



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFRAESTRUTURA E  
DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO

DIEGO LUCENA DE SOUSA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO  
REFORÇADAS COM MACROFIBRAS SINTÉTICAS**

Tucuruí - Pará

2019

DIEGO LUCENA DE SOUSA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM VIGAS DE  
CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM MACROFIBRAS SINTÉTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético.

Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Dr. Marcelo Rassy Teixeira

Tucuruí – Pará

2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**  
**Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

- L935a Lucena de Sousa, Diego.  
AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO  
REFORÇADAS COM MACROFIBRAS SINTÉTICAS / Diego Lucena de Sousa, . — 2019.  
107 f. : il.
- Orientador(a): Prof. Dr. Marcelo Rassy Teixeira  
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e  
Desenvolvimento Energético, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Universidade Federal  
do Pará, Tucuruí, 2019.
1. Concreto armado. 2. Teores de fibras . 3. Tensão de cisalhamento. I. Título.

CDD 624.1834

---

DIEGO LUCENA DE SOUSA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM VIGAS DE  
CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM MACROFIBRAS SINTÉTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energ do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético.  
Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Dr. Marcelo Rassy Teixeira

Aprovada em 01 de fevereiro de 2019.

BANCA EXAMINADORA:

Marcelo Rassy Teixeira  
Dr. Marcelo Rassy Teixeira - UFPA-PPGINDE - Orientador

Aarão Ferreira Lima Neto  
Dr. Aarão Ferreira Lima Neto - UFPA-PPGINDE

Carolina U. da Rosa  
Dra. Carolina Coelho Rosa - UFPA-CAMTUC

Aos meus pais,  
Antenor Lucena e Teresinha  
Moraes.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, nosso Senhor, que me deu sabedoria, saúde e a oportunidade de realizar este sonho de ser mestre em infraestrutura e engenheiro formado nesta quão conceituada Universidade Federal do nosso Estado do Pará – Campus Universitário de Tucuruí.

Aos meus queridos pais, Antenor Lucena de Sousa e Teresinha Moraes Lucena de Sousa, que sempre me incentivaram nos estudos e me deram o apoio necessário para que eu conseguisse atingir os objetivos de vida. E ainda, a minha amada Flávia dos Santos de Sousa que sempre me apoiou e me motivou nesta tão difícil caminhada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Rassy Teixeira por ter aceitado o convite para a participação neste estudo, pela orientação desta pesquisa, atenção e confiança depositada em mim e sua contribuição para o meu amadurecimento pessoal e crescimento profissional.

Ao meu grande amigo Mateus Gonçalves de Oliveira por ter sido essencial para o desenvolvimento deste trabalho, pela disponibilização pessoal para a realização dos ensaios, principalmente por não hesitar em contribuir prontamente às minhas solicitações.

Ao professor Dr. Aarão Ferreira Lima Neto pela contribuição na escolha do tema e orientações sobre como prosseguir na linha de pesquisa.

Às mestrandas Rosângela Silva Pinto e Marília Caires Freire, e também aos discentes de graduação em engenharia civil do CAMTUC por disponibilizarem vosso tempo para a realização dos ensaios.

E também, às empresas Eletronorte/Eletróbrás, MM Fibras e MC-Bauchemie Brasil, pela doação dos agregados (gráudo e miúdo), fibras e aditivos, respectivamente, sendo materiais de suma importância para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

Com o crescimento da utilização de materiais compósitos em busca de se agregar às novas tecnologias, e, mediante a aplicação em teores de fibras sintéticas ao concreto, esse material pode acrescentar características favoráveis em relação ao concreto convencional. A partir desta constatação, este estudo realizou a aplicação de teores de 0,08%, 0,12% e 0,16% para a fibra de polipropileno e 0,24%, 0,36% e 0,48% para a fibra de polietileno em vigas de concreto armado para que se pudesse avaliar as devidas contribuições, quando tal elemento estivesse submetido a tensão de cisalhamento. Assim, após a realização dos ensaios pôde-se constatar que os elementos com aplicação de fibras obtiveram uma resistência acima, porém, próxima à viga produzida com o concreto de referência, por outro lado, à medida que se incrementou teores de ambas as fibras ao concreto produzido, o mesmo obteve um aumento de ductilidade, fato comprovado pelos gráficos cortante x deslocamento vertical, cortante x deformação no concreto e cortante x deformação na armadura de flexão, visto que, dentre os teores de fibras utilizados, os percentuais de 0,36% e 0,48% de polietileno e 0,16% de polipropileno foram os que apresentaram um volume crítico correspondente ao teor de fibras mais aproximado de um ideal, demonstrando assim, a proximidade da capacidade portante para tal compósito produzido, a partir da ruptura de sua matriz. Portanto, conforme Figueiredo (2000), a mudança de comportamento é função das características das fibras e da matriz de concreto e da sua interação. Desta forma, o material passa a ter exigências específicas para seu controle da qualidade, dosagem e até mesmo aplicação, diferentes do concreto convencional. Diante disso, pode-se afirmar que as possibilidades de aplicação do material são ampliadas, pois o concreto reforçado com fibras apresentou vantagens tecnológicas em relação ao convencional, pois o mesmo evidenciou um comportamento mais dúctil, absorvendo uma mesma capacidade de carga por um maior período de tempo.

Palavras chave: Concreto armado. Teores de fibras. Tensão de cisalhamento.

## ABSTRACT

With the increased use of composite materials, in search of adding to the new technologies, and, through the application in synthetic fiber contents to the concrete, this material can add favorable characteristics in relation to the conventional concrete. From this finding, the present study applied 0.08%, 0.12% and 0.16% for polypropylene fiber and 0.24%, 0.36% and 0.48% for polyethylene fiber in reinforced concrete beams so that the appropriate contributions could be evaluated, when this element was subjected to shear stress. Thus, after the tests, it was possible to observe that the elements with fiber application obtained a resistance above, however, close to the beam produced with the reference concrete. In contrast, as the contents of both fibers were increased, it obtained a ductility increment, a fact proven by the graphics shear x vertical displacement, shear x concrete deformation and shear x bending armor deformation, since, among the fiber contents used, the percentages of 0.36 % and 0.48% of polyethylene and 0.16% of polypropylene were the ones that presented a critical volume corresponding to the fiber content closest to an ideal, thus demonstrating the proximity of the carrying capacity for such produced composite, from the rupture of its matrix. Therefore, according to Figueiredo (2000), the behavior change is a function of the fibers characteristics, the concrete matrix and their interaction. In this way, the material now has specific requirements for its quality control, dosage and even application, different from conventional concrete. In view of this, it can be stated that the application possibilities of the material are amplified, since the reinforced concrete with fibers presented technological advantages in relation to the conventional one, as it showed a more ductile behavior, absorbing na equal load capacity for a longer period of time.

Key words: Reinforced concrete. Fiber content. Shear stress.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Mecanismo de transferência de tensões entre matriz e fibras .....	02
Figura 2.1 – Representações esquemáticas das diversas características geométricas espaciais das partículas da fase dispersa que podem influenciar as propriedades dos compósitos: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e (e) orientação .....	08
Figura 2.2 - Configuração das fibras para materiais compósitos .....	09
Figura 2.3 – Esquema de classificação dos compósitos .....	10
Figura 2.4 – Esquema de compósitos reforçados com fibras .....	11
Figura 2.5 – Concentração de tensões sem (esquerda) e com (direita) o reforço de fibras .....	12
Figura 2.6 – Compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão .....	13
Figura 2.7 – Concreto reforçado com fibras onde há compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo (esquerda), Concreto reforçado com fibras onde não há compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo (direita) .....	14
Figura 2.8 – Diferença do comportamento entre fibras frágeis (à esquerda) e dúcteis (à direita) quando se encontram inclinadas em relação a superfície de ruptura .....	14
Figura 2.9 – Aglomerado de fibras mal misturadas ao concreto .....	16
Figura 2.10 – Concentrações de tensões no concreto sem reforço de fibras .....	18
Figura 2.11 – Concentrações de tensões no concreto com reforço de fibras .....	18
Figura 2.12 – Resultado do gráfico de estudo de dosagem .....	21
Figura 2.13 – Estados limites de vigas com armadura transversal .....	23
Figura 2.14 – Modelos recomendados pela norma ABNT NBR 6118 (2014) para ancoragem de estribos .....	27
Figura 2.15 – Modelos recomendados pela norma Eurocode 2 (2004) para ancoragem de estribos .....	29
Figura 2.16 – Distribuição de tensão e deformação admitida para o Estado Limite Último .....	30
Figura 3.1 – Ensaio de abatimento pelo método do tronco de cone .....	37
Figura 3.2 – Moldagem dos corpos de prova .....	39

Figura 3.3 – Corpos de prova em câmara úmida para realização da cura .....	39
Figura 3.4 – Corpo de prova no momento do ensaio de compressão .....	40
Figura 3.5 – Corpo de prova no momento do ensaio de tração .....	42
Figura 3.6 – Corpo de prova no momento do ensaio de módulo .....	43
Figura 3.7 – Ensaio de caracterização do aço .....	45
Figura 3.8 – Tensão X deformação do aço .....	45
Figura 3.9 – Detalhamento da armadura utilizada nas vigas .....	46
Figura 3.10 – Disposição das armaduras longitudinais .....	47
Figura 3.11 – Armadura executada para a viga .....	47
Figura 3.12 – Dados referentes os elementos de ensaios .....	48
Figura 3.13 – Strain Gages do aço colados e protegidos para a execução da concretagem .....	49
Figura 3.14 – Strain Gages internos do concreto pronto para a execução da concretagem .....	49
Figura 3.15 – Strain Gage externo para concreto colado na face da viga .....	50
Figura 3.16 – Posicionamento do yoke durante o ensaio do elemento .....	50
Figura 3.17 – Posicionamento do LVDT durante o ensaio do elemento .....	51
Figura 3.18 – Modelo do sistema adotado para ensaio das vigas .....	52
Figura 3.19 – Inserção de dados não lineares-concreto .....	53
Figura 3.20 – Implementação do comportamento elastoplástico ao aço .....	54
Figura 3.21 – Configuração da seção transversal no software-SAP2000 .....	54
Figura 3.22 – Diagrama momento-curvatura .....	55
Figura 3.23 – Demonstração do encurtamento máximo (concreto) e alongamento máximo (aço) .....	56
Figura 3.24 – Evolução das tensões na seção .....	57
Figura 4.1 – Deslocamento vertical – VFSP01/VREF .....	59
Figura 4.2 – Deformação no concreto – VFSP01/VREF .....	59
Figura 4.3 – Deformação na armadura de flexão – VFSP01/VREF .....	60
Figura 4.4 – Deslocamento vertical – VFSP02/VREF .....	61
Figura 4.5 – Deformação no concreto – VFSP02/VREF .....	61
Figura 4.6 – Deformação na armadura de flexão – VFSP02/VREF .....	62
Figura 4.7 – Deslocamento vertical – VFSP03/VREF .....	63
Figura 4.8 – Deformação no concreto – VFSP03/VREF .....	63

Figura 4.9 – Deformação na armadura de flexão – VFSP03/VREF .....	64
Figura 4.10 – Deslocamento vertical – VFP01/VREF .....	65
Figura 4.11 – Deformação no concreto – VFP01/VREF .....	65
Figura 4.12 – Deformação na armadura de flexão – VFP01/VREF .....	66
Figura 4.13 – Deslocamento vertical – VFP02/VREF .....	67
Figura 4.14 – Deformação no concreto – VFP02/VREF .....	67
Figura 4.15 – Deformação na armadura de flexão – VFP02/VREF .....	68
Figura 4.16 – Deslocamento vertical – VFP03/VREF .....	69
Figura 4.17 – Deformação no concreto – VFP03/VREF .....	69
Figura 4.18 – Deformação na armadura de flexão – VFP03/VREF .....	70
Figura 4.19 – Cortante x Deslocamento vertical - Vigas de referência e VFSP .....	71
Figura 4.20 – Cortante x Deslocamento vertical - Vigas de referência e VFP .....	71
Figura 4.21 – Cortante x Deformação no concreto - Vigas de referência e VFSP ..	72
Figura 4.22 – Cortante x Deformação no concreto - Vigas de referência e VFP .....	72
Figura 4.23 – Cortante x Deformação na armadura de flexão- Vigas de referência e VFSP .....	73
Figura 4.24 – Cortante x Deformação na armadura de flexão- Vigas de referência e VFP .....	73
Figura 4.25 – Aspecto pós-ruptura da viga de referência .....	74
Figura 4.26 – Aspecto pós-ruptura da viga de VMP 01 .....	75
Figura 4.27 – Aspecto pós-ruptura da viga de VMP 02 .....	76
Figura 4.28 – Aspecto pós-ruptura da viga de VMP 03 .....	77
Figura 4.29 – Aspecto pós-ruptura da viga de VMSP 01 .....	78
Figura 4.30 – Aspecto pós-ruptura da viga de VMSP 02 .....	79
Figura 4.31 – Aspecto pós-ruptura da viga de VMSP 03 .....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Características físicas do cimento .....	32
Tabela 3.2 – Características físicas do agregado graúdo .....	33
Tabela 3.3 – Características físicas do agregado miúdo – areia natural .....	33
Tabela 3.4 – Características da Fibra de Polipropileno .....	34
Tabela 3.5 – Características da Fibra Sintética de Polietileno .....	34
Tabela 3.6 – Dados Técnicos - Muraplast FK 101 .....	35
Tabela 3.7 – Quantitativo dos materiais utilizados para cada viga e resultado do Slump .....	38
Tabela 3.8 – Propriedades mecânicas do concreto – Ensaio de Compressão .....	41
Tabela 3.9 – Propriedades mecânicas do concreto – Ensaio de tração .....	42
Tabela 3.10 – Propriedades mecânicas do concreto – Ensaio de módulo .....	44
Tabela 3.11 – Propriedades mecânicas do aço .....	45
Tabela 3.12 – Principais características das vigas .....	48
Tabela 4.1 – Cargas de rupturas dos elementos .....	81
Tabela 4.2 – Cargas de rupturas dos elementos-comparação às normas .....	82

## LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ACI - American Concrete Institute  
ADS - sistema de aquisição de dados  
CAFP - concreto armado com adição de fibra de polipropileno  
CAFSP - concreto armado com adição de fibra sintética de polietileno  
CAMTUC - Campus Universitário de Tucuruí  
CCV - concreto convencional  
CFP - concreto com aplicação de fibra de polipropileno  
CFSP - concreto com aplicação de fibra sintética de polietileno  
CP - corpo de prova  
CR - concreto de referência  
CRF - concreto reforçado com fibras  
DMC - diâmetro máximo característico  
EB - especificações brasileiras  
ETA - estação de tratamento de água  
FF - fator forma  
GPa - gigapascal  
LEC - laboratório de engenharia civil  
LVDT - transdutor de deslocamento linear variável  
MPa - megapascal  
UFPA - Universidade Federal do Pará  
VFP - viga em concreto armado com aplicação de fibra de polipropileno  
VFSP - viga em concreto armado com aplicação de fibra sintética de polietileno  
Vref - resistência última ao cisalhamento da viga de referência  
VREF - viga de referência  
NBR - Norma Brasileira

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $a$  - vão de cisalhamento da peça
- $A$  - relação agregado miúdo/cimento, em massa (kg/kg)
- $A_S$  - área de aço das armaduras longitudinais
- $A_W$  - área de aço de uma seção transversal
- $B$  - relação agregado graúdo/cimento, em massa (kg/kg)
- $b_w$  - largura da viga
- $c$  - altura do bloco de compressão do concreto
- $C$  - consumo de cimento por  $m^3$  de concreto
- $D$  - altura útil da viga
- $D_k$  - diâmetro característico
- $E$  - deformação
- $E$  - módulo de elasticidade
- $F_c$  - resistência a compressão do concreto
- $F_{cd}$  - resistência a compressão de cálculo
- $F_{cj}$  - resistência a compressão axial em MPa, na idade  $j$ (dias)
- $f_{ct,m}$  - resistência média à tração do concreto
- $f_{ctk,inf}$  - resistência do concreto à tração frágil
- $f_{y,w}$  - tensão da armadura transversal
- $f_{ys}$  - tensão de escoamento do aço
- $H$  - altura da viga
- $K$  - considera a redução ao cisalhamento devido ao efeito escala
- $L$  - comprimento da viga
- $M$  - relação agregado/cimento, em massa (kg/kg)
- $S$  - espaçamento entre as camadas da armadura transversal
- $\alpha$  - ângulo de inclinação entre a armadura transversal e a longitudinal
- $\alpha(\%)$  - teor de argamassa seca
- $\theta$  - ângulo de inclinação da biela no momento do rompimento
- $\eta$  - constante assumida com o valor 1 para seções constantes e 0,9 para os demais casos
- $\alpha_{cc}$  - constante assumida como 0,85 para  $f_c \leq 50$  MPa

$\rho_l$  - taxa de armadura longitudinal

$\rho_w$  - taxa de armadura transversal

$\varnothing_f$  - diâmetro da barra de aço da armadura longitudinal

$\varnothing_w$  - diâmetro da barra de aço da armadura transversal

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1.	Objetivos .....	2
1.1.1.	Objetivo geral.....	2
1.1.2.	Objetivos específicos .....	2
1.2.	Justificativa .....	3
1.3.	Organização do trabalho.....	3
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1.	Concreto com Fibras.....	5
2.1.1.	Histórico .....	5
2.1.2.	Tipos de fibras .....	6
2.1.2.1.	Macrofibras .....	6
2.1.2.2.	Microfibras .....	6
2.1.3.	Materiais Compósitos .....	7
2.1.4.	Interação Fibra Matriz .....	10
2.1.4.1.	Influência do comprimento da fibra .....	10
2.1.4.2.	Influência da orientação e da concentração de fibra.....	11
2.1.4.3.	Influência da fibra na matriz de concreto .....	12
2.1.5.	Propriedades no Estado Fresco.....	15
2.1.6.	Propriedades no Estado Endurecido .....	16
2.1.6.1.	Resistência mecânica .....	16
2.1.6.2.	Comportamento ao surgimento de microfissuras.....	17
2.1.7.	Dosagem de concreto com fibras .....	18
2.1.8.	Aplicações.....	21
2.2.	Cisalhamento em elementos de concreto armado.....	22
2.2.1.	Resistência ao cisalhamento unidirecional .....	22
2.2.2.	Estados limites para vigas de concreto armado sob armadura de cisalhamento .....	23
2.2.3.	Recomendações normativas.....	24
2.2.3.1.	ACI 318 (2014).....	24
2.2.3.2.	ABNT NBR 6118 (2014).....	25

2.2.3.3.	Eurocode 2 (2004) .....	28
2.3.	Resistência à flexão em vigas.....	30
2.4.	SAP 2000.....	31
<b>3.</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>32</b>
3.1.	Materiais .....	32
3.1.1.	Cimento Portland .....	32
3.1.2.	Agregados.....	32
3.1.2.1.	Agregado Graúdo .....	32
3.1.2.2.	Agregado Miúdo.....	33
3.1.3.	Fibras .....	34
3.1.3.1.	Fibra de Polipropileno .....	34
3.1.3.2.	Fibra Sintética de Polietileno.....	34
3.1.4.	Aditivos .....	34
3.2.	Métodos .....	35
3.2.1.	Dimensionamento e Ensaio ao Esforço de Cisalhante dos Elementos ...	35
3.2.2.	Dosagem do Concreto Convencional .....	35
3.2.3.	Incorporação das Fibras ao Concreto.....	36
3.2.4.	Ensaio no Estado Fresco do Concreto.....	37
3.2.4.1.	Abatimento do tronco de cone .....	37
3.2.5.	Moldagem dos corpos de prova.....	38
3.2.6.	Ensaio no estado endurecido.....	40
3.2.6.1.	Ensaio de resistência à compressão .....	40
3.2.6.2.	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	41
3.2.6.3.	Ensaio de módulo .....	43
3.2.7.	Propriedades mecânicas do aço.....	44
3.2.8.	Determinação do modelo físico.....	46
3.2.9.	Características dos Elementos .....	47
3.2.10.	Instrumentação dos Elementos.....	48
3.2.11.	Modelo do Sistema de Ensaio das Vigas .....	51
3.2.12.	Análise não linear utilizando o software SAP 2000.....	52
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>58</b>
4.1.	Respostas à flexão das vigas .....	58

4.1.1.	Análise comparativa entre VFSP01 e VREF .....	58
4.1.2.	Análise comparativa entre VFSP02 e VREF .....	60
4.1.3.	Análise comparativa entre VFSP03 e VREF .....	62
4.1.4.	Análise comparativa entre VFP01 e VREF .....	64
4.1.5.	Análise comparativa entre VFP02 e VREF .....	66
4.1.6.	Análise comparativa entre VFP03 e VREF .....	68
4.2.	Análises comparativas entre as vigas .....	70
4.2.1.	Deslocamento vertical.....	70
4.2.2.	Deformações do concreto .....	71
4.2.3.	Deformações da armadura de flexão.....	72
4.2.4.	Mapa de fissuração e superfície de ruptura.....	74
4.3.	Cargas de rupturas dos elementos .....	80
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>83</b>
5.1.	Considerações gerais .....	83
5.2.	Considerações sobre os resultados dos ensaios.....	83
5.2.1.	Ensaio experimental dos corpos de prova.....	83
5.2.2.	Ensaio experimental das vigas.....	84
5.3.	Sugestões para futuros trabalhos .....	84
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>86</b>

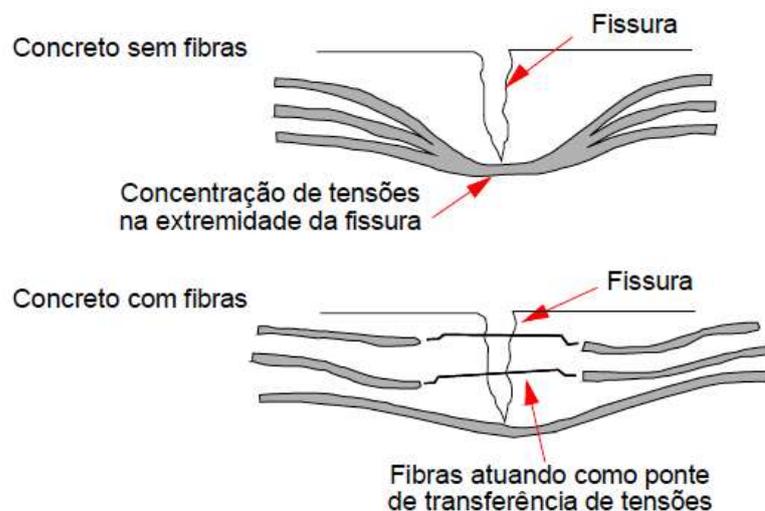
## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos vários estudiosos vêm realizando pesquisas no que se refere ao reforço das estruturas de concreto, visto que tais elementos resultam da junção do concreto com o aço. Desse processo, a consequência é uma relação mútua entre os dois materiais, pois o aço promove a estrutura endurecida capacidade de resistir a maiores tensões de tração e o concreto quando curado o protege contra agentes agressivos que poderão provocar a corrosão do mesmo.

Como o material mais utilizado na construção civil é o concreto, vem se desenvolvendo ao longo dos anos por meio de pesquisas diferentes tipos de concretos, buscando facilitar o emprego desse material em diversas aplicações na construção civil.

Estudiosos vêm buscando realizar trabalhos a aplicação de fibras ao concreto, visando proporcionar a melhoria de ductilidade e tenacidade do material, visto que o concreto está propício ao surgimento de microfissuras quando submetido a ciclos de carregamento, tendendo a diminuir a durabilidade do mesmo. Desta forma, a fim de que se possa atenuar tais problemas apresentados nos elementos estruturais de concreto armado, a aplicação de fibras ao concreto, poderá resultar em uma melhoria quando analisado a resistência à fadiga.

Sabe-se ainda que em uma matriz de concreto, pesquisas vêm comprovando que as fibras impedem a formação microfissuras durante o endurecimento da pasta de cimento, impedindo a propagação das mesmas e retardando o aparecimento de microfissuras, e consequentemente, aumentando a durabilidade do concreto. Portanto, de acordo com Medeiros (2012), ao se adicionar fibras com a resistência e módulo de elasticidade adequados, em um teor apropriado, o material deixa de ter característica frágil, pois a fibra age como ponte de transferência de tensões (Figura 1.1), reduzindo grandemente a propagação de fissuras no referido material.



**Figura 1.1 – Mecanismo de transferência de tensões entre matriz e fibras.**  
**Fonte: Medeiros, 2012.**

Portanto, este trabalho se propõe a levantar informações sobre a possível contribuição que variações percentuais em massa de fibras sintéticas inseridas em concretos convencionais poderão proporcionar para vigas sujeitas aos esforços de cisalhamento.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo geral**

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar a relação à resistência ao cisalhamento em vigas moldadas em concreto convencional reforçadas com macrofibras sintéticas e, assim, alçar as contribuições que tais fibras poderão proporcionar a estes elementos.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Realizar a aplicação de teores de fibras de polipropileno (0,08%, 0,12% e 0,16%) e polietileno (0,24%, 0,36% e 0,48%) ao concreto convencional
- Verificar o ganho ou não de resistência ao cisalhamento das peças por meio de aplicações de teores variáveis em frações volumétricas de fibras;
- Verificar as possíveis contribuições que as fibras de polietileno e polipropileno poderão proporcionar ao concreto estrutural;

– Realizar a análise não linear da seção transversal por meio de software, simulando os elementos para que se possa obter uma leitura do encaminhamento das tensões que tais elementos poderão sofrer durante a aplicação de carga para o rompimento dos mesmos e assim verificar como tais elementos se comportariam caso fossem armados para resistir ao esforço cortante.

## **1.2. Justificativa**

Vários estudos têm sido realizados com o advento da aplicação de fibras ao concreto, entretanto, no país, ainda há poucas pesquisas voltadas à utilização de fibras sintéticas como reforço estrutural. Além disso, em sua maioria, parte de estudos já realizados deram ênfase à aplicação de aço e carbono, sendo que ainda há uma lacuna sobre um direcionamento à viabilidade de um possível reforço estrutural com relação à tensão de cisalhamento. Portanto, a realização deste trabalho se justifica pela necessidade de buscar resultados experimentais a respeito das possíveis contribuições que a aplicação de fibras sintéticas de polipropileno e polietileno ao concreto poderão proporcionar a elementos estruturais sujeitos a tensões de cisalhamento.

## **1.3. Organização do trabalho**

No capítulo 1, apresenta-se a introdução do trabalho, objetivo geral, objetivos específicos e a justificativa do referido estudo.

No capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica, demonstrando os tipos de fibras introduzidas ao concreto, a dosagem do concreto com fibras e suas aplicações, além da interação fibra-matriz. Ainda neste capítulo, está apresentado o levantamento teórico de recomendações normativas de dimensionamento de elementos de concreto armado quanto aos esforços de cisalhamento.

No capítulo 3, apresenta-se o programa experimental, demonstrando o método de dosagem adotado e a definição do traço do concreto que foi utilizado para moldar os elementos, além de definir os percentuais das fibras a serem utilizadas. Ainda neste capítulo, é apresentado o modelo físico adotado para as vigas após o dimensionamento das mesmas, bem como a instrumentação e o modelo do sistema de ensaio.

No capítulo 4, apresenta-se por meio de gráficos, os resultados experimentais realizados neste estudo, como também as devidas discussões a respeito dos mesmos.

No capítulo 5, por fim, apresenta-se as conclusões a respeito do referido estudo, além de propor sugestões para a realização de trabalhos futuros que possam dar continuidade a esta linha de pesquisa.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Concreto com Fibras**

#### **2.1.1. Histórico**

O Concreto Reforçado com Fibras (CRF) vem sendo usado desde 1960. E atualmente, podendo ser encontrados em várias aplicações na construção civil como telhas, painéis de vedação vertical e estruturas de concreto como túneis e pavimentos, onde o concreto reforçado com fibras vem progressivamente ampliando sua aplicação (FIGUEIREDO, 2000).

Conforme descrito por Neville & Brooks (2013), o concreto, no sentido mais amplo, é qualquer produto ou massa produzido a partir do uso de um meio cimentante. Comumente, esse meio é o produto da reação entre um cimento hidráulico e água, porém, atualmente mesmo essa definição pode cobrir uma larga gama de produtos. Desta forma, o concreto pode ser produzido com vários tipos de cimento e também conter pozolanas, como cinza volante, escória de alto-forno, sílica ativa, adições minerais, agregados de concreto reciclado, aditivos, polímeros e fibras. Além disso, esses concretos podem ser aquecidos, curados a vapor, autoclavados, tratados a vácuo, prensados, vibrados por impactos (shock-vibrated), extrudados e projetados.

O concreto possui o posto de material estrutural que mais é utilizado no mundo devido a uma série de características que possui. No entanto, existem algumas limitações como a baixa deformação antes de romper, quando solicitado a tração, comportamento frágil, e uma reduzida resistência à tração, quando comparado a resistência à compressão. Assim, uma forma de contornar essas limitações, é o incremento de fibras.

Assim, o concreto reforçado com fibras (CRF) surgiu como meio alternativo para os casos nos quais utilizam o emprego do concreto, aço e materiais tradicionais, não é adequado/viável. Logo, têm presenciado que diversas indústrias já usavam os materiais compósitos com êxito, apresentando propriedades como elevada resistência à tração, resistência à corrosão, leveza, amortecimento ao choque, fadiga e isolamento eletromagnético. Com isso, despertou o interesse da indústria da construção civil (ARAÚJO, 2002).

O CRF contém cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, água e fibras. As fibras podem ser de vários tamanhos e formas, sendo de aço, vidro, plástico e materiais naturais, no entanto, para grande parte da utilização em peças estruturais e não estruturais, a mais utilizada é a de aço (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Logo, com o desenvolvimento de outros tipos de fibras, como exemplo as sintéticas, vem ganhando mercado na aplicação de concretos estruturais no Brasil e no mundo.

### **2.1.2. Tipos de fibras**

Em 1960, as primeiras fibras usadas foram as fibras de asbestos misturadas ao cimento. Atualmente, o mercado vem disponibilizando outros tipos de fibras como: aço, polipropileno, carbono, vidro, nylon, celulose, acrílico, polietileno, madeira, sisal, etc.

#### **2.1.2.1. Macrofibras**

As macrofibras proporcionam resistência a retração por fissuração plástica, além de fornecer ao concreto o aumento da durabilidade, tenacidade e capacidade de proporcionar resistência estrutural limitada. As macrofibras sintéticas são projetadas para serem dosadas em quantidades para se equivaler ao reforço convencional em aço, como os vergalhões e telas eletrosoldadas, e ela irá se distribuir tridimensionalmente por toda a matriz de concreto (GRANATO e POLIDORO, 2017).

#### **2.1.2.2. Microfibras**

As microfibras possuem alta resistência à formação de fissuras por retração plástica, em comparação com as telas de aço, no entanto, elas não são capazes de fornecer resistência à abertura de fissuras por retração hidráulica, carregamentos estruturais ou outras formas de tensões. Porém, esses materiais podem ser utilizados em qualquer tipo de concreto para aumentar à resistência a fissuração, efeito anti-spalling, durabilidade e homogeneidade do concreto durante seu lançamento (GRANATO e POLIDORO, 2017).

### 2.1.3. Materiais Compósitos

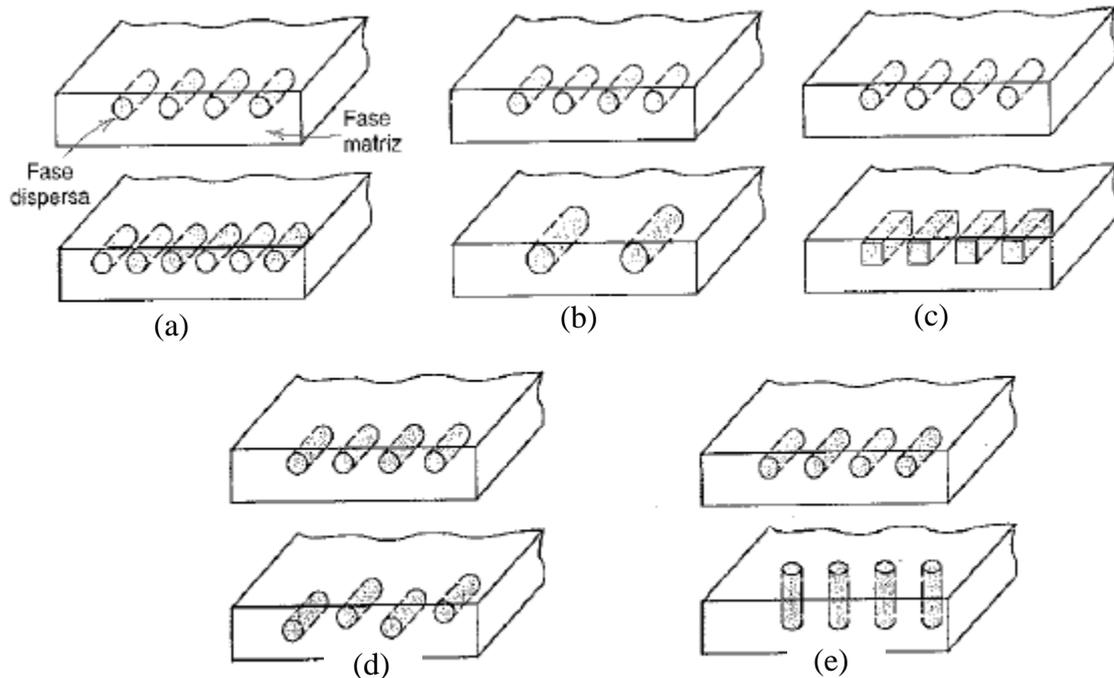
Diversas tecnologias modernas fazem uso de materiais que necessitam de várias combinações de propriedades fora do comum e, tais propriedades não são supridas somente por ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos convencionais. Assim, para se criar novos materiais com características que venham a surpreender o mercado consumidor, pesquisadores combinam de maneira engenhosa materiais como o ferro, cerâmica, polímeros, dentre outros, constituindo assim os compósitos (SCHETTINO, 2015).

A definição de compósito consiste na combinação de dois ou mais materiais, que atuam solidariamente/em conjunto mantendo suas próprias identidades. Logo, os polímeros apresentam características como materiais compósitos anisotrópicos, não homogêneos e de comportamento perfeitamente elástico até a ruína (ARAÚJO, 2002).

Os polímeros reforçados com fibra (PRF) ou "*fiber reinforced polymers*" (FRP) são constituídos por um componente estrutural -as fibras- e também por um componente matricial -a resina polimérica e, geralmente, por alguns "*fillers*", além de aditivos) (ARAÚJO, 2002).

Por sua vez, o desempenho de um PRF é determinado pelas características e propriedades dos materiais, pelas qualidades da execução do reforço e pela interação desses materiais, por isso de sua grande versatilidade (ARAÚJO, 2002).

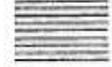
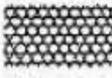
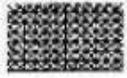
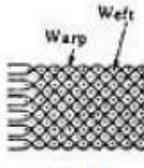
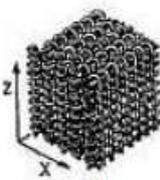
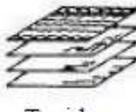
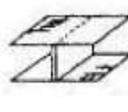
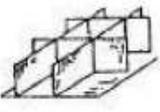
Materiais compósitos, em sua grande maioria, são constituídos somente por duas fases que são: matriz e dispersa. A fase matriz é contínua e envolve a outra fase, a dispersa. As propriedades dos compósitos são uma função das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa. Assim, a "geometria da fase dispersa" refere-se à forma das partículas, o seu tamanho, a sua distribuição e a sua orientação, conforme pode ser observado na Figura 2.1 (SCHETTINO, 2015).



**Figura 2.1 – Representações esquemáticas das diversas características geométricas espaciais das partículas da fase dispersa que podem influenciar as propriedades dos compósitos: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e (e) orientação.**  
**Fonte: Callister, 2002 apud. Richard A. Flinn and Paul K. Trojan.**

Para a definição do objetivo principal a que se designa e a estimativa do custo real da sua produção, a forma geral de um compósito irá depender dos pressupostos citados. Sendo que o segundo pressuposto, estimativa do custo real da sua produção, com o predomínio significativo ligado a seleção do referido produto, tem recentemente, se justificado, o incremento na investigação de processos automáticos de fabricação (Pultrusão) e de formas simples, tendo em vista torná-lo mais competitivo quando comparados aos materiais usados tradicionalmente (MENON, 2008).

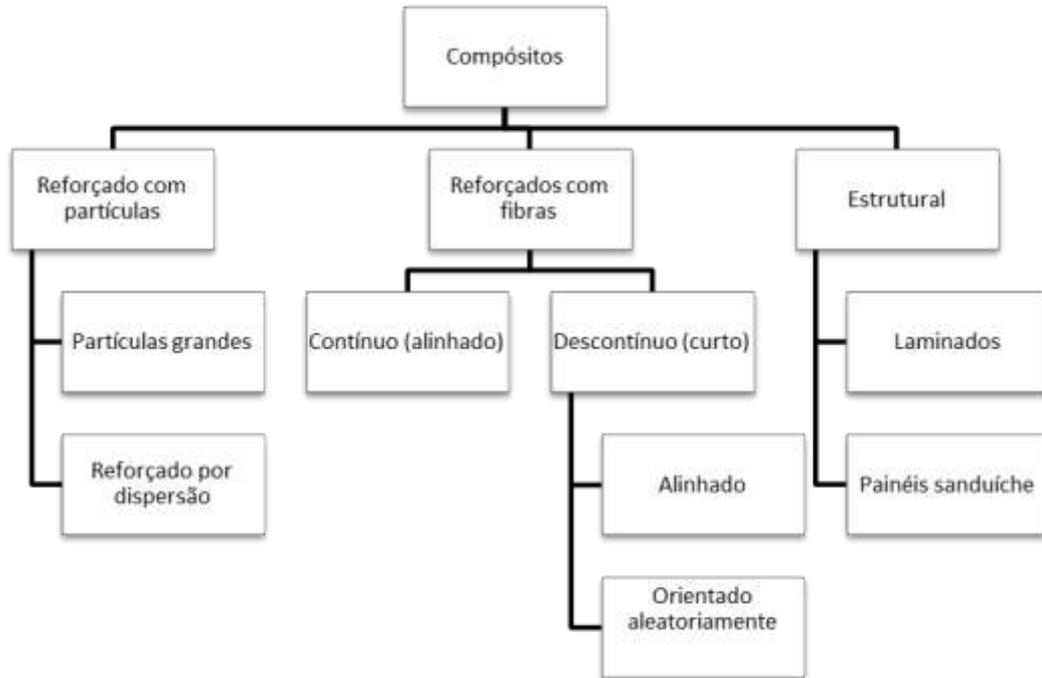
Com isso, a disposição das fibras no produto final e a consideração da configuração geométrica espacial são parâmetros de base, com isso, os compósitos de PRF podem ser classificados em três grandes grupos, quanto à forma, como observado na Figura 2.2. Logo, os primeiros, onde essencialmente se incluem produtos com comportamento unidirecional e forma linear, como se pode ver, por exemplo, os cabos destinados a sistemas de protensão, fios entrelaçados, as barras obtidas por pultrusão com tratamento superficial de aquisição de rugosidade ou superfície lisa e, também ainda por pultrusão, têm-se os perfis compósitos como "I", cantoneiras, ou outros. Ainda com integração neste grupo com comportamento unidirecional, com exceção das fibras caso não apresentarem uma disposição contínua longitudinal, são igualmente mencionáveis as chapas ou placas de espessura variável, utilizadas em reforços estruturais (MENON, 2008).

Eixos Elementos		1	2	3	4		
		Moni-axial	Biaxial	Triaxial	Multi-axial		
<b>1D</b>		Barras (pultrusão)	—	—	—		
<b>2D</b>		 Placas pré-impregnadas	 Tecido plano	 Tecido triaxial	 Tecido multi-axial		
<b>3D</b>	Linear	 Entrelaçado 3D	 Tecido multi-forma	 Tecido triaxial 3D	4 axial	5 axial	6 axial
					 Tecido multi-axial		
Plano		 Tecido laminar	 Viga I ou H	 Forma de favo	—		

**Figura 2.2 - Configuração das fibras para materiais compósitos.**  
**Fonte: Nanni et al., 1993 apud Menon, 2008.**

Para o segundo grupo de compósitos, baseando-se na forma dominante plana, cujas propriedades principais estão orientadas mediante duas quaisquer direções pré-estabelecidas, pelo sistema de disposição das fibras. Desse modo, as placas ou películas de PRF com o reforço disposto segundo orientações tecidas e, ainda algumas formas de composição em sanduíche, além de barras de material compósito, este produtos são comercializados como sistemas em grelha constituídos (MENON, 2008).

Conforme Callister (2002), uma forma de realizar a classificação dos materiais compósitos é por meio de três divisões: compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e os compósitos estruturais (Figura 2.3). Logo, pode-se observar que os compósitos reforçados com fibras são subclassificados de acordo com o comprimento da fibra, sendo que no caso de fibras curtas, estas podem produzir uma melhoria significativa de resistência.



**Figura 2.3 – Esquema de classificação dos compósitos.**  
**Fonte: Callister, 2002 – adaptado pelo autor.**

Assim, de acordo com Menon (2008), a escolha entre um tipo de fibra e uma matriz depende fundamentalmente da aplicação que será dada ao material compósito: características mecânicas elevadas, resistência à alta temperatura, resistência à corrosão, etc. O custo em muitos casos pode também ser um fator de escolha entre um ou outro componente. Desta forma, deve ser observada também a compatibilidade entre as fibras e as matrizes.

#### **2.1.4. Interação Fibra Matriz**

##### **2.1.4.1. Influência do comprimento da fibra**

De acordo com Callister (2002), certo comprimento crítico de fibra se faz necessário para que haja um efetivo aumento de resistência e enrijecimento do material compósito. Logo, esse comprimento crítico,  $l_c$ , depende do diâmetro da fibra,  $d$ , como também da força de ligação entre a fibra e a matriz,  $\tau_c$ , conforme Equação 2.1.

$$l_c = \frac{\sigma_f \times d}{2\tau_c} \quad (2.1)$$

Onde:

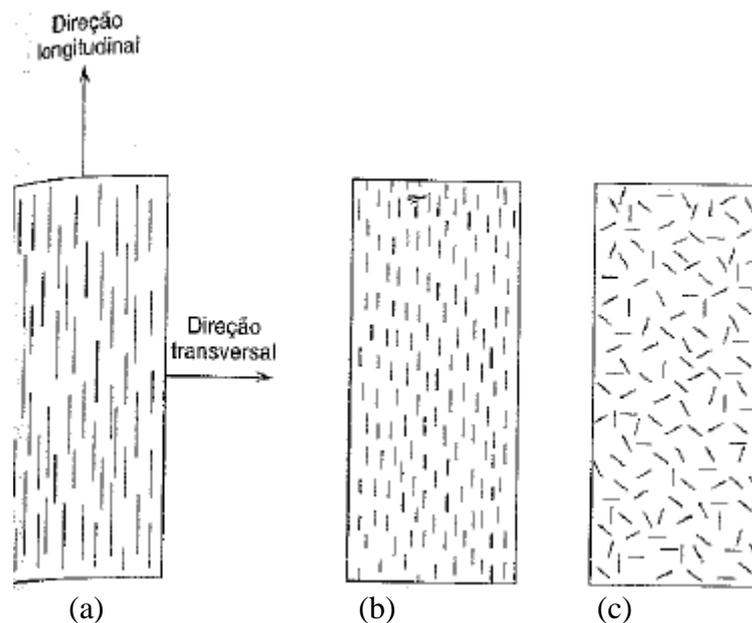
$l_c$  – comprimento crítico da fibras;

$d$  – diâmetro da fibra;

$\tau_c$  – força de ligação entre a fibra e a matriz.

#### 2.1.4.2. Influência da orientação e da concentração de fibra

De acordo com Callister (2002), o arranjo e a orientação das fibras na relação entre elas próprias, a concentração de fibras e a sua distribuição causa uma influência significativa sobre a resistência e sobre outras propriedades dos compósitos reforçados com fibras. Com base na orientação das fibras, pode ser dividida em: alinhamento paralelo do eixo longitudinal das fibras em uma única direção e alinhamento aleatório. Assim, normalmente as fibras contínuas estão alinhadas (Figura 2.4a), enquanto as descontínuas podem está alinhadas (Figura 2.4b), orientadas aleatoriamente (Figura 2.4c) ou parcialmente orientadas. Portanto, a combinação mais satisfatória para as propriedades dos compósitos pode ser obtida ao se realizar uma distribuição uniforme das fibras.



**Figura 2.4 – Esquema de compósitos reforçados com fibras: a) fibras contínuas alinhadas, b) fibras descontínuas alinhadas e c) orientadas aleatoriamente.**

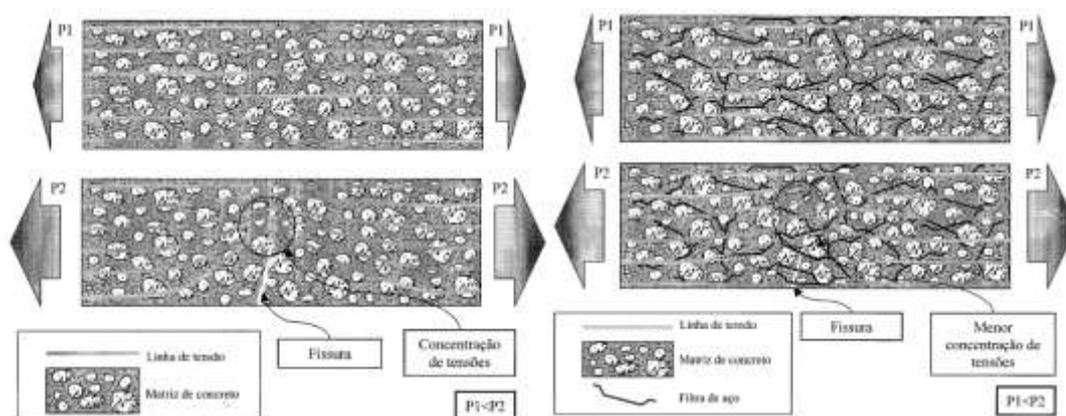
**Fonte: Callister, 2002.**

### 2.1.4.3. Influência da fibra na matriz de concreto

Os materiais compósitos vêm sendo utilizados na construção civil desde a antiguidade. Assim, vêm surgindo novas possibilidades de utilização com o advento de tecnologias. A adição de fibras aos concretos minimiza o comportamento frágil característico do concreto. Deste modo, o concreto passa a ser um material pseudo-dúctil, ou seja, continua apresentando uma resistência residual a esforços nele aplicados mesmo após sua fissuração. A alteração do comportamento é função das características das fibras e, da matriz de concreto e da sua interação (FIGUEIREDO, 2000).

Conforme Garcez (2005), a eficiência do reforço das fibras na matriz cimentícia, pode ser caracterizada através de dois estágios: pré e pós-fissuração. Pois, em ambos os casos, o comportamento é controlado pela interação fibra-matriz, por meio do processo de transferência do esforço da matriz para as fibras e do mecanismo de “costura” das fissuras, em níveis avançados de carregamentos. Assim, para que um compósito apresente um bom desempenho, deve-se assegurar que seus componentes atuem em conjunto.

O embasamento sobre o comportamento dos concretos reforçados com fibras está na função de atuação das fibras como ponte de transferência de tensão após o surgimento de fissuras. De acordo com Figueiredo (2011), quando há a incorporação de fibras ao concreto, as mesmas dificultam que as fissuras se propaguem e que as microfissuras aumentem sua espessura, pelo fato de possuir um elevado módulo de elasticidade. Assim, as fibras fazem com que haja uma redistribuição de esforços no compósito (conforme Figura 2.5).

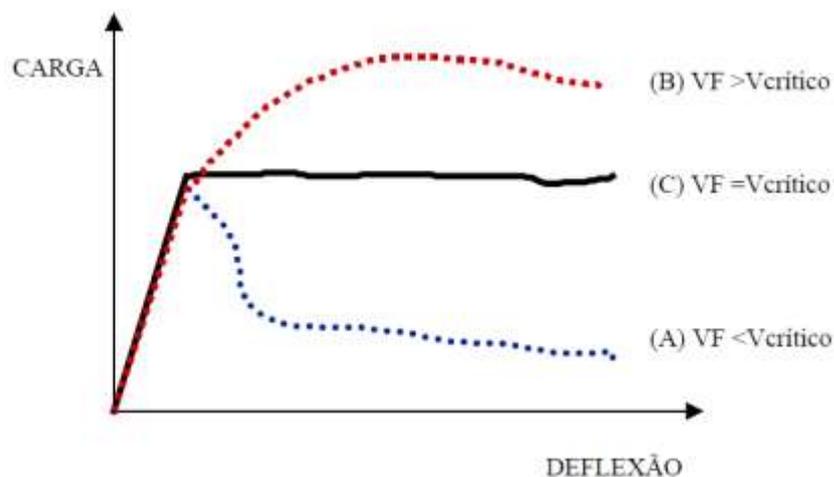


**Figura 2.5 – Concentração de tensões sem (esquerda) e com (direita) o reforço de fibras.**  
**Fonte: Figueiredo, 2011.**

Conforme exposto na Figura 2.5, para o concreto sem fibras, a fissura representa uma barreira para que a tensão se propague, fazendo com que assim haja uma concentração dessa

tensão na extremidade da fissura, e caso o valor dessa tensão seja superior a resistência do concreto, a ruptura abrupta acontece. No caso desse esforço ser cíclico, a cada ciclo há uma pequena propagação de microfissura e conseqüentemente, também uma concentração dessa tensão na extremidade até que haja a ruptura do material pela fadiga do material (FIGUEIREDO, 2011).

Ainda, conforme Figueiredo (2011), a definição conceitual do volume crítico é a de que ele corresponde ao teor de fibras que mantém a mesma capacidade portante para o compósito a partir da ruptura da matriz. Ou seja, abaixo do volume crítico no momento em que ruptura da matriz ocorre, necessariamente existe uma queda na carga que o material tem capacidade de suportar. Acima do volume crítico, o compósito continua aceitando níveis de carregamentos crescentes mesmo após a ruptura da matriz. Mediante a isso, a Figura 2.6 demonstra as curvas de carga x deflexão em prismas de concretos com fibras rompidos à flexão. Assim, existe um trecho linear inicial correspondente ao estágio pré-fissurado da matriz do compósito e outro, semelhante a um patamar de escoamento, onde se pode diferenciar o comportamento do concreto reforçado com teores abaixo, acima e igual ao volume crítico.

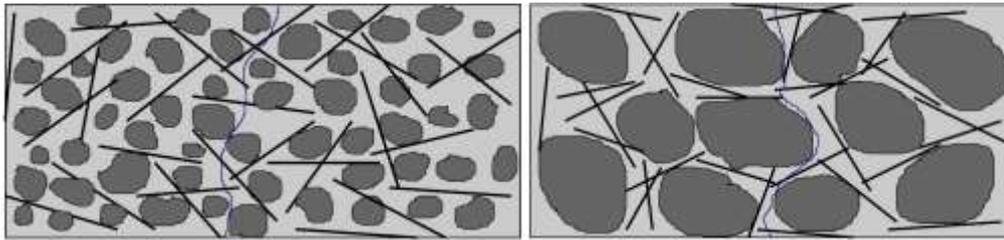


**Figura 2.6 – Compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão.**

**Fonte: Figueiredo, 2011.**

Pode-se perceber, conforme exposto na Figura 2.5, que há um trecho inicial elástico linear que representa o estágio pré-fissurado da matriz do concreto, e, na seqüência, outro estágio semelhante a um patamar de escoamento (característica de materiais dúcteis), onde é possível observar o comportamento do concreto reforçado com teores igual, abaixo e acima do teor crítico.

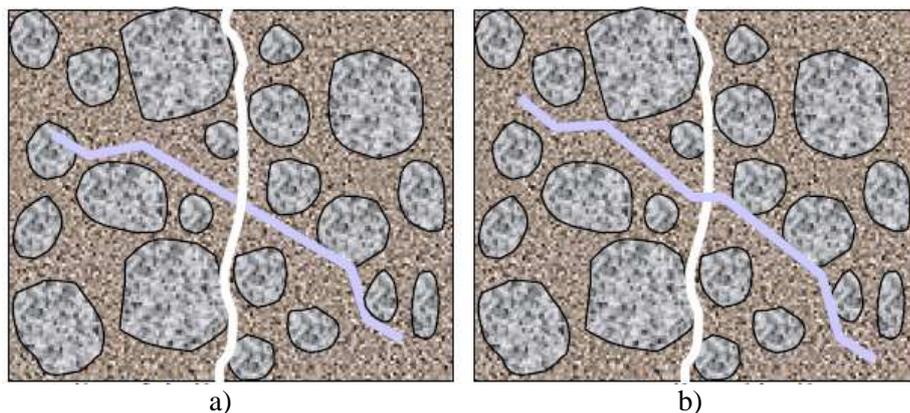
É notório que quando não há compatibilidade, poucas fibras trabalham como ponte de transferência de tensões na fissura (Figura 2.7). Assim, duas alternativas são normalmente empregadas de maneira que possa otimizar a mistura de concreto com fibras: ou se reduz a dimensão máxima característica do agregado, ou se aumenta o comprimento da fibra (FIGUEIREDO, 2011).



**Figura 2.7 – Concreto reforçado com fibras onde há compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo (esquerda), Concreto reforçado com fibras onde não há compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo (direita).**

**Fonte: Figueiredo, 2011.**

De acordo com Figueiredo (2011), a perda de eficiência da fibra inclinada em relação ao plano de ruptura pode ser ainda maior para o conjunto, caso a mesma não apresente ductilidade suficiente. Isto ocorre pelo elevado nível de tensão de cisalhamento que a fibra pode estar submetida nesta situação. Logo, se ela não for capaz de se deformar plasticamente, de modo a se alinhar ao esforço principal, acaba rompendo-se por cisalhamento (Figura 2.8).



**Figura 2.8 – Diferença do comportamento entre a) fibras frágeis e b) dúcteis, quando se encontram inclinadas em relação a superfície de ruptura.**

**Fonte: Figueiredo, 2011.**

### 2.1.5. Propriedades no Estado Fresco

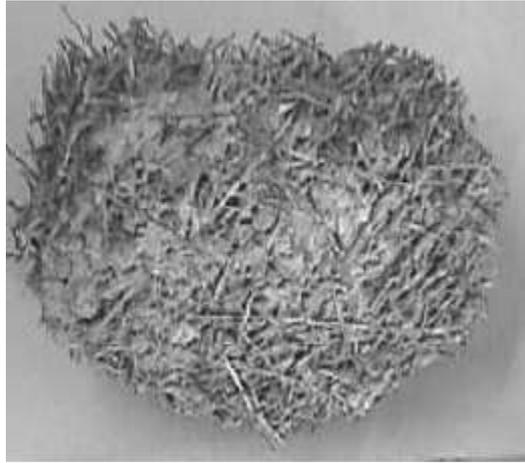
Apesar do ganho de desempenho conferido pelas fibras no que se refere à contenção da propagação das fissuras quando o concreto se encontra no estado endurecido, a adição de fibras altera as condições de consistência do concreto e, conseqüentemente, a sua trabalhabilidade. Isso ocorre principalmente porque ao se adicionar à fibra ao concreto está se adicionando também uma grande área superficial que demanda água de molhagem (FIGUEIREDO, 2011).

Conforme Hannant (1994), o desempenho dos compósitos reforçados com fibras é controlado principalmente pelo teor e pelo comprimento da fibra, pelas propriedades físicas da fibra e da matriz e pela aderência entre as duas fases. No entanto, segundo Bentur & Mindes (2007), a trabalhabilidade é afetada pela adição de fibras, em proporção direta à fração volumétrica das fibras utilizadas. Assim, concretos reforçados com altos teores de fibras produzidos de forma convencional apresentam difícil dispersão das fibras, onde se pode observar o agrupamento de fibras e conseqüentemente, a formação de novelos.

De acordo com o American Concrete Institute (ACI 544.3R, 1993) é possível avaliar a trabalhabilidade do concreto convencional por três métodos, como: através do método tradicional do abatimento do tronco de cone, outra forma é através da utilização do cone invertido cujo concreto é submetido a vibração; e a utilização do VeBe.

Porém, para a avaliação da trabalhabilidade de concreto com fibras, utilizando qualquer teor, Ceccato (1998) afirma que o ensaio com cone invertido não é adequado, pois para ele, se o concreto for muito plástico, o mesmo acaba passando pela extremidade inferior aberta do cone com facilidade, invalidando o ensaio, e, se for muito coeso, acaba por entupir a extremidade inferior de modo a impossibilitar a obtenção de qualquer resultado.

Figueiredo (2011), afirma que além da perda de trabalhabilidade, ainda considerando o estado fresco do concreto, é possível ocorrer a formação de ouriços, que são bolas formadas por fibras que ficaram aglomeradas, conforme pode ser visto na Figura 2.9.



**Figura 2.9 – Aglomerado de fibras mal misturadas ao concreto.  
Fonte: Figueiredo, 2011.**

### **2.1.6. Propriedades no Estado Endurecido**

Conforme afirma Medeiros (2012), existem os seguintes fatores que influenciam nas propriedades mecânicas de concretos com fibras:

- Resistência da matriz de concreto;
- Resistência mecânica do material empregado na fabricação das fibras;
- Características geométricas das fibras;
- Volume de fibras adicionadas ao concreto;
- Orientação e distribuição das fibras dentro da matriz de concreto.
- Tensão de aderência entre as fibras e a matriz;
- Razão entre dimensão máxima do agregado e o comprimento da fibra.

#### **2.1.6.1. Resistência mecânica**

A principal finalidade de adicionar fibras no concreto, não é melhorar sua resistência à compressão. Estudos indicam uma redução nos valores encontrados para a resistência à compressão pelo fato da má compactação (em concretos convencionais) obtido com a mistura. No entanto, pesquisas apontam que como as fibras atuam como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, o concreto apresentará ganho em sua resistência à compressão (FIGUEIREDO, 2011).

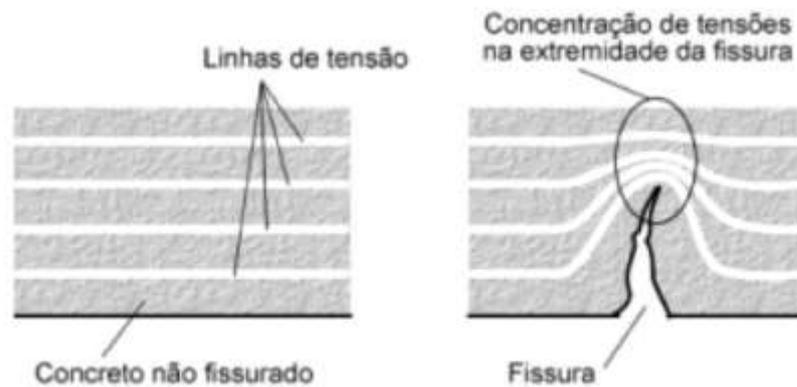
A norma americana, American Concrete Institute (ACI 544.1R, 1996), apresenta que a incorporação de fibras de aço no concreto resulta em um aumento de 0 a 15% na resistência à compressão, para frações volumétricas que estejam acima de 1,5%. Contudo, com relação ao esforço de tração, as fibras aumentam a sua resistência de forma mais significativa, estando na faixa de 30 a 40% para adições com um teor de 1,5%.

Conforme Figueiredo (2011), o aumento da resistência à tração por compressão diametral gerado pelas fibras, tende a variar conforme o comprimento das fibras e a dimensão máxima do adregado graúdo. Essa variação pode ser compreendida na faixa entre 60% e 130% de ganho de resistência à tração utilizando o ensaio de compressão diametral, dependendo o teor incorporado.

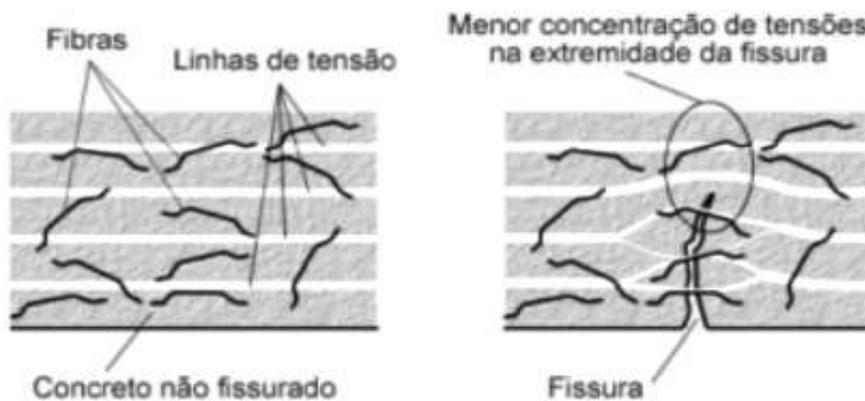
Em geral, as fibras de aço proporcionam também um aumento na resistência do material ao cisalhamento. Esse aumento tem se mostrado dependente da forma de ensaio empregada e do alinhamento das fibras na região de ruptura por cisalhamento. É possível obter um aumento de 30% na resistência ao cisalhamento para um teor de 1% de acréscimo de fibras (ACI 544.1R, 1996).

#### 2.1.6.2. Comportamento ao surgimento de microfissuras

Com ao surgimento de microfissuras no material, para cada ciclo de carregamento as fissuras tendem a se propagar diminuindo a área útil para transferência de tensão, conforme Figura 2.10. Quanto mais próxima a carga cíclica estiver da correspondente à resistência do material, menor será o número de ciclos necessários para se atingir a ruptura deste. Conforme apresentado na Figura 2.11, as fibras, atuando como ponte de transferência de tensão pelas fissuras reduz a propagação das mesmas possibilitando, o trabalho da estrutura de concreto por um maior número de ciclos ou mesmo com um maior nível de tensão para a mesma vida útil (FIGUEIREDO, 2011).



**Figura 2.10 – Concentrações de tensões no concreto sem reforço de fibras.**  
**Fonte: Barros, 2009.**



**Figura 2.11 – Concentrações de tensões no concreto com reforço de fibras.**  
**Fonte: Barros, 2009.**

### 2.1.7. Dosagem de concreto com fibras

Muitos autores determinam o conceito de dosagem conforme suas experiências profissionais e a medida que os métodos irão evoluindo, estes também vêm se adequando conforme a análise realizada por cada pesquisador.

Assim, para Vasconcelos (1977), que a partir da utilização da essência da palavra, prediz que a dosagem de concreto seria a quantificação de seus componentes de forma que após sua correta execução (medição, mistura, transporte, lançamento, adensamento e cura) e das reações de hidratação da pasta de cimento e água, resulte em um material petrificado, apresentando propriedades (resistência mecânica, impermeabilidade e durabilidade) que o habilitem a constituir-se em parte integrante e útil de uma peça isolada ou de uma estrutura.

Conforme descrito por Mehta e Monteiro (1994), o objetivo de se realizar a dosagem experimental é realizar a escolha dos materiais adequados entre àqueles disponíveis e a determinação da combinação mais econômica, para que se obtenha a produção de um concreto que atenda as características de desempenho mínimo estabelecidas.

Contudo, a dosagem de concreto está além de conceitos pré-definidos e cabe levar em consideração não somente os materiais disponíveis para sua realização, como também, fatores que também poderão influenciar nesta, como exemplo o fator econômico.

Apesar de que ainda haver uma massiva utilização da dosagem “empírica” (dosagem baseada na experiência de profissionais ou na tradição, sem o embasamento científico), aos poucos, obras de pequeno e médio porte vêm realizando a utilização de concreteiras e estas buscam qualificar seus profissionais e em convênio com universidades estão produzindo um concreto baseado em métodos científicos.

Assim, para se realizar uma correta metodologia de estudo de dosagem deve-se levar em consideração: exigências de projeto, condições de exposição e operação, tipo de agregado disponível economicamente, técnicas de execução e o menor custo possível para este concreto a ser produzido.

Ao longo dos anos, vários estudiosos vêm desenvolvendo pesquisas a fim de se criar ou aperfeiçoar métodos de dosagem, para que esses sejam cada vez mais eficaz em sua utilização. Desta forma, pode-se citar como exemplos, os seguintes métodos que são mais utilizados:

– Método de dosagem de concreto ABCP/ACI

Foi publicado em 1984 pela Associação Brasileira de Cimento Portland, baseado na Norma ACI 211.1-81, constituindo-se em uma adaptação prática do método americano às condições brasileiras e permite a utilização de agregado graúdo britado e areia de rios que se enquadram na norma NBR 7211 (ABNT, 1983).

– Método de dosagem de concreto EPUSP-IPT

O método denominado EPUSP-IPT, descrito no Manual de Dosagem e Controle de Concreto (Helene e Terzian, 1992) realizado na Escola Politécnica da USP, tendo como base o método inicialmente desenvolvido pelo IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

Este método teve como resultado final o diagrama de dosagem e que a partir de um gráfico de três quadrantes (Figura 2.12), onde estão representadas as “leis de comportamento” expressas pelas correlações a seguir:

a) Lei de Abrams

$$f_{cj} = \frac{A}{B^x}, \text{ onde:} \quad (2.2)$$

$f_{cj}$  – resistência a compressão axial em Mpa, na idade j (dias);  
 $x$  – relação água/cimento, em massa (kg/kg);

b) Lei de Lyse

$$m = k_3 + k_4 \times x, \text{ onde:} \quad (2.3)$$

$m$  – relação agregado/cimento, em massa (kg/kg).

$$m = (a + b), \text{ onde:} \quad (2.4)$$

$m$  – relação agregado/cimento, em massa (kg/kg);  
 $a$  – relação agregado miúdo/cimento, em massa (kg/kg)  
 $b$  – relação agregado graúdo/cimento, em massa (kg/kg)

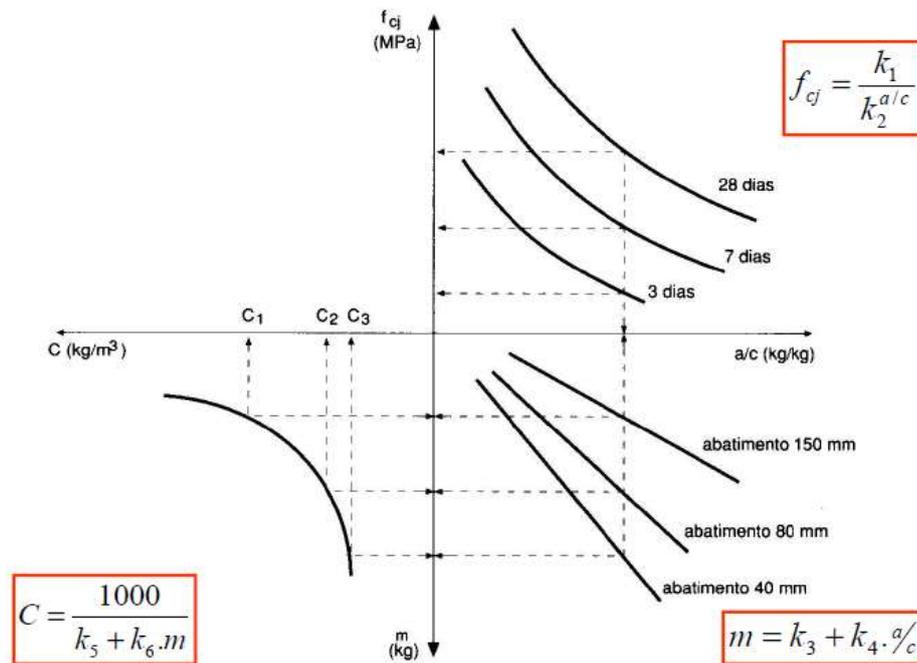
c) Lei de Molinari

$$C = \frac{1000}{(K_5 + K_6 \times m)}, \text{ onde:} \quad (2.5)$$

$C$  – consumo de cimento por  $m^3$  de concreto.

$$\alpha(\%) = \frac{1+a}{1+m} \times 100, \text{ onde:} \quad (2.6)$$

$\alpha(\%)$  – teor de argamassa seca.



**Figura 2.12 – Resultado do gráfico de estudo de dosagem.**

**Fonte: Ferreira, 2012.**

Atualmente ainda são raras proposições de metodologias para a otimização do conteúdo de fibras no concreto, no Brasil é comum que se utilize empiricamente o consumo de fibras de aço entorno de  $30 \text{ kg/m}^3$ , independentemente do tipo utilizado. Da mesma maneira, para a utilização de fibras poliméricas, fixando o consumo entre  $600 \text{ g/m}^3$  a  $1.000 \text{ g/m}^3$ , para qualquer condição de aplicação (FIGUEIREDO, 2011).

Ainda, segundo Figueiredo (2011), para garantir a viabilidade econômica e o desempenho adequado dos concretos reforçados com fibras, devem-se aplicar metodologias de dosagem que viabilizem o seu consumo, de modo a definir o mínimo adequado para atender às exigências de desempenho.

### 2.1.8. Aplicações

No país, atualmente as universidades vêm buscando linhas de pesquisas para que se possa comprovar os benefícios e aperfeiçoar a aplicação de fibras em concretos de forma a garantir a sua viabilidade.

Conforme Figueiredo (2011), as principais aplicações do concreto com fibras são em pavimentos, revestimento de túneis e tubos de concreto para obras de saneamento. Como principal vantagem de uso desse concreto para pavimentos, se tem a eliminação da colocação

de armadura o que acarreta em um número menor de funcionários e um tempo reduzido para a execução.

## **2.2. Cisalhamento em elementos de concreto armado**

Em um dimensionamento de uma viga de Concreto Armado, geralmente o calculista faz uso primeiramente do cálculo para a determinação das armaduras longitudinais para os momentos fletores máximos e depois seguido pelo cálculo da armadura transversal para resistência às forças cortantes. Desta forma, diferentes teorias e modelos foram desenvolvidos para análise de vigas de concreto sob força cortante, sendo que o modelo de treliça, embora desenvolvido há mais de cem anos, é o que ainda se destaca no Brasil e nas normas internacionais mais importantes, devido à sua simplicidade e bons resultados (BASTOS, 2017).

Sabe-se que a ruptura por efeito de força cortante é iniciada após o surgimento de fissuras inclinadas, causadas pela combinação de força cortante, momento fletor e eventualmente forças axiais. Assim, a quantidade de variáveis que influenciam a ruptura é muito grande, como geometria, dimensões da viga, resistência do concreto, quantidade de armaduras longitudinal e transversal, características do carregamento, vão, etc. Como o comportamento de vigas à força cortante apresenta grande complexidade e dificuldades de projeto, este assunto tem sido um dos mais pesquisados, no passado bem como no presente (BASTOS, 2017).

Portanto, neste tópico será abordado o levantamento sobre os critérios de cálculo para a determinação das armaduras que agem contra a ação dos esforços cisalhantes em vigas. Assim, para o levantamento das armaduras transversais a serem utilizadas nos elementos deste estudo, terão como base os critérios de cálculos preditos nas normas ACI 318 (2014), Eurocode 2 (2004) e principalmente a norma brasileira ABNT 6118 (2014).

### **2.2.1. Resistência ao cisalhamento unidirecional**

Para garantir a resistência ao cisalhamento teórica das vigas, segue-se o preceito pré-determinado pela NBR 6118 (2014):

$$V_R = V_C + V_S \quad (2.7)$$

Onde:

$V_R$  é a força cortante resistente da viga;

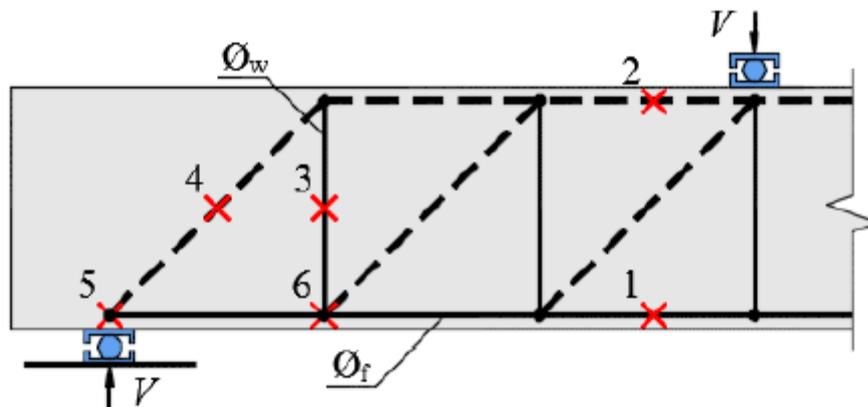
$V_c$  é a parcela de contribuição do concreto na força cortante resistente;

$V_s$  é a parcela de contribuição do aço na força cortante resistente.

### 2.2.2. Estados limites para vigas de concreto armado sob armadura de cisalhamento

De acordo com Fusco (2008), é mais de se temer a ruptura por efeito de solicitações tangenciais que por solicitações normais, em virtude da natureza frágil das rupturas por cisalhamento, porquanto elas decorrem essencialmente da ruptura do concreto, o que torna possível o colapso não avisado das estruturas.

Para que se possa atender aos estados limites em uma viga armada para combater aos esforços cisalhantes, faz-se necessário realizar algumas verificações para garantir tal resistência (Figura 2.13). A figura abaixo demonstra um modelo de bielas e tirantes, onde as linhas tracejadas representam as bielas comprimidas e as linhas contínuas representam os tirantes tracionados.



**Figura 2.13 – Estados limites de vigas com armadura transversal.**  
Fonte: Tapajós, 2017.

- 1 – Escoamento da armadura a flexão;
- 2 – Esmagamento do concreto na zona comprimida;
- 3 – Escoamento da armadura de cisalhamento;
- 4 – Esmagamento da biela inclinada;
- 5 – Falha de ancoragem de armadura a flexão;

## 6 – Falha de ancoragem de armadura de cisalhamento.

Quanto aos esforços de flexão devem ser feitas as verificações atentando-se para o escoamento da armadura de flexão e o esmagamento da zona comprimida, respectivamente os pontos 1 e 2 da Figura 2.13. Além da verificação quanto à flexão, é necessária também a verificação quanto ao cisalhamento. Desta forma, é possível que uma viga atinja sua resistência última após a armadura transversal escoar, como mostra o ponto 3 da Figura 2.13. Assim, a ocorrência em vigas com baixa taxa de armadura transversal, ou ainda em vigas com altas taxas de armadura longitudinal, cuja resistência ao cisalhamento é menor que à flexão. Desta maneira, esse tipo de falha leva à ruptura da estrutura, caracteriza-se uma ruptura por cisalhamento proveniente de tração diagonal. Uma ruptura por tração diagonal pode ocorrer principalmente em vigas esbeltas sem armadura de cisalhamento (TAPAJÓS, 2017).

Com relação a verificação a ser feita quanto ao cisalhamento é ilustrada no ponto 4 da Figura 2.13, uma viga pode falhar por cisalhamento após ocorrer o esmagamento da biela inclinada, podendo levar a mesma, inclusive, à ruína. Assim, esse tipo de ruptura pode ocorrer em vigas muito curtas, onde a resistência à flexão é, geralmente, muito superior à ao cisalhamento, bem como, por conta da geometria, o desenvolvimento de tensões por tração diagonal é dificultado. Também é possível que esse fenômeno ocorra em vigas esbeltas, quando se tem altas taxas de armadura longitudinal e transversal (TAPAJÓS, 2017).

### 2.2.3. Recomendações normativas

#### 2.2.3.1. ACI 318 (2014)

Conforme os critérios de cálculos definidos pela norma dos Estados Unidos da América, é possível verificar que a mesma adota a resistência do concreto como variável que influencia na resistência ao cisalhamento (Equação 2.8).

$$V_{R,c} = 0,17 \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d \quad (2.8)$$

Onde:

$f_c$  é a resistência a compressão do concreto;

$b_w$  é a largura da viga;

$d$  é a altura útil da viga.

Pode-se verificar que a norma ACI 318 delimita um valor para a resistência ao cisalhamento (Equação 2.11), garantindo uma segurança quanto a ação máxima de cargas que tais elementos poderão ser submetidos.

$$V_{R,CS} = V_{R,C} + V_{R,S} \quad (2.9)$$

$$V_{R,S} = \left( \frac{d}{s} \right) \cdot A_{S,W} \cdot f_{y,W} \cdot (\text{sen } \alpha + \cos \alpha) \quad (2.10)$$

$$V_{R,Max} = 0,66 \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d \quad (2.11)$$

Onde:

$S$  é a espaçamento entre as camadas da armadura transversal;

$A_{SW}$  é a área de aço de uma seção transversal;

$f_{yw}$  é a tensão de escoamento da armadura transversal, limitada em 420 MPa;

$\alpha$  é a ângulo de inclinação entre a armadura transversal e a longitudinal.

### 2.2.3.2. ABNT NBR 6118 (2014)

A norma brasileira se utiliza de dois modelos de cálculos para realizar a estimativa da resistência ao cisalhamento para elementos em concreto armado. Mediante a esta informação, o Modelo I para o cálculo leva em conta a consideração de resistência ao cisalhamento em vigas armadas de forma transversal ( $V_{R,CSI}$ ), cujo é dada pela somatória da parcela de contribuição da resistência do concreto ( $V_{R,CI}$ ) juntamente com a parcela de contribuição de resistência do aço ( $V_{R,SI}$ ), conforme Equação 2.11. Este modelo de cálculo leva ainda em consideração que a inclinação da biela fica estimada a 45° no momento do rompimento.

Desta forma, conforme definido por este modelo de cálculo, a contribuição esperada para o concreto é dada pela Equação 2.13, estimando a resistência ao cisalhamento de uma viga sem a armadura transversal, considerando apenas a resistência que o concreto possui em

relação aos esforços de tração. Para a parcela de contribuição da armadura de combate ao cisalhamento, propriamente dita, é calcula a partir da Equação 2.14, sendo que a resistência última ( $V_{R, \max I}$ ) de cisalhamento é definida pela Equação 2.15, estimando assim, a ruptura na biela comprimida.

$$V_{R,CSI} = V_{R,CI} + V_{R,SI} \quad (2.12)$$

$$V_{R,CI} = 0,6 \cdot f_{ct,inf} \cdot b_w \cdot d \quad (2.13)$$

$$V_{R,SI} = \left( \frac{A_{WS}}{S} \right) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{yw} \cdot (\text{sen } \alpha + \cos \alpha) \quad (2.14)$$

$$V_{R,MaxI} = 0,27 \cdot \left( 1 - \frac{f_c}{250} \right) \cdot f_c \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot g \alpha + 1) \quad (2.15)$$

Onde:

$f_{ct,inf} = 0,7 \cdot f_{ct,m}$  - equivale a resistência do concreto à tração frágil, em 5% dos casos;

$f_{ct,m}$  - resistência média à tração do concreto, calculada por  $f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_c^{2/3}$ , para concretos com resistência a compressão de no máximo 50 MPa;

$f_{y,w}$  - tensão da armadura transversal, limitada a 500 MPa.

Conforme a ABNT NBR 6118 (2014), o modelo de cálculo II, segue as premissas do modelo I, em que a resistência de elementos armados transversalmente ( $V_{R,CSII}$ ), é dada pela contribuição do concreto ( $V_{R,CII}$ ) e da armadura transversal ( $V_{R,SII}$ ). Mediante a isso, o modelo II leva ainda em consideração os efeitos de fissuração diagonal, reduzindo a inclinação da biela, e como consequência, reduz a parcela de contribuição do concreto. Assim, conforme a norma brasileira, nesse modelo, o ângulo de inclinação fica entre 30° a 45°, sendo que para isto, a contribuição do concreto é dada em função da Equação 2.17.

Desta forma, o calculo para definir a contribuição da armadura de cisalhamento é dado por meio da Equação 2.18 e sua resistência última ao cisalhamento ( $V_{R,maxII}$ ) pela Equação 2.19.

$$V_{R,CSII} = V_{R,CII} + V_{R,SII} \quad (2.16)$$

$$V_{R,CII} = V_{R,CI} \cdot \frac{V_{R,max II} - V}{V_{R,max II} - V_{R,CI}} \leq V_{R,CI} \quad (2.17)$$

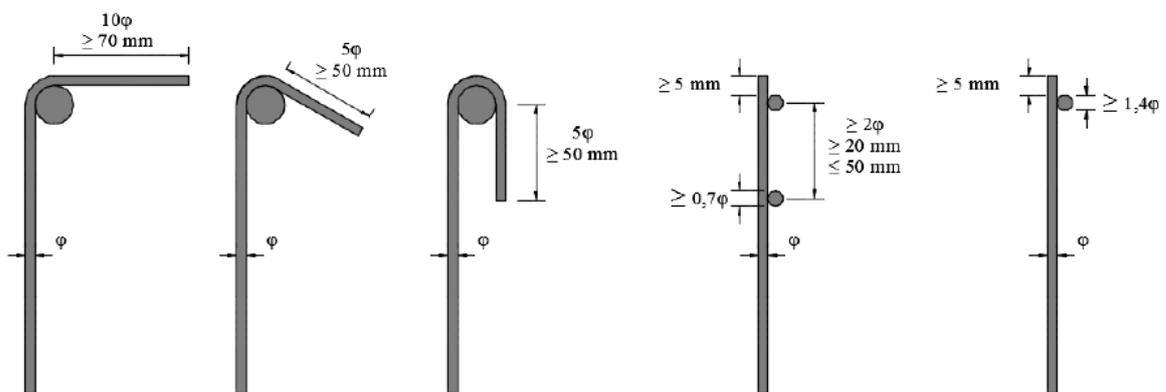
$$V_{R,SII} = \left( \frac{A_{WS}}{s} \right) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{yw} \cdot (\cot g \theta + \cot g \alpha) \cdot \text{sen} \alpha \quad (2.18)$$

$$V_{R,MaxII} = 0,54 \cdot \left( 1 - \frac{f_c}{250} \right) \cdot f_c \cdot b_w \cdot d \cdot \text{sen}^2 \theta \cdot (\cot g \alpha + \cot g \theta) \quad (2.19)$$

Onde:

$\theta$  – ângulo de inclinação da biela no momento do rompimento, podendo variar entre 30° a 45°, conforme modelo de cálculo II;

Em relação a ancoragem das armaduras transversais, a norma brasileira recomenda que os estribos envolvam as barras das armaduras de flexão, conforme figura 2.14.



**Figura 2.14 – Modelos recomendados pela norma ABNT NBR 6118 (2014) para ancoragem de estribos.**

**Fonte: ABNT – NBR 6118 (2014).**

### 2.2.3.3. Eurocode 2 (2004)

A norma Eurocode 2 (2004) faz uso da Equação 2.20 para calcular a resistência ao cisalhamento em vigas desconsiderando a armadura transversal ( $V_{RC}$ ). Desta forma, a partir da referida equação pode-se verificar que a norma europeia leva em consideração o efeito de escala e a taxa de armadura longitudinal, já que o mesmo possui influência ao cisalhamento devido ao efeito pino.

$$V_{R,C} = \max \left[ \begin{array}{l} \left( 0,18.k.(100.\rho_l.f_c)^{1/3} \right) b_w.d \\ 0,035.K^{3/2}.\sqrt{f_c}.b_w.d \end{array} \right] \quad (2.20)$$

Onde:

K – considera a redução ao cisalhamento devido ao efeito escala, calculado por:

$$K = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$$

$\rho_l$  – parcela referente a taxa de armadura, sendo calculada pela seguinte equação:

$$\rho_l = \frac{A_s}{b_w.d} \leq 2, \text{ sendo } A_s \text{ a área longitudinal de aço} \quad (2.21)$$

Para realizar a estimativa da resistência ao cisalhamento em vigas com armaduras transversais ( $V_{R,CS}$ ), a norma Eurocode 2 (2004) faz uso da Equação 2.22, cuja estimativa faz referência somente a parcela de contribuição oferecida pela armadura transversal, sendo que tal resistência deverá ser maior que a de uma viga sem a armadura transversal. Mediante a isto, a referida norma propõe que o ângulo de inclinação da biela pode ser encontrado entre 21,8° e 45°. Assim, a resistência máxima que um elemento pode atingir com relação aos esforços de cisalhamento é calculada a partir da Equação 2.23.

$$V_{R,CS} = \max \left[ \begin{array}{l} \frac{A_{sw}}{S}.0,9.d.f_{yw}.\left(\cot g\theta + \cot g\alpha\right).\text{sen}\alpha \\ V_{R,C} \end{array} \right] \quad (2.22)$$

Onde:

$\theta$  – ângulo de inclinação da biela, cujo mesmo pode variar entre 21,8° a 45°;

$$V_{R,max} = \frac{0,9 \cdot b_w \cdot d \cdot v1 \cdot f_c \cdot (\cot g\theta + \cot g\alpha)}{1 + \cot g^2\theta} \quad (2.23)$$

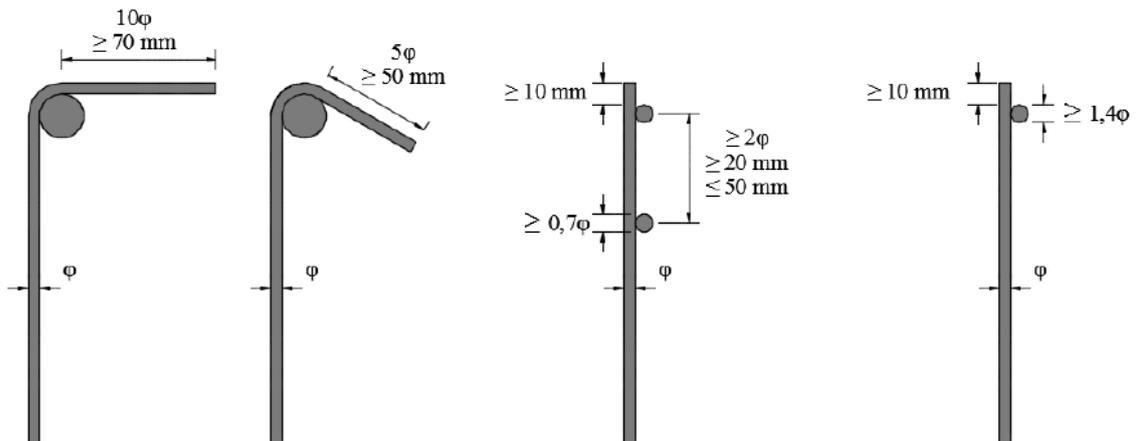
Onde:

$$v1 = 0,6 \cdot \left[ 1 - \frac{f_c}{250} \right] \quad (2.24)$$

Para que se possa verificar qual o menor ângulo a ser utilizado para a determinação da estimativa da resistência de uma viga, conforme as características da mesma, a eurocode prevê que as Equações 2.22 e 2.23 (apresentadas anteriormente) sejam igualadas, obtendo-se a Equação 2.25.

$$\cot g\theta = \sqrt{\frac{b_w \cdot S \cdot v1 \cdot f_c}{A_{sW} \cdot f_{yW} \cdot \text{sen}\alpha}} \quad (2.25)$$

A norma Eurocode 2 (2004), recomenda quando não há a possibilidade de que os estribos transversais possam envolver a armadura longitudinal, que haja essa ancoragem por meio de soldagem entre os estribos e as armaduras longitudinais, conforme Figura 2.15.



**Figura 2.15 – Modelos recomendados pela norma Eurocode 2 (2004) para ancoragem de estribos.**

**Fonte: Eurocode 2 (2004).**

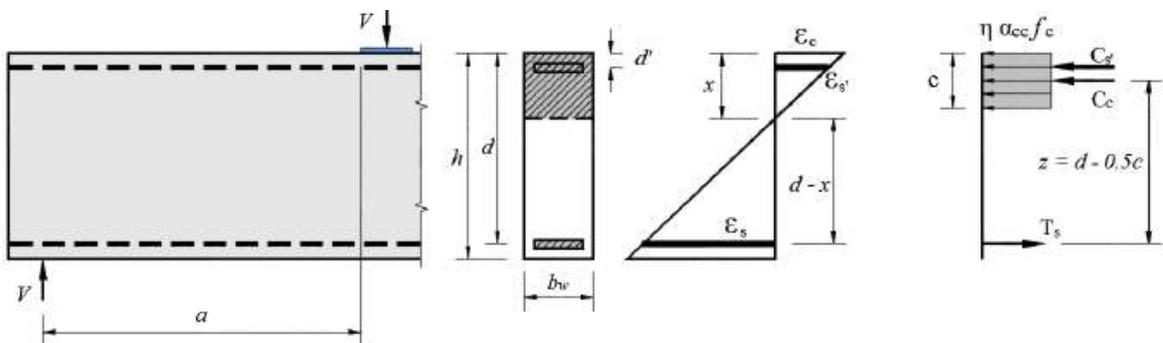
### 2.3. Resistência à flexão em vigas

Conforme a norma brasileira ABNT NBR 6118 (2014), as hipóteses básicas admitidas para o dimensionamento de uma seção transversal de concreto armado, submetida a uma seção simples ou composta, são definidas nos seguintes itens:

– É admitido para uma seção transversal ao eixo de um elemento estrutural indeformado permaneça plana, mesmo após as deformações do referido elemento (hipótese de Bernoulli). Assim, o resultado é uma distribuição linear das deformações ao longo da altura das seções transversais;

– É admitida a existência de uma aderência perfeita entre o concreto e o aço. Desta forma, as armaduras irão estar sujeitas as mesmas deformações do concreto que as envolve;

– De acordo com o diagrama parábola – retângulo (Figura 2.16, ficam definidas as distribuições de tensões do concreto. Assim, a tensão máxima de compressão é igual a  $0,85 \cdot f_{cd}$ , sendo que  $f_{cd}$  é a resistência a compressão de cálculo. Sendo que o referido diagrama pode ser substituído pelo retângulo de altura  $0,8x$  (onde  $x$  é a profundidade da linha neutra).



**Figura 2.16 – Distribuição de tensão e deformação admitida para o Estado Limite Último.**

**Fonte: ABNT – NBR 6118 (2014 - Adaptado).**

$$C_C + C_S + T_S = 0 \quad (2.26)$$

$$(\eta \cdot f_c \cdot b_w \cdot c) + (A_{S'} \cdot f_{YS'}) = A_S \cdot f_{YS} \quad (2.27)$$

$$c = \frac{(A_S \cdot f_{YS}) - (A_{S'} \cdot f_{YS'})}{\eta \cdot f_c \cdot b_w} \quad (2.28)$$

$$M_{flex} = A_S \cdot f_{YS} \cdot z \quad (2.29)$$

$$V_{flex} = \frac{M_{flex}}{a} \quad (2.30)$$

Onde:

$\eta$  – constante assumida com o valor 1 para seções constantes e 0,9 para os demais casos;

$\alpha_{cc}$  – constante assumida como 0,85 para  $f_c \leq 50$  MPa;

$c$  – altura do bloco de compressão do concreto;

$a$  – vão de cisalhamento da peça.

## 2.4. SAP 2000

Na atualidade, é imprescindível a realização de um estudo de comportamento de tensões e de deslocamento das estruturas na engenharia. Logo, Fundamentos embasados na Teoria da Elasticidade aplicada aos materiais estruturais necessitam de técnicas de mensuração mais confiáveis que possam auxiliar o profissional em suas atividades resolutivas (ROSSI, 2016).

Assim, o SAP 2000 é um software de análise estrutural baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) e embora existam softwares mais completos, o SAP 2000 ainda é bastante utilizado por ser um programa bastante flexível, com um processador de cálculo bastante eficiente. Do ponto de vista didático, ele é bastante interessante, pois a versão fornece os esforços para a estrutura, deixando a cargo do usuário o dimensionamento e detalhamento, que são os objetivos nas disciplinas de “concreto armado” dos cursos de engenharia civil realizados no país (MELO, 2016).

Por ser um programa bastante flexível, através do SAP 2000 é possível modelar desde vigas simples, pórticos complexos em 3D, estruturas laminares como lajes e cascas, estruturas tridimensionais como treliças espaciais. Este software permite ainda considerar carregamentos diversos, esforços dinâmicos, efeitos de gradiente de temperatura e pressões, analisar esforços devidos a deslocamentos impostos (como o recalque de uma fundação, por exemplo), permitindo até a simulação com concreto protendido (MELO, 2016).

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este estudo consiste em ensaiar de 07 vigas de concreto armado, sendo que em seis vigas foram utilizadas variações de teores de fibras, com o objetivo de investigar o comportamento com relação aos esforços de cisalhamento.

Portanto, todos os ensaios foram realizados no laboratório de engenharia civil do Campus Universitário de Tucuruí – CAMTUC – UFPA.

#### 3.1. Materiais

##### 3.1.1. Cimento Portland

O cimento utilizado na pesquisa foi o CP-II-E-32, e suas características, conforme fabricante, apresentadas na Tabela 3.1:

**Tabela 3.1 – Características físicas do cimento.**  
**Fonte: Votorantim Cimentos – Cimento Poty (2017).**

Descrição	Cimento
Massa específica	3,1 Kg/dm <sup>3</sup>
Resistência à compressão – 28 dias	32 MPa

##### 3.1.2. Agregados

###### 3.1.2.1. Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado na pesquisa foi doado pela Eletronorte/Eletróbrás e a caracterização do mesmo foi realizada pela até então discente de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental, Souza (2017), no laboratório da Universidade Federal do Pará – Campus de Tucuruí, conforme especificações definidas pelas normas da ABNT. Segue os resultados averiguados durante os ensaios (Tabela 3.2).

**Tabela 3.2 – Características físicas do agregado graúdo.**

Fonte: Souza (2017).

<b>Ensaio</b>	<b>Método</b>	<b>Resultados</b>
Diâmetro máximo (DMC) (mm)	NBR NM 248 (2003)	19
Módulo de finura (%)	NBR NM 248 (2003)	7,86
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 53 (2003)	2,8
Absorção de água (%)	NBR NM 53 (2003)	0,47
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 45 (2003)	1,51

## 3.1.2.2. Agregado Miúdo

O agregado miúdo a ser utilizado na pesquisa foi doado pela Eletronorte/Eletronorte e a caracterização do mesmo foi realizada por Souza (2017), no laboratório da Universidade Federal do Pará – Campus de Tucuruí, conforme especificações definidas pelas normas da ABNT. Segue os resultados averiguados durante os ensaios (Tabela 3.3).

**Tabela 3.3 – Características físicas do agregado miúdo – areia natural.**

Fonte: Souza (2017).

<b>Ensaio</b>	<b>Método</b>	<b>Resultados</b>
Diâmetro máximo (DMC) (mm)	NBR NM 248 (2003)	1,19
Módulo de finura (%)	NBR NM 248 (2003)	2,11
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 52 (2003)	2,67
Absorção de água (%)	NBR NM 30 (2003)	0,27
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 45 (2003)	1,58

### 3.1.3. Fibras

#### 3.1.3.1. Fibra de Polipropileno

Com as fibras de polipropileno foram produzidos concretos com variações de teores de 0,08%; 0,12% e 0,16% em massa (teores esses com base no teor máximo especificado pelo fornecedor, Torri Engenharia e Saneamento (2017), que recomenda a utilização de 2 a 4 kg/m<sup>3</sup> de concreto produzido). Segue a Tabela 3.4 com as características da referida fibra.

**Tabela 3.4 – Características da Fibra de Polipropileno.**  
Fonte: Torri Engenharia e Saneamento (2017).

Comprimento	Diâmetro	Fator de Forma	Módulo de Elasticidade	Resistência à tração	Massa específica
48 mm	0,8 mm	50	8,6 GPa	-	0,92 g/cm <sup>3</sup>

#### 3.1.3.2. Fibra Sintética de Polietileno

Com as fibras de polietileno foram produzidos concretos com variações de teores de 0,24%; 0,36% e 0,48% em massa (teores esses com base no teor máximo especificado pelo fornecedor, MM Fibras (2017), que recomenda a utilização de 3 a 12 kg/m<sup>3</sup> de concreto produzido). Segue a Tabela 3.5 com as características da referida fibra.

**Tabela 3.5 – Características da Fibra Sintética de Polietileno.**  
Fonte: MM Fibras para concreto (2017).

Comprimento	Diâmetro	Fator de Forma	Módulo de Elasticidade	Resistência à tração	Massa específica
40 mm	-	50 FF	-	350 MPa	1,12 g/cm <sup>3</sup>

### 3.1.4. Aditivos

O aditivo utilizado foi o plastificante multifuncional retardador de pega **Muraplast FK 101** (Fabricante: MC-Bauchemie Brasil), cujo objetivo principal foi obter uma maior resistência do concreto (igual ou superior a 30 MPa) por meio da redução do fator água/cimento e garantir o abatimento mínimo do concreto (slump: 16±2), prevendo que após a adição das fibras haverá a perda de trabalhabilidade do referido traço de concreto.

Assim, o fabricante MC-Bauchemie (2018) forneceu as seguintes especificações a respeito do aditivo empregado durante a dosagem, conforme descritos na Tabela 3.6.

**Tabela 3.6 – Dados Técnicos - Muraplast FK 101.**

**Fonte: MC-Bauchemie Brasil (2018).**

<b>Característica</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>	<b>Observação</b>
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	1,20	-
Dosagem	%	0,2 a 1,0	Sobre o peso do cimento

## **3.2. Métodos**

### **3.2.1. Dimensionamento e Ensaio ao Esforço de Cisalhante dos Elementos**

Para a realização do dimensionamento das vigas foi utilizada como base a NBR 6118:2014 (Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Armado). Assim, o foco do dimensionamento será à flexão, visto que o objetivo do ensaio foi realizar o rompimento das vigas ao cisalhamento de modo a avaliar o efeito dos teores de fibras aplicadas as mesmas segundo os esforços que estas sejam sujeitas próximos aos apoios.

Após a definição do traço do concreto pelo método IPT-EPUSP e o dimensionamento das vigas a serem estudadas, foi realizada a moldagem das mesmas, para que depois do processo de cura, sejam realizadas as análises de resistência com relação ao cisalhamento.

### **3.2.2. Dosagem do Concreto Convencional**

Este estudo utilizou como base para a realização da dosagem do concreto o método IPT-EPUSP no qual apresenta como fundamentos a Lei de Abrams, Lei de Inge Lyse, Lei de Molinari, entre outros. Sendo que o mesmo teve como parâmetros fixos o teor de argamassa e o *Slump*. Contudo, no respectivo trabalho foram considerados constantes o teor de argamassa o fator água/cimento, para que se possa realizar comparações após a adição das fibras. Pois, segundo a Lei de Abrams, para certo conjunto particular de materiais, a resistência do concreto é função da relação a/c, assim, com valores fixos e com a mesma proporção nos traços do mesmo, apresentará uma comparação efetiva e condizente com as características dos respectivos materiais em análise.

Assim, como base o traço normal e inicialmente partindo do traço normal com slump de  $16 \pm 2$  para o concreto sem a adição de fibras, será encontrado o teor de argamassa ideal e o fator a/c a serem utilizados para os demais traços com adições de fibras.

### **3.2.3. Incorporação das Fibras ao Concreto**

Com exceção da viga produzida com o concreto de referência, todas as demais vigas foram produzidas a partir de fibras incorporadas ao concreto. Essa incorporação foi realizada após todo o processo de adição dos materiais, e um tempo de mistura pós-adição das fibras de 3 minutos.

Desta forma, foram utilizadas dois (02) tipos de fibras (Fibra Ondulada Polipropileno e Fibra Sintética de Polietileno), e para cada uma delas variando os teores, conforme descritos a seguir (teores esses escolhidos com base no teor máximo definido pelos fornecedores). Assim, as misturas de concreto se dividiram da seguinte forma:

- ✓ CA0 – mistura de concreto de controle (0% de fibra);
- ✓ CAFSP 0,24 – mistura com 0,24% de Fibra Sintética de Polietileno;
- ✓ CAFSP 0,36 – mistura com 0,36% de Fibra Sintética de Polietileno;
- ✓ CAFSP 0,48 – mistura com 0,48% de Fibra Sintética de Polietileno;
- ✓ CAFP 0,08 – mistura com 0,08% de Fibra de Polipropileno;
- ✓ CAFP 0,12 – mistura com 0,12% de Fibra de Polipropileno;
- ✓ CAFP 0,16 – mistura com 0,16% de Fibra de Polipropileno.

Assim, todas as 07 vigas foram produzidas em concreto convencional seguindo os processos de dosagem, cura, e execução dos ensaios, conforme descritos nas normas da ABNT.

### 3.2.4. Ensaios no Estado Fresco do Concreto

#### 3.2.4.1. Abatimento do tronco de cone

Com o objetivo de medir a trabalhabilidade e a consistência após a adição da fibra ao concreto, foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone (NBR NM 67, 1998) (Figura 3.1).



**Figura 3.1 – Ensaio de abatimento pelo método do tronco de cone.**

Diante dos resultados dos *Slumps*, expostos na Tabela 3.7, pode-se notar que a medida que houve o aumento em massa de fibra, ocorreu uma gradual diminuição do *Slump*.

Desta forma, com base nas Tabelas 3.4 e 3.5 do Item 3.1.4, pode-se avaliar que as propriedades tanto da fibra de polietileno como a de polipropileno se apresentam próximas, o que ratifica que a perda de trabalhabilidade ocorreu devido ao aumento da massa de fibras que foram introduzidas ao concreto. Pois como se pode verificar no Item 3.2.2, que o percentual adicionado da Fibra de Polietileno foi consideravelmente maior que o da Fibra de Polipropileno, proporcionando assim, maior massa e conseqüentemente maior volume incorporado ao concreto.

**Tabela 3.7 – Quantitativo dos materiais utilizados para cada viga e resultado do Slump.**

Viga	Massa de Fibra	Massa ag. Graúdo	Massa Ag. Miúdo	Massa Água	Massa Cimento	Massa Aditivo Plast. (0,7%)	Slump (mm)
VFP01 – 0,08%	0,210 KG	115,23 KG	76,86 KG	20,66 KG	48,05 KG	0,336 KG	185
VFP02 – 0,12%	0,313 KG						181
VFP03 – 0,16%	0,420 KG						180
VREF	-----						181
VFSP01 – 0,24%	0,626 KG						172
VFSP02 – 0,36%	0,939 KG						140
VFSP03 – 0,48%	1,250 KG						134

Notas: VFP-Viga em concreto armado com aplicação de Fibra de Polipropileno, VFSP-Viga em concreto armado com aplicação de Fibra Sintética de Polietileno, VREF-viga de referência, massa total de concreto para cada traço será de 260,76 Kg – correspondente a concretagem de 01 viga de 10 moldes (10 x 20 cm), relação a/c=0,43, teor de argamassa=52%, a resistência prevista para o concreto foi para  $\geq 30$  MPa.

### 3.2.5. Moldagem dos corpos de prova

Para a realização dos ensaios no estado endurecido dos concretos produzidos, foram seguidos os passos descritos na norma de Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (NBR 5738 - 2015). Assim, foram moldados 10 corpos de prova para cada concreto referente aos teores de fibras aplicadas, conforme Item 3.2.2, sendo utilizados para a moldagem de cilindros de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura (Figura 3.2).



**Figura 3.2 – Moldagem dos corpos de prova.**

Após 24 horas em que os corpos de prova permaneceram nos moldes, foi realizada a desmoldagem dos mesmos e em seguida foram colocados na câmara úmida para a realização do processo de cura e posterior rompimento após 28 dias (Figura 3.3).



**Figura 3.3 – Corpos de prova em câmara úmida para realização da cura.**

### 3.2.6. Ensaio no estado endurecido

#### 3.2.6.1. Ensaio de resistência à compressão

Depois de passado o período de cura de 28 dias, foi realizado o ensaio de resistência à compressão, para cada concreto estudado, sendo moldados 03 corpos de prova cilíndricos, de 10 cm x 20 cm, seguindo as recomendações da NBR 5739: 2007 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos (Figura 3.4).



**Figura 3.4 – Corpo de prova no momento do ensaio de compressão.**

Conforme os resultados apresentados na Tabela 3.8, sendo adotado como resultados a média dos corpos de prova ensaiados para cada variação de concreto estabelecido. Assim, pode-se notar que houve um gradual aumento de resistência à compressão devido ao aumento de teor de fibras na mistura e que o concreto com a de fibra sintética de polietileno apresentou um comportamento melhor com relação a este quesito em comparação ao concreto com adição de fibra de polipropileno.

**Tabela 3.8 – Propriedades mecânicas do concreto – Ensaio de Compressão.**

CP	$f_c$ (MPa)
CP - CR	33,39
CP - CFSP01	41,38
CP - CFSP02	46,59
CP - CFSP03	44,58
CP - CFP01	39,37
CP - CFP02	43,66
CP - CFP03	42,44

CP – Corpo de prova, CR – Concreto de Referência, CFSP – Concreto com aplicação de Fibra Sintética de Polietileno, CFP – Concreto com aplicação de Fibra de Polipropileno.

### 3.2.6.2. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Estima-se que a resistência à tração do concreto gira entorno de 10% da resistência a compressão, sendo que foi necessário realizar este ensaio para verificar o comportamento do mesmo após a introdução de fibra em sua composição. Assim, foram seguidas as recomendações da NBR 7222: 2011 – Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Assim, para a realização desse ensaio, foram moldados 02 corpos de prova cilíndricos, de 10 cm x 20 cm, para cada teor de fibra aplicada (Figura 3.5).



**Figura 3.5 – Corpo de prova no momento do ensaio de tração.**

Conforme os resultados demonstrados na Tabela 3.9, sendo adotado como resultados a média dos corpos de prova ensaiados para cada variação de concreto estabelecido. Assim, pode-se notar que houve uma queda de resistência a tração, com relação ao CP de referência, após a aplicação das fibras e em seguida houve um gradual aumento de resistência devido a incrementação na aplicação das mesmas. Percebe-se ainda, que o concreto com a aplicação de fibra sintética de polietileno apresentou um comportamento melhor com relação a este quesito em comparação ao concreto com adição de fibra de polipropileno.

**Tabela 3.9 – Propriedades mecânicas do concreto – Ensaio de tração.**

CP	$f_{ct}$ (MPa)
CP - CR	5,1
CP - CFSP01	4,1
CP - CFSP02	4,76
CP - CFSP03	5,13
CP - CFP01	4,78
CP - CFP02	4,24
CP - CFP03	4,74

CP – Corpo de prova, CR – Concreto de Referência, CFSP – Concreto com aplicação de Fibra Sintética de Polietileno, CFP – Concreto com aplicação de Fibra de Polipropileno.

### 3.2.6.3. Ensaio de módulo

Devido a aplicação de fibras ao concreto, deseja-se verificar a influência que estas poderão propiciar ao mesmo, quanto ao crescimento linear de deformações sob carregamento. Assim, este ensaio foi realizado com base na NBR 8522 (2008) (Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão), a fim de que se possa obter mais especificações a respeito do concreto produzido neste estudo e que o mesmo, caso por ventura seja utilizado em obras, garanta ao executor informações como a deformação mínima na idade de desforma, movimentação de elementos pré-moldados ou até mesmo na execução de elementos protendidos. Assim, para a realização deste ensaio, foram moldados 05 corpos de prova para cada teor de fibra adicionada ao concreto (Figura 3.6).



**Figura 3.6 – Corpo de prova no momento do ensaio de módulo.**

Conforme os resultados demonstrados na Tabela 3.10, sendo adotado como resultados a média dos corpos de prova ensaiados para cada variação de concreto estabelecido. Assim, pode-se notar que houve uma gradual queda dos valores de módulo, com relação ao CP de referência, após incrementação na aplicação das fibras.

**Tabela 3.10 – Propriedades mecânicas do concreto – Ensaio de módulo.**

<b>CP</b>	<b><i>E<sub>c</sub></i> (GPa)</b>
CP - CR	38,73
CP - CFSP01	33,95
CP - CFSP02	36,07
CP - CFSP03	30,58
CP - CFP01	36,00
CP - CFP02	33,62
CP - CFP03	30,98

CP – Corpo de prova, CR – Concreto de Referência, CFSP – Concreto com aplicação de Fibra Sintética de Polietileno, CFP – Concreto com aplicação de Fibra de Polipropileno.

### **3.2.7. Propriedades mecânicas do aço**

Para as propriedades mecânicas do aço, foram realizados os ensaios nas armaduras de flexão, vistos que estas foram relevantes para a realização do estudo. Assim, foram utilizadas 03 amostras com 600 mm de comprimento do aço de bitola 12,5 mm para a realização dos ensaios à tração na prensa do LEC (Figura 3.7), seguindo as recomendações da NBR 6892 (2013). A Figura 3.8 mostra o gráfico de tensão x deformação das amostras ensaiadas, sendo apresentadas as médias dos valores na Tabela 3.11.



Figura 3.7 – Ensaio de caracterização do aço.

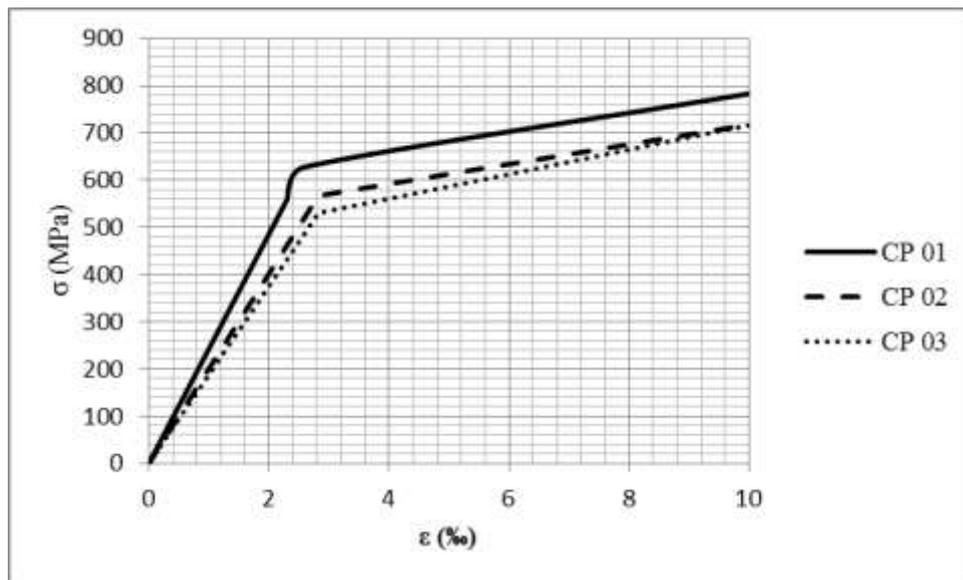


Figura 3.8 – Tensão x deformação do aço.

Tabela 3.11 – Propriedades mecânicas do aço.

Tipo de aço	Ø (mm)	$f_{vs}$ (MPa)	$\epsilon_{vs}$ (‰)	$E_s$ (GPa)
CA 50 (Armadura de flexão)	12,5	574,63	2,73	210,40

### 3.2.8. Determinação do modelo físico

As vigas foram dimensionadas de modo a garantir que as mesmas possam ser rompidas pelo esforço cortante, resistindo assim ao momento fletor. Diante disso, para o modelo físico de cada viga foi definida a seção transversal de 15 x 25 cm e 2 m de comprimento, sendo adotados os critérios de cálculos com base na NBR 6118/2014.

Desta forma, foram adotadas cinco (05) barras de aço CA50 de 12,5 mm na região tracionada, garantindo-se sua capacidade resistente ao esforço de flexão. E na área superior das vigas foram utilizadas duas (02) barras de aço CA50 de 8,0 mm, sendo que estas possuem o objetivo de garantir a armação das armaduras e o posicionamento dos estribos.

Para os estribos foram utilizadas barras de aço de CA60 de 5,0 mm com o espaçamento de 10 cm entre os mesmos em 2/3 da viga, sendo que em 1/3 (próximo ao apoio) foram utilizados estribos a cada 30 cm. Isto foi feito para garantir a região em que ocorrerá o cisalhamento da viga (Figura 3.9).

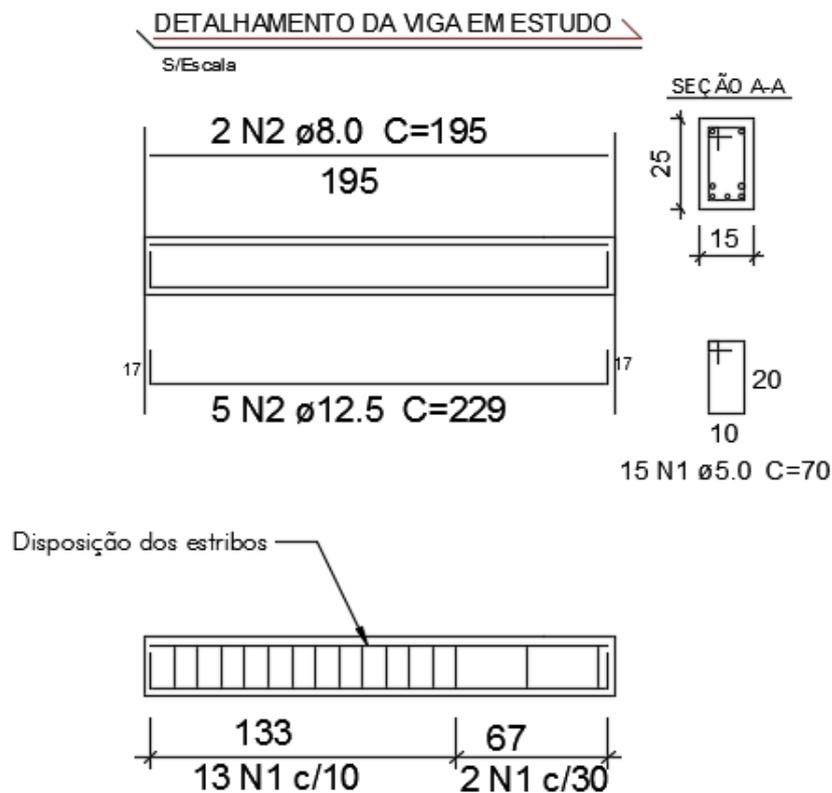
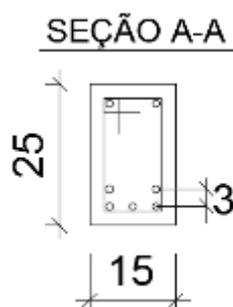


Figura 3.9 – Detalhamento da armadura utilizada nas vigas.

Para o detalhamento das armaduras longitudinais foram utilizadas três barras na seção inferior e devido ao pouco espaçamento foi adotada a utilização das duas restantes imediatamente acima, seguindo as especificações da NBR 6118/2014. Assim, as barras longitudinais ficaram dispostas conforme Figura 3.10, sendo que o espaçamento entre eixos das barras verticais foi de 3 cm, de modo a garantir o envolvimento da pasta às barras de aço e a passagem do agregado graúdo entre as mesmas (Figuras 3.10 e 3.11).



**Figura 3.10 – Disposição das armaduras longitudinais.**



**Figura 3.11 – Armadura executada para a viga.**

### **3.2.9. Características dos Elementos**

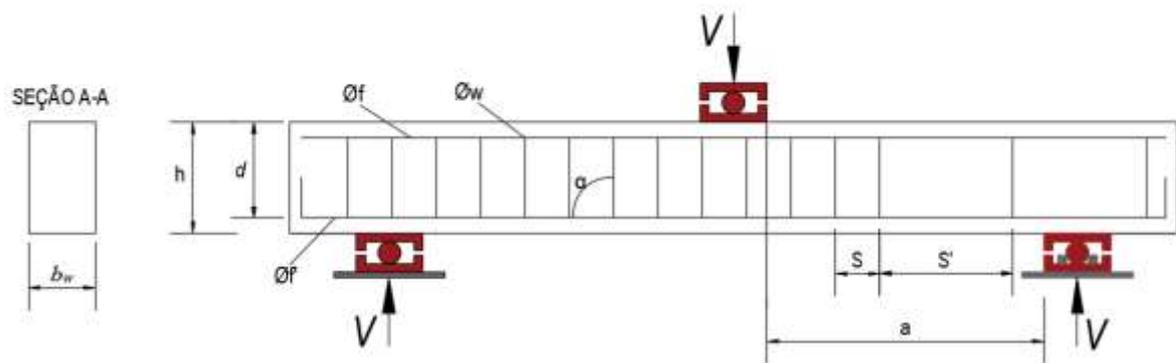
Nesta pesquisa foram ensaiadas 07 vigas, sendo uma viga de referência que foi moldada com o mesmo traço de concreto que as demais e com o mesmo detalhamento de armadura. As principais variáveis do estudo foram os percentuais em massa de fibras de polietileno e polipropileno introduzidas ao concreto moldado às 06 unidades de vigas, cujo objeto será analisar o comportamento dos elementos com relação a resistência de

cisalhamento. Segue a Tabela 3.12 apresentando as principais características das vigas (Figura 3.12 – dados referentes aos elementos de ensaios).

**Tabela 3.12 – Principais características das vigas.**

Viga	$a/d$	$d$ (mm)	$\rho_l$ (%)	$\rho_w$ (%)	Tipo de fibra	Percentual de fibra (%)
VREF	3,04	207,5	1,97	0,397	–	0
VFSP					Fibra	0,24
					Sintética de Polietileno	0,36
						0,48
VFP					Fibra de Polipropileno	0,08
						0,12
	0,16					

Obs.:  $b_w = 150$  mm;  $h = 250$  mm;  $A_s = 613,59$  mm<sup>2</sup>;  $\rho_w = \frac{A_{sw}}{b_w \cdot d}$ ;  $\rho_l = \frac{A_s}{b_w \cdot d}$ ;  $\alpha = 90^\circ$ ;  $a = 630$  mm;  $\varnothing_f = 6,3$  mm;  $\varnothing_f' = 12,5$  mm;  $S = 100$  mm;  $S' = 300$  mm;  $L = 2000$  mm.



**Figura 3.12 – Dados referentes aos elementos de ensaios.**

### 3.2.10. Instrumentação dos Elementos

A instrumentação das vigas foi realizada de maneira que se possa obter a capacidade máxima de resistência que cada material utilizado pode absorver no momento de trabalho submetido por uma viga. Apesar de que a aplicação da carga central tem como objetivo do rompimento da viga por cisalhamento e não por flexão. Assim, foram coladas 02 unidades *de strain gages* em duas faces da barra de aço inferior - central de cada viga de modo a se analisar o comportamento das mesmas, visto que estas estão dispostas na região onde ocorrerá a tração máxima na viga e que tais armaduras foram dimensionadas para que não atinjam a

tensão máxima de escoamento das mesmas, que ocasionaria o possível rompimento da viga por flexão (Figura 3.13).



**Figura 3.13 – *Strain Gages* do aço colados e protegidos para a execução da concretagem.**

Para a análise do concreto foram colocadas 02 unidades de *strain gages* internos (3 cm abaixo da armadura longitudinal superior) na região central superior de cada viga de modo a se medir a máxima deformação por compressão em que tais vigas serão submetidas no momento do ensaio (Figura 3.14). E ainda, para a análise da compressão do concreto foi colocada 01 unidade de *strain gage* externo em uma das faces laterais de cada viga, sendo colado a 2 cm abaixo da face superior, podendo-se analisar também a abertura de fissuras na face do concreto, garantindo-se assim uma maior eficácia da instrumentação (Figura 3.15).



**Figura 3.14 – *Strain Gages* internos do concreto pronto para a execução da concretagem.**



**Figura 3.15 – *Strain Gage* externo para concreto colado na face da viga.**

Para a realização da medição do deslocamento vertical sofrido pelos elementos durante o ensaio, fez-se uso do LVDT (Transdutor de Deslocamento Linear Variável) de marca Gefran, onde o mesmo foi posicionado no meio do vão com o auxílio de um yoke (Figura 3.16) para a viabilização do ensaio. Além disso, foi feita a utilização de uma chapa de aço colada a 2 cm da face superior na lateral da viga, cujo LVDT foi posicionado ligeiramente em contato com a referida chapa (Figura 3.17), permitindo assim a leitura da movimentação e deslocamento final do elemento durante o ensaio.



**Figura 3.16 – Posicionamento do yoke durante o ensaio do elemento.**

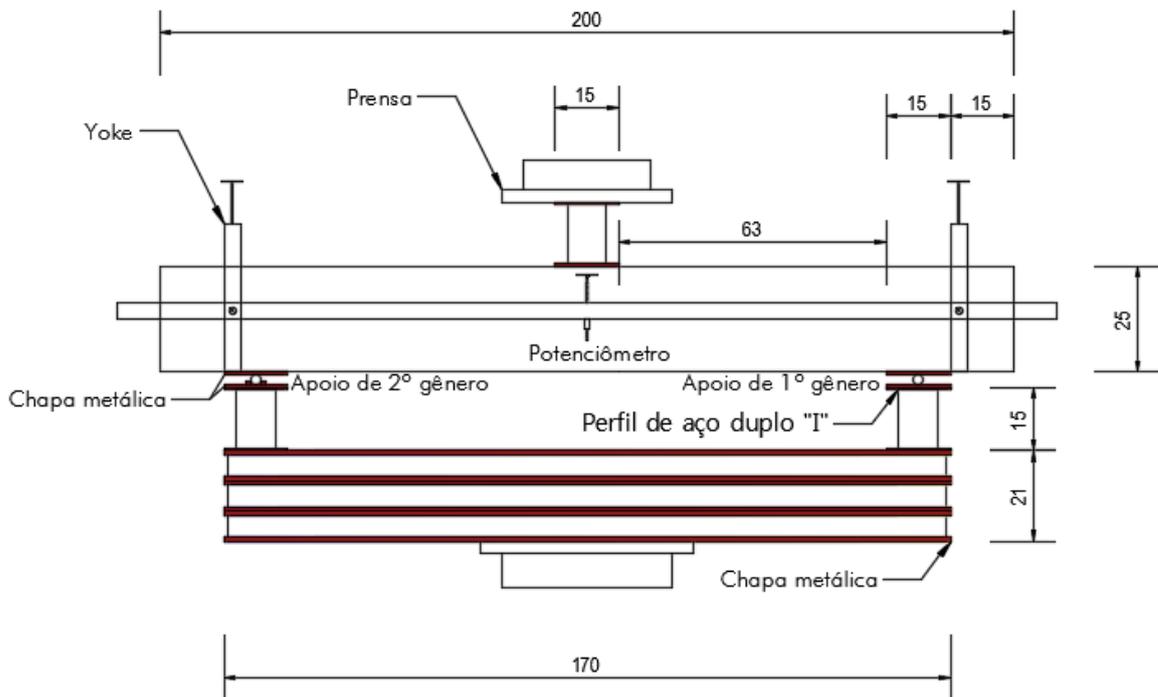


**Figura 3.17 – Posicionamento do potenciômetro durante o ensaio do elemento.**

### **3.2.11. Modelo do Sistema de Ensaio das Vigas**

O sistema de ensaio adotado para o rompimento dos elementos estudados nesta pesquisa foi baseado em sistemas já utilizados em estudos anteriores realizados no Laboratório de Engenharia Civil – LEC, do Campus Universitário de Tucuruí – CAMTUC – UFPA. Desta forma, foram utilizadas três chapas metálicas vazadas, cada uma com dimensões de 70 mm de altura e 15 mm de espessura, cujas mesmas foram empilhadas e apoiadas sobre o centro da mesa da prensa (Figura 3.18).

Em cada extremidade da chapa superior foi colocado um perfil “I” metálico, com dimensões 150 mm de largura x 150 mm de altura x 4 mm de espessura, e sobre eles foram apoiadas duas chapas metálicas, com dimensões 150 mm de largura x 10 mm de espessura, e entre estas foi alocado um rolete de diâmetro de 4 mm sem restrição ao deslocamento horizontal e outro com restrição, simulando assim, apoio de 1º e 2º gênero respectivamente. Após o posicionamento da viga sobre a estrutura montada, foi posicionado no centro da mesma um perfil “I”, nas mesmas dimensões dos perfis já utilizados, onde foi aplicada a carga através do apoio da prensa, garantindo-se assim, a dimensão do vão de cisalhamento idealizada para o ensaio (Figura 3.18).



**Figura 3.18 – Modelo do sistema adotado para ensaio das vigas.**

Para a realização das leituras do potenciômetro e extensômetros elétricos (aço e concreto interno/externo), os mesmos foram conectados por meio de cabos ao ADS 2000, que é um equipamento de funcionalidade como módulo de entrada de dados da empresa Lynx Tecnologia.

### **3.2.12. Análise não linear utilizando o software SAP 2000**

Para uma melhor compreensão sobre comportamento dos elementos estudados neste trabalho, quando submetidos a tensões de cisalhamento, foi realizada a análise não linear da seção transversal utilizando o software SAP 2000.

Assim, para o modelo criado, buscou-se realizar a inserção de dados não lineares para o concreto. Logo, foi implementado na compressão das linhas 1 a 6 e na tração nas linhas 8 e 9, onde o item 8.2.10 da NBR 8118 (2014) solicita para o comportamento do concreto a compressão, sendo parábola-retângulo e a tração, o comportamento bilinear, terceiro quadrante e primeiro quadrante, respectivamente, Figura 3.19.

Nonlinear Material Data

Edit

Material Name: CONCRETO Material Type: Concrete

Hysteresis Type: Takeda Drucker-Prager Parameters: Friction Angle: 0. Dilatational Angle: 0. Units: KN, m, C

Stress-Strain Curve Definition Options:  Parametric  User Defined Convert To User Defined

User Stress-Strain Curve Data: Number of Points in Stress-Strain Curve: 9

	Strain	Stress	Point ID
1	-3,500E-03	-12142,	
2	-2,000E-03	-12142,	
3	-1,500E-03	-11383,36	
4	-1,000E-03	-9106,69	
5	-5,000E-04	-5312,26	
6	-1,000E-04	-1183,869	
7	0,	0,	
8	1,034E-04	2586,	
9	1,500E-04	2873,	

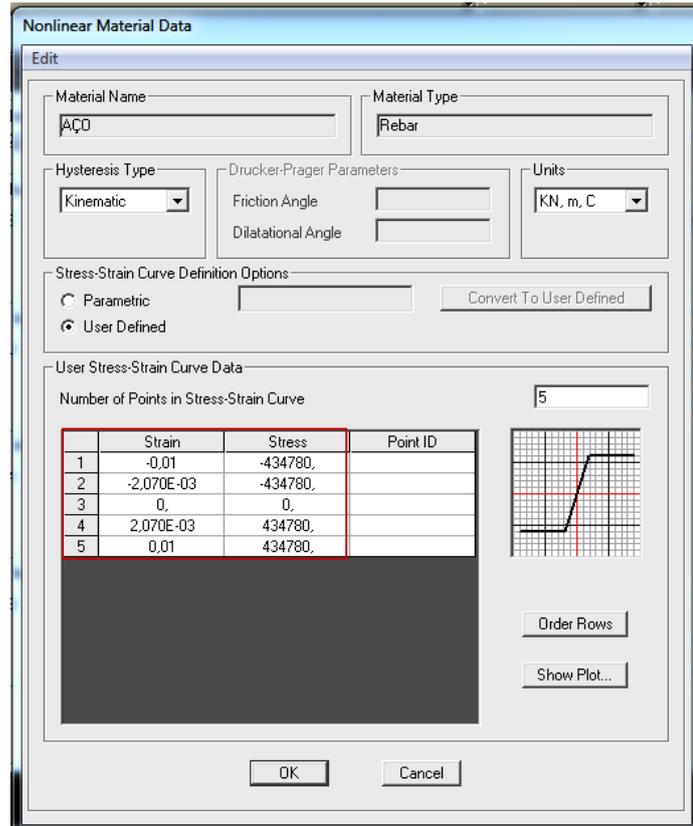
Show Plot...

Order Rows

OK Cancel

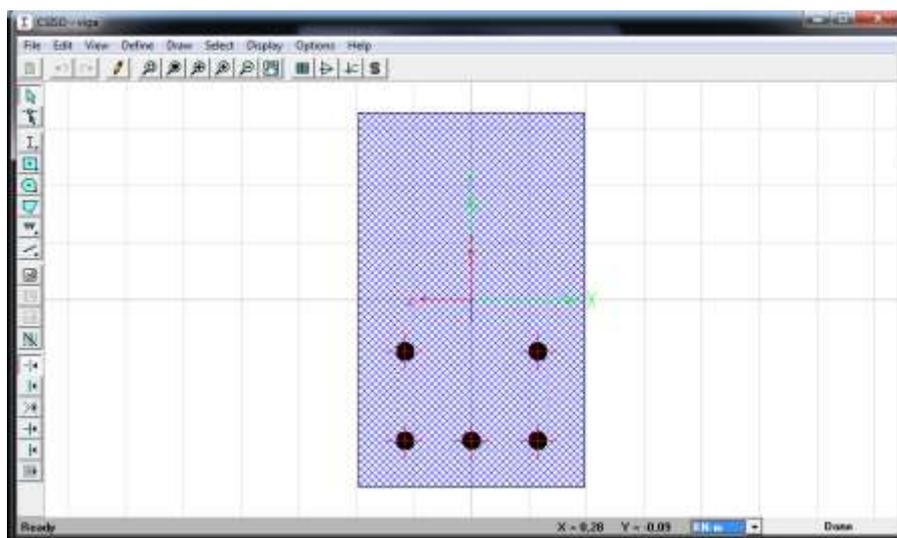
**Figura 3.19 – Inserção de dados não lineares-concreto.**

Para o aço foi implementado o comportamento elastoplástico perfeito, tanto para compressão quanto para tração do material. Assim, conforme Figura 3.20, foi caracterizada a deformação de escoamento para o aço CA50, a deformação última para o aço e a tensão de escoamento, visto que a NBR 6118 (2014), item 8.2.6, permite que seja utilizado o mesmo comportamento para tração e compressão, porém, esta análise tratará das características a tração do aço.



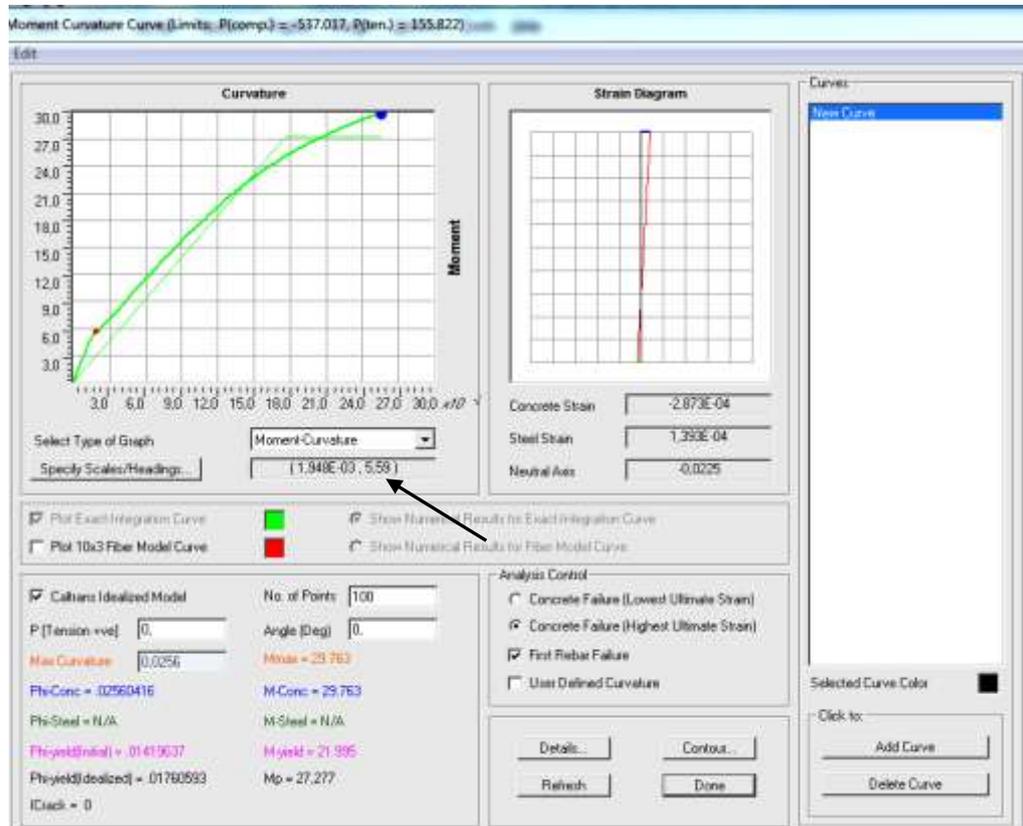
**Figura 3.20 – Implementação do comportamento elastoplástico ao aço.**

Para a análise foi idealizada uma seção composta (aço e concreto), com dimensões 25 x 15 cm e armadura longitudinal com cinco barras de 12,5 mm de diâmetro e espaçamento conforme os elementos analisados neste trabalho, conforme Figura 3.21.



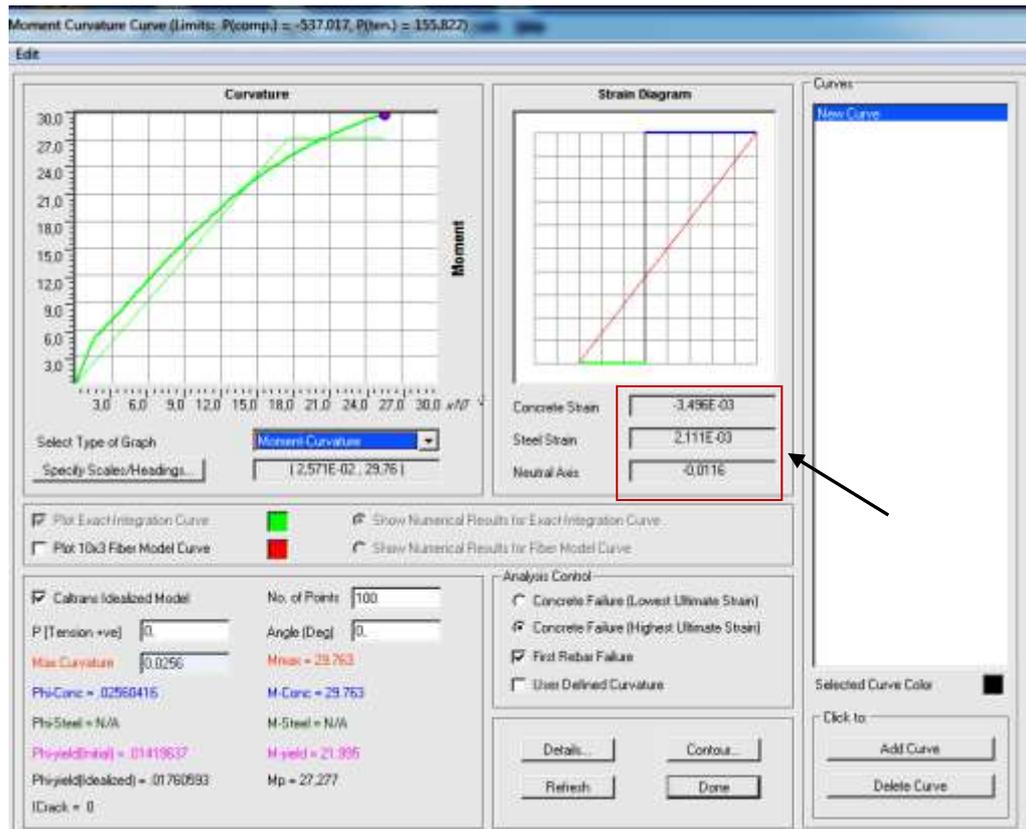
**Figura 3.21 – Configuração da seção transversal no software-SAP2000.**

Com base na análise do diagrama momento-curvatura, permite-se avaliar o comportamento da seção do concreto armado. Logo, o momento de fissuração gira em torno de 5,59 KN.m, podendo-se notar que a armadura longitudinal não atinge o escoamento.



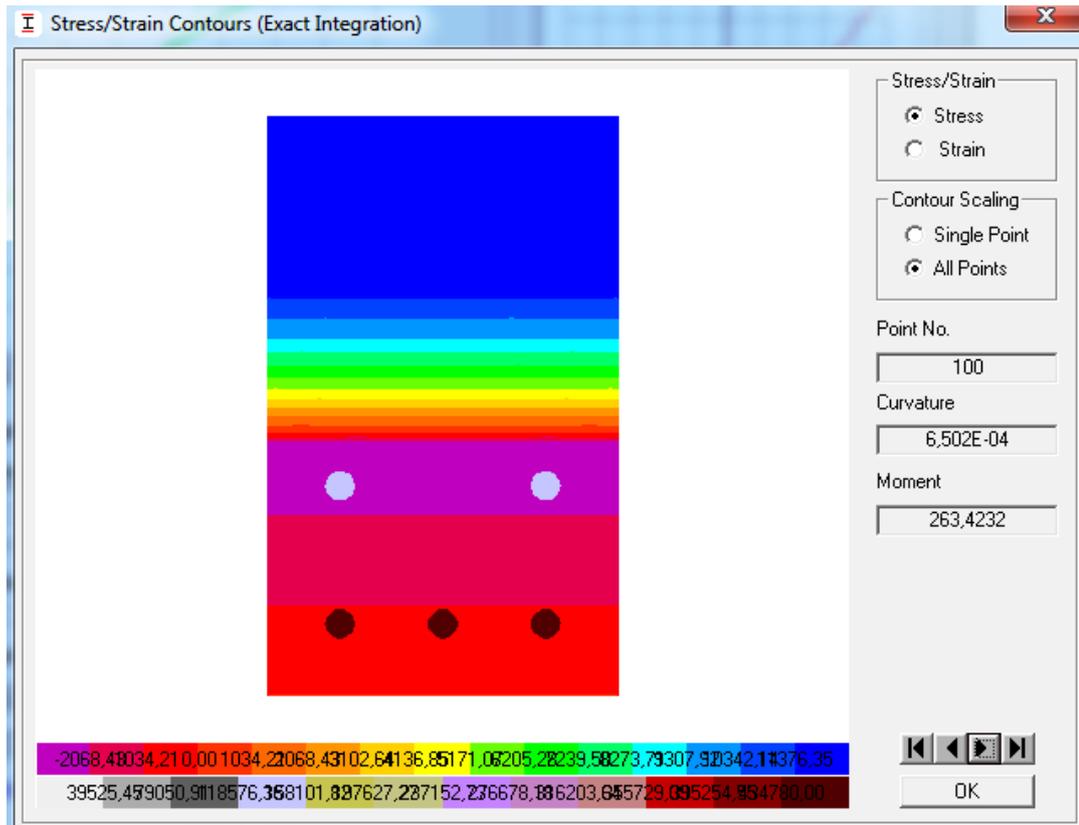
**Figura 3.22 – Diagrama momento-curvatura.**

Na Figura 3.23, pode-se notar que o concreto atingiu o encurtamento máximo de aproximadamente 3,5%, e o aço alongou até 2,11%, logo, podendo-se notar a baixa ductilidade desta seção, sendo que a linha neutra teve um deslocamento para baixo, apresentando o valor negativo de -0,0116, demonstrando que a armadura longitudinal pouco trabalhou devido a mesma está super armada, já que a mesma foi armada no domínio 3, 4.



**Figura 3.23 – Demonstração do encurtamento máximo (concreto) e alongamento máximo (aço).**

Para a análise da evolução das tensões na seção, conforme Figura 3.24, percebe-se que a armadura longitudinal obteve uma menor faixa de tensões com relação ao concreto, visto que a mesma foi super armada de forma a garantir que o elemento se romperia por tensão de cisalhamento. Portanto, tal situação vem permitir o propósito deste estudo, para que assim a análise sobre as possíveis contribuições que a inserção das fibras sintéticas de polipropileno e polietileno proporcionarão à resistência aos esforços de cisalhamento em vigas de concreto armado.



**Figura 3.24 – Evolução das tensões na seção.**

## **4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

A partir das pesquisas realizadas, pôde-se chegar a informações que comprovam os benefícios que a aplicação das fibras sintéticas de polietileno e polipropileno propiciam ao concreto convencional. Assim, neste capítulo estão expostos os principais resultados colhidos a partir deste estudo.

### **4.1. Respostas à flexão das vigas**

Objetivando quantificar a influência que as fibras de polietileno e polipropileno apresentaram ao serem adicionadas ao concreto, foi realizada a comparação entre os resultados dos gráficos cortante x deslocamento vertical no centro da viga, cortante x deformação no concreto e cortante x armadura de flexão. Tal análise foi realizada utilizando-se como parâmetro os dados obtidos e confrontados entre a viga de referência x resultados obtidos pelo response 2000 e viga de referência x vigas moldadas em concreto com aplicação de fibras.

#### **4.1.1. Análise comparativa entre VFSP01 e VREF**

Conforme resultados expostos nas figuras de 4.1 a 4.3, nota-se que para o deslocamento vertical a viga VFSP01 atingiu um menor valor com relação a VREF, porém a viga com aplicação de fibra obteve uma maior carga resistente ao cisalhamento, devido a presença de fibras na VFSP01. E com relação a deformação no concreto é possível verificar que a VFSP01 apresentou um comportamento mais dúctil que a VREF e ainda levando em consideração a deformação na armadura de flexão, nota-se que para a viga com aplicação de fibra, a armadura de flexão conseguiu atingir a capacidade resistente para que assim ocorresse o escoamento da mesma, diferentemente da viga sem a fibra.

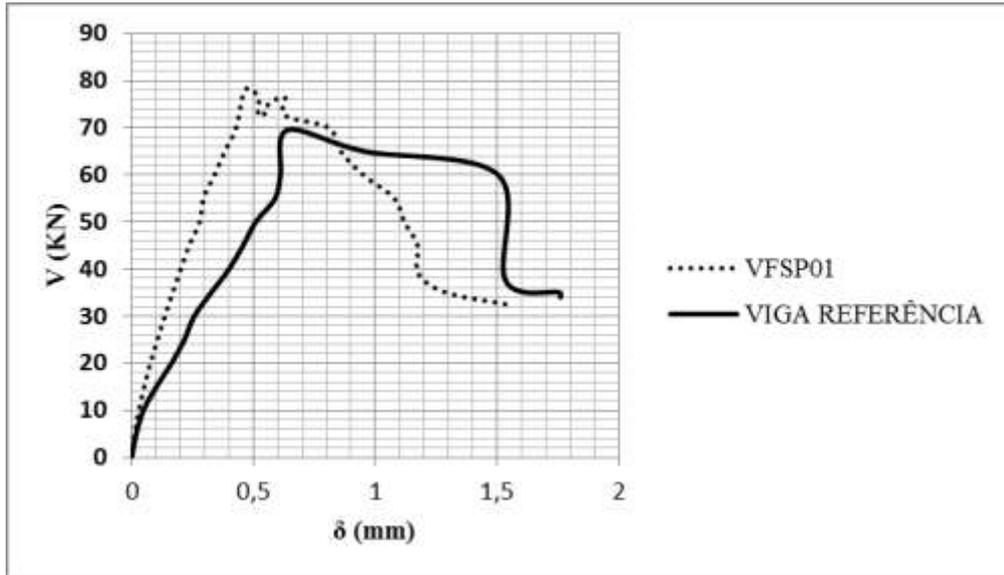


Figura 4.1 – Deslocamento vertical – VFSP01/VREF.

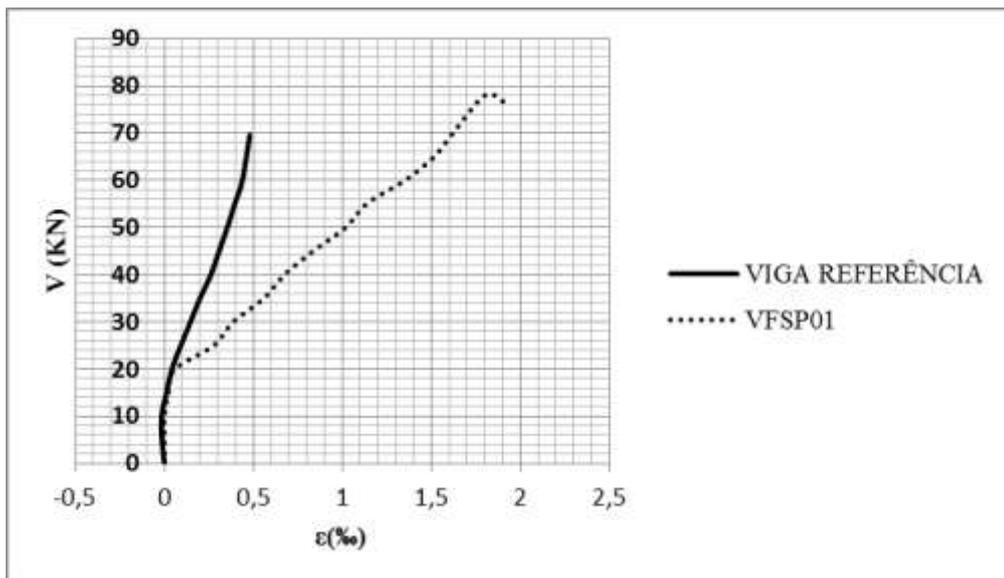


Figura 4.2 – Deformação no concreto – VFSP01/VREF.

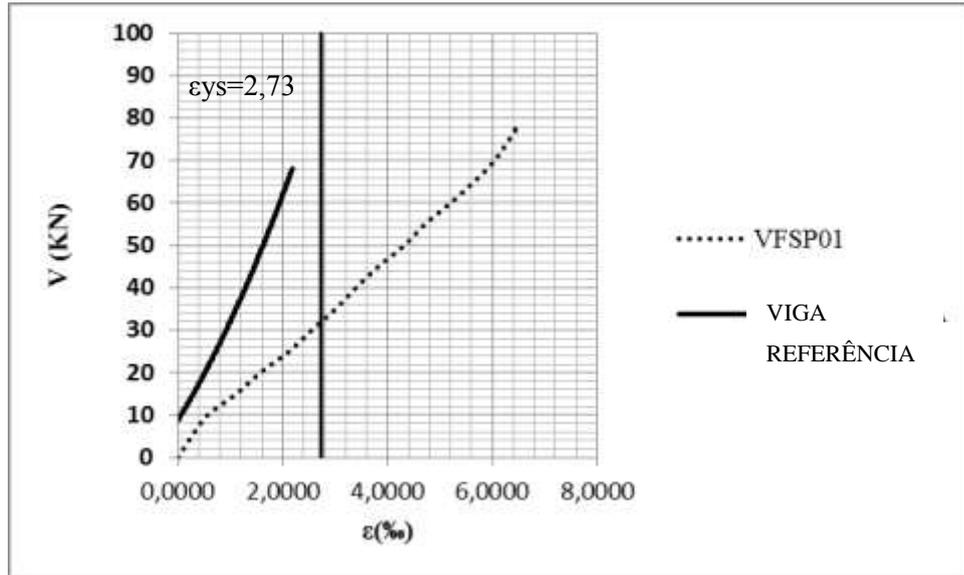


Figura 4.3 – Deformação na armadura de flexão – VFSP01/VREF.

#### 4.1.2. Análise comparativa entre VFSP02 e VREF

Conforme resultados expostos nas figuras de 4.4 a 4.6, nota-se que para o deslocamento vertical e a carga resistente ao cisalhamento, a viga VFSP02 atingiu um maior valor com relação a VREF, podendo-se inferir que tal ocorrência que ocasionou a distinção entre as duas vigas foi devido a ausência e presença de fibra. E, com relação a deformação no concreto, é possível verificar que a VFSP02 apresentou um comportamento mais dúctil que a VREF, e ainda levando em consideração a deformação na armadura de flexão nota-se que para a viga com aplicação de fibra, a armadura de flexão conseguiu atingir a capacidade resistente para que ocorresse o escoamento da mesma, diferentemente da viga sem a fibra.

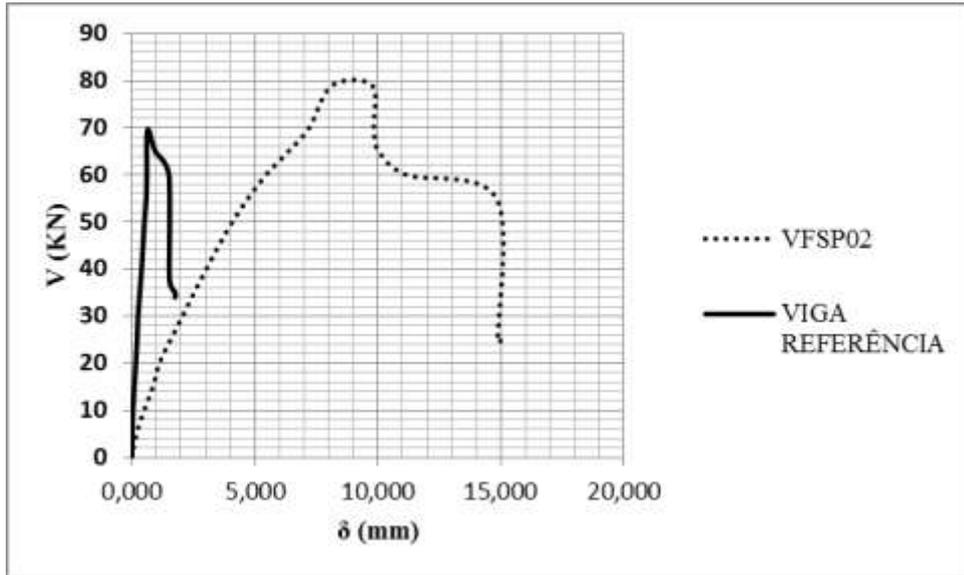


Figura 4.4 – Deslocamento vertical – VFSP02/VREF.

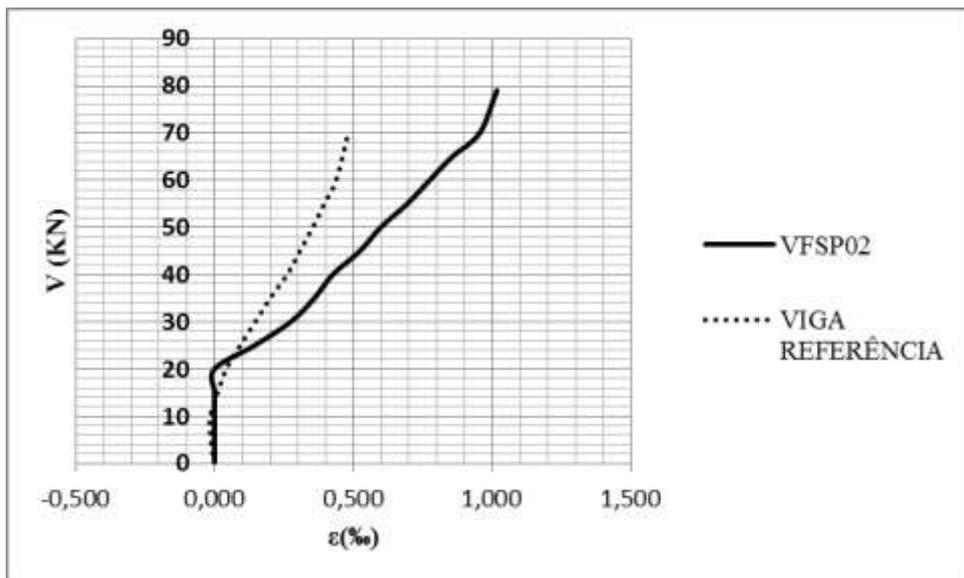


Figura 4.5 – Deformação no concreto – VFSP02/VREF.

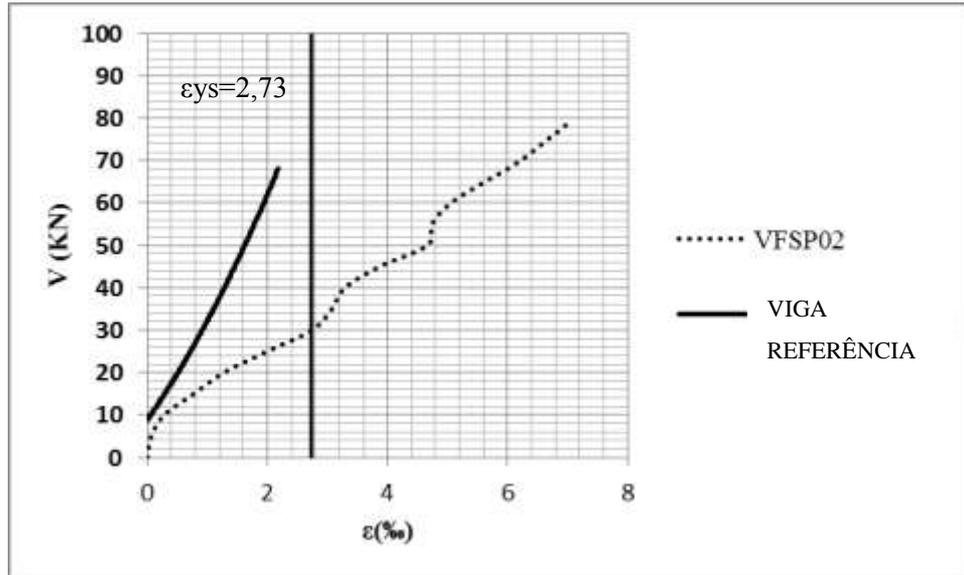


Figura 4.6 – Deformação na armadura de flexão – VFSP02/VREF.

#### 4.1.3. Análise comparativa entre VFSP03 e VREF

Conforme resultados expostos nas figuras de 4.7 a 4.9, nota-se que o cortante máximo atingido pelas vigas foram muito próximos, já com relação ao deslocamento vertical a viga VFSP03 atingiu um maior valor com relação a VREF, podendo-se inferir que tal ocorrência que ocasionou a distinção entre as duas vigas devido a ausência e presença de fibra. E com relação a deformação no concreto é possível verificar que a VFSP03 apresentou um comportamento próximo a VREF, porém a viga com aplicação de fibra atingiu uma carga mais relevante para que desse início a deformação, e ainda levando em consideração a deformação na armadura de flexão nota-se que para a viga com aplicação de fibra, a armadura de flexão conseguiu atingir a capacidade resistente para que ocorresse o escoamento da mesma, diferentemente da viga sem a fibra.

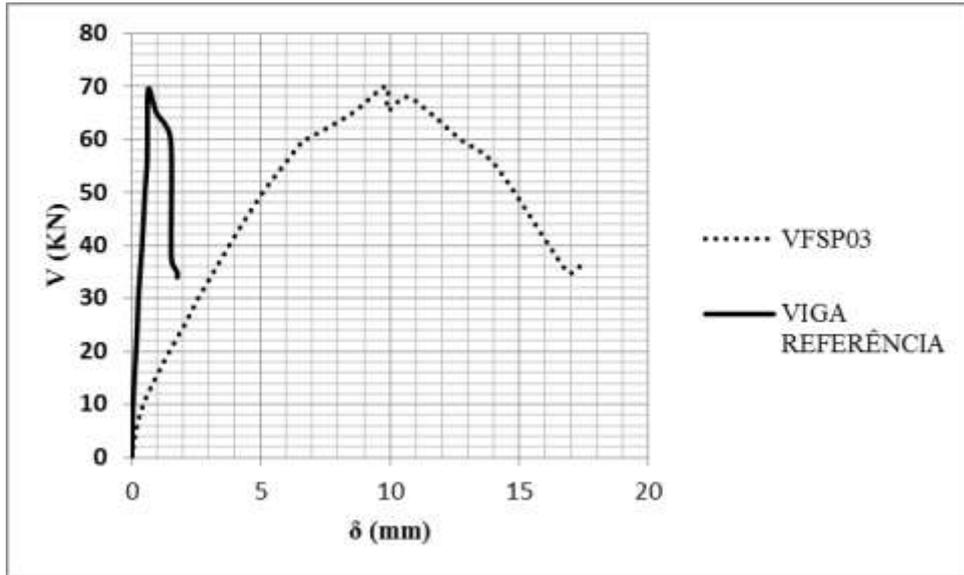


Figura 4.7 – Deslocamento vertical – VFSP03/VREF.

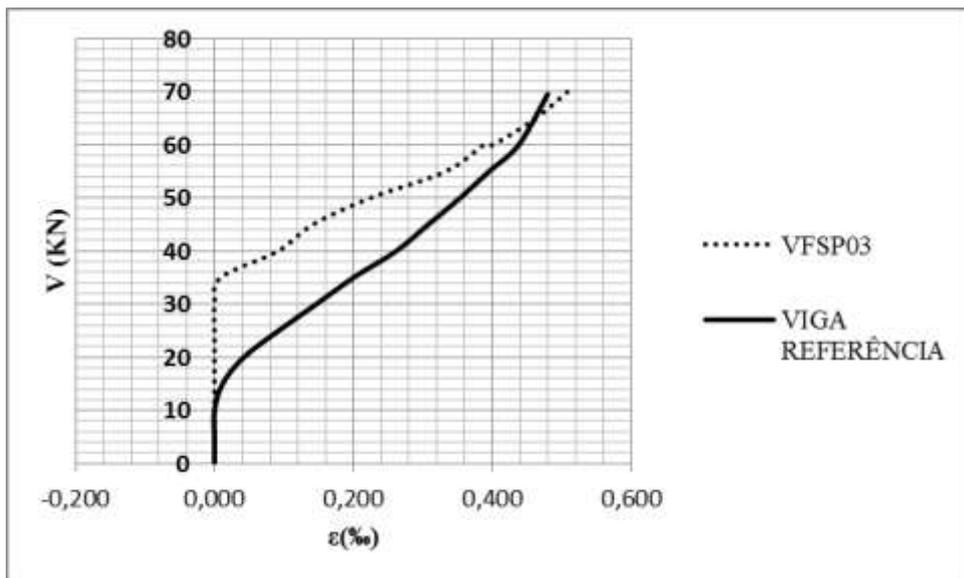


Figura 4.8 – Deformação no concreto – VFSP03/VREF.

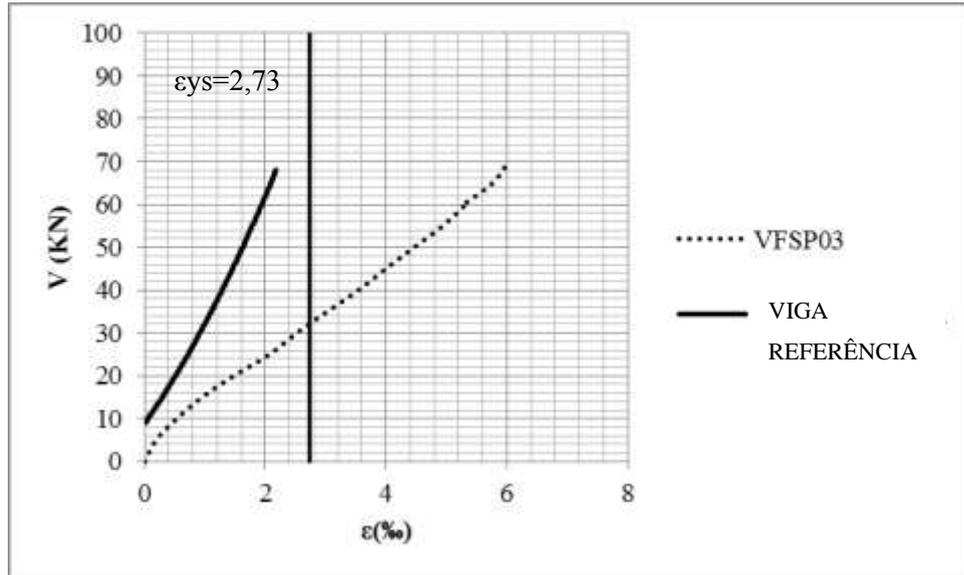


Figura 4.9 – Deformação na armadura de flexão – VFSP03/VREF.

#### 4.1.4. Análise comparativa entre VFP01 e VREF

Conforme resultados expostos nas figuras de 4.10 a 4.12, nota-se que o cortante máximo atingido pelas vigas foram muito próximos, já com relação ao deslocamento vertical a viga VFP01 atingiu um menor valor com relação a VREF, podendo-se inferir que tal ocorrência pode ter sido ocasionada devido a alguma divergência ocorrida durante a concretagem, visto que o percentual de fibra utilizada nesta viga foi bem menor em relação às demais. E, ainda com relação a deformação no concreto e na armadura de flexão, é possível verificar que a VFP01 apresentou um comportamento inferior a VREF.

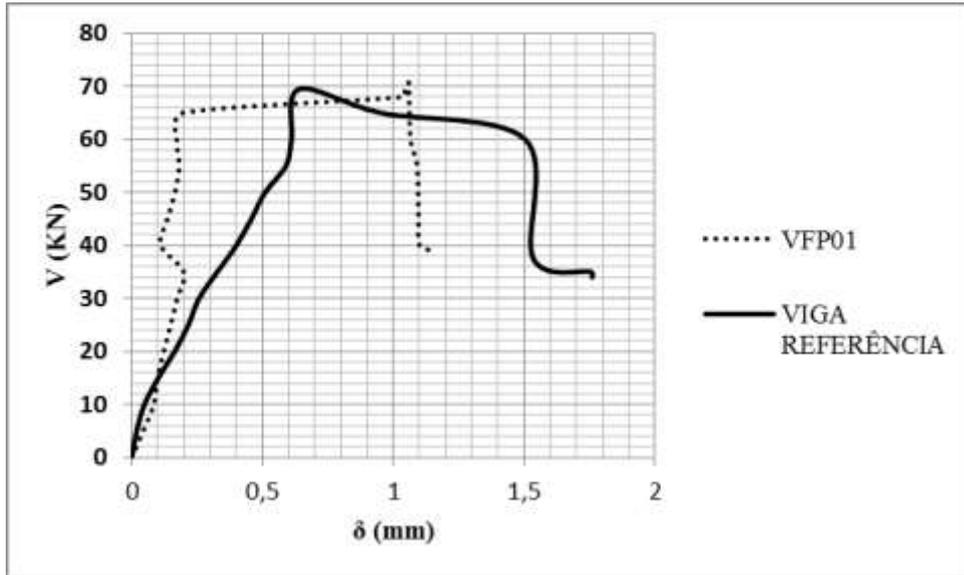


Figura 4.10 – Deslocamento vertical – VFP01/VREF.

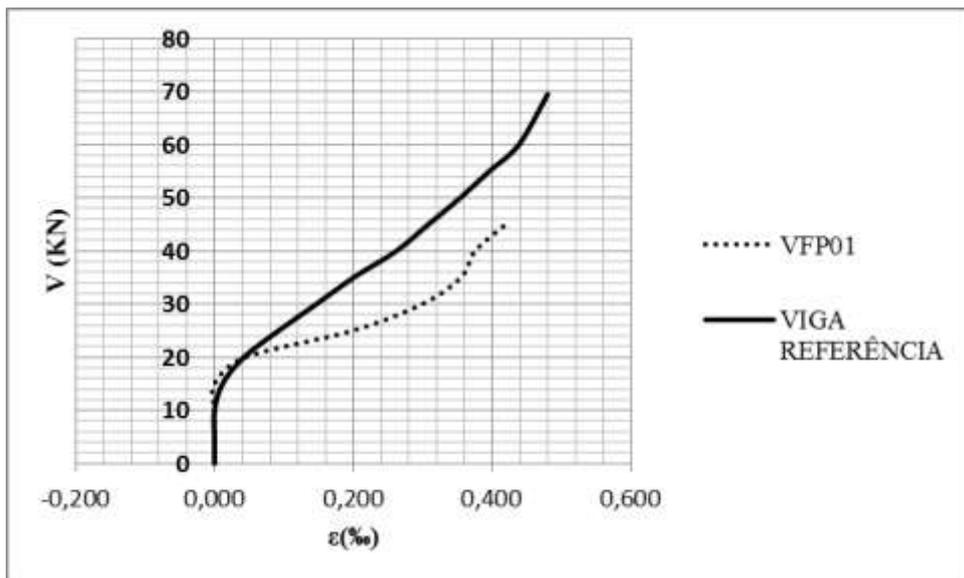


Figura 4.11 – Deformação no concreto – VFP01/VREF.

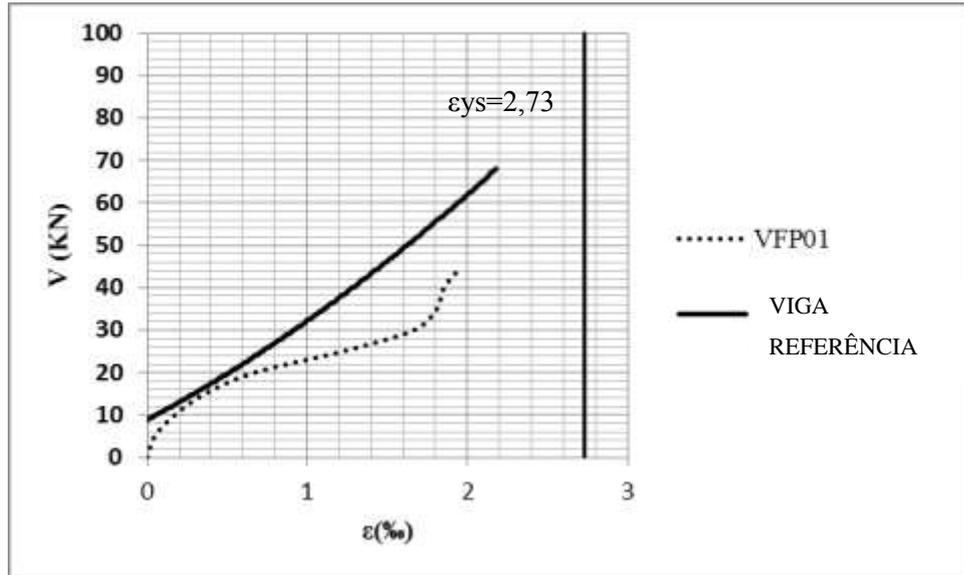


Figura 4.12 – Deformação na armadura de flexão – VFP01/VREF.

#### 4.1.5. Análise comparativa entre VFP02 e VREF

Conforme resultados expostos nas figuras de 4.13 a 4.15, nota-se que o cortante máximo atingido pelas vigas foram muito próximos, já com relação ao deslocamento vertical, a viga VFP02 atingiu um maior valor com relação a VREF, podendo-se inferir que tal ocorrência que ocasionou a distinção entre as duas vigas devido a ausência e presença de fibra. E com relação a deformação no concreto é possível verificar que a VFP02 apresentou um comportamento mais dúctil que a VREF, e ainda levando em consideração a deformação na armadura de flexão nota-se que para a viga com aplicação de fibra, a armadura de flexão conseguiu atingir a capacidade resistente, para que assim ocorresse o escoamento da mesma, diferentemente da viga sem a fibra.

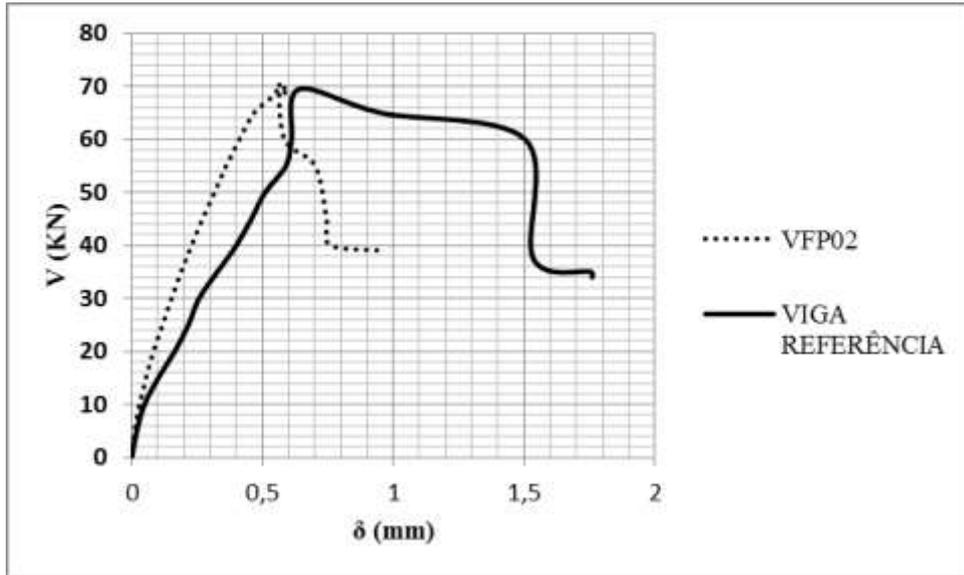


Figura 4.13 – Deslocamento vertical – VFP02/VREF.

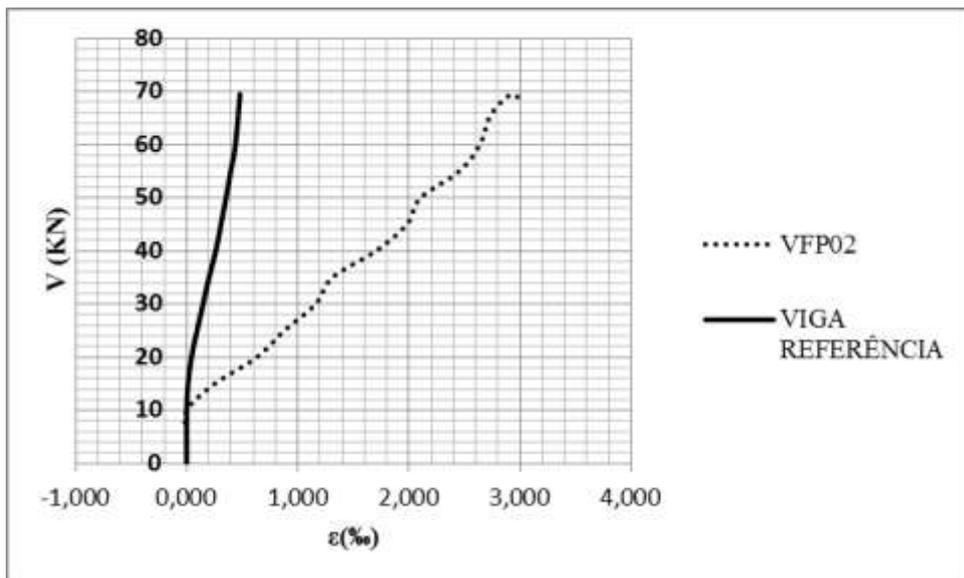


Figura 4.14 – Deformação no concreto – VFP02/VREF.

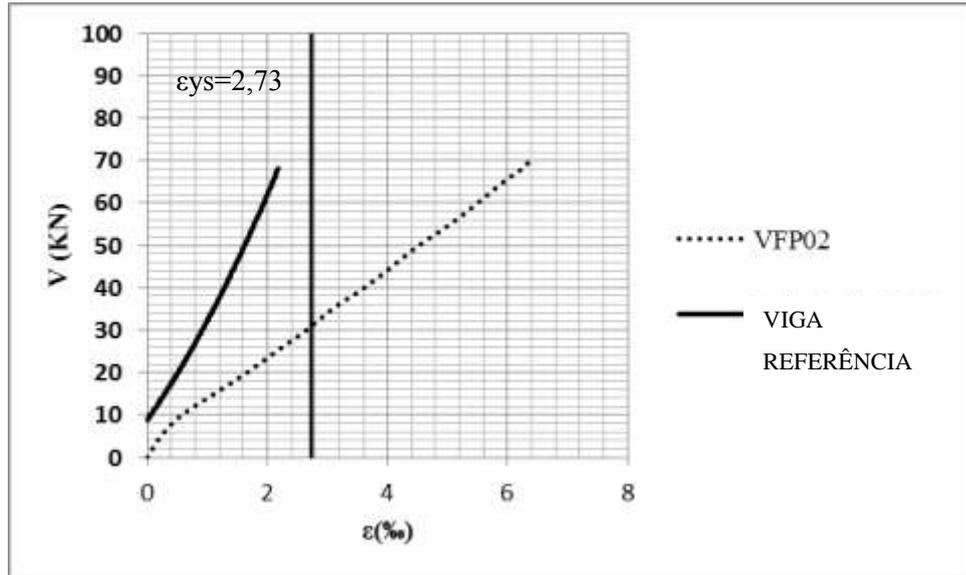


Figura 4.15 – Deformação na armadura de flexão – VFP02/VREF.

#### 4.1.6. Análise comparativa entre VFP03 e VREF

Conforme resultados expostos nas figuras de 4.16 a 4.18, nota-se que o cortante máximo atingido pelas vigas foram muito próximos, já com relação ao deslocamento vertical, a viga VFP03 atingiu um maior valor com relação a VREF, podendo-se inferir que tal ocorrência que ocasionou a distinção entre as duas vigas devido a ausência e presença de fibra. E com relação a deformação no concreto é possível verificar que a VFP03 atingiu uma carga maior que VREF, até que a mesma desse início a deformação, apresentando um comportamento menos dúctil que a VREF, e ainda levando em consideração a deformação na armadura de flexão nota-se que para a viga com aplicação de fibra, a armadura de flexão conseguiu atingir a capacidade resistente, para que assim ocorresse o escoamento da mesma, diferentemente da viga sem a fibra.

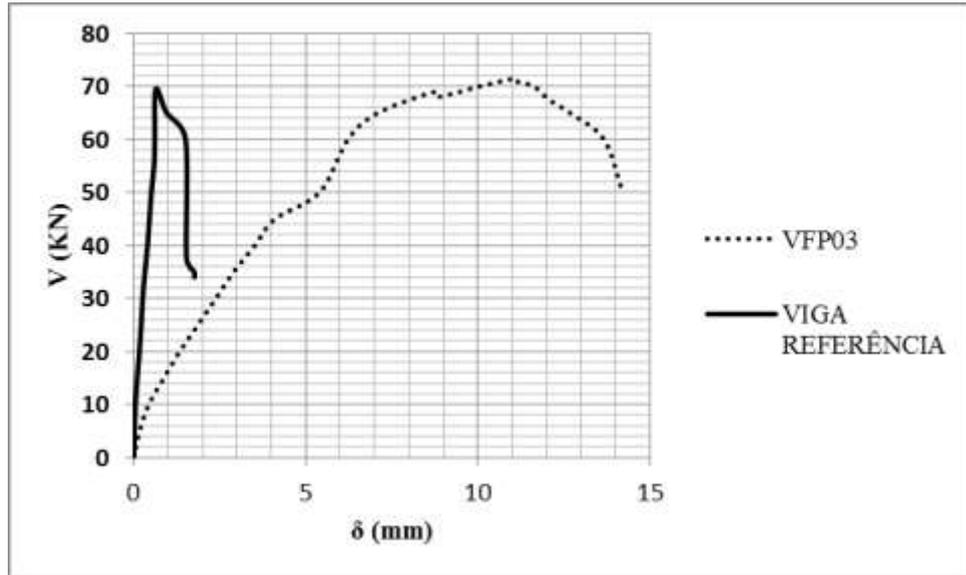


Figura 4.16 – Deslocamento vertical – VFP03/VREF.

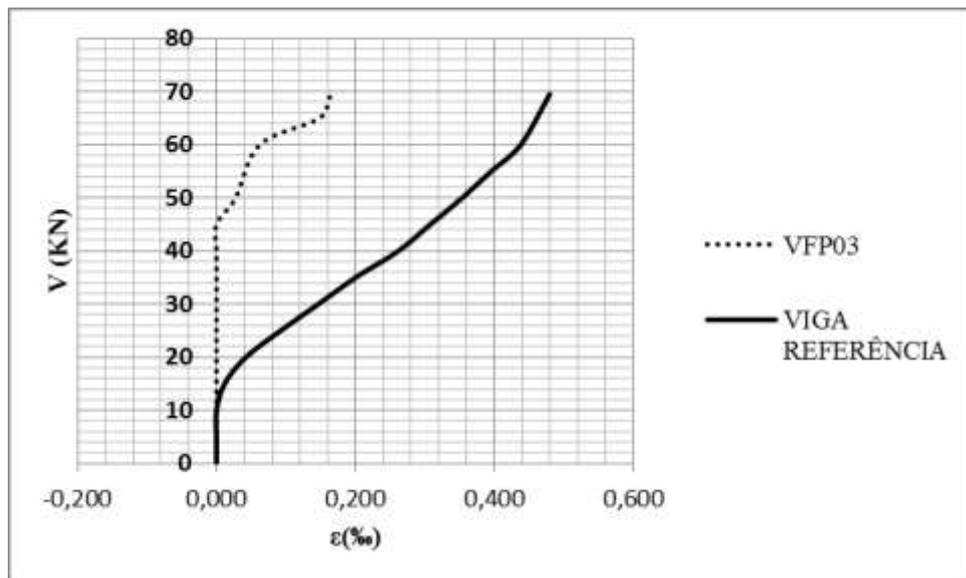


Figura 4.17 – Deformação no concreto – VFP03/VREF.

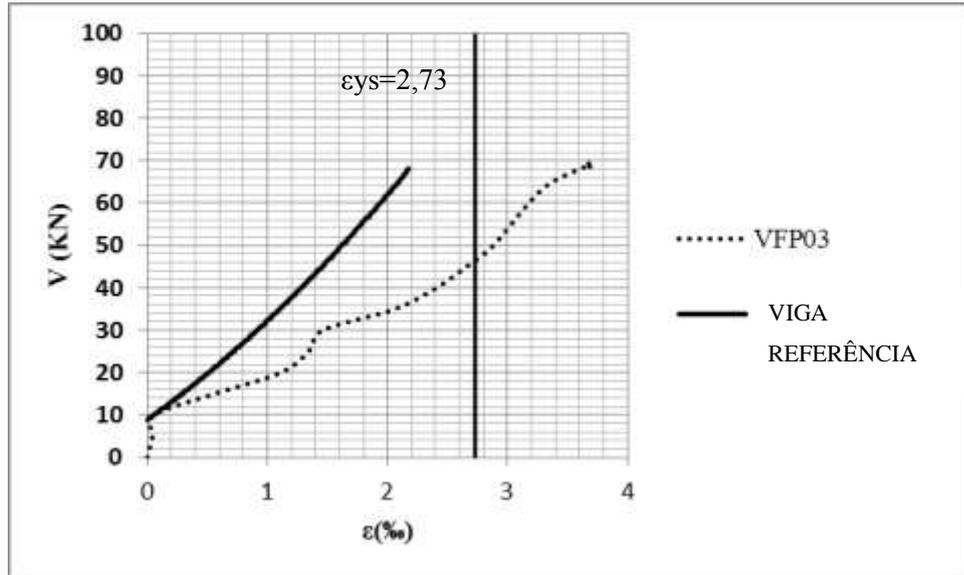


Figura 4.18 – Deformação na armadura de flexão – VFP03/VREF.

## 4.2. Análises comparativas entre as vigas

### 4.2.1. Deslocamento vertical

Conforme resultados expostos nas Figuras 4.19 e 4.20, pode-se observar que os resultados do cortante ( $V$ ) máximo atingido pelas vigas foram próximos, já com relação ao deslocamento vertical no meio do vão ( $\delta$ ), as vigas VFSP02, VFSP03 e VFP03 atingiram um maior valor com relação às demais, deduzindo em uma maior resistência e ductilidade às mesmas, podendo-se inferir que tal ocorrência se deu devido a uma maior presença de fibras nestas vigas. Ainda com relação ao ensaio, foi monitorado o comportamento dos elementos mesmo após os mesmos terem atingido a capacidade máxima resistente, para que assim pudesse ser verificado como os mesmos reagiriam em um comportamento pós-pico.

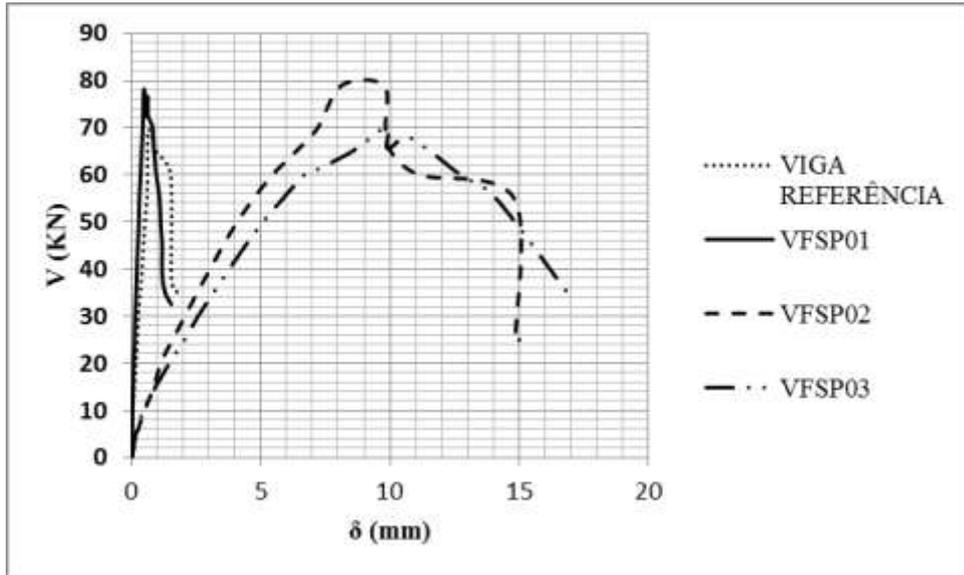


Figura 4.19 – Cortante x Deslocamento vertical - Vigas de referência e VFSP.

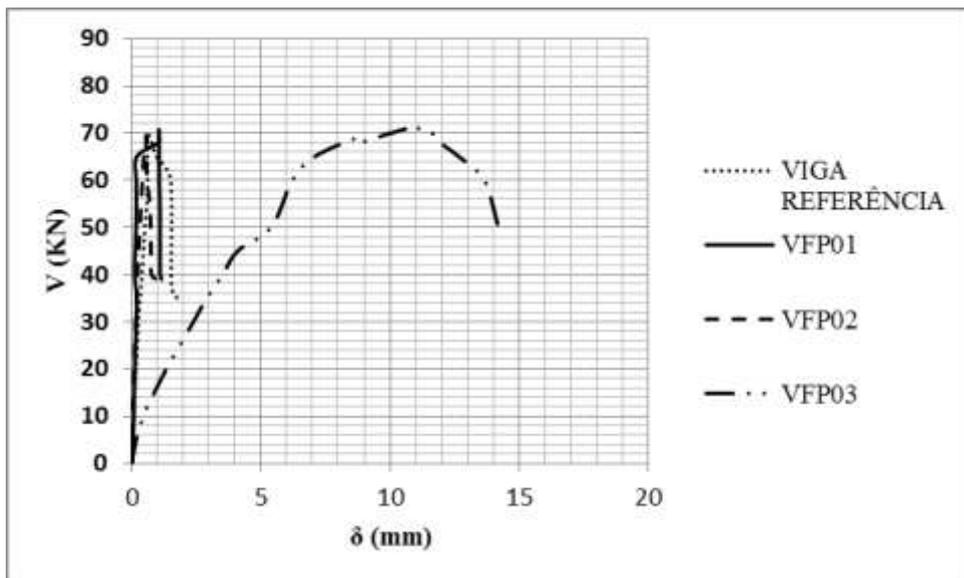


Figura 4.20 – Cortante x Deslocamento vertical - Vigas de referência e VFP.

#### 4.2.2. Deformações do concreto

Conforme resultados expostos nas Figuras 4.21 e 4.22, pode-se observar que com relação ao gráfico cortante ( $V$ ) x deformação no concreto ( $\epsilon\%$ ), as vigas VFSP01, VFSP02 e VFP02 obtiveram um comportamento semelhante e melhor que as demais vigas, porém pode-se inferir que para a viga com o percentual de fibra de polipropileno (VFP02) foi a que obteve um melhor resultado dentre estas.

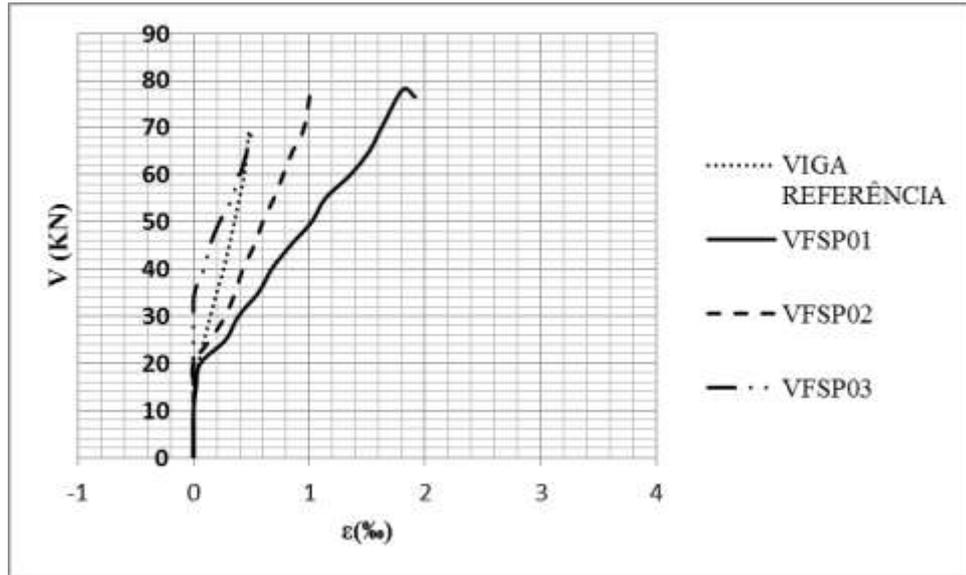


Figura 4.21 – Cortante x Deformação no concreto - Vigas de referência e VFSP.

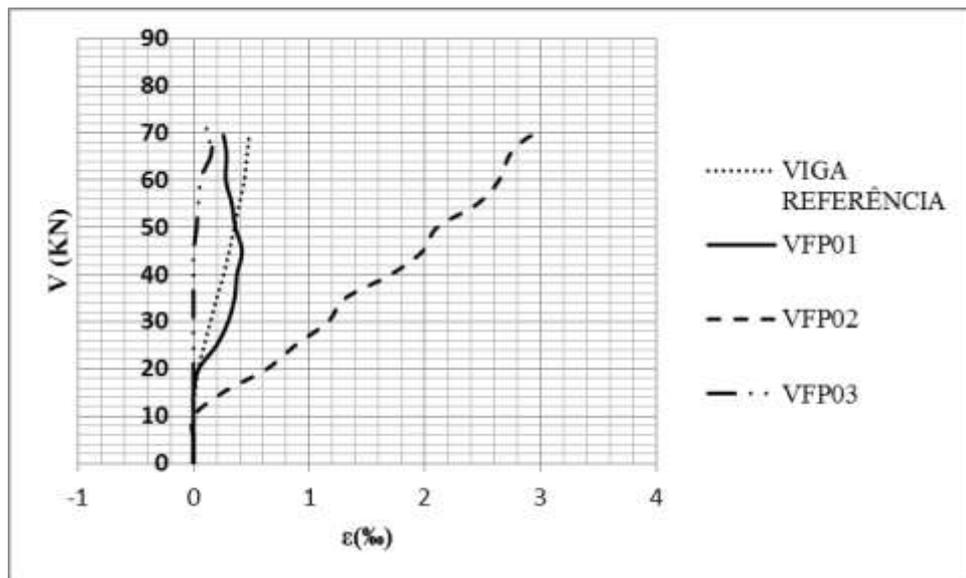


Figura 4.22 – Cortante x Deformação no concreto - Vigas de referência e VFP.

#### 4.2.3. Deformações da armadura de flexão

Conforme resultados expostos nas Figuras 4.23 e 4.24, pode-se observar que com relação ao gráfico cortante ( $V$ ) x deformação na armadura de flexão ( $\epsilon_{\text{‰}}$ ), praticamente todas as vigas com inserção de fibras obtiveram o escoamento da armadura após atingir a capacidade máxima resistente, com exceção VFP01, que possivelmente pode não ter tido um comportamento próximo às demais devido ao baixo percentual de fibra aplicada à mesma.

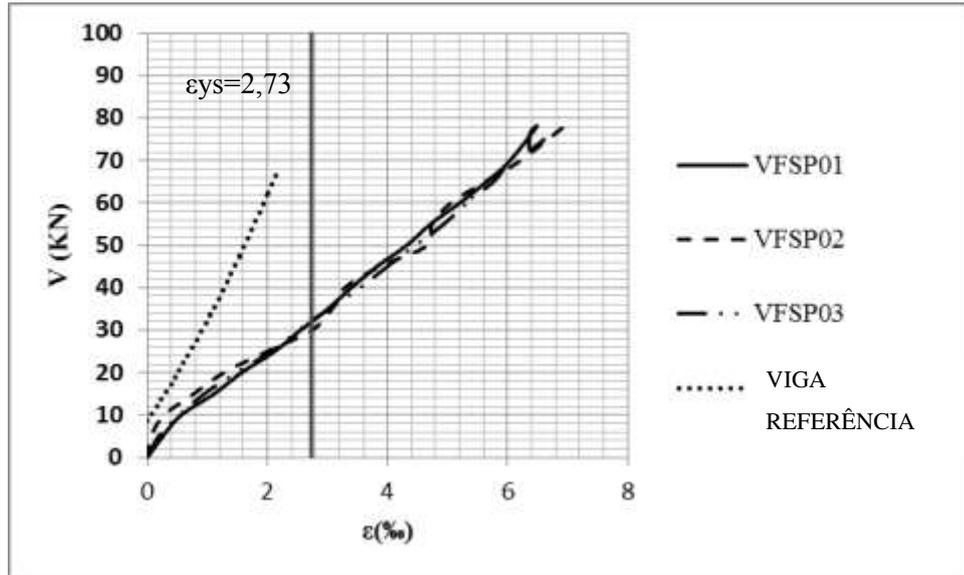


Figura 4.23 – Cortante x Deformação na armadura de flexão - Vigas de referência e VFSP.

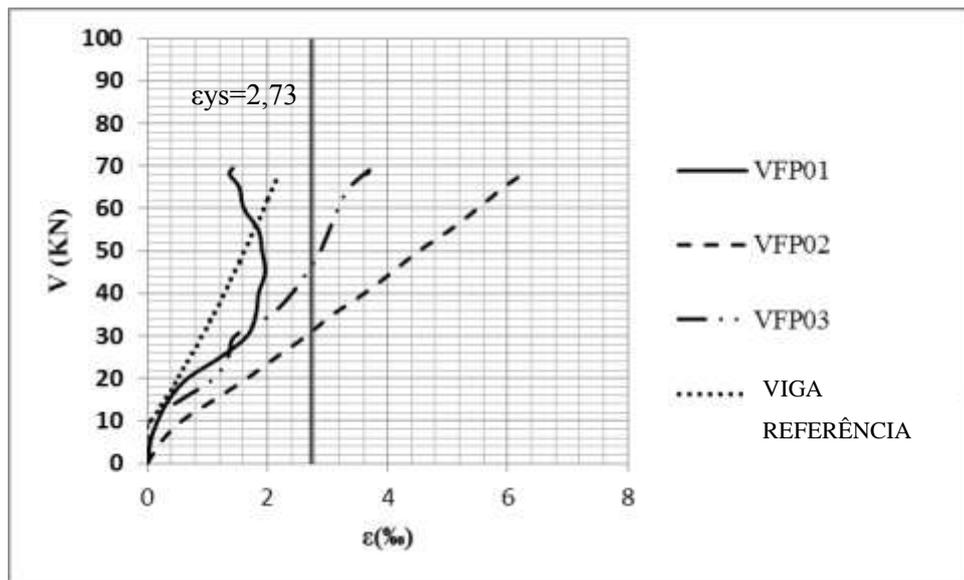
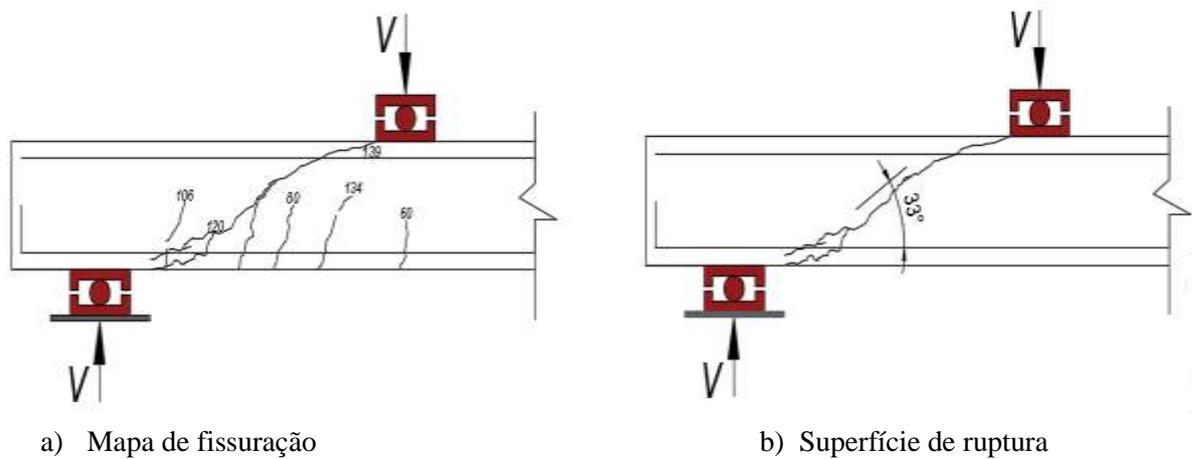


Figura 4.24 – Cortante x Deformação na armadura de flexão - Vigas de referência e VFP.

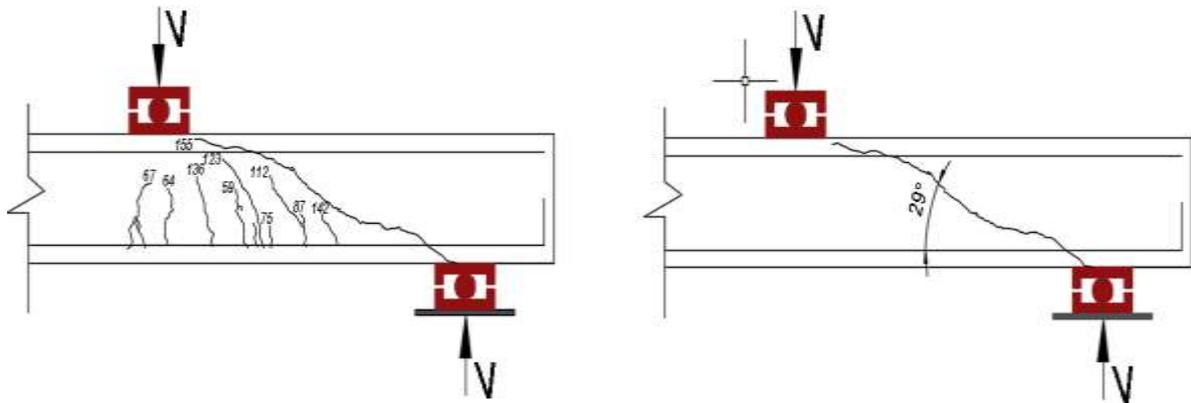
#### 4.2.4. Mapa de fissuração e superfície de ruptura

As figuras 4.25 a 4.31 demonstram os aspectos pós-fissuração das vigas ensaiadas. Logo, pode-se observar que todos os elementos foram rompidos por tensão de cisalhamento. Assim, em geral, os resultados visuais da ruptura das vigas foram semelhantes, fato este, comprova que as armaduras foram dimensionadas e armadas conforme estava proposto para este estudo.



b) Viga após o ensaio

**Figura 4.25 – Aspecto pós-ruptura da viga de referência.**



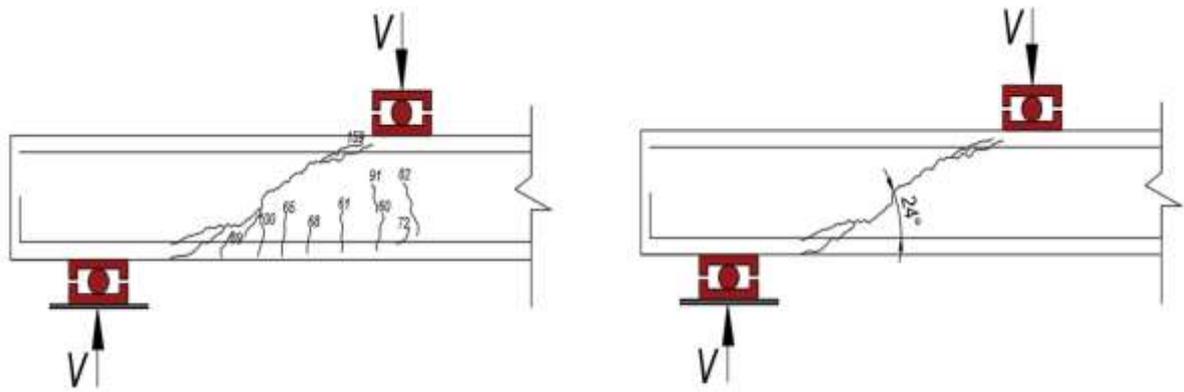
a) Mapa de fissuração

b) Superfície de ruptura



c) Viga após o ensaio

**Figura 4.26 – Aspecto pós-ruptura da viga de VFP 01.**



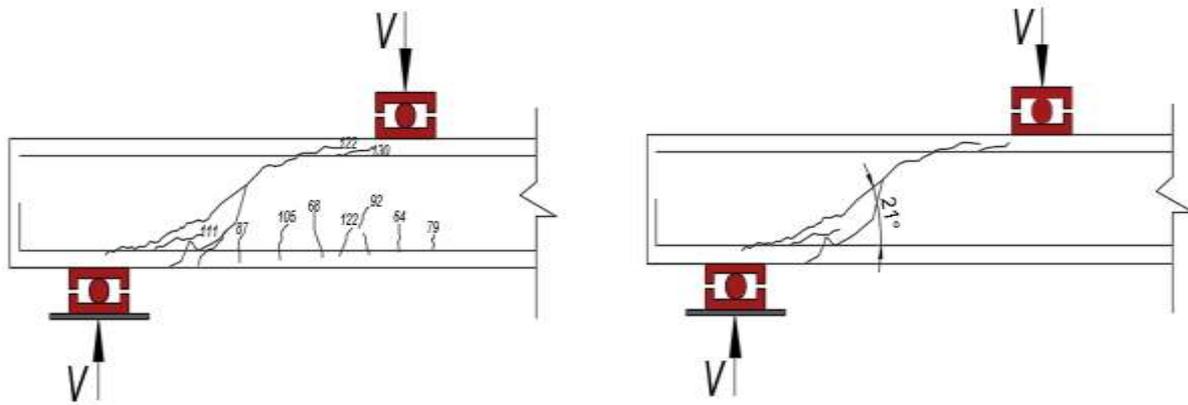
a) Mapa de fissuração

b) Superfície de ruptura



c) Viga após o ensaio

**Figura 4.27 – Aspecto pós-ruptura da viga de VFP 02.**



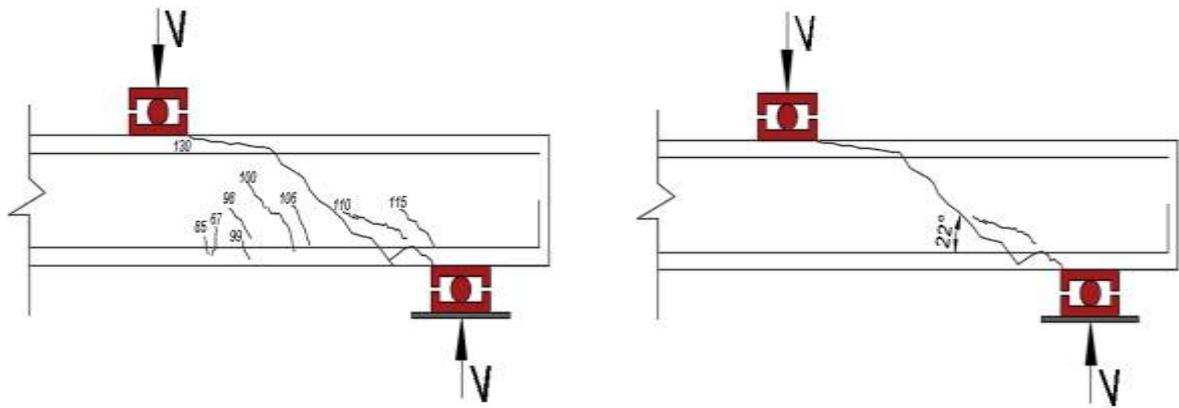
a) Mapa de fissuração

b) Superfície de ruptura



c) Viga após o ensaio

**Figura 4.28 – Aspecto pós-ruptura da viga de VFP 03.**



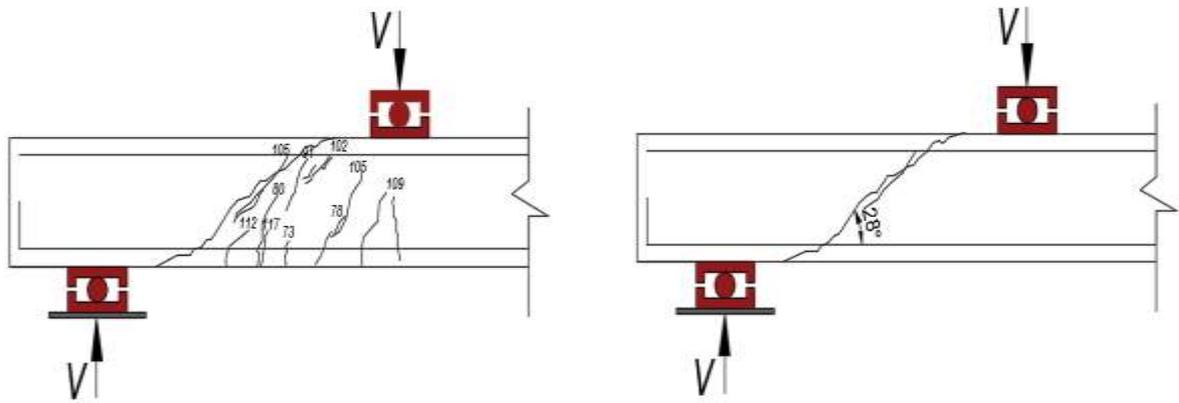
a) Mapa de fissuração

b) Superfície de ruptura



c) Viga após o ensaio

**Figura 4.29 – Aspecto pós-ruptura da viga de VFSP 01.**



a) Mapa de fissuração

b) Superfície de ruptura



b) Viga após o ensaio

**Figura 4.30 – Aspecto pós-ruptura da viga de VFSP 02.**

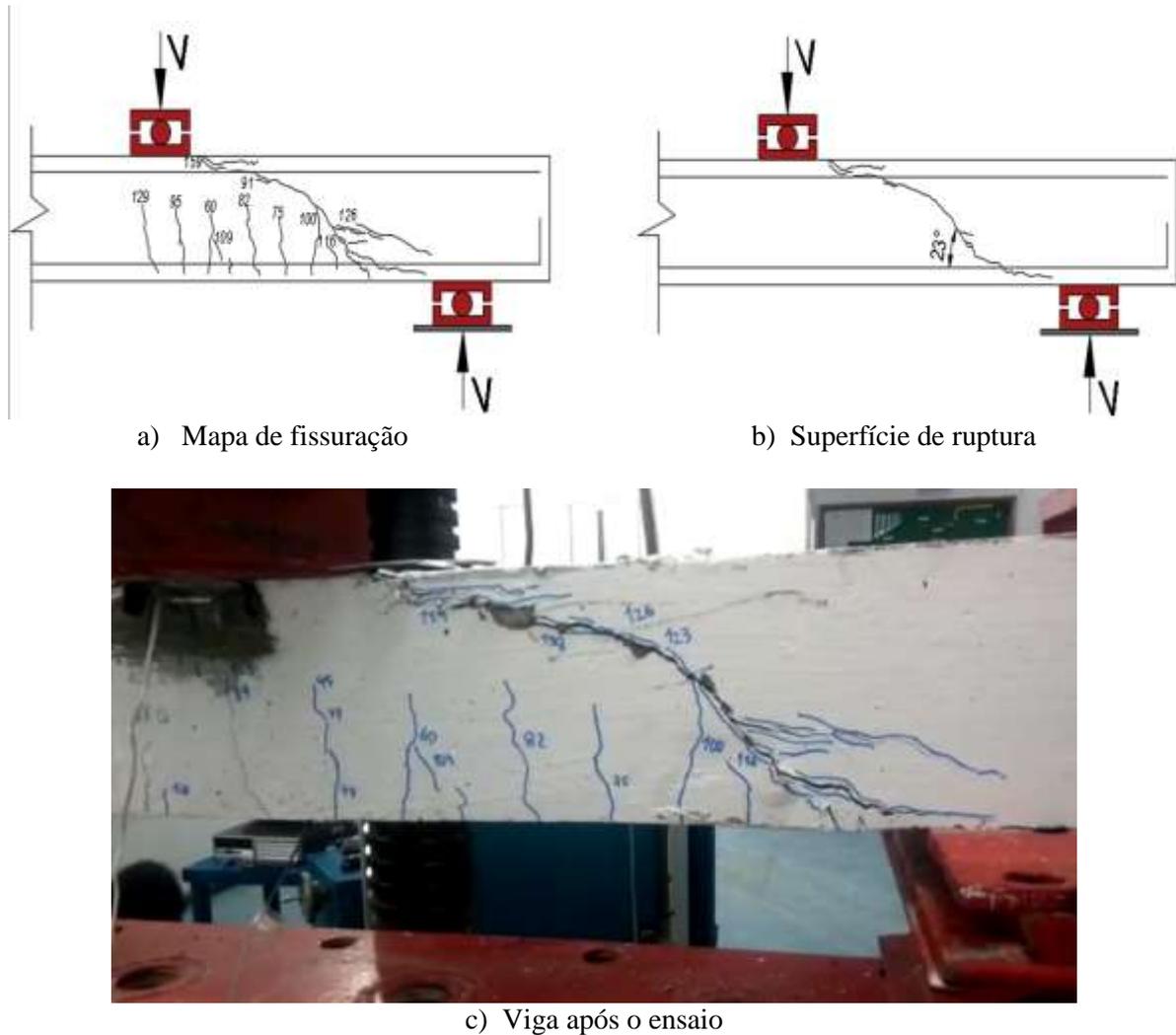


Figura 4.31 – Aspecto pós-ruptura da viga de VFSP 03.

### 4.3. Cargas de rupturas dos elementos

A Tabela 4.1 expõe as resistências máximas obtidas pelos elementos ensaiados, comparando as mesmas com a resistência à flexão estimada para cada viga, com o objetivo de verificar o quanto a carga última se aproximou do limite da resistência à flexão. E a comparação da carga última com a resistência obtida pela viga de referência para que se possa verificar o acréscimo de resistência, que por ventura, cada elemento com aplicação de teor em massa de fibra possa ter alcançado.

Assim, com relação às cargas de ruptura foi verificado que as vigas com aplicação de teor de fibras obtiveram resistências no intervalo de 70 a 79 KN, sendo que a viga de referência obteve uma carga máxima de 69,5 KN. Logo, percebe-se que houve um pequeno ganho de resistência após a aplicação das fibras, sendo que, para a aplicação da fibra de

polipropileno o ganho de resistência foi muito baixo, como se pode verificar por meio da relação  $V_u/V_{ref}$ , fato este que se pode aferir devido ao baixo teor desta fibra aplicado. Já em consideração a fibra de polietileno, percebe-se um leve aumento de resistência, porém para a viga VFSP03 houve uma queda de resistência, situação que possivelmente pode está relacionada a problemas na concretagem, como por exemplo, o adensamento.

Ainda com relação as informação expostas na Tabela 4.1, verifica-se que os elementos com a aplicação de teores de fibras obtiveram uma maior aproximação com a resistência a flexão em relação a viga de referência, conferindo assim, uma certa contribuição na aplicação das fibras utilizadas neste estudo.

**Tabela 4.1 – Cargas de rupturas dos elementos.**

<b>Viga</b>	<b><math>V_u</math> (Kn)</b>	<b><math>V_u/V_{flex}</math></b>	<b><math>V_u/V_{ref}</math></b>
VREF	69,5	0,599	1,000
VFP01	71	0,612	1,022
VFP02	70,5	0,607	1,014
VFP03	71,5	0,616	1,029
VFSP01	78	0,672	1,122
VFSP02	79	0,680	1,137
VFSP03	70	0,603	1,007
<b>Média</b>	-	0,612	1,022
<b>Desvio Padrão</b>	-	0,031	0,053

**Tabela 4.2 – Cargas de rupturas dos elementos-comparação às normas.**

<b>Viga</b>	$V_u / V_{NBR I}$	$V_u / V_{NBR II}$	$V_u / V_{ACI}$	$V_u / V_{EC2}$
VREF	0,845	0,925	0,696	0,932
VFP01	0,864	0,945	0,711	0,952
VFP02	0,857	0,939	0,706	0,945
VFP03	0,869	0,952	0,716	0,958
VFSP01	0,949	1,04	0,782	1,046
VFSP02	0,961	1,05	0,792	1,059
VFSP03	0,852	0,932	0,701	0,938
<b>Média</b>	0,864	0,945	0,711	0,952
<b>Desvio Padrão</b>	0,045	0,049	0,037	0,049

Conforme Tabela 4.2, a norma Eurocode 2 foi a que apresentou os resultados mais próximos dos reais em relação às demais estimativas, para os elementos ensaiados neste trabalho, sendo que a mesma permite um ângulo mínimo de inclinação das bielas de 21,8°. Logo, podendo ser verificado essa proximidade através do ângulo de inclinação exercido pela VFP03, cujo mesmo foi de 21°.

Quanto à ABNT NBR 6118 (2014), observou-se que o modelo II foi mais conservador que o modelo I, apresentando resultados mais próximos dos experimentais, uma vez que o modelo II permite uma variação até os 30°, já o modelo I fixa o ângulo de rompimento por cisalhamento aos 45°. Ainda com relação a comparação às normas, verificou-se que a norma americana foi a que apresentou resultados mais distantes, visto que a ACI 318 (2014) possui um caráter conservador, prezando a segurança.

## **5. CONCLUSÕES**

### **5.1. Considerações gerais**

A partir deste estudo foram avaliadas as contribuições que a aplicação de teores de fibras de polipropileno e polietileno oferecem com relação aos esforços cisalhantes sofridos por elementos estruturais. Assim, com base em um referencial teórico descrevendo as principais influências que a aplicação de teores de fibras podem proporcionar aos concretos, bem como os principais métodos da realização de dimensionamento para se combater aos esforços de cisalhamento, logo, tais informações foram referências para a idealização do programa experimental, que submeteu ensaios ao esforço cortante em vigas.

### **5.2. Considerações sobre os resultados dos ensaios**

Diante das análises dos resultados experimentais, pôde-se explicar as devidas conclusões expostas neste tópico.

#### **5.2.1. Ensaios experimentais dos corpos de prova**

Diante dos resultados dos ensaios de rompimentos dos corpos de prova, foi possível ratificar as informações levantadas no referencial teórico, visto que para a resistência à compressão houve um gradual aumento de resistência a partir da aplicação e ao incremento nos teores de ambas as fibras (Tabela 3.8), contudo, para a fibra de polietileno, o ganho de resistência foi maior em relação a fibra de polipropileno, podendo-se inferir que tal resultado, possivelmente se deu devido ao maior percentual no teor de fibra utilizado de uma com relação a outra, visto que ambas as fibras possuem características semelhantes como fator forma, comprimento, densidade e módulo de elasticidade.

Com relação ao ensaio de tração, pôde-se verificar que com a aplicação baixa de teores de fibras não houve contribuição, visto que os corpos de prova apresentam uma resistência menor que o moldado com o concreto de referência, porém ao se aplicar maiores teores foi notado um aumento na resistência a tração dos elementos (Tabela 3.9). E ainda, para o ensaio de módulo de elasticidade (Tabela 3.10), nota-se que à medida que se aplica o

incremento no teor de fibra, o mesmo tende a diminuir, demonstrando assim, que foi produzido um concreto mais dúctil.

### **5.2.2. Ensaios experimentais das vigas**

A partir dos resultados dos ensaios de rompimentos das vigas, pôde-se avaliar que a aplicação de teores em massa de fibras de polipropileno e polietileno, possivelmente por apresentarem um baixo módulo de elasticidade, e diante dos dados apresentados na Tabela 4.1, pouco contribuiu para o aumento de resistência ao cisalhamento dos elementos. Logo, com base nos gráficos do Item 4.2.1, verifica-se que os teores em fibras para as vigas VFSP02, VFSP03 e VFP03 contribuíram para que estas pudessem atingir em relação às outras um maior deslocamento vertical, apontando-se assim uma maior ductilidade do material.

Além das informações já evidenciadas, com base nos gráficos cortante x deformação no concreto e nos gráficos cortante x deformação na armadura de flexão foi confirmado que para maiores teores de fibras foram obtidos melhores resultados, sendo que para as armaduras longitudinais, apenas a viga de referência e VFP01 (com o menor teor de fibras entre todas as vigas) não atingiram o escoamento do aço, conferindo a influência da aplicação de fibras aos elementos. Haja vista, que devido às vigas estarem armadas para resistirem aos esforços de flexão, o rompimento ocorreu de maneira abrupta, tendo baixa deformação, logo, com o aumento do teor de fibra, o concreto passou a admitir uma maior deformação permitindo assim, que a armadura de flexão pudesse trabalhar, atingindo o escoamento.

Assim, pode-se deduzir, diante dos resultados, que as fibras utilizadas neste estudo garantem certa estabilidade a estrutura com relação ao pós-pico, visto que após a abertura das fissuras, as fibras permitem a transferência de tensões entre as regiões separadas, colaborando para certo deslocamento e permitindo ao elemento suportar a uma resistência antes que haja o rompimento do mesmo, servindo assim, como aviso sobre a utilização da estrutura.

### **5.3. Sugestões para futuros trabalhos**

Este estudo analisou o comportamento e desempenho de elementos de concreto armado reforçados a diferentes teores de macrofibras sintéticas de polipropileno e polietileno quanto à capacidade portante da contribuição destas aos esforços de cisalhamento. Portanto, para complementar o trabalho realizada, sugere-se:

– Realizar ensaios ao cisalhamento em elementos com aplicação de outros teores de fibras de polipropileno e polietileno, a fim de que se possa encontrar um teor para a aplicação destas, próximo ao ideal, visto que é comum que fabricantes de fibras recomendem uma dosagem padrão para qualquer tipo de aplicação, desprezando assim, a ocorrência de diferentes tipos de solicitação a que o material estará exposto, não prevendo a capacidade máxima portante que o elemento produzido poderá oferecer ao mercado;

– Realizar ensaios de flexão em elementos com aplicação dos mesmos e outros teores de fibras de polipropileno e polietileno, para que se possa avaliar a contribuição destas em elementos submetidos a tais esforços;

– Realizar a construção de um modelo computacional para que possa ter uma aplicação genérica sobre o comportamento de elementos de concreto armado sob a influência de fibras sintéticas;

– Realizar análises microscópicas do concreto produzido com aplicação de teores de fibras de polipropileno e polietileno, para que se possa avaliar o comportamento da microestrutura da zona de contato entre a pasta e a fibra.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Manual of concrete practice: part 5**. ACI. Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fiber reinforced concrete. (ACI 544.3R-93). ACI Committee 544. Detroit, USA, 1993.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Report on Fiber Reinforced Concrete**. ACI. Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fiber reinforced concrete. (ACI 544.1R-96). Detroit, USA, 1996.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Building Code Requirements for Structural Concrete**. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan (ACI 318). Detroit, USA, 2014.

ARAÚJO, C. M. **Reforço de vigas de concreto à flexão e ao cisalhamento com tecidos de fibra de carbono**. Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica**. (ABNT, 2005).

\_\_\_\_\_. **NBR MN 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica**. (ABNT, 2003).

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52: Agregado Miúdo – Determinação da massa específica e massa aparente**. (ABNT, 2009).

\_\_\_\_\_. **NBR NM 30: Agregado Miúdo – Determinação da absorção de água** (ABNT, 2001).

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53: Agregado Graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água** (ABNT, 2009).

\_\_\_\_\_. **NBR 6118: Procedimento – Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Armado**. Rio de Janeiro, Brasil, (ABNT, 2014).

\_\_\_\_\_. **NBR 7211: Especificação – Agregados para concreto**. Rio de Janeiro, Brasil, (ABNT, 2005).

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67** Concreto - **Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** (ABNT, 1998).

\_\_\_\_\_. **NBR 5738** Concreto - **Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** (ABNT, 2015).

\_\_\_\_\_. **NBR 5739** Concreto - **Ensaio de compressão de corpos de prova.** (ABNT, 2007).

\_\_\_\_\_. **NBR 7222** Concreto - **Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.** (ABNT, 2011).

\_\_\_\_\_. **NBR 8522** Concreto - **Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.** (ABNT, 2008).

\_\_\_\_\_. **NBR 6892** Materiais metálicos – **Ensaio de Tração – Método de ensaio à temperatura ambiente.** (ABNT, 2013).

BASTOS, P. S. S. **Dimensionamento de vigas de concreto armado à força cortante.** Notas de Aula. Universidade Estadual Paulista - Campus de Bauru: 79 p.; São Paulo, Brasil, 2017.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites.** 2 Ed. London and New York: Modern Concrete Technology Series. 2007.

CALLISTER, W. D. J. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução.** 5 Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC: 589 p.; 2002.

CECCATO, M. R. **Estudo da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço.** Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo: 98 p.; São Paulo, Brasil; 1998.

EN 1992-1-1 (2004). **Eurocode 2: Design of Concrete Structures—Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings.** CEN, EN 1992-1-1, Brussels, Belgium.

FERREIRA, R. **Dosagem de Concreto.** Eletrobrás Furnas, PUC-Goiás, Brasil, 2012.

FIGUEIREDO, A. D., **Concreto com fibras de aço.** Boletim Técnico, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil, 2000.

FIGUEIREDO, A. D., **Concreto reforçado com fibras**. Tese de Livre Docência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil, 2011.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do Concreto Estrutural**. 1 Ed. São Paulo: Editora Pini Ltda, 2008.

GARCEZ, Estela Oliari. **Análise teórica e experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a carga de impacto**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul: 141 p.; Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil; 2005.

GRANATO, E. J., POLIDORO, G. **Reforço secundário de proteção mecânica sobre impermeabilização utilizando macrofibra sintética**. VIAPOL. 2017.

HANNANT, L. **Fibre-reinforced Cements and Concretes**. 2 Ed. London, 1994.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. R. **Manual de dosagem e controle do concreto**. Brasília: PINI, 1992.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1 Ed. São Paulo: Editora Pini LTDA, 1994.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Editora Pini LTDA, 2008.

MEDEIROS, Arthur. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio: 223 p.; Santa Catarina, Brasil; 2012.

MELO, Carlos Eduardo Luna. **Análise estrutural com o SAP 2000**. Universidade de Brasília: 48 p.; Brasília, Brasil, 2016.

MENON, N. V. **Estudo Experimental de sistemas de reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado utilizando-se Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (PRFC)**. Tese de Doutorado, Universidade de Santa Catarina: 98 p.; São Paulo, Brasil; 2008.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2 Ed. São Paulo: Editora Bookman LTDA. Brasil, 2013.

OLIVEIRA, Valéria Faria. **O papel da Indústria da Construção Civil na organização do espaço e do desenvolvimento regional.** Congresso Internacional de Cooperação Universidade-Indústria. Taubaté, São Paulo, Brasil; 2012.

ROSSI, Mariana Lavagnolli. **Aplicação do software SAP 2000 para análise de esforços em elementos estruturais de concreto armado.** 25º Encontro Anual de Iniciação Científica. Universidade Estadual de Maringá. Maringá, São Paulo, Brasil; 2016.

SCHETTINO, Rômulo Marczuk. **Concreto com adição de fibras de politereftalato de etileno.** Dissertação de Mestrado, Fundação Oswaldo Aranha – Centro Universitário de Volta Redonda: 66 p.; Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil; 2015.

SOUZA, Grazielle Tigre. **Dosagem experimental de concreto massa com adição de sílica ativa aplicado em barragem.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará: 113 p.; Tucuruí, Pará, Brasil; 2017.

TAPAJÓS, Luamim Sales. **Cisalhamento em elementos de concreto armado com estribos desconectados.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará: 98 p.; Belém, Pará, Brasil; 2017.

VASCONCELOS, J. M.C. **Fundamentos da dosagem de concretos.** IBRACON, São Paulo, 1977.