,681\% \quad (10)$$

Para obter uma deformação real da base da viga é recomendado realizar a subtração do valor da deformação com a viga carregada do valor da deformação com a viga descarregada, tendo-se, assim, a deformação final a qual está submetida, valor que será usado para o dimensionamento do reforço.

$$\varepsilon_f = 0,681 - 0,033 = 0,647\%$$

Com a deformação existente na viga já devidamente calculada, foi possível calcular, agora algumas características da fibra que está sendo usada para o reforço. Como primeira informação, calcula-se a tensão a que a fibra estará submetida. Seguindo a Lei de Hooke e utilizando a fibra MBrace CF130 com módulo de elasticidade $ER=22700\text{KN/cm}^2$ tem-se:

$$\sigma_R = \varepsilon_f * ER = \frac{0,647}{100} * 22700 \text{ KN/cm}^2 = 146,89 \text{ KN/cm}^2 \quad (11)$$

O fabricante disponibiliza a informação da tensão máxima de tração que a fibra pode suportar e, portanto deve-se realizar essa verificação. Para a fibra utilizada uma tensão máxima de tração de 380 KN/cm^2 , portanto:

$$146,89 \text{ KN/cm}^2 < 380 \text{ KN/cm}^2 \therefore \text{VERIFICA!}$$

Feita a verificação pode-se, então, encontrar a área efetiva de fibra de carbono (A_f) necessária para reforçar a viga com o novo carregamento através da Equação 12:

$$Md = A_s * f_{yd} * (d - 0,4x) + A_f * \sigma_R * (h - 0,4x) \quad (12)$$

$$3310 = 1,57 * \left(\frac{50}{1,15}\right) * (26,37 - 0,4 * 10,19) + A_f * 146,89 * (30 - 0,4 * 10,19)$$

$$A_f = 0,82\text{cm}^2$$

Como cada fibra possui uma espessura de $0,0165\text{cm}$, tem-se como largura teórica (l_i).

$$l_i = \frac{A_f}{e} = \frac{0,82\text{cm}^2}{0,0165\text{cm}} = 49,53\text{cm} \quad (13)$$

Entretanto, para esta largura deve se levar em conta a largura da viga, número de camadas e a folga (s) que se deixa nas laterais da viga. Adotando uma folga de 0,5cm de cada lado, tem-se o número de camadas dado pela Equação 14, onde n deve ser um número inteiro.

$$n = \frac{li}{bw-2s} = \frac{49,53}{15-2*0,5} = 3 \text{ camadas} \quad (14)$$

Portanto, para que a viga em estudo atenda ao novo carregamento da edificação serão necessárias 3 camadas de fibra de carbono, devidamente aplicadas em toda a extensão do trecho A.

Pode-se observar na Figura 22, um esquema em corte da viga com o reforço aplicado.

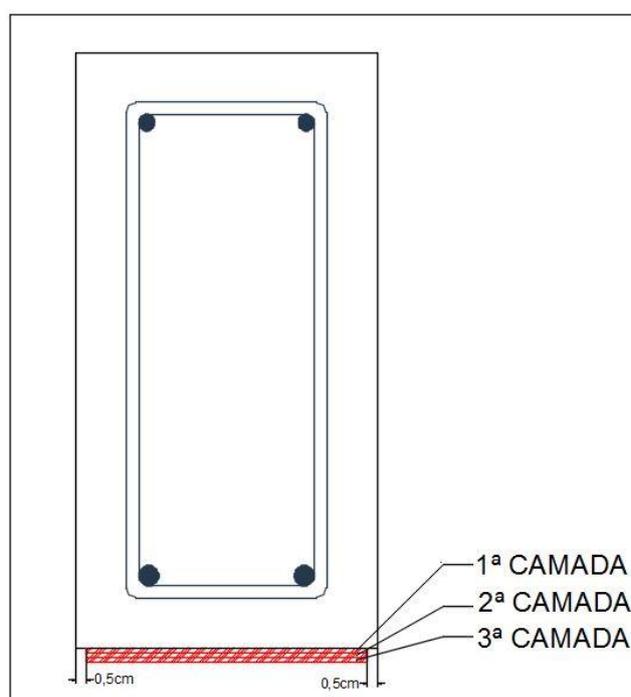


Figura 22: Corte do trecho A da Viga V8, com a fibra de carbono aplicada
Fonte: Autores (2016).

As informações do trecho B da viga V8 são as mesmas apresentadas nas Figuras 19, 20 e 21. O único valor que diferencia o trecho A do trecho B é o valor do momento fletor encontrado no CAD/TQS que possui como valor 3,15 tf.m. Como o cálculo é o mesmo apresentados no item 8.1.2, mudando apenas o valor do

momento fletor, apresentar-se-á a Tabela 3, contendo os resultados e o número de camadas necessárias para o reforço da viga.

VIGA 08 - TRECHO B	
Capacidade resistente atual da viga (Mdi)	1672,13
PESO PRÓPRIO	
Momento Fletor (Mpp)	180
Altura da linha neutra (X)	0,66
Força na armadura inferior (FS)	9,65
Tensão na armadura inferior (σ_S)	6,15
Deformação na base inferior (ϵ_{ti})	0,033
NOVO CARREGAMENTO	
Momento fletor (Mdf)	3150
Altura da linha neutra (X)	9,59
Força na armadura inferior (FS)	139,80
Tensão na armadura inferior (σ_S)	89,04
Deformação na base inferior (ϵ_{ti})	0,744
COMO $M_{di} < M_{df}$ A VIGA NECESSITA DE REFORÇO	
REFORÇO	
Deformação real (ϵ_f)	0,711
Tensão na fibra (σ_R)	161,40
Tensão admissível na fibra (σ_{adm})	380
VERIFICA	
Número de camadas	2

Tabela 3: Tabela de dimensionamento de reforço estrutural com fibras de carbono para o trecho B da viga V8
Fonte: Autores (2016).

Portanto, para que o trecho B da viga V8 atenda ao novo carregamento da edificação serão necessárias 2 camadas de fibra de carbono, devidamente aplicadas em toda a extensão do trecho B.

8.1.3 Projeto de Reforço da Viga 9

A viga V9 se apoia em quatro pilares, possuindo assim três trechos, porém, apenas dois desses trechos tiveram que ser reforçados, o trecho A e o trecho B. São esses, trechos, que possuem maiores vãos e recebem cargas de lajes de ambos os lados, fazendo com que a viga seja solicitada e precise de reforço.

A Figura 23 mostra o corte da viga V9 com suas informações.

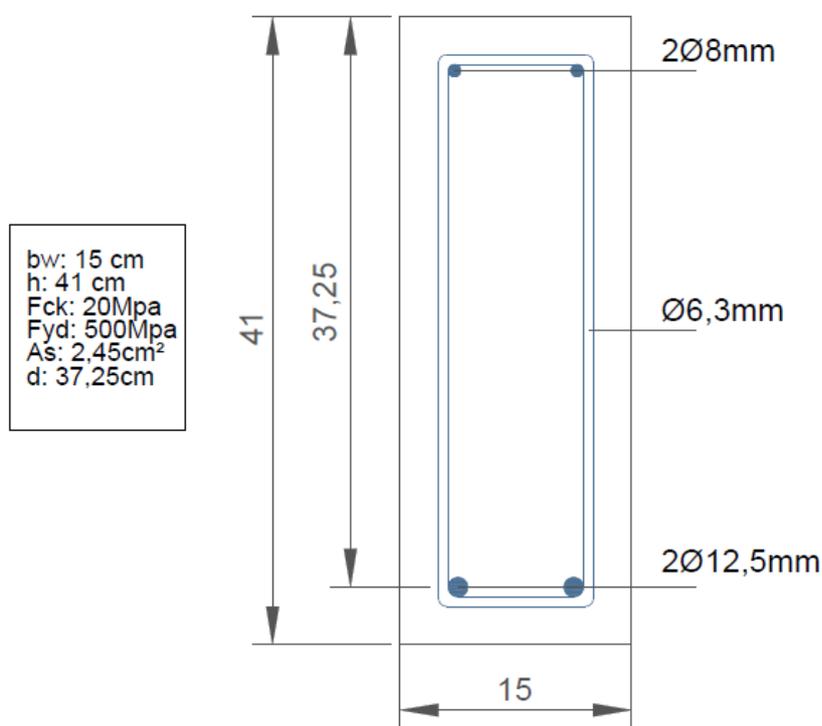


Figura 23: Dados da viga V9
Fonte: Autores (2016).

A Figura 24 mostra o gráfico de momento fletor da viga V9 gerado pelo CAD/TQS, considerando o carregamento como biblioteca.

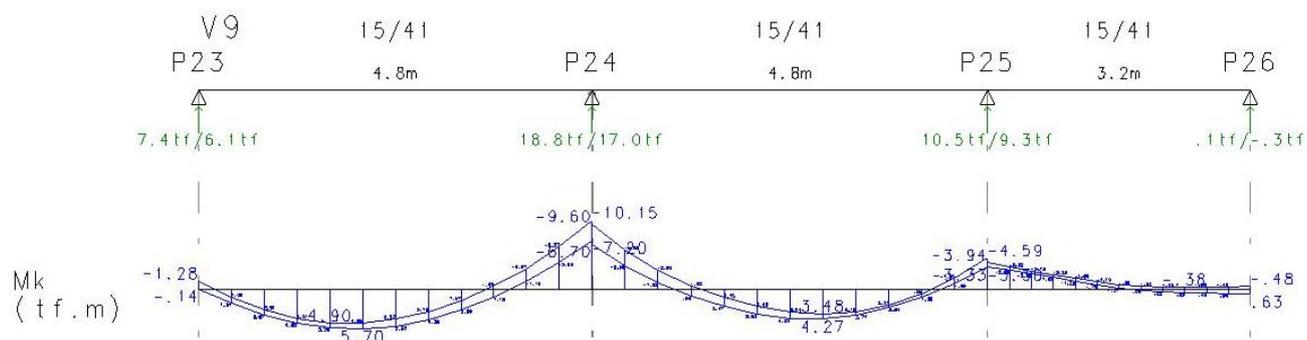


Figura 24: Diagrama de momento fletor atuante na Viga V9
Fonte: Autores (2016).

A Figura 25, apresenta em KN.m os valores de momento fletor devido ao peso próprio da viga V9. O valor obtido para o momento máximo positivo no primeiro trecho foi de 2,7 KN.m e no segundo trecho foi de 1,4 KN.m.

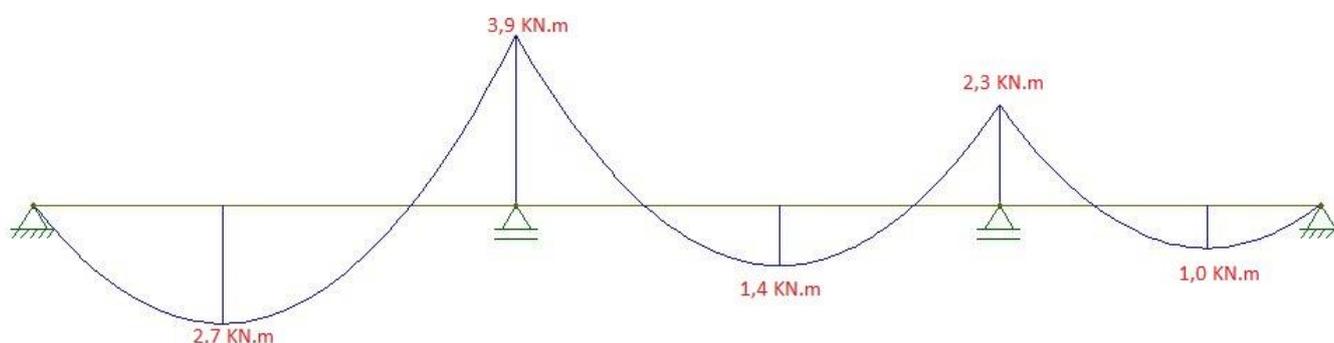


Figura 25: Diagrama de momento fletor da viga V9, considerando apenas seu peso próprio
Fonte: Autores 2016.

Por fim, a Tabela 4, apresenta os resultados dos cálculos apresentados na viga V8, e o número de camadas de fibra necessárias para o reforço da viga V9.

VIGA 09 - TRECHO A		VIGA 09 - TRECHO B	
Capacidade resistente atual da viga (Mdi)	3655,39	Capacidade resistente atual da viga (Mdi)	3655,39
PESO PRÓPRIO		PESO PRÓPRIO	
Momento Fletor (Mpp)	270	Momento Fletor (Mpp)	200
Altura da linha neutra (X)	0,70	Altura da linha neutra (X)	0,52
Força na armadura inferior (FS)	10,23	Força na armadura inferior (FS)	7,56
Tensão na armadura inferior (σ_S)	4,17	Tensão na armadura inferior (σ_S)	3,09
Deformação na base inferior (ϵ_{ti})	0,022	Deformação na base inferior (ϵ_{ti})	0,016
NOVO CARREGAMENTO		NOVO CARREGAMENTO	
Momento fletor (Mdf)	5700	Momento fletor (Mdf)	4270
Altura da linha neutra (X)	12,07	Altura da linha neutra (X)	8,68
Força na armadura inferior (FS)	175,86	Força na armadura inferior (FS)	126,45
Tensão na armadura inferior (σ_S)	71,78	Tensão na armadura inferior (σ_S)	51,61
Deformação na base inferior (ϵ_{ti})	0,839	Deformação na base inferior (ϵ_{ti})	1,304
COMO $M_{di} < M_{df}$ A VIGA NECESSITA DE REFORÇO		COMO $M_{di} < M_{df}$ A VIGA NECESSITA DE REFORÇO	
REFORÇO		REFORÇO	
Deformação real (ϵ_f)	0,817	Deformação real (ϵ_f)	1,287
Tensão na fibra (σ_R)	185,48	Tensão na fibra (σ_R)	292,25
Tensão admissível na fibra (σ_{adm})	380	Tensão admissível na fibra (σ_{adm})	380
VERIFICA		VERIFICA	
Número de camadas	3	Número de camadas	1

Tabela 4: Tabela de dimensionamento de reforço estrutural com fibras de carbono da Viga V9
Fonte: Autores (2016).

Logo, para que a viga V9 atenda ao novo carregamento da edificação, serão necessárias três camadas de fibra de carbono, devidamente aplicadas ao longo da extensão do trecho 1 e, uma camada de fibra de carbono aplicada em toda a extensão do trecho 2.

8.1.4 Projeto de Reforço da Viga 20

A viga V20 se apoia em duas vigas nas extremidades e um pilar ao centro, tendo assim dois trechos, sendo os dois com necessidade de reforço. O trecho A e o trecho B, além de possuir grandes vãos, recebem cargas provenientes do descarregamento de duas vigas, ao centro de cada trecho, além de receber a

carga de laje em ambos os lados, fazendo com que a viga seja solicitada e precise de reforço.

A Figura 26 mostra o corte da viga V20 em ambos os trechos com suas informações.

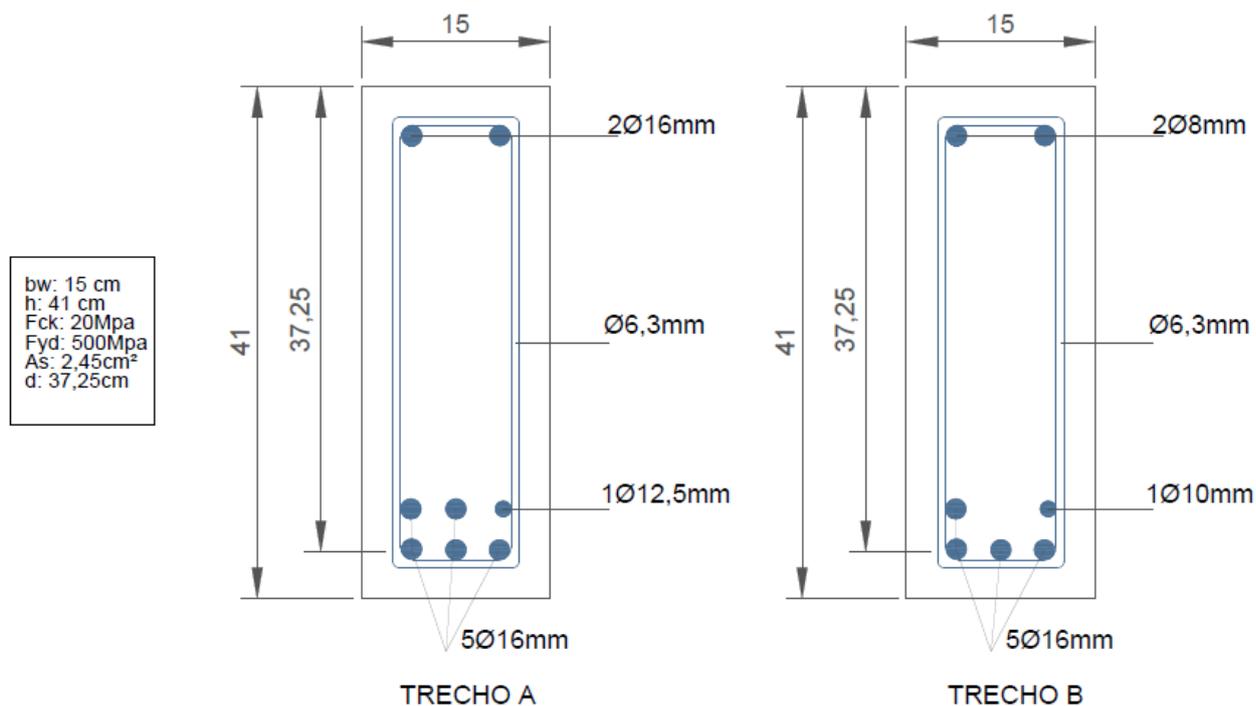


Figura 26: Dados da viga V20
Fonte: Autores (2016).

A Figura 27 mostra o gráfico de momento fletor da viga V20 gerado pelo CAD/TQS, considerando o carregamento como biblioteca.

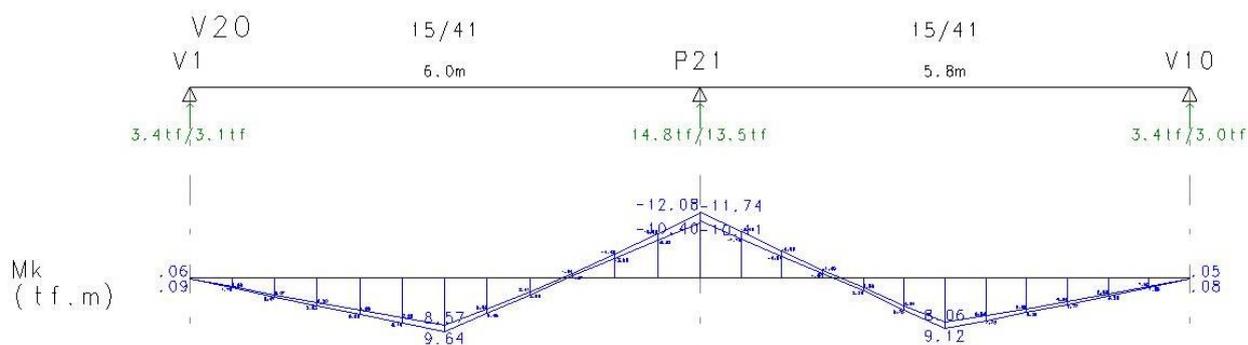


Figura 27: Diagrama de momento fletor atuante na Viga V20
Fonte: Autores (2016).

A Figura 28, apresenta em KN.m os valores de momento fletor devido ao peso próprio da viga V20. O valor obtido para o momento máximo positivo no primeiro trecho foi de 4,0 KN.m e no segundo trecho foi de 3,6 KN.m.

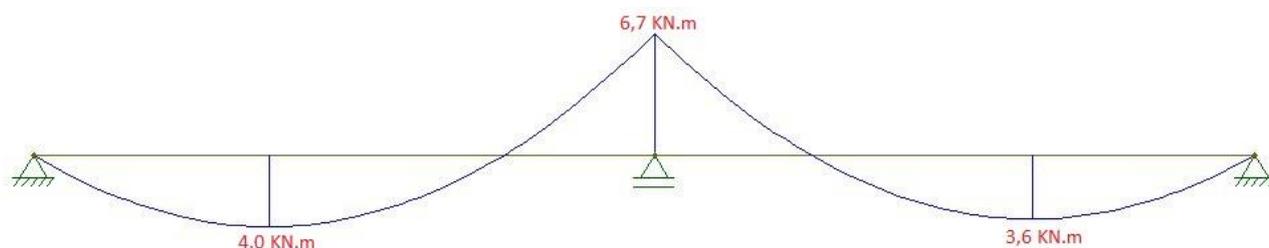


Figura 28: Diagrama de momento fletor da viga V20, considerando apenas seu peso próprio
Fonte: Autores (2016).

Por fim, a Tabela 5, apresenta os resultados dos cálculos apresentados na viga V8, e o número de camadas de fibra necessárias para o reforço da viga V20.

VIGA 20 - TRECHO A		VIGA 20 – TRECHO B	
Capacidade resistente atual da viga (Mdi)	7709,31	Capacidade resistente atual da viga (Mdi)	6836,73
PESO PRÓPRIO		PESO PRÓPRIO	
Momento Fletor (Mpp)	400	Momento Fletor (Mpp)	360
Altura da linha neutra (X)	1,10	Altura da linha neutra (X)	0,99
Força na armadura inferior (FS)	15,99	Força na armadura inferior (FS)	14,37
Tensão na armadura inferior (σ_S)	1,42	Tensão na armadura inferior (σ_S)	1,63
Deformação na base inferior (ϵ_{ti})	0,008	Deformação na base inferior (ϵ_{ti})	0,009
NOVO CARREGAMENTO		NOVO CARREGAMENTO	
Momento fletor (Mdf)	9640	Momento fletor (Mdf)	9120
Altura da linha neutra (X)	26,68	Altura da linha neutra (X)	24,31
Força na armadura inferior (FS)	388,72	Força na armadura inferior (FS)	354,23
Tensão na armadura inferior (σ_S)	34,46	Tensão na armadura inferior (σ_S)	40,12
Deformação na base inferior (ϵ_{ti})	0,188	Deformação na base inferior (ϵ_{ti})	0,240
COMO $M_{di} < M_{df}$ A VIGA NECESSITA DE REFORÇO		COMO $M_{di} < M_{df}$ A VIGA NECESSITA DE REFORÇO	
REFORÇO		REFORÇO	
Deformação real (ϵ_f)	0,180	Deformação real (ϵ_f)	0,231
Tensão na fibra (σ_R)	40,88	Tensão na fibra (σ_R)	52,51
Tensão admissível na fibra (σ_{adm})	380	Tensão admissível na fibra (σ_{adm})	380
VERIFICA		VERIFICA	
Número de camadas	4	Número de camadas	7

Tabela 5: Tabela de dimensionamento de reforço estrutural com fibras de carbono da Viga V20
Fonte: Autores (2016).

Logo, para que a viga V20 atenda ao novo carregamento da edificação, serão necessárias quatro camadas de fibra de carbono devidamente aplicadas ao longo da extensão do trecho A e seriam necessárias sete camadas de fibra de carbono aplicadas em toda a extensão do trecho B, porém, como sete é um número elevado, recomenda-se o uso de outro tipo de reforço estrutural, pois a fibra de carbono já não é viável para este caso pela dificuldade de execução.

8.1.5 Projeto de Reforço da Viga 7

A viga V7 se apoia em sete pilares ao longo de sua extensão, tendo assim seis trechos, sendo que apenas os dois últimos trechos com necessidade de reforço. O trecho E e o trecho F, além de possuir grandes vãos, recebem as cargas de lajes em ambos os lados fazendo com que a viga seja solicitada e precise de reforço.

A Figura 29 mostra o corte da viga V7 com suas informações.

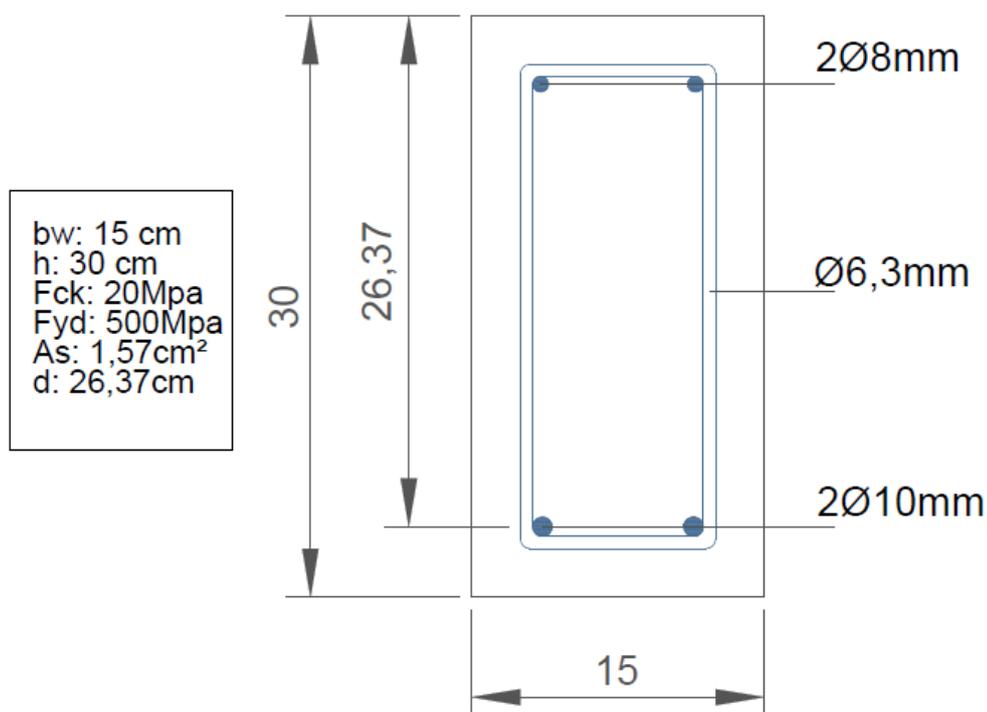


Figura 29: Dados da viga V7
Fonte: Autores (2016).

A Figura 30 mostra o gráfico de momento fletor da viga V7 gerado pelo CAD/TQS, considerando o carregamento como biblioteca.

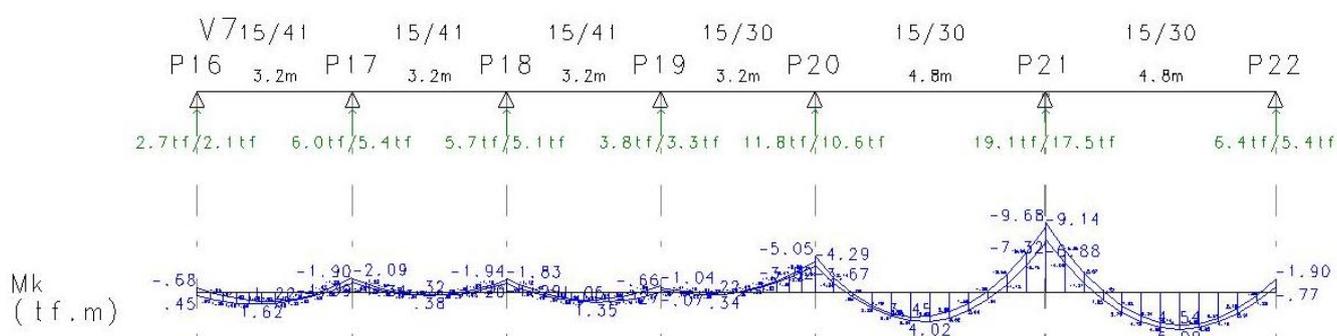


Figura 30: Diagrama de momento fletor atuante na Viga V7
Fonte: Autores (2016).

A Figura 31, apresenta em KN.m os valores de momento fletor devido ao peso próprio da viga V7. O valor obtido para o momento máximo positivo no quinto trecho foi de 1,1 KN.m e no segundo trecho foi de 2,0 KN.m.

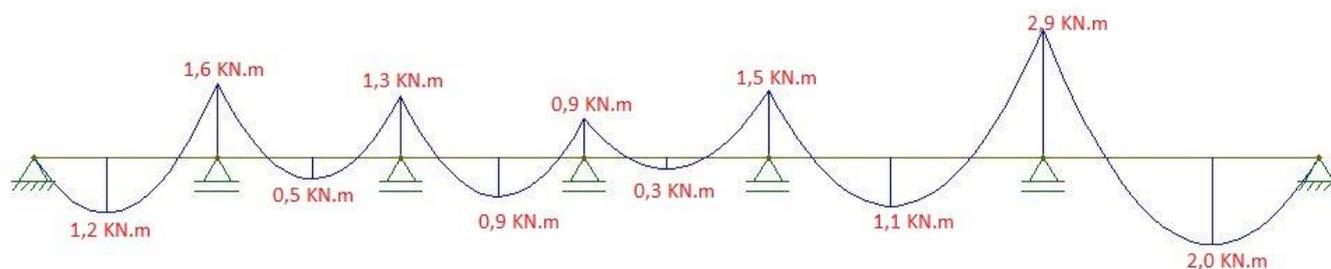


Figura 31: Diagrama de momento fletor da viga V7, considerando apenas seu peso próprio
Fonte: Autores (2016).

Por fim, a Tabela 6, apresenta os resultados dos cálculos apresentados na viga V8, e o número de camadas de fibra necessárias para o reforço da viga V7.

VIGA 07 - TRECHO E		VIGA 07 - TRECHO F	
Capacidade resistente atual da viga (Mdi)	2483,65	Capacidade resistente atual da viga (Mdi)	2483,65
PESO PRÓPRIO		PESO PRÓPRIO	
Momento Fletor (Mpp)	110	Momento Fletor (Mpp)	200
Altura da linha neutra (X)	0,41	Altura da linha neutra (X)	0,74
Força na armadura inferior (FS)	5,91	Força na armadura inferior (FS)	10,79
Tensão na armadura inferior (σ_S)	2,41	Tensão na armadura inferior (σ_S)	4,41
Deformação na base inferior (ϵ_{ti})	0,013	Deformação na base inferior (ϵ_{ti})	0,024
NOVO CARREGAMENTO		NOVO CARREGAMENTO	
Momento fletor (Mdf)	4020	Momento fletor (Mdf)	5090
Altura da linha neutra (X)	13,15	Altura da linha neutra (X)	18,57
Força na armadura inferior (FS)	191,61	Força na armadura inferior (FS)	270,56
Tensão na armadura inferior (σ_S)	78,21	Tensão na armadura inferior (σ_S)	110,43
Deformação na base inferior (ϵ_{ti})	0,448	Deformação na base inferior (ϵ_{ti})	0,215
COMO $M_{di} < M_{df}$ A VIGA NECESSITA DE REFORÇO		COMO $M_{di} < M_{df}$ A VIGA NECESSITA DE REFORÇO	
REFORÇO		REFORÇO	
Deformação real (ϵ_f)	0,817	Deformação real (ϵ_f)	1,287
Tensão na fibra (σ_R)	98,82	Tensão na fibra (σ_R)	43,45
Tensão admissível na fibra (σ_{adm})	380	Tensão admissível na fibra (σ_{adm})	380
VERIFICA		VERIFICA	
Número de camadas	6	Número de camadas	22

Tabela 6: Tabela de dimensionamento de reforço estrutural com fibras de carbono da Viga V7
Fonte: Autores (2016).

Logo, para que a viga V7 atenda ao novo carregamento da edificação, seriam necessárias seis camadas de fibra de carbono devidamente aplicadas ao longo da extensão do trecho E e vinte e duas camadas de fibra de carbono aplicadas em toda a extensão do trecho F. Porém, como seis e vinte e dois são números elevados, recomenda-se o uso de outro tipo de reforço estrutural, pois a fibra de carbono já não é viável para este caso pela dificuldade de execução.

8.1.6 Resumo final do dimensionamento

A Tabela 7 traz um panorama geral do dimensionamento do reforço e algumas conclusões importantes. O aumento do valor do momento fletor das vigas e a configuração da sua seção transversal são dois fatores primordiais para o valor de

área de fibra e conseqüentemente o número de camadas que irá ser necessário para reforçá-las. Podemos perceber que, as vigas que mais sofreram pelo acréscimo de carga foram as que possuem a altura de 30 cm, já que parâmetros como a altura útil (d) das mesmas são variáveis em quase todo o dimensionamento, como por exemplo, a viga V7 onde o foi verificado através do dimensionamento não ser viável o uso do material. Para as vigas V9 e V20 a porcentagem de aumento dos momentos fletores foi menor, visto que as duas possuem um maior momento resistente, influenciado pela altura útil da seção e sua disposição de armaduras. Por fim, temos a área final de fibra de carbono que, caso fosse realizada sua execução, seria necessária para o reforço dos trechos das vigas escolhidas, lembrando que o valor apresentado na Tabela 7 é através da área longitudinal da fibra, não transversal como calculado anteriormente.

		Momento Resistente (KN.cm)	Momento Atuante (KN.cm)	Valor de momento acrescido (%)	Altura da seção transversal (cm)	Número de Camadas	Área de fibra de carbono (m ²)
V8	Trecho A	1672,1	3310,0	98%	30	3	2,02
	Trecho B	1672,1	3150,0	88%		2	1,34
V9	Trecho A	3655,4	5700,0	56%	41	3	2,02
	Trecho B	3655,4	4270,0	17%		1	0,67
V7	Trecho E	2483,6	4020,0	62%	30	6	4,03
	Trecho F	2483,6	5090,0	105%		22	14,78
V20	Trecho A	7709,3	9640,0	25%	41	4	2,69
	Trecho B	6836,7	9120,0	33%		7	4,70
						TOTAL	32,26

**Tabela 7: Tabela resumo dos trechos de vigas reforçados.
Fontes: Autores 2016.**

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se afirmar que os objetivos propostos para este trabalho foram atingidos. Verificou-se a utilização da fibra de carbono na construção civil, fez-se o estudo do projeto estrutural do Bloco S da UTFPR-PB, analisando informações e considerações adotadas, modelando-o computacionalmente no *software* CAD/TQS, e, por fim, foi proposta uma solução de reforço estrutural com fibra de carbono, para a estrutura solicitada por um carregamento maior que o projetado.

Percebeu-se a importância de se conhecer a estrutura que se irá projetar, abordando todas as possibilidades de uso futuro. Isto porque, ao se fazer o uso da edificação finalizada não haja surpresas devido o carregamento ser maior do que foi projetado, tendo então que recorrer ao reforço estrutural, a fim de recuperar a estrutura.

Quando se fizer necessário o reforço estrutural, concluiu-se que o reforço com compósitos de fibras de carbono é uma ótima opção, por sua leveza, alta resistência mecânica, rápida e fácil execução. Esse reforço pode ser aplicado sem a necessidade de isolamento do local que irá ser reforçado, o que se torna uma grande vantagem quando o local de aplicação é público, como escolas, universidades, hospitais e edifícios comerciais.

Apesar de uma ótima opção de reforço, a fibra de carbono se torna inviável, dependendo da situação que se encontra a estrutura que irá ser reforçada. Em alguns casos, o número de camadas de fibras de carbono necessário para reforçar é elevado, tornando assim a aplicação inviável, por dificultar a execução e aumentar o custo. Não há uma indicação de número ideal de camadas, porém, é recomendado pelos fabricantes de quatro a cinco camadas.

Quanto ao custo, a fibra de carbono possui um custo relativamente elevado se, comparado com outros tipos de reforços estruturais, por isso, apesar de ser muito eficiente e de fácil aplicação, às vezes não é escolhida como opção de reforço. Porém, hoje no Brasil, já existem estudos sobre uma nova tecnologia que diminui o custo da fibra de carbono. Devido a isso, talvez em um futuro próximo, a fibra de carbono poderá ter valores mais acessíveis e quem sabe ser uma aliada na concepção de projetos, que utilizarão da fibra como seu principal material de resistência.

9.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O tema discorrido neste trabalho e os resultados obtidos concedem a possibilidade de aprofundar o assunto em novos estudos, como:

- Analisar o desempenho da fibra de carbono como reforço estrutural por meio de ensaios;
- Realizar comparativo de custo entre dois diferentes tipos de reforço estrutural.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1991). Comit  363R. **State of the art report on high-strength concrete**. ACI Manual of concrete practice, Detroit, part1. 49p.

ANDRADE, Paulo H. de. **Evolu o do concreto armado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Gradua o) – Curso Superior de Engenharia Civil. Universidade Anhembi Morumbi. São Paulo, 2006.

ASSOCIA O BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2014**: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 6120:1980**: Cargas para o cáculo de estruturas de edifica es. Rio de Janeiro, 2014.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. Tradu o de M. C. Marcondes, C. W. F. dos Santos, B. Cannabrava. São Paulo: PINI, 1988.

CARNEVALE, Paula B. **Compara o entre o dimensionamento de uma estrutura offshore pelo método das tensões admissíveis e pelo método dos estados limites**. Monografia (Gradua o em Engenharia Civil) – Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CARVALHO. Roberto C.; PINHEIRO Llib nio M. **C culo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**. 2 ed. v. 2. São Paulo: PINI, 2009.

FONTES, Fernando F. **Análise estrutural de elementos lineares segundo a NBR 6118:2003**. Disserta o (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

FONTES, Fernando F.; PINHEIRO Libânio M.; BITTENCOURT T lio. Projeto Estrutural. In: Concreto: Ciência e tecnologia. São Paulo: **IBRACON**, v.1, p. 109-232, 2005.

FRANÇA, Ricardo L. S. Entrevista. **TQS News**. São Paulo, jun.2001. Se o Entrevista. Disponível em: <<http://www.tqs.com.br/tqs-news/consulta/entrevistas/188-entrevista-com-o-prof-dr-ricardo-l-s-franca>>. Acesso em: 26 out. 2015.

GIL, Antônio C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas 2002.

HELENE, Paulo R. L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1992.

ISAIA, Geraldo C. Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas a corrosão da armadura. In: **Concreto: Ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, v.2, 2011.

KIMURA, Alio. **Informática aplicada em estruturas de concreto armado**: cálculos de edifícios com o uso de sistemas computacionais. São Paulo: PINI, 2007.

LIMA, P. G. **Tendências paradigmáticas na pesquisa educacional**. 2001, 317f. Dissertação (Mestrado em Educação). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Educação. Campinas, SP, 2001.

MACHADO, Antônio. de P. **Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono**: Características, dimensionamento e aplicação. São Paulo: PINI, 2002.

MACHADO, Ari de P. Apresentação. **Reforço estrutural com base em lâminas e barras de fibras de carbono**. São Paulo, ago. 2006. Disponível em: <<http://www.abece.com.br/e-ArtigosABECE007.pdf>>. Acesso em 19 out. 2015.

MARTHA, Luiz F. **Análise de Estruturas**: Conceitos e métodos básicos. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

MOTTA, Leila A. de C.; MALITE, Maximiliano. Análise da segurança no projeto de estruturas: **método dos estados limites**. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**. São Carlos, n. 20, p. 1-32, 2002.

PERELLES, Débora H. **Estudo analítico do comportamento de uma viga bi apoiada de concreto armado reforçado com um compósito de fibra de carbono**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil. Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2013.

REIS, Lília S. N. **Sobre a recuperação e reforço das estruturas de concreto armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em engenharia de estruturas. Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2001.

REVISTA TÉCNNE. **Recuperação estrutural**: Sistemas, técnicas e materiais para reabilitar estruturas de concreto. São Paulo, mar. 2004. Seção Técnica Educação. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/84/artigo286279-2>>. Acesso em: 11 out. 2015.

SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LUCIO, P. B. **Metodologia de pesquisa**. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill. 2006.

SILVA, Erick A. da. **Técnicas de Recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Civil. Universidade Anhembi Morumbi. São Paulo, 2006.

SILVA, Luíz C. P.; HELENE, Paulo. Análise de estruturas de concreto com problemas de resistência e fissuração. In: **Concreto: Ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, v.2, p. 1129-1174, 2011.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: PINI, 1998.

TIMERMAN, Júlio. Reabilitação e reforço de estruturas de concreto. In: **Concreto: Ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, v.2, p. 1175-1210, 2011.

TQS Informática LTDA. **Análise Estrutural**. São Paulo, abr. 2015. Seção Conheça os sistemas CAD/TQS Disponível em: <<http://www.tqs.com.br/conheca-os-sistemas-cadtqs/analise-estrutural/analise-estrutural>>. Acesso em: 27 out. 2015.