

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**EMANUEL ANTÔNIO DELLATORRE**

**REFORÇO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS À FLEXÃO COM  
COMPÓSITO CONTENDO FIBRAS DE JUTA**

**Alegrete  
2015**

**EMANUEL ANTÔNIO DELLATORRE**

**REFORÇO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS À FLEXÃO COM  
COMPÓSITO CONTENDO FIBRAS DE JUTA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título  
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ederli Marangon

Coorientador: Prof. Dr. Telmo Egmar  
Camilo Deifeld

**Alegrete  
2015**

**EMANUEL ANTÔNIO DELLATORRE**

**REFORÇO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS À FLEXÃO COM  
COMPÓSITO CONTENDO FIBRAS DE JUTA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título  
de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 03 de julho de 2015.

Banca examinadora:



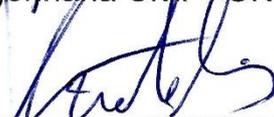
---

Prof. Dr. Ederli Marangon  
Orientador  
Engenharia Civil – UNIPAMPA



---

Prof. Dr. Telmo Egmar Camilo Deifeld  
Engenharia Civil – UNIPAMPA



---

Prof. Dr. Luis Eduardo Kostas  
Engenharia Civil – UNIPAMPA



---

Prof. Dr. Fladimir Fernandes dos Santos  
Engenharia Civil – UNIPAMPA

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço aos meus pais Alexandre F. Dellatorre e Elisangela Giacomoni pela educação e apoio sempre.

A meu irmão Lázaro Augusto Dellatorre pela motivação e companheirismos.

Aos meus colegas e amigos da UNIPAMPA, pela ajuda prestada no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador Professor Dr. Ederli Marangon e meu coorientador Professor Dr. Telmo E. C. Deifeld, pelos conhecimentos e colaboração neste trabalho.

## RESUMO

A utilização de fibras naturais de origem vegetal, para reforço estrutural, vem sendo aplicado com algumas vantagens em relação as fibras sintéticas, a fibra vegetal é um material biodegradável, não é prejudicial à saúde e torna-se mais econômica em relação as fibras sintéticas. A eficiência desses reforços vem sendo comprovada pelos resultados de diversos estudos experimentais desenvolvidos em todo o mundo. O presente trabalho tem como objetivo testar a eficiência de vigas de concreto com armadura mínima através de ensaios experimentais, aplicando a técnica de reforço à flexão com compósito contendo fibras de juta na parte tracionada. Foram ensaiadas duas vigas, a primeira é a viga de referência, ou seja, viga sem aplicação do reforço, e a segunda é a viga reforçada com duas camadas de fibras de juta. No trabalho foram analisados os dados das deformações das barras de aço, das deformações no concreto e dos deslocamentos verticais e comparados com os dados obtidos pelo cálculo teórico. A partir das análises efetuadas, é possível afirmar que o reforço proporcionou um bom desempenho, obtendo ganho de rigidez e um ganho aproximado de 20% de carga. A execução do reforço não apresentou maiores dificuldades, e foi executado de forma rápida e sem necessidade de mão-de-obra especializada.

Palavras-Chave: Reforço estrutural de vigas; concreto armado; compósito cimentício; fibra de juta.

## **ABSTRACT**

The use of natural fibers of vegetable origin, for structural reinforcement, has been applied with some advantages over synthetic fibers, vegetable fiber is a biodegradable material, is not detrimental to health and it becomes more economical in relation synthetic fibers. The efficiency of these reinforcements has been proven by the results of various experimental studies carried out throughout the world. This study aims to test the concrete beams efficiency with minimum reinforcement through experimental tests, applying the reinforcement technique to bending with composite containing jute fibers in the pulling. Two beams were tested, the first is the reference beam, ie, without the application of the reinforcing beam and the second beam is reinforced with two layers of jute fibers. In the study analyzed data from the deformation of the steel bars, the deformations in the concrete and vertical displacements and compared with data obtained by theoretical calculation. From the analysis made, it is clear that further gave a good performance, obtaining gain of rigidity and an approximate gain of 20% load. The strengthening of execution presented no major difficulties, and was executed quickly and without the need for labor-skilled labor.

**Keywords:** Structural reinforcement of beams; reinforced concrete; cementitious composite; jute fiber.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Reforço à flexão de vigas por materiais colados com um sistema de amarração.....	17
Figura 2 – Reforço por adição de chapas metálicas.....	20
Figura 3 – Reforço executados através de chapas de aço.....	21
Figura 4 – Diagrama tensão-deformação dos principais tipos de fibra, traduzida por Araújo, 2000.....	24
Figura 5 – Classificação das fibras vegetais, tradução própria.....	30
Figura 6 – Colheita da juta.....	33
Figura 7 – Secagem da fibra de juta.....	33
Figura 8 – Industrialização da fibra.....	33
Figura 9 – Fardos da fibra.....	33
Figura 10 – Esquema estrutural utilizado.....	36
Figura 11 – Detalhamento das armaduras das vigas V1Ref e V2.....	38
Figura 12 – Diagrama retangular simplificado de tensões e diagrama de deformação da seção da viga.....	39
Figura 13 – Cura dos corpos de prova imersos em água.....	41
Figura 14 – Ensaio de compressão, corpo-de-prova do concreto das vigas.....	42
Figura 15 – Fibra de juta na forma de tela utilizada no compósito.....	43
Figura 16 – Armaduras das vigas.....	45
Figura 17 – Fôrmas e os espaçadores usados para a concretagem das duas vigas.....	46
Figura 18 – (a) Concreto sendo produzido na betoneira, (b) Adensamento do concreto utilizando vibrador.....	46
Figura 19 – Cura das vigas.....	47
Figura 20 – Extensômetros colados nas barras de aço.....	48
Figura 21 – Extensômetros colados na superfície superior da viga.....	48
Figura 22 – Posicionamento dos LVDT'S .....	49

Figura 23 – LVDT’S posicionados para a realização do ensaio.....	51
Figura 24 – Preparo de superfície da viga V2 para a colocação do reforço.....	51
Figura 25 – Viga V2 preparada para receber a camada de reforço .....	52
Figura 26 – Produção da matriz do reforço.....	53
Figura 27 – (a) Aplicação da primeira camada de matriz, (b) Aplicação da primeira camada de fibra e segunda camada de matriz, (c) Aplicação da última camada de fibra e última camada de matriz.....	54
Figura 28 – Esquema de ensaio das vigas.....	55
Figura 29 – Posicionamento das vigas.....	55
Figura 30 – Mapa de fissuração da viga V1Ref.....	56
Figura 31 – Mapa de fissuração da viga V2 .....	57
Figura 32 – Viga V2R pronta para ser ensaiada.....	57
Figura 33 – Mapa de fissuração da viga V2R.....	58
Figura 34 – Abertura de fissura da V1Ref, carga $P_{f,exp} = 15\text{kN}$ .....	61
Figura 35 – Limite de fissuração da V1Ref, 0,3 mm, carga $P_{f,exp} = 19,9\text{ kN}$ .....	61
Figura 36 – Diagramas carga-deslocamento da viga de referência V1Ref.....	62
Figura 37 – Diagramas carga-deformação das barras de aço mais tracionadas da viga V1Ref.....	63
Figura 38 – Diagramas carga-deformação do concreto da viga V1Ref.....	63
Figura 39 – Abertura de fissura, carga $P_{f,exp} = 14,5\text{ kN}$ .....	66
Figura 40 – Limite de fissuração da V2, 0,3 mm, carga $P_{0,3exp} = 22,3\text{ kN}$ .....	66
Figura 41 – Diagramas carga-deslocamento da viga V2 .....	67
Figura 42 – Diagramas carga-deformação das barras de aço da viga V2.....	67
Figura 43 – Diagrama carga-deformação do concreto da viga V2.....	68
Figura 44 – Diagramas carga-deslocamento da viga V2R.....	70
Figura 45 – Diagrama carga-deformação do concreto da viga V2R.....	70

Figura 46 – Diagrama carga-deslocamento das vigas V1Ref, V2 e V2R.....	72
Figura 47 – Diagramas carga-deformação das barras de aço mais tracionadas das vigas V1Ref e V2.....	73
Figura 48 – Diagramas carga-deformação do concreto das vigas V1Ref, V2 e V2R.....	74
Figura 49 – Diagramas carga-deslocamento das vigas V1Ref, V2 e V2R, teórico e experimentais.....	77
Figura 50 – Diagramas carga-deformação média teórica e experimentais das armaduras das vigas V1Ref, V2.....	77
Figura 51 – Diagramas carga-deformação média teórica e experimentais do concreto das vigas V1Ref, V2 e V2R.....	78
Figura 52 – Diagramas carga-deslocamento das vigas V1Ref, V2 e V2R, teórico e experimentais, com rigidez reduzida .....	79
Figura 53 – Diagramas carga-deformação média teórica e experimentais das armaduras das vigas V1Ref, V2, com rigidez reduzida.....	79
Figura 54 – Diagramas carga-deformação média teórica e experimentais do concreto das vigas V1Ref, V2 e V2R, com rigidez reduzida.....	80
Figura 55 – Visualização da fibra de juta fazendo a ponte de ligação através da fissura.....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades típicas dos principais tipos de fibra, traduzida por Araújo, 2002.....	23
Tabela 2 – Propriedades mecânicas e características das fibras vegetais e fibras convencionais de reforço, tradução própria.....	31
Tabela 3 – Classes de agressividade ambiental.....	36
Tabela 4 – Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobertura nominal.....	37
Tabela 5 – Composição por kg/m <sup>3</sup> do concreto usado nas vigas.....	41
Tabela 6 – Resultados dos ensaio de resistência do concreto a compressão nos 28 dias.....	42
Tabela 7 – Composição por kg/m <sup>3</sup> de argamassa para o reforço.....	44
Tabela 8 – Curso de medição dos LVDTs e suas posições.....	50
Tabela 9 – Dados para comparação do comportamento teórico e experimental da viga V1Ref.....	64
Tabela 10 – Dados para comparação do comportamento teórico e experimental da viga V2.....	68
Tabela 11 – Dados para comparação do comportamento experimental da viga V2R.....	71
Tabela 12 – Dados para comparação do comportamento experimental das vigas estudadas.....	75

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- $M_{uk}$  – Momento fletor último característico  
 $h$  – Altura da seção transversal  
 $d$  – Distância entre as fibras mais comprimida e o centroide da armadura tracionada  
 $d'$  – Distância entre as fibras mais comprimida e o centroide da armadura comprimida  
 $b_w$  – Largura da base da viga  
 $x$  – Altura da linha neutra  
 $f_{ck}$  – Resistência característica do concreto submetido a esforços de compressão  
 $f_{cd}$  – Resistência de projeto do concreto submetido a esforços de compressão  
 $f_{yk}$  – Resistência característica das armaduras longitudinais submetidas a esforços de tração  
 $f_{yd}$  – Resistência de projeto das armaduras longitudinais submetidas a esforços de tração  
 $\epsilon_c$  – Deformação da parte mais comprimida do concreto  
 $\epsilon_s$  – Deformação das barras de aço mais tracionadas  
 $A_s$  – Área da seção transversal da armadura longitudinal tracionada  
 $\sigma_s$  – Tensão na armadura longitudinal tracionada  
 $R_c$  – Resultante das tensões no concreto  
 $R_s$  – Resultante das tensões na armadura longitudinal tracionada  
 $P_u$  – Carga máxima de ruptura teórica  
PRVA – Polímeros reforçados com fibras de aramida  
PRFV – Polímeros reforçados com fibras de vidro  
PRFC – Polímeros reforçados com fibras de carbono  
PRF – Polímeros reforçados com fibras  
PVA – Acetato de polivinila

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 Contextualização do problema de pesquisa .....	14
1.2 Objetivos .....	15
1.2.1 Objetivo geral .....	15
1.2.2 Objetivos específicos .....	15
1.3 Justificativas .....	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
2.1 Reforço à flexão por colagem de material .....	17
2.1.1 Chapas de aço coladas .....	18
2.1.2 Polímeros reforçados com fibras .....	21
2.1.2.1 Fibras de carbono .....	26
2.1.2.2 Fibras de vidro .....	27
2.1.2.3 Fibras de aramida .....	28
2.1.2.4 Fibras vegetais .....	29
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>35</b>
3.1 Introdução .....	35
3.2 Pré-dimensionamento e características das vigas.....	35
3.3 Materiais .....	40
3.3.1 Concreto .....	40
3.3.2 Material do Reforço .....	43
3.3.3 Aço .....	44
3.4 Execução das vigas .....	45
3.4.1 Concretagem .....	45
3.4.2 Instrumentação .....	47
3.5 Execução do reforço.....	51
3.6 Ensaio .....	54
3.6.1 Montagem dos ensaios .....	54
3.6.2 Execução dos ensaios .....	56
<b>4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>59</b>
4.1 Introdução .....	59
4.2 Resistência mecânica teórica da viga V1Ref e V2 .....	59
4.3 Dados obtidos do ensaio da viga de referência, V1Ref .....	61

<b>4.4 Dados obtidos do ensaio da viga dois pré-fissurada, V2 .....</b>	<b>65</b>
<b>4.5 Dados obtidos do ensaio da viga dois reforçada, V2R.....</b>	<b>69</b>
<b>4.6 Comparação dos dados das vigas V1Ref, V2 e V2R .....</b>	<b>72</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>81</b>
<b>6 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>83</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização do problema de pesquisa

A engenharia civil é uma área que está em constante desenvolvimento, ao iniciar pelos materiais utilizados na construção civil, técnicas construtivas e na modernização das máquinas e equipamentos, tendo ainda novos métodos de cálculo e detalhamento de projetos que são cada vez mais inovadores. Mesmo assim, no que diz respeito ao cálculo e ao detalhamento, ainda há sérias limitações, o que pode ocasionar falhas involuntárias, imperícia, deterioração, irresponsabilidade e acidentes, fazendo com que algumas estruturas venham a apresentar um desempenho insatisfatório (SOUZA; RIPPER, 1998).

Nos últimos anos o segmento da construção civil está aquecido, devido aos grandes investimentos que vêm sendo realizados, seja por parte do governo ou das empresas em constante crescimento no país.

Nesse contexto, a velocidade com que o mercado da construção civil se expandiu tem ocasionado:

- adoção de técnicas construtivas ainda não tão aprimoradas;
- obrigação à contratação de mão-de-obra de baixa qualificação;
- alta demanda de obras para os responsáveis técnicos, acarretando em um acompanhamento de baixa qualidade.

As construções civis contemporâneas, principalmente as de concreto armado, estão mais sensíveis aos defeitos dos materiais, da execução ou até mesmo do cálculo estrutural, e isso vem provocando situações de risco. Estas são mais aptas a apresentarem um quadro patológico do que as obras mais antigas, que eram dimensionadas com uma margem de segurança superior das atuais, originando uma reserva de resistência para superar as ações de agentes agressivos, mecânicos e químicos (BEBER, 2003).

As estruturas de concreto armado necessitam de reforços ou reparos, a partir do momento em que as fissurações, as vibrações e as deformações forem superiores aos limites estabelecidos por norma, ou quando ocorrer um acréscimo no carregamento. Leva-se em conta alguns fatores que influenciam diretamente os danos causados nas estruturas, podendo-se citar: ausência de qualidade técnica na execução, má utilização, detalhamentos e projetos incompletos, utilização de modelos de cálculos incorretos, ações relevantes desconsideradas, falta de controle

dos materiais a serem empregados, qualidades dos materiais e a falta de manutenção. Deve-se ainda levar em conta os fatores relacionados com o meio ambiente, os mais destacados são: sismos, meio ambiente agressivo, cheias e outras. Em relação à ação humana: carregamentos que propiciam fortes impactos (explosões) e incêndio (SALLABERRY, 2005).

No caso das estruturas bem projetadas, construídas, e perfeitamente utilizadas, mesmo assim podem vir a ocorrer alguns sistemas patológicos. Nos dias atuais vem crescendo os casos de estruturas que necessitam de aumento na capacidade portante. No entanto, o conhecimento do procedimento e das técnicas de recuperação ou reforço é de fundamental importância para que a estrutura volte a sua capacidade portante de origem, no caso de recuperação, ou sua capacidade de carga aumentada, no caso de reforço (SOUZA; RIPPER, 1998).

Mesmo com uma manutenção de qualidade as estruturas e seus materiais deterioram-se, sendo essa, no limite irreversível, podendo atingir níveis de desempenho insatisfatório variando em função do tipo de estrutura. No acontecimento de falhas de projeto e de execução de uma obra, já iniciam as suas vidas de forma insatisfatória, podendo outras chegarem ao final de suas vidas úteis projetadas e ainda mostrarem um bom desempenho. Analisando o fato de uma estrutura em algum momento apresentar-se com desempenho insatisfatório não significa que ela esteja essencialmente condenada, com intervenções técnicas é possível que a estrutura seja reabilitada (SOUZA; RIPPER, 1998).

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Testar o comportamento mecânico de vigas de concreto com armadura mínima através de ensaios experimentais, aplicando a técnica de reforço à flexão com compósito contendo fibras de juta na parte tracionada.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

a) Comparar as deformações das barras de aço da viga de referência e da viga reforçada.

- b) Comparar a deformação do concreto da viga de referência e da viga reforçada.
- c) Comparar o deslocamento vertical da viga de referência e da viga reforçada.
- d) Verificar a abertura de fissuras durante o processo de carregamento.
- e) Analisar a correlação dos dados experimentais com os teóricos.

### **1.3 Justificativas**

O estudo e execução dos diferentes métodos de reforço estrutural aceita que, estruturas que estejam danificadas por algum sintoma patológico possam ser reabilitadas pelas técnicas de reforço, assim sendo, as estruturas recebem um aumento na capacidade portante, possibilitando, assim, ter um acréscimo de carregamento, delimitado pelos cálculos estruturais.

Nesse contexto, vale destacar que a utilização de fibras naturais de origem vegetal, para reforço estrutural, propicia algumas vantagens em relação a outros tipos de reforços. Utilizando essas fibras a técnica torna-se mais econômica comparada com o uso dos métodos de fibras sintéticas, pois as fibras vegetais são encontradas em abundância na natureza em todo o nosso país. Além disso, é um material biodegradável, de baixa densidade e não é prejudicial à saúde.

Os materiais cimentícios reforçados com fibras vegetais, possuem um grande potencial para fabricação de placas planas e corrugadas para elemento de cobertura, painéis divisórios e revestimentos externos. Estes compósitos eram produzidos até pouco tempo com a utilização de fibras de amianto, porém, devido à natureza cancerígena dessa fibra o material não é mais fabricado. Assim sendo, várias alternativas começaram a ser estudadas para a substituição das fibras de amianto por fibras vegetais como elemento de reforço. Devido à baixa densidade, alta resistência específica e módulo de elasticidade elevado, essas fibras apresentam-se como uma boa alternativa (MELO FILHO, 2012).

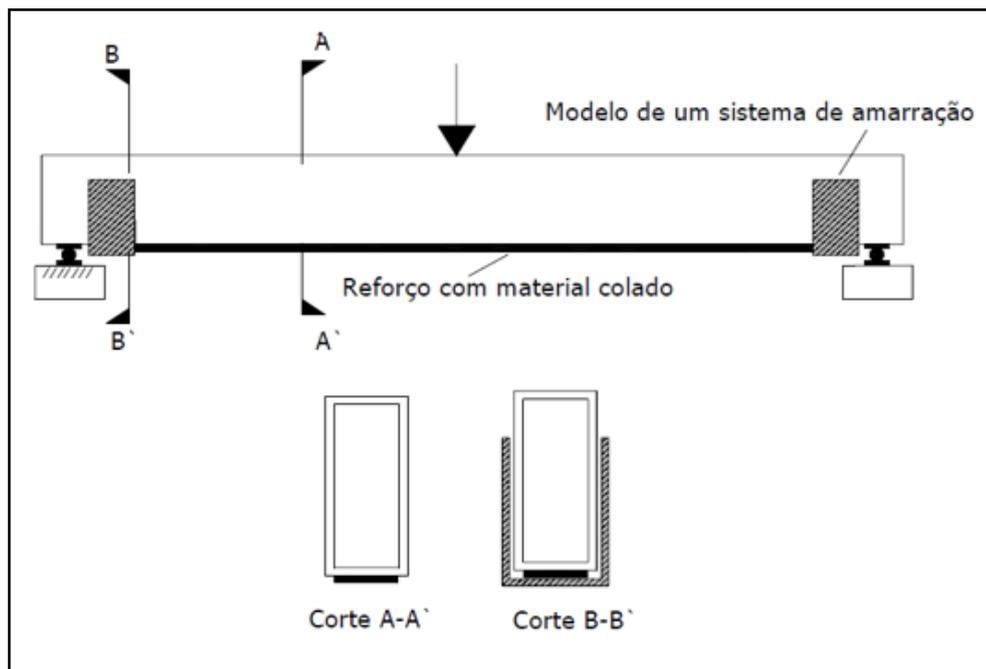
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Reforço à flexão por colagem de material

Analisando as técnicas de reforço de estruturas de concreto armado, o método de colagem de materiais apresenta alta eficiência, fácil execução e o aumento irrelevante nas dimensões do elemento estrutural (ARAÚJO, 2002).

A técnica para reforço à flexão de vigas de concreto armado envolve basicamente placas de aço ou de polímeros reforçados com fibras (PRF) coladas na face da viga que sofrem esforços de tração (ver Figura 1). É um método eficiente, pois o aumento do peso e das dimensões da viga reforçada são insignificantes, e ele é executado com facilidade (SANTOS, 2006).

Figura 1 – Reforço à flexão de vigas por materiais colados com um sistema de amarração



Fonte: Santos (2006, p.6)

Os reforços estruturais podem sofrer ruptura frágil por destacamento ou descolamento devido ao fato de chapas de aço e compósitos serem colados nas vigas de concreto armado. Essa colagem possui pontos críticos nos bordos das chapas pela grande concentração de tensões e deve-se realizar uma proteção contra incêndio e outros agentes agressivos. Cada material utilizado tem o seu

problema com os agentes agressivos, no caso da chapa de aço podem ocorrer corrosão e raios ultravioletas para os compósitos de fibra de carbono (SANTOS, 2006).

Para realizar a colagem do reforço, utilizam-se adesivos que devem apresentar resistência à tração e ao cisalhamento superiores às do concreto. A aplicação requer cuidados na espessura e no espalhamento do adesivo para evitar que o reforço sofra um descolamento. Para que não ocorra ruptura frágil por descolamento ou destacamento do reforço, existem sistemas de amarrações especiais que vem aprimorando-se através de estudos técnicos que comprovam sua eficiência, conforme mostrado na Figura 1 (SANTOS, 2006).

### **2.1.1 Chapas de aço coladas**

Na década de 60, foram realizados os primeiros estudos sobre chapas de aço para reforço de estruturas de concreto armado, desde então, são realizadas pesquisas visando à melhoria da técnica que vem sendo bastante utilizada. A utilização de chapas de aço coladas com a função de reforço de vigas sujeitas à flexão, tem boa popularidade e facilidade de aquisição de material tornando-se uma técnica mais econômica em relação aos compósitos de fibras de carbono (SANTOS, 2006).

Segundo Reis (1998), a colagem de chapas de aço contém inúmeras vantagens e todas são proporcionadas pela resina epóxi. Nota-se, que uma das mais importantes é a união do aço com o concreto e é através da resina que a armadura suplementar pode ser aderida ao elemento estrutural que necessita de reforço. As principais vantagens dessa técnica são:

- a. rapidez na execução;
- b. não utilização de materiais molhados ou úmidos;
- c. ausência de vibrações e baixo nível de ruídos;
- d. não há necessidade de instalações auxiliares importantes;
- e. o acréscimo da seção é muito pequeno;
- f. pouca interferência no uso da estrutura durante a execução da reabilitação.

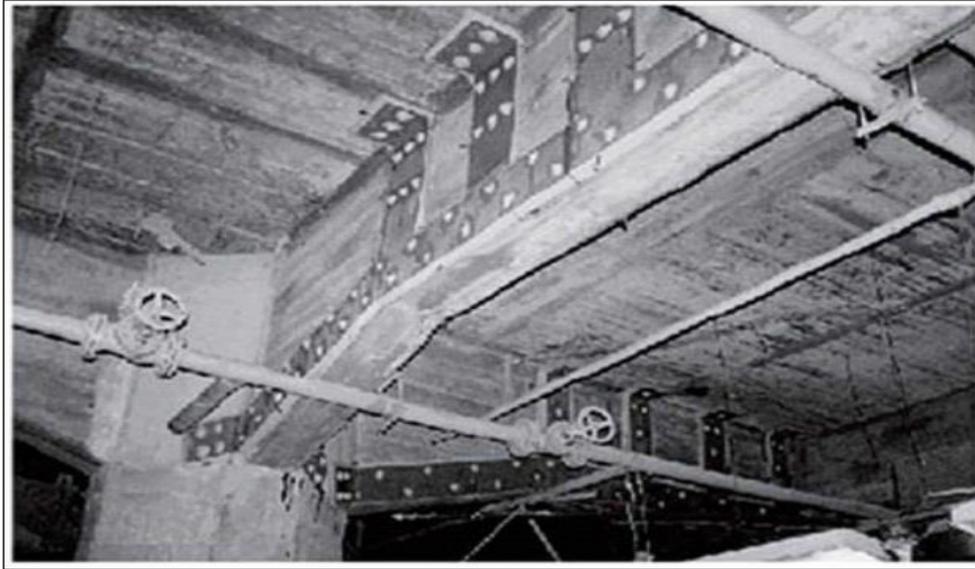
De acordo com Santos (2006), alguns estudos revelam que em um longo período de exposição, ocorre à corrosão das chapas de aço, onde o caso crítico é entre a chapa e o adesivo, comprometendo a ligação chapa/adesivo/concreto. Através da literatura pesquisada nota-se que as principais desvantagens dessa técnica são:

- risco de corrosão na ligação do aço-adesivo, fato impossível de ser visualizado;
- as chapas de aço contem baixa resistência ao fogo;
- necessitam de escoramento, na maioria das vezes em locais de difícil acesso. Dificuldade na colagem devido ao peso das chapas;
- necessidade de realização de juntas de ligação entre uma chapa e outra, pois as dimensões são limitadas;
- deve ser executar algum método de proteção contra incêndio e corrosão;
- concentrações de tensões nos bordos das chapas podendo ocorrer o descolamento das mesmas.

Para a execução do método ter sucesso, na superfície de concreto onde será aplicado o reforço, deverá ser feita uma remoção da camada de cobrimento da viga e limpeza do local. Deve-se lixar a superfície da chapa de aço para retirar escaras de oxidação e eliminar os óleos e gorduras existentes (VIANA, 2004). Em seguida, deve-se proteger as superfícies a serem coladas com filme autocolante adequado, prevenindo contra qualquer agressão ambiental e ações desfavoráveis durante o transporte, manuseio, armazenagem e aplicação das chapas, depois de aplicar a resina, deve-se tomar cuidado na hora da colagem para que ocorra o posicionamento certo das peças, no entanto, para as ocasionais soldas, estas só deveram ser realizadas depois da colagem (SOUZA; RIPPER, 1998).

Durante a aplicação, as chapas devem ser submetidas a uma rápida pressão uniforme, para que o excesso de resina, por acaso existente, seja expulso. Esta pressão poderá ser aplicada por escoras de madeira ou de aço, o sistema de escoramento só deverá ser retirado após o total endurecimento da resina, sendo que o tempo de endurecimento dependerá das características da cola e da temperatura ambiente (SOUZA; RIPPER, 1998).

Figura 2 – Reforço por adição de chapas metálicas

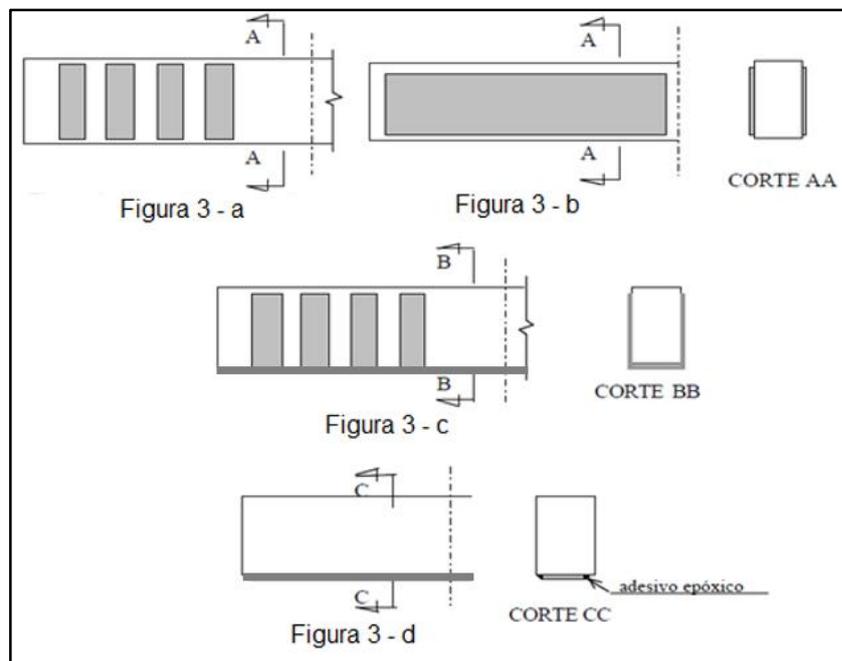


Fonte: Souza e Ripper (1998, p.151)

As chapas podem ser coladas de duas maneiras, nas faces laterais das vigas para dar mais resistência ao cisalhamento ou nas faces inferiores, aumentando à resistência da viga a flexão. Se for necessário reforçar a viga ao cisalhamento a altura das chapas não deve exceder a altura da secção transversal da viga a reforçar (FERREIRA, 2009).

Se for necessário reforçar a viga ao cisalhamento é recomendado a utilização de chapas de aço em tiras (Figura 3 - a) permitindo um melhor estudo e visualização do processo de fissuração da viga em relação as chapas contínuas (Figura 3 - b), além de evitar o desperdício de material tornando o método mais econômico para o reforço à flexão, o ideal é utilizar chapa com largura inferior à largura da viga e realizar um acabamento nas extremidades com adesivo, evitando a penetração da água (Figura 3 - d). A Figura 3 - c ilustra o reforço à flexão e ao cisalhamento (VIANA, 2004).

Figura 3 – Reforços executados através de chapas de aço



Fonte: Viana (2004, p.5)

As chapas de aço e a resina epóxi devem ter espessura mínima de 1,5 mm e máxima de 3,0 mm para casos que necessitam de chapas de aço com maior espessura que o recomendado, e deve-se utilizar métodos especiais de ancoragem, assim, a espessura máxima da chapa é de 10 mm, pois, quanto mais espessa, menor a flexibilidade, dificultando o comportamento em relação as irregularidades do concreto. Para chapas muito finas o problema é o empenamento, dificultando a colagem (REIS, 1998).

Esse método pode ser empregado em diversos tipos de obras, sendo de pequeno e de grande porte, desde obras usuais até pontes e viadutos (SANTOS, M. P., 2008). Além disso, segundo Beber (2003), ainda ocorrem restrições de projetos que podem impedir a execução de algumas alternativas de reabilitação, através do ponto de vista estrutural e de funcionalidade.

### 2.1.2 Polímeros reforçados com fibra

Os (PRF) polímeros reforçados com fibras são constituídos por dois componentes, um deles é o componente estrutural (fibra de alta resistência) e o

outro é o componente matricial (resina polimérica). Sendo que os polímeros são materiais homogêneos, anisotrópicos com comportamento elástico até a ruína (SALLABERRY, 2005).

Em relação a todos os tipos de compósitos os PRF atraíram e vêm atraindo vários pesquisadores da engenharia estrutural. Vários centros de pesquisa difundidos por todo o mundo vêm se especializando e desenvolvendo-se para gerar novas alternativas de reforço estrutural para o concreto armado, tendo como objetivo principal estender a vida última das estruturas (BEBER, 2003).

De acordo com Santos (2006), a utilização dos polímeros reforçados com fibras em estruturas de concreto armado são alternativas de reforços em casos onde os materiais que sofrem esforços de tração, aço e concreto, não são adequados.

A troca das barras de aço do concreto armado por fibras reforçadas com polímeros tem sido limitada a situações muito específicas, entretanto, para situações que ocorrem fenômenos como a ressonância magnética, (em alguns hospitais), a aplicação de PRF torna-se uma técnica quase exclusiva para as estruturas, pois nessas situações o emprego do aço é inadmissível (SOUZA; RIPPER, 1998).

Para que haja sucesso no reforço estrutural, os materiais compósitos dependem do tipo e quantidade de fibras aplicadas numa determinada direção (SALLABERRY, 2005); da matriz, que visa abranger completamente as fibras; e do adesivo responsável pela colagem, como pode ser visto a seguir:

#### **a) Fibras**

O material responsável pela resistência e rigidez do compósito são as fibras, que podem variar em função do tipo, tamanho, grau de concentração e disposição na matriz. A maior resistência e rigidez do compósito depende do posicionamento das fibras, o mais eficaz é posicioná-la na direção longitudinal da viga, ao se afastar a resistência vai diminuindo até chegar à direção perpendicular onde corresponde a seção crítica em relação a resistência e rigidez do compósito. Estão disponíveis no mercado vários tipos de fibras com propriedades diversas, as mais adequadas para o reforço estrutural em concreto armado são as fibras longas (contínuas) e de pequeno diâmetro, pela boa capacidade de transferir as tensões e um bom aproveitamento de suas propriedades (ARAÚJO, 2002).

As fibras contínuas mais utilizadas para reforços em estruturas são as de vidro, aramida (ou Kevlar®) e as de carbono. Cada tipo de fibra contém certa resistência mecânica, podendo ocorrer variações no mesmo tipo de fibra (SALLABERRY, 2005).

Segundo Santos (2006), através destas fibras se adquirem três diferentes compósitos reforçados chamados de: polímeros reforçados com fibras de aramida (PRVA); polímeros reforçados com fibras de vidro (PRFV); polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC). Na Tabela 1 constam as variações de resistência entre os tipos de fibras diferentes e entre as mesmas, e na Figura 4 pode-se observar o diagrama tensão-deformação dos principais tipos de fibras.

Tabela 1 - Propriedades típicas dos principais tipos de fibra, traduzida por Araújo, 2002

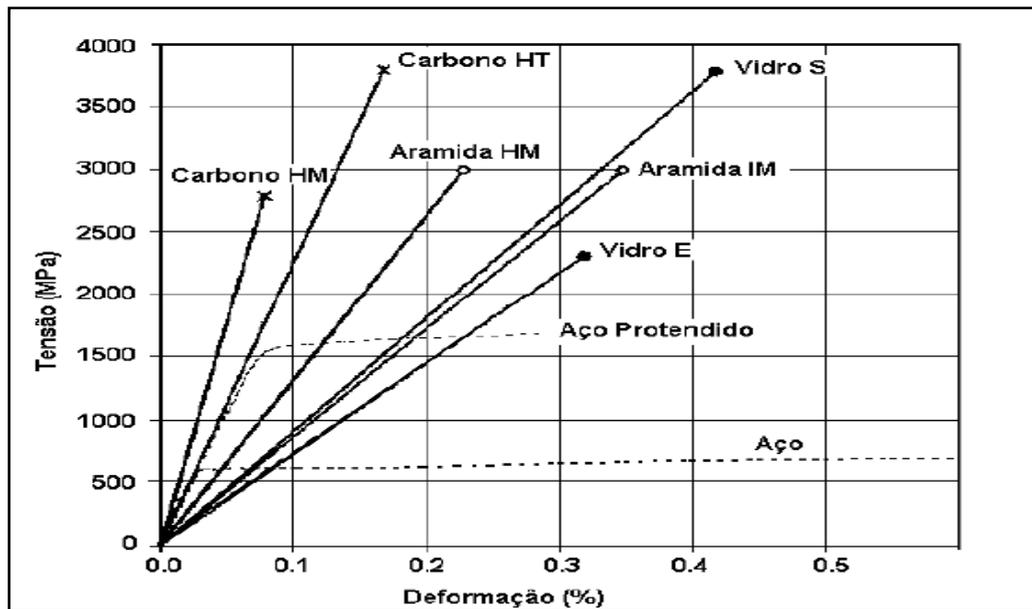
Tipo de Fibras		Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação última (%)	Peso específico (Kg/m <sup>3</sup> )	Diâmetro da fibra (µm)
Carbono (C)	Tipo PAN - com alta resistência	3500 - 5000	200 - 260	1,2 - 1,8	1700 - 1800	5 - 8
	Tipo PAN - com alto módulo de elasticidade	2500 - 4000	350 - 700	0,4 - 0,8	1800 - 2000	5 - 8
	Tipo Pitch - com alto módulo de elasticidade	3000 - 3500	400 - 800	0,4 - 1,5	1900 - 2100	9 - 18
Aramida (A)	Com módulo de elasticidade intermediário	2700 - 4500	60 - 80	4,0 - 4,8	1400 - 1450	12 - 15
	Com módulo de elasticidade	2700 - 4500	115 - 130	2,5 - 3,5	1400 - 1450	12 - 15
Vidro (G)	Aluminoborosilicato de cálcio (E)	1800 - 2700	70 - 75	3,0 - 4,5	2550 - 2600	5 - 25
	Aluminosilicato de magnésio (S)	3400 - 4800	85 - 100	4,5 - 5,5	2550 - 2600	5 - 25

PAN = fibras obtidas por pirólise e oxidação de fibras sintéticas de Poliácridonitrila

Pitch = fibras obtidas pela pirólise do petróleo destilado ou do piche convertido em cristal líquido

Fonte: Matthys (2000, p.66, tradução própria)

Figura 4 – Diagrama tensão-deformação dos principais tipos de fibra, traduzida por Araújo, 2000



Fonte: Matthys (2000, p.67); Araújo (2002, p.6)

Comparando os três tipos de fibras citadas, a de carbono contém maior resistência e rigidez devido ao processo de carbonização de fibras de polímeros orgânicos, suas propriedades dependem da estrutura molecular adquirida. Depois de passar pelo processo de produção, em elevadas temperaturas, apresentam átomos de carbono perfeitamente alinhados ao longo da mesma, tornando o produto mais resistente (SALLABERRY, 2005).

## b) Matriz

O objetivo principal da matriz polimérica é abranger completamente as fibras proporcionando alta proteção à abrasão, à umidade, à oxidação e à agentes agressivos, de natureza química e biológica, tendo como responsabilidade manter as fibras posicionadas e transferir as tensões (BEBER, 2003).

A escolha da matriz polimérica influencia o custo final do PRF. Existem dois tipos de resinas que a matriz polimérica pode se basear: resina termoplástica (thermo plastic resins); resinas termo endurecíveis (thermo setting resins) (ARAÚJO, 2002).

Outro tipo de matriz bastante utilizado na formação de materiais compósitos, é a matriz de base cimentícia. Na indústria da construção civil o maior interesse é aumentar a tenacidade ou melhorar as propriedades físicas e mecânicas da matriz à base de cimento, estes objetivos estão sendo alcançados através de diversos estudos, porém, é necessário um determinado grau de cautela quanto à questão da compatibilidade matriz-fibra e quanto a questão da durabilidade (BERNARDI, 2003).

### **c) Adesivo**

O adesivo ou cola, é uma substância responsável pela colagem de matérias a elementos estruturais já existentes ao longo de uma superfície de ligação e pode apresentar-se sob a forma de um líquido filme ou pasta (BEBER, 2003).

As resistências à tração e ao cisalhamento do adesivo utilizado na colagem do reforço devem ser superiores às do concreto. O espalhamento e a espessura adequada são fundamentais para que não ocorra o deslocamento do reforço (SANTOS, 2006).

Os adesivos encontrados no mercado podem ser à base de epóxi, de acetato de polivinila (PVA) ou acrílico. Os adesivos de base epóxi são polímeros compostos pela mistura de dois componentes, monômeros e catalisador. Após a mistura, o material continua com viscosidade durante certo tempo, essa etapa denomina-se "potlife", depois da fase da viscosidade o material endurece e se solidifica, podendo alcançar elevada resistência mecânica. Deve-se tomar cuidado com a mistura dos componentes, para tornar a composição homogênea, o uso de agitador mecânico ou manual é indispensável (SOUZA; RIPPER, 1998).

Já os adesivos a base de PVA, apresentam boa resistência as intempéries e são utilizados na construção civil em tintas, membranas impermeabilizantes, revestimentos, principalmente no preparo de chapisco e a confecção de argamassas, pois, quando diluídos na água de amassamento, a argamassa torna-se mais aderente aos substrato (SOUZA; RIPPER, 1998)

Os polímeros acrílicos são compostos resultantes da polimerização de monômeros, são ésteres do ácido acrílico ou do ácido metacrílico, proporcionam transparência e ótima resistência química. São utilizadas na construção civil como placas transparentes semelhantes ao vidro, painéis de revestimento de parede, em

tintas, impermeabilizantes e como adesivos, tendo como aplicação semelhante à dos adesivos de base PVA (SOUZA; RIPPER, 1998).

### **2.1.2.1 Fibras de carbono**

A utilização de materiais compósitos ganhou força na indústria naval, aeroespacial e automobilística. Contudo, o ingresso na construção civil foi mais demorada tendo em vista a falta de conhecimento técnico na fase inicial, a ausência de normas técnicas, além do seu alto custo. Porém, nos últimos anos os meios técnicos internacionais e nacionais, realizaram um grande esforço para avaliar o verdadeiro potencial da sua aplicação no reforço estrutural (RELVAS, 2003).

As fibras de carbono derivam do processo de carbonização de fibras de polímeros orgânicos, suas características mecânicas variam de acordo com a estrutura molecular obtida. Para a produção das fibras de carbonos as mesmas devem passar por um processo em elevadas temperaturas, atingindo até 3.000°C, já as fibras sintéticas derretem ou evaporam, no entanto, as fibras de acrílico permitem que sua estrutura molecular fique estabilizada após a carbonização, ficando os átomos de carbono alinhados ao longo das fibras de origem. O agrupamento de um conjunto de dezenas de milhar desses filamentos, obtém-se a espessura de um cabelo e proporcionam extraordinárias características mecânicas. Dependendo do arranjo microestrutural das fibras, pode-se adquirir um elevado módulo de elasticidade e uma excepcional resistência à tração (SOUZA; RIPPER, 1998).

Os materiais compósitos de PRFC (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono) são basicamente constituído por dois componentes com características diferentes. O primeiro são as fibras de carbono, sua estrutura apresenta-se em forma de filamentos de pequeno diâmetro com resistência a tração e módulo de elasticidade elevado, pois sua densidade é baixa, seu comportamento é frágil, elástico e sem patamar de escoamento. O segundo é a matriz, que deve ter um comportamento dúctil e excelentes características em relação à durabilidade (RELVAS, 2003).

De acordo com Araújo (2002), a durabilidade, a leveza e o alto módulo de elasticidade dos PRFC podem chegar a 800 GPa. O custo do compósito chega a ser dez vezes maior que o do aço, sendo assim, representa 20% do custo total da obra de reforço, porém, como é um sistema que proporciona rapidez, facilidade e limpeza

na execução pode compensar o custo do compósito com essas vantagens (ARAÚJO, 2002).

As fibras de carbono podem ser reproduzidas de várias formas comerciais, normalmente passam pela sua incorporação a matriz de resina poliméricas, com adição de metais, de modo a conseguir formas diferentes como perfis, barras, laminados, tecidos bidirecionais e folhas flexíveis unidirecionais (SOUZA; RIPPER, 1998).

O baixo peso específico do compósito facilita o transporte e manejo na hora da instalação. Podem ser encontrados em vários tipos, cada um com sua vantagem, os rolos eliminam a necessidade de emendas pois a disponibilidade em dimensões é quase ilimitada. No entanto, as chapas coladas contém um comprimento limitado, necessitando de emendas. As fibras são as principais responsáveis pela ação estrutural dos materiais compósitos PRFC e têm como função garantir a resistência e rigidez, portanto, a orientação, a forma, o grau de concentração e a composição química, influenciam diretamente no comportamento estrutural da fibra (RELVAS, 2003).

#### **2.1.2.2 Fibras de vidro**

As fibras de vidro são empregadas em concretos, acompanhadas a uma matriz de resina poliéster, tendo uma intensa aplicação em produtos industriais, como carrocerias de veículos, piscinas, barcos, reservatórios, etc. São compostas por filamentos, aglomeradas em grupos de 200 a 400 filamentos, constituindo cordoalhas. É importante destacar que essas cordoalhas podem ser cortadas em diversos comprimentos, podendo também ser combinadas formando um tecido, dependendo da aplicação, torna-se uma boa opção. Estas fibras em contato com a pasta de cimento podem sofrer uma perda de resistência, ocasionada pelos álcalis composto na pasta. Pode-se controlar a redução de resistência utilizando fibras resistentes a álcalis, fibras com um revestimento orgânico, ou ainda pela redução do grau de umidade ambiental. Como essa redução de resistência torna-se um problema a utilização deste material para reforço, porém, já estão sendo estudadas em centros de pesquisas para obter mais conhecimento na variação das propriedades do concreto com fibras de vidro (SOUZA; RIPPER, 1998).

A utilização das fibras de vidro tem sido predominante em muitas aplicações na área da engenharia civil, pois esses materiais contêm um custo econômico equilibrado e específicas propriedades de resistência. Os compósitos desenvolvidos por fibras de vidro têm como nomenclatura GFRP (glass fiber reinforced polymer) ou PRFV (polímero reforçado com fibras de vidro), e são divididos em:

- E-Glass: Sua composição química é formada por cálcio, alumina e silicato, é empregada basicamente em aplicação elétricas. Responsável por cerca de 80 a 90% da produção comercial de fibras de vidro. Além dessas definições, é importante ressaltar que sua formulação química provém de maior resistência à corrosão pela maioria dos ácidos.

- S-Glass: Apresenta uma formulação química à base de alumínio e silicato de magnésio, atinge alta resistência e maior desempenho em elevada temperatura. As fibras S-Glass comparadas com outras fibras de vidro possuem um custo mais elevado e é produzida sobre controle de qualidade específico para atender às especificações militares.

- C-Glass: Tendo composição química à base de boro-silicato, é basicamente utilizada em indústrias químicas onde é exigido um contato com ácidos altamente corrosivos;

No comércio pode-se encontrar as fibras de vidro em diversos formatos, sendo eles:

- Fitas: Forma mais básica de fibras contínuas, sendo fornecidas em rolos.
- Esteira: Sua modulação é realizada através de uma matriz à base de vinil ou poliéster, apresenta um arranjo aleatório.
- Trama: O produto é definido pelo entrelaçamento das fitas com direções pré-determinadas, que pode ser a 0 e 90 graus; de 0 graus, 45 graus, e de outras orientações dependendo do processo de fabricação. É comercializada em relação do seu peso por m<sup>2</sup> (ACI, Committee 440, 1996).

### **2.1.2.3 Fibras de aramida**

As fibras de aramidas são produzidas a partir de parafenileno tereftalamida, contém uma estrutura fibrilar anisotrópica, de modo que as fortes ligações covalentes apresentam-se no sentido transversal sendo reticuladas por pontes de hidrogênio mais fracas proporcionando maior resistência e rigidez no sentido

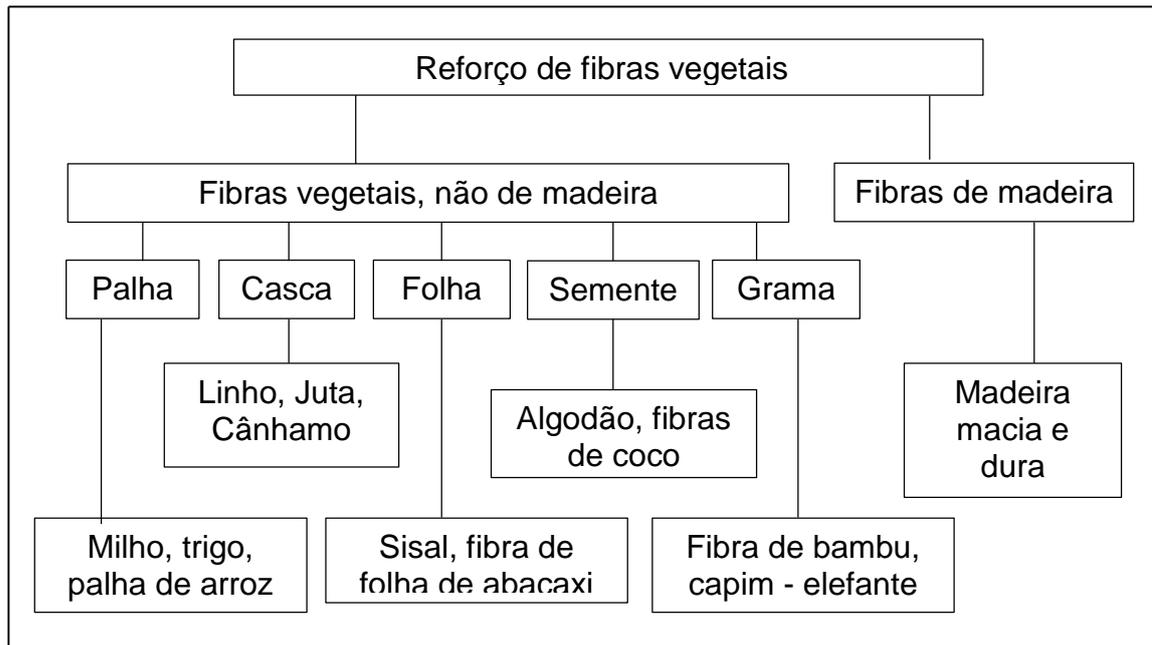
longitudinal das fibras. Além dessas definições, é importante ressaltar que, mesmo tendo alta resistência a tração as fibras de aramida apresentam também uma alta absorção de energia, dureza, resistência de amortecimento, resistência à fluência, baixa condutividade térmica, boa estabilidade térmica, moderada a boa resistência química, baixa resistência a compressão e falha por fadiga. Sobre compressão, as fibras apresentam um comportamento linear e dúctil, além disso, geralmente apresentam uma baixa resistência contra ácidos, resistência moderada contra álcalis e uma pobre resistência contra radiação ultravioleta. As fibras devem ser adicionadas em uma matriz tecnicamente escolhida para oferecer proteção adicional (MATTHYS, 2000).

Os nomes comerciais mais comuns para as fibras de aramida são Kevlar™ e Nomex™. Para o primeiro nome citado existem várias classes, sendo elas, Kevlar 29, 49 e 149, apresentando diferentes comportamentos mecânicos. Mesmo que as aramidas são termoplásticas, elas são, no entanto, resistentes à combustão. Sua mais frequente aplicação é em compósitos de matriz polimérica, tendo como grande fabricação em coletes à prova de bala, artigos esportivos, pneus, cordas, vasos de pressão e como um substituto para o amianto em freios automotivos (CALLISTER, 1997).

#### **2.1.2.4 Fibras vegetais**

As fibras vegetais são classificadas de acordo com sua origem como mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Classificação das fibras vegetais (tradução própria)



Fonte: Mohanty, Misra e Drzal (2005)

As fibras naturais do caule ou das folhas são reconhecidas como fibras duras e são as mais utilizadas como reforço em compósitos poliméricos. O emprego de compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais surgiu na década de 60, não sendo uma técnica nova, no entanto, nos anos de 70 e 80, as fibras vegetais foram substituídas pelas fibras sintéticas comprovando um melhor desempenho e equilíbrio econômico. Na década de 90, iniciou-se uma visão ecológica ressurgindo o interesse em materiais sustentáveis e renováveis, sendo um deles as fibras vegetais. Outro ponto importante a ser observado são os aspectos tecnológicos e econômicos deste material. Como as fibras vegetais são naturais de regiões mais pobres, a questão social tem grande força na argumentação para o incentivo da produção desses compósitos. A realização de um compósito com boas propriedades mecânicas dependem de alguns fatores, tais como: fração volumétrica, razão de aspecto, distribuição e sentido da fibra, aderência entre a matriz com a fibra e a composição química da matriz polimérica e das fibras (SILVA, 2003).

Tem como desvantagens a baixa temperatura de processamento do compósito, tendo como limite aproximadamente 200°C. Na utilização de compósitos com resinas termorrígidas essa particularidade não é limitante, pois, quando ocorre à cura das resinas, as temperaturas são inferiores que 200°C. Além dessa desvantagem também se pode citar a falta de uniformidade de propriedades que

estão ligadas a origem das fibras, a forma de plantio, a habilidade manual durante a colheita e o inchaço das fibras causadas pela grande absorção de umidade. Realizando modificações químicas ou executando uma boa colagem na interface fibras/matriz, a umidade das fibras pode ser reduzida.

Na Tabela 2 são apresentados dados das propriedades mecânicas e características de fibras vegetais e fibras de reforço convencionais.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas e características das fibras vegetais e fibras convencionais de reforço, tradução própria

Fibra	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Alongamento (%)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade GPa)
Algodão	1,5 – 1,6	7 - 8	287 – 597	5,5 – 12,6
Juta	1,3	1,5 – 1,8	393 – 773	26,5
Linho	1,5	2,7 – 3,2	345 – 1035	27,6
Cânhamo	.....	1,6	690	.....
Rami	.....	3,6 – 3,8	400 – 938	61,4 – 128
Sisal	1,5	2,0 – 2,5	511 – 635	9,4 – 22,0
Fibra de coco	1,2	30	175	4,0 – 6,0
Viscose (cabó)	.....	11,4	593	11
Madeira macia	1,5	.....	1000	40
E - Glass	2,5	2,5	2000 – 3500	70
S - Glass	2,5	2,8	4570	86
Aramida (normal)	1,4	3,3 – 3,7	3000 – 3150	63,0 – 67,0
Carbono (padrão)	1,4	1,4 – 1,8	4000	230,0 – 240,0

Fonte: Bledzki e Gasson (1999, p.225); Matthys (2000)

### **a) Fibras de Juta**

De acordo com A.B.B.A (2001), a juta (*Corchorus Capsularis*), é um arbusto com cerca de 3 m de altura cultivado nas regiões ribeirinhas da Amazônia. A parte aproveitável do arbusto são as fibras têxteis extraídas do caule e aproveitadas na fabricação de inúmeros produtos usados no nosso dia a dia. É uma fibra completamente ecológica e a espessura do seu caule é aproximadamente 20 mm, suas plantações ocorrem em climas úmidos e tropicais. Tem como vantagens o seu baixo custo, alta produção e variados métodos de aplicações. Em relação à escala mundial a juta é superada apenas pelo algodão, em produção. A época de plantio fica entre agosto e janeiro, tendo um ciclo de plantio de seis meses que acontecem com os períodos de cheia e vazante dos rios, como são plantadas nas calhas de rios, não gera desmatamento (PIRES, 2009).

Segundo Pires (2009), para a produção da fibra de juta não é utilizado nenhum tipo de produto químico e a duração dessa produção varia em torno de cinco dias.

O Processo de preparação da fibra de juta será explanado a seguir:

- após a colheita a juta deve ser lavada em água corrente ou parada, etapa conhecida como afogamento ou maceração;
- realizar a separação das fibras com a casca, após deve-se lavar as fibras;
- executar uma segunda lavagem, golpeando as fibras na água;
- estender as fibras em varais para a secagem;
- por fim, as fibras são encaminhadas para o processamento industrial.

Algumas das etapas deste processo podem ser visualizadas nas Figuras 6, 7, 8 e 9 (PIRES, 2009).

Figura 6 – Colheita da juta



Fonte: Folha de São Paulo

Figura 7 – Secagem da fibra de juta



Fonte: Portal Amazônia.com

Figura 8 – Industrialização da fibra



Fonte: Jornal é notícia

Figura 9 – Fardos da fibra



Fonte: Jornal é notícia

A juta é um arbusto auto-sustentável e renovável anualmente, não necessitam de fertilizantes, queimadas ou desmatamento de novas áreas. Tem como nutriente o húmus fornecido pelo próprio rio. Como seu processo é totalmente ecológico, sendo licenciado pela Secretaria da Tecnologia e Meio Ambiente, vai ao encontro da defesa da natureza e de uma vida saudável, sem poluentes ou contaminações (A.B.B.A, 2001).

A produção de juta tornou-se uma das principais atividades econômicas das populações ribeirinhas na região amazônica, gerando muitos empregos para a população, fixando mais de 50 mil famílias ao campo. Atualmente, a produção mundial anual de juta supera os três milhões de toneladas, liderados pela Índia. A produção brasileira já superou as cem mil toneladas anuais no início da década de

80 e hoje prevê crescimento de 15 a 20% ao ano devido ao crescente consumo de produtos com técnicas ecológicas (PIRES, 2009).

A utilização das fibras de juta para compósitos estruturais, geralmente são através de matrizes de resinas termo fixas, pois suas propriedades mecânicas são de alta qualidade proporcionando boa estabilidade dimensional, além da facilidade de processamento. Além dessas definições, é importante ressaltar que, possuem elevada resistência térmica e resistência a ataques químicos. Vários estudos comprovam a importância da interação fibra/matriz propondo diversos tratamentos realizados nas fibras para torná-las mais compatíveis com as matrizes poliméricas, oferecendo uma maior adesão (PIRES, 2009).

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 Introdução**

No programa experimental deste trabalho, foram ensaiadas duas vigas de seção retangular de 15 cm x 30 cm e com 300 cm de comprimento. Uma viga sem reforço (viga de referência), e a outra reforçada à flexão por compósito de fibra de juta, apenas na região de tração.

Para o melhor entendimento dos ensaios, a viga de referência foi chamada de V1Ref, e a segunda viga, denominada com a nomenclatura V2. Para os estudos a viga V2 foi submetida a duas etapas de ensaio; a primeira foi a pré-fissuração (até o limite de abertura de fissura de 0,3mm), sendo reconhecida por V2, e a segunda foi à ruptura com a viga reforçada, denominada de V2R. Ressaltando, os dois testes dizem respeito a mesma viga V2.

A armadura de flexão utilizada foi a mínima, conforme especificado na NBR 6118 (2014), e a armadura transversal foi suficiente para que a ruptura da viga sempre ocorra por flexão.

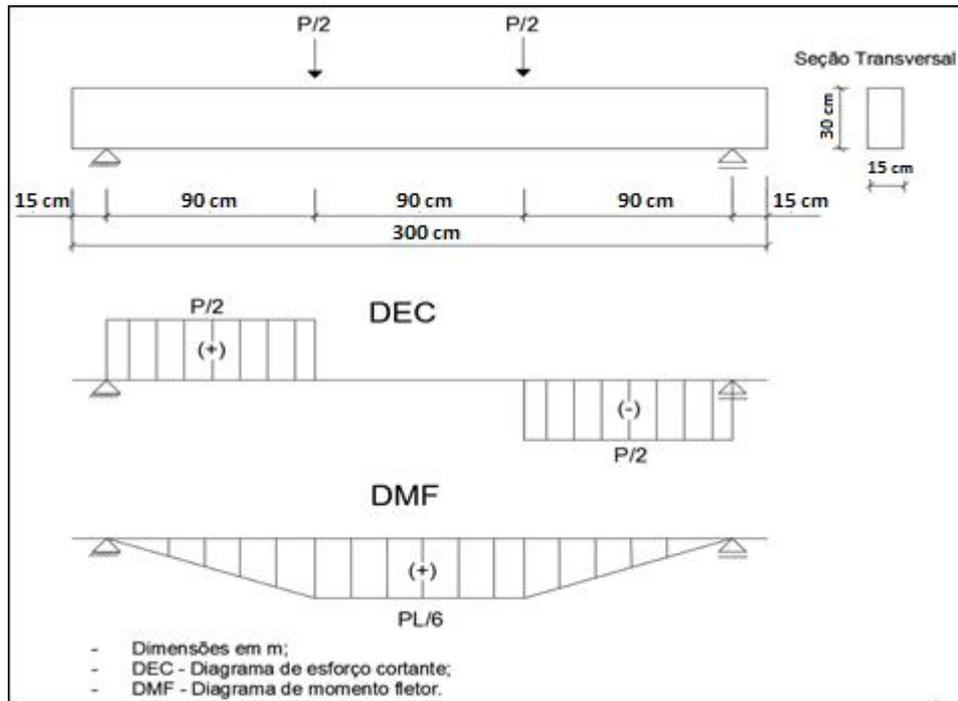
As vigas foram instrumentadas com sensores internos e externos com o objetivo de acompanhar o seu comportamento durante os ensaios.

A seguir serão apresentados os procedimentos utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

#### **3.2 Pré-dimensionamento e características das vigas**

No ensaio as vigas foram bi-apoiadas, sendo um apoio de primeiro gênero e outro do segundo gênero, e em seguida submetidas a duas cargas concentradas afastadas 450 mm do meio do vão da viga, uma para a esquerda e a outra para a direita, com espaçamento de 900 mm entre as duas cargas, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Esquema estrutural utilizado



Fonte: Elaboração própria

Para critérios de dimensionamento foi determinado na Tabela 3 o ambiente para efeito de projeto como Urbana, desse modo, o risco de deterioração da estrutura é pequeno, a classe de agressividade é a II, proporcionando uma agressividade moderada.

Tabela 3 – Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de Projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana <sup>1)2)</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>1)</sup>	Grande
		Industrial <sup>1)2)</sup>	
IV	Muito forte	Industrial <sup>1)3)</sup>	Elevado
		Respingos de maré	

<sup>1)</sup> Pode-se admitir um micro-clima com classe de agressividade um nível mais branda para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

<sup>2)</sup> Pode-se admitir uma classe de agressividade um nível mais branda em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

<sup>3)</sup> Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT, NBR 6118 (2014, p.17)

Sabendo a classe de agressividade e o tipo de estrutura, pode-se observar, através da Tabela 4, os valores do cobrimento nominal. Neste trabalho o cobrimento nominal utilizado foi de 30 mm.

Tabela 4 – Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV <sup>3)</sup>
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje <sup>2)</sup>	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido <sup>1)</sup>	Todos	30	35	45	55

<sup>1)</sup> Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

<sup>2)</sup> Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5 respeitado um cobrimento nominal  $\geq 15$  mm.

<sup>3)</sup> Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal  $\geq 45$  mm.

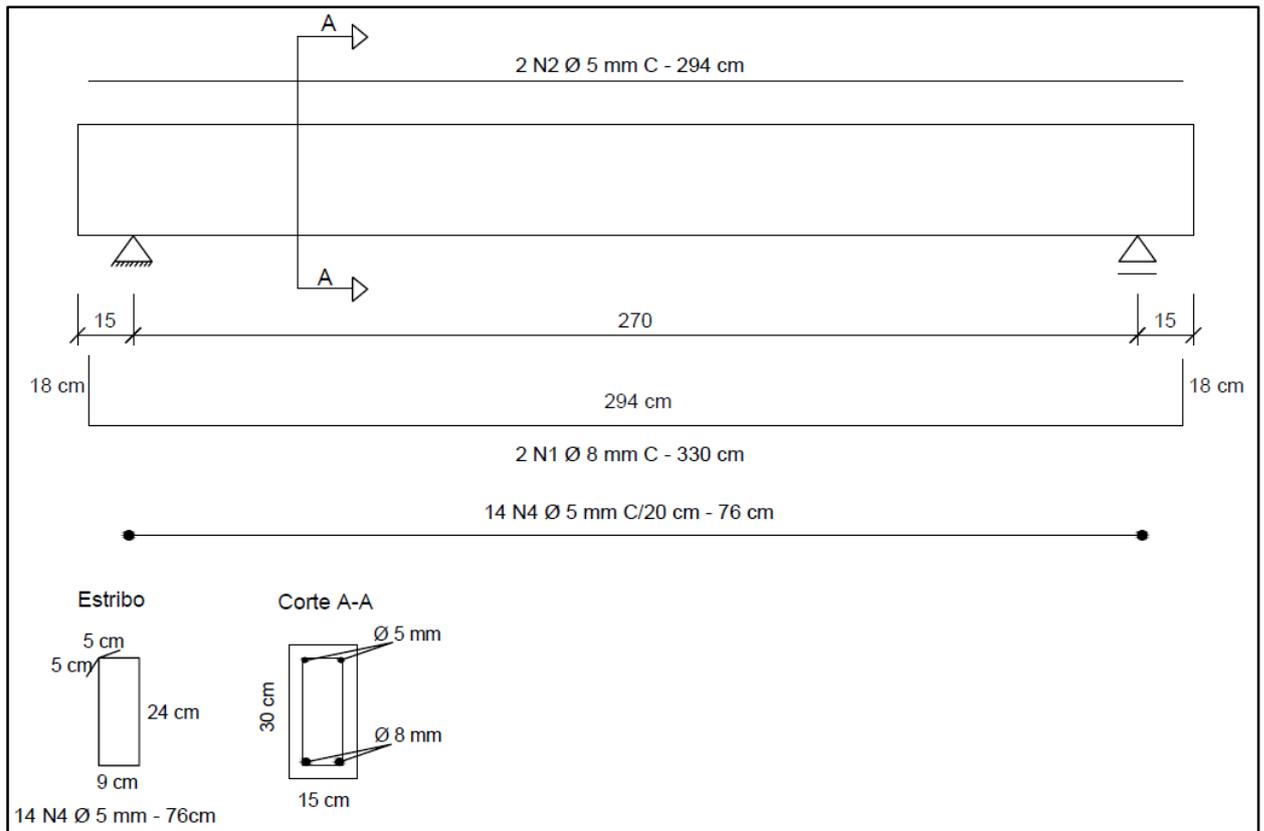
Fonte: ABNT, NBR 6118 (2014, p.20)

Os parâmetros adotados para a viga de referência foram:

- área de aço da seção transversal ( $A_s = 1,00 \text{ cm}^2$ );
- altura da viga ( $h = 300 \text{ mm}$ );
- largura da viga ( $b_w = 150 \text{ mm}$ );

As barras de aço das duas vigas foram detalhadas, com a finalidade de se obter armadura de flexão o mais próximo à armadura mínima, e a armadura transversal, foi suficiente para que a ruptura ocorresse por flexão. O detalhamento das armaduras pode ser visualizado na Figura 11.

Figura 11 – Detalhamento das armaduras das vigas V1Ref e V2

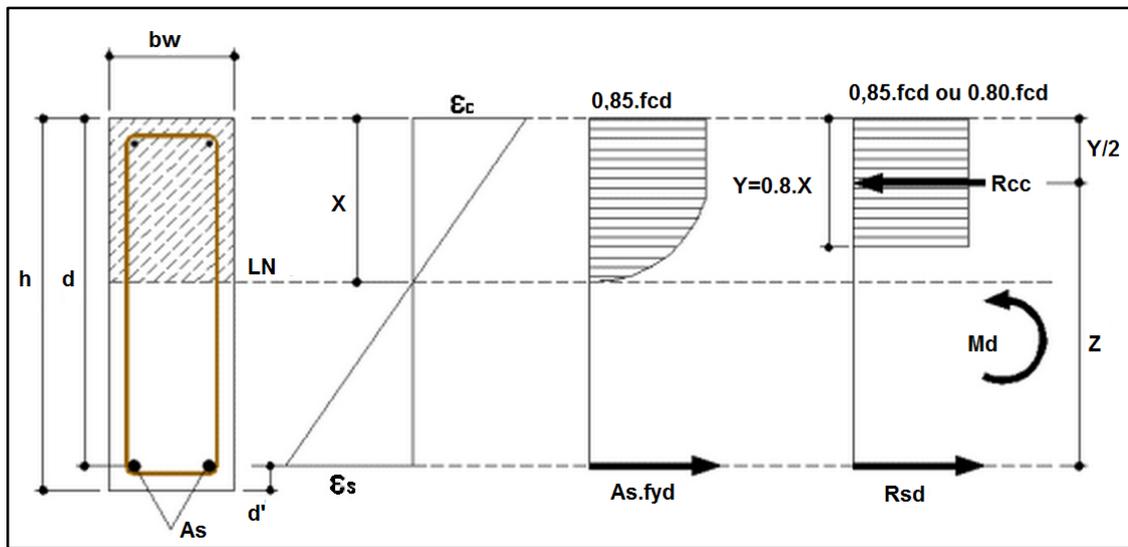


Fonte: Elaboração própria

A viga V2R foi reforçada somente à flexão, com um compósito contendo duas camadas de fibras de juta, com 30 mm de espessura, 150 mm de largura e 2700 mm de comprimento. A viga V1Ref não foi reforçada e serviu como referência para a outra viga.

Através do detalhamento da seção transversal da viga e dos parâmetros obtidos nas Tabelas 3 e 4, foi realizado o cálculo da viga de referência utilizando um  $f_{ck} = 25$  MPa para a obtenção do momento máximo e do carregamento máximo. Com esses dados foi possível obter um controle prévio do comportamento das vigas durante os ensaios. A metodologia de cálculo foi obtida conforme a equação 1, proposta por Figueiredo Filho e Carvalho (2007), com base na Figura 12, que ilustra o diagrama retangular simplificado de tensões e diagrama de deformação da seção da viga segundo a ABNT, NBR 6118 (2014).

Figura 12 - Diagrama retangular simplificado de tensões e diagrama de deformação da seção da viga



Fonte: AltoQi

No dimensionamento da viga V1Ref não foi utilizado nenhum tipo de majoração dos esforços e minoração das resistências dos materiais, então, os resultados encontrados são valores característicos.

> Resultantes das tensões: Para  $f_{ck} \leq 50$  MPa

- no concreto;  $R_c = 0,85 f_{ck} b_w \cdot 0,8 x = 0,68 b_w \cdot x \cdot f_{ck}$

- na armadura;  $R_s = A_s \sigma_s$

> Equações de equilíbrio:

- força;  $R_c = R_s$  ou  $0,68 b_w \cdot x \cdot f_{ck} = A_s \sigma_s$

- momento;  $M_{uk} = R_c (d - 0,4 x)$  ou  $M_{uk} = R_s (d - 0,4 x)$

$$0,68 b_w \cdot x \cdot f_{ck} - A_s \sigma_s = 0 \quad \dots(1)$$

$$0,68 \cdot 15 \cdot x \cdot 2,5 - 1,00 \cdot 50 = 0$$

Em que:

$b_w$  = largura da base da viga: (15 cm);

$d$  = distância entre as fibras mais comprimidas e o centroide da armadura tracionadas: (26,6 cm);

$x$  = posição da linha neutra;

$A_s$  = área de aço calculada da seção transversal da viga: (1,00 cm<sup>2</sup>);

$\sigma_s$  = tensão na armadura longitudinal tracionada: (50 kN/cm<sup>2</sup>);

$f_{ck}$  = resistência característica do concreto à compressão: (2,5 kN/cm<sup>2</sup>).

$M_{uk}$  = momento máximo característico;

Isolando  $x$  na equação (1) obtém-se a altura da linha neutra,  $x = 1,961$  cm. Assim sendo, foi aplicado o valor de  $x$  na equação (2) para obtenção do momento máximo característico.

$$M_{uk} = 0,68 b_w f_{ck} x (d - 0,4 x) \quad \dots(2)$$

$$M_{uk} = 0,68 \cdot 15 \cdot 2,5 \cdot 1,961 \cdot (26,6 - 0,4 \cdot 1,961)$$

Substituído os valores na equação (2), foi encontrado o valor de  $M_{uk} = 12,90$  kN.m. Dessa forma, a carga máxima aplicada referente ao momento máximo calculado é de  $P_u = 28,68$  kN (carga aplicada na viga de transição e dividida para dois pontos na viga de concreto armado de ensaio).

### 3.3 Materiais

#### 3.3.1 Concreto

O concreto utilizado na confecção das duas vigas possui um traço, em massa, de 1: 2,71: 3,58 (cimento: areia: agregado graúdo) e relação água/cimento de 0,6. A Tabela 5 mostra a composição para um m<sup>3</sup> de concreto usado nas vigas.

Tabela 5 – Composição em kg/m<sup>3</sup> do concreto usado nas vigas

<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>
Cimento	300
Areia	814
Brita n° = 0	1074
Superplastificante	2,5
Água	180

Fonte: Elaboração própria

O cimento utilizado na produção das vigas foi o CP II – F. O agregado miúdo usado foi areia lavada, e como agregado graúdo foi empregado a brita 0, visando minimizar as dificuldades nas operações de lançamento e vibração do concreto, evitando ninhos de concretagem. A água utilizada foi a da rede de abastecimento da cidade de Alegrete - RS.

O concreto foi misturado mecanicamente em betoneira com capacidade de até 300 litros, observando-se o tempo de homogeneização dos materiais. Em seguida, foram moldados quatro corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm para cada viga ensaiada.

Decorridas 24h da concretagem, os corpos-de-prova foram desformados e imersos em água até ser realizado os ensaios de compressão (ver Figura 13).

Figura 13 – Cura dos corpos de provas imersos em água



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 14 pode-se observar o ensaio de compressão sendo realizado em um dos corpos-de-prova do concreto das vigas na prensa EMIC PC 150.

Figura 14 – Ensaio de compressão, corpo-de-prova do concreto das vigas



Fonte: Elaboração própria

Pode-se observar na Tabela 6 os valores médios de resistência do concreto à compressão nos 28 dias. Os dados tachados foram excluídos para os demais cálculos, devido a erros de ensaio, apresentaram uma variação grande em relação aos outros.

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de resistência do concreto à compressão nos 28 dias

<b>V1REF</b>		<b>V2R</b>	
Cilindros	MPa	Cilindros	MPa
CP 1	<del>23,6</del>	CP 1	33,2
CP 2	31,9	CP 2	31,3
CP 3	33,1	CP 3	<del>25,0</del>
CP 4	31,3	CP 4	32,6
<b>Média</b>	<b>32,1</b>	<b>Média</b>	<b>32,4</b>
Desvio padrão = 0,74 MPa Coeficiente de variação = 2,33 %		Desvio padrão = 0,79 MPa Coeficiente de variação = 2,45 %	

**Média das vigas, V1Ref e V2 = 32,2 MPa**

Fonte: Elaboração própria

### 3.3.2 Material de reforço

Com a ideia de tornar-se um compósito de fácil produção, a fibra vegetal utilizada foi a fibra de juta em formato de tela, com abertura de aproximadamente 5 mm, facilitando a entrada da matriz através dos espaçamentos, ocasionando aderência entre a fibra e a matriz. A juta pode ser encontrada facilmente no estado do Rio Grande do Sul. Foram utilizadas duas camadas de fibra de juta no reforço, com espaçamento de aproximadamente 10 mm entre elas. Na Figura 15 pode-se observar a fibra de juta na forma de tela utilizada para a fabricação do compósito.

Figura 15 – Fibra de juta na forma de tela utilizada no compósito



Fonte: Elaboração própria

Vale destacar que, na produção dos compósitos, uma das principais características é a durabilidade do material, principalmente os de base de cimento Portland e fibras vegetais, pois esse tipo de fibra (vegetal) será embebida em um meio alcalino que possibilita a sua mineração, prejudicando a resistência mecânica. (MELO FILHO, 2012)

Entende-se, segundo Melo Filho (2012), que através de ensaios termogravimétricos pode-se observar que a substituição de 50% em massa de cimento Portland, por metacaulim, é o suficiente para o consumo total do hidróxido de cálcio presente na matriz, desse modo impossibilita a mineração das fibras, sem prejudicar sua resistência mecânica.

Visando o aumento da capacidade resistente à flexão das vigas, foi incorporado na zona tracionada da viga V2R uma matriz argamassada, abrangendo,

tela de juta com seção transversal de 150 mm x 30 mm e comprimento de 2700 mm. A matriz utilizada possui o traço, em massa, de 1:1 (aglomerantes: areia). Os aglomerantes foram divididos em 50% de cimento Portland CP II – F e 50% de Metacaulim HP–Ultra, relação água-cimento de 0,4. A Tabela 7 mostra a composição, por m<sup>3</sup>, da argamassa utilizada no reforço.

Tabela 7 – Composição em kg/m<sup>3</sup> de argamassa utilizada para o reforço

<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>
Cimento Portland CPII-F	432,25
Metacaulim HP - Ultra	432,25
Areia	864,5
Superplastificante	17,3
Água	345,8

Fonte: Elaboração própria

Segundo a empresa Metacaulim do Brasil, os principais benefícios do Metacaulim HP-Ultra são:

- aumento das resistências mecânicas à compressão, tração e abrasão, em todas as idades, em até 40%;
- reduz até 95% as reatividades álcali-agregado;
- aumento da resistência ao ataque por sulfatos, ácidos e outros agentes químicos;
- reduz até 75% a penetração de cloretos;
- redução da corrosão de armaduras;
- diminui o calor de hidratação;
- Diminui a porosidade e permeabilidade em até 90%;
- Melhoria no controle da eflorescência, fissuração e desgaste.

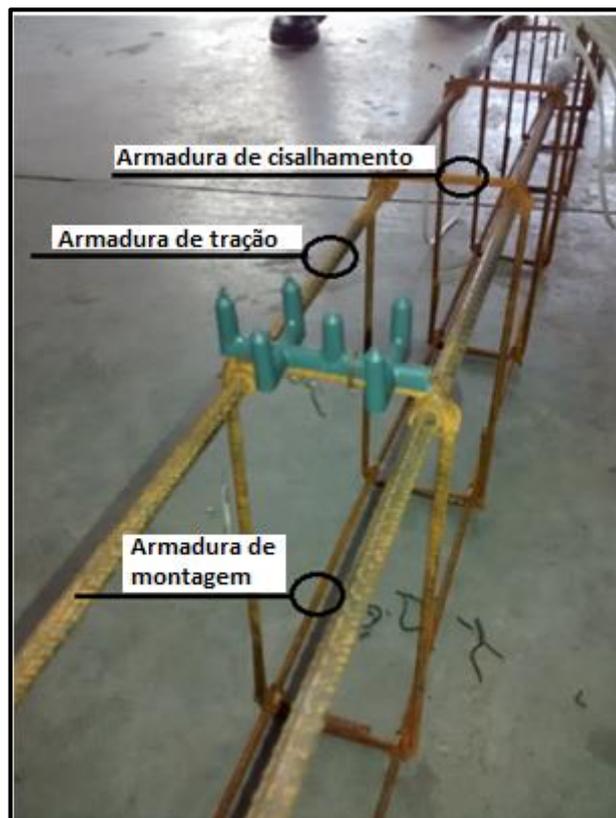
### **3.3.3 Aço**

As barras de aço usadas, foram de CA-50 e CA-60. Para a armadura transversal utilizaram-se barras CA-60 de 5,0 mm de diâmetro, com espaçamento de

20 cm, garantindo a ruptura por flexão. Na armadura longitudinal de montagem, também foram usadas barras de 5,0 mm de diâmetro.

Barras CA-50 com diâmetro de 8 mm foram empregadas para armadura longitudinal de tração. A Figura 16 ilustra a montagem das armaduras usadas nas vigas ensaiadas, a armadura está invertida para a fixação dos espaçadores.

Figura 16 – Armaduras das vigas



Fonte: Elaboração própria

### 3.4 Execução das vigas

#### 3.4.1 Concretagem

As fôrmas utilizadas para a produção das vigas foram feitas com madeira de Pinheiro Americano, espessura de 20 mm. As laterais foram travadas com sarrafos fixados com pregos e para respeitar o cobrimento de 30 mm, foi utilizado espaçadores de plástico no fundo e na face da viga. A Figura 17 ilustra as fôrmas e os espaçadores usados para concretagem das duas vigas.

Figura 17 – Fôrmas e os espaçadores usados para concretagem das duas vigas.



Fonte: Elaboração própria

Foi concretadas uma viga por vez. Primeiramente a viga V1Ref, e posteriormente a viga V2. Em cada produção foi utilizado concreto de uma betonada.

O concreto das vigas foi adensado com a utilização de vibradores de imersão com agulha. Na Figura 18 pode-se observar a produção do concreto em betoneira e o adensamento do concreto por vibrador de imersão.

Figura 18 – (a) Concreto sendo produzido na betoneira, (b) Adensamento do concreto utilizando vibrador



Fonte: Elaboração própria

A cura das vigas foi realizada através de papéis umedecidos colocados sobre a sua superfície livre, por um período de sete dias. Após esse período, as vigas foram desformadas e deixadas nas condições do ambiente do laboratório até a data do ensaio, como ilustra a Figura 19.

Figura 19 - Cura das vigas



Fonte: Elaboração própria

### 3.4.2 Instrumentação

Visando acompanhar o comportamento das vigas nos ensaios, foram realizadas instrumentações para medições de deformações da armadura longitudinal de tração das vigas, das deformações do concreto e dos deslocamentos verticais, utilizando-se os instrumentos listados nos itens a e b.

#### a) Extensômetros Elétricos de Resistência

O acompanhamento das deformações específicas da armadura de tração, foi realizado através da colagem de extensômetros elétricos (strain gages) Kyowa, com base de medição de 5 mm, modelo KFG-5-120-C1-1, e para medir a deformação à compressão do concreto, foi utilizado extensômetros elétricos com base de medição de 30 mm, modelo KFG-30-120-C1-C11.

Nas seções das barras de aço instrumentadas, havia um extensômetro colado em cada barra de aço, denominado de B1 e B2, posicionados no meio do vão da viga, onde ocorre a tensão de tração máxima. Na Figura 20 pode-se observar os extensômetros colados nas barras de aço protegidos com silicone.

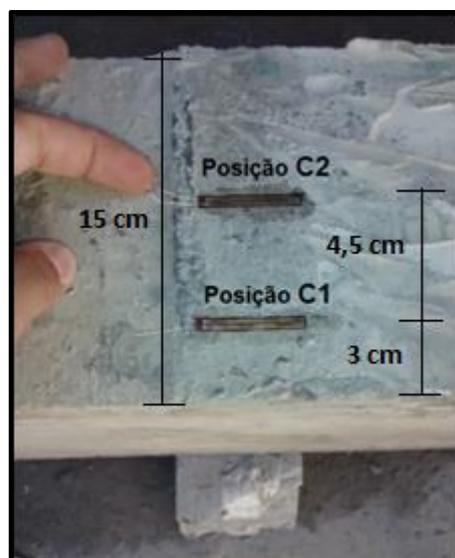
Figura 20 – Extensômetro colados nas barras de aço



Fonte: Elaboração própria

Para medir a deformação específica do concreto, foi colado extensômetro no meio do vão da viga na parte superior (posição C1 e C2), onde ocorre a maior concentração de tensões de compressão. A Figura 21 ilustra o posicionamento dos extensômetros colados na superfície da viga.

Figura 21 – Extensômetro colados na superfície superior da viga



Fonte: Elaboração própria

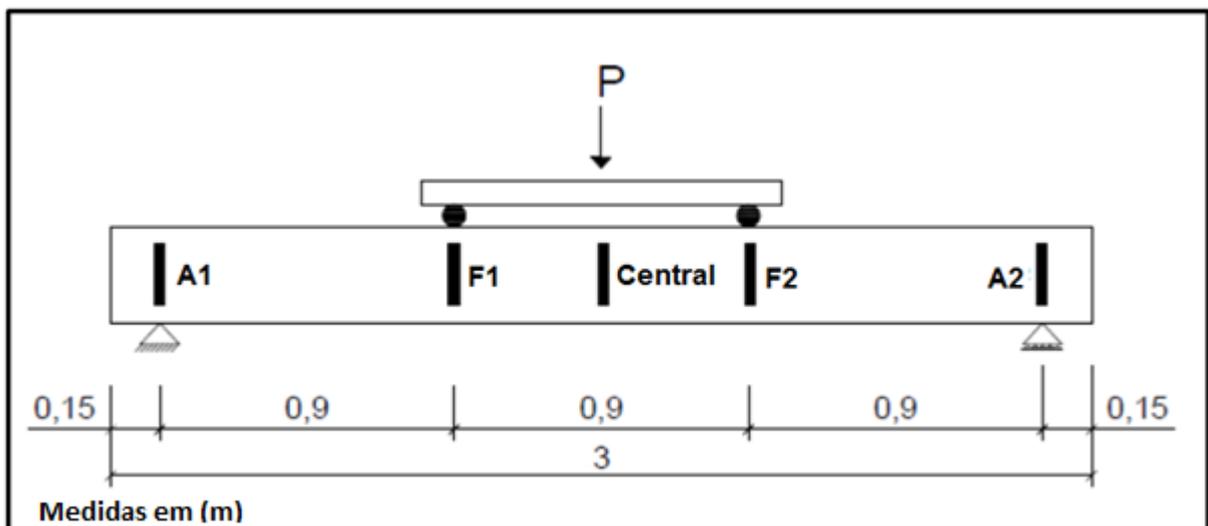
O HBM – Spider foi o sistema de aquisição automática de dados, usado para registrar os dados de deformações a um intervalo de 1 ponto por segundo.

## b) Deflectômetros Elétricos

Os deslocamentos verticais das vigas foram medidos através de LVDTs (do inglês *Linear Variable Differential Transformer* ou Transformador Diferencial Variável Linear), da marca HBM.

Na elaboração desse trabalho, foram utilizados cinco LVDTs, com seus devidos posicionamentos ilustrados na Figura 22. Na Tabela 8 pode-se observar o curso de medição de cada LVDT e suas posições. Como era esperado um deslocamento maior na parte central, foi colocado LVDT's de 50 mm, e nos apoios de 20 mm.

Figura 22 – Posicionamento dos LVDT'S (ver foto da Figura 23 como complementação)



Fonte: Elaboração própria

Tabela 8 – Curso de medição dos LVDTs e suas posições.

<b>Posições</b>	<b>LVDTs, curso de medição</b>
A1	20 mm
F1	50 mm
Central	50 mm
F2	50 mm
A2	20 mm

Fonte: Elaboração própria

As funções de cada LVDT são:

- A1 e A2, medir o deslocamento da viga nos apoios (deslocamento de corpo rígido); (esses foram necessários para a obtenção dos valores corretos dos deslocamentos na viga de concreto. Descontando o deslocamento medido nos pontos F1, F2 e central pela média dos deslocamentos obtidos entre A1 e A2, foi possível plotar os diagramas corretos nos pontos F1, F2 e central).

- F1 e F2, medir o deslocamento nos pontos de aplicação das cargas; (leituras para verificação do andamento do ensaio e se o posicionamento da viga foi ideal, proporcionando a distribuição uniforme de carregamento).

- Central, medir o deslocamento na seção central da viga; (essa é a medida mais importante para a análise dos resultados, pois nesse ponto encontra-se o maior deslocamento da viga).

Na Figura 23 pode-se observar os LVDT'S instalados e preparados pra o início do ensaio.

Figura 23 – LVDT'S posicionados para a realização do ensaio



Fonte: Elaboração própria

### 3.5 Execução do reforço

A viga V2, antes de ser reforçada, foi pré-fissurada e, em seguida, apicoada na região onde haveria ligação com o reforço. O preparo da superfície da viga para receber o reforço é importante, quando se deseja uma boa aderência entre o compósito e o concreto da viga. Foi realizado o apicoamento manual da superfície da viga, utilizando talhadeira e marreta, como ilustra a Figura 24.

Figura 24 – Preparo de superfície da viga V2 para a colocação do reforço



Fonte: Elaboração própria

O apicoamento foi realizado no fundo da viga, com profundidade de 30 mm, possibilitando a visualização das armaduras internas (longitudinais de tração e transversais) ao longo do comprimento de 2700 mm (vão livre da viga). Na Figura 25 pode-se observar a viga V2 apicoada, preparada para receber a camada de reforço.

Figura 25 – Viga V2 preparada para receber a camada de reforço



Fonte: Elaboração própria

Para aplicar a camada de reforço na viga, foram necessárias a limpeza e a molhagem leve com esponja na superfície da mesma, garantindo que nenhuma impureza prejudicasse a aderência entre o reforço e o concreto da viga.

O preparo da matriz foi realizado em um misturador planetário de argamassa, logo após do preparo da superfície. Na Figura 26 pode-se observar a produção da matriz do reforço.

Figura 26 – Produção da matriz do reforço.



Fonte: Elaboração própria

Após a mistura da matriz, iniciou-se o processo de execução do reforço, utilizando espátulas como método de aplicação. A primeira camada foi de aproximadamente 10 mm, só então foi colocada à primeira camada da fibra de juta. Repetiram-se os 10 mm de matriz, logo após, a segunda camada de fibra de juta foi colocada. Para finalizar o reforço, aplicou-se mais 10 mm de matriz. Contudo, a espessura final do reforço foi de aproximadamente 30 mm. A Figura 27 ilustra a aplicação do reforço na viga V2.

Figura 27 – (a) Aplicação da primeira camada de matriz, (b) Aplicação da primeira camada de fibra e segunda camada de matriz, (c) Aplicação da segunda camada de fibra e terceira camada de matriz



Fonte: Elaboração própria

A cura do reforço foi realizada através de panos úmidos colocados sobre a sua superfície livre, por um período de sete dias. Após esse período, a viga V2R foi deixada nas condições do ambiente do laboratório até a data do ensaio.

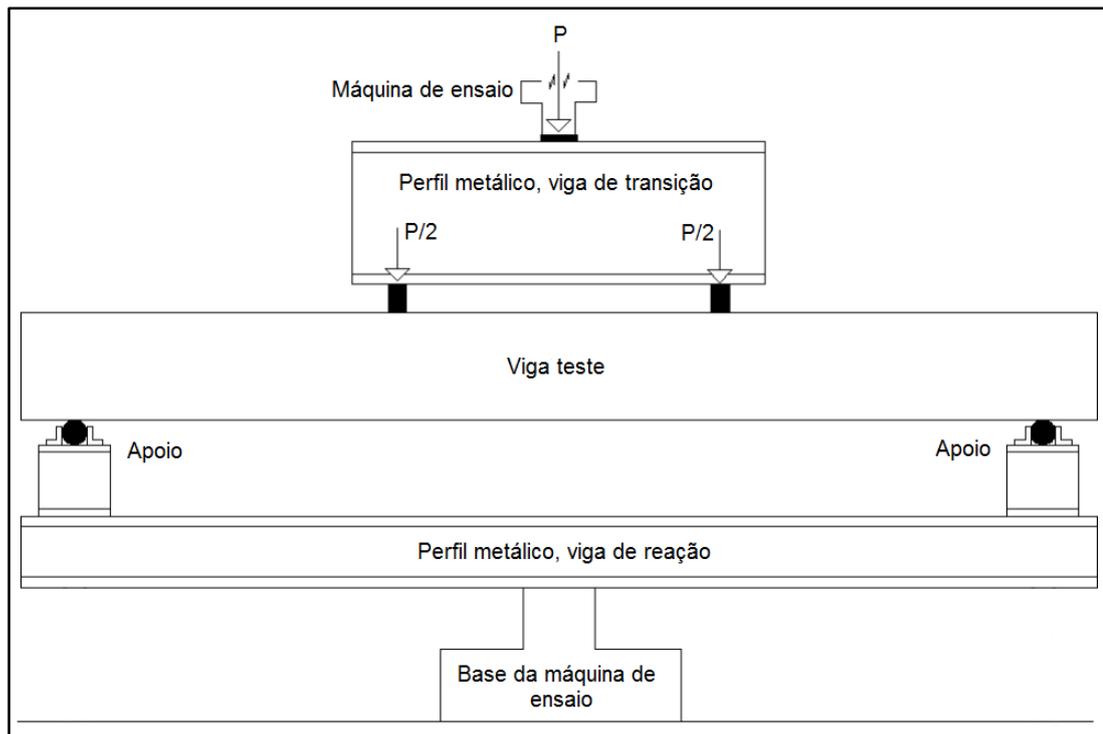
### 3.6 Ensaios

#### 3.6.1 Montagem dos ensaios

Nos ensaios, as vigas foram posicionadas na prensa EMIC DL 20000 em cima de um perfil metálico de reação. Entre a viga e o travessão de deslocamento da

prensa, foi colocado um perfil metálico, com o objetivo de transmitir o carregamento para a viga, dividindo em duas a carga concentrada. O esquema de ensaio das vigas é apresentado na Figuras 28 e na Figura 29 é possível visualizar o posicionamento das vigas.

Figura 28 – Esquema de ensaio das vigas



Fonte: Elaboração própria

Figura 29 – Posicionamento das vigas



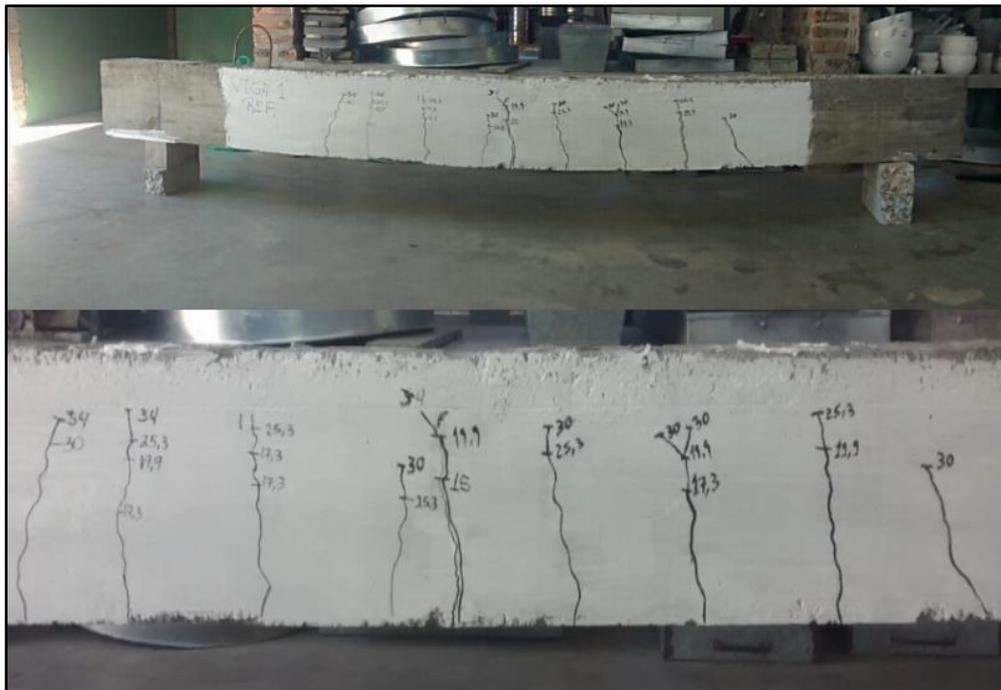
Fonte: Elaboração própria

### 3.6.2 Execução dos ensaios

A viga V1Ref teve um único ensaio, com velocidade do deslocamento do travessão de 0,2 mm/min. A prensa foi programada para realizar paradas, estabilizando e continuando o carregamento em qualquer instante desejado, com isso pode-se monitorar as fissuras surgidas nas vigas, em qualquer estágio do ensaio. As paradas foram realizadas quando era visualizada uma fissura, ou quando era observado um aumento significativo das mesmas. A programação da prensa e o método de monitoramento das fissuras foi adotado para as duas vigas, V1Ref e V2.

As vigas V1Ref e V2R não foram carregadas até a ruptura, pois a viga rompida dificultaria a movimentação da mesma para retirá-la de dentro do laboratório. Pode-se observar na Figura 30 o mapa de fissuração da viga V1Ref.

Figura 30 – Mapa de fissuração da viga V1Ref



Fonte: Elaboração própria

A viga V2 foi submetida a dois ensaios: uma pré-fissuração e o segundo de ruptura com a viga reforçada V2R, utilizando o mesmo sistema e programação da máquina de ensaio empregado na viga V1Ref. A pré-fissuração teve como objetivo atingir o limite de abertura de fissura estabelecido de 0,3 mm. Determinado pela

NBR 6118 (2014). Na Figura 31 é possível visualizar as fissuras que surgiram durante o ensaio. Após o ensaio a viga foi descarregada e reforçada.

Figura 31 – Mapa de fissuração da viga V2



Fonte: Elaboração própria

O segundo ensaio foi realizado após a cura do reforço. A Figura 32 ilustra a viga V2R pronta para ser ensaiada.

Figura 32 – Viga V2R pronta para ser ensaiada



Fonte: elaboração própria

Na Figura 33 é possível visualizar as fissuras que surgiram durante o ensaio.



## 4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Introdução

Neste item são comparados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental. É também efetuado o cálculo da capacidade resistente à flexão teórica das vigas V1Ref e V2 com os dados atualizados de acordo a resistência à compressão média do concreto apresentado na Tabela 6.

O resultado teórico de capacidade de carga é comparado com o obtido experimentalmente.

As análises dos resultados experimentais foram feitas confrontando as vigas V1Ref, V2 e V2R, em termos de deslocamento vertical, deformação do concreto, deformação das armaduras longitudinais de tração.

### 4.2 Resistência mecânica teórica da viga V1Ref e V2

Através do detalhamento da seção transversal da viga e das propriedades apresentadas e obtidas nas Tabelas 3 e 4, foi realizado o cálculo da resistência mecânica teórica à flexão das vigas V1Ref e V2, utilizando  $f_{ck}$  determinado em laboratório, apresentado na Tabela 6. A metodologia de cálculo utilizada foi a mesma descrita no item 3.2.

Para a viga V1Ref e V2 a média da resistência à compressão  $f_{ck}$  foi de 32,2 MPa, então:

$$0,68 b_w \times f_{ck} - A_s \sigma_s = 0 \quad \dots(3)$$

$$0,68 \cdot 15 \cdot x \cdot 3,2 - 1,00 \cdot 50 = 0$$

Em que:

$b_w$  = largura da base da viga: (15 cm);

$d$  = distância entre as fibras mais comprimidas e o centroide da armadura tracionada: (26,6 cm);

$x$  = posição da linha neutra;

$A_s$  = área de aço da seção transversal da viga: (1,00 cm<sup>2</sup>);

$\sigma_s$  = tensão na armadura longitudinal tracionada: (50 kN/cm<sup>2</sup>);

$f_{ck}$  = resistência característica do concreto à compressão: (3,2 kN/cm<sup>2</sup>).

$M_{uk}$  = momento máximo característico;

Isolando  $x$  na equação (3) obtém-se a altura da linha neutra,  $x = 1,5318$  cm. Assim sendo, foi aplicado o valor de  $x$  na equação (4) para obtenção do momento máximo característico.

$$M_{uk} = 0,68 b_w f_{ck} x (d - 0,4 x) \quad \dots(4)$$

$$M_{uk} = 0,68 \cdot 15 \cdot 3,2 \cdot 1,5318 \cdot (26,6 - 0,4 \cdot 1,5318)$$

Substituído os valores na equação (4) foi encontrado o valor de  $M_k = 12,99$  kN.m, então a carga máxima aplicada para o momento máximo é de  $P_u = 28,90$  kN (carga aplicada na viga de transição e dividida para dois pontos na viga de concreto armado de ensaio).

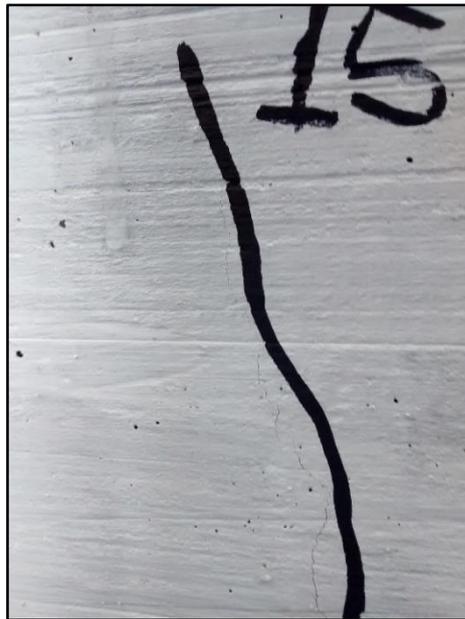
Através dos cálculos teóricos realizados segundo a NBR 6118 (2014) foi possível obter a carga teórica, os deslocamentos verticais, medidos no meio do vão da viga, a deformação das armaduras no ponto de máxima tração e a deformação do concreto no ponto de máxima compressão. Esses cálculos foram realizados para o instante em que ocorreu a primeira fissura, no limite de abertura de fissura 0,3 mm e para a carga última,  $P_u$ .

Na abertura da primeira fissura, a carga teórica calculada é de  $P_f = 15,20$  kN, o deslocamento vertical é de 0,2 mm, a deformação das armaduras é de 0,05‰ e a deformação no concreto é de 0,0015‰. No instante em que ocorre o limite de abertura de fissura 0,3 mm a carga teórica é de  $P_{0,3} = 20$  kN, resultando em um deslocamento vertical de 0,50 mm, e a deformação nas armaduras é de 0,15‰ e a deformação no concreto é de 0,0058‰. Para a carga última teórica,  $P_u = 28,90$  kN, o deslocamento é de 1,80 mm, a deformação das armaduras é de 0,55‰ e no concreto é de 0,032‰.

#### 4.3. Dados obtidos do ensaio da viga de referência, V1Ref

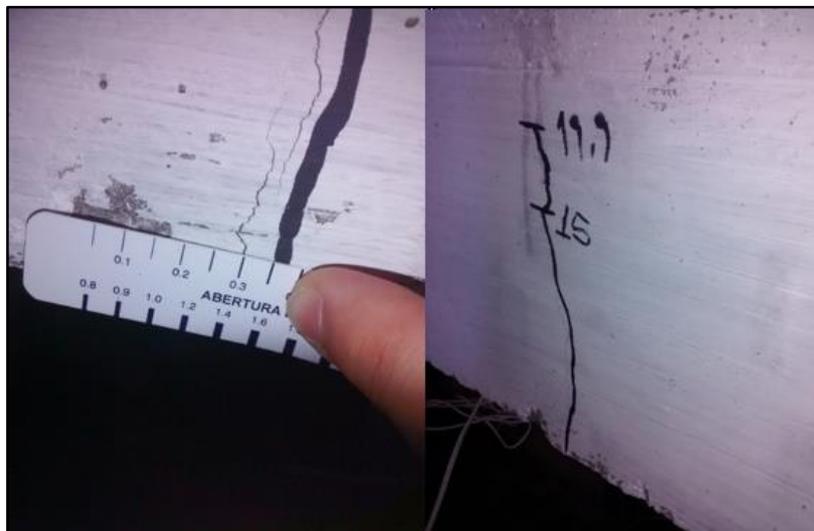
A Figura 34 ilustra que as primeiras fissuras perceptíveis visualmente, surgiram para a carga experimental,  $P_{f,exp} = 15 \text{ kN}$ , e na Figura 35 pode-se observar que o limite de abertura de fissura  $0,3 \text{ mm}$ , ocorreu sob a carga experimental,  $P_{0,3exp} = 19,90 \text{ kN}$ .

Figura 34 – Abertura de fissura da viga V1Ref, carga  $P_{f,exp} = 15 \text{ kN}$



Fonte: Elaboração Própria

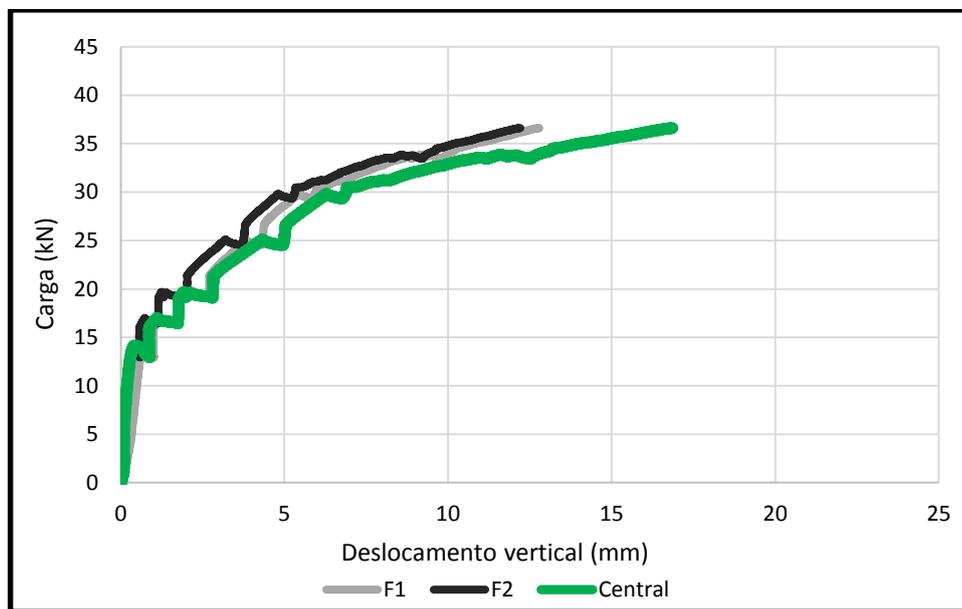
Figura 35 – Limite de fissuração da viga V1Ref,  $0,3 \text{ mm}$ , carga  $P_{0,3exp} = 19,90 \text{ kN}$



Fonte: Elaboração própria

A posição que foi realizada a medição dos deslocamentos verticais F1, F2 e Central, foram ilustradas na Figura 22. A Figura 36 apresenta os diagramas de carga-deslocamento obtidos para a viga V1Ref. Pode-se observar que os deslocamentos F1 e F2 são próximos, o que indica que o ensaio e a posição da viga na máquina de ensaios universais foram adequados, proporcionando uma uniformidade na distribuição do carregamento. Além disso, como era de se esperar o deslocamento central da viga foi maior em relação aos obtidos para F1 e F2.

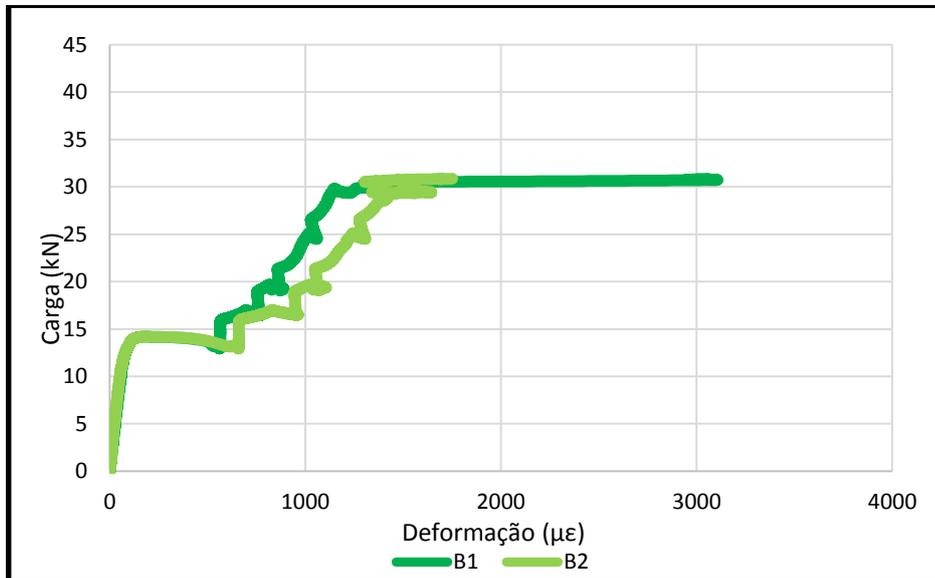
Figura 36 – Diagramas carga-deslocamento da viga de referência V1Ref



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 37 são mostrados os diagramas obtidos da deformação das duas armaduras longitudinais de tração, B1 e B2. Para critério de análise dos dados foi adotado a média das deformações das barras.

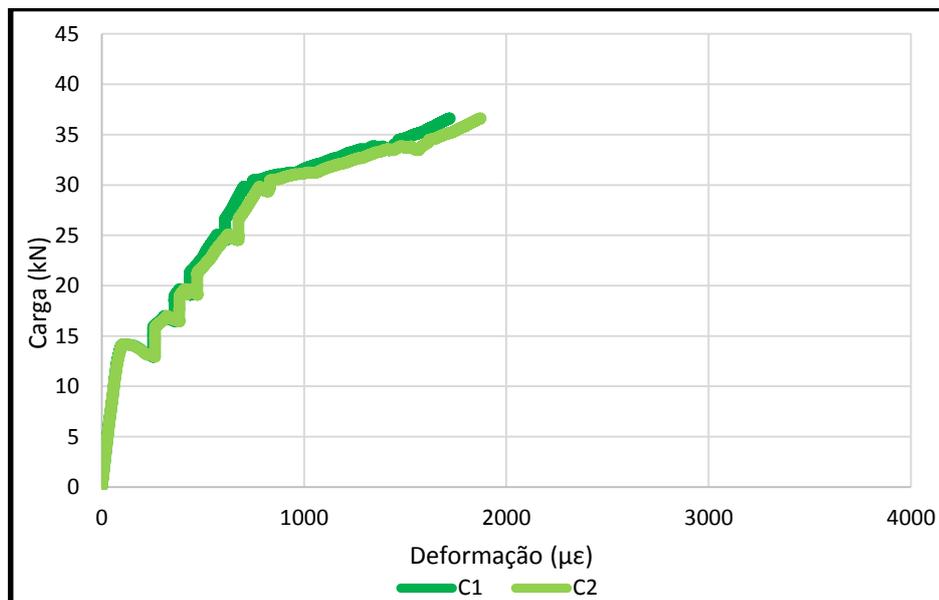
Figura 37 – Diagramas carga-deformação das barras de aço tracionadas da viga V1Ref.



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 38 são ilustrados os diagramas de carga-deformação do concreto, medido no meio do vão da viga no ponto de máxima tensão de compressão. As curvas foram construídas através dos dados obtidos pelos dois Strain Gages (C1 e C2), colados na parte superior da viga, conforme apresentado no item 3.4.2 da metodologia.

Figura 38 – Diagramas carga-deformação do concreto da viga V1Ref.



Fonte: Elaboração própria

A Tabela 9 apresenta os dados obtidos do ensaio para os pontos referente ao surgimento da primeira fissura, no instante em que a fissura apresentava abertura de 0,3 mm e para a carga máxima do ensaio. Para facilitar a análise, também são apresentados na tabela os dados teóricos.

Tabela 9 – Dados para comparação do comportamento teórico e experimental da viga V1Ref

	1º Fissura		Abertura 0,3 mm		Ponto Máximo	
	Teórico	Exp.	Teórico	Exp.	Teórico	Exp.
Carga (kN)	15,20	15,00	20,00	19,90	28,90	36,9*
Deslocamento Central (mm)	0,20	0,90	0,50	1,90	1,85	5,50
Deformação das barras (‰)	0,05	0,22	0,15	0,97	0,55	1,26
Deformação do concreto (‰)	0,0015	0,11	0,006	0,39	0,032	0,69

\* Carga última do ensaio.

Exp. Dados obtidos experimentalmente.

OBS: Os dados foram obtidos para a carga última teórica de 28,90 kN, e não para a carga última de ensaio, para fins de análise dos resultados.

Fonte: Elaboração própria

De acordo com os dados obtidos no instante da abertura da primeira fissura a carga,  $P_f = 15,20$  kN, é 1,3% maior que a carga experimental,  $P_{f,exp} = 15$  kN. Analisando os dados do limite de abertura de fissura 0,3 mm a carga,  $P_{0,3} = 20$  kN, é 0,50% maior que a carga experimental,  $P_{0,3exp} = 19,90$  kN.

Nota-se que a leitura do deslocamento no centro da viga no instante do surgimento da primeira fissura, para a carga,  $P_{f,exp} = 15$  kN, foi de 0,9 mm, sendo 350% maior que o deslocamento de 0,20 mm, obtido através da carga  $P_f = 15,20$  kN. No instante em que ocorre o limite de abertura de fissura 0,3 mm, carga de  $P_{0,3exp} = 19,90$  kN, o deslocamento foi de 2,00 mm, 300% maior que o deslocamento de 0,5 mm (teórico), obtido através da carga  $P_{0,3} = 20$  kN. Para a carga última teórica,  $P_u =$

28,9 kN, o deslocamento experimental obtido foi de 5,50 mm, sendo 197,3% maior que deslocamento teórico (1,85 mm).

No instante da abertura da primeira fissura, carga teórica  $P_f = 15,20 \text{ kN}$ , obteve-se uma deformação nas armaduras de 0,05‰, e para a carga experimental,  $P_{f,exp} = 15 \text{ kN}$ , a deformação foi de 0,22‰, desse modo, a deformação das armaduras foi 340% maior que a deformação obtida de acordo com o cálculo teórico.

Analisando os dados no instante do limite de abertura de fissura 0,3 mm, pode-se observar que através da carga teórica  $P_{0,3} = 20 \text{ kN}$ , é possível obter uma deformação nas armaduras de 0,15‰, e para a carga experimental foi obtida uma deformação de 0,97‰, assim sendo, as armaduras deformaram 546,6% a mais que a deformação obtida teoricamente.

No carregamento último teórico  $P_u = 28,90 \text{ kN}$ , a deformação das armaduras de tração é de 0,55‰, 129% menor que a deformação obtida experimentalmente de 1,26‰.

Para a deformação do concreto, no momento da abertura da primeira fissura, obteve-se uma deformação teórica de 0,0015‰, e para a carga experimental, a deformação foi de 0,11‰. Dessa forma, pode-se afirmar que a deformação obtida para a carga experimental foi 7233,3% maior que a deformação da carga teórica. No instante do limite de abertura de fissura 0,3 mm, a deformação calculada no concreto é de 0,0058‰, e a obtida no ensaio foi de 0,39‰, ou seja, o concreto deformou 6624,1% a mais no ensaio que a deformação obtida no cálculo teórico.

No que se refere ao carregamento último teórico, a deformação do concreto teórico é de 0,032‰, sendo 115,6% menor que a deformação obtida experimentalmente (0,69‰).

#### **4.4 Dados obtidos do ensaio da viga dois pré-fissurada, V2**

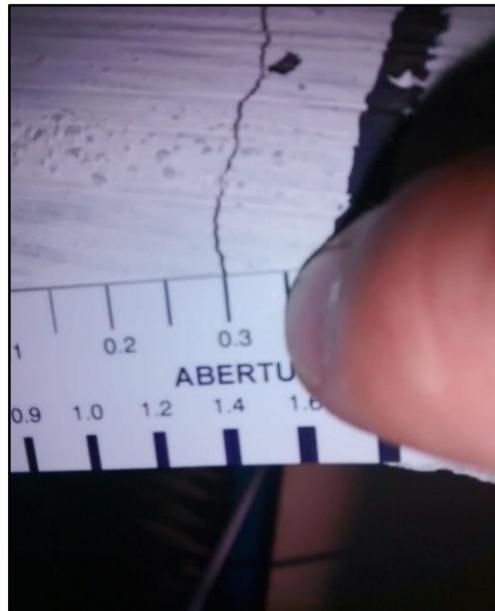
Na Pré-fissuração da viga V2, o ensaio foi realizado até atingir o limite de fissuração 0,3 mm, segundo a NBR 6118 (2014), para depois ser realizado o reforço. Na Figura 39, pode-se visualizar que as primeiras fissuras visíveis surgiram sob uma carga de aproximadamente  $P_{f,exp} = 14,50 \text{ kN}$ , e a Figura 40 ilustra, que o limite de fissuração ocorreu para uma carga de aproximadamente  $P_{0,3,exp} = 22,30 \text{ kN}$ .

Figura 39 – Abertura de fissura da viga V2, carga  $P_{f,exp} = 14,50$  kN



Fonte: Elaboração Própria

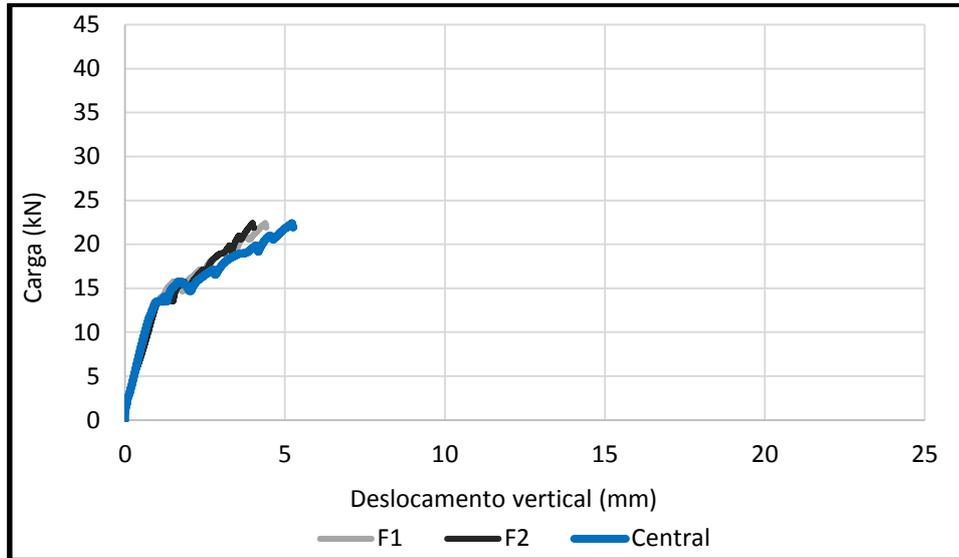
Figura 40 - Limite de fissuração da viga V2, 0,3 mm, carga  $P_{0,3exp} = 22,30$  kN



Fonte: Elaboração própria

A Figura 41 apresenta os diagramas de carga-deslocamento vertical da viga V2. Pode-se observar que os deslocamentos F1 e F2 são próximos, o que indica que a execução do ensaio e o posicionamento da viga na máquina de ensaios universais foram adequados, proporcionando uma uniformidade na distribuição do carregamento. Além disso, como era de se esperar o deslocamento central da viga foi maior quando comparados relação aos obtidos para F1 e F2.

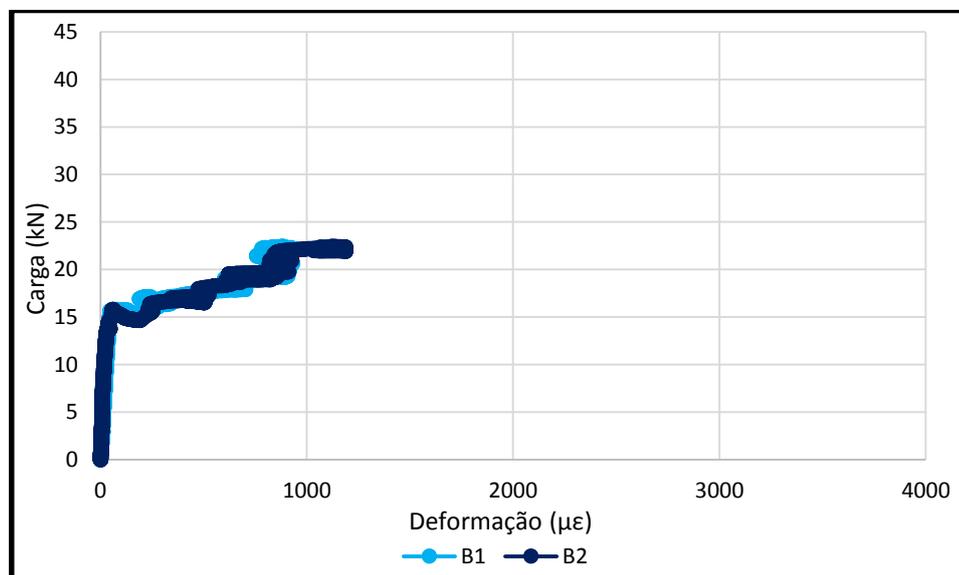
Figura 41 – Diagramas carga-deslocamento da viga V2



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 42 pode-se observar o diagrama carga-deformação das duas armaduras longitudinais de tração, B1 e B2.

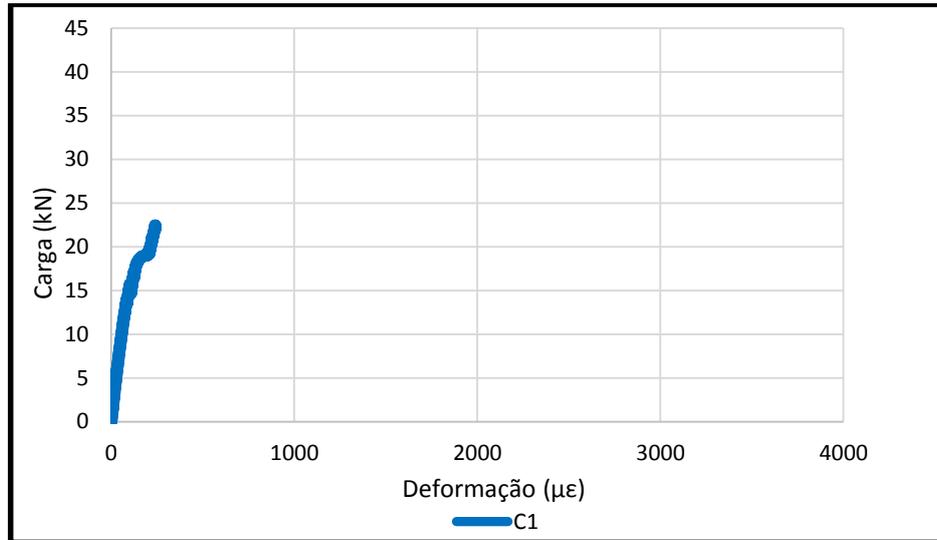
Figura 42 – Diagramas carga-deformação das barras de aço da viga V2



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 43 são ilustrados os diagramas de carga-deformação do concreto, medido no meio do vão da viga no ponto de máxima compressão. Não foi possível realizar a média entre as deformações, pois ocorreu um erro de leitura do extensômetro (posição C2).

Figura 43 – Diagrama carga-deformação do concreto da viga V2



.Fonte: Elaboração própria

A Tabela 10 apresenta os dados obtidos do ensaio para os pontos referente ao surgimento da primeira fissura, no instante em que a fissura apresentava abertura de 0,3 mm e para a carga máxima do ensaio. Para facilitar a análise, também são apresentados na tabela os dados teóricos.

Tabela 10 – Dados para comparação do comportamento teórico e experimental da viga V2

	1º Fissura		Abertura 0,3 mm	
	Teórico	Exp.	Teórico	Exp.
Carga (kN)	15,20	15,00	20,00	19,90
Deslocamento Central (mm)	0,20	1,30	0,50	5,10
Deformação das barras (‰)	0,05	0,05	0,15	0,94
Deformação do concreto (‰)	0,0015	0,09	0,006	0,24

Exp. Dados obtidos experimentalmente

Fonte: Elaboração própria

De acordo com os dados obtidos no instante da primeira abertura de fissura a carga teórica  $P_f = 15,20$  kN, é 4,82% maior que a carga  $P_{f,exp} = 14,50$  kN. Analisando os dados do limite de abertura de fissura 0,3 mm a carga teórica  $P_{0,3} = 20$  kN é 11,5% menor que a carga  $P_{0,3exp} = 22,30$  kN.

A leitura do deslocamento vertical central no instante do surgimento da primeira fissura, para a carga experimental,  $P_{f,exp} = 14,5$  kN, foi de 1,30 mm, 550% maior que o deslocamento teórico de 0,20 mm, e no instante do limite de abertura de fissura 0,3 mm, para a carga experimental de  $P_{0,3exp} = 22,30$  kN, o deslocamento foi de 5,10 mm, 920% maior que o deslocamento teórico de 0,50 mm.

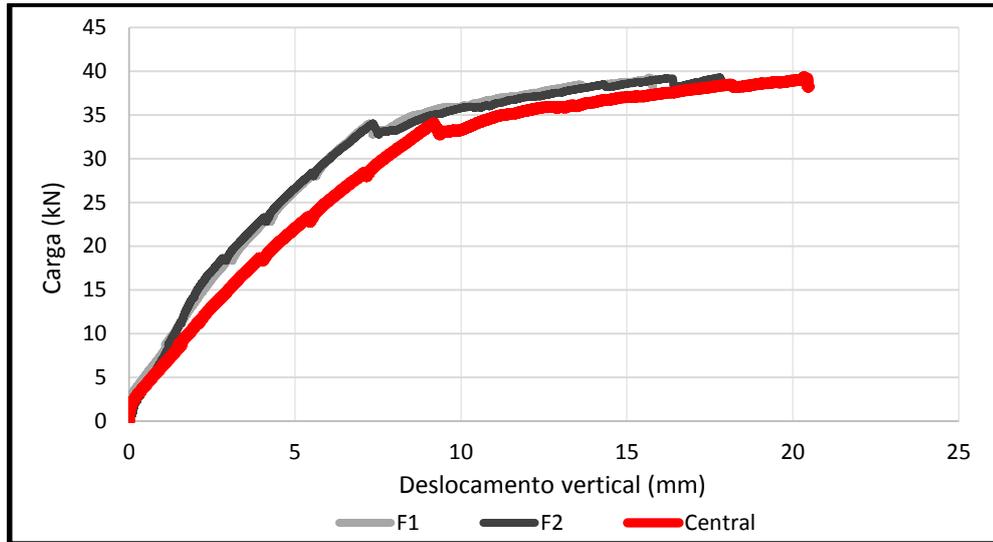
No momento da abertura da primeira fissura, para a carga teórica, a deformação das armaduras é de 0,05‰, e para a carga experimental, foi de 0,05‰, desse modo, a deformação das armaduras obtida experimentalmente e teoricamente foram as mesma. Analisando os dados no instante do limite de abertura de fissura 0,3 mm, pode-se observar que através da carga teórica, foi possível obter uma deformação das armaduras de 0,15‰, e com a carga experimental, a deformação foi de 0,94‰, sendo 526,6% maior que a deformação das armaduras obtida teoricamente.

Para a deformação do concreto, no momento da abertura da primeira fissura, obteve-se uma deformação teórica de 0,0015‰, e para a carga experimental, a deformação foi de 0,09‰. Dessa forma, pode-se afirmar que a deformação obtida para a carga experimental foi 5900% maior que a deformação da carga teórica. No instante do limite de abertura de fissura 0,3 mm, a deformação calculada no concreto é de 0,0058‰, e a obtida no ensaio foi de 0,24‰, ou seja, o concreto deformou 4037,9% a mais no ensaio que a deformação obtida no cálculo teórico.

#### **4.5 Dados obtidos do ensaio da viga dois reforçada, V2R**

A Figura 44 apresenta os diagramas de carga-deslocamento vertical da viga V2R. Pode-se observar que os deslocamentos F1 e F2 são próximos, o que mais uma vez indica que o ensaio e a posição da viga na máquina de ensaios universais foram adequados, o que proporcionou uma boa uniformidade na distribuição do carregamento. Adicionalmente, o deslocamento central da viga foi maior em relação aos obtidos para F1 e F2.

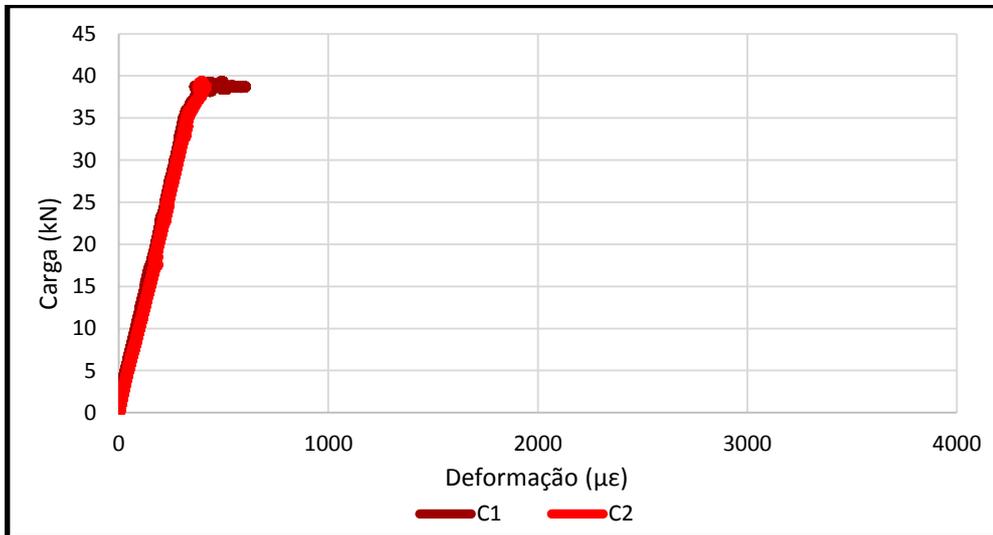
Figura 44 – Diagramas carga-deslocamento da viga V2R



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 45 são ilustrados os diagramas de carga-deformação à compressão do concreto.

Figura 45 – Diagrama carga-deformação do concreto da viga V2R.



Fonte: Elaboração própria

As análises dos dados para a viga V2R foram realizadas utilizando as cargas da viga V2, no instante em que ocorreu a primeira abertura de fissura e no limite de abertura de fissuras 0,3 mm, pois a viga V2R já tinha sido submetida a carregamento prévio. Não foi possível calcular a carga última da viga V2R, pois não foram obtidos os dados necessários do reforço para realizar a análise teórica da viga. Desse modo

foi utilizado a carga última teórica das vigas V1Ref e V2 para fins de análise de dados.

A Tabela 11 apresenta os dados obtidos do ensaio, comparados com os da viga V2 pré-fissurada.

Tabela 11 – Dados para comparação do comportamento experimental da viga V2R

	1º Fissura	Abertura 0,3 mm	Ponto Máximo
	Exp.	Exp.	Exp.
Carga (kN)	14,5 (V2)	22,3 (V2)	28,90 (V2)
Deslocamento Central (mm)	2,90	5,09	7,00
Deformação das barras (‰)	Erro de leitura	Erro de leitura	Erro de leitura
Deformação do concreto (‰)	0,13	0,21	0,27

Exp. Dados obtidos experimentalmente.

OBS: Os dados foram obtidos para a carga última teórica de 28,90 kN, e não para a carga última de ensaio, para fins de análise dos resultados.

Fonte: Elaboração própria

Analisando os dados obtidos, o deslocamento vertical no centro da viga V2R para a carga experimental,  $P_{f,exp} = 14,50$  kN (V2), foi de 2,90 mm. Para a carga de  $P_{0,3exp} = 22,30$  kN (V2), o deslocamento foi de 5,10 mm e no que se refere a carga última  $P_u = 28,90$  kN (V2), o deslocamento foi 7,00 mm.

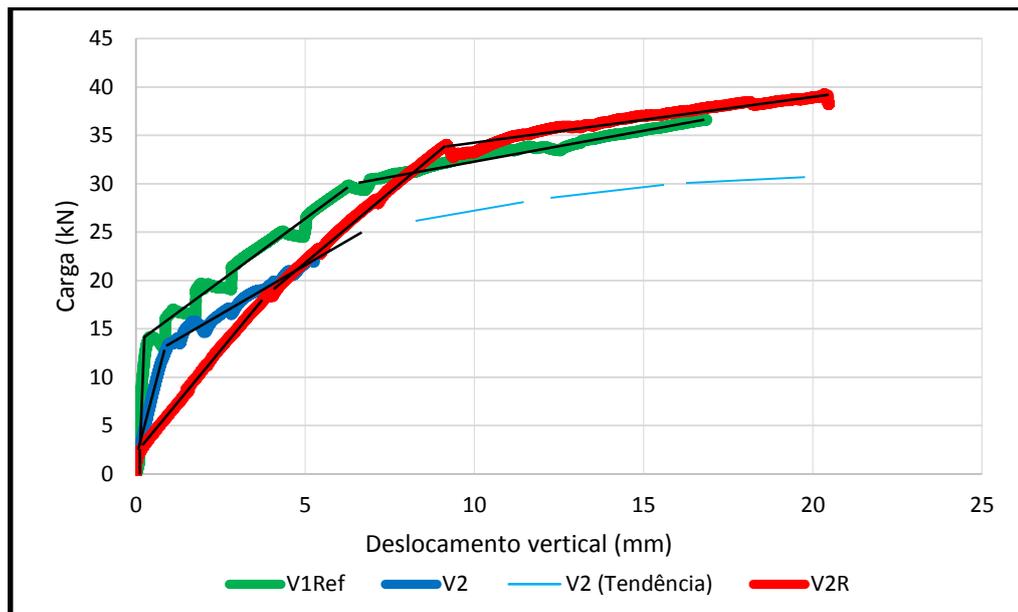
Não foi possível plotar os diagramas carga-deformação das barras de aço da viga V2R, devido a erros de leitura do extensômetros durante o ensaio.

De acordo com os dados obtidos, a deformação média do concreto no centro da viga V2R na carga referente à abertura da primeira fissura (da viga V2) foi de 0,13‰, e para a carga experimental de  $P_{0,3exp} = 22,30$  kN (V2), a deformação foi 0,21‰, e no que se refere a carga última  $P_u = 28,90$  kN, a deformação média foi de 0,27‰.

#### 4.6 Comparação dos dados das vigas V1Ref, V2 e V2R

A Figura 46 mostra os diagramas de carga-deslocamentos verticais das vigas V1Ref, V2 e V2R, além disso, pode-se observar a tendência do comportamento do diagrama da viga V2, traçado com base na viga V1Ref.

Figura 46 – Diagrama carga-deslocamento das vigas V1Ref, V2 e V2R

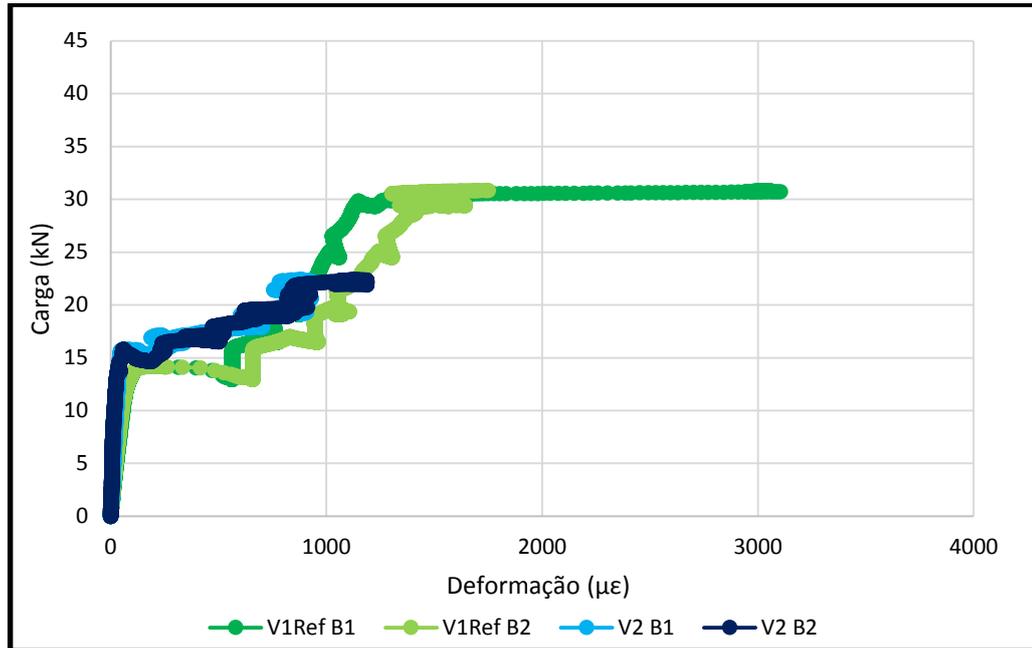


Fonte: Elaboração própria

Conforme pode ser observado na Figura 46, é possível observar que até o carregamento de aproximadamente 2,5 kN a curva mostra-se linear, possivelmente devido que o reforço ainda não tinha fissura, e a partir daí a curva apresenta uma leve inclinação, dessa forma a viga V2R obteve ganho de rigidez, observado pela tangente da curva. Na carga última teórica de  $P_u = 28,90$  kN, infere-se um ganho aproximado de 20% de carga, tendo por referência a tendência da curva da viga V2. Ao atingir a carga de ruptura calculada, há nova mudança de direção na curva, diminuindo significativamente a rigidez da viga. Claramente este comportamento caracteriza a ruptura teórica da viga.

A Figura 47 ilustra os diagramas carga-deformação das barras das vigas ensaiadas, V1Ref e V2.

Figura 47 – Diagramas carga-deformação das barras de aço das vigas V1Ref e V2

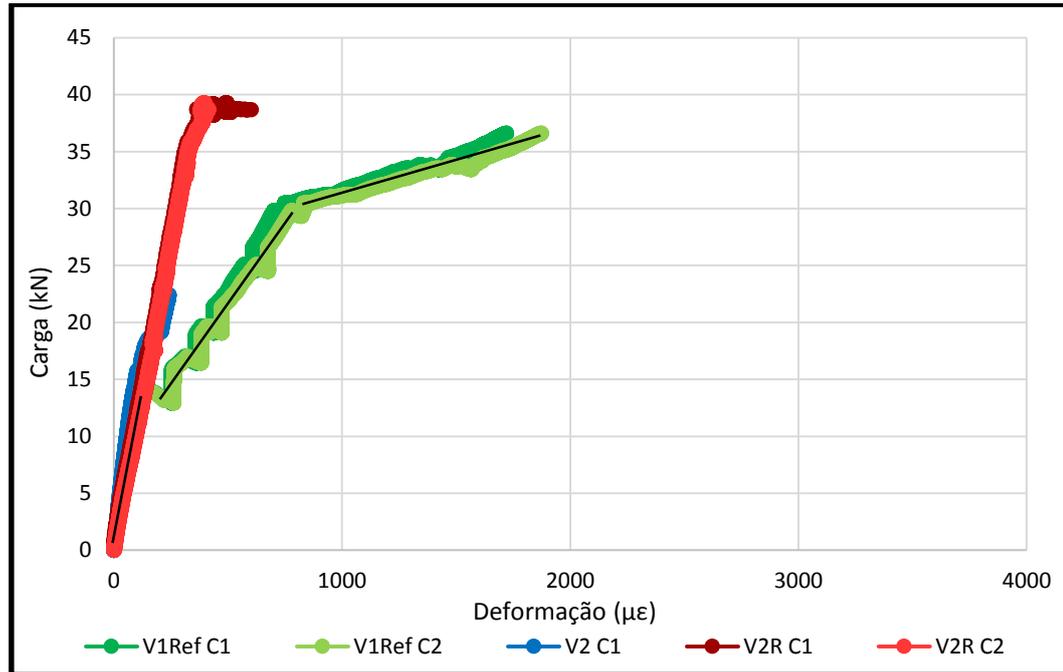


Fonte: Elaboração própria

Devido a erros de leitura dos extensômetros, colados nas barras de aço da viga V2R, não foi possível plotar o diagrama carga-deformação. De acordo a Figura 47, é possível observar que a deformação das barras de aço são semelhantes. Nota-se um trecho linear até a abertura da primeira fissura (carga de aproximadamente 15kN) e logo depois um aumento da deformação sem aumento da carga. Isso significa o momento de transição do estágio I para o estágio II, ou seja, viga não fissurada para viga fissurada. No estágio I o concreto e o aço estão resistindo as tensões de tração e no estágio II, quando fissurado, as tensões de tração são resistidas somente pelas barras de aço.

Na Figura 48, pode-se visualizar os diagramas de carga-deformação à compressão do concreto das vigas ensaiadas.

Figura 48 – Diagramas carga-deformação do concreto das vigas V1Ref, V2 e V2R



Fonte: Elaboração própria

Observa-se na viga V1Ref que ao aproximar-se da carga de 15 kN ela perde rigidez, caracterizando o início da abertura da primeira fissuras. Ao atingir a carga de ruptura, calculada em 28,90 kN há nova mudança de direção na curva, diminuindo significativamente a rigidez da viga. Claramente este comportamento caracteriza a ruptura teórica da viga. Para obter uma melhor conclusão do comportamento das curvas carga-deformação do concreto das vigas ensaiadas é necessário realizar mais ensaios, assim facilitaria a comparação de dados.

Comparando o diagrama carga-deformação, do concreto da viga V2 e V2R, nota-se que o comportamento é semelhante.

A Tabela 12 apresenta os dados para a melhor comparação do comportamento experimental das vigas estudadas.

Tabela 12 – Dados para comparação do comportamento experimental das vigas estudadas

	1º Fissura			Abertura 0,3 mm			Ponto Máximo	
	Experimental			Experimental			Exp.	
Vigas	V1Ref	V2	V2R	V1Ref	V2	V2R	V1Ref	V2R
Carga (kN)	15	14,5	14,5	19,9	22,3	22,3	28,90	
Deslocamento Central (mm)	0,90	1,30	2,90	1,90	5,10	5,09	5,50	7,00
Deformação das barras (‰)	0,22	0,05	Erro de leitura	0,97	0,94	Erro de leitura	1,26	Erro de leitura
Deformação do concreto (‰)	0,11	0,09	0,13	0,39	0,24	0,21	0,69	0,27

OBS: Os dados foram obtidos para a carga última teórica de 28,90 kN, e não para a carga última de ensaio, para fins de análise dos resultados.

Fonte: Elaboração própria

De acordo com os dados obtidos durante os ensaios, no instante da primeira abertura de fissura a viga V1Ref apresentou uma carga de  $P_{f,exp} = 15$  kN, 3,4% maior que a carga da viga V2 de  $P_{f,exp} = 14,50$  kN. No instante do limite de fissura 0,3 mm a viga V1Ref apresentou uma carga de  $P_{0,3exp} = 19,9$  kN, 12% menor que a carga da viga V2 de  $P_{0,3exp} = 22,30$  kN.

Considerando os resultados dos deslocamentos verticais no meio do vão das vigas obtidos nos ensaios, no instante do surgimento da primeira fissura a viga V1Ref deslocou 0,90 mm, 44,4% menos que a viga V2 que deslocou 1,30 mm e 222,2% menos que o deslocamento da viga V2R de 2,90 mm. No instante que a fissura apresentava abertura de 0,3 mm a viga V1Ref apresentou um deslocamento de 1,9 mm, ou seja, 168,4% menor que a viga V2 que deslocou 5,10 mm. No que se refere a V2R, o deslocamento, quando comparado com a V1ref foi 167,9% maior. O Deslocamento vertical obtido na viga V1Ref para a carga última teórica foi de 5,50 mm, sendo 27,3% menor que o deslocamento da viga V2R.

Analisando os resultados obtidos das deformações das barras de aço, no instante da abertura da primeira fissura, a viga V1Ref apresentou uma deformação média nas armaduras de 0,22‰, e para a viga V2 foi de 0,05‰. Assim, as armaduras da viga V1Ref deformaram 340% a mais que as da viga V2. No instante que a abertura de fissura apresentava-se com medida igual a 0,3 mm, as armaduras

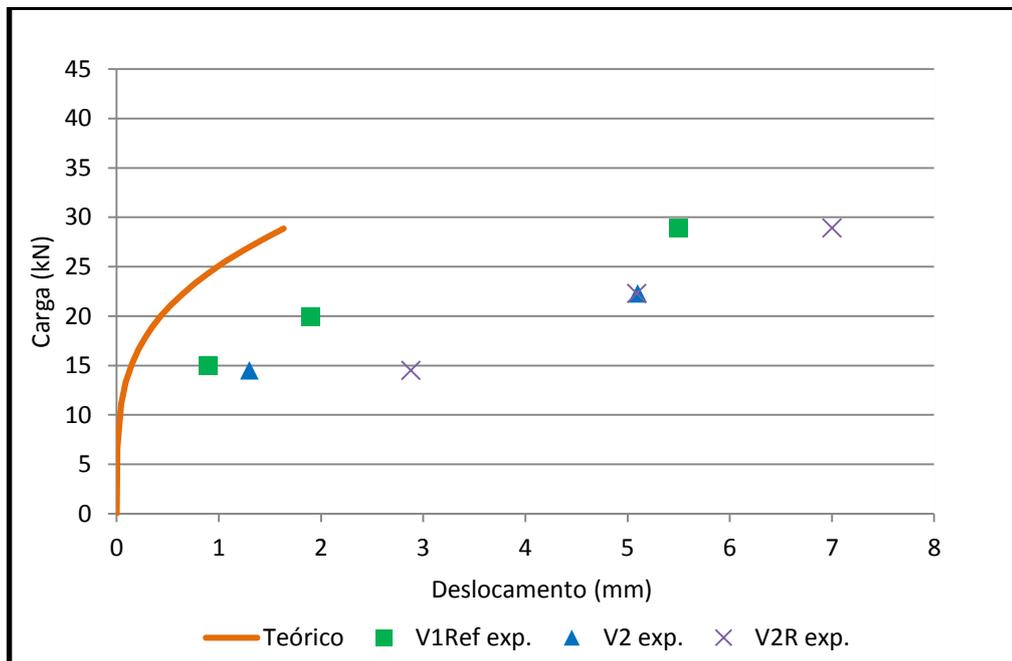
da viga V1Ref deformaram 0,97‰, isso significa que a deformação foi 3,2% superior a encontrada na viga V2 (0,94‰).

Além disso, de acordo com a Tabela 12 a deformação média do concreto da viga V1Ref no instante da abertura da primeira fissura foi de 0,11 ‰, enquanto que a deformação da viga V2 foi de 0,09 ‰. Isso representa uma diferença de 22,2% entre as duas. Comparando a viga V1ref e a V2R, a deformação medida no concreto foi de 18,2% menor. No instante do limite de fissuração 0,3 mm, o concreto da viga V1Ref deformou 62,5% a mais que o concreto da viga V2 e 85,7% a superior que a viga V2R. Para a carga última teórica a deformação do concreto da viga V1Ref foi 155,5% maior que da viga V2R.

As Figuras 49, 50 e 51, apresentam os diagramas teóricos e experimentais dos deslocamentos verticais medidos no meio do vão das vigas, das deformações médias das armaduras e do concreto. Essas propriedades mecânicas foram medidas nos pontos referentes ao surgimento da primeira fissura, no instante em que a fissura apresentava abertura de 0,3mm, e para a carga máxima teórica, respectivamente.

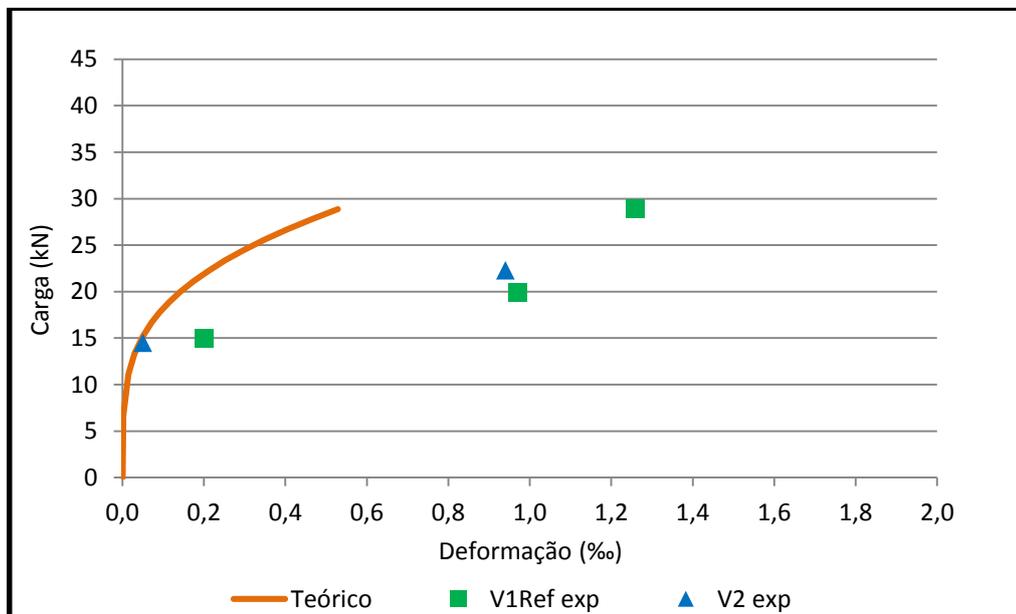
Para fins de análise as vigas foram calculadas utilizando o módulo de elasticidade do concreto de  $E_c=33557\text{Mpa}$ , calculado segundo a equação apresentada na ABNT, NBR 6118 (2014).

Figura 49 - Diagramas carga-deslocamento das vigas V1Ref, V2 e V2R, teórico e experimentais



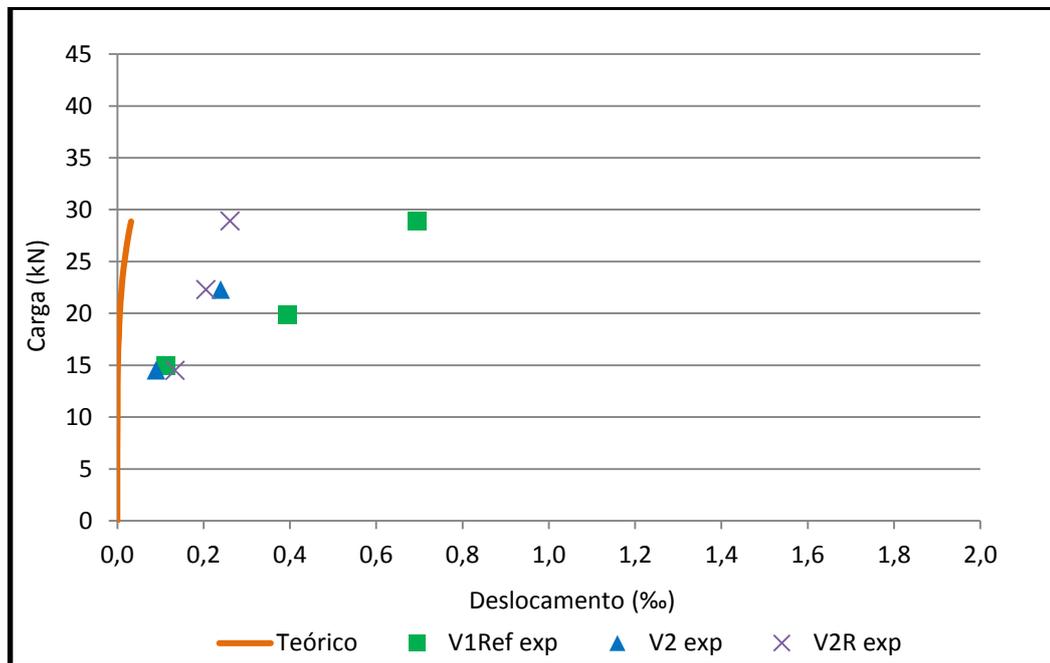
Fonte: Elaboração própria

Figura 50 – Diagramas carga-deformação média teórica e experimentais das armaduras das vigas V1Ref, V2



Fonte: Elaboração própria

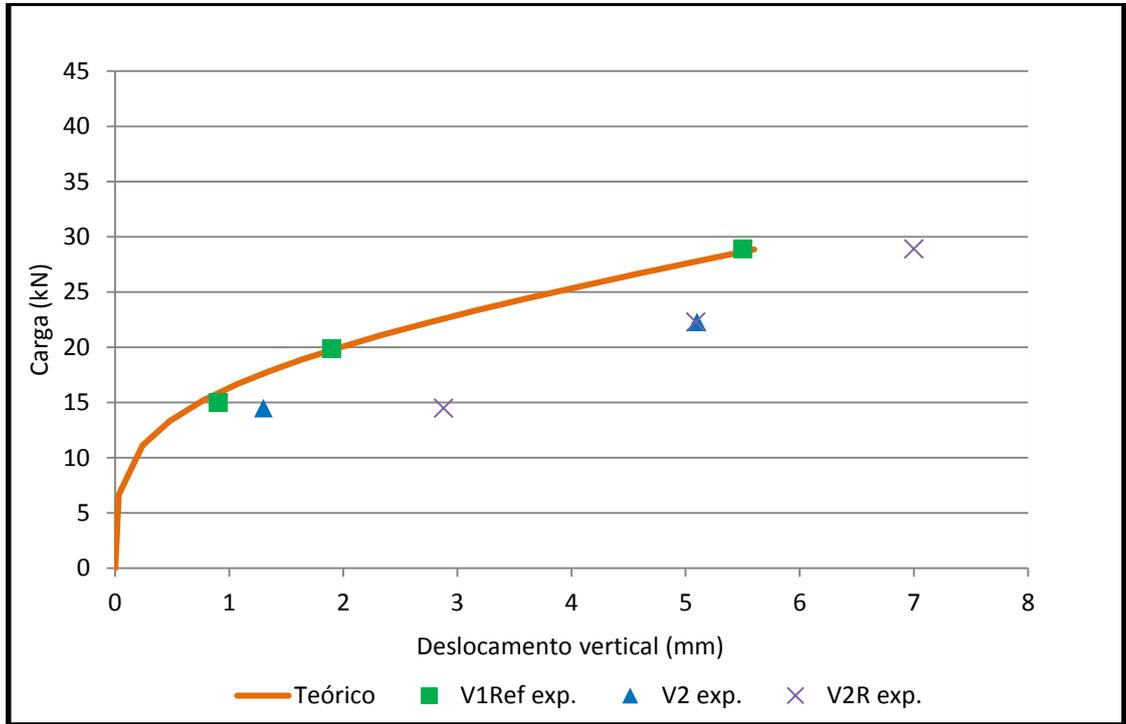
Figura 51 – Diagramas carga-deformação média teórica e experimentais do concreto das vigas V1Ref, V2 e V2R



Fonte: Elaboração própria

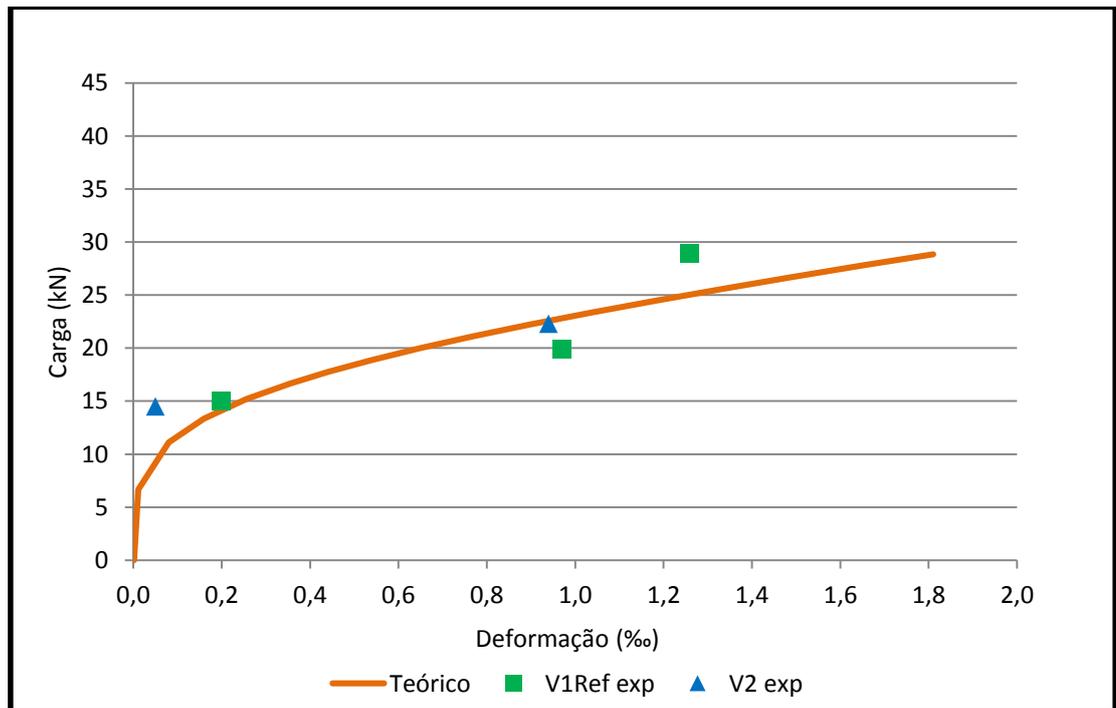
Nota-se nos gráficos que a curva teórica não mostrou uma boa correlação com os dados experimentais. No entanto, é possível observar que existe uma tendência entre as curvas. Essa aproximação foi realizada com o ajuste da rigidez, e é mostrado nas Figuras 52, 53 e 54. Essa correlação é de aproximadamente  $\frac{1}{4}$  da rigidez obtida segunda as equações apresentadas na ABNT, NBR 6118 (2014).

Figura 52 – Diagramas carga-deslocamento das vigas V1Ref, V2 e V2R, teórico e experimentais, com rigidez reduzida



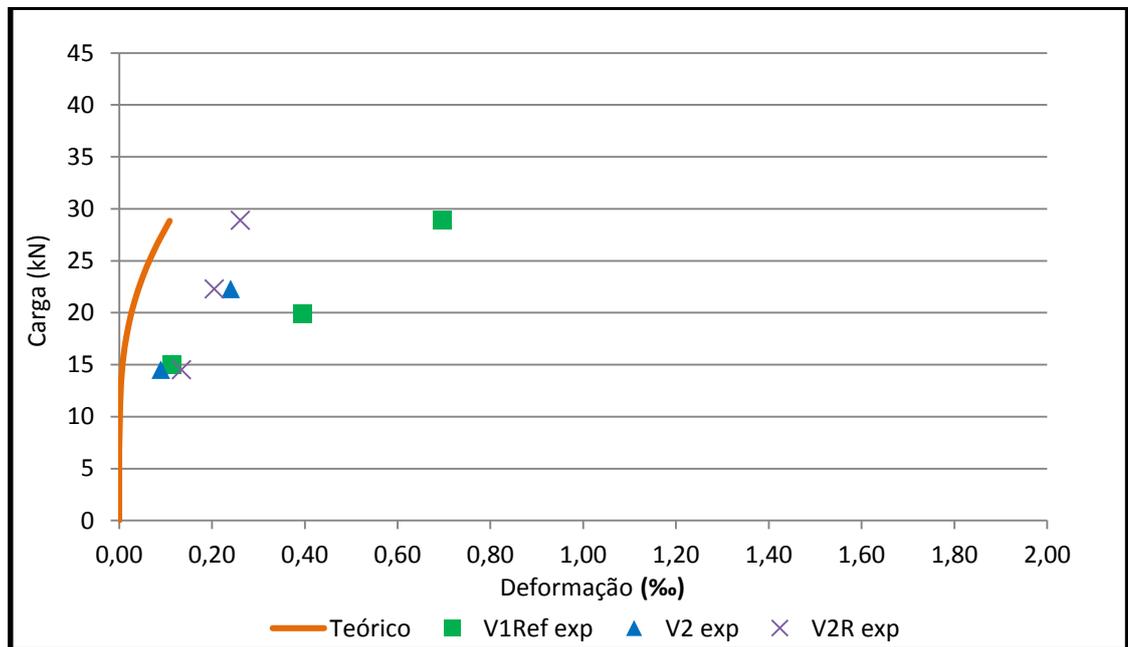
Fonte: Elaboração própria

Figura 53 – Diagramas carga-deformação média teórica e experimentais das armaduras das vigas V1Ref, V2, com rigidez reduzida



Fonte: Elaboração própria

Figura 54 – Diagramas carga-deformação média teórica e experimentais do concreto das vigas V1Ref, V2 e V2R, com rigidez reduzida



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 55 pode-se visualizar através da fissura a ponte de ligação proporcionada pela fibra de juta através da maior fissura apresentada pela viga V2R.

Figura 55 – Visualização da fibra de juta fazendo a ponte de ligação através da fissura



Fonte: Elaboração própria

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As principais conclusões referentes ao presente trabalho são listadas a seguir.

a) As deformações das barras de aço das vigas V1Ref e V2, apresentam comportamentos semelhantes.

b) Para obter uma melhor conclusão do comportamento das curvas carga-deformação do concreto das vigas ensaiadas é necessário realizar mais ensaios, assim facilitaria a comparação dos dados.

c) No que refere-se ao deslocamento vertical das vigas de referência e da viga reforça, para a carga referente a abertura de fissura 0,3 mm foi de 1,90 mm (viga V1Ref) e 5,10 mm (V2R), respectivamente. Isso demonstra que o reforço proporcionou que a viga V2R apresentasse um deslocamento 168,4% maior que o apresentado pela viga V1Ref para a mesma abertura de fissura. Também foi possível observar que o reforço proporcionou aumento de rigidez da viga, uma vez que a inclinação da curva da viga V2R foi maior que da V1Ref.

d) No que tange a abertura de fissuras, durante o processo de carregamento, as mesmas surgiram em carregamentos próximos ao determinados teoricamente.

e) De acordo com a correlação dos dados experimentais com o teórico conclui-se que a curva teórica não mostrou uma boa correlação com os dados experimentais. No entanto, foi possível observar que existe uma tendência entre as curvas. Essa correlação ajustada é de aproximadamente  $\frac{1}{4}$  da rigidez obtida segunda as equações apresentadas na ABNT, NBR 6118 (2014).

A execução do reforço não apresentou maiores dificuldades, e foi executado de forma rápida e sem necessidade de mão-de-obra especializada.

Conclui-se que o reforço teve um bom desempenho antes da abertura da primeira fissura, pois, a curva carga-deslocamento manteve-se linear até o carregamento de aproximadamente 2,5 kN (abertura da primeira fissura do reforço) e a partir daí a curva apresenta uma leve inclinação, dessa forma a viga V2R obteve ganho de rigidez, observado pela tangente da curva. Na carga última teórica de  $P_u = 28,90$  kN a viga V2R, infere-se um ganho aproximado de 20% de carga comparada com a tendência da curva da viga V2, além disso, obteve um aumento de aproximadamente 15% da carga última em relação a viga V1Ref.

### **a) Sugestões Para Trabalhos Futuros**

Através dos resultados obtidos na realização desse trabalho, assim como o conhecimento adquirido, sugere-se para trabalhos futuros os seguintes itens:

- determinação das propriedades mecânicas do compósito cimentício contendo fibras de juta;
- modelagem numérica de vigas de concreto armado reforçada à flexão com compósito contendo fibras de juta;
- reforço de vigas de concreto armado submetida à esforço cortante com compósito contendo fibras de juta.

## REFERÊNCIAS

**AltoQi**, Florianópolis, SC, jan. 2010. Disponível em: <<http://faq.altoqi.com.br/content/263/643/pt-br/impacto-econ%C3%B4mico-da-nbr-61182007-no-dimensionamento-de-pilares-de-concreto-armado.html>>. Acesso em: 10 jul. 2015.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.2R-96**: State of the Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, ACI, USA, 1996.

ARAÚJO, C. M. **Reforço de vigas de concreto à flexão e ao cisalhamento com tecidos de fibra de carbono**. 2002. 153 f. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

ARAÚJO, J.; SCIARRETTA, T. Ecológica, juta mira mercado de saco plástico. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 27 set. 2011. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2011/09/981370-ecologica-juta-mira-mercado-de-saco-plastico.shtml>>. Acesso em: 26 fev. 2014.

**Associação Brasileira da Batata**, A.B.B.A. Itapetinga, SP, mai. 2001. Disponível em: <[http://www.abbabatatabrasileira.com.br/revista01\\_013.htm](http://www.abbabatatabrasileira.com.br/revista01_013.htm)>. Acesso em: 2 fev. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2014.

BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósito de fibras de carbono**. 2003. 317 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BERNARDI, S. T. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar**. 2003. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering**. 7 ed., Nova Iorque: Editora John Wiley & Sons Inc., 1997.

FERREIRA, L. F. N. Í. **Reforço ao corte de elementos em betão armado com chapas metálicas**. 2009. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

FIGUEIREDO FILHO, J. R.; CARVALHO, R. C. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 3 ed., São Carlos, SP, EdUfscar, 2007.

Juta e malva são plantadas às margens do rio, em floresta amazônica. **Jornal é Notícia**, São Paulo, 27 mai. 2012. Disponível em: <<http://pautasnaweb.wordpress.com/2012/05/27/juta-e-malva-sao-plantadas-as-margens-do-rio-em-plena-floresta-amazonica/>>. Acesso em: 26 fev. 2014.

MATTHYS, S. **Structural behavior and design of Concrete members streng the ned with externally bonded FRP reinforcement**. 2000. 367 f. – Ghent University, Faculty of Engineering Department of structural Engineering, Ghent, 2000.

**Metacaulim do Brasil**, São Paulo, Disponível em: <<http://www.metacaulim.com.br/impermeabilizantes-metacaulim-hp-ultra.html>>. Acesso em: 10 jun. 2015

MELO FILHO, J. A. **Durabilidade química e térmica e comportamento mecânico de compósitos de alto desempenho reforçados com fibras de sisal**. 2012. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. **Natural fibers, biopolymers, and biocomposites**. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, 2005. Disponível em: <[http://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=AwXugfY2oc4C&oi=fnd&pg=PP1&dq=Mohanty,+A.+K.,+Misra,+M.,+Drza+l,+L.+T.+%E2%80%9CNatural+fibers,+biopolymers,+and+biocomposites%E2%80%9D.+Boca+Raton:+Taylor+%26+Francis,+2005.&ots=gKQ7LC5dQQ&sig=6jXK5AZXGZo\\_ExOAxUr5BcBlb-g#v=onepage&q&f=false](http://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=AwXugfY2oc4C&oi=fnd&pg=PP1&dq=Mohanty,+A.+K.,+Misra,+M.,+Drza+l,+L.+T.+%E2%80%9CNatural+fibers,+biopolymers,+and+biocomposites%E2%80%9D.+Boca+Raton:+Taylor+%26+Francis,+2005.&ots=gKQ7LC5dQQ&sig=6jXK5AZXGZo_ExOAxUr5BcBlb-g#v=onepage&q&f=false)>. Acesso em: 16 fev. 2014.

Pagamento antecipado socorre produtores afetados pela cheia no AM. **Portal Amazônia.com**, Amazônia, 5 abr. 2012. Disponível em: <<http://www.portalamazonia.com.br/editoria/atualidades/pagamento-antecipado-socorre-produtores-de-juta-e-malva-afetados-pela-cheia-no-am/>>. Acesso em: 25 fev. 2014.

PIRES, E. N. **Efeito do tratamento de superfície em fibras de juta no comportamento mecânico de compósitos de matriz epóxi**. 2009. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

REIS, A. P. A. **Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho**. 1998. 239 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

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

SALLABERRY, R. D. **Limite de deformação das firas de carbono usadas no reforço à flexão de vigas de concreto armado**. 2005. 162 f. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

SANTOS, E. W. F. **Reforço de vigas de concreto armado à flexão por encamisamento parcial**. 2006. 168 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SANTOS, P. M. **Comparação de Reforço com chapas de aço e firas de carbono em vigas de concreto armado submetidas à flexão simples**. 2008. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2008.

SILVA, R. V. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003. 157 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

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

VIANA, R. D. A. **Programa para dimensionamento de reforço à flexão e ao cisalhamento de vigas de concreto armado**. 2004. 130 f. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.