



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO – UFMA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA – CCET
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE CARBONO
PARA FINS DE REFORÇO ESTRUTURAL**

São Luís
2019

FELIPE ANDERSON SILVA DE AQUINO

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE CARBONO
PARA FINS DE REFORÇO ESTRUTURAL**

Projeto de monografia apresentado ao curso de Engenharia Civil, do CCET, da Universidade Federal do Maranhão como requisito parcial à apresentação do Trabalho de Conclusão de Curso.

Professor: Mikhail Luczynski, Msc.

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Aquino, Felipe Anderson Silva de.

Contribuição ao Estudo da Utilização de Fibras de Carbono para Fins de Reforço de Estrutural / Felipe Anderson Silva de Aquino. - 2019.

60 f.

Orientador(a): Mikhail Luczynski.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2019.

1. Estruturas. 2. Fibra de Carbono. 3. Reforço Estrutural. I. Luczynski, Mikhail. II. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe Auricleide Evangelista da Silva, meu pai Francisco Robson de Aquino, a minha irmã Alana Fernanda Silva de Aquino, ao meu filho Tarcísio Felipe Tromps Aquino e a minha namorada Samia Larissa Ribeiro de Souza pessoas que eu amo e que me apoiam e ajudam sempre.

Com amor e carinho.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE FELIPE ANDERSON SILVA DE AQUINO APRESENTADA AO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Msc. Mikhail Luczynski
(UFMA)

Prof. Felipe Alexander Vargas Bázan
(UFMA)

Prof. Paulo César de Oliveira Queiroz
(UFMA)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me agraciado com as oportunidades e condições de seguir com meus estudos, mesmo trabalhando.

Ao Prof. Msc. Mikhail pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho e por fazer parte dessa história acadêmica.

Aos meus familiares, pelo apoio, incentivo e compreensão: A minha mãe (Auricleide), ao meu pai (Robson), a minha irmã (Fernanda), minha namorada (Samia) e ao meu filho (Tarcísio Felipe).

À Deus que conduz minha vida nos caminhos do sucesso; aos meus pais, irmã e ao meu filho que me fornecem o incentivo para chegar na minha realização profissional.

RESUMO

Com o passar do tempo as edificações vão sendo danificadas e o desempenho estrutural das peças estruturais são diminuídas devido a uma série de fatores como a deteriorização dos materiais utilizados e/ou variação dos carregamentos, se fazendo necessário a reabilitação desses elementos, utilizando reforços estruturais. No mercado existem vários tipos de reforços e um dos mais utilizados são os de polímero revestidos com fibra de carbono devido ao baixo custo, fácil colocação e possui uma grande vantagem sobre os demais devido as suas dimensões serem bem reduzidas. Então verificando essas séries de vantagens, neste trabalho foi feito um estudo da influência desse tipo de reforço estrutural no aumento da resistência em vigas de seção retangular, observando as possíveis falhas que devem ser evitadas durante a aplicação e a resistência na qual irá chegar, fazendo o estudo de um modelo teórico e prático de cálculo da aplicação do revestimento de fibras de carbono em uma viga em um edifício hipotético, fazendo algumas simplificações, e verificações quanto a flexão, calculando o momento resistente da viga após a colocação do reforço estrutural, chegando a resultados satisfatórios.

Palavras-Chave: Reforço Estrutural, fibra de carbono, Estruturas

ABSTRACT

Over time the buildings are damaged and the structural performance of the structural parts are reduced due to a number of factors such as the deterioration of the materials used and the variation of the loads, making it necessary to rehabilitate these elements using structural reinforcements. There are several types of reinforcements on the market and one of the most used is carbon fiber coated polymer due to its low cost, easy placement and has a great advantage over the others due to their very small dimensions. So checking these series of advantages, in this work was made a study of the influence of this type of structural reinforcement in the increase of the strength in T-beams, observing the possible failures that should be avoided during the application and the resistance in which it will arrive, making The study of a theoretical and practical model of calculation of the application of carbon fiber coating on a dummy structure and an existing structure without the informed data of the structural part, making some simplifications, reaching satisfactory results.

Keywords: Structural Reinforcement, carbon fiber, Structures

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comportamento de uma viga de concreto simplesmente apoiada (CARVALHO, 2016).....	6
Figura 2 – Exemplo de edifício com estrutura em concreto armado e seus elementos (BOTELHO, 2004)	8
Figura 3 – Representação dos Elementos Estruturais – Viga, Fundação e Pilar (BOTELHO, 2004).....	8
Figura 4 – Gráfico de Tensão Deformação para o Concreto Armado (Santos et.al, 2016).....	9
Figura 5 – Ensaio de flexão de uma viga com aplicação de carga P para verificação de sua resistência (ANDO et al., 2012).....	12
Figura 6 – Flexão pura entre as cargas aplicadas nas figuras (SILVA, 2014).....	13
Figura 7 – Viga simplesmente apoiada – carregamento e diagramas.....	15
Figura 8 – Procedimento de análise de vigas de seção “T” (DA SILVA, 2015)....	16
Figura 9 – Procedimento de análise de vigas seção retangular (ANDREOLLI, 2016).....	17
Figura 10 – Diagrama tensão deformação de fibras, aço para construção e cordoalhas de protensão.....	18
Figura 11 – Sistemas de Reforços com fibras de carbono: (a) fios de fibra de carbono; (b) chapas pultrudadas de fibra de carbono; (c) tecidos de fibra de carbono (SILVA FILHO, 2007).....	19
Figura 12 – Fibras de Carbono Envolvidas com Resinas Epóxi (Machado 2007).	21
Figura 13 – Ilustração do sistema de reforço com fibra de carbono <i>in situ</i> (PERELLES, 2013).....	22
Figura 14 – Pilares com aplicação da fibra de carbono (SILVA FILHO, 2007)....	24
Figura 15 – Reforço de ponte à força cortante com utilização de fibras de carbono (SILVA FILHO, 2007).....	24
Figura 16 – Reforço de Lajes à flexão e Vigas à flexão e a força cortante com tecidos de fibras de carbono (SILVA FILHO, 2007).....	25
Figura 17 – Aplicação da Fibra de Carbono na face inferior da viga (DASH, 2009, apud SILVA, 2014).....	26

Figura 18 – Distribuição das deformações e forças em uma seção reforçada a flexão com PRFC (SILVA e BANDEIRA, 2019).....	26
Figura 19 – Deformações e distribuição das tensões para uma seção retangular (ACI 440.2R 2008).....	28
Figura 20 – Deslocamento causado por irregularidades na superfície do concreto Fonte: Silva, 2014.....	32
Figura 21 – Vista da estrutura a ser dimensionada em 3 dimensões.....	33
Figura 22 – Ilustração da planta baixa, na qual será dimensionado o reforço para a viga V1.....	34
Figura 23 – Ilustração da análise estrutural para a viga V1.....	36
Figura 24 – Diagrama dos esforços cortantes para a viga V1.....	36
Figura 25 – Diagrama do momento fletor para a viga V1.....	37
Figura 26 – Ilustração da deformação máxima da viga V1.....	37

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Valores Estimados de Módulo de Elasticidade em Função da Resistência característica a compressão do concreto (ABNT 6118, 2014).....	10
Tabela 2 – Comparativo entre as características dos diversos tipos de fibra.....	19
Tabela 3 – Propriedades Mecânicas das Fibras.....	20
Tabela 4 – Fator de segurança de acordo com o tipo de aplicação do reforço.....	27
Tabela 5 – Fator de redução da deformação de ruptura do reforço em função da exposição ambiental.....	29
Tabela 6 – Dados obtidos por fabricantes de fibras de carbono para fins de reforço.....	40
Tabela 7 – Propriedades dos materiais utilizados para reforço estrutural.....	41
Tabela 8 – Valores para deformações da viga de acordo com as normas.....	42
Tabela 9 – Resultados obtidos na modelagem teórica do uso da fibra de carbono variando os tipos de fabricantes, para a mesma viga.....	43

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 OBJETIVOS GERAIS.....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3. REFERÊNCIAL TEÓRICO	4
3.1 CONCRETO ARMADO	4
3.1.1 DOSAGEM DO CONCRETO	4
3.1.2 SISTEMAS E ELEMENTOS ESTRUTURAIS.....	7
3.1.2 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO CONCRETO	9
3.1.3 QUALIDADE E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS	10
3.2 PRINCÍPIOS GERAIS DA ANÁLISE ESTRUTURAL	11
3.3 RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS	14
3.3.1 VERIFICAÇÕES DE VIGAS DE SEÇÃO “T”	14
3.4 REFORÇO ESTRUTURAL	17
3.5 SISTEMAS COMPOSTO.....	18
3.6 REFORÇO ESTRUTURAL COM SISTEMA COMPOSTO DE FIBRAS DE CARBONO	22
3.6.1 APLICAÇÃO DA FIBRA DE CARBONO NAS PEÇAS ESTRUTURAIS	23
3.6.2 REFORÇO A FLEXÃO EM VIGAS REFORÇADAS COM FIBRAS DE CARBONO	25
3.7 VERIFICAÇÕES SEGUNDO A FEDERAÇÃO INTERNACIONAL DE CONCRETO	26
3.8 DESCOLAMENTO DO REFORÇO NA RESISTÊNCIA DAS VIGAS.....	31
4. METODOLOGIA	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
5.1 CÁLCULOS PRELIMINARES PARA A VIGA V1.....	35
5.1.1 ESTIMATIVA DA ALTURA	35
5.1.2 VÃO EFETIVO	35
5.1.3 CARGAS NA VIGA.....	35
5.1.4 ESFORÇOS SOLICITANTES	36
5.1.5 DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS	37
5.2 ANÁLISE DA VIGA REFORÇADAS COM FIBRA DE CARBONO ACI 440.2R (2008)	40
6 CONCLUSÃO.....	44
REFERÊNCIAS	45

1. INTRODUÇÃO

Com a utilização do concreto armado um novo e vasto campo de realizações se descortinou para a engenharia civil. Novas e cada vez mais ousadas estruturas foram construídas e os grandes vãos se tornaram prática comum em nossos dias. Por muito tempo se acreditou que o concreto armado seria o material definitivo, uma vez que as suas patologias demoraram algum tempo para se manifestar, criando uma falsa sensação de segurança e durabilidade. No entanto, descobriu-se que o concreto armado, similarmente a qualquer material da natureza, estava sujeito à ação deletéria do meio ambiente, das agressões físicas e químicas durante o período de sua utilização e tinha, inclusive, problemas introduzidos ainda na sua gênese. Assim juntamente com as técnicas necessárias às construções de novas estruturas, surgiram as técnicas para a sua reparação e reforço.

Uma das finalidades do reforço estrutural é aumentar a capacidade de carga de uma peça de concreto. Assim esse processo insere-se dentro da incorporação de novos materiais ao concreto armado, no sentido de melhorar o desempenho esperado das peças estruturais. O reforço objetiva corrigir equívocos nos projetos, na execução da obra ou preparar a estrutura para uma utilização diferente da original (SILVA, 2014).

Muitos materiais e de processos foram criados e utilizados para o reforço e reabilitação das estruturas, utilizando a fixação de materiais de reforço externamente ao elemento estrutural. Durante algum tempo foi utilizada a técnica de se reforçarem estruturas de concreto armado por meio de chapas de aço aderidas externamente às superfícies dos seus elementos através de resinas formuladas à base de epóxi. Essa técnica consistia em se aplicarem as chapas de aço nas regiões tracionadas por meio de resinas adesivas tendo sido amplamente utilizada para reforçar pontes e estruturas diversas ao logo do mundo (MACHADO e MACHADO, 2015).

Devido ao fato das chapas de aço serem relativamente pesadas exigindo equipamentos mais robustos para serem içadas e posicionadas e de necessitarem de preparações superficiais rigorosas para poderem ser coladas sem que a camada de adesivo fosse muito espessa, o que reduz sensivelmente a capacidade de transferência de esforços, aliado ao fato da necessidade de manutenção regular para evitar a corrosão do metal, e principalmente, pelo fato das resinas utilizadas apresentarem um processo de deterioração progressiva por fluência, esses procedimentos foram, pouco a pouco, sendo abandonados (GALHARDO, 2002).

Os primeiros sistemas compostos de reforço foram desenvolvidos na Europa, como alternativa para os sistemas de chapas coladas. O alto custo inicial de produção desses materiais,

aliada à falta de suficientes pesquisas e informações técnicas adequadas limitaram e inibiram por longo tempo a utilização de materiais poliméricos avançados na indústria da construção civil. Essa viabilização econômica, por sua vez, permitiu que fosse realizada uma grande variedade de projetos de pesquisa e de construção dirigida especificamente para o uso dos materiais poliméricos, resultando na aquisição de um vasto conhecimento experimental o que possibilitou a avaliação teórica em bases confiáveis e seguras para o projeto e o detalhamento dos reforços das estruturas de concreto armado e/ou protendidas com materiais poliméricos avançados (MACHADO e MACHADO, 2015).

Dentre todos os materiais poliméricos avançados possíveis de serem utilizados nessas estruturas de concreto armado e/ou protendidas, destacou-se a alternativa da utilização de sistemas poliméricos estruturados com fibras de carbono. Todos os avanços obtidos das pesquisas e dos ensaios realizados conduziram à produção de perfis estruturais compostos, telas, tecidos e barras de fibras de carbono que estão sendo correntemente utilizados para reforços estruturais. Esses materiais compostos, também conhecidos como polímeros reforçados com fibras (FRP em inglês).

Materiais compósitos, empregados com a técnica de colagem denominada *Externally Bonded Reinforcement (EBR)* ou Colagem na Superfície do Concreto (CSC), para fins de reforço das estruturas possui desempenho semelhante ou superior ao realizado com materiais metálicos. Entretanto, esses materiais compósitos, quando utilizados em reforço estrutural necessitam de cuidados especiais, sobretudo em razão de problemas de descolamento do PRF da superfície do concreto e (ou) o destacamento do PRF do cobrimento do concreto e aos aspectos relacionados à ductilidade e durabilidade das peças reforçadas com esses polímeros (SILVA, 2014).

Vários fatores geram receio em relação ao uso deste método no país, entre estes a facilidade do processo executivo que vagamente se resume em limpar a peça que será reforçada e colar os filamentos de fibra de carbono sobre esta, e se falando em filamentos de fibra de carbono, a aparente fragilidade da manta destes é mais um fator que gera desconfiança no seu emprego como material com função estrutural. A falta de normas e estudos em âmbito nacional dificultam a adoção deste método como ferramenta para os engenheiros e profissionais de engenharia civil, sendo assim, o seguinte trabalho visa a revisão da bibliografia existente acerca deste assunto, para apresentar e comprovar a eficácia deste sistema de reforço (SOUZA, 2014).

1.1 JUSTIFICATIVA

Este trabalho visa o aprimoramento da utilização da norma ACI 440.2R:2008 juntamente com a norma NBR 6118 (ABNT 2014), para fins de utilização de reforços estruturais utilizando materiais compósitos. A utilização crescente de fibra de carbono para tal finalidade, desperta o interesse mercadológico por se tratar de um reforço mais barato do que os convencionais, além de fácil aplicação. A grande dificuldade para este tipo de reforço está nos modelos de cálculos que ainda apresentam certas divergências, portanto o trabalho visa estudar a utilização de fibras de carbono em vigas de seção retangular para a verificação dos modelos de cálculos utilizados. A viga escolhida, está situada em um edifício com 2 pavimentos, na qual foi dimensionada de acordo com a NBR 6118 (ABNT 2014) e reforçada com a utilização da norma ACI 440.2R.

1.2 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho é uma pesquisa teórico através de vários referenciais teóricos, na tentativa de elaboração de modelos teóricos consistentes para a análise e dimensionamento do reforço de vigas, com a utilização de fibras de carbono.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fazer um estudo detalhado sobre o uso das fibras de carbono como reforço em peças estruturais de concreto armado, analisando sua eficiência em relação a outros materiais;
- Analisar as formas de colocação das fibras de carbono em vigas, e o efeito do descolamento das mesma.
- Avaliar o acréscimo de carregamento a que podem resistir as vigas de concreto armado reforçadas com fibra de carbono;

2. REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 CONCRETO ARMADO

No contexto que envolve construções civis, várias técnicas e materiais são utilizados para sua execução, dentre estes o concreto armado se destaca principalmente na confecção de peças com função estrutural. Composto muito utilizado em edificações no Brasil e em boa parte do mundo devido à abundância de matéria prima e simplicidade na execução se comparado a estruturas de aço que requer mão de obra especializada e alto custo de materiais. (SOUZA, 2014).

O concreto é um material composto de água, cimento e agregados. Como o cimento é um material caro, o principal objetivo da utilização do agregado de maiores dimensões é reduzir os custos sem que a qualidade do material seja muito prejudicada. Para utilização estrutural, o concreto sozinho não é adequado como elemento resistente, pois, enquanto tem uma boa resistência a compressão, pouco resiste a tração. (CARVALHO, 2016).

A classificação do concreto pode ser feita pela sua consistência, considerando assim os tipos de concretos em seco, semiplástico, plástico e fluído CAA que pode ser caracterizado pelo teste do slump. Cada tipo de concreto terá sua aplicação de acordo com as necessidades e especificações a serem determinadas pelos engenheiros da obra.

O concreto armado é um material compósito constituído de cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, água e aço, sendo este último acrescentado para conferir algumas propriedades em que só o concreto não teria, como é o caso da resistência a tração. Peças estruturais como vigas, pilares, lajes e fundações, precisam necessariamente resistir a tração, propriedade esta que os aços possuem e que ao fazer o processo de homogeneização desses materiais, adquirindo também essa propriedade.

2.1.1 DOSAGEM DO CONCRETO

O estudo de dosagem do traço de concreto a ser utilizado em na confecção de peças estruturais deve levar em conta a resistência esperada, a retração ocorrida, estanqueidade e trabalhabilidade. Para se definir os valores e desempenho esperados dos critérios, o conhecimento do projeto a qual será aplicado este concreto, as formas de produção disponíveis para este e os materiais a que se tem acesso na região onde a obra será executada, é de extrema importância (BAUER, 2011).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1996), diz que a dosagem do concreto pode ser feita pelo método racional ou experimental e dosagem empírica adotando algumas medidas, como após definido o traço para estudo são realizados ensaios de compressão de acordo com ABNT (2007), em no mínimo 20 corpos de prova deste traço utilizado para o cálculo de resistência. A equação 1 mostra como é feito esse cálculo.

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65.S_d \quad \text{Equação 1}$$

onde:

f_{cj} - resistência a compressão média do concreto após j dias (MPa)

f_{ck} - resistência a compressão esperada para a classe do concreto estudado (MPa)

S_d - desvio padrão do traço de dosagem em estudo (MPa) (Não deve ser inferior a 2 MPa).

2.1.2 RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO

Ao adicionar água no cimento tem-se a formação da pasta que no estado fresco, tem a função de envolver os agregados, preencher os vazios entre os agregados e atribuir certa fluidez à mistura. No estado endurecido a pasta tem a função de aglutinar os agregados, conferindo impermeabilidade, resistência mecânica e durabilidade. A resistência da pasta é o principal fator de influência na resistência a compressão e o fator água/cimento influencia nas propriedades do concreto produzido, tais como trabalhabilidade, porosidade, permeabilidade, resistência a compressão e durabilidade.

O aumento no teor de água presente em concretos à níveis que a quantidade desta não é totalmente consumida na reação de hidratação e pega do cimento leva a diminuição da resistência final e o módulo de elasticidade do concreto, além de aumentar consideravelmente a retração e a porosidade deste. A retração pode ser definida pela variação volumétrica da peça de concreto em questão, causada pelo consumo de água presente no composto durante o processo de hidratação dos grãos de cimento. Em traços com altos índices de relação água/cimento, a perda de volume da peça exerce tensões internas no concreto que inicialmente são inibidas pelas formas da peça, tais tensões acabam por gerar esforços de tração que não são resistidos pelo concreto e levam ao aparecimento de pequenas fissuras na peça, diminuindo sua resistência e durabilidade. (FUSCO, 2008).

2.1.3 ARMADURA/CONCRETO

A interação entre a armadura e o concreto nas estruturas de concreto armado é um fator de extrema importância, para este material, porque a aderência entre eles deve ser constituída da melhor forma possível, já que o aço é o responsável pela resistência a tração e o concreto a compressão. Deste modo sem a aderência o escorregamento das barras de aço levaria ao aparecimento de fissuras na peça estrutural e até o colapso da estrutura como um todo.

2.1.4 VIGAS EM CONCRETO ARMADO

Na figura 1 ilustra uma viga sendo fletida, em que na mesma secção transversal existem tanto tensões de compressão quanto tensões de tração. No trecho BC, submetido à flexão pura e dependendo dos esforços atuantes podem ocorrer fissuras na parte inferior, que estão submetida a tensões normais de tração, fazendo com que a capacidade resistente da viga ao momento fletor seja pequena.

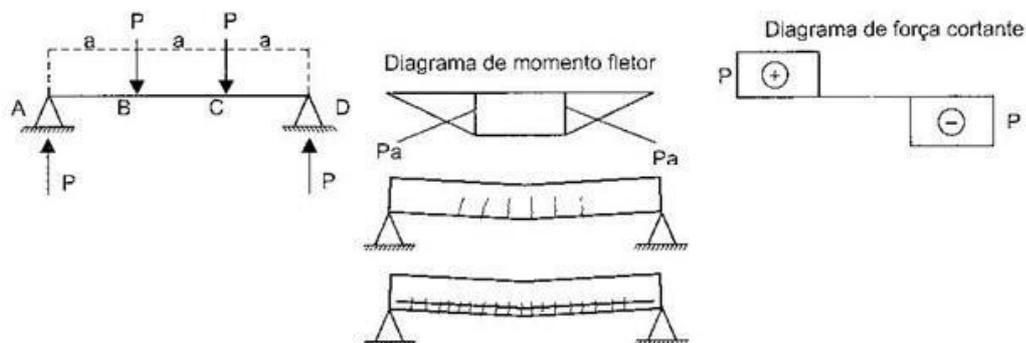


Figura 1 – Comportamento de uma viga de concreto simplesmente apoiada (CARVALHO, 2016)

Para aumentar a resistência da viga é importante associar o concreto a um material que tenha boa resistência à tração e seja mais deformável, sendo mais comum o aço, que deve ser colocado longitudinalmente na região tracionada da peça. Dessa forma o concreto e o aço, deverão trabalhar solidariamente o que é possível devido às forças de aderência entre a superfície do aço e concreto, pois as barras de aço tracionadas só funcionam quando pela deformação do concreto que as envolve, começam a ser alongadas, o que caracteriza as armaduras passivas. É a aderência que faz com que o concreto armado se comporte como material estrutural (CARVALHO, 2016).

Como todo material que se utiliza para determinada finalidade, o concreto armado possui vantagens e desvantagens quanto ao seu uso estrutural. Segundo Carvalho (2016) as principais vantagens são:

- Apresenta boa resistência à maioria das solicitações, tem boa trabalhabilidade, por isso apresenta-se em várias formas, podendo ser escolhida a mais conveniente para cada tipo de projeto;
- Permite obter estruturas monolíticas, existindo aderência entre o concreto já endurecido e o que é lançado posteriormente, facilitando a transmissão de esforços;
- É um material durável, desde que seja bem executado, conforme as normas, e evitado o uso de aceleradores de pega, devido a corrosão de armaduras que eles podem causar.
- Apresenta durabilidade, choques e vibrações, efeitos térmicos, atmosféricos e desgastes mecânicos e possibilita a utilização da pré-moldagem, proporcionando maior rapidez e facilidade de execução.

O concreto armado também possui algumas desvantagens, que foram listadas como por exemplo:

- Resulta em elementos com maiores dimensões que o aço, com peso específico elevado ($\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$), acarretando peso próprio muito grande, limitando seu uso em determinadas situações;
- As reformas e adaptações são muitas vezes de difíceis execuções;
- É bom condutor de calor e som, exigindo em casos específicos, associação com outros materiais para sanar esses problemas.

São necessários um sistema de fôrmas e a utilização de escoramentos (quando não se faz uso da pré-moldagem) que geralmente precisam permanecer no local até que o concreto alcance a resistência adequada.

2.1.2 SISTEMAS E ELEMENTOS ESTRUTURAIIS

Elementos estruturais são peças geralmente com uma ou duas dimensões preponderantes sobre as demais (vigas, lajes, pilares e etc), que compõem uma estrutura. O modo como são arrançados pode ser chamado de sistema estrutural. Alguns comportamentos são dependentes apenas desse arranjo, não influenciando o material com que são feitos os elementos. A figura 2 ilustra um edifício com estrutura em concreto moldado no local e seus elementos.

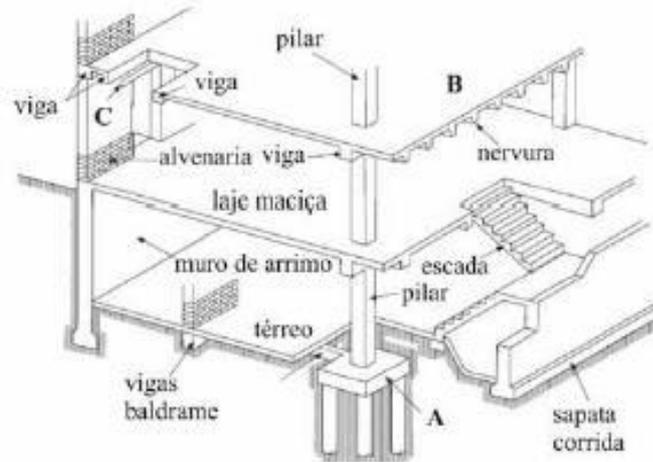


Figura 2 – Exemplo de edifício com estrutura em concreto armado e seus elementos (BOTELHO, 2004)

Então os principais elementos estruturais são as lajes, vigas, pilares e as fundações. As lajes são placas que, além das cargas permanentes, recebem as ações de uso e as transmitem para os apoios; travam os pilares e distribuem as ações horizontais entre os elementos de contraventamento. Os pilares são barras verticais que recebem as ações das vigas ou das lajes e dos andares superiores as transmitem para os elementos inferiores ou para a fundação. As fundações que são elementos como blocos, lajes, sapatas, vigas, estacas etc., que transferem os esforços para o solo.

Por fim as vigas, objeto deste trabalho, são elementos lineares ou barras horizontais que suportam o peso próprio, paredes, recebem ações das lajes ou de outras vigas, em que a flexão é a ação preponderante, fazendo a transmissão dessas ações para os apoios. As vigas podem, também, receber cargas de pilares, nos casos de vigas de transição ou em vigas de fundação. Com exceção das cargas provenientes de outras vigas ou de pilares, que são concentradas, as demais podem ser admitidas uniformemente distribuídas.

A figura 3 ilustra as peças em concreto armado, viga em forma “T”, sapata e pilar de forma separada.

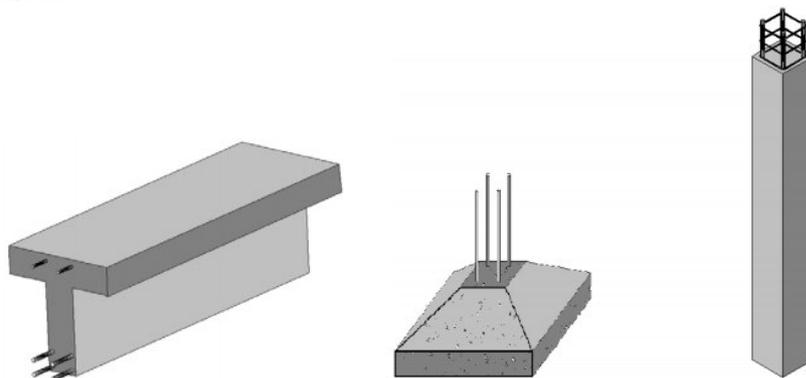


Figura 3 – Representação dos Elementos Estruturais – Viga, Fundação e Pilar (BOTELHO, 2004).

2.1.2 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO CONCRETO

O concreto é obtido por meio da mistura adequada de cimento, agregado fino, agregado graúdo e água. Em algumas situações, são incorporados produtos químicos ou outros componentes, como microsílca e polímeros. As adições têm a finalidade de melhorar algumas propriedades, como aumentar a trabalhabilidade e a resistência e retardar a velocidade das reações químicas que ocorrem no concreto (BAUER, 2011).

As diversas características que o concreto endurecido deve apresentar para que possa ser utilizado dependem fundamentalmente do planejamento e dos cuidados na sua execução. A resistência a compressão geralmente é utilizada como controle de fabricação, e admite-se que forneça todas as informações relativas à resistência e a deformabilidade do concreto (BAUER, 2011).

As características e as propriedades do concreto podem ser estudadas em dois estados, são eles o concreto fresco e o concreto endurecido. Para o estudo das principais propriedades do concreto fresco são levados em consideração a consistência, a trabalhabilidade, homogeneidade, o adensamento, o início do endurecimento (pega), e a cura do concreto. Já para o concreto endurecido as principais características que são levadas em consideração são as propriedades mecânicas, como resistência a compressão e a resistência a tração (CARVALHO, 2016).

Os diagramas de tensão-deformação mostram as relações entre as tensões (σ) e deformações (ϵ) do concreto, informações essas retiradas de ensaios do tipo compressão ou tração, podendo ser adquirido o módulo de elasticidade (E). A figura 4 mostra como é feito o ensaio de compressão e o resultando gerado, um diagrama de tensão-deformação característico para concretos.

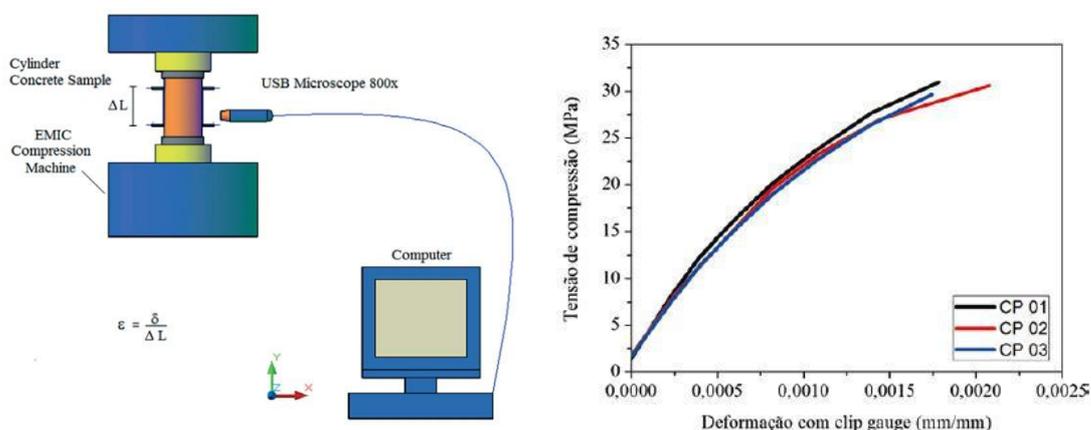


Figura 4 – Gráfico de Tensão Deformação para o Concreto Armado (Santos et.al, 2016).

Então os concretos produzidos são classificados de acordo com sua classe de resistência e os concretos mais usuais são os ilustrados na tabela 1, mostrando respectivamente o módulo de elasticidade dos respectivos concretos.

Tabela 1 – Valores Estimados de Módulo de Elasticidade em Função da Resistência característica a compressão do concreto (ABNT 6118, 2014)

Classe de resistência	C20	C25	C30	C35	C40	C50	C60	C70	C80
E_{ci} (GPa)	25	28	31	33	35	40	42	43	45
E_{cs} (GPa)	21	24	27	29	32	37	40	42	45

2.1.3 QUALIDADE E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS

A norma ABNT NBR 6118:2014 se preocupa com a questão da qualidade e durabilidade das estruturas, na qual as estruturas de concreto devem atender aos requisitos mínimos de qualidade durante a construção e utilização, classificados em três grupos, são eles:

- Grupo 1 – requisitos relativos à capacidade resistente da estrutura ou de elementos componentes;
- Grupo 2 – requisitos relativos ao desempenho em serviço, que consiste na capacidade de a estrutura se manter em condições plenas de utilização, não devendo apresentar danos que comprometam, em parte ou totalmente, o uso para o qual foi projetada;
- Grupo 3 – requisitos relativos a sua durabilidade, que consiste na capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante.

Então as exigências do grupo 1 corresponde à segurança contra a ruptura, o grupo 2 refere-se à fissuração excessiva, deformações inconvenientes e vibrações excessivas e o grupo 3 tem como referência a conservação da estrutura.

Em relação a durabilidade a norma ABNT NBR 6118:2014, exige que as estruturas de concretos sejam projetadas e construídas de modo que, sob influências ambientais previstas e quando utilizadas conforme estabelecido em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e comportamento adequado em serviço durante o período correspondente à sua vida útil de projeto, que é o período de tempo durante o qual se mantêm as características da estrutura de

concreto, sem intervenções significativas, desde que sejam atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista.

Os principais responsáveis pela perda de qualidade e durabilidade das estruturas é a agressividade do meio ambiente, seguindo o qual a norma ABNT 6118:2014 afirma, está relacionada às ações físicas e químicas que atuam na estrutura de concreto, independentemente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento, por isso a norma ABNT 6118:2014, prevendo essas condições insalubres na qual as estruturas podem ser submetidas estabelece as classes de agressividade ambiental, para minimizar esses impactos.

2.2 PRINCÍPIOS GERAIS DA ANÁLISE ESTRUTURAL

O cálculo de uma estrutura deve garantir que ela suporte de forma segura, estável e sem deformações excessivas, todas as solicitações a que estará submetida durante sua execução e utilização, dessa forma o dimensionamento estrutural consiste em impedir a ruína (falha) da estrutura ou determinadas partes da mesma. Por ruína não se entende apenas o perigo de ruptura, que ameaça a vida dos ocupantes, mas também as situações em que a edificação não apresenta um perfeito estado para utilização, devido a deformações excessivas, fissuras inaceitáveis e outras patologias (CARVALHO, 2016).

De acordo com a NBR 6118:2014 o objetivo da análise estrutural é determinar os efeitos das ações em uma estrutura, com a finalidade de efetuar verificações de estados limites últimos e de serviço, permitindo estabelecer as distribuições de esforços internos, tensões, deformações e deslocamentos em uma parte ou em toda a estrutura, garantindo segurança durante a vida útil da peça estrutural. O dimensionamento de uma estrutura consiste em comprovar que uma seção previamente conhecida (forma, dimensões e quantidade de armadura) é capaz de resistir às solicitações mais desfavoráveis que poderão atuar e dimensionar uma seção ainda não definida completamente a fim de que suporte as solicitações máximas a que poderá estar sujeita. (CARVALHO, 2016).

A norma ABNT NBR 6118 (2014) define vigas como elementos lineares em que a flexão é preponderante e os elementos lineares são aqueles em que o comprimento supera pelo menos três vezes, a maior dimensão da seção transversal, sendo também denominadas barras. As solicitações normais produzem tensões perpendiculares às seções transversais dos elementos

estruturais. Os esforços que provocam as tensões normais são o momento fletor (M) e a força normal (N).

Os primeiros ensaios de vigas em concreto armado foram realizados em 1850 pelo americano *Thaddeus Hyatt*, que motivado por uma série de ensaios, obteve, em 1877. As armaduras de aço absorviam as tensões de tração oriundas dos momentos fletores e das forças cortantes dessas vigas. Em 1892 o engenheiro francês *François Hennebique* registra a primeira patente de vigas de concreto armado semelhantes às vigas usadas atualmente com armaduras longitudinais e estribos. Em 1902, o alemão *Emil Mörsch* publica resultados de pesquisas teóricas e experimentais sobre elementos estruturais em concreto armado e contribui para o progresso das estruturas de concreto. Os pesquisadores Fritz Leonhardt e René Walther, em 1961, realizaram os chamados “Ensaio de *Stuttgart*”, nesse tipo de ensaio pode-se observar o comportamento à flexão pura (sem a presença do cisalhamento) e flexão simples (com a presença do cisalhamento). Este ensaio é caracterizado pela aplicação, em estágios gradativos, de uma carga dividida em duas cargas concentradas simétricas, que é aplicada até o colapso estrutural da viga, em cada estágio podendo ser medidas as deformações absolutas e específicas no concreto e nas armaduras, as flechas e fissurações da viga (SILVA, 2014).

A figura 5 mostra o exemplo do ensaio de flexão de uma viga com a aplicação de uma carga P .

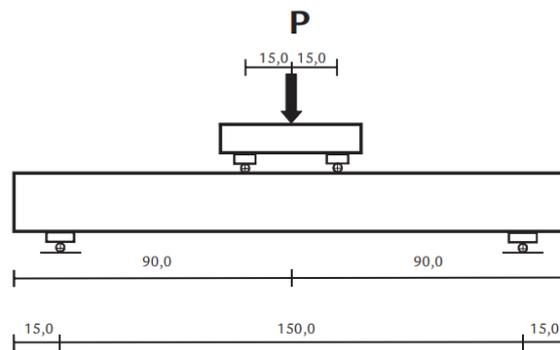


Figura 5 – Ensaio de flexão de uma viga com aplicação de carga P para verificação de sua resistência (ANDO et al., 2012).

A flexão é denominada pura quando atua apenas o momento na seção transversal. A região entre as forças aplicadas no “ensaio de *Stuttgart*”, região central, é solicitada apenas por momento fletor constante, caracterizando uma situação de flexão pura. A flexão simples ocorre quando atuam conjuntamente o momento fletor e a força cortante, produzindo tensões normais e tangenciais na seção, como nas extremidades das vigas no “ensaio de *Stuttgart*”. A partir da comprovação dos resultados teóricos com os experimentais surgem os primeiros tratados

técnicos para o cálculo e execução de estruturas em concreto armado. A Figura 6 apresenta um detalhe esquemático do “ensaio de *Stuttgart*” com fissuras apenas na região de flexão pura (intervalo entre as cargas simétricas) (SILVA, 2014).

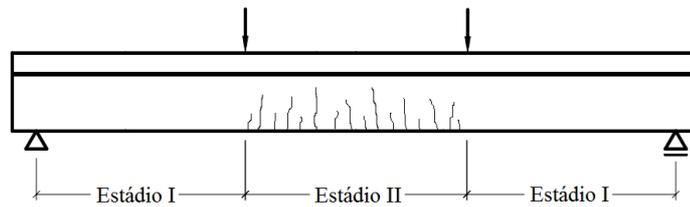


Figura 6 – Flexão pura entre as cargas aplicadas nas vigas (SILVA, 2014)

Então o modelo estrutural deve ser realista, permitindo de maneira clara todos os caminhos percorridos pelas ações até os apoios da estrutura e que permita também representar a resposta não linear dos materiais. O modelo deve representar a geometria dos elementos estruturais, os carregamentos atuantes, as condições de contorno, as características e respostas dos materiais, sempre em função do objetivo específico da análise (ABNT 6118: 2014).

Os métodos de cálculo de estruturas de concreto armado podem ser classificados basicamente em dois tipos: os métodos clássicos, ou das tensões admissíveis, e os métodos de cálculo na ruptura (ou dos estados limites), então é necessário o calculista tentar modelar a estrutura com o método mais realista. Nos métodos clássicos são métodos determinísticos, nos quais os valores são fixos servindo como ponto de partida para calcular as solicitações (momento fletor, força cortante e força normal) correspondentes às cargas máximas de serviço (cargas de utilização), determinando a resistência dos materiais e valores de carga (ABNT 6118:2014).

Para o método de cálculo na ruptura (ou estados limites) a segurança é garantida fazendo com que as solicitações correspondentes às cargas majoradas (solicitações de cálculo) sejam menores que as solicitações últimas, sendo estas as que levariam a estrutura à ruptura ou atingir um estado limite último) se os materiais tivessem suas resistências reais (resistências características) minoradas por coeficientes de ponderação das resistências de cálculo, onde as resistências não podem ser menores que as solicitações e devem ser verificadas em relação a todos os estados limites e todos os carregamentos especificados para o tipo de construção ($R_d \geq S_d$) (ABNT 6118:2014).

A falta de projetos estruturais, ou mesmo uma avaliação errônea das cargas, pode subestimar a ação das forças atuantes a ponto de serem gerados deslocamentos transversais inaceitáveis, prejudicando a sensação de segurança do usuário. Estes deslocamentos, devido à

baixa rigidez da estrutura, podem surgir ainda em virtude de dois fenômenos: retração e fluência (deformação lenta do concreto), sendo que a retração ocorre independente das ações atuantes, incidindo mais intensamente no concreto fresco, mas podendo ocorrer em idades mais avançadas em função das condições climáticas (DA SILVA et al., 2015).

Os mecanismos responsáveis pela fluência da pasta também são responsáveis por retração, uma vez que a fluência se dá quando uma ação externa é aplicada à estrutura e gera esforços internos. Considerando o estado de uma estrutura em concreto armado, pode-se dizer que dois fatores são sugestivos de reforço: estados limites (serviço e utilização) alcançados ou prevenção, adequando a estrutura à adição de cargas. O desempenho da estrutura em serviço é satisfatório quando, em condições normais de utilização, ela não transmita ao usuário qualquer tipo de desconforto (DA SILVA et al., 2015).

Fissuração e flechas excessivas podem ser sinais visíveis de problemas relacionados à segurança da estrutura. Por outro lado, uma estrutura bem dimensionada deve apresentar tais sinais sob utilização indevida. Ainda de acordo com o autor, comportamentos fora dos padrões especificados, tais como vibração, fissuração e flechas excessivas, bem como recalques diferenciais elevados, são indícios de uma estrutura que já atende mais o estado limite de utilização. Para que as seções de uma viga submetida à flexão pura permaneçam planas, a aderência entre a armadura e o concreto deve garantir a compatibilidade de deformações (DA SILVA et al., 2015).

2.3 RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS

2.3.1 VERIFICAÇÕES DE VIGAS DE SEÇÃO “T”

Nas vigas, geralmente o esforço normal é desprezível (exceção às vigas protendidas), portanto apenas a flexão normal, simples e pura será verificada. É necessário o entendimento dos princípios do mecanismo de colapso (ruína) para a utilização do reforço estrutural. O processo de colapso de vigas sob tensões normais, sujeitas a carregamentos crescentes de forma experimental, causam flexão pura na região central ($V = 0$ e $M = \text{constante}$), dessa maneira, na seção central, a viga é submetida a um momento fletor M crescente, que varia de zero até um valor que a leve ao colapso. A figura 7 mostra uma viga simplesmente apoiada com uma carga P no centro da viga, sendo construído os respectivos diagramas de esforço cortante e do momento fletor (CARVALHO, 2016).

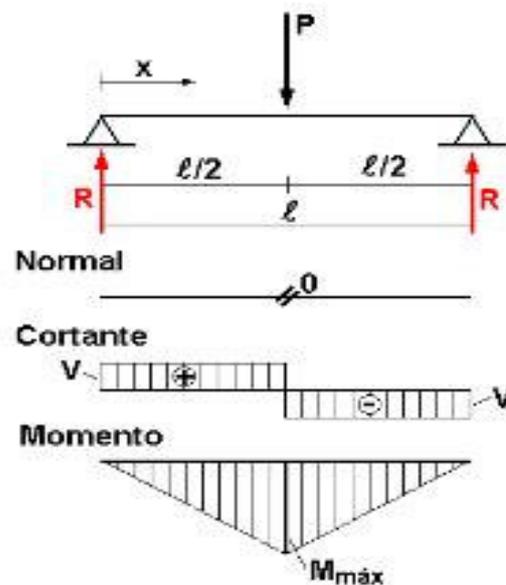


FIGURA 7 – Viga simplesmente apoiada – carregamento e diagramas

Com o momento fletor crescente, a viga passa por estágios de deformação, denominados de estádios, que determinam o comportamento da peça até a sua ruína. Podem-se caracterizar os três estádios de deformação de uma viga de concreto na flexão normal simples: estágio I (estado elástico), estágio II (estado de fissuração) e estágio III (estado de ruína).

O estágio I e II corresponde ao estado limite de serviço (ELS), quando atuam as ações reais e quanto ao estágio III corresponde ao estado limite último (ELU), quando as ações são majoradas e resistência minoradas, que só ocorre em situações extremas. Para a utilização de reforços estruturais com a utilização de fibra de carbono é necessário que não atinja esse último estágio, na situação real, tendo em vista que o dimensionamento estrutural sempre é feito no estado limite último, portanto estágio III (CARVALHO, 2016).

A NBR 6118:2014 faz algumas recomendações com relação ao dimensionamento de vigas, neste trabalho a viga utilizada é do tipo “T”, portanto algumas considerações normativas devem ser levadas em consideração. Para as vigas permite-se adotar como largura colaborante da mesa b_f , a largura da viga b_w acrescida de no máximo 10% da distância a entre pontos de momento fletor nulo, para cada lado da viga em que haja laje colaborante e quando a ação conjunta de lajes e vigas não for considerada no dimensionamento da estrutura, lembrando que a seção transversal das vigas não pode apresentar largura menor que 12 cm por critérios de segurança.

Estas vigas podem ser analisadas de duas formas, em função da posição da linha neutra. Quando a linha neutra está localizada na nervura, o procedimento de análise

recomendado na literatura é o mostrado na Figura 8. As Equações 1 a 7 podem então ser utilizadas para determinação do momento fletor resistente das vigas com seção transversal “T”, onde o plano neutro se situa abaixo da mesa. Quando a linha neutra se encontra no plano da ligação entre mesa e alma, ou acima, o procedimento de verificação é o mesmo recomendado para vigas de seção transversal retangular, mas com largura b_f .

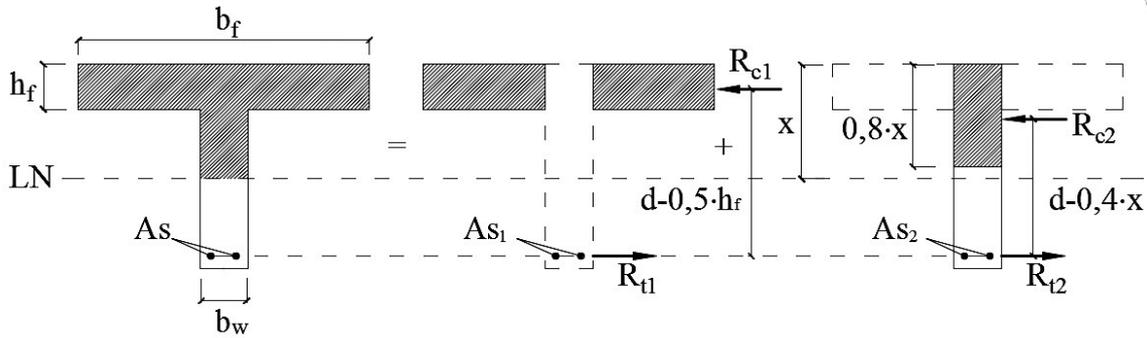


Figura 8 – Procedimento de análise de vigas de seção “T” (DA SILVA, 2015).

$$M_{abas} = R_{c1} \cdot z_1 \quad \text{Eq. 1}$$

$$x = \frac{A_s f_s}{0,8 \cdot 0,85 \cdot f_c \cdot b_f} \quad \text{Eq. 2}$$

$$M_{abas} = 0,85 \cdot f_c \cdot h_f \cdot (b_f - b_w) \cdot (d - 0,5 \cdot h_f) \quad \text{Eq. 3}$$

$$M_{nervura} = R_{c2} \cdot z_2 \quad \text{Eq. 4}$$

$$M_{nervura} = 0,8 \cdot 0,85 \cdot x \cdot f_c \cdot (d - 0,4 \cdot x) \quad \text{Eq. 5}$$

$$A_s = \frac{M_{abas}}{(d - 0,5 \cdot h_f) \cdot f_c} + \frac{M_{alma}}{(d - 0,4 \cdot x) \cdot f_s} \quad \text{Eq. 6}$$

$$M_R = M_{abas} + M_{nervura} \quad \text{Eq. 7}$$

onde:

A_s : é a área necessária de armadura;

f_s : é a tensão atuante;

f_c : é a resistência a compressão do concreto;

b_f : é a largura da mesa;

d : é a altura útil da seção transversal;

b_w : é a largura da nervura.

2.3.2 VERIFICAÇÕES DE VIGAS DE SEÇÃO RETANGULAR

O equacionamento para o cálculo da armadura longitudinal para concretos com resistência até 50 MPa, é feito de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), como mostra a figura 9, utilizando as equações 8, 9, 10 e 11.

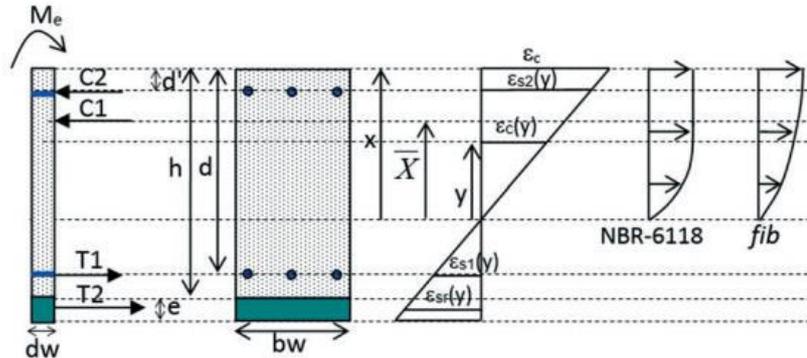


Figura 9 – Procedimento de análise de vigas seção retangular (ANDREOLLI, 2016)

$$x = \frac{0,68 \cdot d \pm \sqrt{(0,68 \cdot d)^2 - 4 \cdot 0,272 \cdot \left(\frac{Md}{bw \cdot f_{cd}}\right)}}{0,544} \quad \text{Eq. 8}$$

$$A_s = \frac{Md}{z \cdot f_s} \quad \text{Eq. 9}$$

$$z = d - 0,4 \cdot x \quad \text{Eq. 10}$$

$$Md = (0,85 \cdot f_{cd} \cdot bw \cdot 0,8 \cdot x) \cdot z \quad \text{Eq. 11}$$

2.4 REFORÇO ESTRUTURAL

O reforço pode ser idealizado pela associação de outros materiais ou elementos resistentes à estrutura original como barras de aço adicionais, concreto, chapas metálicas ou mantas de fibras sintéticas. Além da incorporação de novos materiais e elementos resistentes à estrutura original, pode-se tentar diminuir o nível de tensões imposto à estrutura, aplicando-se permanentemente forças que se contraponham ao acréscimo de tensões gerado.

Todo elemento estrutural danificado deve ser reforçado. Os danos estruturais ocorrem em decorrência de erros em projetos, erros em execução, excesso de cargas não previstas em projeto, acidentes de origem humana (explosões e incêndios, por exemplo) ou natural (sismos, cheias e outros), deterioração dos materiais (envelhecimento natural, ataques químicos ou biológicos), má utilização, e, ainda, a falta de manutenção e inspeção necessárias nas estruturas. Devido ao elevado desempenho mecânico das fibras de carbono, o reforço à flexão com PRFC é muito utilizado em vigas de concreto armado danificadas. No Brasil, o reforço à flexão de

vigas de concreto armado com PRFC tem sido executado sem a utilização de um sistema de ancoragem para o PRFC (Viera et al. 2015).

2.5 SISTEMAS COMPOSTO

Os materiais estruturados com fibras contínuas e matriz polimérica são conhecidos como compostos. São materiais anisotrópicos e heterogêneos com um comportamento elástico linear até a sua ruptura, conforme mostra a figura 7.

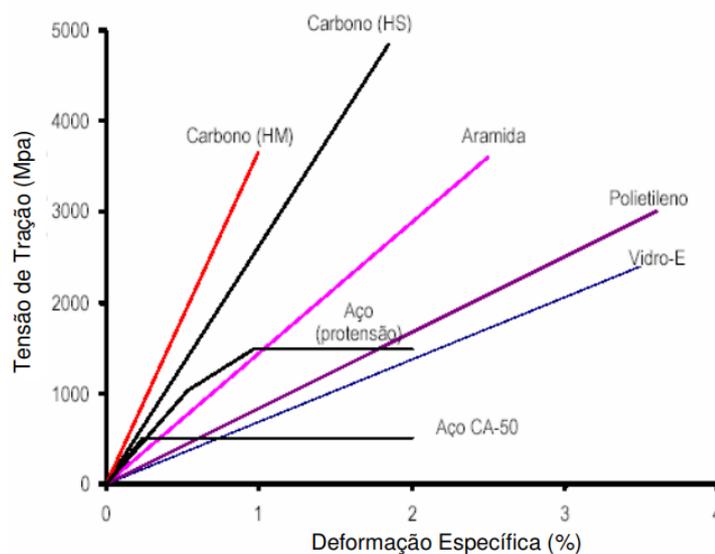


Figura 10 – Diagrama tensão deformação de fibras, aço para construção e cordoalhas de protensão

Existem várias razões e vantagens em sua utilização, para fins de reforço de estrutura, tais como:

- (i) São muito leves (geralmente o peso dos sistemas compostos nem é levado em consideração nos projetos de reforço estrutural);
- (ii) São resistentes à corrosão, pois não são metálicos;
- (iii) Possuem excelentes propriedades mecânicas;
- (iv) São aplicados de maneira fácil, não necessitando de equipamentos e ferramentas especiais;
- (v) Adaptam-se facilmente em qualquer superfície em que sejam aplicados.

As fibras que estruturam os compostos são disponibilizadas para aplicação em vários tipos e geometrias, que vão desde os tecidos (uni e bidirecionais) passando pelas placas até os laminados rígidos como mostra a figura 6.

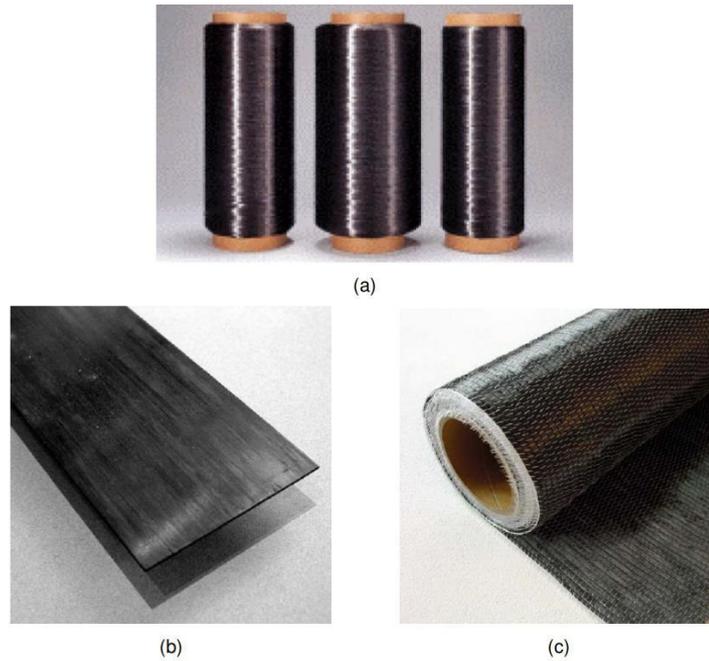


Figura 11 – Sistemas de Reforços com fibras de carbono: (a) fios de fibra de carbono; (b) chapas pultrudadas de fibra de carbono; (c) tecidos de fibra de carbono (SILVA FILHO, 2007)

Em reforço estrutural além das fibras de carbono podem ser utilizadas também fibras de vidro e aramida. A tabela 2 apresenta um estudo comparativo entre as características das fibras (SILVA FILHO, 2007).

Tabela 2 – Comparativo entre as características dos diversos tipos de fibra

Consideração	Fibra de Carbono	Fibra de Vidro	Fibra de Aramida
Alcalidade / Exposição à meios ácidos	Alta resistência	Não tolera	Não tolera
Expansão térmica	Próximo de zero, pode causar altas tensões de aderência	Similar ao concreto	Próximo de zero, pode causar altas tensões de aderência
Condutividade elétrica	Alta	Excelente isolante	Excelente isolante
Tolerância ao impacto	Baixa	Alta	Alta
Fluência e fadiga	Alta resistência	Baixa resistência	Baixa resistência

Os compósitos com fibras de carbono (CFC) são os materiais mais indicados para o reforço de vigas de concreto armado, pois apresentam alto desempenho mecânico e o aumento

na seção transversal original é praticamente desprezível. Na tabela 3 estão as propriedades mecânicas de alguns tipos de fibras (SILVA FILHO, 2007).

Tabela 3 – Propriedades Mecânicas das Fibras

Tipo de Fibra	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação Específica Última (%)	Densidade Específica
Carbono de alta resistência	4300 – 4900	230 – 240	1,9 – 2,1	1,8
Carbono de alto módulo	2740 – 5490	294 – 329	0,7 – 1,9	1,78 – 1,81
Carbono de alta resistência e alto módulo	2600 – 4020	540 – 640	0,4 – 0,8	1,91 – 2,12
Aramida de alta resistência e alto módulo	3200 – 3600	124 – 130	2,4	1,44
Vidro	2400 – 3500	70 – 85	3.5 – 4,7	2,6

Fonte: Silva Filho, 2007

As fibras têm como funções principais fornecer resistência e rigidez ao compósito. Estas propriedades variam em função do tipo, tamanho, grau de concentração e disposição das mesmas na matriz. A escolha da fibra a ser empregada em determinada situação depende do tipo de estrutura, grau de sollicitação e condições ambientais (SILVA FILHO, 2007).

A matriz é responsável por envolver completamente as fibras, proporcionando proteção mecânica e proteção contra agentes agressivos, além de garantir a transferência integral das tensões do elemento estrutural para as fibras por atrito ou adesão. As matrizes utilizadas em polímeros reforçados com fibras são constituídas por resinas termoplásticas ou resinas termo-rígidas, as quais devem apresentar compatibilidade química e térmica com a fibra (FIORELLI, 2002).

As resinas termo-rígidas ou termofixas são aquelas em que a cura é feita pela ação do calor, ou tratamento químico com catalisadores formando um produto final infusível e insolúvel. As resinas termoplásticas são aquelas em que o processo de cura é reversível, ou seja, podem ser fundidas por meio do aumento de temperatura tornando a se solidificar ao serem resfriadas. Em reforço estrutural utiliza-se resinas de origem termo-rígida, dentre as quais pode-se citar o poliéster, o éster-vinílico, o uretano metacrilato, o fenol e principalmente o epóxi (FIORELLI, 2002).

As resinas epóxi são as mais utilizadas pois apresentam excelente aderência, durabilidade, compatibilidade com o concreto, boa resistência à tração, bom comportamento à fluência, boa resistência química e a solventes, forte adesão com as fibras e baixa retração durante a cura. A qualidade do reforço com CFC depende da quantidade de fibras em contato com a resina epóxi como mostra a figura 7. (MACHADO 2004).

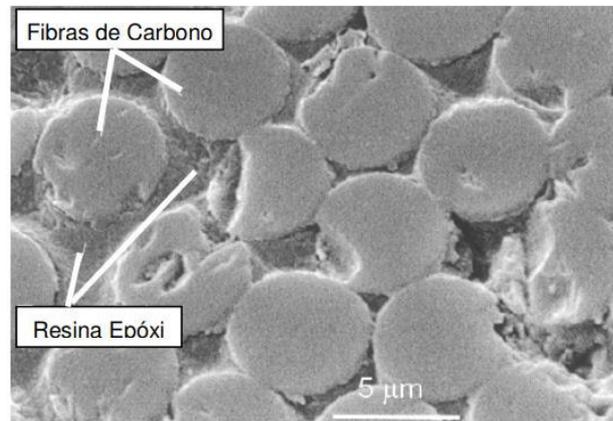


Figura 12 – Fibras de Carbono Envolvidas com Resinas Epóxi (Machado 2007)

Os materiais compósitos formados por fibras de carbono podem ser comercializados de duas maneiras: como barras e grelhas para substituição do aço nas vigas de concreto armado e para protensão externa ou na forma de tecidos e lâminas. Essa segunda categoria pode ser dividida em sistemas pré-fabricados (laminados) e os sistemas curados *in situ* (PERELLES, 2013).

Os sistemas pré-fabricados são industrializados e basta a colagem do laminado na superfície a ser reforçada, já os sistemas curados *in situ* possuem a configuração apresentada na Figura 13 e todo o sistema é moldado no local

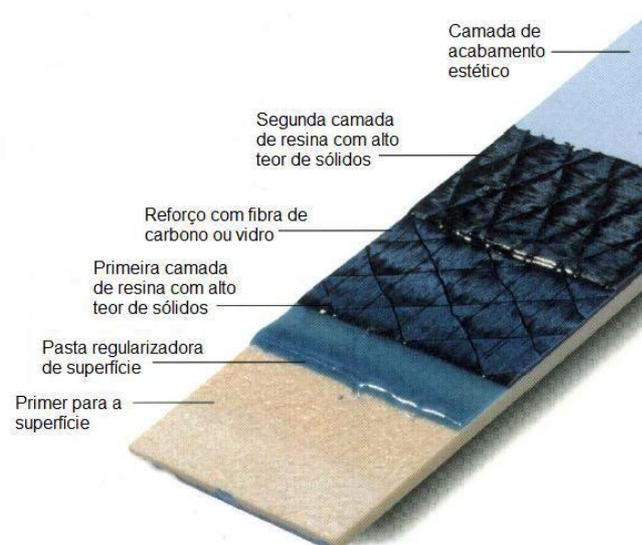


Figura 13 – Ilustração do sistema de reforço com fibra de carbono *in situ* (PERELLES, 2013)

A execução desse reforço deve seguir algumas etapas que são importantes para garantir a qualidade do mesmo. Primeiramente se aplica uma camada de *primer* seguida de uma camada regularizadora. Depois, é aplicada uma resina epoxídica que tem por objetivo aderir o tecido de fibras de carbono e saturar o mesmo de maneira a promover a sua colagem. Segue-se com a implantação do tecido de fibras e por último se aplica mais uma camada de resina finalizando com um acabamento estético.

2.6 REFORÇO ESTRUTURAL COM SISTEMA COMPOSTO DE FIBRAS DE CARBONO

Segundo Souza e Ripper (1998), a utilização de fibras de carbono para fins de reforço de estruturas de concreto armado, teve sua concepção no início dos anos 80 no Japão. Devida grande incidência de abalos sísmicos em curto espaço de tempo e com escalas consideráveis, várias construções tinham suas estruturas comprometidas, especialmente os pilares e o período para reparo de tais estruturas era reduzido. Dentro deste contexto, o governo japonês e entidades privadas se uniram na pesquisa de novas tecnologias que suprissem a necessidade de reforçar os pilares das edificações com eficácia, segurança e agilidade. Como o uso de fibra de carbono naquela época já era bem comum nas indústrias do tipo navais e automobilísticas no reforço de várias peças, testes realizados comprovaram sua eficiência em reforços de estruturas de concreto armado.

O reforço de estruturas de concreto armado com sistema composto de fibra de carbono, não fica restrito apenas para pilares como no início de seu emprego. As propriedades mecânicas deste composto permitem o seu uso em outras peças importantes das estruturas de concreto armado danificadas como lajes e vigas. As fibras de carbono dispostas corretamente sobre tais peças resistem perfeitamente aos esforços de tração e cisalhamento resultantes do carregamento da estrutura como um todo (SOUZA E RIPPER, 1998).

O reforço de estruturas de concreto armado com sistema composto de fibra de carbono (CFC) contribuiu com o avanço do melhoramento das estruturas de concreto armado existentes, proporcionando o uso destas sobre maiores carregamentos e a recuperação de peças que tenham a resistência afetada por acidentes que exerceram impacto sobre esta, erros devido a má preparação dos componentes e irregularidades durante a execução dos serviços de montagem e locação de formas tais como a disposição das armaduras e preenchimento da forma com concreto (GALHARDO, 2002).

Este método de reforço pode ser entendido como a evolução de métodos pioneiros como, o aumento da seção de concreto, confinamento com nova armadura e lançamento de

concreto projetado nesta, suportes de perfis metálicos, além de métodos mais recentes como o uso de chapas metálicas aderidas com resina epóxi. (GALLARDO, 2002).

De acordo com Machado (2002), este método de reforço se destaca dos demais pela fácil execução conservando as características arquitetônicas originais da edificação devida à espessura da manta, que gira em torno de 0,166 mm e sua acomodação ao formato das peças a serem reforçadas. Este sistema de reforço não exerce carregamento considerável à estrutura já que todos os seus componentes são leves, com peso total do composto na faixa de 500 g/m², sendo assim o uso deste em pavimentos superiores de edifícios, não acarreta o aumento de esforços no restante da estrutura.

2.6.1 APLICAÇÃO DA FIBRA DE CARBONO NAS PEÇAS ESTRUTURAIIS

As figuras 14, 15 e 16 mostram a aplicação dos da fibra de carbono nos elementos estruturas como vigas à flexão e à força cortante, lajes, chaminés, alvenaria estrutural, silos, reservatórios, túneis, pilares por meio de confinamento ou para redução de deformações.



Figura 14 – Pilares com aplicação da fibra de carbono (SILVA FILHO, 2007)



Figura 15 – Reforço de ponte à força cortante com utilização de fibras de carbono (SILVA FILHO, 2007)



Figura 16 – Reforço de Lajes à flexão e Vigas à flexão e a força cortante com tecidos de fibras de carbono (SILVA FILHO, 2007).

O código ACI 440.2R (2008), American Concrete Institute, indica que o correto comportamento do reforço de elementos de concreto depende da preparação de sua superfície, podendo resultar em uma redução da aderência entre a superfície do concreto e a fibra de carbono, provocando o descolamento ou o destacamento prematuro do sistema de reforço. Para que não ocorram tais falhas é necessário fazer o lixamento feito por abrasivos da peça estrutural e adicionar uma camada de material de regularização que proporcione condições de aderência para garantir a perfeita ligação dos materiais. A superfície do elemento estrutural deve receber uma camada de adesivo de baixa viscosidade para penetração nos poros e consolidação do substrato.

Na preparação do substrato podem existir elementos de concreto fissurados, e nessas situações o movimento das fissuras pode comprometer o desempenho do reforço externo devido à possibilidade de descolamento ou destacamento da fibra. Por ocorrência desse tipo de comportamento, recomenda-se que as fissuras com abertura superior a 0,3 mm sejam preparadas e injetadas com resina epóxi. Nas arestas das vigas, para evitar a concentração de tensões nas fibras coladas, a utilização de cantos arredondados, para evitar os eventuais vazios que podem ocorrer, entre o concreto e o reforço, por deficiência no processo de colagem (ACI 440.2R-08, 2008).

2.6.2 REFORÇO A FLEXÃO EM VIGAS REFORÇADAS COM FIBRAS DE CARBONO

O reforço à flexão com fibras de carbono em vigas de concreto armado com a técnica CSC (colagem na superfície do concreto) é um processo que consiste em regularizar a superfície de concreto e aplicar sobre o substrato de concreto o reforço. Os sistemas podem ser subdivididos em curados “in situ” e em sistemas “pré-fabricados. A técnica para a utilização dos dois sistemas de reforço envolve a aplicação manual por meio de colagem com adesivos e da cura a frio. Na Figura 17 é ilustrado o posicionamento do sistema curado “in situ”, com a fibra colada na face inferior da viga “T”.

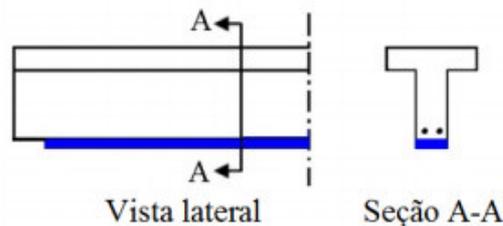


Figura 17 – Aplicação da Fibra de Carbono na face inferior da viga (DASH, 2009, apud SILVA, 2014).

Na figura 18 é ilustrado o posicionamento do sistema PRFC na seção Retangular, com a fibra colada na face inferior da viga.

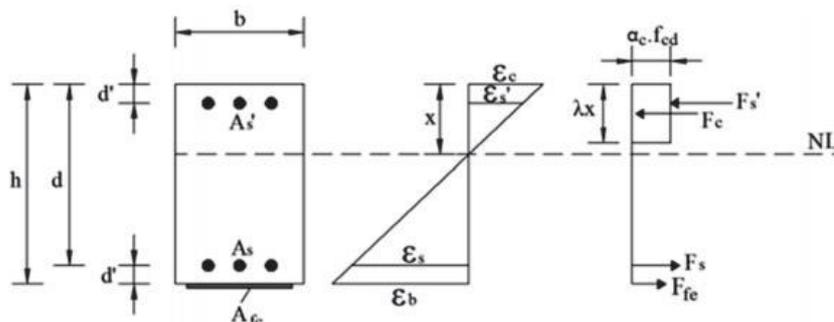


Figura 18 – Distribuição das deformações e forças em uma seção reforçada a flexão com PRFC (SILVA e BANDEIRA, 2019)

2.7 VERIFICAÇÕES SEGUNDO A FEDERAÇÃO INTERNACIONAL DE CONCRETO

A ABNT NBR 6118:2014 não regulamenta os parâmetros e equações necessárias para a verificação dos elementos estruturais após a colocação dos reforços estruturais com a utilização de fibra de carbono, porém o boletim *fib* 2001, faz algumas orientações de projetos a uma série de materiais compósitos em reforço externo nas estruturas de concreto, com barras e mantas de fibras de carbono.

A análise dos estados limites serviço (ELS) e último (ELU) são levados em consideração nesse boletim, para assegurar que a estrutura cumpra, em condições de utilização, as exigências relativas às deformações, fissurações e tensões. Nessas considerações recomenda-se a utilização de um fator de segurança denominado g_f para o cálculo de deformações específicas do reforço com fibra de carbono. Para a utilização desse fator de segurança deve ser levado em consideração o controle de qualidade na aplicação do reforço, sendo o grupo A com o controle bem efetivo e o grupo B com certa dificuldade na aplicação do reforço, como mostra a tabela 4.

Tabela 4 – Fator de segurança de acordo com o tipo de aplicação do reforço

Tipo de Reforço	Aplicação tipo A	Aplicação tipo B
PRFC (carbono)	1,20	1,35
PRFV (vidro)	1,25	1,45

O reforço estrutural deve refletir efeitos adicionais fornecido pela seção e a capacidade de transferência de forças na interface compósito-concreto. A análise para o estado limite último das vigas à flexão deve seguir procedimentos bem estabelecidos para estruturas de concreto armado, onde se verificam dois itens, a contribuição do reforço de e a ligação entre o reforço e o concreto. Por isso a análise deve ser feita a partir do ELU da resistência dos elementos de concreto reforçados à flexão e da identificação de todos os possíveis modos de ruptura. O efeito de carga aplicada antes do reforço deve ser considerado no cálculo (SILVA, 2014).

Segundo a ACI440.2R (2008), o dimensionamento de um sistema de reforço com fibra é realizado no estado limite último, portanto, a capacidade resistente à flexão de uma seção transversal é obtida pela combinação das condições de equilíbrio das forças, pela compatibilidade das deformações e pelas propriedades dos materiais envolvidos. Algumas considerações devem ser feitas para o dimensionamento à flexão:

- ✓ Os estudos e os cálculos deverão ser feitos com base nas dimensões dos elementos envolvidos, bem como nas propriedades dos materiais que os constituem;
- ✓ Prevalecem os critérios de Bernoulli, em que as seções permanecem planas após as deformações e essas são linearmente proporcionais às suas distâncias à linha neutra;
- ✓ A aderência entre o sistema de reforço e o substrato deverá ser considerada perfeita.

Na figura 19 mostra o esquema de cálculo segundo ACI 440.2R (2008) para vigas em concreto armado reforçada com fibras de carbono.

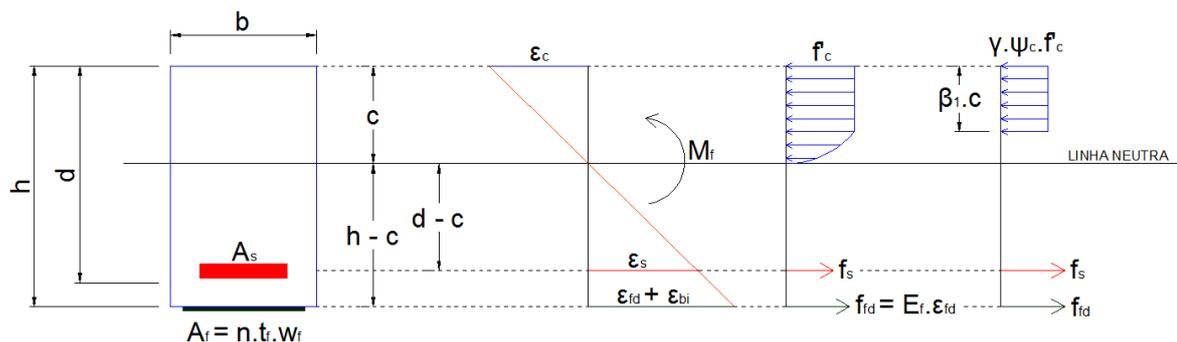


Figura 19 – Deformações e distribuição das tensões para uma seção retangular (ACI 440.2R 2008).

onde:

h - altura da viga de concreto armado;

b - largura da viga de concreto armado;

d - altura útil da viga, medida do centro de gravidade da armadura tracionada até o bordo comprimido;

A_s - área da seção transversal da armadura tracionada;

A_f - área da seção transversal do reforço de PRFC, dada pela equação 8:

$$A_f = n \cdot t_f \cdot w_f \quad \text{Eq 12}$$

Onde:

n - número de camadas de reforço em determinada seção;

t_f - espessura da camada de reforço;

w_f - largura da camada de reforço.

c - altura da zona comprimida, medida a partir da borda comprimida (posição da linha neutra);

ϵ_c - encurtamento (deformação) do concreto provocado pelo momento fletor solicitante;

ϵ_s - alongamento (deformação) das armaduras provocadas pelo momento fletor solicitante;

ϵ_{bi} - alongamento (deformação) do concreto inicial provocado pelo momento fletor solicitante devido ao peso-próprio;

$\varepsilon_{fd} + \varepsilon_{bi}$ - deformação real do reforço caracterizada pela soma da deformação do compósito quando aplicado no substrato mais a deformação inicial do bordo inferior da viga;

f'_c - resistência característica à compressão do concreto;

f_s - tensão de tração nas armaduras;

f_{fe} - nível de tensão real de tração no reforço com fibra de carbono.

Como o reforço é tratado como um material elástico linear até a ruptura, seu comportamento pode ser definido pela Lei de Hooke, mostrado na equação 9

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} \quad \text{Eq. 13}$$

Em que o E_f é o módulo de elasticidade do reforço, podendo ser calculado pela razão entre a tração de ruptura do esforço e a deformação do compósito, como mostra a equação 10:

$$E_f = \frac{f_{fe}}{\varepsilon_{fe}} \quad \text{Eq. 14}$$

onde f_{fe} é determinado pela equação 11:

$$f_{fe} = C_e \cdot f_{fu}^* \quad \text{Eq. 15}$$

em que o f_{fu}^* é a tensão de tração última do reforço fornecido pelo fabricante do material e o C_e é o fator de redução especificado na norma ACI 440.2R (2008), de acordo com as condições de fatores ambientais, como mostra a tabela 5:

Tabela 5 – Fator de redução da deformação de ruptura do reforço em função da exposição ambiental

Exposição	Tipo de Fibra e Resina	Fator de Redução C_e
Ambiente Interno	Carbono / Epóxi	0,95
	Vidro / Epóxi	0,75
	Aramida / Epóxi	0,85
Ambiente Externo	Carbono / Epóxi	0,85
	Vidro / Epóxi	0,65
	Aramida / Epóxi	0,75
Ambiente agressivo	Carbono / Epóxi	0,85
	Vidro / Epóxi	0,50
	Aramida / Epóxi	0,70

Fonte: ACI 440.2R (2008)

β_1 , ψ_c e γ são coeficientes relacionados com a simplificação do diagrama parábola-retângulo de distribuição de tensões de compressão do concreto. Eles representam a equivalência entre o diagrama parábola-retângulo e o diagrama retangular. O valor admitido para β_1 segundo a ACI 318 (2008), é mostrado de acordo com a equação 16.

$$\beta_1 = \begin{cases} 0,85 \text{ para } 0 \leq f'_c \leq 30 \text{ MPa} \\ 0,85 - 0,05 \cdot \frac{(f'_c - 30,00)}{7,00} \geq 0,65 \text{ para } f'_c > 30 \text{ MPa} \end{cases} \quad \text{Eq. 16}$$

O γ deve ser igual a 0,85 porque leva em consideração o efeito da variação da resistência do concreto em função das velocidades de carregamento, além do ganho de resistência do concreto com o tempo e os resultados obtidos por ensaios físicos de rupturas de corpos de prova cilíndrico.

O valor de ψ_c é obtido conforme o nível de deformação apresentado pelo concreto de acordo com a redução no nível de tensão devido às simplificações do diagrama parábola-retângulo. Peirelles 2013, utilizando ACI 2008 e ABNT NBR 6114:2014, fez algumas possibilidades para os valores de ψ_c :

$$\psi_c = \begin{cases} = 1, & \text{para } \epsilon_c = \epsilon_{cu} \\ = 1,25 \cdot \left(1 - \frac{\epsilon_{c2}}{3 - \epsilon_{c2}} \right), & \text{para } \epsilon_{c2} < \epsilon_c < \epsilon_{cu} \\ = \frac{2,5}{3} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}}}, & \text{para } \epsilon_c < \epsilon_{c2} \end{cases} \quad \text{Eq. 17}$$

O descolamento do reforço feito com epóxi, ocorre se não houver aderência adequada e as tensões provenientes do substrato do concreto devem ser transmitidas ao sistema reforço por meio do adesivo (resistência pelo ensaio de arrancamento igual à 1,40 MPa). Sistemas reforçados com fibra de carbono não devem ser utilizados para estruturas com o substrato de concreto inferior a 17 MPa, de acordo com a ACI.440.2R, 2008. Para prevenir esse tipo de situação, deve haver uma redução da deformação última (de ruptura) do reforço (ϵ_{ft}) segundo o coeficiente dado pela equação 18:

$$K_m \begin{cases} \frac{1}{60 \cdot \epsilon_{fu}} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot E_f \cdot t_f}{360.000}\right) \leq 0,90 \text{ para } n \cdot E_f \cdot t_f \leq 180.000 N/mm \\ \frac{1}{60 \cdot \epsilon_{fu}} \cdot \left(1 - \frac{90.000}{n \cdot E_f \cdot t_f}\right) \leq 0,90 \text{ para } n \cdot E_f \cdot t_f > 180.000 N/mm \end{cases} \quad \text{Eq. 18}$$

em que $n \cdot E_f \cdot t_f$ é a rigidez do reforço em N/mm e o n é o número de camadas de reforço com fibra de carbono ao longo do eixo longitudinal do elemento onde se está determinando a força. Tal número sugere que quanto maior o número de camadas utilizado, maior será as chances de ocorrer o descolamento, impactado diretamente na rigidez do reforço. Então a deformação de ruptura do reforço (ϵ_u) é multiplicada pelo coeficiente K_m , para prevenir a ação do descolamento das fibras de carbono, assim a deformação de cálculo do reforço (ϵ_{fd}) será limitada pela equação 19:

$$\epsilon_{fd} \leq K_m \cdot \epsilon_{fu} \quad \text{Eq. 19}$$

O tipo de PRF utilizado no reforço da estrutura define o coeficiente C_E , menor que a unidade, e variável em função das condições ambientais de exposição do elemento reforçado. O produto ($C_E \cdot \epsilon_{fu}$) corresponde ao valor de cálculo da deformação do reforço.

A figura 15, mostra a distribuição das deformações e forças na seção retangular, e partir dela, gerou as equações 20 e 21 no domínio 2, de acordo com ACI 440R, 2014

$$\epsilon_c = \frac{0,01 \cdot x}{d - x} \quad \text{Eq. 20}$$

$$\epsilon_s = 0,01$$

$$\epsilon_b = \frac{\epsilon_c \cdot (h - x)}{x} \quad \text{Eq. 21}$$

Considerando a deformação inicial no substrato de concreto, ϵ_0 , e a possibilidade de esmagamento do concreto, a deformação efetiva do reforço em estado limite último, ϵ_{fe} , pode ser obtida pela equação 22.

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \cdot \left(\frac{h - x}{x}\right) - \epsilon_0 \leq k_m \cdot C_E \cdot \epsilon_{fu} \quad \text{Eq. 22}$$

onde:

ϵ_{cu} – deformação última do concreto;

ϵ_0 – deformação inicial no substrato de concreto;

h – altura da viga;

x – posição da linha neutra em relação à face superior da viga

Considerando a distribuição de tensões na seção apresentada também na figura 15, pode-se obter as equações de equilíbrio 23 e 24:

$$M_{Rd1} = F_c \cdot \left(h - \frac{\lambda x}{2} \right) - F_s \cdot d \quad \text{Eq. 23}$$

$$M_{Rd2} = F_s \cdot \left(d - \frac{\lambda x}{2} \right) + F_{fe} \cdot \left(h - \frac{\lambda x}{2} \right) \quad \text{Eq. 24}$$

Sendo que o M_{Rd1} é obtido a partir do somatório de momento no ponto de aplicação da fibra de carbono e o valor de M_{Rd2} é obtido no ponto de aplicação da força F_c . As forças F_c , F_s e F_{fe} , são definidas respectivamente entre o produto das áreas e as respectivas tensões resistentes de cada elemento, de acordo com as equações 25, 26 e 27.

$$F_c = \psi \cdot \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot \lambda x \cdot b \quad \text{Eq. 25}$$

$$F_s = A_s \cdot f_s \quad \text{Eq. 26}$$

$$F_{fe} = \psi_f \cdot A_{fc} \cdot f_{fe} \quad \text{Eq. 27}$$

Onde ψ_f é um fator de redução igual a 0,85, aplicado as fibras conforme ACI 440.2R:2018 e f_{cd} é a resistência de cálculo. É recomendado pela norma ACI 440.2R:2008, que a deformação da fibra (ϵ_{fe}) seja limitada a deformação última da fibra (ϵ_{fud}), na qual é dada pela equação 28.

$$\epsilon_{fud} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{f_{cd}}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \quad \text{Eq. 28}$$

É necessário a utilização de um fator de redução da ductilidade do elemento estrutural que será aplicado o PRFC, na qual o valor é de ϕ igual a 0,9 de acordo com a norma ACI 440.2R:2014.

2.8 DESCOLAMENTO DO REFORÇO NA RESISTÊNCIA DAS VIGAS

A avaliação do descolamento do reforço é feita em função do descolamento causado por irregularidades, fissuras de flexão, cisalhamento e nas extremidades do reforço. O descolamento causado por irregularidades na superfície do substrato de concreto, mostrado na figura 20, pode ser evitado limitando-se a ocorrência de irregularidades na superfície na preparação das vigas.

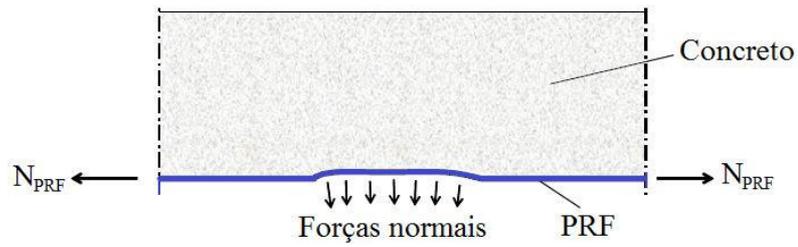


Figura 20 – Deslocamento causado por irregularidades na superfície do concreto

Fonte: Silva, 2014

As irregularidades da superfície de ligação entre o concreto e a fibra de carbono não ocorreram na pesquisa feita por Silva (2014), devido a utilização de formas metálicas na confecção das vigas resultando uma superfície de concreto lisa e sem irregularidades.

3. METODOLOGIA

O método utilizado para a realização deste trabalho é a executiva, um estudo de caso, fazendo pesquisas teóricas para a avaliação da utilização da fibra de carbono como reforço de vigas. O reforço estrutural para vigas de concreto armado solicitadas pode ser feito por meio da colagem externa da fibra de carbono sentido longitudinal, promovendo um aumento de resistência em estruturas submetidas a este tipo de solicitação. Neste trabalho serão utilizado duas fibras de carbono com especificações diferentes, variando também o número de camadas para o reforço, afim de verificar a melhor condição para tal reforço.

Este trabalho tem como justificativa avaliar pesquisas feitas com a utilização das fibras de carbono para fins de reforço estruturais, analisando o modo de aplicação de vigas do tipo retangular, mostrando os dimensionamentos e os cálculos que são levados em consideração para o reforço estrutural, verificando a carga de reforço calculada, além de estimar a nova resistência de vigas com o acréscimo de carregamentos em verificações para vigas a flexão simples. Para possibilitar a análise e o dimensionamento do reforço a flexão, foi considerado que o carregamento da viga sofreu um aumento da sobrecarga em função de uma mudança de utilização do edifício modelo.

A conclusão será feita após a observação de estudo de caso, mostrando as equações e cálculos sugeridos para a aplicação de reforço estrutural com fibras de carbono, comparando os resultados com a metodologia ABNT NBR 6118:2014 e ACI 440.2R 2008, escolhendo uma viga de um edifício de pequeno porte, como mostra a figura 18.

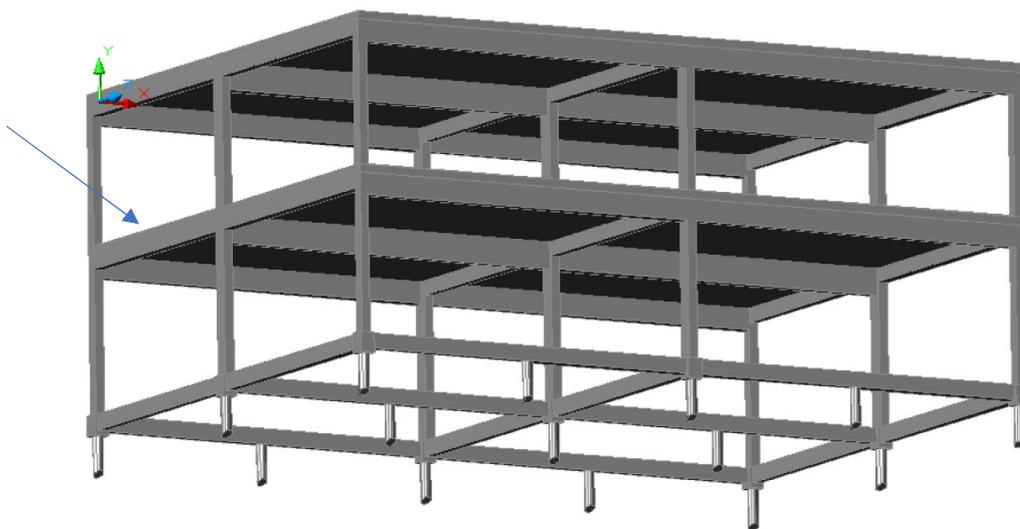


Figura 21 – Vista da estrutura a ser dimensionada em 3 dimensões

A viga V1 escolhida a ser projetada para uma edificação com dois pavimentos em área urbana, cuja a classe de agressividade é a II. Utilizou-se concreto C25 ($f_{ck} = 25$ MPa), na qual a laje utilizada é pré-fabricada treliçada com altura total de 16 cm e peso próprio $2,43$ kN/m². De acordo com a ABNT 6120, o peso específico para argamassa de revestimento é igual a 19 kN/m³ e para argamassa de contrapiso 21 kN/m³, e para o piso utiliza-se carga de $0,2$ kN/m², com espessuras respectivamente de $1,5$ e $3,0$ cm, sabendo que a distância entre os pilares foi de 6 m. A figura 19 mostra a planta baixa, indicando a posição dessa viga V1.

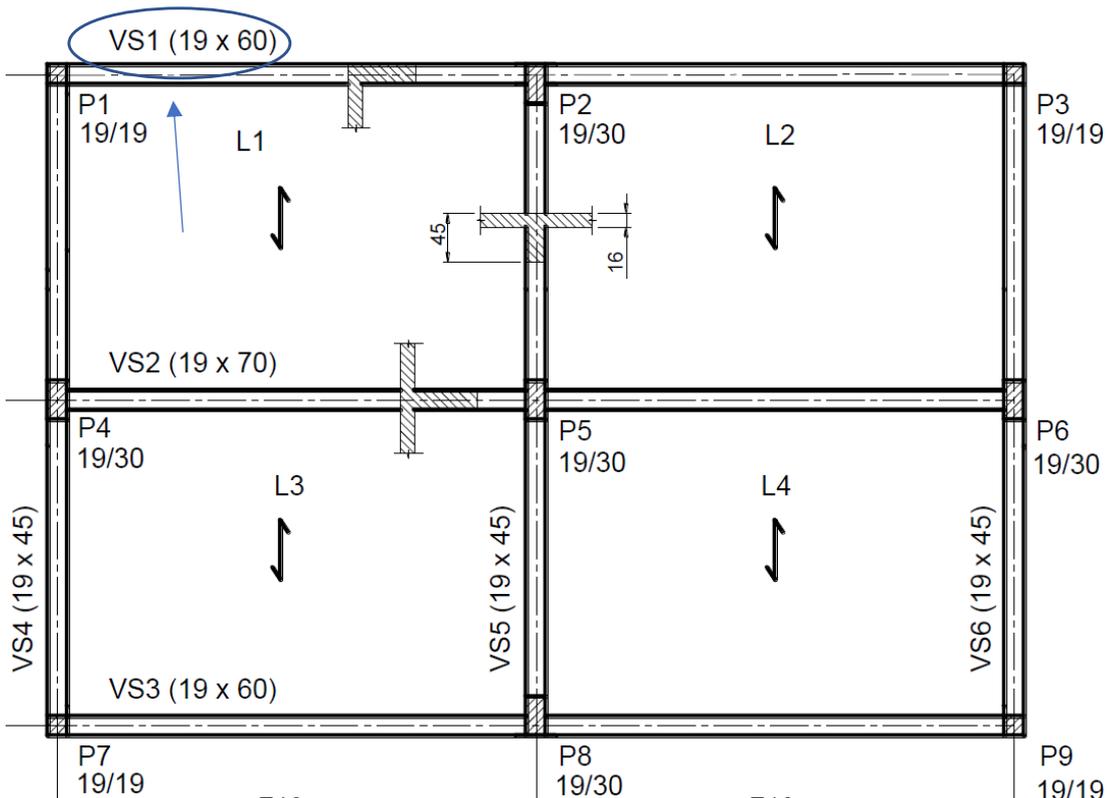


Figura 22 – Ilustração da planta baixa, na qual será dimensionado o reforço para a viga V1

Alguns parâmetros devem ser informados no projeto das vigas, como a resistência do concreto (f'_c), módulo de elasticidade do concreto (E_c), propriedades do aço tracionado como a área de aço (A_s) e o módulo de elasticidade do aço (E_s) além da tensão de escoamento f_{yk} . As propriedades do aço comprimido também devem ser levados em consideração, já que o aço também resiste a compressão, tais como área do aço (A'_s), módulo de elasticidade do aço (E_s) e a tensão de escoamento (f'_{yk}).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CÁLCULOS PRELIMINARES PARA A VIGA V1

4.1.1 ESTIMATIVA DA ALTURA

Para estimar a altura da Viga V1 é necessário observar o vão, ou seja, a distância entre os pilares. Então como a classe do concreto é a C25, a forma para estimar está de acordo com a equação 22:

$$h = \frac{l_{ef}}{12} \quad \text{Eq. 22}$$

onde o l_{ef} é a distância entre os pilares que apoiam a viga, então como o vão é de 6 m, a estimativa da altura foi de 52 cm. A largura da viga será de acordo com o que vai está apoiada sobre ela, nesse caso teremos paredes de alvenaria sob a viga, então devemos levar em consideração as dimensões dos tijolos usuais, que são de 6 furos (9 x 19 x 19 cm), ficando assim a viga V1 com as dimensões 19 x 60 cm.

4.1.2 VÃO EFETIVO

Para quantificar o vão efetivo da viga, é necessário levar em consideração os tramos que fazem parte dela, de acordo com a equação 23, determinamos o vão efetivo (l_{ef}):

$$a_1 = a_2 \leq \begin{cases} t_1/2 = t_2/2 = 19/2 = 9,5 \text{ cm} \\ 0,3 \cdot h = 0,3 \cdot 60 = 18 \text{ cm} \end{cases} \quad \text{Eq. 23}$$

$$l_{ef} = l_0 + a_1 + a_2 \quad \text{Eq. 24}$$

$$l_{ef} = 619 \text{ cm}$$

4.1.3 CARGAS NA VIGA

Considerando que a Viga V1, recebe cargas da laje L1 no primeiro tramo e da laje L2 no segundo tramo, de acordo com os dados fornecidos para as lajes que são treliçadas, calculamos a carga total (p), como mostra a equação 25.

$$p = q + g_{\text{pisso}} + g_{\text{contra}} + g_{\text{revest}} + g_{\text{pp}} \quad \text{Eq. 25}$$

então a carga total (p) calculada é igual a $5,55 \text{ kN/m}^2$, atuante na laje. Para o cálculo das cargas na viga é necessário fazer algumas considerações, como o peso próprio, a parede, a influência da laje nessa viga, de acordo com a equação 26:

$$p_{total} = g_{pp} + g_{par} + g_{laje} \quad \text{Eq. 26}$$

onde o peso próprio é de $2,47 \text{ kN/m}$ calculado de acordo com suas dimensões e peso da parede foi de 8 kN/m , já que a altura da parede de alvenaria é de $2,5 \text{ m}$. O peso da laje calculado foi de $12,48 \text{ kN/m}$, levando em consideração que o comprimento da laje tem $4,5 \text{ m}$, então:

$$p_{total} = 2,47 + 8 + 12,48$$

$$p_{total} = 22,95 \text{ kN/m}$$

4.1.4 ESFORÇOS SOLICITANTES

Utilizando o software Ftool, foi colocado a estrutura para ser analisada conforme mostra a figura 23:

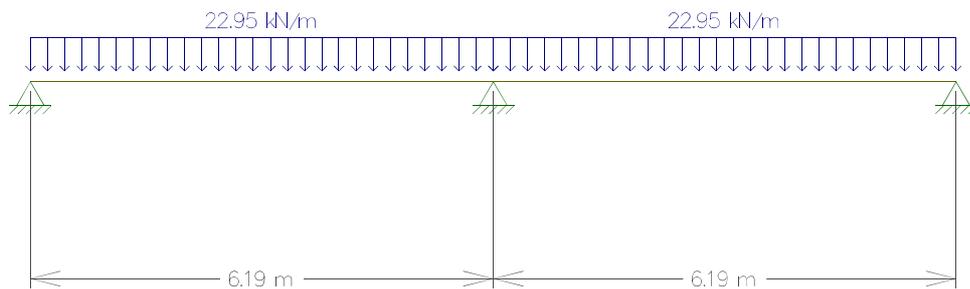


Figura 23 – Ilustração da análise estrutural para a viga V1

As figuras 24 e 25, mostram respectivamente os diagramas de esforços cortante e momento fletor, com os respectivos resultados de forças atuantes. Como foi desprezado as forças atuantes no eixo x da viga, não foi necessário fazer a representação do diagrama de forças normais.

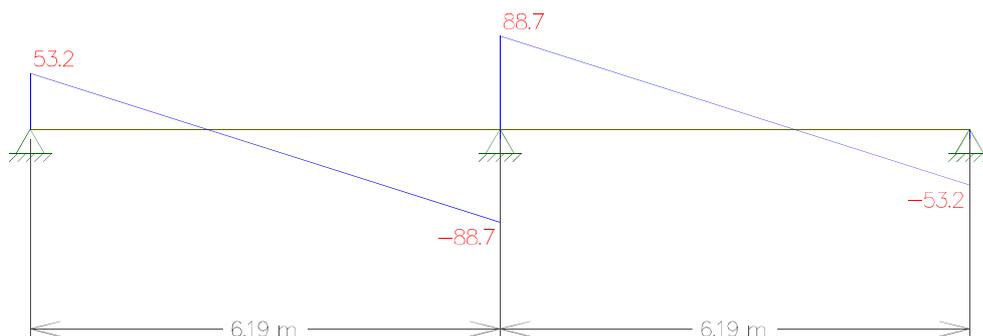


Figura 24 – Diagrama dos esforços cortantes para a viga V1

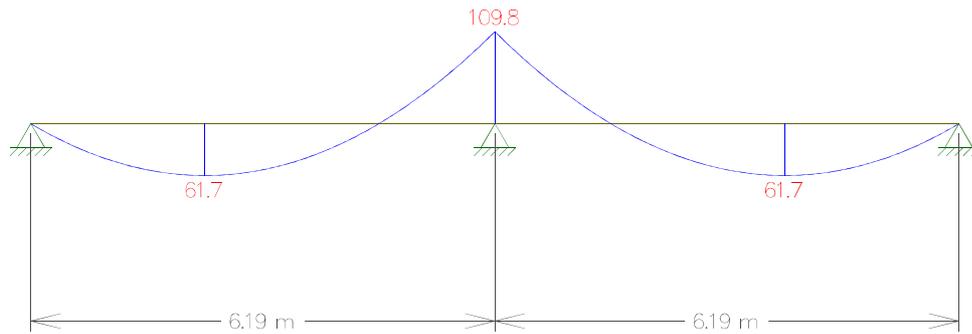


Figura 25 – Diagrama do momento fletor para a viga V1

Com a utilização do programa Ftool 3.00, determinou-se também a estimativa de deformação da viga V1 após a análise das cargas em que foi submetida, com o valor de deslocamento da peça em torno de 3,67 mm, como mostra a figura 26.

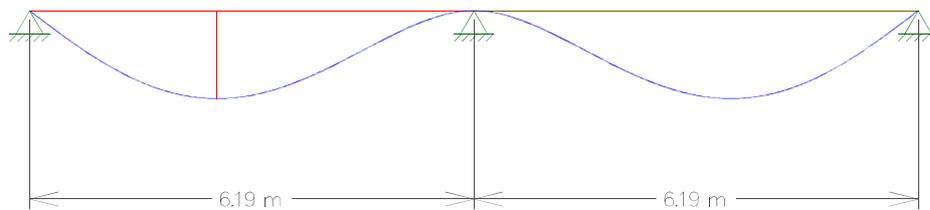


Figura 26 – Ilustração da deformação máxima da viga V1

De acordo com a NBR 6118:2014, a flecha de aceitabilidade para as vigas nessas situações é determinada pela equação 27:

$$\frac{l}{250} > M_{calculado} \quad \text{Eq. 27}$$

Então o valor dessa relação do vão da viga por 250, chegou a um resultado de 2,47 cm de aceitabilidade com relação a deformação e pela norma utilizando o valor de 3,67 mm de deformação encontrada para tais características da viga, é necessário multiplicar por 2, resultando em um valor de 7,34 mm, portanto a viga satisfaz a condição de projeto.

4.1.5 DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS

As armaduras longitudinais e transversais foram dimensionadas baseadas no valor encontrado do momento máximo. Para a armadura mínima a flexão, utilizou-se o cálculo para o momento fletor mínimo, de acordo com a equação 28:

$$M_{d,min} = 0,8 \cdot W_0 \cdot f_{ctk,sup} \quad \text{Eq. 28}$$

determinando o $f_{ctk,sup} = 1,3 \cdot f_{ctm} = 1,3 \cdot 0,3 \sqrt[3]{f_{ck}^2} = 1,3 \cdot 0,3 \cdot \sqrt[3]{25} = 3,33 \text{ MPa}$, precisou-se determinar o W_0 , de acordo com a equação 29:

$$W_0 = \frac{I}{y} \quad \text{Eq. 29}$$

onde I é a inercia da peça e o y é a meia altura da viga de acordo com o estágio I, portanto o valor de W_0 nessas condições é de 11.400 cm^3 . Então calculando o valor de $M_{d,min}$, resultando em 3037 kN.cm .

O dimensionamento da armadura para o momento fletor mínimo, tomando $d = 50 \text{ cm}$, um valor menor que o d real, então K_c é determinado de acordo com a equação 30:

$$K_c = \frac{bw \cdot d^2}{M_d} \quad \text{Eq. 30}$$

O resultado para K_c foi de $15,64$, necessitando assim verificar na tabela tal, que se encontra em anexo. A partir do valor de K_c , encontra-se o valor de K_s para calcular o valor de A_s de acordo com a equação 31.

$$A_s = K_s \cdot \frac{M_d}{d} \quad \text{Eq. 31}$$

O resultado da área de aço (A_s) foi de $1,377 \text{ cm}^2$, e verificando na tabela 1 em anexo o valor da taxa mínima de armadura (ρ_{min}) foi de $0,15$, por tanto de acordo com a equação 32:

$$A_{s,min} = \rho_{min} \cdot d \cdot bw \quad \text{Eq. 32}$$

No qual $A_{s,min}$ foi determinado em $1,71 \text{ cm}^2$, um valor maior que o determinado para a área de aço que foi de $1,377 \text{ cm}^2$. A armadura de pele não será necessária de acordo com a NBR 6118 para a viga V1, devido a sua seção retangular possuir uma altura igual a 60 cm , então para economizar no projeto, a armadura de pele então poderá ser dispensada.

Com o momento fletor atuante na viga V1 sobre o pilar 2, é negativo com valor de -10980 kN.cm , portanto um valor muito maior que os momentos na extremidade dessa viga que possui um valor de 6170 kN.cm no pilar 1 e no pilar 3. Então se faz necessário de acordo com a norma, plastificar essa viga, afim de diminuir essa diferença entre os valores dos momentos, então o momento será reduzido em 10% conforme a norma ABNT 6118:2014, de acordo com a equação 33:

$$\delta M_k = 0,9 \cdot M \quad \text{Eq. 33}$$

Gerando um valor de M_k igual a -9882 kN.cm , no pilar 2 e já para os pilares 1 e 3 dessa viga o valor será de 5553 kN.cm com valor positivo, no qual esse valor acarretará uma

mudança nos demais valores de momento fletor e força cortante, bem como nos elementos estruturais ligados a este valor. Para o cálculo do M_d , utilizou-se a equação 34:

$$M_d = \gamma_f \cdot M_k \quad \text{Eq. 34}$$

O valor encontrado para o M_d , foi de -13834,8 kN.cm, para o pilar 2 e M_d igual a 7774,3 kN.cm para os pilares 1 e 3, então com esses valores do momento, calcula-se o valor de K_c , para fazer as verificações.

Para a primeira situação (momento negativo), utilizando a mesma equação 30, porém com o novo M_d , foi encontrado o valor para K_c de 3,43 e observando esse valor na tabela 2 em anexo, o valor de K_s foi de 0,026 e o de β_x foi de 0,27, caindo no domínio 3.

Fazendo as verificações de acordo com a equação 35 da norma para o concreto com 25 MPa:

$$\beta_x = x/d \leq 0,45 \quad \text{Eq. 35}$$

$$0,27 \leq 0,45, \text{ verificação ok.}$$

Então os limites estão satisfeitos, garantindo a ductilidade da viga na seção. Então a área de aço (A_s) a ser utilizado é determinada pela equação 36:

$$A_s = K_s \frac{M_d}{d} \quad \text{Eq. 36}$$

A área de aço para a viga foi de 7,19 cm², valor esse que é menor que a área de aço mínimo que foi de 1,71 cm². Para o detalhamento da armadura longitudinal a flexão na seção transversal, foi utilizado a tabela 3, no anexo 2, a quantidade de aço utilizado na viga V1 foi de 4 ϕ 16 mm e 1 ϕ 12,5 mm.

Para a segunda situação (momento positivo), utilizando a mesma equação 30, com o novo M_d , foi encontrado o valor de K_c igual a 6,109 e observando esse valor na tabela 2 em anexo, o valor de K_s foi de 0,024 e o β_x igual a 0,14 caindo no domínio 2. Da mesma forma que para o primeiro momento negativo, com o momento positivo também foi atendido as verificações. Para o cálculo da área de aço, utilizando a equação 36, o A_s foi de 3,731 cm², dando um valor maior que a área de aço mínima, atendendo também as verificações. Para o detalhamento da armadura longitudinal a flexão na seção, onde a quantidade de aço para essa viga V1 de acordo com os valores de momento positivo foi de 3 ϕ 12,5 mm. Então para fins de dimensionamento da viga, será utilizado a área de aço maior, que foi de 7,19 cm², garantindo maior resistência em todo o vão da viga.

4.2 ANÁLISE DA VIGA REFORÇADAS COM FIBRA DE CARBONO ACI 440.2R (2008)

Para a utilização do reforço estrutural com fibra de carbono, é necessário observar algumas especificações do PRFC, fornecidos pelos fabricantes como mostra a tabela 7:

Tabela 6 – Dados obtidos por fabricantes de fibras de carbono para fins de reforço

Dados fibras de carbono (prfc), fornecidos por fabricantes		
Parâmetros	Fibra 1	Fibra 2
$\epsilon_{fu, fabricante}$	17%	15%
$f_{fu, fabricante}$	379 kN/cm ²	300 kN/cm ²
E_f	22800 kN/cm	22000 kN/cm
t_f	0,165 mm	0,180 mm
CE	0,95	0,95
$\epsilon_{fu,k}$	$\epsilon_{fu, fabricante} \cdot CE = 16,15\%$	14,25 ‰
$f_{fu,d}$	$f_{fu, fabricante} \cdot CE = 360 \text{ kN/cm}^2$	285 kN/cm ²

A tabela 8 mostra algumas propriedades dos materiais utilizados no dimensionamento da viga V1, como as características do concreto C-25, do aço CA 50 e da fibra de carbono, com utilização de resina epóxi.

Tabela 7 – Propriedades dos materiais utilizados para reforço estrutural

Concreto	f_{ck}	2,5 kN/cm ²	
	E_{ci}	8854 kN/cm ²	
	α_i	0,86 (tabelado)	
	E_{cs}	7614,44 kN/cm ²	
Aço	f_{yk}	50 kN/cm ²	
	E_s	21000 kN/cm ²	
	$\epsilon_{s,u}$	10‰	
	$\epsilon'_{s,u}$	10‰	
Fibra de Carbono 1 e 2 (PRFC)	$\epsilon_{fu,k}$ fabricante	17 %	15%
	$f_{fu,k}$ fabricante	379 kN/cm ²	300 kN/cm ²
	E_f	22800 kN/cm ²	22000 kN/cm ²
	t_f	0,165 mm	0,180 mm
	CE	0,95	0,95
	$\epsilon_{fu,k}$	16,65 %	14,25%
	$f_{fu,d}$	360 kN/cm ²	285 kN/cm ²

Para o dimensionamento de vigas reforçadas com PRFC, de acordo com a norma ACI.2R:2008 adaptado aos atendimentos da NBR 6118:2014, é necessário o cálculo de alguns parâmetros para a verificação de quanto será o aumento da resistência da viga as ações solicitantes, no que diz respeito a flexão das vigas. Como a viga escolhida para a realização dos cálculos de reforço estrutural possui seção retangular com dimensões de (19x60 cm), verificada no domínio 2, no limite do domínio 2 e em todo o domínio 3, como já mostrado os cálculos de acordo com a NBR 6118:2014.

No domínio 2 de acordo com as equações 20 e 21 presentes na norma ACI 440.2R:2008, e também para a norma NBR 6118 (ABNT 2014) foi possível calcular as deformações para o concreto e para o aço, como mostra a tabela 9.

Tabela 8 – Valores para deformações da viga de acordo com as normas

	Viga 6118:2014	Viga Reforçada ACI 440.2R:2008
ϵ_c	1,63‰	3,69‰
ϵ_s	10‰	10‰
ϵ_b	-	12,73‰

Foi determinado as forças atuantes da seção comprimida do concreto (F_c), força resultante da seção tracionada da armadura (F_s) e a força resultante da seção tracionada de fibra de carbono (F_{fe}), através das equações 25, 26 e 27. Porém de acordo com a ACI 440.2R:2008, é necessário obter o valor ψ que foi de 0,75231 por que o concreto utilizado na viga é da classe C25, onde o $\epsilon_c < \epsilon_{c2}$, utilizando assim esse coeficiente na equação da força da seção comprimida do concreto, gerando um resultado de 12,33324 kN.

Para a determinação da força resultante da seção tracionada da armadura (F_s), de acordo com a norma NBR 6118:2014, f_s é igual ao f_{yd} , portanto o valor para F_s foi de 312,54 kN.

Por fim para a determinação da força resultante da seção tracionada de fibra de carbono (F_{fe}), utilizou-se o coeficiente ψ_f no valor de 0,85 como recomenda a norma ACI 440.2R:2008, no qual o cálculo do f_{fe} teve que levar em consideração ϵ_{bi} que varia de acordo com a área estimada para a fibra de carbono colocada na viga, então chegando a um valor ótimo de calculo de 3,8‰ e assim a f_{fe} foi determinada com um valor de aproximadamente 339,78 kN/cm². O número de camadas escolhida foi igual a 5, pois verificou-se que caso fosse colocado menos ou mais que 5 camadas, o valor de f_{fe} seria menor, portanto, não atingindo valor máximo possível para tais condições. Então a força resultante da seção tracionada de fibra de carbono foi de 357,40 kN, um valor bem significativo para o aumento da resistência da viga.

Para a determinação do M_{Rd1} que é o somatório de momentos no ponto de aplicação da fibra de carbono (F_{fe}), utilizando a equação 23, resultou no valor de 527,93 kN.cm. Já o M_{Rd2} que é o somatório de momentos no ponto de aplicação da força atuante na seção comprimida do concreto (F_c), utilizando a equação 24, resultou no valor de 34042,8 kN.cm

A deformação máxima que pode ser admitida em um reforço à flexão com fibras de carbono em função do número de camadas para prevenir o descolamento do sistema composto, foi determinado conforme a equação 18, e como a rigidez da peça reforçada foi maior que 180.000 N/mm, verificou-se que o valor de K_m foi de 0,876, portanto esse valor limita a força desenvolvida no laminado em oposição ao nível de deformação.

A tabela 10 mostra os resultados após o cálculo utilizando as fibras do tipo 1 e do tipo 2, que são de fabricantes diferentes, portanto com propriedades diferentes.

Tabela 9 – Resultados obtidos na modelagem teórica do uso da fibra de carbono, variando os tipos de fabricantes, para a mesma viga

Fibra	F_c (kN)	F_s (kN)	F_{fe} (kN)	Ψ	Ψ_f	K_m	N	M_{rd1} (kN.cm)	M_{rd2} (kN.cm)
1	12,33	312,54	357,48	0,75231	0,85	0,876	10	527,93	34042,8
2	12,33	312,54	692,40	0,75231	0,85	0,737	25	465,43	47535,62

Observa-se que utilizando 10 camadas para a fibra 1, consegue-se chegar a um momento resistente de 34042 kN.cm, já para a fibra 2, consegue-se ultrapassar esse valor utilizando 25 camadas de fibra, um valor que acaba gerando um K_m mais baixo, por ser um fator de segurança com relação ao descolamento ou deslocamento da fibra junto ao substrato, então na modelagem isso também tem que ser levado em consideração. Então os resultados mostra que para a situação na qual a viga V1 se encontra, a melhor opção é a da fibra 1, por conseguir resistir a um momento alto, utilizando poucas fibras, gerando inclusive economia e um melhor desempenho para o compósito.

6 CONCLUSÃO

De acordo com os dimensionamentos realizados e com as discussões sobre os resultados, pode-se chegar a algumas conclusões com relação ao dimensionamento do reforço de vigas de concreto armado com PRFC. O ACI 440.2R:2008 utiliza fatores de minoração das resistências diferentes do que os aplicados pela NBR 6118:2014. Para a NBR 6118:2014, a deformação última do concreto (particularmente para os concretos de classe C20 a C50) tem um valor de 3,5‰ enquanto pelo ACI 440.2R:2008 essa deformação tem um valor de 3‰, algumas notações diferentes também são observadas nas duas normas.

Nota-se que as cargas de ruptura de acordo com o que foi calculado no modelo analítico, já seria suportado pela estrutura dimensionado e verificou-se que após a aplicação de 5 camadas de PRFC colada no sentido longitudinal com resina epóxi, teve-se um aumento na resistência final da viga de forma bem significativa, mostrando a efetividade do modelo teórico de cálculo proposto pela ACI 440.2R: 2008, confirmado por vários ensaios práticos e modelos experimentais como em BANDEIRA e SILVA (2019), PERELLES (2013) e outros trabalhos que modelam o reforço estrutural com fibra de carbono. No entanto, avaliando apenas a seção de momento máximo, observou-se que as forças e deformações apresentadas pelo modelo numérico são significativamente diferentes daquelas apresentadas pelo modelo analítico.

Verifica-se a preocupação com os fatores que influenciam na diminuição do desempenho do reforço estrutural, como a forma de colocação, o substrato a ser colocado, o tipo de cola, o tipo de reforço e outros aspectos, que são levados em consideração no modelo de cálculo pela ACI 440.2R:2008.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6118:2014., Projeto de estruturas de concreto — Procedimento., 238 páginas, 2014 ISBN 978-85-07 04941-8

ACI 440.2R-08; Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, Reported by ACI Committee 440; American Concrete Institute 38800 Country Club Drive Farmington Hills, MI 48331 U.S.A, 2008.

ANDO, Eunice Sumie et al.; *Reforço à flexão de vigas em concreto armado pelo acréscimo de altura na região comprimida, utilizando-se concreto de alta resistência*; REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 65p, 2012.

ANDREOLLI, I; Modelo analítico para avaliação de reforço à flexão de vigas com seção retangular e T; Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, v9 p22 – 47; IBRACON, 2016.

BANDEIRA, A. A; SILVA, A. S. C; Análise de Vigas de concreto armado reforçados à flexão com fibra de carbono: uma abordagem teórica e computacional. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais; p233 – 254 IBRACON, 2019

BOTELHO, M.H.C.; MARCHETTI, O. *Concreto Armado eu te amo*. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

CARVALHO, Roberto Chust.; *Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2014* / Roberto Chust Carvalho, Jasson Rodrigues de Figueiredo Filho. – 4.ed. – São Carlos: EDUFSCar, 2016. 415p.

D. A. GUJEL., C. S. KAZMIERCZAK., J. R. MASUERO.; *Diagrama tensão-deformação específica em concretos com agregados reciclados de concreto: análise da metodologia proposta pela NBR 8522.*; Rev. IBRACON Estrut. Mater. vol.10 no.3 São Paulo, 201

DE SOUZA, V.; RIPPER, T. *Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto*. São Paulo: Pini, 1998. 255 p.

FALCÃO BAUER, A. *Materiais de Construção*. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 488p.

FIORELLI, J. *Utilização de Fibras de Carbono e de Fibras de Vidro para Reforço de Vigas de Madeira*. São Carlos Dissertação de Mestrado. São Carlos. 2002.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do Concreto Estrutural** : tópicos aplicados . São Paulo: Pini, 2008. 179p.

GALLARDO, S. M. A. G. Reforço à Flexão em Vigas de Concreto Utilizando Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono. 2002. 229 p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Universidade estadual de Campinas, Campinas, 2002

H. P. Da SILVA, A. B. de MEDEIROS, D. R. C. de OLIVEIRA.; *Reforço de Lajes Maciças utilizando Vigas com Conectores de Cisalhamento*; REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil Vol.10 - nº 3 (2015).

MACHADO, Ari de Paula.; MACHADO, Bruno Alberto.; Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Sistemas Compostos FRP, Teoria e Prática.; Pini, 2015, 556p

M. M. Vieira, A. R. S. Santos, A. M. Mont’Alverne, L. M. Bezerra, L. C. S. Montenegro, A. E. B. Cabral, Análise experimental de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com polímero reforçado com fibra de carbono; CONPAT, Lisboa 2015.

PERELLES, D. H.; Estudo Analítico do comportamento de uma viga biapoiada de concreto armada reforçada com um compósito de fibra de carbono; Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná; Curitiba 2013.

SANTOS, A.H.A, PITANGUEIRA, R.L.S, RIBEIRO G.O, CARRASCO, E.V.M.; *Concrete modulus of elasticity assessment using digital image correlation.*; IBRACON structures and materials jornal. Vol 9, N. 4, 2016.

SILVA, J. R. (2014). Reforço híbrido à flexão de vigas “T” de concreto armado com compósitos de fibras de carbono e fibras de vidro. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E. TD. – 003A/2014. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 276p.

SILVA FILHO, Júlio Jerônimo Holtz.; *Reforço à torção de vigas de concreto armado com compósitos de fibras de carbono* / Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho ; orientadores: Marta de Souza Lima Velasco, Emil de Souza Sánchez Filho. – 2007. 280 f. : il.

SILVA, JULIANO RODRIGUES.; *Reforço híbrido à flexão de vigas “T” de concreto armado com compósitos de fibras de carbono e fibras de vidro.* [Distrito Federal] 2014.

SOUZA, Silas Geraldo.; *Reforço de estruturas de concreto armado com sistema composto de fibras de carbono* / Silas Geraldo de Souza. – 2014. 79 f.