

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Jonas Müller Rocha

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO REFORÇO À FLEXÃO EM LAJES DE
CONCRETO ARMADO UTILIZANDO FIBRA DE CARBONO**

Santa Cruz do Sul

2017

Jonas Müller Rocha

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO REFORÇO À FLEXÃO EM LAJES DE
CONCRETO ARMADO UTILIZANDO FIBRA DE CARBONO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. M.Sc. Christian Donin

Santa Cruz do Sul

2017

Jonas Müller Rocha

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO REFORÇO À FLEXÃO EM LAJES DE
CONCRETO ARMADO UTILIZANDO FIBRA DE CARBONO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Prof. M.Sc. Christian Donin
Professor orientador – UNISC

Prof. M.Sc. Henrique Rupp
Professor examinador - UNISC

Prof. Dr. Eduardo Rizzatti
Professor examinador - UFSM

Santa Cruz do Sul

2017

RESUMO

Atualmente, nota-se o grande número de alterações em estruturas para serem utilizadas a um fim com a qual não foram projetadas, e também o aparecimento de patologias. Portanto encontra-se a necessidade de reforça-las com o fim de suportar cargas maiores do que inicialmente. O presente trabalho trata-se de uma análise teórico experimental sobre lajes maciças de concreto armado reforçadas com fibra de carbono, bem como o processo de cálculo e também de execução. Estudou-se então as vantagens de utilizar este método, bem como as estruturas foram moldadas, ensaiadas e analisadas. Realizou-se o processo de cálculo e comparou-se com os resultados obtidos experimentalmente. Neste trabalho abordou-se o correto processo de aplicação do reforço e também a comparação de resistência acrescida pelo reforço. Este tipo de reforço se mostrou muito eficiente, visto que não agrega peso e nem aumento de geometria da estrutura reforçada, e resulta em elevado ganho de resistência final.

Palavras-chave: laje; concreto armado; reforço; fibra de carbono; modelo de cálculo.

ABSTRACT

Nowadays, it has become noticeable the great number of changes in structures that are used for purposes they were not designed for, as well as the emergence of pathologies. Therefore, there is a need to reinforce them in order to withstand higher loads than they were initially projected for. The current work evaluates the theoretical and experimental analysis of the usage of solid reinforced concrete slabs reinforced with carbon fiber, as well as the calculation and process execution. The advantages of using such method, as well as the design, test and analyses of the structures were also evaluated. The calculation procedure was done and compared with the results obtained experimentally. In this work, the correct application process of the reinforcement along with the comparison of increased resistance by the reinforcement were assessed. This type of reinforcement proved to be very efficient, since it does not add weight or increase the geometry of the reinforced structure, thus it results in a gain on the final resistance.

Keywords: slabs; reinforced concrete; reinforcement; carbon fiber; calculation model.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Causas dos Problemas Patológicos em Estruturas de Concreto	15
Tabela 2 - Densidade Típica de materiais PRF (g/cm ³)	19
Tabela 3 - Coeficiente de expansão térmica típica de materiais PRF	19
Tabela 4 - Características Mecânicas das Fibras de Carbono	20
Tabela 5 - Fator de redução ambiental para vários sistemas PRF e condições de exposição	24
Tabela 6 - Traço de concreto utilizado	37
Tabela 7 - Resistência à compressão das amostras.....	38
Tabela 8 - Resistência média a compressão do concreto ensaiado	38
Tabela 9 - Resistência a tração do aço ensaiado.....	39
Tabela 10 - Características técnicas Viapol Carbon CFW 300.....	39
Tabela 11 – Parâmetros para momento de cálculo na análise teórica.....	53
Tabela 12 - Parâmetros para momento de ruptura na análise teórica	53
Tabela 13 - Carga de ruptura obtida experimentalmente	54
Tabela 14 - Resultados experimentais e análise estatística.....	55
Tabela 15 - Comparativo entre momento teórico e experimental.....	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Cisalhamento interfacial e tensão normal conceitual distribuídos ao longo de um laminado PRF.....	26
Figura 2 - Delaminação causada por falha da tensão de cobertura de concreto	26
Figura 3 - Tensão interna e distribuição de tensões para uma seção retangular sob flexão.....	27
Figura 4 - Detalhamento construtivo para laminados com três camadas.....	30
Figura 5 - Representação gráfica do fator de redução de resistência em função da dutibilidade	31
Figura 6 - Dimensões laje experimental	36
Figura 7 - Detalhamento armadura	36
Figura 8 - Ensaio à compressão do concreto	37
Figura 9 - Manta de fibra de carbono utilizada	39
Figura 10 - Imprimador primário Repardur Base Coat	40
Figura 11 - Resina epóxi Repardur Carbon Coat	40
Figura 12 - Armadura montada sobre o gabarito.....	41
Figura 13 - Formas e armaduras posicionadas	41
Figura 14 - Teste de abatimento de cone.....	42
Figura 15 - Formas concretadas	43
Figura 16 - Sequência de aplicação do reforço	44
Figura 17 - Máquina EMIC DL 30000.....	45
Figura 18 - Representação gráfica do ensaio.....	45
Figura 19 - Laje posicionada para ensaio	46
Figura 20 - Momento teórico de cálculo da laje testemunho	47
Figura 21 - Momento teórico de ruptura da laje testemunho.....	48
Figura 22 - Deformações na estrutura para equilíbrio de forças	49
Figura 23 - Momento teórico de cálculo da laje reforçada.....	50
Figura 24 - Deformações na estrutura para equilíbrio de forças	51
Figura 25 - Momento teórico de ruptura da laje reforçada	52
Figura 26 - Gráfico Força x Deslocamento das lajes ensaiadas	54
Figura 27 - Fissuras de flexão na face lateral da laje	55
Figura 28 - Ruptura da laje 1.....	56
Figura 29 - Ruptura da laje 2.....	56

Figura 30 - Ruptura da laje 4.....	57
Figura 31 - Comparativo entre momento de ruptura experimental e estimado	57
Figura 32 - Comparativo entre momento de ruptura experimental e de cálculo	58

LISTA DE ABREVIATURAS

ACI	American Concrete Institute
As	Área de aço
bw	Largura
c	Cobrimento
C	Celsius
CEB	Comité Euro-International du Béton
CFC	Compósitos de Fibra de Carbomo
cm	Centímetro
CSTC	Construction Skills Training Centre
ENR	Engineering News-Record
G	Gramas
GPa	GigaPascal
h	altura
m	Metro
mm	Milímetro
MPa	MegaPascal
N	Newton
NBR	Norma Brasileira
PAN	Poliacrilonitrila
PRF	Polímero Reforçado com Fibras
PRFA	Polímero Reforçado com Fibras de Aramida
PRFC	Polímero Reforçado com Fibras de Carbono
PRFV	Polímero Reforçado com Fibras de Vidro
Psi	Libra por polegada quadrada

SUMÁRIO

1 JUSTIFICATIVA	11
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo geral	12
2.2 Objetivos específicos	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Introdução	13
3.2 Lajes de concreto armado	13
3.2.1 Laje maciça	13
3.2.2 Laje nervurada	14
3.2.3 Laje treliçada	14
3.3 Patologias em lajes	14
3.4.1 Reforço com resina epóxi.....	16
3.4.2 Reforço com perfis metálicos	17
3.4.3 Reforço com concreto armado	17
3.4.4 Reforço com chapas de aço.....	17
3.4.5 Reforço com fibra de carbono	18
3.5 Fibra de carbono	19
3.6 Matriz polimérica	20
3.7 Processos de execução	20
3.8.1 Limites de resistência dos reforços com CFC	23
3.8.2 Dimensionamento do reforço à flexão com fibras de carbono	24
3.8.3 Determinação do momento resistente do reforço	28
3.8.4 Deformação máxima que pode ser admitida em um reforço à flexão com fibras de carbono em função do número de camadas para prevenir a delaminação do revestimento ou descolamento do sistema composto.....	29
3.8.5 Verificação da ductibilidade	30
3.8.6 Tensões limites para a ruptura por fluência e fadiga.....	31
3.9 Pesquisas.....	32
4 METODOLOGIA	35
4.1 Definição dos protótipos	35
4.2 Caracterização dos materiais utilizados	36
4.2.1 Concreto.....	37
4.2.2 Aço	38
4.2.3 Fibra de carbono	39

4.2.4	Imprimador primário	39
4.2.5	Resina epóxi	40
4.3	Confecção dos protótipos	41
4.4	Procedimento de ensaio	44
4.5	Análise teórica	46
4.5.1	Momento de cálculo da laje testemunho	46
4.5.2	Momento de ruptura da laje testemunho	47
4.5.3	Momento de cálculo com reforço aplicado	48
4.5.4	Momento de ruptura com reforço aplicado	51
5	RESULTADOS	53
5.6	Análise dos resultados	54
	REFERÊNCIAS	62
	ANEXOS	64

1 JUSTIFICATIVA

Como visto em todas as áreas de conhecimento, o avanço tecnológico vem crescendo fortemente, e na construção civil não poderia ser diferente. Utilizando diferentes métodos ou ideias para favorecer esta importante área, seja nas fases de projetos, planejamento ou na execução.

Encontra-se, facilmente, a necessidade de reforçar determinadas estruturas com o intuito de aumentar a capacidade de carga para a qual foi projetada, devido a diversos fatores, como a alteração do uso ou até mesmo a ocorrência do aparecimento de patologias

As patologias encontradas em estruturas de concreto armado podem ser de diversas causas e ocorrer em diferentes etapas do processo, desde o planejamento até em sobrecargas na utilização. O que resulta na importância de estudar e conhecer os tipos de reforços para que a estrutura não seja comprometida.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estudar e analisar as vantagens e o comportamento de estruturas de concreto armado reforçada com fibra de carbono, e após realizar ensaios com estruturas reais para verificação de resultados.

2.2 Objetivos específicos

- Estudar as vantagens na utilização de fibra de carbono como reforço estrutural
- Analisar o comportamento de estruturas de concreto armado reforçada com fibra de carbono
- Desenvolver um programa experimental onde serão ensaiados corpos de prova para verificação dos resultados práticos e teóricos
- Analisar modelos de cálculo segundo prescrições normativas
- Comparar os resultados teóricos e experimentais
- Apresentar conclusões acerca da eficiência dos métodos empregados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Introdução

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo, formado por cimento, agregados e algumas vezes com aditivos. Essa mistura resulta em um material com grande resistência à compressão, porém apresenta uma baixa resistência à tração. Para suprir este problema e formar estruturas com melhor resistência à tração e diminuir problemas por fissuração foi desenvolvido o concreto armado.

Segundo Kaefer (1998), a primeira utilização do concreto armado foi pelo francês Joseph Louis Lambot, que utilizou uma malha de barras finas de aço entrelaçadas com barras maiores para utilizar como gabarito de uma canoa. Mas apenas em 1854, com William Boutland Wilkinson que demonstrou conhecimento na utilização destes materiais, empregando barras de aço na parte tracionada de vigas.

Para melhorar as características do concreto armado, ou até para reforçar estruturas que apresentam patologias, está sendo empregado o uso de fibra de carbono juntamente da estrutura. Para Machado (2010) os sistemas compostos com essa tecnologia podem apresentar inúmeras melhorias, como elevada resistência mecânica, aumento de rigidez da estrutura, além de ser mais leve do que estruturas reforçadas por outros métodos.

3.2 Lajes de concreto armado

Lajes são estruturas bidimensionais que possuem sua espessura bem menor em relação às demais direções. As lajes são responsáveis além de possuir o peso próprio, por receber a maioria das cargas atuantes, sejam cargas permanentes ou cargas variáveis, e assim transmitir para as vigas, ou em alguns casos são transmitidas diretamente para o pilar.

3.2.1 Laje maciça

Tipo mais comum de laje, onde toda sua espessura é coberta por concreto, acrescido de armadura de aço o que oferece maior resistência ao sistema. Este tipo de laje fornece a alternativa de ser realizada em concreto armado e também em

concreto protendido. Normalmente moldada no local, onde é feita uma forma, distribuída a armadura de aço e depois realizada a concretagem. Pode ser apoiada em vigas ou diretamente nas paredes, dependendo das solicitações. Permite também a distribuição prévia de demais sistemas dentro da laje, como elétrico, hidráulico, etc.

3.2.2 Laje nervurada

Utilizada para vencer grandes vãos, onde se há necessidade de uma maior espessura de laje. Este motivo inviabiliza a utilização de uma laje maciça, o que resultaria em um elevado peso próprio. São utilizadas nervuras armadas e entre estas nervuras são colocados materiais apenas para enchimento, como formas, isopor, ou outros materiais apenas para ajudar na redução de peso.

3.2.3 Laje treliçada

Desenvolvida para suprir o elevado peso próprio da laje maciça para locais com cargas menores, normalmente utilizada em residências. São pré-moldadas, apresentando armaduras e o responsável pela redução de peso é o material de enchimento, como o bloco cerâmico, este que é colocado entre as treliças. Este tipo de laje apresenta também maior agilidade de execução, visto que tendo os materiais na obra só tem a necessidade de executar a montagem.

3.3 Patologias em lajes

Com o passar dos tempos vieram surgindo no meio da construção civil diversas tecnologias, materiais e utilizações variadas dos já conhecidos materiais empregados. No que se refere a concreto armado não seria diferente, onde se é percebido que estruturas novas comparadas a estruturas mais antigas sofreram uma redução do seu tamanho. Segundo Cánovas (1988) as estruturas desenvolvidas atualmente visam as dimensões mínimas seguras para atender as solicitações em que esta será exigida.

Reduzindo até as dimensões mínimas, além de um projeto mal elaborado, ou um mau uso da estrutura, erros durante a execução, exposição a agentes agressivos e até mesmo na qualidade dos materiais empregados, algum destes fatores pode

acabar gerando patologias nas estruturas. Sejam elas de qualquer forma, para Souza e Ripper (1998) as causas ocorrem nas seguintes etapas:

Tabela 1 - Causas dos Problemas Patológicos em Estruturas de Concreto

Fonte de Pesquisa	Concepção e Projeto	Materiais	Execução	Utilização e outras
Edward Grunau Paulo Helene (1992)	44	18	28	10
D. E. Allen (Canadá) (1979)	55	49		
C.S.T.C. (Bélgica) Verçosa (1991)	46	15	22	17
C.E.B. Boletim 157 (1982)	50	40		10
Faculdade de Engenharia da Fundação Armando Álvares Penteadó Verçosa (1991)	18	6	52	24
B.R.E.A.S. Reino Unido (1972)	58	12	35	11
Bureau Securitas (1972)		88		12
E.N.R. (U.S.A.) (1968 - 1978)	9	6	75	10
S.I.A. (Suíça) (1979)	4		44	10
Dov Kaminetzky (1991)	51	40		16
Jean Blénot (França) (1974)	35		65	
I.È.M.I.T. (Venezuela) (1965 - 1975)	19	5	57	19

Fonte: Projeto e execução de estruturas, cuidados Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto - Vicente C.M Souza e Thomaz Ripper.

Conforme pode ser observado acima, a maioria das patologias surgem antes da estrutura estar curada e pronta para o uso. Para suprir esse problema, devem ser observados alguns itens, como uma correta elaboração de projeto com todos os esforços que a estrutura pode sofrer, a escolha adequada dos materiais que serão utilizados, e principalmente com cuidados extras na execução, respeitando as dimensões mínimas estabelecidas e requisitos de projeto.

Cánovas (1988) alega que as principais causas de patologias ocorrem devido à má escolha, qualidade e uso de seus componentes, erros em seu projeto e deficiências na execução e seu tratamento.

Quando o projeto de engenharia for mal detalhado, a construção for realizada com insuficientes planejamento e controle, os técnicos e operários não forem dotados da qualificação adequada e os prazos de execução forem excessivamente curtos, a estrutura de concreto resultante será quase certamente de má qualidade e irá se deteriorar de modo prematuro, absorvendo gastos de recuperação e de reforço exagerados para ser mantida em condições de uso. Como as estruturas de concreto existentes estão envelhecendo, muitas já estão com dezenas de anos, os problemas de deterioração estão cada vez mais acentuados, exigindo com frequência trabalhos de recuperação e de reforço estrutural e mesmo, em casos mais graves, sua demolição. (SOUZA e RIPPER, 1998)

Porém nem sempre consegue-se evitar com que as patologias ocorram, havendo necessidades de reparar as estruturas danificadas antes de ocorrer a ruptura da mesma. Ou até mesmo há a necessidade de reparar estruturas não danificadas visando a melhoria de sua resistência e rigidez visando melhores resultados durante a fase de operação.

Assunto muito falado hoje em dia é a questão de vida útil ou durabilidade das estruturas de concreto armado, e a melhor maneira de prolongar a durabilidade das estruturas é realizando as manutenções periódicas. Conforme indica a NBR 6118:2014, deve ser elaborado por profissional habilitado um manual contendo requisitos para utilização e manutenção preventiva.

3.4 Tipos de reforço

Segundo Cánovas (1988) as patologias mais frequentes em estruturas de concreto armado são as fissuras ou trincas, a desagregação através da corrosão da armadura, entre outras. Quando se trata de patologias em lajes, estas se devem normalmente à sobrecargas na utilização e mau uso. A fim de eliminar estes danos e devolver a estabilidade da estrutura são necessárias intervenções através de reparos utilizando materiais diversos, cada um com suas vantagens ou desvantagens, seja pelo preço ou devido ao método de execução.

3.4.1 Reforço com resina epóxi

Este tipo de reforço é um dos mais utilizados em reforços de estruturas de concreto armado. Existem diversos tipos de resina que podem ser empregadas, são elas a resina poliéster, acrílica, de poliuretano e epóxi, sendo a última a resina mais utilizada. Dependendo do tipo de dano das estruturas e da necessidade de reforço,

pode-se variar a combinação de epícloridrina e bisfenol para garantir diferentes propriedades.

Porém apenas a resina não garante a aderência ao sistema, o que implica na adição de catalizador para que a resina reaja. Essa mistura de resina e catalizador, chamada formulação epóxi, deve possuir proporções ideais para atingir a necessidade de aplicação. Por possuir diversas propriedades, este reforço pode ser utilizado tanto para reforçar estruturas danificadas, como para proteger estruturas expostas a agentes agressivos.

3.4.2 Reforço com perfis metálicos

Uma das mais antigas técnicas de reforço. Esta que exige diversos cuidados a serem tomados para a utilização, pois o reforço não irá trabalhar nas mesmas condições para as quais a estrutura foi projetada, podendo danificar outros elementos do sistema. Em lajes, este tipo de reforço é utilizado reduzindo os vãos.

3.4.3 Reforço com concreto armado

A principal vantagem na utilização deste método é a economia quando comparado com os demais, visto que os materiais utilizados são de fácil acesso. Compreende na adição de uma camada de concreto armado no local desejado, resultando na desvantagem na utilização desta técnica, consequência das dimensões elevadas após a estrutura estar curada. Porém quando bem executada apresenta resultados superiores aos demais meios de reforço.

3.4.4 Reforço com chapas de aço

Um dos mais recentes métodos, através da colagem de armaduras com resina epóxi, o que resulta em um reforço, rápido, eficaz e econômico. Vantagem de não acrescentar dimensões na estrutura, visto que são utilizadas chapas esbeltas. Assim como no reforço com resinas epóxi, devem ser tomados cuidados na formulação epóxi para atingir os resultados esperados.

3.4.5 Reforço com fibra de carbono

Para Souza e Ripper (1998), a utilização de fibra de carbono como reforço é mais um passo na evolução da indústria da construção civil. Tecnologia importante quando se trata de uma constante busca que visa resultados cada vez melhores. Comparando com outros métodos que aumentavam a seção reforçada das estruturas, seja por concreto projetado, argamassa modificada e até mesmo da adição de chapas de aço.

Possui uma elevada taxa resistência/peso, quando se comparado com o aço, a fibra de carbono chega a ser 5 vezes mais leve com uma resistência a tração cerca de 8 a 10 vezes mais alta. Segundo Garcez (2007) as características de uma estrutura reforçada com fibra de carbono são as seguintes:

- Maior módulo de elasticidade específico e resistência à tração específica entre as fibras utilizadas como reforço;
- Excelente comportamento à fadiga;
- Não são afetados por solventes, ácidos e bases à temperatura ambiente;
- Capazes de manter seu módulo de elasticidade e resistência à tração em elevadas temperaturas. Porém, oxidam e se degradam em altas temperaturas;
- Imune à corrosão;
- Baixo coeficiente de dilatação térmica.

Outro fator importante na utilização deste método é que apresenta uma boa flexibilidade, permitindo seu uso em diferentes formas. Apresenta também fácil aplicação, o que implica na redução de custos e menor tempo com a estrutura inutilizada.

Fibras de carbono são referidas normalmente a fibras de grafite; entretanto somente fibras de carbono de elevado módulo de elasticidade com estrutura de grafite tridimensional podem ser propriamente denominadas fibras de grafite. Em virtude das fibras de carbono possuírem resistência e módulo de resistência extremamente elevado, quando comparados com outros materiais de engenharia, elas são utilizadas predominantemente em aplicações críticas envolvendo peso. A resistência específica e rigidez das fibras de carbono comercialmente disponíveis podem duplicar outras fibras de reforço tais como Kevlar e S-glass da DuPont, e exceder os metais por uma ordem de grandeza. Quando se projeta utilizando-se compósitos de fibras de carbono, a sua resistência e módulo de elasticidade podem ser orientados de modo otimizado para minimizar o peso final. Além da resistência e rigidez, as fibras de carbono possuem excelente resistência à fadiga, características de amortecimento de vibrações, resistência térmica, e estabilidade dimensional.

As fibras de carbono possuem também boa resistência elétrica e térmica e são quimicamente inertes, exceto quanto à oxidação. (WIEDECK e HARADA, 2005)

Devido à oxidação e desagregação em elevadas temperaturas, é interessante que seja feito um revestimento de alto desempenho a fogo, melhorando assim o comportamento das estruturas na resistência ao fogo.

Machado (2010) salienta que os sistemas de reforço utilizando fibra de carbono, são constituídos por dois elementos:

- A matriz polimérica, que tem a função de manter as fibras coesas, transferindo as tensões de cisalhamento entre o concreto e fibra de carbono.
- O elemento estrutural, que são as fibras de carbono. As fibras absorvem as tensões de tração decorrentes dos esforços solicitantes atuantes.

3.5 Fibra de carbono

A fibra de carbono é uma tecnologia já conhecida e muito utilizada na indústria aeronáutica, automobilística e naval, devido a suas excelentes propriedades mecânicas e baixa densidade. Esta pode ser encontrada através de tecido ou manta. O tecido pode ser com fibras unidirecionais ou fibras bidirecionais, enquanto a manta possui fibras curtas e em direções aleatórias.

Tabela 2 - Densidade Típica de materiais PRF (g/cm³)

Aço	PRFV	PRFC	PRFA
7,9	1,2 a 2,1	1,5 a 1,6	1,2 a 1,5

Fonte: ACI 440.2R-02. Adaptado pelo autor

Tabela 3 - Coeficiente de expansão térmica típica de materiais PRF

Direção	Coeficiente de expansão térmica (x10 ⁻⁶ /°C)		
	PRFV	PRFC	PRFA
Longitudinal (α_L)	6 a 10	-1 a 0	-6 a -2
Transversal (α_T)	19 a 23	22 a 50	60 a 80

Fonte: ACI 440.2R-02. Adaptado pelo autor

Esta distribuição nas fibras resulta em um material com características anisotrópicas, possuindo maior resistência no sentido da fibra e menor em sentidos diferentes. Atualmente possui um custo de fabricação bem menor quando comparado ao preço de alguns anos atrás, o que resulta em uma maior utilização desta tecnologia e permite uma elevada relação performance/custo.

Segundo Wiebeck e Harada (2005), as fibras são representadas por precursores, sendo eles o PAN (poliacrilonitrila), piche, ou raíom, e são classificadas de acordo com sua resistência e seu módulo de elasticidade:

Tabela 4 - Características Mecânicas das Fibras de Carbono

Propriedades	Fibra de Carbono Uso Geral	Fibra de Carbono Alto Módulo	Fibra de Carbono Nova Geração
Diâmetro μm	7	6	5,3
Densidade g/m^3	1,76	1,9	1,82
Módulo de Elasticidade Mpa	3,5	2,3	7
Resistência à Tração Gpa	235	490	294

Fonte: Plásticos de Engenharia – Tecnologia e Aplicações. Hélio Wiebeck e Júlio Harada – 2005

3.6 Matriz polimérica

As matrizes utilizadas em reforço são as resinas poliméricas. As resinas podem ser termorrígidas ou termoplásticas, e sua escolha depende do objetivo do reforço, sendo que as propriedades empregadas dependem do tipo de resina escolhido. Souza e Ripper (1998) contam que a resina utilizada deve possuir resistência e dureza capazes de transferir o esforço do concreto para a fibra de carbono, e possuir também elasticidade para não romper facilmente. Também deve ser observada a quantidade de resina a ser empregada, para que não altere as características do compósito, e também que conforme a relação de resina aumenta, conseqüentemente aumenta o peso e diminui a resistência do reforço.

3.7 Processos de execução

O processo de execução dos reparos deve seguir duas macro etapas, a primeira de preparação da superfície facilitando a aplicação e tornando a aplicação do

substrato da melhor maneira, e a segunda a aplicação do reforço em si. A estrutura que receberá o reforço deverá estar sã e íntegra, dispondo de resistência mecânica suficiente para que os esforços se transmitam entre a estrutura de concreto armado e a matriz/fibra de carbono.

Para garantir a aderência do sistema, a estrutura deve ter suas trincas e fissuras recuperadas, podendo utilizar qualquer método de recuperação. A superfície que o sistema irá ser aderido deverá estar totalmente limpa, não possuindo poeira, óleos, argamassa, pinturas, etc., permitindo também a utilização de qualquer método para que se possa realizar a execução da limpeza. Bem como nas estruturas em que se necessita o reforço em mais de uma face, os cantos devem ser arredondados para evitar vazios no sistema e também para evitar a concentração de tensões.

Segundo o manual elaborado por Machado (2010), a execução do sistema de reforço estrutural com fibra de carbono deve seguir os seguintes passos:

1. Aplicação do imprimador primário: Os imprimadores primários têm como objetivo penetrar nos poros do concreto, colmatando-os para que, juntamente com a película aderida à superfície do concreto, seja estabelecida uma ponte de aderência eficiente, sobre a qual será instalado o sistema.
2. Aplicação do regularizador de superfície: As massas regularizadoras de superfície são utilizadas para a calafetação e/ou regularização das superfícies de concreto onde serão aplicados os sistemas, garantindo o estabelecimento de uma superfície desempenada contínua. Quanto maior a irregularidade superficial maior será o consumo desse material.
3. Corte e imprimação das fibras de carbono: As lâminas de fibra de carbono serão previamente cortadas em bancadas especialmente montadas para o corte. São utilizados para o corte uma régua metálica, tesoura de aço (para o corte transversal) e faca de corte ou estilete (para o corte longitudinal). Após o corte as lâminas de fibras de carbono deverão ser aderidas às peças a serem reforçadas. Existem duas maneiras distintas para se executar esse procedimento:
 - a) Saturação via úmida: Nessa alternativa a lâmina de fibra de carbono é saturada em bancada própria, sendo depois transportada para a sua aplicação na peça a ser reforçada.
 - b) Saturação via seca: Nessa alternativa a saturação é feita diretamente sobre o concreto da peça a ser reforçada para em seguida ser colada a lâmina de fibra de

carbono. Existem duas correntes distintas com relação ao procedimento de saturação. A primeira corrente advoga que a saturação da lâmina na bancada conduz a uma condição de trabalhabilidade e economia de resina maior que a corrente que advoga a saturação diretamente na peça de concreto a ser reforçada.

4. Ferramentas utilizadas para a aplicação: O ferramental para a aplicação das fibras de carbono é bastante comum, onde são vistos rolos de espuma para espalhar tanto os imprimantes como os saturantes e rolos metálicos que servem para promover o alinhamento das fibras e a rolagem das bolhas de ar que possam estar aprisionadas dentro do sistema composto.
5. Aplicação da lâmina de fibra de carbono: A colocação da lâmina de fibra de carbono, independentemente do tipo de imprimação utilizado, deve ser imediata, uma vez que o tempo de aplicação da resina saturante (pot-life) é muito curto, no máximo 25 a 30 minutos. Dentro desse intervalo de tempo ainda é possível se fazer ajustes de alinhamento e prumo das lâminas de fibra de carbono para o seu correto posicionamento. Para que a lâmina de fibra de carbono fique perfeitamente aderida ao substrato de concreto é executado imediatamente à colocação da mesma um procedimento para a eliminação das bolhas de ar que tenham ficado aprisionadas na interface desses dois elementos. Esse procedimento é denominado de “rolagem das bolhas de ar” e é feito com a utilização de pequenos roletes de aço denteados que “empurram” as bolhas de ar até a extremidade das lâminas, onde finalmente são eliminadas.
6. Segunda camada de saturação: Terminado o posicionamento da lâmina de fibra de carbono é feita a segunda saturação, por sobre a lâmina instalada, de modo a garantir que a fibra de carbono esteja totalmente imersa (encapsulada). Normalmente se espera cerca de 30 minutos para essa segunda operação de saturação. Variações de tempo podem ocorrer conforme o sistema composto adotado.

Caso seja necessário aplicar mais de uma camada de fibra de carbono, deve-se repetir os últimos passos até atingir o número de camadas necessárias. Importante lembrar que cada camada de fibra exige duas imprimações, não podendo a última imprimação ser utilizada para colocação da próxima, respeitando o tempo mínimo para aplicação.

Outro importante fator a ser mencionado é o revestimento do sistema, que permite que sejam aplicados acabamentos com fins estéticos, e também revestimentos para proteger o sistema de agressões ambientais, físicas e mecânicas.

3.8 Cálculo do reforço com fibra de carbono

Sequência de cálculos sugerida por Machado (2010), referenciada pela norma ACI 440.2R-02 e adaptada pelo autor, conforme será definido neste item.

3.8.1 Limites de resistência dos reforços com CFC

Segunda ACI 440.2R-02 (item 8.2) a estrutura a ser reforçada deve ter resistência suficiente para o seguinte nível de carregamento:

$$(\phi R_n)_{existente} \geq (1,2 \cdot S_{DL} + 0,85 \cdot S_{LL})_{novo} \quad (\text{eq. 01})$$

Onde,

ϕ - fator de redução da resistência

R_n – resistência nominal do elemento (membro)

S_{DL} – ações da carga permanente e de longa duração

S_{LL} – ações da carga acidental ou de curta duração

Para viabilizar estruturas reforçadas com sistema composto sob a ação de altas temperaturas deve satisfazer a seguinte equação:

$$(R_{n\phi})_{existente} \geq S_{DL} + S_{LL} \quad (\text{eq. 02})$$

Os efeitos dos carregamentos devem seguir as recomendações das normas estruturais, e também pelo período de tempo especificado pela categoria do fogo.

Tabela 5 - Fator de redução ambiental para vários sistemas PRF e condições de exposição

Condições de exposição	Fibra e tipo de resina	Fator de redução ambiental C_e
Exposição interior	Carbono/epoxy	0,95
	Vidro/epoxy	0,75
	Aramida/epoxy	0,85
Exposição exterior	Carbono/epoxy	0,85
	Vidro/epoxy	0,65
	Aramida/epoxy	0,75
Ambientes agressivos	Carbono/epoxy	0,85
	Vidro/epoxy	0,50
	Aramida/epoxy	0,70

Fonte: ACI 440.2R-02. Adaptado pelo autor

3.8.2 Dimensionamento do reforço à flexão com fibras de carbono

Como o reforço utilizando fibra de carbono é aderido nas faces superior ou inferior das peças, ele é considerado um sistema de reforço externo. Para calcular a resistência à flexão, alguns conceitos básicos e definições devem ser estabelecidos:

- O estudo e cálculo deve ser efetuado utilizando como base as dimensões, resistência, armadura e características mecânicas do elemento a ser reforçado.
- Prevalecem os critérios de Bernoulli, que diz que as seções planas permanecem planas após o carregamento e as deformações são lineares em relação a linha neutra.
- A resistência à tração do concreto é desprezada.
- A deformação do concreto não deve ser maior do que 3% segundo as recomendações da ACI, ou 3,5% se dimensionado segundo a ABNT.
- A aderência do sistema de CFC com o concreto deve ser perfeita.
- A deformação é considerada linear até a ruptura no sistema composto CFC.

Para se conhecer o nível de tensão a qual o reforço será submetido é necessário o conhecimento das tensões na superfície da estrutura, conseqüentemente conhecendo-se a deformação na qual a fibra será aderida. Para que se possa estabelecer o nível de tensão com a qual o reforço efetivamente trabalhará, é preciso descontar a deformação pré-existente da deformação final. Sendo fundamental conhecer a deformação máxima permissível, conforme fórmula abaixo:

$$\varepsilon_{fc} = (\varepsilon_b - \varepsilon_{bi}) \leq \varepsilon_{fu} \quad (\text{eq. 03})$$

Onde,

ε_b – deformação na fibra considerada no reforço para o carregamento máximo

ε_{bi} – deformação pré-existente quando da instalação do reforço de fibra de carbono

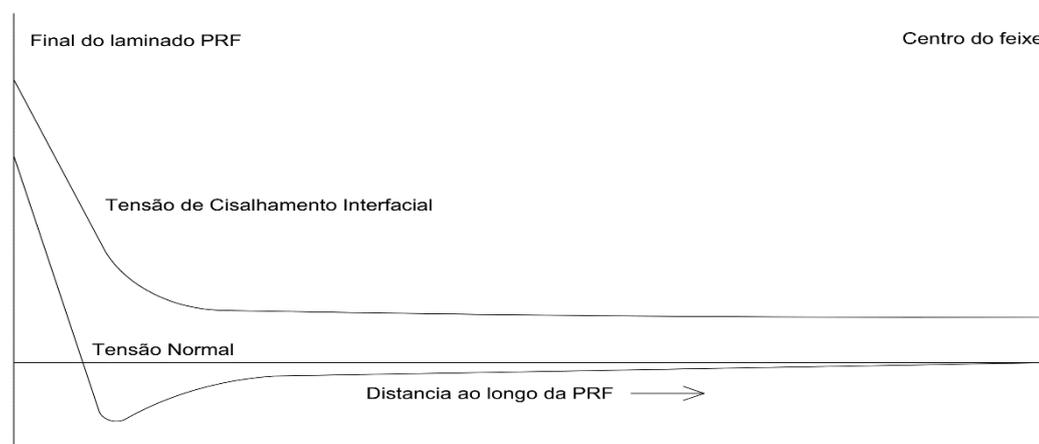
O ACI Committee 440 (9.2) recomenda que o reforço seja feito no estado limite último. Os critérios de dimensionamento no estado limite último estabelecem que a capacidade resistente à flexão deve exceder a demanda estrutural. A análise para o estado limite último calcula as capacidades resistentes de todos materiais constituintes na ruptura. As rupturas podem ocorrer de 4 maneiras distintas:

- 1- Ruptura por escoamento do aço antes do esmagamento do concreto.
- 2- Ruptura por escoamento do aço antes da ruptura do sistema CFC.
- 3- Ruptura por esmagamento o concreto antes da ruptura por escoamento do aço.
- 4- Ruptura do sistema compósito CFC antes da ruptura por escoamento do aço.

Os modos de ruptura 1 e 2 caracterizam um comportamento dúctil da estrutura, o que é desejado. Já os modos 3 e 4 caracterizam um comportamento frágil, sendo menos desejável do que quando ocorre primeiramente a ruptura por escoamento do aço.

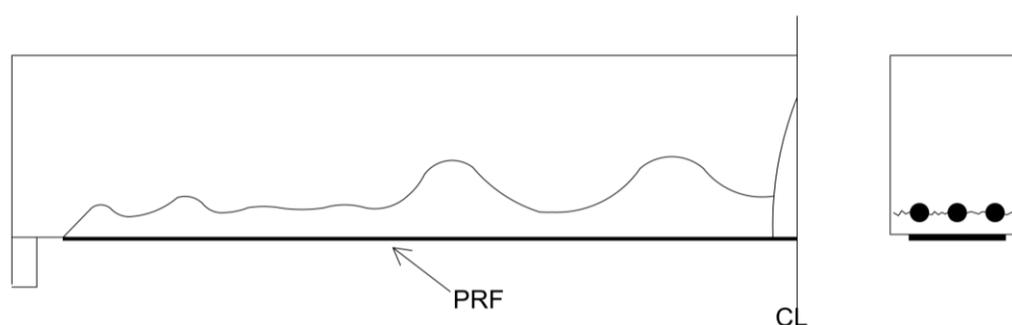
Se o controle da ruptura ocorre pelo esmagamento do concreto, pode-se utilizar sem alterações o bloco de tensões proposto por Whitney, com profundidade de $0,85c$ para concretos de até 27,5MPa (4.000psi) (ACI 318 – item 10.2.7.1). Quando exceder, o valor de β_1 deve ser diminuído de 0,05 para cada 6,9MPa (1.000psi) de crescimento de resistência, nunca podendo ser menor do que 0,65.

Figura 1- Cisalhamento interfacial e tensão normal conceitual distribuídos ao longo de um laminado PRF



Fonte: Roberts e Haji-Kazemi 1989;. Malek et al 1998 apud ACI 440.2R-02. Adaptado pelo autor

Figura 2 - Delaminação causada por falha da tensão de cobertura de concreto



Fonte: ACI 440.2R-02. Adaptado pelo Autor

Caso o controle da ruptura for determinado pela delaminação do cobrimento do concreto ou pelo sistema composto o bloco de tensões de compressão de Whitney fornece resultados mais exatos utilizando o valor de α_1 , obtido pela equação abaixo:

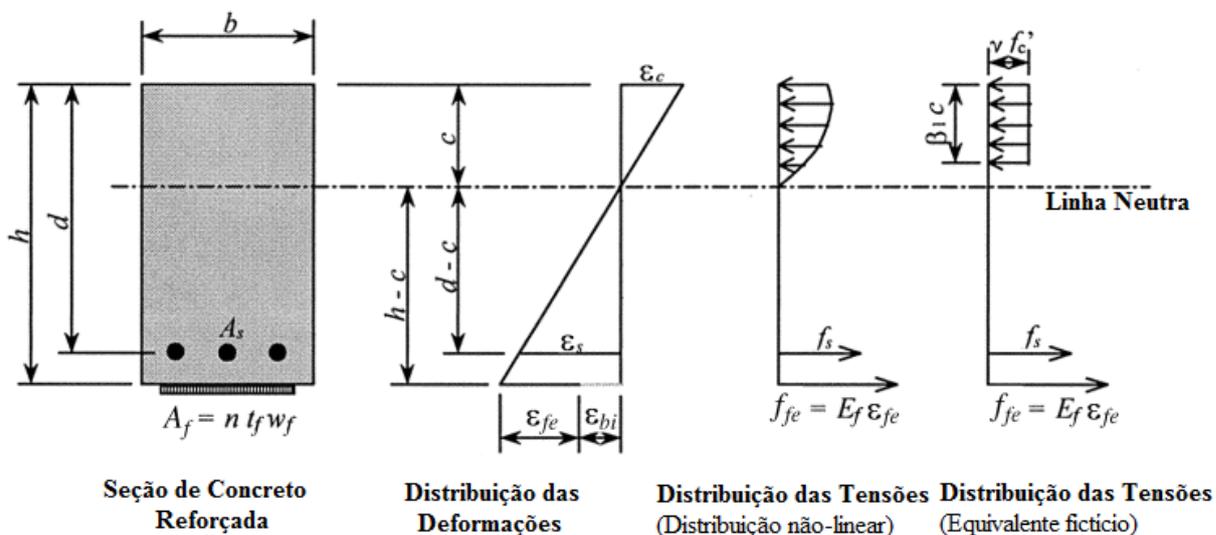
$$\alpha_1 = \frac{3 \cdot \varepsilon'_c \cdot \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3(\varepsilon'_c)^2 \cdot \gamma_1} \quad (\text{eq. 04})$$

Onde,

$$\varepsilon'_c = 1,71 \frac{f'_c}{E_c} \quad (\text{eq. 05})$$

$$\gamma_1 = \frac{4 \cdot \varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6 \cdot \varepsilon_c'^2 - 2 \cdot \varepsilon_c} \quad (\text{eq. 06})$$

Figura 3 - Tensão interna e distribuição de tensões para uma seção retangular sob flexão



Fonte: ACI 440.2R-02. Adaptado pelo autor.

Pode acontecer também uma falha prematura na interface do concreto com o sistema composto, porém este tipo de falha pode ser evitado através de um detalhamento do sistema composto utilizado. Para realizar o cálculo do reforço devem ser efetuadas as seguintes verificações:

- Determinar o momento fletor majorado (do reforço) máximo $M_{maj,máx}$.
- Determinar o momento resistente a flexão da estrutura a partir da geometria e características mecânicas dos materiais constituintes $M_{resist.}$.
- Comparar $M_{maj,máx}$ com $M_{resist.}$. Se $M_{maj,máx} > M_{resist.}$ a viga não necessitará reforço à flexão. Caso $M_{resist.} > M_{maj,máx}$ a viga necessitará reforço.

Conhecido o regime no qual será dimensionado o reforço com fibras de carbono o procedimento é o seguinte:

- 1- Arbitra-se a profundidade da linha neutra.
- 2- Calculam-se as deformações dos diversos materiais.
- 3- Conhecidas as deformações calculam-se as tensões atuantes nos diversos materiais.
- 4- Verifica-se o equilíbrio das forças. Se o momento resistente encontrado no sistema reforçado for maior que o momento solicitante máximo $M_{maj,máx}$ o processo está completo.

O procedimento é iterativo, uma vez que a primeira etapa, que determina o resultado final, é arbitrada, deve ser repetida tantas vezes for necessária para atender

boas condições de resistência e economia. Uma vez concluído o processo faz-se a verificação da dutibilidade do sistema.

3.8.3 Determinação do momento resistente do reforço

O momento resistente de uma estrutura de concreto armado reforçada com fibra de carbono é constituído dos seguintes esforços:

F_c – resultante da seção comprimida do concreto

F'_s – resultante da seção comprimida da armadura

F_s – resultante da seção tracionada da armadura

F_f – resultante da seção tracionada de fibra de carbono

A capacidade resistente ao momento fletor pode ser expressa na seguinte equação:

$$M_n = A_s \cdot A_f \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + A_s' \cdot f_s' \left(\frac{\beta_1 \cdot c}{2} - d' \right) \quad (\text{eq. 07})$$

sendo,

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s < f_y \quad (\text{eq. 08})$$

$$f_s' = E_s \cdot \varepsilon_s' < f_y \quad (\text{eq. 09})$$

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{c,f} \leq E_f \varepsilon_{fe} \quad (\text{eq. 10})$$

ψ – coeficiente adicional de redução com valor 0,85.

$$F_s = A_s \cdot f_s \quad (\text{eq. 11})$$

$$F_s' = A_s' \cdot f_s' \quad (\text{eq. 12})$$

$$F_f = A_f \cdot f_{fe} \quad (\text{eq. 13})$$

$$F_c = \alpha_1 \cdot f_c' \cdot \beta_1 \cdot c \quad (\text{eq. 14})$$

A expressão pode ser reescrita assim:

$$M_n = F_s \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \psi_f \cdot F_f \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + F_s' \left(\frac{\beta_1 \cdot c}{2} - d' \right) \quad (\text{eq. 15})$$

Caso não haja armadura para compressão a expressão pode ser simplificada para:

$$M_n = A_s \cdot f_s \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \quad (\text{eq. 16})$$

Ou ainda,

$$M_n = F_s \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \psi_f \cdot F_f \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \quad (\text{eq. 17})$$

Considerando que:

$$F_f = A_f \cdot f_{fe} \quad (\text{eq. 18})$$

$$f_{fe} = \varepsilon_f \cdot E_f = (\varepsilon_b - \varepsilon_{bi}) E_f \quad (\text{eq. 19})$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_c \left(\frac{h-c}{c} \right) \quad (\text{eq. 20})$$

$$f_{fe} = \left[\varepsilon_c \left(\frac{h-c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \right] E_f \quad (\text{eq. 21})$$

$$F_f = A_f \cdot E_f \left[\varepsilon_c \left(\frac{h-c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \right] \quad (\text{eq. 22})$$

O equilíbrio das forças é calculado através das tensões dos materiais constituintes. Assim, o equilíbrio interno das forças somente é satisfeito se obedecida a seguinte expressão:

$$c = \frac{F_s + F_f}{F_c + F_s'} \quad (\text{eq. 23})$$

Ou seja,

A profundidade da linha neutra é encontrada ao satisfazer a equação 22 através da equação 23, estabelecendo-se assim o equilíbrio de forças e a compatibilidade das deformações.

3.8.4 Deformação máxima que pode ser admitida em um reforço à flexão com fibras de carbono em função do número de camadas para prevenir a delaminação do cobrimento ou descolamento do sistema composto

Quando os esforços atuantes nas fibras não puderem ser absorvidos pelo concreto pode ocorrer a delaminação ou o descolamento do sistema. Para prevenir este fato deve-se introduzir uma limitação ao nível de deformação do sistema. As equações abaixo (ACI Committee 440 – item 9.2.1) determinam o coeficiente (k_m), estabelecido em função da cola:

$$k_m = \frac{1}{60\xi f_{cu}} \left(1 - \frac{n E_{fc} t_{fc}}{360.000} \right) \leq 0,90 \quad \text{para,} \quad n \cdot E_{fc} \cdot t_{fc} \leq 180.000 \quad (\text{eq. 24})$$

$$k_m = \frac{1}{60\xi f_{cu}} \left(\frac{90}{n \cdot E_{fc} \cdot t_{fc}} \right) \leq 0,90 \quad \text{para,} \quad n \cdot E_{fc} \cdot t_{fc} > 180.000 \quad (\text{eq. 25})$$

Onde,

n – nº de camadas do reforço com CFC

E_{fc} – módulo de elasticidade do CFC (MPa)

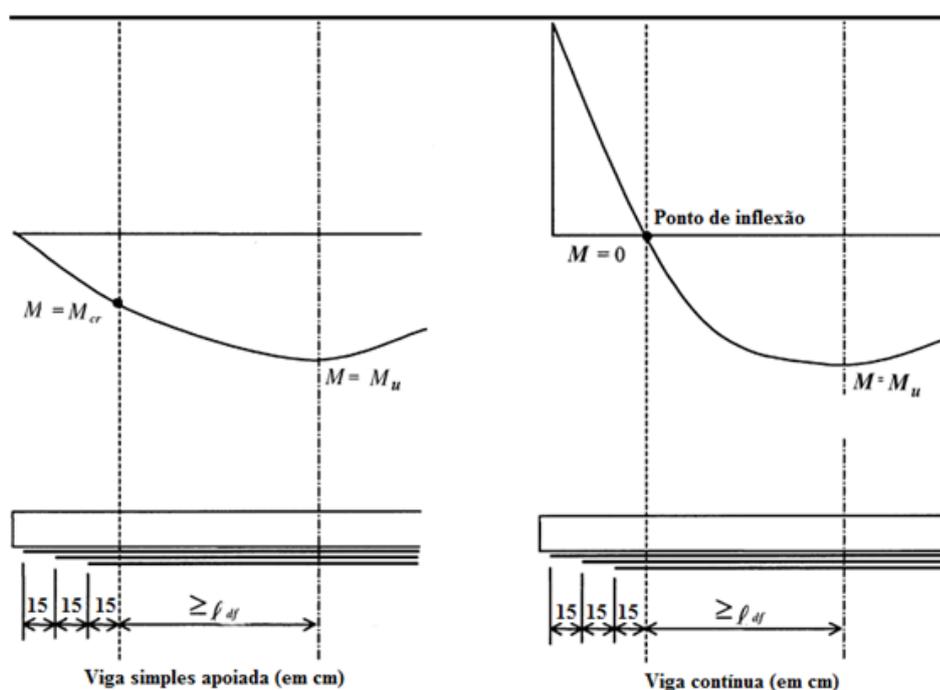
t_{fc} – espessura de uma camada do sistema (mm)

ξf_{cu} – deformação de ruptura do reforço com CFC (mm/mm)

Multiplicação o coeficiente (k_m) pela deformação de ruptura, definindo assim a limitação de deformação para que não haja o descolamento do sistema CFC.

O número de camadas (n) é o número de lâminas de reforço à flexão onde a resistência ao momento fletor esteja sendo considerado. Quanto maior for a espessura dos laminados, mais disposição estes têm à delaminação. Portanto, conforme a espessura aumenta mais rigorosas devem ser as deformações máximas admissíveis. Para os laminados com $n \cdot E_{fc} \cdot t_{fc} > 180.000 \text{N/mm}$ o coeficiente (k_m) limita a força a ser desenvolvida em oposição a deformação. O coeficiente (k_m) é baseado em tendências observadas em projetos com sistemas compósitos externos, enquanto não ocorrem novos estudos mais elaborados, a ACI recomenda a utilização das expressões acima (24 e 25).

Figura 4 - Detalhamento construtivo para laminados com três camadas



Fonte: ACI 440.2R-02. Adaptado pelo autor

3.8.5 Verificação da dutibilidade

Quando se utiliza este tipo de sistema para aumentar a resistência à flexão acaba gerando também uma redução da dutibilidade original da estrutura. Normalmente esta perda é desprezível, porém é extremamente necessário conhecer

este valor para não acabar provocando uma perda significativa nas peças reforçadas. Para se obter um grau suficiente de dutibilidade é preciso verificar o nível de deformação do aço no estado limite último. Segundo a ACI 318 (capítulo 2) um valor adequado pode ser conseguido se a deformação do aço ao nível do esmagamento do concreto ou ruptura do sistema composto seja de pelo menos 0,005.

Maiores valores são obtidos quando se aplica um fator de redução na resistência do aço, sendo 0,70 para seções frágeis e 0,90 para seções dúcteis:

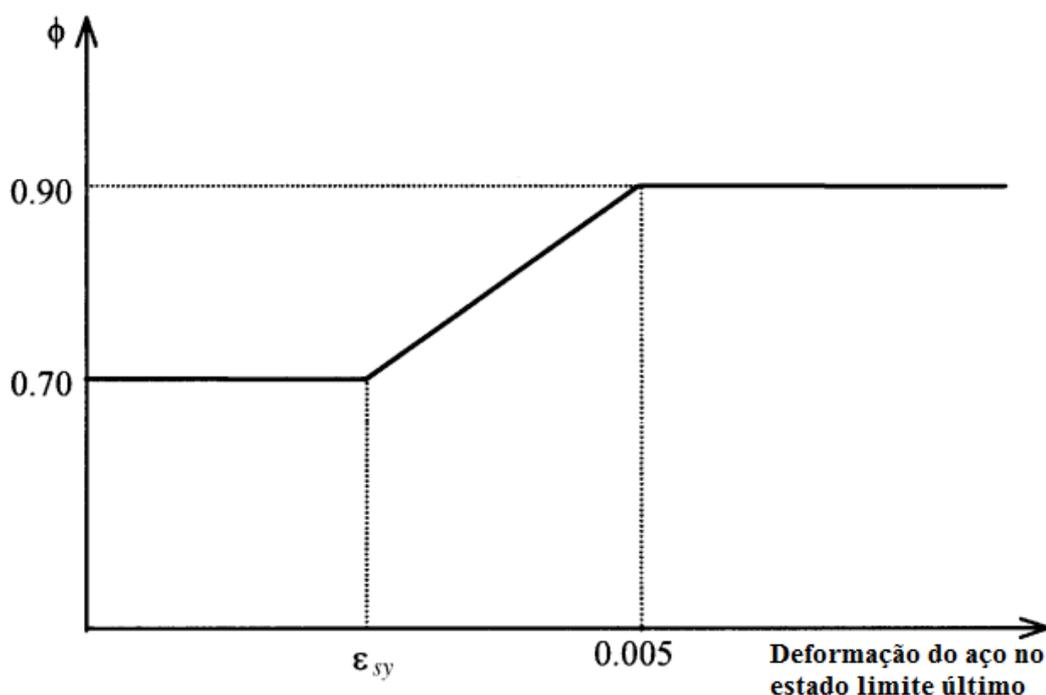
$$\phi = 0,90 \quad \text{para } \xi_s \geq 0,005 \quad (\text{eq. 26})$$

$$\phi = 0,70 + \frac{0,20(\xi_s - \xi_{sy})}{0,005 - \xi_{sy}} \quad \text{para } \xi_{sy} < \xi_s < 0,005 \quad (\text{eq. 27})$$

$$\phi = 0,70 \quad \text{para } \xi_s \leq \xi_{sy} \quad (\text{eq. 28})$$

Onde (ξ_{sy}) é a deformação de escoamento do aço.

Figura 5 - Representação gráfica do fator de redução de resistência em função da dutibilidade



Fonte: ACI 440.2R-02. Adaptado pelo autor.

3.8.6 Tensões limites para a ruptura por fluência e fadiga

Os materiais do reforço quando submetidos por carregamentos constantes de longa duração podem falhar. Conhecido como ruptura por fluência e semelhante a fadiga, porém são longos períodos de tempo e não cíclicos. A durabilidade de

estruturas à fluência diminui quando esta é exposta a condições ambientais adversas, como elevadas temperaturas, ciclos de umedecimento e secagem, congelamento e descongelamento, etc.

Geralmente são pouco suscetíveis à ruptura por fluência, alguns experimentos indicam que a relação entre a resistência e tempo é linear, em todos os níveis de carregamento. Segundo a ACI Committee (item 3.4.1) a relação entre a resistência inicial até cerca de 50 anos é de 0,91. As fibras também são pouco sensíveis a carregamentos que podem gerar falhas por fadiga, e são pouco afetadas pelo meio ambiente, exceto casos em que a resina ou a interface fibra/resina seja degradada.

Para evitar rupturas por fluência deve haver a verificação durante a elaboração do projeto, fazendo com que os níveis de tensão permaneçam dentro do limite elástico. A ACI Committee (item 9.5.1) sugere que se estabeleça o nível de tensão atuante a partir da seguinte equação:

$$f_{fc,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_{fc}}{E_s} \right) \frac{h-kd}{d-kd} - \xi_{bi} \cdot E_{fc} \quad (\text{eq. 29})$$

Essa equação fornece um nível de tensão através de um momento (M_s), porém as tensões de longa duração devem ser limitadas pela equação abaixo para garantir um coeficiente de segurança adequado.

$$F_{fc,s} \geq f_{fc,s} \quad (\text{eq. 31})$$

A ACI 440 Committee (tabela 9.1) sugere que a tensão limite para fluência seja:

$$F_{fc,s} = 0,55 f_{fcu} \quad (\text{eq. 32})$$

Para estruturas sujeitas a fadiga, deve-se utilizar a equação 32, sendo o momento (M_s), igual ao de todas as cargas de longa duração acrescido do carregamento que gera fadiga.

3.9 Pesquisas

Para Brik, Moreira e Krüger (2013) o reparo a ser utilizado depende da patologia que a estrutura sofre, sendo denominadas serviços de intervenção e deve-se levar em conta alguns aspectos, como a qualidade final, aspecto estético, aderência da peça com o reforço e a resistência do concreto. Ressalta-se também a importância do processo executivo realizado de maneira correta, permitindo assim as características de resistência e segurança da estrutura, além de avaliar o custo do processo.

Dentre os métodos para reparar ou reforçar estruturas de concreto armado, tem-se o reforço utilizando fibras de carbono, estes que possuem diversas aplicações, como o uso pós-tensão ou durante a construção de pontes, viadutos e passarelas (Carneiro e Teixeira, 2009). Salientam que a escolha do método varia de acordo com os danos, disponibilidade de material e viabilidade técnico-econômica. São aplicados em lajes, vigas e pilares de concreto, o que leva a diversos estudos sobre a aplicação de reparos nessas estruturas. Alguns estudos já levam a utilização em alvenarias, silos e estruturas sujeitas a abalos sísmicos.

Os sistemas de reparo compósitos utilizando fibras de carbono e resina podem ser pré-fabricados ou curados *in situ*, variando a execução do processo e espessura final da estrutura. Ainda para obter-se melhores resultados existe a possibilidade de alterações em alguns dos processos, como aplicar uma pré-tração na fibra, pré-moldagem do reforço, colagem do reforço em sulcos, impregnação a vácuo, dentre outros.

Quando se faz a opção por recuperar uma estrutura de concreto, deve-se procurar empregar técnicas e materiais que proporcionem as propriedades mecânicas desejadas e o maior período de vida útil possível. Por esse motivo, o uso do concreto reforçado com fibras tem se mostrado uma alternativa interessante. (SILVA e ALBUQUERQUE, 2014)

Silva e Albuquerque (2014) contam que as estruturas reparadas apresentam deformações menores para um mesmo nível de carregamento. Quando se comparado a estruturas sem reforço, percebe-se um aumento na resistência à flexão, diminuição do deslocamento e uma diminuição da quantidade e abertura das fissuras.

Segundo Ferrari, Padaratz e Loriggio (2002) apesar da utilização de PRFC ser considerada recente, vem sendo comprovada através de estudos experimentais. Chegando a resultados onde na maioria das vezes a ruína prematura ocorre por delaminação entre o substrato e o reforço, sendo extremamente indesejável por não conseguir mensurar o momento exato, antecipando o colapso da estrutura reforçada. O que resultou em mais estudos focados na zona de ligação dos dois elementos, inclusive o foco do trabalho elaborado pelos autores que seria mecanismos de incremento de ancoragem.

Tomaz, Soares e Barbosa (2014) salientam que o PRFC possui propriedades mecânicas melhores que o aço, além da facilidade e velocidade de execução, possui menor peso, boa trabalhabilidade e resistência a corrosão. E é utilizado para reforçar ou reabilitar estruturas que possuem determinadas patologias, devendo ser utilizados

em elementos em boas condições estruturais permitindo aumentar as cargas solicitantes. Em vigas e lajes o maior cuidado deve ser tomado durante a análise das tensões de deslizamento na interface do concreto com o reforço.

Para desenvolver o estudo Tomaz, Soares e Barbosa (2014) coletaram informações e especificações de projeto, como espessura da laje, dimensões, concreto e aço utilizados, em uma estrutura que apresentou flechas maiores que os limites estabelecidos na NBR 6118:2014. Não sabendo informar em qual etapa ocorreram descuidos que resultaram nas patologias, detalharam o processo executivo de reforço utilizando fibra de carbono na face inferior da laje.

Para executar o reforço, foi determinada a utilização de 5 faixas de fibra de carbono Viapol CFW300 com 15cm de largura e 5m de comprimento, distribuídas a cada 50cm. O processo executivo ocorreu conforme o já mencionado no item 4.7 - Processo de Execução do presente trabalho, realizando desde a regularização da superfície até a aplicação da última cama de resina. Como resultados perceberam que além de ser cerca de 40% a 50% mais cara que outros métodos, permitiu uma rápida e fácil execução, resultando em grande capacidade resistente e não alterando a altura do pé direito, sendo o fator mais importante por se tratar de uma garagem. Outro ponto que influenciou a escolha foi o baixo peso apresentado pelo reforço, não necessitando considerá-lo no peso próprio.

4 METODOLOGIA

Este trabalho trata-se de um estudo teórico e experimental, onde as lajes maciças de concreto armado reforçadas com fibra de carbono serão comparadas entre o modelo de cálculo e o resultado das análises experimentais.

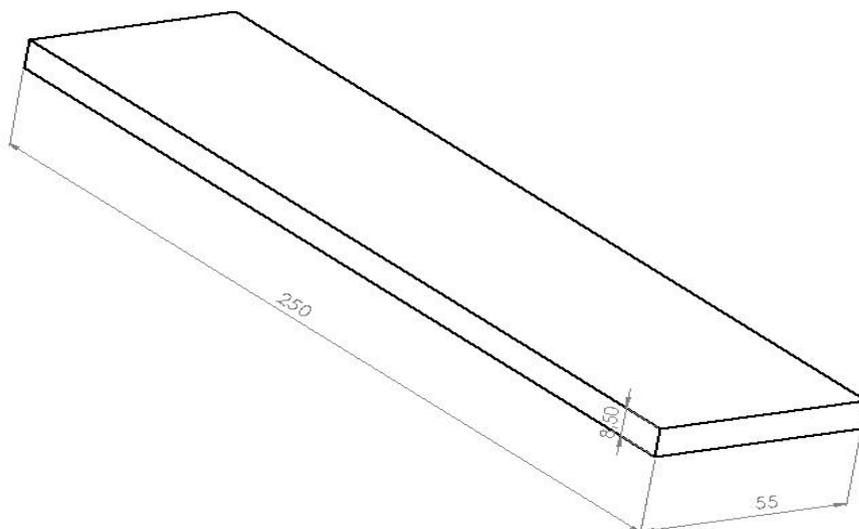
Para as análises experimentais foram moldados protótipos de lajes maciças e reforçadas com fibra de carbono, para após serem ensaiadas à flexão em laboratório. O ensaio seguiu os seguintes aspectos, lajes biapoiadas nas extremidades com 2 pontos de aplicação de mesma carga. O vão entre apoios foi de 240 cm, este dividido em 3 partes iguais ficando 80cm de vão entre as cargas aplicadas.

Os protótipos seguiram as especificações da NBR 6118:2014 e o reforço da ACI 440R, onde foram observados o momento resistente e o modo de falha das lajes.

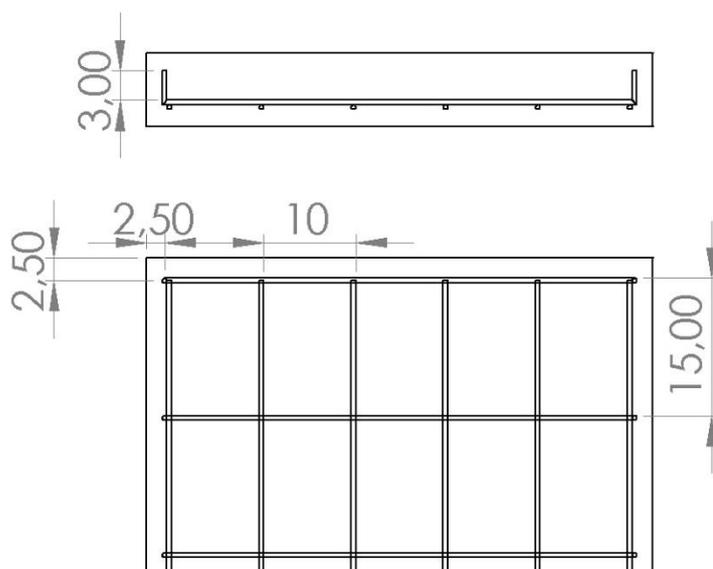
4.1 Definição dos protótipos

Para a comparação dos resultados quanto a resistência à flexão, foi moldada uma laje testemunho com as mesmas características, porém sem execução do reforço. Foram moldadas outras 3 lajes de mesmas dimensões com adição de uma faixa de 25cm de fibra de carbono como reforço em todo o comprimento das lajes.

Os protótipos de lajes foram executados com as mesmas dimensões, sendo 250cm de comprimento, 55cm de largura e 8,5cm de espessura. Quanto à área de aço, foram utilizadas barras de aço CA-60 com diâmetro 5mm espaçadas a cada 10cm longitudinalmente, resultando em uma área de aço (A_s) de 0,9817cm². E armadura de distribuição também de diâmetro 5mm a cada 15cm com dobras de 3cm nas extremidades.

Figura 6 - Dimensões laje experimental

Fonte: Autor (2017)

Figura 7 - Detalhamento armadura

Fonte: Autor (2017)

4.2 Caracterização dos materiais utilizados

Cimento CP V-ARI: aglomerante hidráulico de alta resistência inicial, designado pela NBR 5733:1991. É obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual é adicionada a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio.

Areia média natural: agregado miúdo classificado pela NBR 7211:2009, no qual os grãos passam pela peneira ABNT 4,75mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,15mm.

Brita 1: agregado graúdo classificado pela NBR 7211:2009, no qual os grãos passam pela peneira ABNT 19,00mm e ficam retidos na peneira ABNT 9,50mm.

4.2.1 Concreto

Após a definição do traço partiu-se para a execução da concretagem. O traço escolhido, inicialmente possuía fator a/c era de 0,57, visto que dependia do valor do slump test para liberação do concreto, este que era de 140 ± 20 mm. Resultando no fator a/c médio utilizado de 0,5.

Tabela 6 - Traço de concreto utilizado

Traço de concreto	
1: 2,5: 3,33: 0,5l	
Slump test 140 ± 20 mm	
Cimento	24kg
Areia	60kg
Brita	80kg
Água	12l

Fonte: Autor (2017)

Retiraram-se 3 corpos de prova cilíndricos para cada traço utilizado, com dimensões de altura igual ao dobro do diâmetro, possuindo diâmetro 10cm e altura 20cm (NBR 5738:2015).

Figura 8 - Ensaio à compressão do concreto



Fonte: Autor (2017)

Tabela 7 - Resistência à compressão das amostras

CP	fc (MPa)	Betonada	fcm (MPa)
1	34,65	1	36,04
2	37,38		
3	36,09		
4	36,69	2	36,30
5	36,23		
6	35,98		
7	37,33	3	37,49
8	28,61		
9	37,65		
10	35,15	4	35,84
11	36,81		
12	35,56		
13	38,02	5	37,09
14	37,92		
15	35,34		
16	39,32	6	38,18
17	38,69		
18	36,53		
19	33,27	7	33,41
20	33,9		
21	33,07		

Fonte: Autor (2017)

Os corpos de prova foram ensaiados conforme NBR 5739:2007, tendo sua resistência característica à compressão definida pela NBR 12655:2015, conforme pode ser observado na tabela abaixo.

Tabela 8 - Resistência média a compressão do concreto ensaiado

Laje	CP's	fcm (MPa)
1	1 a 6	36,2
2	4 a 12	36,5
3	10 a 15	36,5
4	13 a 21	36,2

Fonte: Autor (2017)

4.2.2 Aço

A fim de realizar a caracterização do aço utilizado no experimento, foram retiradas 3 amostras das barras utilizadas e submetidas a ensaio de tração. Onde pode-se obter as tensões de escoamento e ruptura para as barras de diâmetro 5mm. Para utilização de um valor padrão nos cálculos, fez-se a média dos valores obtidos nos ensaios.

Tabela 9 - Resistência a tração do aço ensaiado

Barra	fy (MPa)	fym (MPa)	fu (MPa)	fum (MPa)
1	733,16	752,31	755,64	760,37
2	764,94		765,11	
3	758,82		760,37	

Fonte: Autor (2017)

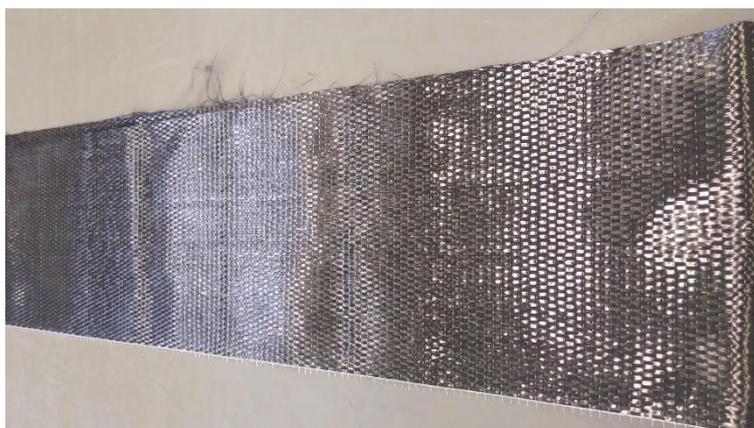
4.2.3 Fibra de carbono

A fibra utilizada como reforço foi a Viapol Carbon CFW 300 (Anexo A), esta já existente no laboratório de ensaios, que é uma manta de fibra de carbono para reforço estrutural com direção única de seus filamentos. Segundo dados do fabricante, a mesma possui as seguintes características técnicas:

Tabela 10 - Características técnicas Viapol Carbon CFW 300

Característica	Especificação
Gramatura	300g/m ²
Espessura da manta	0,166mm
Resistência máxima à tração	4900MPa
Módulo de elasticidade	230GPa
Alongamento na ruptura	2,10%

Fonte: Ficha técnica do produto fornecida pelo fabricante

Figura 9 - Manta de fibra de carbono utilizada

Fonte: Autor (2017)

4.2.4 Imprimador primário

Adesivo tixotrópico para reforço com fibra de carbono. É um adesivo primer para colagem de manta de reforço de alta resistência no substrato de concreto. Foi utilizado

o Repardur Base Coat (Anexo B) com as devidas proporções já estabelecidas pelo fornecedor.

Figura 10 - Imprimador primário Repardur Base Coat

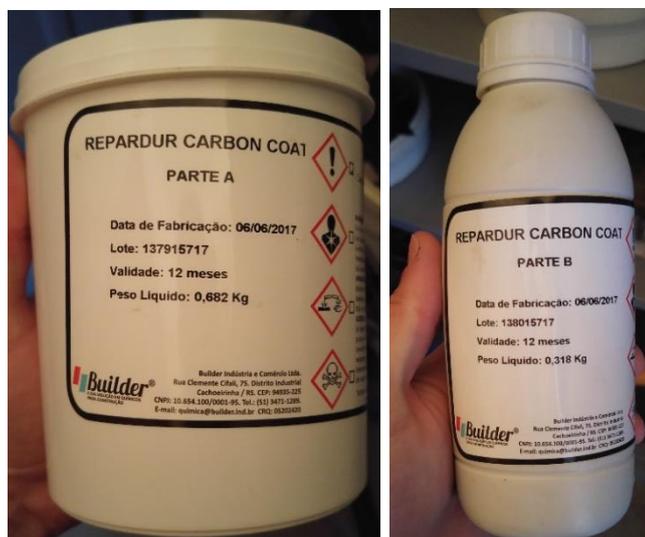


Fonte: Autor (2017)

4.2.5 Resina epóxi

A resina de laminação para reforço em fibra utilizada foi a Repardur Carbon Coat (Anexo C), adesivo para colagem de manta de reforço de alta resistência à tração para reforço de componentes estruturais. Assim como o imprimador primário, as proporções já vieram definidas pelo fornecedor de acordo com a área de laminação a ser executada.

Figura 11 - Resina epóxi Repardur Carbon Coat



Fonte: Autor (2017)

4.3 Confeção dos protótipos

Para facilitar a confecção das armaduras foi elaborado um gabarito com o intuito de garantir a precisão durante a montagem e amarração das barras de aço, estas que foram cortadas com as devidas dimensões e dobradas em bancada.

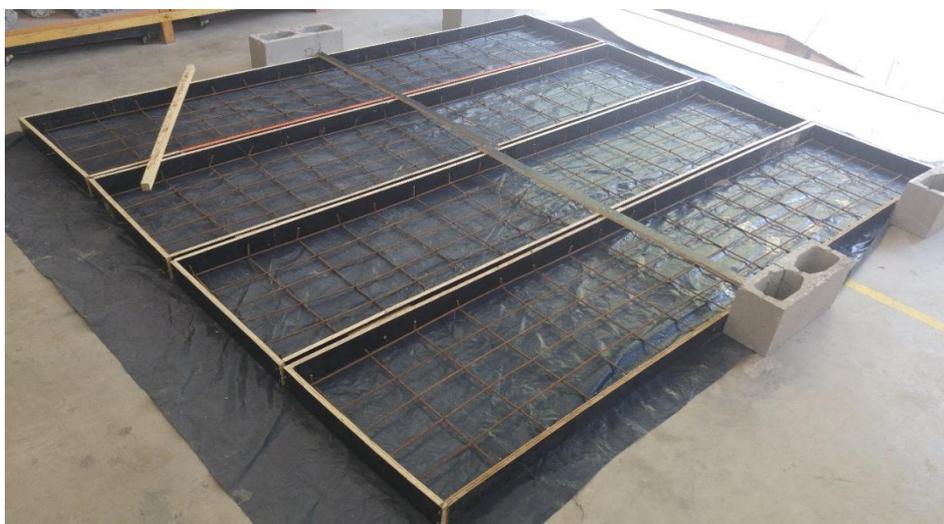
Figura 12 - Armadura montada sobre o gabarito



Fonte: Autor (2017)

Para a confecção das formas laterais foi utilizado compensado resinado com espessura de 14mm cortado em serra circular com as dimensões finais do protótipo. Já para a parte inferior das formas foi utilizada uma lona preta em superfície regular, conforme pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Formas e armaduras posicionadas



Fonte: Autor (2017)

Para o volume total de concretagem foi levado em conta o volume de cada protótipo mais o volume necessário para retirada das amostras. Onde para cada betonada, os materiais foram pesados anteriormente em balança digital e anotados o peso real de cada componente.

Como cada laje necessitaria de $0,112\text{m}^3$ de concreto, uma betonada não seria capaz de completar a forma, portanto foram mapeadas as betonadas e as lajes em que o concreto foi depositado, a fim de se obter maior controle sobre o experimento. Após a adição do material e completa homogeneização da mistura, foi realizado o ensaio de abatimento de cone (slump test) para aceitação ou não do concreto.

Figura 14 - Teste de abatimento de cone



Fonte: Autor (2017)

Após a aceitação do concreto, foram retiradas as amostras para ensaio e então transferido para as formas. Para evitar a formação de bolhas de ar, espaços vazios e excesso de água foi realizada a vibração do concreto através de um vibrador mecânico.

Figura 15 - Formas concretadas

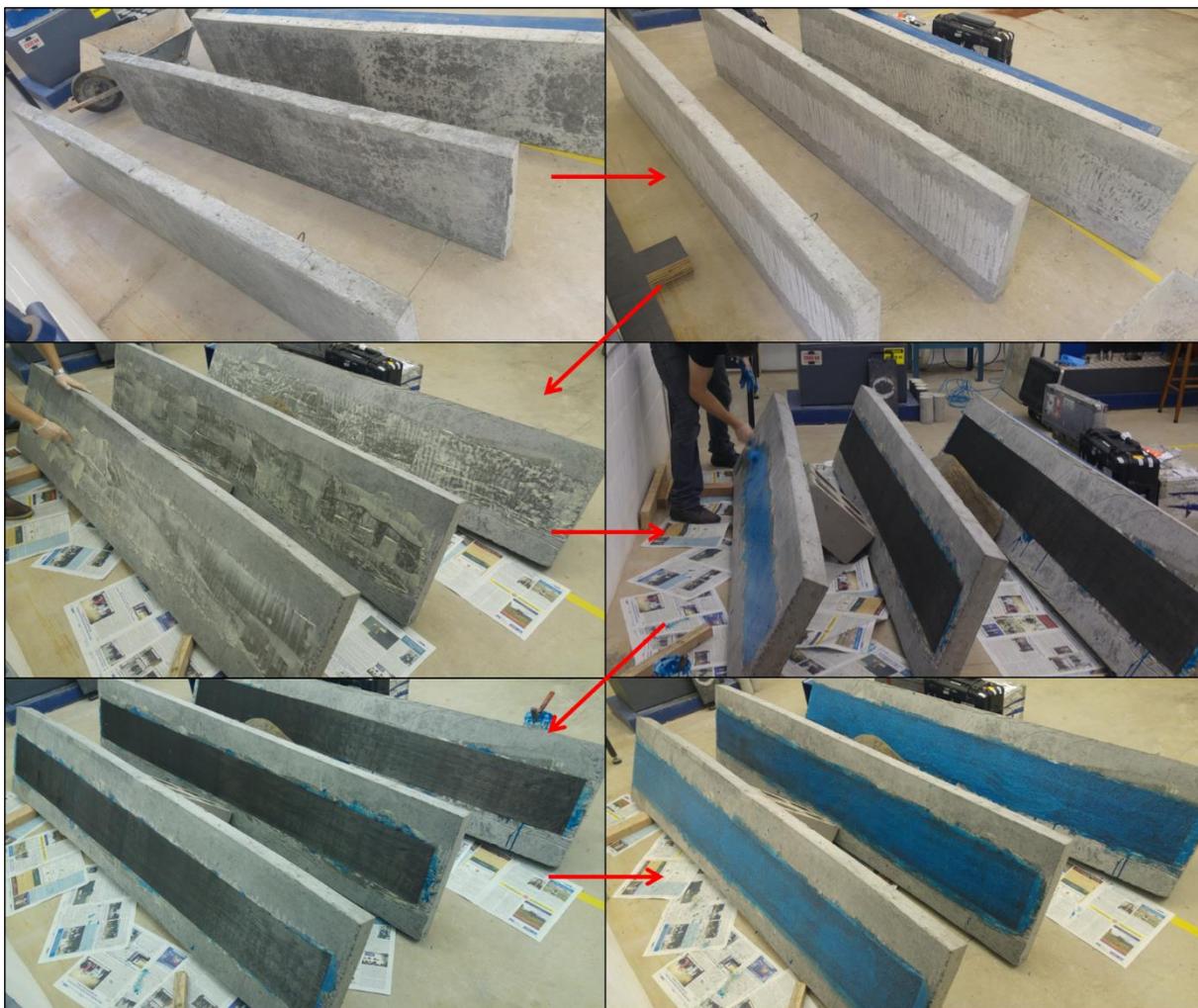
Fonte: Autor (2017)

Por se tratar de um ensaio experimental com protótipos desenvolvidos para este fim e a não existência de trincas e patologias, não houve a necessidade de recuperação da estrutura. Portanto iniciou-se a preparação da superfície garantindo que a mesma esteja sem a presença de água e também com a lixação utilizando uma serra circular manual com o intuito de criar uma maior aderência entre o substrato de concreto a o reforço.

Para iniciar a aplicação do reforço foi realizada a mistura das duas partes do imprimador primário e aplicado de forma homogênea com o uso de espátula na seção onde receberia o reforço. Após foram misturadas as partes da resina com o uso de misturador mecânico e aplicada com o auxílio de um rolo de lã para pintura.

Posteriormente foi adicionada a manta de fibra de carbono e aplicada nova camada de resina, sempre tomando o devido cuidado para evitar o pot-life das resinas. Este método é conhecido por saturação via seca, onde a aplicação da resina é diretamente sobre a estrutura de concreto.

A sequência de aplicação pode ser acompanhada na Figura 16.

Figura 16 - Sequência de aplicação do reforço

Fonte: Autor (2017)

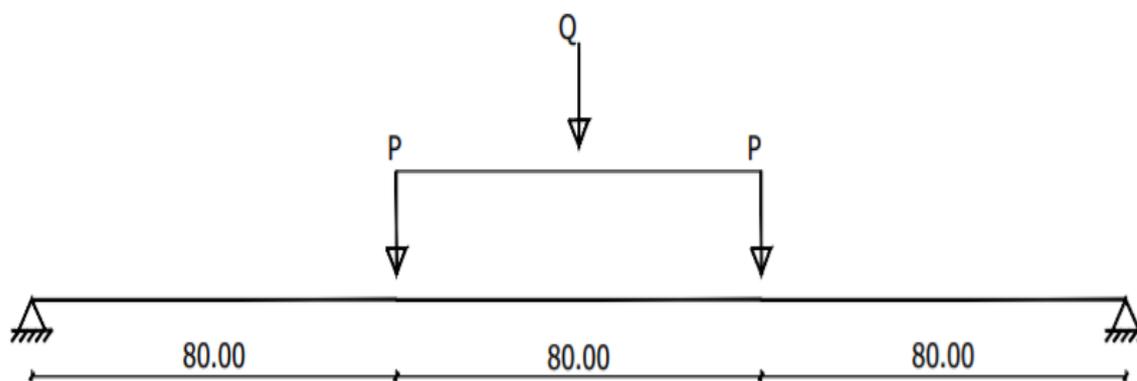
4.4 Procedimento de ensaio

Para a realização dos ensaios foi utilizado o equipamento EMIC DL 30000 que permite ensaios mecânicos de tração, compressão, flexão de diversos materiais. Possui capacidade máxima de 300KN (30.000kgf), com sistema autotravante e pré-carga por sistema pneumático.

Figura 17 - Máquina EMIC DL 30000

Fonte: Autor (2017)

Para a correta execução dos ensaios foram posicionados perfis metálicos de seção I com distância entre apoios de 240cm, distribuídos simetricamente com o eixo do equipamento para ensaio. O ensaio pode ser representado na figura abaixo.

Figura 18 - Representação gráfica do ensaio

Fonte: Autor (2017)

O transporte das lajes foi feito através de guincho hidráulico para o correto arranjo nos apoios. Após a laje estar posicionada e centralizada na máquina, foram dispostos na laje os eixos para aplicação da carga e perfis metálicos de seção I para

distribuir igualmente a carga aplicada pelo equipamento. Conforme pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 - Laje posicionada para ensaio



Fonte: Autor (2017)

4.5 Análise teórica

Conforme mencionado anteriormente os protótipos foram considerados biapoiados com duas aplicações de carga, com largura (b_w) 55cm, altura (h) 8,5cm e cobrimento (c) de 2,5cm.

4.5.1 Momento de cálculo da laje testemunho

Como o intuito deste primeiro cálculo é apenas realizar a verificação da resistência da laje testemunho, seguiram-se conceitos básicos para obtenção do momento resistente para estruturas maciças de concreto armado.

Para iniciar o cálculo de momento resistente, deve-se primeiramente realizar a verificação da linha neutra, conforme equação abaixo:

$$x = \frac{A_s \times f_{yd}}{0,68 \times b_w \times f_{cd}} \quad (\text{eq. 33})$$

$$x = \frac{0,9817 \times \left(\frac{60}{1,15}\right)}{0,68 \times 55 \times \left(\frac{3,5}{1,4}\right)}$$

$$x = 0,5478 \text{ cm}$$

Com a linha neutra já estipulada, calcula-se o momento resistente utilizando a equação:

$$M_d = A_s \times f_{yd} (d - 0,4x) \quad (\text{eq. 34})$$

$$M_d = 0,9817 \times \left(\frac{60}{1,15} \right) (5,75 - 0,4 \times 0,5478)$$

$$M_d = 283,29 \text{KN.cm}$$

Tendo o momento resistente da estrutura e o vão para a qual foi ensaiada, calcula-se a força solicitante de cálculo (Q_d), utilizando o vão utilizado nos experimentos (240cm), através da equação:

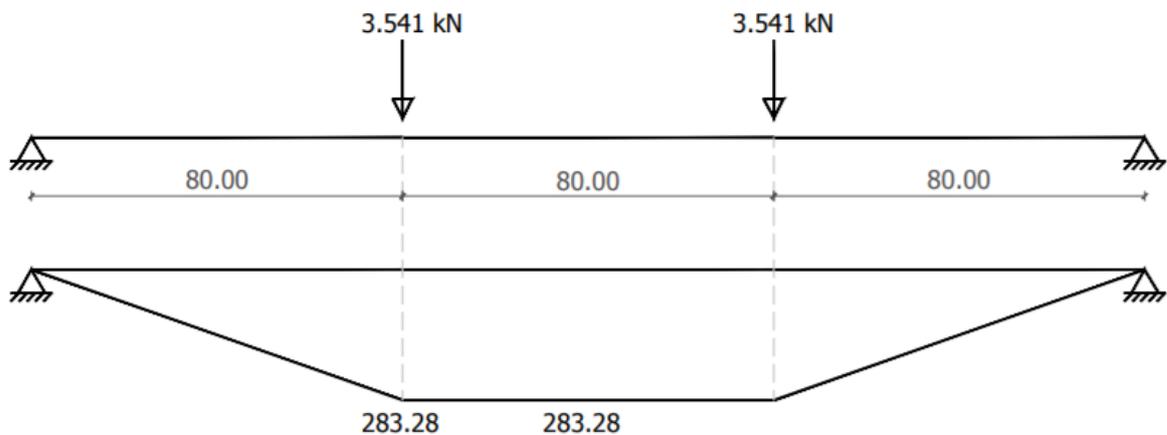
$$P_d = \frac{M_d}{\frac{l}{3}} \quad (\text{eq. 35})$$

$$P_d = \frac{283,29}{\frac{240}{3}}$$

$$P_d = 3,541 \text{KN}$$

Com os valores obtidos, pode-se montar o esquema e diagramas de esforços atuantes nas estruturas a serem ensaiadas, conforme apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Momento teórico de cálculo da laje testemunho



Fonte: Autor (2017)

4.5.2 Momento de ruptura da laje testemunho

Para encontrar o momento de ruptura, desprezou-se os coeficientes de minoração em todas as etapas e utilizou-se os valores obtidos através dos materiais ensaiados. Para iniciar o cálculo de momento resistente, deve-se primeiramente realizar a verificação da linha neutra:

$$x = \frac{A_s \times f_y}{0,68 \times b_w \times f_c} \rightarrow x = \frac{0,9817 \times 75,2}{0,68 \times 55 \times 3,65}$$

$$x = 0,5408 \text{ cm}$$

Com a linha neutra já estipulada, calcula-se o momento resistente:

$$M_r = A_s \times f_y (d - 0,4x) \rightarrow M_r = 0,9817 \times 75,2 (5,75 - 0,4 \times 0,5408)$$

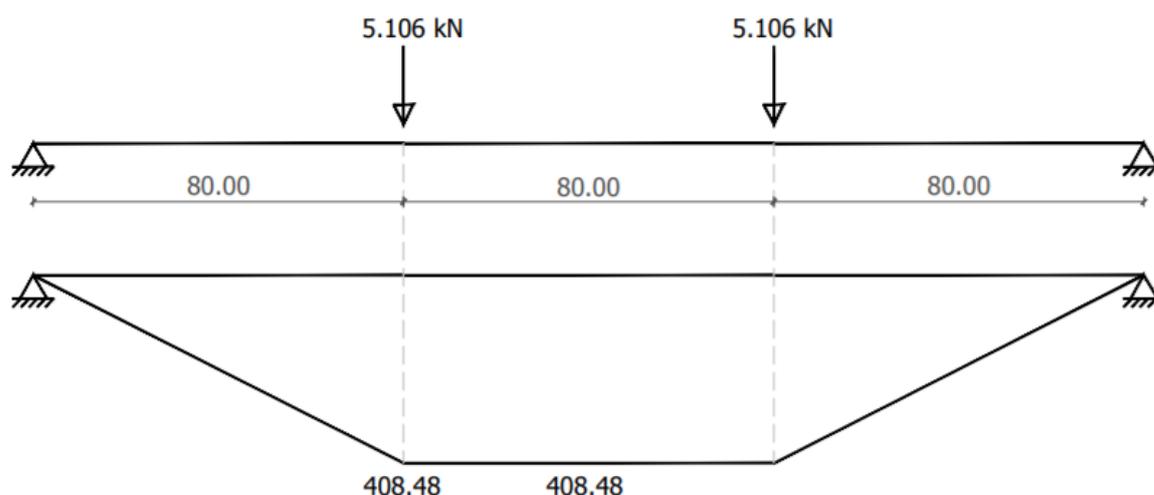
$$M_r = 408,52 \text{ KN.cm}$$

Tendo o momento resistente da estrutura e o vão para a qual foi ensaiada, calcula-se a força solicitante de ruptura (P_r), utilizando o vão utilizado nos experimentos (240cm):

$$P_r = \frac{M_r}{\frac{l}{3}} \rightarrow P_r = \frac{408,52}{\frac{240}{3}}$$

$$P_r = 5,106 \text{ KN}$$

Figura 21 - Momento teórico de ruptura da laje testemunho

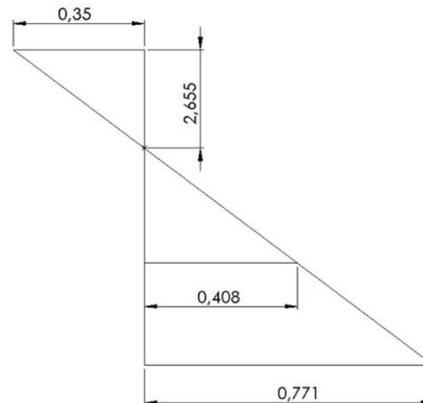


Fonte: Autor (2017)

4.5.3 Momento de cálculo com reforço aplicado

A partir da sequência de cálculo abordada no referencial teórico, foram realizadas adaptações pelo autor e encontrado o momento resistente da estrutura. Na imagem abaixo seguem as deformações utilizadas no cálculo para equilíbrio das forças.

Figura 22 - Deformações na estrutura para equilíbrio de forças



Fonte: Autor (2017)

Com o intuito de equilibrar as forças atuantes na seção, estipulou-se a linha neutra:

$$x = 2,655\text{cm}$$

Utilizando a linha neutra estipulada, inicia-se o cálculo através da resultante do concreto à compressão:

$$F_c = \alpha_1 \times f'_c \times \beta_1 \times c$$

$$\alpha_1 = \left(0,85 \times \frac{f_{ck}}{1,4}\right) \rightarrow \alpha_1 = \left(0,85 \times \frac{3,5}{1,4}\right) \rightarrow \alpha_1 = 2,125$$

$$F_c = 2,125 \times \left(\frac{35}{1,4}\right) \times 0,8 \times 2,655$$

$$F_c = 112,837\text{KN}$$

Calcula-se a resultante do aço à tração:

$$F_s = A_s \times f_s$$

$$f_s = E_s \times \varepsilon_s < f_y \rightarrow f_s = 210 \times 0,408 = 85,47 \text{ KN/cm}^2 > 52,17 \text{ KN/cm}^2$$

Como a força calculada resultou em valor maior que a resistência a escoamento do aço, utiliza-se a equação abaixo:

$$F_s = A_s \times f_y \rightarrow 0,9817 \times 52,17$$

$$F_s = 51,219\text{KN}$$

Para se obter a resultante do reforço a tração, deve-se utilizar os valores de deformação do material através da linha neutra estipulada.

$$F_f = A_f \times f_{fe}$$

$$f_{fe} = E_f \times \varepsilon_{c,f} \rightarrow f_{fe} = 228 \times 0,771$$

$$f_{fe} = 175,68$$

$$A_f = e_f \times l_f \rightarrow A_f = 0,0165 \times 25 \rightarrow A_f = 0,4125 \text{ cm}^2$$

$$F_f = 0,4125 \times 175,68$$

$$F_f = 72,47 \text{ KN}$$

Com a obtenção dos valores das resultantes, deve-se calcular o momento resistente na seção comprimida do concreto:

$$M_{n,c} = F_s(d - 0,4x) + \psi_f \times F_f(h - 0,4x)$$

$$M_{n,c} = 51,219(5,75 - 0,4 \times 2,655) + 0,85 \times 72,27(8,5 - 0,4 \times 2,655)$$

$$M_{n,c} = 698,28 \text{ KN.cm}$$

E para verificar o equilíbrio de forças, calcula-se também o momento resistente na seção do aço tracionado:

$$M_{n,s} = F_c(d - 0,4x) + \psi_f \times F_f \times C$$

$$M_{n,s} = 112,837(5,75 - 0,4 \times 2,655) + 0,85 \times 72,47 \times 2,75$$

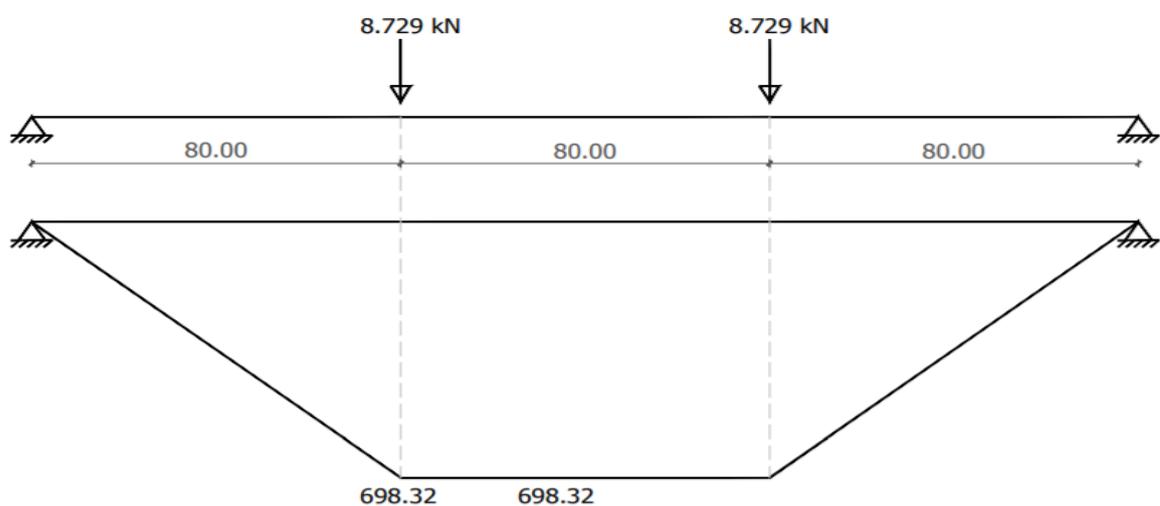
$$M_{n,s} = 698,38 \text{ KN.cm}$$

Como os valores obtidos nos momentos foram muito próximos, valida-se assim a linha neutra estipulada. Portanto pode-se calcular a força solicitante de cálculo para a estrutura reforçada.

$$P = \frac{M_n}{\frac{l}{3}} \rightarrow P = \frac{698,28}{\frac{240}{3}}$$

$$P = 8,729 \text{ KN}$$

Figura 23 - Momento teórico de cálculo da laje reforçada

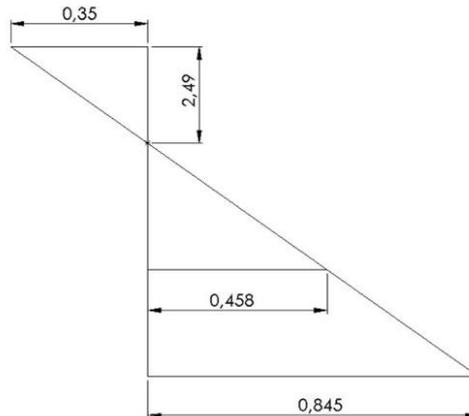


Fonte: Autor (2017)

4.5.4 Momento de ruptura com reforço aplicado

Assim como no cálculo do momento de ruptura da estrutura não reforçada, neste item não se utilizou os coeficientes de minoração dos materiais.

Figura 24 - Deformações na estrutura para equilíbrio de forças



Fonte: Autor (2017)

Com o intuito de equilibrar as forças atuantes na seção, estipulou-se a linha neutra:

$$x = 2,49cm$$

Utilizando a linha neutra estipulada, inicia-se o cálculo através da resultante do concreto à compressão:

$$F_c = \alpha_1 \times f'_c \times \beta_1 \times c$$

$$\alpha_1 = \left(0,85 \times \frac{f'_c}{1,4}\right) \rightarrow \alpha_1 = \left(0,85 \times \frac{3,56}{1,4}\right) \rightarrow \alpha_1 = 2,126$$

$$F_c = 2,125 \times 3,56 \times 0,8 \times 2,49$$

$$F_c = 153,278KN$$

Calcula-se a resultante do aço à tração:

$$F_s = A_s \times f_s$$

$$f_s = E_s \times \varepsilon_s < f_y \rightarrow f_s = 210 \times 0,458 = 96,18 KN/cm^2 > 75,2 KN/cm^2$$

Como a força calculada resultou em valor maior que a resistência a escoamento do aço, utiliza-se a equação abaixo:

$$F_s = A_s \times f_y \rightarrow 0,9817 \times 75,2$$

$$F_s = 73,824KN$$

Para se obter a resultante do reforço a tração, deve-se utilizar os valores de deformação do material através da linha neutra estipulada.

$$F_f = A_f \times f_{fe}$$

$$f_{fe} = E_f \times \varepsilon_{c,f} \rightarrow f_{fe} = 228 \times 0,845$$

$$f_{fe} = 192,66$$

$$A_f = e_f \times l_f \rightarrow A_f = 0,0165 \times 25 \rightarrow A_f = 0,4125 \text{ cm}^2$$

$$F_f = 0,4125 \times 192,66$$

$$F_f = 79,45 \text{ KN}$$

Com a obtenção dos valores das resultantes, deve-se calcular o momento resistente na seção comprimida do concreto:

$$M_{n,c} = F_s(d - 0,4x) + \psi_f \times F_f(h - 0,4x)$$

$$M_{n,c} = 73,824(5,75 - 0,4 \times 2,49) + 1 \times 79,45(8,5 - 0,4 \times 2,49)$$

$$M_{n,c} = 947,16 \text{ KN.cm}$$

E para verificar o equilíbrio de forças, calcula-se também o momento resistente na seção do aço tracionado:

$$M_{n,s} = F_c(d - 0,4x) + \psi_f \times F_f \times C$$

$$M_{n,s} = 153,278(5,75 - 0,4 \times 2,49) + 1 \times 79,45 \times 2,75$$

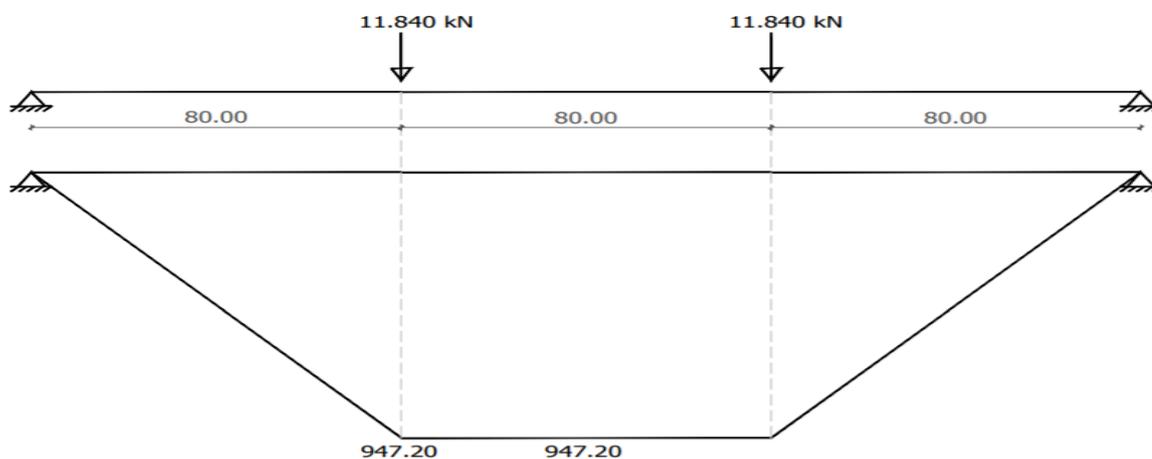
$$M_{n,s} = 947,18 \text{ KN.cm}$$

Como os valores obtidos nos momentos foram muito próximos, valida-se assim a linha neutra estipulada. Portanto pode-se calcular a força solicitante de ruptura para a estrutura reforçada.

$$P = \frac{M_n}{\frac{l}{3}} \rightarrow P = \frac{947,16}{\frac{240}{3}}$$

$$P = 11,84 \text{ KN}$$

Figura 25 - Momento teórico de ruptura da laje reforçada



Fonte: Autor (2017)

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados encontrados nos ensaios experimentais das 4 lajes ensaiadas, bem como uma relação entre os protótipos através de gráficos e tabelas, para se obter uma melhor análise e confiabilidade do resultado obtido.

Na análise teórica calculou-se os protótipos para as situações de cálculo e estimativa de ruptura. Para o momento de cálculo utilizou-se os coeficientes de minoração, enquanto que para a estimativa de ruptura estes não foram considerados. Os valores obtidos podem ser observados nas tabelas a seguir.

Tabela 11 – Parâmetros para momento de cálculo na análise teórica

Laje	Pcál (KN)	Mcál (KN.cm)	Vão (cm)	fc (MPa)	fy (MPa)	γ_s	γ_c	ψ
1	8,729	698,320	240	35	60	1,15	1,40	0,85
2								
4								
3 SR	3,541	283,28						-

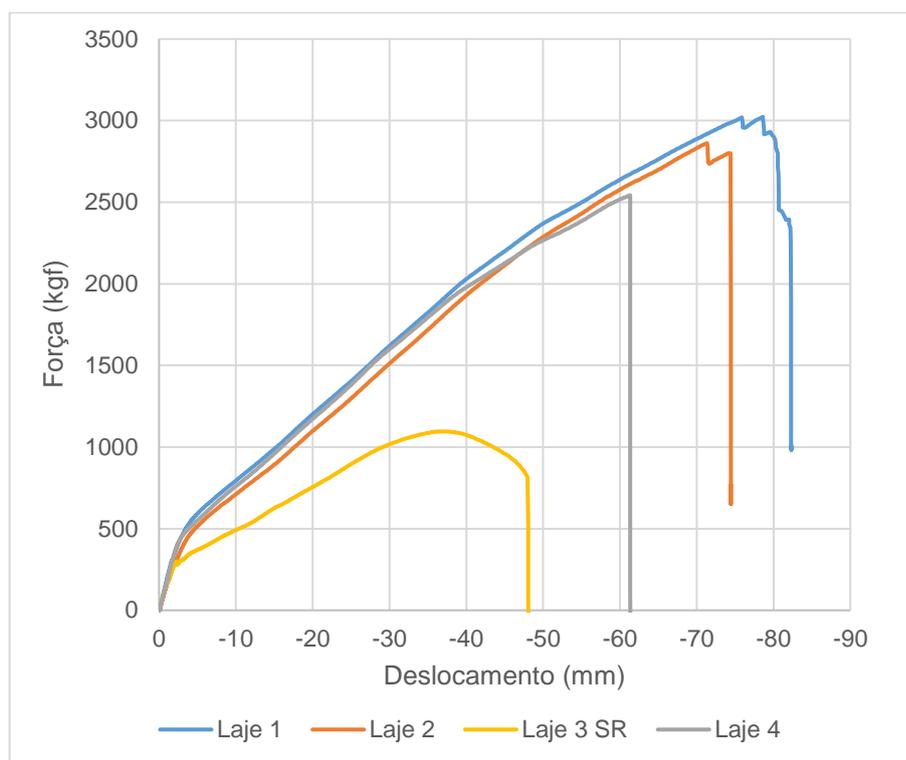
Fonte: Autor (2017)

Tabela 12 - Parâmetros para momento de ruptura na análise teórica

Laje	Pest,rup (KN)	Mest,rup (KN.cm)	Vão (cm)	fc (MPa)	fy (MPa)	γ_s	γ_c	ψ
1	11,840	947,20	240	35,6	75,2	1,00	1,00	1,00
2								
4								
3 SR	5,106	408,48						-

Fonte: Autor (2017)

Os protótipos foram ensaiados conforme descrito no item 4.4, e então elaborados os gráficos de Força x Deslocamento conforme Figura 26. Pode-se notar um comportamento semelhante entre as lajes 1, 2 e 4, ambas possuindo reforço, e então compará-las com a laje 3 que serviu de testemunho e observar o acréscimo de resistência.

Figura 26 - Gráfico Força x Deslocamento das lajes ensaiadas

Fonte: Autor (2017)

Os valores obtidos nos ensaios, bem como a força máxima resistida pelos protótipos podem ser observadas na tabela abaixo.

Tabela 13 - Carga de ruptura obtida experimentalmente

Laje	Q _{exp} (KN)	P _{exp} (KN)	Vão (cm)	f _c (MPa)	f _y (MPa)
1	30,23	15,12	240	35,6	75,2
2	28,62	14,31			
4	25,42	12,71			
3 SR	10,96	5,48			

Fonte: Autor (2017)

5.6 Análise dos resultados

Através dos resultados dos ensaios, gráficos e tabelas apresentados no item anterior, com o intuito de validar estatisticamente o experimento, comparou-se os valores conforme pode ser visto na Tabela 14. Pode-se notar a baixa variação entre os resultados ensaiados, validando assim o experimento elaborado.

Tabela 14 - Resultados experimentais e análise estatística

Laje	Carga (KN)	Vão (cm)	Mrup,exp (KN.cm)	Mméd (KN.cm)	Coef. Variação	Variação
1	30,23	240	1209,28	1123,67	8,71%	7,6%
2	28,62	240	1144,76			1,9%
4	25,42	240	1016,96			9,5%
3 SR	10,96	240	438,4	-	-	-

Fonte: Autor (2017)

Em todos os ensaios a ruptura da estrutura ocorreu, como já esperado, no meio do vão, devido ao momento fletor constante nesta seção. Todas as amostras tiveram seu rompimento através de flexão, com a ocorrência de fissuras no terço central do vão, conforme pode ser observado na Figura 27.

Figura 27 - Fissuras de flexão na face lateral da laje

Fonte: Autor (2017)

O modo de falha da estrutura reforçada se deu pelo rompimento da camada de reforço antes da ruptura por escoamento do aço ou até mesmo do esmagamento do concreto. O que já era esperado, devido à geometria dos protótipos, sendo lajes de pouca inércia, suscetíveis a deformações nas camadas externas da estrutura. Os modos de falha podem ser observados nas figuras a seguir.

Figura 28 - Ruptura da laje 1



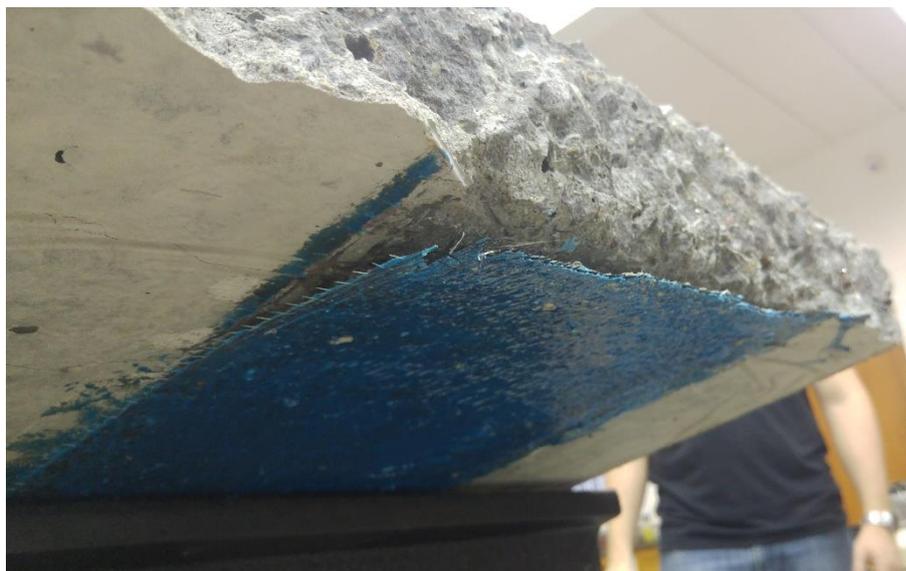
Fonte: Autor (2017)

Figura 29 - Ruptura da laje 2



Fonte: Autor (2017)

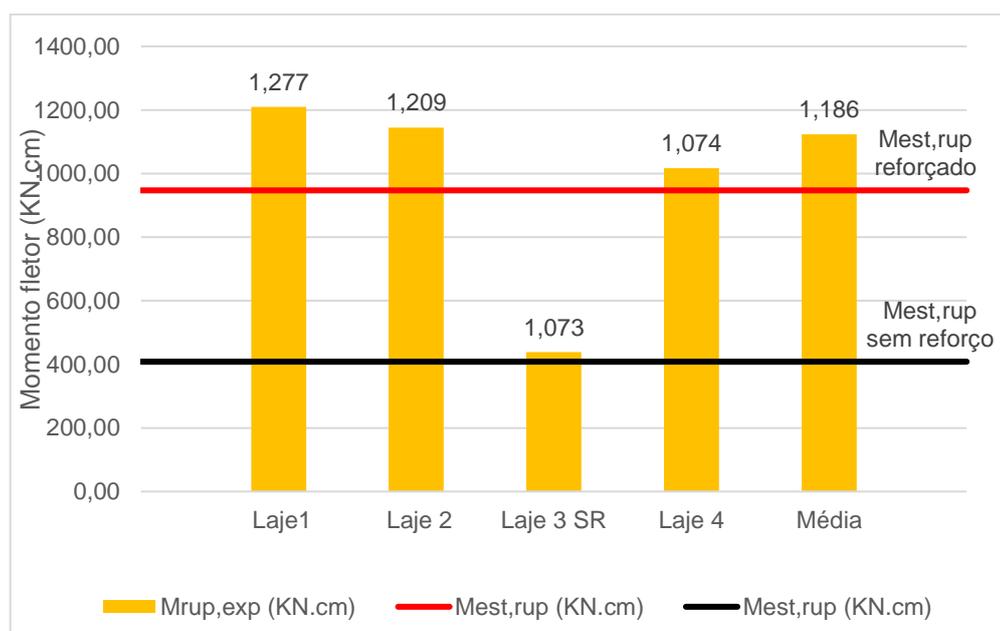
Figura 30 - Ruptura da laje 4



Fonte: Autor (2017)

Todos os ensaios tiveram capacidade resistente maior do que a estimada para ruptura, portanto, com o intuito de quantificar este acréscimo foi calculado também o fator do acréscimo de resistência pelos experimentos com relação ao estimado para ruptura, conforme mostrado abaixo.

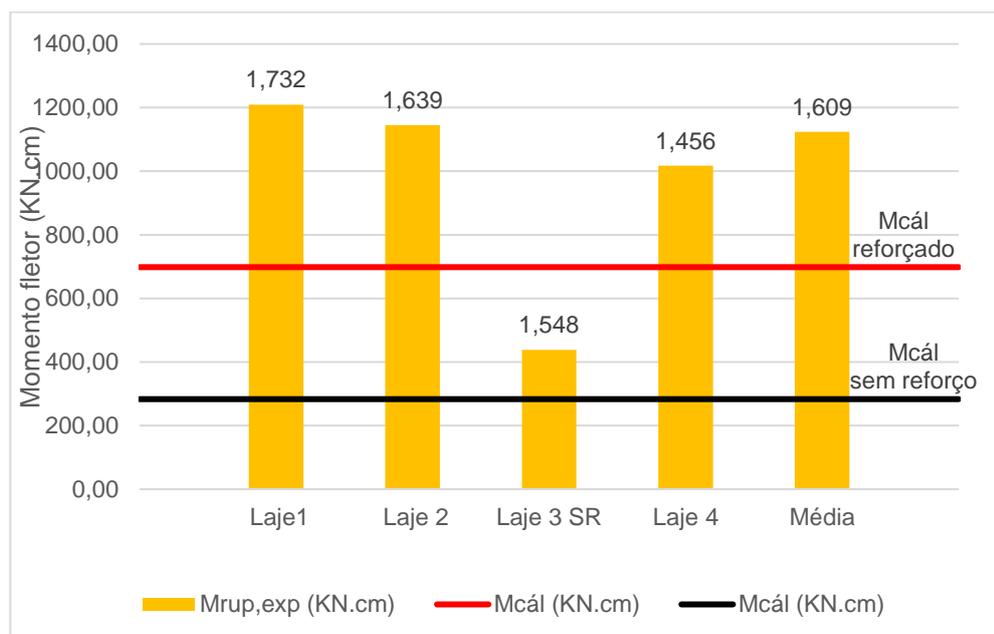
Figura 31 - Comparativo entre momento de ruptura experimental e estimado



Fonte: Autor (2017)

Em média os protótipos resistiram a um fator de 1,186 em comparação com a ruptura teórica, o que valida o método de cálculo utilizado, bem como valida a execução de todas as etapas construtivas do processo, desde os detalhes para iniciar a concretagem até o processo de aplicação do reforço.

Figura 32 - Comparativo entre momento de ruptura experimental e de cálculo



Fonte: Autor (2017)

Já em comparação entre os momentos experimentais e os momentos de cálculo, notou-se que em média as estruturas resistiram a um fator de 1,609, o que se justifica através dos fatores utilizados durante os cálculos, seguindo a NBR 6118:2014 para o dimensionamento da estrutura de concreto armado e a ACI 440R para o reforço. Os fatores podem ser observados na tabela abaixo.

Tabela 15 - Comparativo entre momento teórico e experimental

Laje	Mcál (KN.cm)	Mest,rup (KN.cm)	Mrup,exp (KN.cm)	Exp X Est	Exp X Cál
1	698,28	947,16	1209,28	1,277	1,732
2	698,28	947,16	1144,76	1,209	1,639
4	698,28	947,16	1016,96	1,074	1,456
Média	698,28	947,16	1123,67	1,186	1,609

Fonte: Autor (2017)

Para o caso ensaiado, comprovou-se a utilização do reforço com fibra de carbono, visto que as lajes reforçadas resultaram, em média, a um fator de acréscimo

de 2,56 quando comparadas ao momento de ruptura da laje que não possuía o reforço.

6 CONCLUSÃO

Com base nos estudos realizados, considerando os resultados experimentais, pode-se concluir que o desenvolvimento de um trabalho desta amplitude, que abrange embasamento teórico e após análises através de cálculos sendo comparados com resultados experimentais, é de suma importância. Pois além de todos estes fatores técnicos, envolve os processos prévios para a correta execução de estruturas comumente utilizadas na engenharia civil.

O presente trabalho tratou-se de uma análise teórico experimental sobre lajes maciças de concreto armado reforçadas com fibra de carbono, bem como o processo de cálculo e execução. Foram moldados 4 protótipos de 8,5x55x250cm, sendo que em 3 deles foi adicionada uma manta de reforço com 25cm de largura por todo o comprimento da estrutura. Antes da execução foram ensaiados e analisados todos os materiais constituintes, sendo que todas as etapas seguiram as normas vigentes mencionadas durante o trabalho.

Através dos ensaios, foram comparados os momentos resistidos experimentalmente com os momentos de cálculo e teórico de ruptura, onde nos dois casos a resistência dos experimentos foi maior, cerca de 60,9% e 18,6% respectivamente. Além de resultar em um momento resistente de, em média, 156% maior que o momento resistido pela laje testemunho, demonstrando ser um tipo de reforço válido para ser utilizado em estruturas que necessitam maior capacidade resistente.

A técnica de reforço com fibra de carbono se mostrou bastante eficiente, bem como apresentou desempenho satisfatório, visto que sua resistência excedeu os valores de cálculo. Apesar da elevada resistência agregada pelo reforço, o peso da estrutura não sofreu alterações, bem como não houve acréscimo das dimensões da laje, devido ao baixo peso e espessura da manta.

De acordo com os resultados obtidos, é possível sugerir para futuros trabalhos, a execução do reforço com fibra de carbono variando a espessura da camada de resina com o intuito de quantificar e encontrar a espessura ideal para o atingimento da melhor capacidade resistente do reforço. Indica-se também que estruturas deste tipo sejam verificadas análises de seu desempenho perante situações expostas ao fogo, assunto este em alta atualmente. Podem ser analisadas uma verificação da influência da adição de mais camadas de fibra de carbono bem como a variação do

limite de deformação da fibra, visto que este fator é de grande importância para o dimensionamento de reforços como este.

REFERÊNCIAS

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide for the design and construction of externally bonded systems for strengthening concrete structures - ACI 440.2R, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

_____. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

BRIK, E. M. J.; MOREIRA, L. P.; KRÜGER, J. A. Estudo das patologias em estruturas de concreto provenientes de erros em ensaios e em procedimentos executivos. Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, vol. 8. 2013.

CÁNOVAS, M. F. Patologia e Terapia do Concreto Armado. Editora Pini, São Paulo, 1988.

CARNEIRO, L. A. V.; TEIXEIRA, A. M. A. J. Aplicações de materiais compósitos de resina e fibras na engenharia de construção. Revista Militar de Ciência e Tecnologia, vol. 26, nº 2, p.45-60. 2009.

FERRARI, V. J; PADARATZ, I. J; LORIGGIO, D. D. Reforço à flexão em vigas de concreto armado com manta de fibra de carbono: mecanismos de incremento de ancoragem. Revista Acta Scientiarum. Maringá. v. 24, n. 6, p. 1783-1791. 2002.

GARCEZ, Mônica Regina. Alternativas para melhoria no desempenho de estruturas de concreto armado reforçadas pela colagem de polímeros reforçados com fibras. 2007. 241 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

KAEFER, L. F. A evolução do concreto armado. (PEF 5707 – Concepção, Projeto e Realização das estruturas: aspectos históricos – 1998.3). São Paulo: 1998.
MACHADO, A.P. Manual de eforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono. São Paulo: Pini, 2010.

SILVA, R. J. C; ALBUQUERQUE, C. S. Estudo teórico de reforço de vigas de concreto armado. Revista Sobral, vol. 15, nº 1, p.241-262. 2014.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto. 1 ed. São Paulo: Pini, 1998.

TOMAZ, R. A.; SOARES, F. L.; BARBOSA, P. H. M. Reforço estrutural de lajes de concreto armado com fibra de carbono. Congresso Brasileiro de Ponte e Estruturas, vol. 7. 2014.

WIEBECK, Hélio; HARADA, Júlio. Plásticos de Engenharia - Tecnologia e Aplicações. São Paulo: Artliber, 2005.

ANEXOS

ANEXO A – Ficha técnica VIAPOL CARBON CFW 300

ANEXO B – Ficha técnica REPARDUR BASE COAT

ANEXO C – Ficha técnica REPARDUR CARBON COAT