



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

MATEUS GONÇALVES DE OLIVEIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO CISALHAMENTO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO
REFORÇADO COM MICROFIBRAS**

TUCURUÍ-PA

2019

MATEUS GONÇALVES DE OLIVEIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO CISALHAMENTO EM VIGAS DE CONCRETO
ARMADO REFORÇADAS COM MICROFIBRAS**

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: Prof. Dr. Marcelo Rassy Teixeira.

Tucuruí-PA

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)**

- O48a Oliveira, Mateus Gonçalves de.
Análise experimental do cisalhamento em vigas de concreto armado reforçado com microfibras / Mateus Gonçalves de Oliveira, . — 2019.
cxxii, 122 f.
- Orientador(a): Prof. Dr. Marcelo Rassy Texeira
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. Cisalhamento. 2. Concreto com Fibras. 3. Comportamento Mecânico. 4. Elementos Estruturais. 5. Vigas. I. Título.

CDD 624.1834

MATEUS GONÇALVES DE OLIVEIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO CISALHAMENTO EM VIGAS DE CONCRETO
ARMADO REFORÇADAS COM MICROFIBRAS**

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: Prof. Dr. Marcelo Rassy Teixeira.

Aprovada em 31 de janeiro de 2019.

BANCA EXAMINADORA:

Marcelo Rassy Teixeira

Dr. Marcelo Rassy Teixeira / UFPA-PPGINDE - Orientador

Aarão Ferreira Lima Neto

Dr. Aarão Ferreira Lima Neto / UFP -PPGINDE

Carolina U. da Rocha

Dra. Carolina Coelho da Rocha / UFPA-CAMTUC

Dedico este trabalho a minha esposa, por todo apoio durante todos esses anos que vivemos juntos, sua compreensão, carinho e amor verdadeiro; também aos meus filhos que são as fontes de inspiração na realização desta dissertação.

AGRADECIMENTOS

À Deus, em primeiro lugar e acima de todos, pelo eterno amor que demonstrou deixando seu único Filho (Jesus) morrer como resgate pela vida da humanidade da qual faço parte.

A minha mãe Jucelia Gonçalves da Silva, por ter tido escolhas na vida que versavam em me ajudar a se formar em Engenharia Civil, bem como pelo seu amor verdadeiro demonstrado quando ninguém mais podia ou não queria. Com isso, muito obrigado pelas suas orações, conselhos e pelas palavras de amor e carinho.

Ao meu pai Antonio José de Oliveira, pelo apoio financeiro e ter sido quem mais me influenciou a escolher dentre tantas opções que tinham a me formar em engenharia civil.

Ao meu grande amigo Diego Lucena de Sousa, que contribuiu desde minha formação em engenharia civil até no incentivo mútuo para a realização do processo seletivo deste mestrado e bem como durante todos os passos do citado.

Ao Prof. Dr. Marcelo Rassy Teixeira pela orientação nos moldes da Escola Alemã, confiança, paciência constante e colaboração no desenvolvimento deste projeto.

Ao Prof. Dr. Aarão Ferreira Lima Neto pela ajuda na realizada durante a escolha do tema e bem como no auxílio durante a realização da preparação do rompimento das vigas.

Aos meus amigos José Diego Rodrigues Neris e Gabriel Farias Conceição Junior, Lucas Moreira Paz, obrigado a vocês pelo auxílio durante o período que ninguém mais pode me ajudar no rompimento das vigas no LEC (laboratório de Engenharia Civil) e concretagem das mesmas, sem medir esforços vocês fizeram do impossível ser possível.

Aos meus amigos Marília, Rosangela, Cleomar e toda equipe de pesquisa do GEMUT, sendo estes: Arielly Batista de Oliveira, Bárbara Cristina Soares Silva, Bruno Silva Lisboa Alves, Marcelo Carlos Maia dos Santos, Eduardo Luiz Machado Tenório, pela contribuição na realização desta pesquisa sem o apoio de vocês esta pesquisa não se realizaria.

A Francirene Pereira Bonfim técnica do laboratório LEC, engenheira civil pela contribuição no desenvolvimento dos ensaios realizados.

As empresas MM Fibras pela doação das microfibras: de vidro e poliéster e a empresa MC Bauchemie pela doação do aditivo plastificante usado nesta pesquisa.

Não poderia deixar de agradecer às empresas Eletronorte/Eletróbrás, pela doação dos agregados (gráudo e miúdo), sendo materiais de suma importância para a realização desta pesquisa.

A todos, os meus sinceros votos de agradecimento.

RESUMO

O estudo ao cisalhamento para obras de pequeno, médio e grande porte, sendo esta última conhecida como obras de arte, com a utilização de concreto armado ou protendido apresenta particularidades nas definições dos traços, uma vez que, tem a necessidade de minimizar a propagação de fissuras, assim como obter misturas adequadas considerando o diâmetro máximo característico elevado dos agregados graúdos, bem como evitar reações deletérias no concreto. Neste sentido, o principal objetivo desta pesquisa é analisar o comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado, com reforço de microfibras de vidro e poliéster para cada tipo das citadas em frações volumétricas (0,024%, 0,032% e 0,048%), comparando-as com o comportamento de viga de concreto sem fibra, visando sua aplicação em elementos estruturais. Com a finalidade de atender a proposta desta pesquisa, a metodologia baseou-se primeiramente na caracterização dos materiais constituintes do concreto (cimento, agregados miúdos e graúdos e as fibras já mencionadas), dosagem do concreto tendo como premissas o método de Dosagem de Concreto EPUSP-IPT, concretagem das vigas, sendo: uma de referência sem adição de fibras e 6 (seis) com adições de microfibra de vidro e poliéster, sendo 3 (três) para cada uma das referidas, e posterior análise quanto ao cisalhamento por meio dos rompimentos das vigas experimentais, e análise computacional entre a viga modelada no software Response 200 considerando estribos em toda sua seção e a de referência experimental sem estribos em 1/3 de suas seções. Pode-se afirmar, que as microfibras de vidro e de poliéster demonstraram indícios que seus usos podem ser usados como substituição parcial das armaduras transversais; contribuíram para estabilidade com relação ao pós-pico ou pós-fissuração; contribuíram no ganho na resistência ao cisalhamento de 15,1% para a VFV01 (viga com adição de microfibras vidro com o percentual de 0,024%) e de 21,6% da VFP02 (viga com adição de microfibra de poliéster com percentual de 0,032%) ambas em relação a VR (viga de referência). Logo, este estudo demonstrou que o reforço fibroso pode ser usado como eficiência no controle e bem como melhoria do desempenho ao cisalhamento em concreto estrutural.

Palavras chave: Cisalhamento. Concreto com fibras. Comportamento Mecânico. Elementos Estruturais. Vigas.

ABSTRACT

The shear study for small, medium and large works, the latter known as works of art, with the use of reinforced or prestressed concrete presents particularities in the definitions of the traces, since, it has the need to minimize the propagation of fissures, as well as to obtain suitable mixtures considering the high characteristic high diameter of the large aggregates, as well as to avoid deleterious reactions in the concrete. In this sense, the main objective of this research is to analyze the shear behavior of reinforced concrete beams, with reinforcement of glass and polyester microfibers for each type of cited in volumetric fractions (0,024%, 0,032% e 0,048%), comparing them with the behavior of fiber- aiming its application in structural elements. In order to meet the proposal of this research, the methodology was based primarily on the characterization of concrete constituent materials (cement, small and large aggregates and fibers already mentioned), concrete dosage based on the Concrete Dosage method EPUSP -IPT, concrete of the beams, being: one of reference without fiber addition and 6 (six) with additions of microfiber of glass and polyester, being three (three) for each one of them, and later analysis as to shear through the breaking of the experimental beams, and computational analysis between the beam modeled in the Response 200 software considering stirrups throughout its section and the experimental reference without stirrups in 1/3 of its sections. It can be stated that the glass and polyester microfibers have shown that their uses can be used as partial replacement of the transverse reinforcement; contributed to post-peak or post-cracking stability; contributed to the gain in shear strength of 15.1% for VFV01 (beam with addition of glass microfibers with a percentage of 0.024%) and 21.6% of VFP02 (beam with addition of polyester microfiber with a percentage of 0.032%) both in relation to VR (reference beam). Therefore, this study demonstrated that the fibrous reinforcement can be used as control efficiency and as well as shear performance improvement in structural concrete.

Keywords: Shear, Concrete with fibers. Mechanical Behavior. Structural Elements. Beams.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Compósitos reforçados com a) partículas e com b) fibras.	8
Figura 2.2 - Representação esquemática das fases constituintes de um compósito. .	8
Figura 2.3 - Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto.....	9
Figura 2.4 - Esquema de concentração de tensões para um concreto simples a) e com reforço de fibras b)	17
Figura 2.5 - Cisalhamento direto.	18
Figura 2.6 - Ruptura teórica por cisalhamento a) Ruptura ideal por cisalhamento macroscópico b) Ruptura real por compressão diagonal	19
Figura 2.7 - Tensões de compressão atravessando as fissuras.	19
Figura 2.8 - Forças atuantes em uma fissura diagonal numa viga de concreto armado.	20
Figura 2.9 - Tipos de ruptura de vigas de concreto armado sem armadura transversal.....	23
Figura 2.10 - Mecanismos internos resistentes.	24
Figura 2.11 - Engrenamento dos agregados.	24
Figura 2.12 - Encavilhamento da armadura de flexão.	25
Figura 2.13 - Tipos de ruptura.	26
Figura 2.14 - Estados limites de vigas com armadura transversal	27
Figura 2.15 - Modelos recomendados para ancoragem de estribos	31
Figura 2.16 - Modelos recomendados para ancoragem de estribos	33
Figura 2.17 – Distribuição de tensão e deformação admitida para o estado limite último.....	34
Figura 2.18 - Diagrama de Dosagem.	37
Figura 3.1 - Detalhamento da armadura utilizada nas vigas.....	46
Figura 3.2 - Disposição das armaduras longitudinais.....	47
Figura 3.3 - Armadura executada para a viga.....	47
Figura 3.4 - Formas das vigas prontas.....	47
Figura 3.5 - Strain gages do aço colados e protegidos para a posterior execução da concretagem.....	49

Figura 3.6 - Strain gages internos do concreto pronto para a execução da concretagem.....	49
Figura 3.7 - Strain Gages externo do concreto já colado.....	50
Figura 3.8 - a) Viga com o potenciômetro fixado ao Yoke b) O Potenciômetro posicionado na chapa metálica.....	51
Figura 3.9 - Modelo do sistema adotado para ensaio das vigas.....	52
Figura 3.10 - Dados referentes aos elementos de ensaios.....	52
Figura 3.11 - Ensaio de Slump Test.....	54
Figura 3.12 - Concretagem das vigas com adensador mecânico.....	54
Figura 3.13 - Vigas concretadas com os extensômetros.....	55
Figura 3.14 - Corpos de provas moldados.....	55
Figura 3.15 - Ensaio de compressão.....	58
Figura 3.16 - Ensaio de compressão diametral.....	59
Figura 3.17 - Ensaio de módulo de elasticidade.....	59
Figura 3.18 - Ensaio a tração das armaduras.....	61
Figura 3.19 - Tensão X deformação do aço.....	61
Figura 4.1 - Dados de entrada no Response 2000.....	63
Figura 4.2 - Saída de dados no Response 2000.....	64
Figura 4.3 - Diagrama de fissuração no response 2000.....	64
Figura 4.4 – Posicionamento do potenciômetro durante o ensaio do elemento.....	65
Figura 4.5 – Posicionamento do potenciômetro durante o ensaio do elemento.....	66
Figura 4.6 – Posicionamento do potenciômetro durante o ensaio do elemento.....	66
Figura 4.7 – Posicionamento do potenciômetro durante o ensaio do elemento.....	67
Figura 4.8 – Posicionamento do potenciômetro durante o ensaio do elemento.....	68
Figura 4.9 – Posicionamento do potenciômetro durante o ensaio do elemento.....	69
Figura 5.1 - Deslocamento vertical – VR/Response 2000.....	71
Figura 5.2 - Deformação no concreto – VR/Response 2000.....	71
Figura 5.3 - Deformação na armadura de flexão – V/Response 2000.....	72
Figura 5.4 - Deslocamento vertical – VFV01/VR.....	73
Figura 5.5 - Deformação no concreto – VFV01/VR.....	73
Figura 5.6 - Deformação na armadura de flexão – VFV01/VR.....	74

Figura 5.7 - Deslocamento vertical – VFV02/VR.....	75
Figura 5.8 - Deformação no concreto – VFV02/VR.....	75
Figura 5.9 - Deformação na armadura de flexão – VFV02/VR.....	76
Figura 5.10 - Deslocamento vertical – VFV03/VR.....	77
Figura 5.11 - Deformação no concreto – VFV03/VR.....	77
Figura 5.12 - Deformação na armadura de flexão – VFV03/VR.....	78
Figura 5.13 - Deslocamento vertical – VFP01/VR.....	79
Figura 5.14 - Deformação no concreto – VFP01/VR.....	79
Figura 5.15 - Deformação na armadura de flexão – VFP01/VR.....	80
Figura 5.16 - Deslocamento vertical – VFP02/VR.....	81
Figura 5.17 - Deformação no concreto – VFP02/VR.....	81
Figura 5.18 - Deformação na armadura de flexão – VFP02/VR.....	82
Figura 5.19 - Deslocamento vertical – VFP03/VR.....	83
Figura 5.20 - Deformação no concreto – VFP03/VR.....	83
Figura 5.21 - Deformação na armadura de flexão – VFP03/VR.....	84
Figura 5.22 - Deslocamento vertical – VR/VFP01, VFP02 e VFP03.....	85
Figura 5.23 – Deformação vertical – VR/VFV01, VFV02 e VFV03.....	85
Figura 5.24 - Deformação no concreto – VR/VFP01, VFP02 e VFP03.....	87
Figura 5.25 - Deformação no concreto – VR/VFV01, VFV02 e VFV03.....	87
Figura 5.26 - Deformação na armadura de flexão – VR/VFP01, VFP02 e VFP03....	88
Figura 5.27 - Deformação na armadura de flexão – VR/VFV01, VFV02 e VFV03....	88
Figura 5.28 - Aspecto pós-ruptura da VR.....	89
Figura 5.29 - Aspecto pós-ruptura da VFV01.....	90
Figura 5.30 - Aspecto pós-ruptura da VFV02.....	90
Figura 5.31 - Aspecto pós-ruptura da viga de vidro 03.....	91
Figura 5.32 - Aspecto pós-ruptura da viga de poliéster 01.....	91
Figura 5.33 - Aspecto pós-ruptura da viga de poliéster 02.....	92
Figura 5.34 - Aspecto pós-ruptura da viga de poliéster 03.....	92

LISTA DE TABELA

Tabela 2.1 - Valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibra e matrizes	10
Tabela 2.2 - Classificação Geral das Fibras Têxteis.	15
Tabela 3.1 - Características físicas do cimento.....	40
Tabela 3.2 - Características físicas da areia natural.....	40
Tabela 3.3 - Características físicas do agregado graúdo.....	41
Tabela 3.4 - Características das Fibras de Vidro.....	42
Tabela 3.5 - Características das Fibras de Poliéster.....	43
Tabela 3.6 - Dados Técnicos - Muraplast FK 101.....	44
Tabela 3.7 - Principais características das vigas.....	56
Tabela 3.8 - Plano execução de concretagem das vigas, com seus quantitativos de materiais, e bem como as datas de concretagem, slumps e datas dos rompimentos.....	57
Tabela 3.9 - Resultados dos rompimentos dos Corpos de Provas.....	60
Tabela 3.10 - Propriedades mecânicas do aço.....	61
Tabela 5.1 – Cargas de rupturas dos elementos.....	94
Tabela 5.2 – Cargas de rupturas dos elementos-comparação às normas.....	95

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 poliéster
CAFV - concreto armado com adição de fibra de vidro
CAMTUC - Campus Universitário de Tucuruí
CCV - concreto convencional
CFV - concreto com aplicação de fibra de vidro
CFP - concreto com aplicação de fibra de poliéster
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
VFV - viga em concreto armado com aplicação de fibra de vidro
VFP - viga em concreto armado com aplicação de fibra de poliéster
Vref - resistência última ao cisalhamento da viga de referência
VR - viga de referência
NBR - Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

- a - vão de cisalhamento da peça
- A - relação agregado miúdo/cimento, em massa (kg/kg)
- AS - área de aço das armaduras longitudinais
- AW - 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 m³ de concreto
- D - altura útil da viga
- Dk - 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_y - 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)
- MPa - megapascal
- S - espaçamento entre as camadas da armadura transversal
- α - ângulo de inclinação entre a armadura transversal e a longitudinal
- $\alpha(\%)$ - teor de argamassa seca
- θ - ângulo de inclinação da biela no momento do rompimento
- η - constante assumida com o valor 1 para seções constantes e 0,9 para os demais casos

α_{cc} - constante assumida como 0,85 para $f_c \leq 50$ MPa

ρ_l - taxa de armadura longitudinal

ρ_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

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo Geral	2
1.2.2 Específicos	3
1.3 Justificativa.....	3
1.4 Estruturação da Dissertação.....	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Considerações iniciais	6
2.2 Os Materiais Compósitos Reforçados com Fibras	7
2.3 O compósito e a interação fibra-matriz	12
2.3.1 A Matriz Polimérica	12
2.3.1.1 As Matrizes Termofixas e Termoplásticas	13
2.3.2 Fibras	14
2.3 Teoria para reforço ao cisalhamento	17
2.3.1 Considerações iniciais	17
2.3.2 Resistência ao cisalhamento	18
2.3.2.1 Mecanismos básicos de resistência ao cisalhamento.....	20
2.3.3 Tipos de ruptura.....	22
2.3.3.1 Ruptura sem estribo	22
2.3.3.2 Ruptura com Estribo	25
2.4 Resistência ao cisalhamento unidirecional	27
2.4.1 Considerações iniciais	27
2.4.2 Estados limites para vigas de concreto armado sob armadura de cisalhamento.....	27
2.4.3 Normas.....	28
2.4.3.1 ACI 318 (2014).....	28
2.4.3.2 ABNT NBR 6118 (2014).....	29
2.4.3.3 EUROCODE 2 (2004).....	31
2.4.4 Resistência à flexão em vigas	34
2.5 Dosagem de concreto.....	35

2.5.1 Considerações Iniciais	35
2.5.2 Método de Dosagem de Concreto EPUSP-IPT	36
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	39
3.1 Concepção das Vigas	39
3.2 Materiais Utilizados.....	39
3.2.1 Cimento.....	39
3.2.2 Agregados	40
3.2.2.1 Miúdo	40
3.2.2.2 Graúdo	40
3.2.3 Fibras de Vidro e Poliéster	41
3.2.3.1 Fibra de Vidro.....	41
3.2.3.2 Fibra de Poliéster	42
3.2.4 Água	43
3.2.5 Aditivos	43
3.2.6 Dosagem do concreto convencional	44
3.3 Determinação do Modelo Físico.....	45
3.4 Instrumentação das Vigas	48
3.4.1 Considerações iniciais	48
3.4.2 Deformações na armadura de flexão	48
3.4.3 Deformações no concreto	49
3.4.4 Deslocamento vertical	50
3.4.5 Modelo do Sistema de Ensaio das Vigas	51
3.5 Ensaio no estado fresco do concreto	53
3.5.1 Considerações iniciais	53
3.6 Ensaio no estado endurecido do concreto e aço.....	58
3.6.1 Propriedades mecânicas do concreto.....	58
3.6.2 Propriedades mecânicas do aço	60
4. ANÁLISE COMPUTACIONAL.....	62
4.1 Análise não linear utilizando o software Response 2000	62
4.2 Análise não linear utilizando o software SAP 2000	65
5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	70
5.1 Respostas à flexão das vigas.....	70

5.1.1 Análise comparativa entre VR e Response 2000.....	70
5.1.2 Análise comparativa entre VFV01 e VR.....	72
5.1.3 Análise comparativa entre VFV02 e VR.....	74
5.1.4 Análise comparativa entre VFV03 e VR.....	76
5.1.5 Análise comparativa entre VFP01 e VR.....	78
5.1.6. Análise comparativa entre VFP02 e VR.....	80
5.1.7 Análise comparativa entre VFP03 e VR.....	82
5.2 Análises comparativas entre as vigas	84
5.2.1 Deslocamento vertical	84
5.2.2 Deformações do concreto	85
5.2.3 Deformações da armadura de flexão	87
5.3 Mapas de fissuração e modo de ruptura	88
5.4 Cargas de rupturas dos elementos	93
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	96
6.1 Considerações Gerais	96
6.2 Considerações sobre os resultados dos ensaios	96
6.2.1. Ensaio experimentais dos corpos de prova	96
6.2.2. Ensaio experimentais das vigas.....	97
6.3 Sugestões para Trabalhos Futuros	99
7. REFERÊNCIAS	100

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Atualmente a construção civil, vem buscando desenvolver alternativas que versam na área da recuperação, reforço e melhoria de características inerentes ao concreto visando sua aplicação em elementos estruturais, quer sejam eles em argamassas, concreto armado e concreto protendido. Esta busca ocorre na maioria das vezes, pela inadequação no uso das construções, por deterioração devido ao uso, por erros de projeto ou construção, e por alterações na finalidade de uso (PRADO, 2016).

Como medida para a contribuição das características do concreto, surge as fibras de diferentes origens, pois as mesmas têm demonstrando potencialidade de grande contribuição para o concreto, passando assim, a ser alvos de grande volume de pesquisa e desenvolvimento. Dessa forma, apesar das fibras começarem a ser utilizadas em diferentes materiais construtivos, é importante salientar que sua aplicação começou a ser desenvolvida na década de 60, especificamente em 1960 e, a partir da década de 90, passou a ser empregada em escala comercial no Brasil (CUNHA et al., 2017).

Não obstante, é necessária a definição do que consiste o concreto com adição de fibras, assim, Segundo Metha e Monteiro (1994), o concreto contendo um aglomerante hidráulico, isto é, cimento hidráulico, agregados miúdos ou graúdos e miúdos, água e fibras conhecidas como discretas descontínuas é denominado concreto reforçado com fibras. Esse também pode conter pozolanas e outros aditivos geralmente usados em CCV (concreto convencional). Segundos esses autores, verifica-se que são usadas com maiores intensidades às fibras de aço, contudo nos últimos anos começam a ser utilizados as demais: fibras de plástico, vidro e materiais naturais.

Como objeto de estudo mediante adição de fibras, a resistência ao cisalhamento para obras pequeno, médio e grande porte, sendo esta última conhecida como obras de arte, com a utilização de concreto armado ou protendido apresenta particularidades nas definições dos traços, uma vez que, tem a necessidade de minimizar a propagação de fissuras, assim como obter misturas adequadas considerando o diâmetro máximo característico elevado dos agregados graúdos, bem como evitar reações deletérias no concreto.

Logo, a utilização de fibras com o objetivo de reforçar matrizes com comportamento frágeis já era praticada desde a antiguidade, no qual se usava capim ou palha como reforços de tijolos de barro secos ao sol. Isto nos remete ao período no qual o povo de Israel vivia como escravos no Egito, sendo que os mesmos eram obrigados a fazerem tijolos com palha, porém esta era fornecida a eles, sendo importante ressaltar que em um determinado momento quando por convicções religiosas eles se rebelaram contra a forma de Faraó Ramissés II, este deu a seguinte ordem: Não torneis a dar mais palha ao povo para fazer tijolos, como faziam antes. Eles mesmos que tratem de ajuntar palha para si (BÍBLIA, 1999).

O estudo que versa sobre a melhoria de características do concreto convencional nos últimos anos tornou-se imprescindível na engenharia civil. De acordo com Metha e Monteiro (2008), os custos de reparos, reforços e substituições em estruturas, devido a falhas nos materiais que levam a deterioração, tornou-se uma parte substancial do orçamento total das construções. Como exemplo, os mesmos citam que por volta dos 40% do total dos recursos da construção civil em países industrialmente desenvolvidos é destinado para recuperação, reforço e manutenção das estruturas já existentes. Sobre a recuperação, reforço e manutenção das estruturas no Brasil ainda não está sendo colocada em prática, contudo, é necessário que o mesmo comece a se preocupar, pois já se percebe que a infraestrutura brasileira começa a apresentar problemas que podem ocasionar rompimento de seus elementos estruturais, a levar ao colapso e interferir na integridade das estruturas como um todo.

1.1 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal do trabalho é analisar experimentalmente o comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado, com adição de fibras de vidro e poliéster para cada tipo das citadas em frações volumétricas, comparando-as com o comportamento de viga de concreto sem fibra, visando sua aplicação em elementos estruturais.

1.2.2 Específicos

- Verificar o ganho ou não de resistência ao cisalhamento das peças por meio de as aplicações de teores variáveis de fibras em frações volumétricas, sendo estas de 0,024%, 0,036% e 0,042% por m³ de concreto como alternativa aplicação em vigas com limitações de seções, vãos exagerados e cortantes elevados;
- Verificar o comportamento das vigas com adição de fibras após a ruptura dos mesmos, isto é, analisando o pós-pico ou pós-fissuração;
- Verificar a utilização de fibras em concreto convencional como alternativa de substituição parcial das armaduras de cisalhamento;
- Realizar a modelagem computacional por meio de software para validar o estudo realizado.

1.3 Justificativa

Embora o concreto seja o material de construção mais utilizado no mundo, na atual conjuntura, considerar somente o estudo de concretos convencionais (CCV) nos moldes tradicionais torna-se para algumas situações fator de limitação e encarecendo ainda mais as obras passando a ser inviável. Pois o mercado da construção civil estar mais exigente e concorrente, com isso, as técnicas construtivas demandam concretos que apresentem características distintas e especiais, como: os concretos de alto desempenho, de alta resistência, altos teores de adições pozolânicas, aparentes, coloridos, brancos, autoadensáveis, com fibras, e sustentáveis, entre outros (TUTIKIAN e MOLIN, 2008).

Assim, a utilização das fibras como adições tem a função de melhorar certas características do concreto, logo, elas passaram a ser o objeto de muito estudo e desenvolvimento. As fibras são empregadas para minimizar o aparecimento das fissuras originadas pela retração plástica do concreto e para estruturar o concreto, a formar uma armadura que elimina o uso de telas metálicas e fibras de aço em pisos industriais, concreto projetado etc.

O uso das fibras citadas acima, normalmente são em pisos industriais projetados, pavimentos rígidos, pré-moldados, áreas de piscina, argamassas, tanques e reservatórios, entre

outros. Logo, estas fibras propiciam a diminuição das fissuras, podendo ser usadas como substituição total das fibras de aço e das telas em aplicações do concreto.

Arelado a isso, a avaliação da resistência ao cisalhamento de concreto reforçado com fibras, devido à falta de um procedimento de teste padrão tem sido uma das causas para o número limitado de estudos relacionado a isso. Assim, apesar de alguns ensaios estruturais terem sido realizados e demonstrados benefícios evidentes no comportamento ao cisalhamento de vigas utilizando-se de reforço fibroso, os códigos de projeto ainda não o reconhece como uma alternativa, como por exemplo, para a redução ou a substituição de estribos, apesar de estes serem usados para fornecer propriedades que podem ser obtidas através do reforço fibroso (VELASCO, 2008).

De tal modo, é relevante que exista um número maior de pesquisas, bem como o desenvolvimento de provisões de códigos e um método de teste padrão para gerar um banco de dados para o desenvolvimento de com propriedades ao cisalhamento de concretos reforçados com fibras e explicitem estas propriedades (VELASCO, 2008).

Para minimizar o efeito de ruptura por cisalhamento em concreto, no qual apresenta um comportamento frágil, já se sabe que estudos têm sido feitos para mostrar a melhoria do desempenho ao cisalhamento em concretos estruturais e mostrar a eficiência do reforço fibroso no controle. E sendo assim, como visto nas propriedades descritas anteriormente, a resistência ao cisalhamento depende da geometria e tipo da fibra, bem como fração volumétrica e orientação utilizada. (VELASCO, 2008).

Todavia, para alcançar uma aplicabilidade em larga escala, desde grandes obras de arte, como pontes e hidrelétrica dentre outras, até as obras corriqueiras de elementos estruturais típicos de pequenos a médio porte, é de suma relevância, um profundo conhecimento suas propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas deste material.

A recuperação, reforço e melhoria das características estruturais abrangem desde as edificações que “sofrem” as falhas no planejamento, projeto, execução ou abalos por sinistros de qualquer natureza ou ainda por emprego de componentes, materiais de baixa qualidade e alteração de sua finalidade.

Portanto, no atual desenvolvimento tecnológico e circunstancial admite-se a produção de compósitos de matriz cimentícia com apropriada trabalhabilidade de forma que permitir a incorporação de altas frações volumétricas de fibras, produzindo-se com isso, compósitos com elevadas propriedades mecânicas.

1.4 Estruturação da Dissertação

Esta dissertação foi elaborada em capítulos, separados em:

- **CAPÍTULO 1:** Introdução, com as considerações iniciais para ambientar o leitor sobre os principais temas contemplados pelo estudo; objetivos para destacar o foco das análises; justificativa definindo a motivação deste estudo;
- **CAPÍTULO 2:** Revisão bibliográfica, discorrendo sobre as normas, métodos e técnicas utilizadas no Brasil e no mundo sobre o uso de reforço das microfibras: de poliéster e vidro e bem como os métodos de cálculos utilizados para o cisalhamento.
- **CAPÍTULO 3:** Materiais e métodos de vigas de concreto armado (ensaio principal) reforçados com microfibras: de poliéster e vidro, discriminando as técnicas e normas utilizadas para a elaboração dos ensaios, e bem como a caracterização dos materiais usados na dosagem das mesmas;
- **CAPÍTULO 4:** Apresentação da análise computacional comparando a viga de referência experimental armada em 2/3 da mesma, com a modelagem de uma viga toda armada com os mesmos parâmetros que a referida (viga de referência) utilizando o software Response 2000, bem como análise da secção da viga de referência pelo software Sap 2000.
- **CAPÍTULO 5:** Apresentação e análise de resultados de vigas (ensaio principal) de concreto armado reforçados com microfibras: de poliéster e vidro, para os ensaios experimentais destrutivos.
- **CAPÍTULO 6:** Considerações finais das principais análises observadas nos ensaios principais; sugestões para trabalhos futuros, destacando opções para melhorias nos trabalhos futuros com sistemas de reforço ao cisalhamento.
- **CAPÍTULO 7:** Referências bibliográficas, apresentando os trabalhos e as normas utilizadas em auxílio a elaboração da presente dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi desenvolvida com a finalidade de compreender todas as etapas necessárias para o estudo de reforço ao cisalhamento em vigas com microfibras: poliéster e vidro e a modelagem da viga de referência.

Para uma melhor compreensão dos estudos relacionados sobre esta pesquisa a revisão bibliográfica foi dividida em duas (2) linhas de estudo essenciais utilizadas nesta dissertação, sendo elas: reforço em vigas com microfibras: poliéster e vidro; modelagem da viga de referência.

2.1 Considerações iniciais

Na atual conjuntura, têm crescido nos últimos anos no mundo, especificamente no ramo da engenharia civil a aprendizagem de novas técnicas de melhoria dos materiais constituintes do concreto, com destaque para o uso de materiais compósitos de PRF (Polímero Reforçado com Fibra), pois este foi introduzido com enorme sucesso na indústria aeroespacial, naval e automobilística. Sendo que, na década de 30 do século passado, a casca de um barco em fibra de vidro foi o primeiro produto de PRF, sendo este manufaturado. Já na indústria de defesa, o referido iniciou-se em 1940. Por sua vez, pesquisas sobre a tentativa da utilização de PRF para reforçar concreto foram realizadas no ano de 1950 e em 1960 se expandiu na área de artigos esportivos, a comercialização de PRF. Com isso, especificamente ao concreto, a primeira comercialização de PRF foi realizada em 1970 (MENON, 2008).

Para Figueiredo (2000), o Concreto Reforçado com Fibras (CRF), vem sendo aplicado desde a década de 60, ou seja, a partir de 1960. E desde esse período, o CRF vem tendo sua utilização para as mais diversas aplicações, sendo encontradas na construção civil como painéis de vedação vertical, telhas, em estruturas de concreto como pavimentos, túneis.

Com essas primeiras pesquisas e comercialização da PRF, a engenharia nos últimos anos tem evoluído no quesito estudo das ciências dos materiais, isso para se obter novos materiais específicos para a mesma, pois na última década tem surgido uma procura considerável por materiais muito resistentes, mais deformáveis, duráveis, e capazes de absorver e dissipar energia, sem ocorrência de ruptura frágil e sem patamar de escoamento (MENON, 2008).

Esta procura é necessária, pois em relação ao concreto, este apresenta uma série de características que lhe garantem o reconhecido título como o material estrutural mais utilizado no mundo. No entanto, o referido possui várias limitações, como por exemplo: o comportamento predominantemente frágil e a baixa capacidade de deformação exibida antes da ruptura durante o período no qual o material é tracionado. A sua resistência à tração é muito reduzida em relação à sua resistência à compressão, isso está no fato da susceptibilidade do material às fissuras e microfissuras que podem se desenvolver internamente. Estas fissuras podem ser induzidas por vários fatores como, até, pela própria retração da pasta restringida pelo agregado graúdo. Com isso, a utilização das fibras para o reforço do concreto, pode contribuir na minimização dessas limitações (FIGUEIREDO, 2011).

2.2 Os Materiais Compósitos Reforçados com Fibras

A definição para compósito consiste em que este é um sistema de materiais. Pois o termo "compósito" pode se aplicar a combinação de dois ou mais materiais diferentes que possuem uma interface identificável. Assim, com frequência há o costume de realizar um tratamento de superfície em um ou mais dos materiais constituintes se conseguir uma adesão entre os mesmos (ACI, 1996).

Ainda, os concretos com adição de fibras podem ter suas definições como compósitos, isto é, materiais constituídos de, ao menos, duas fases distintas principais. Reforça que o concreto sem fibras em essência já é um compósito, pois suas fases principais são: a pasta, os poros e os agregados. Apesar disso, consideram-se como fases principais do concreto com fibras a própria matriz de concreto e as fibras, que podem ser produzidas a partir de diferentes materiais, como aço, vidro, polipropileno, náilon, etc (FIGUEIREDO, 2011).

Outra definição, sobre o referido, é que este é um material estrutural formado pela união entre dois ou mais materiais de naturezas diferentes. Logo, seus constituintes no nível macroscópico, são combinados, sendo que um deles é denominado de fase de reforço e o outro é responsável pela impregnação do reforço, conhecido como matriz (Figura 2.1). Com isso, o material formado pelos dois citados anteriormente, possui comportamento superior àquele de seus componentes tomados separadamente. Portanto, o material usado no reforço

em geral é um arranjo de fibras, contínuas ou não, de um material resistente que são impregnadas em uma matriz com resistência mecânica inferior às fibras (MENON, 2008).

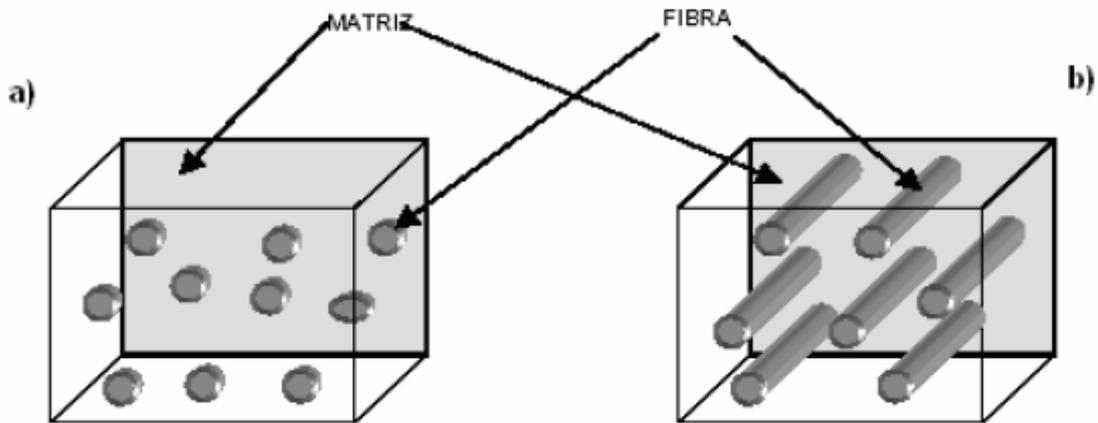


Figura 2.1 - Compósitos reforçados com a) partículas e com b) fibras.
Fonte: CNR-DT-200 (2004, apud MENON, 2008).

Logo, os compósitos são fundamentalmente constituídos por duas fases, segundo a Figura 2.2 ilustrada a seguir. Sendo que, na primeira fase, as fibras, apresentam elevado módulo de elasticidade, elevada resistência e apresenta a forma de filamentos de pequeno diâmetro. A segunda fase denomina-se matriz, é macia e tem características sinérgicas. Esta envolve completamente a primeira fase, isto é, as fibras, apresentando capacidade relativa de ductilidade, a permitir assim, boa transferência de tensões entre as fibras interlaminares e no plano (conceito de sinergia) (MENON, 2008).

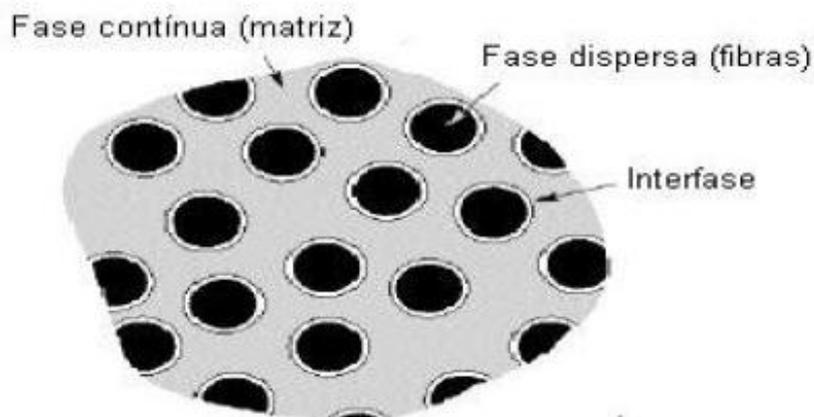


Figura 2.2 - Representação esquemática das fases constituintes de um compósito.
Fonte: CNR-DT-200 (2004, apud MENON, 2008).

Para Figueiredo (2011), o módulo de elasticidade e a resistência mecânica das fibras contribuem para o material constituinte da fibra, com isso, essas duas propriedades intrínsecas são as que mais influenciam a capacidade de reforço para o concreto. Infere-se que as fibras que apresentam módulo de elasticidade inferior ao do concreto endurecido, são conhecidas de fibras de baixo módulo, como as poliméricas. Por sua vez, as fibras que têm módulo de elasticidade superior ao do concreto, como é o caso das fibras de carbono e aço, são chamadas de fibras de alto módulo. Como forma de exemplificação, na Figura 2.3, foi desenvolvido um esquema que representa isso. Nele existe uma matriz considerada hipotética reforçada com três tipos de fibras, estas são: uma de baixo módulo de elasticidade e duas de alto módulo, sendo que para estas últimas, uma de baixa e outra de alta resistência mecânica. Importante salientar que todas as fases deste compósito hipotético tiveram que considerar como tendo um comportamento elástico perfeito

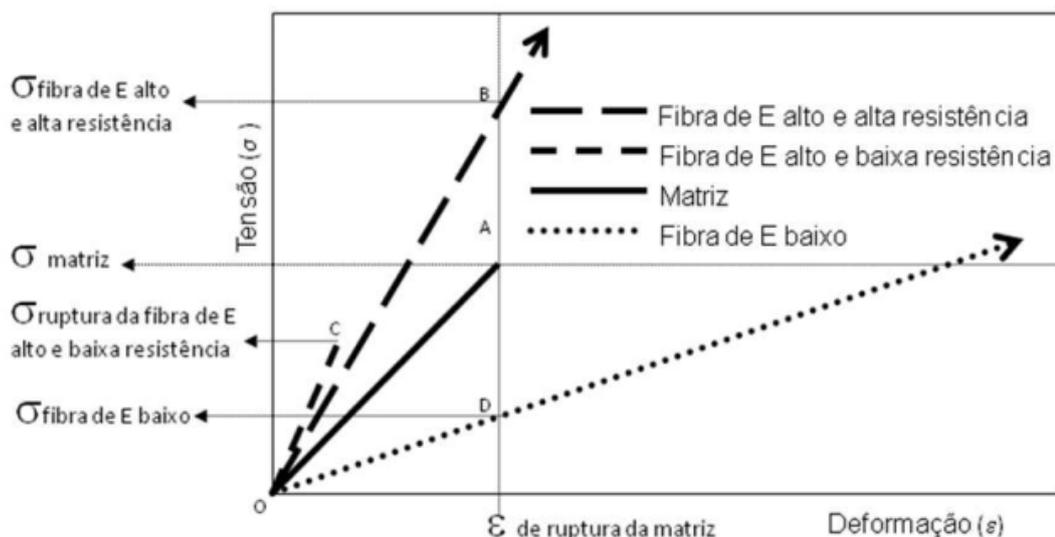


Figura 2.3 - Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto
Fonte: Figueiredo, 2011

Tem-se a curva de tensão por deformação da matriz, sendo que esta é representada pela linha O-A, já as linhas O-B e O-C representam assim, o trabalho elástico das fibras de alto módulo com alta e baixa resistência. Já a linha O-D demonstra o comportamento da fibra de baixo módulo. Assim, se considerar que existe entre as fibras e a matriz uma aderência perfeita, o compósito, quando tracionado, irá ter uma deformação com diferentes níveis de tensão para cada uma das fases citadas (FIGUEIREDO, 2011).

Verifica-se que no momento em que a matriz chegar aproximadamente à sua tensão de ruptura, conforme vista no ponto A, o nível de tensão atingido pela fibra de baixo módulo segundo visto no ponto D, é bem mais baixo que o da matriz. Isto é, quando a matriz se rompe, passa a surgir uma fissura na referida, com isso, a fibra de baixo módulo exibe uma tensão mais baixa que a matriz nesse mesmo nível de deformação – σ fibra de E baixo -. Desta forma, para que a fibra de baixo módulo apresente capacidade de reforço, precisa haver na matriz um elevado teor. Além do mais, a tensão por fibra não deve exceder a tensão de ruptura, a qual guarda certa proporcionalidade para o próprio módulo de elasticidade, conforme Tabela 2.1 (FIGUEIREDO, 2011).

Tabela 2.1 - Valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibra e matrizes

Material	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	190-210	0,5-2,0	0,5-3,5
Vidro	9-5	2,60	70-80	2-4	2-3,5
Amianto	0,02-0,4	2,6	160-200	3-3,5	2-3
Polipropileno	20-200	0,9	1-7,7	0,5-0,75	8,0
Kevlar	10	1,45	65-133	3,6	2,1-4,0
Carbono	9	1,9	230	2,6	1,0
Náilon	---	1,1	4,0	0,9	13-15
Celulose	---	1,2	10	0,3-0,5	---
Acrílico	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
Polietileno	---	0,95	0,3	$0,7 \times 10^{-3}$	10
Fibra de madeira	---	1,5	71	0,9	---
Sisal	10-50	1-50	---	0,8	3,0
Matriz de Cimento (para comparação)	---	2,50	10-45	3,7	0,02

Fonte: Bentur, Mindess (1990, apud FIGUEIREDO, 2011) – adaptada pelo autor.

Também para as fibras de módulo baixo, os níveis elevados de tensão na fibra irão produzir sem dúvidas um elevado nível de deformação da mesma, o que proporcionará uma grande abertura de fissura. Este tipo de fibra é considerada normalmente como de baixa capacidade de reforço pós-fissuração. Assim, a fração volumétrica destas, deve ser em maior proporção que das fibras de elevado módulo, e resistência também maior para ter a garantia do mesmo nível de reforço do compósito. Isto pode inviabilizar a utilização destas devido aos

elevados custos e bem como à dificuldade relacionada a moldagem das mesmas na mistura de concreto. Já em relação à fibra de alto módulo de elasticidade e alta resistência apresentará um elevado nível de tensão - σ fibra de E alto e alta resistência – quando o compósito atingir sua deformação crítica (ϵ de ruptura da matriz). Este tipo de fibra contribui para um elevado nível de reforço da matriz, com consumos menores que o das fibras de baixo módulo, quando sua resistência não seja superada (FIGUEIREDO, 2011).

Mesmo que uma fibra tenha elevado módulo de elasticidade, contudo demonstre uma baixa resistência à tração ou mesmo ao cisalhamento, o reforço pós-fissuração será reduzida. Isto é, a combinação de elevado módulo e baixa resistência correspondem a um material frágil de baixa capacidade de deformação elástica. Na Figura 2.1 tem-se a linha O-C, no qual se observa o momento em que acontece a ruptura da matriz (ponto A), assim, também se terá ultrapassado o limite último de deformação da fibra (FIGUEIREDO, 2011).

Só são consideradas fibras com capacidade de reforço das matrizes cimentícias, aquelas que apresentam maior capacidade de deformação na ruptura e maior resistência à tração que a matriz de concreto, de acordo com o ilustrado na Tabela 2.1 (FIGUEIREDO, 2011). Esta análise é preponderante, porque o desempenho dos concretos reforçados com fibras está diretamente relacionado a capacidade de transferência de tensão pelas fissuras.

Portanto, as fibras de baixo módulo de elasticidade e baixa resistência somente serão eficientes quando os módulos de elasticidade e resistência do concreto também forem baixos, ou seja, no estado fresco e no início de seu processo de endurecimento (FIGUEIREDO, 2011).

De acordo com Mckenna et al., (1994, *apud* SILVA, 2001), a orientação, a composição química das fibras, as propriedades mecânicas das fibras, as propriedades mecânicas da matriz e a adesão entre as fibras e a matriz são os fatores principais que afetam a decisivamente a desempenho físico de um compósito de PRF (polímeros reforçados com fibras). Contudo, levando em consideração o campo, os fatores que influenciam no desempenho destes, são basicamente:

- i. a duração da carga: em geral, a curva tensão versus deformação é aproximadamente linear, porém, caso seja submetidos a carregamentos de longa duração, a curva passa a ser ligeiramente não-linear. Assim como para o concreto, as deformações devido à fluência

podem ser preponderantes. Tendo com isso, os efeitos dependentes da tensão e da deformação aplicada, bem como do tipo de matriz;

ii. a resistência a fadiga: comumente, o material exibe, boa resistência a fadiga. Esta resistência é cerca de 10 milhões de ciclos, com isso, cita-se que as fibras de carbono mantêm 80 % da sua resistência total, as fibras de aramida 40 % e fibras de vidro 25 %;

iii. os efeitos do meio-ambiente: estes efeitos podem degradar as matrizes de polímeros, o que pode gerar ruptura do PRF e uma perda de resistência. Portanto, as principais causas da deterioração abarcam: degradação química e biodegradável, degradação por raios X ou gama e fotodegradação.

iv. a temperatura: como as fibras e a matriz têm diferentes coeficientes de expansão térmica, caso ocorra flutuações, estas podem causar um enfraquecimento do material;

v. o clima: para as fibras de vidro, este é o responsável por uma perda da ordem de 12 % a 20 % da resistência a flexão num período de 15 anos por meio do aparecimento da corrosão mecânica climática, como fissuras ou perfurações;

vi. o fogo: a matriz de polímero é muito sensível ao fogo, e, a depender da composição química que a mesma possui, a presença de uma grande quantidade de fumaça densa, preta e tóxica pode ser produzida quando o material começa a perder suas propriedades. Porém, quando se usa certos materiais de revestimento, estes podem ser utilizados para melhorar o desempenho a exposição a elevadas temperaturas.

2.3 O compósito e a interação fibra-matriz

2.3.1 A Matriz Polimérica

Uma molécula de cadeia longa que possui uma ou mais unidades de átomos que se repetem e ao mesmo tempo, são unidas entre si por fortes ligações covalentes, são os polímeros, e esta é sua definição. De tal modo, uma matriz polimérica ou um material é o conjunto de um grande número de moléculas de polímeros de estrutura quimicamente similar. Com isso, se as moléculas estiverem em uma ordem aleatória, na fase sólida, o material polimérico é dito amorfo. Já para o este ser considerado semicristalino, as moléculas devem estar em arranjos ordenados (ACI, 1996).

Logo, a formação por processos quimicamente de associação molecular, é conhecido como polímeros. A esta associação, na qual é controlada por catalisadores, sendo estes os responsáveis pelo início do processo, por inibidores, que busca impedir a polimerização prematura durante o armazenamento do produto e também pelos aceleradores, que aumentam a velocidade do processo de associação (MENON, 2008).

Ao passo que, o conjunto das fibras se constitui como o principal elemento resistente a carregamentos a flexão para um material compósito reforçado com fibras, contudo, é de suma relevância que se compreenda e considere a importância da matriz polimérica. (MENON, 2008).

Também, a transferência de tensões entre as fibras e a proteção das mesmas de danos mecânicos e provenientes do meio ambiente, são os papéis da matriz polimérica. Sendo assim, a obtenção de uma boa qualidade da resina da matriz proporciona um suporte lateral contra o empenamento das fibras sob carga a compressão (ACI, 1996).

No quesito matriz polimérica, vários são aspectos que o diferencia dos metais, afetando assim, os seus comportamentos em aplicações estruturais. Sendo que suas propriedades mecânicas, por exemplo, dependem fortemente da taxa de carregamento e da temperatura ambiente (MENON, 2008).

Desta forma, a matriz polimérica demonstra ser altamente viscoelástica. Cita que quando ocorre à aplicação de uma carga externa, ela demonstra uma deformação elástica instantânea e em seguida uma lenta deformação viscosa (MENON, 2008).

Ainda quando se aquece um material polimérico, ele transforma-se em um sólido com a consistência de uma borracha, capaz de grandes deformações elásticas sob o efeito de cargas externas. Já caso a temperatura seja aumentada ainda mais, os semicristalinos e os termoplásticos amorfos alcançam um estado líquido altamente viscoso (ACI, 1996).

2.3.1.1 As Matrizes Termofixas e Termoplásticas

O período em que ocorrem as ligações químicas entre as moléculas durante a polimerização, é denominado de a cura de uma resina, esse é o momento no qual ela passa do estado líquido para o sólido. Conhece-se este fenômeno, em inglês, de *cross-linking* (MENON, 2008).

Assim, um material polimérico reforçado com fibras, apresenta uma matriz polimérica do tipo termofixa ou termoplástica. As matrizes poliméricas termofixa (*thermoset polymers*) são líquidos de baixo peso molecular com viscosidades muito baixas. Estas possuem boa resistência química e estabilidade térmica, porém apresenta baixa resistência a impactos (ACI, 1996). Apresentam-se ainda pouca relaxação de tensões e fluência em comparação com os polímeros termoplásticos, além de demonstrarem baixa deformação até a ruptura. Assim, em geral, após o início da polimerização possuem um curto período para aplicação. Entretanto, a principal característica, deste material é o fato de não poderem ser moldados ou reformados novamente após um aumento na sua temperatura, isto é, se constituem em um processo irreversível as ligações químicas que ocorrem durante a cura, reforça-se a isso o fato de serem chamados de polímeros termofixos (ACI, versão preliminar).

Por sua vez, as matrizes termoplásticas (*thermoplastic polymers*), têm alta resistência a fraturas e impactos, mas, o progresso do uso comercial em aplicações estruturais é pequeno. A maior problemática para seu uso é o fato delas serem muito mais viscosas que as termofixas, sendo assim, difíceis de serem combinadas com fibras contínuas em um método de produção viável (ACI, 1996). Também os polímeros termoplásticos com a elevação de sua temperatura, demonstram com isso, ter a capacidade de serem amolecidos e tomarem novas formas e ainda ser reendurecidos novamente com o decréscimo da mesma (ACI, versão preliminar). Como forma de se reforçar ao que dito anteriormente, cita-se exemplo como: polipropileno, o nylon e o poliestireno.

Em contra partida, os polímeros termofixos são quase sempre processados em estado líquido. Assim, pode-se obter um bom arranjo das fibras sem se recorrer a altas temperaturas ou pressões (MENON, 2008). Portanto, na atual conjuntura, as matrizes poliméricas termofixas (poliésteres, epóxis e vinil ésteres) têm sido o tipo de material mais usado em aplicações estruturais, reforça a isso, aquelas que são utilizadas em combinação como concreto, como é o caso deste respectivo estudo.

2.3.2 Fibras

As fibras são responsáveis pela rigidez e resistência do compósito, no qual o mesmo pode variar em função do grau e concentração, tamanho, tipo e disposição das mesmas na matriz. Sendo que, a direção principal das fibras leva ao valor máximo da rigidez e resistência

e rigidez do compósito, assim caso se afastem da direção principal, seus valores vão diminuindo até o mínimo que corresponde à direção perpendicular àquela. (ARAÚJO, 2002).

Comercialmente se encontram vários tipos de fibra, e esta apresenta grande variedade de propriedades. Depois disso, é necessário se atentar na escolha as fibras de pequeno diâmetro e longas (contínuas) são as mais adequadas para o reforço de estruturas de concreto, pelo o aproveitamento de suas propriedades bem como pela ótima capacidade de transferência de carga. (ARAÚJO, 2002).

Logo, pode-se afirmar que, as fibras classificam-se em fibras naturais e fibras manufaturadas, sendo estas últimas podem ser divididas em artificiais ou sintéticas. Já as primeiras, podem ser classificadas em vegetais (compostas essencialmente por celulose, lignina e hemicelulose), minerais (retiradas de certos tipos de rochas) e animais (originárias da secreção animal ou dos pelos que são compostas por proteínas). A tabela 2.2 a seguir demonstrará essas classificações (CALDAS, 2014).

Tabela 2.2 - Classificação Geral das Fibras Têxteis.

Naturais	Vegetal	Semente (Algodão, Kapok, Coco, ect). Caule (Linho, Junta, Rami, ect). Folha (Abacaxi, Tenax, Sisal, Curauá, ect).
	Mineral	Amianto.
	Animal	Seda, Lã, Pelo.
Manufaturadas	Artificiais	Alginato, borracha, viscosa, acetato, tênsel, ect.
	Sintéticas	PP, PE, aramida, poliéster, náilon, acrílico, ect.
	Outras	Carbono, Vidro, metálica, cerâmica.

Fonte: Ladchumananandasivam (2002, *apud* CALDAS, 2014) - adaptada pelo autor.

Com o exposto, pode-se inferir que devido à reduzida resistência à tração do concreto, o mesmo passa a apresentar grande dificuldade de interrupção da propagação das fissuras quando o referido está submetido a este tipo de esforço. Isso é ocasionado devido à direção de propagação das fissuras serem transversalmente à direção principal de tensão, de tal modo, como a área que está disponível para o suporte de carga é reduzida, proporciona aumento das tensões presentes nas extremidades das fissuras. Ao passo que, esse comprometimento da resistência, é verificado bem maior quando o esforço está submetido a tração do que em compressão. A ruptura na tração é ocasionada por algumas fissuras que se unem e não por aquelas fissuras que numerosas, como ocorre quando o concreto é comprimido (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Figueiredo (2011), foi verificado que o gasto energético associado à ruptura por tração no concreto como é reduzido, logo, a superfície total de ruptura também será menor, com isso, tem-se a caracterização do comportamento predominante frágil. O mecanismo de aumento da energia associada à ruptura do material em análise e bem como à restrição à propagação de fissuras, é obtido pelo trabalho de ponte de transferência de tensão que a fibra pode realizar por meio das fissuras no concreto.

Para o concreto simples, demonstrado na Figura 2.4a, uma fissura irá representar uma barreira à propagação de tensões, representadas simplificada por linhas de tensão. Haverá um desvio das linhas de tensão que irão se concentrar nas bordas da fissura e, caso essa tensão supere a resistência da matriz, ocorrerá a ruptura frágil do material. Caso o esforço seja cíclico, pode-se interpretar a ruptura por fadiga da mesma forma, ou seja, para cada ciclo há uma pequena propagação das microfissuras e, conseqüentemente, um aumento progressivo na concentração de tensões em sua extremidade até que ocorra a ruptura completa do material (FIGUEIREDO, 2011).

Já ao se adicionar fibras de módulo e resistência adequados ao concreto num teor correspondente, esse material passa a não ter um comportamento predominante frágil. Este fato é constatado ao perceber que as fibras servem como ponte de transferência de tensões pelas fissuras já mencionadas acima, diminuindo a concentração das referidas tensões nas extremidades da fissura, conforme Figura 2.4b. Desta forma, observa-se uma grande diminuição da velocidade de propagação das fissuras no material que recebe as mesmas, assim, os mesmos passam a apresentar um comportamento pseudo-dúctil ou não frágil. Isto é, o concreto reforçado com fibras apresenta certa capacidade resistente após a sua fissuração, com isto, começa a descaracterizar o comportamento predominante frágil típico do material quando está sendo tracionado. Quando se utiliza as fibras, sem dúvida será assegurada menor fissuração do concreto (FIGUEIREDO, 2011).

As vantagens do reforço oferecido pelas fibras é o fato destas se distribuírem aleatoriamente no material, a reforçar por toda a peça, e não numa determinada posição, como é observada com as armaduras convencionais. Caso a peça estrutural apresentem esforços bem localizados, como por exemplo: em viga biapoiada, no qual as tensões de tração se concentram em sua parte inferior, o uso das fibras torna-se inviável, porque não conseguem substituir as barras de aço de maneira econômica. Isto ocasionado devido às barras de aço poderem ser posicionadas de forma mais precisa para aperfeiçoar o reforço da estrutura.

Portanto, a utilização do concreto reforçado com fibras acaba por ser preponderante para estruturas contínuas, como exemplos: revestimentos de túneis e pavimentos no qual existe a possibilidade de redistribuição dos esforços que não tem sua localização caracterizada numa área específica da estrutura (FIGUEIREDO, 2011).

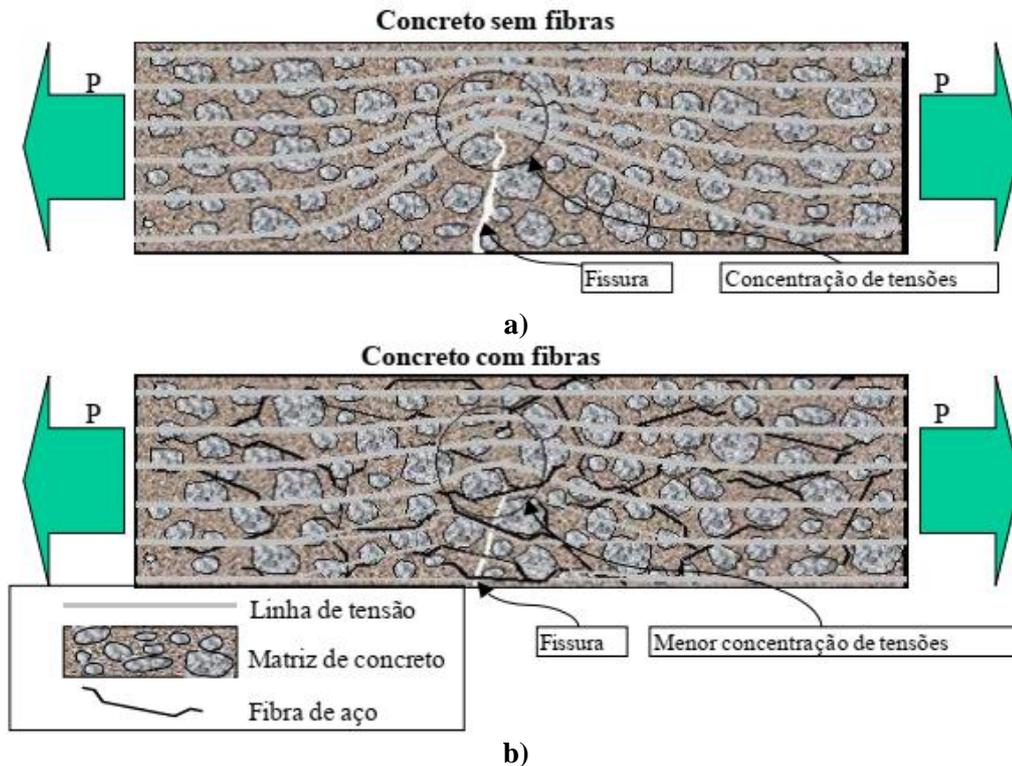


Figura 2.4 - Esquema de concentração de tensões para um concreto simples a) e com reforço de fibras b)

Fonte: Figueiredo, 2011.

2.3 Teoria para reforço ao cisalhamento

2.3.1 Considerações iniciais

Mesmo no atual contexto que a ciência se encontra, o entendimento sobre o comportamento do cisalhamento no concreto armado tem demonstrado ser um grande desafio aos pesquisadores. Cita-se a isso que nas últimas décadas os pesquisadores têm tido o foco no estudo do problema da estimativa da capacidade resistente ao cisalhamento de peças de concreto armado. Embora o interesse nisto seja relevante, o colapso por cisalhamento ainda não foi completamente desvendado, isto devido a razão do complexo comportamento global

das estruturas de concreto e bem como a dificuldade de se estabelecer com enorme precisão a parcela que cada um dos diferentes mecanismos resistentes contribui para a força cortante.

2.3.2 Resistência ao cisalhamento

O estudo da resistência ao cisalhamento é desde os primórdios do concreto armado. Assim, ensaios, como na Figura 2.4, já eram usados como busca da definição do que seria de fato esta resistência ao cisalhamento do concreto sob a ação de tensões de cisalhamento τ_v . Mas, em tal tipo de ensaio não ocorre uma ruptura de deslizamento como já se verifica com os metais (MENON, 2008).

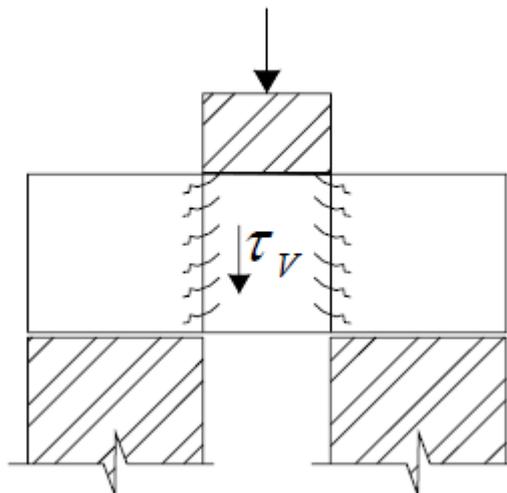
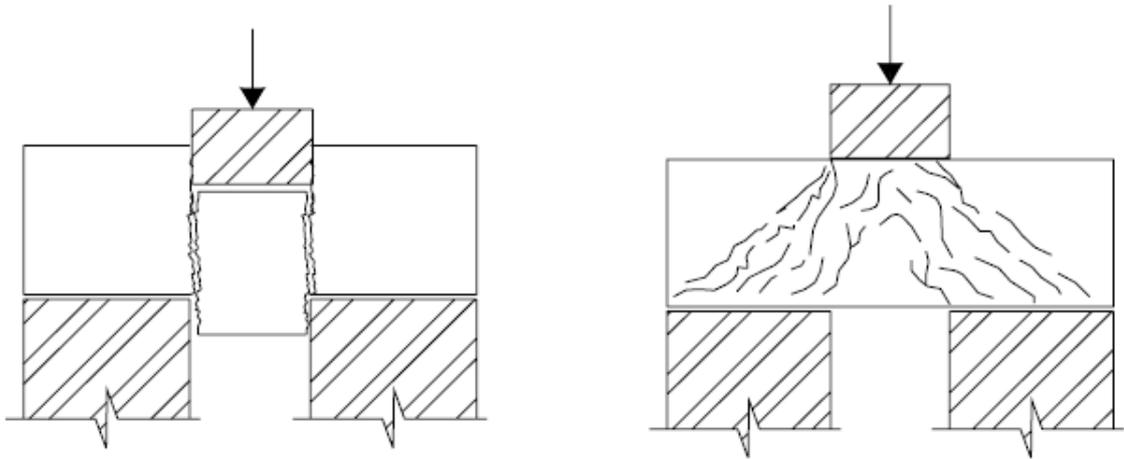


Figura 2.5 - Cisalhamento direto.
Fonte: Fusco (1995, *apud* MENON, 2008).

Devido ter o conhecimento que o concreto apresenta baixa resistência, ele passa a está sujeito à fissuração diagonal nos planos onde as tensões de cisalhamento atuantes são iguais tensões principais de tração (MENON, 2008).

A ruptura macroscópica por deslizamento só pode ocorrer se as faixas de concreto ao longo dos planos de deslizamento macroscópico forem pulverizadas como visto na Figura 2.5a. Mas na realidade ocorre é a ruptura por compressão diagonal conforme Figura 2.6b (MENON, 2008).

A fissuração ocasionada pelas tensões somente diminui a resistência à compressão diagonal do concreto fissurado (MENON, 2008).



a) Ruptura ideal por cisalhamento macroscópico b) Ruptura real por compressão diagonal

Figura 2.6 - Ruptura teórica por cisalhamento

Fonte: Fusco (1995, *apud* MENON, 2008).

Nos ensaios de cisalhamento realizados com vigas fletidas, a fissuração diagonal observada não indica a direção do campo diagonal de compressão. Mas, experimentalmente, o que se observa, é que as tensões de compressão atravessam diagonalmente as fissuras, por meio do engrenamento dos agregados, segundo Figura 2.6 (MENON, 2008).

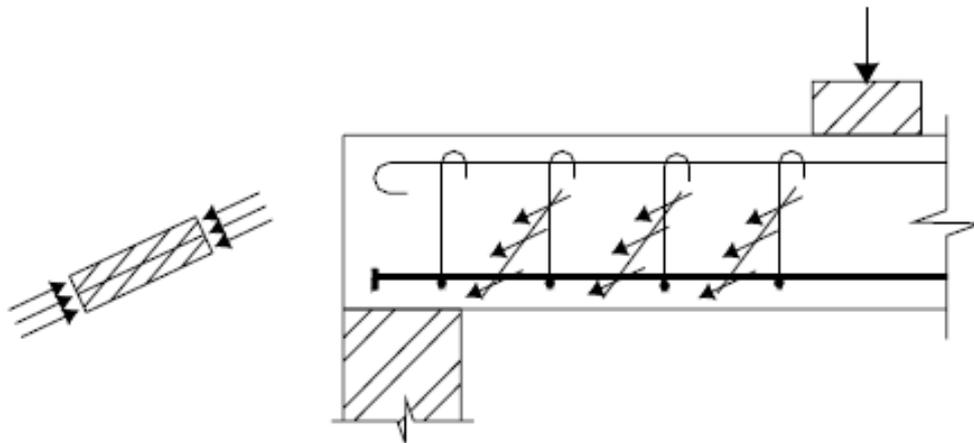


Figura 2.7 - Tensões de compressão atravessando as fissuras.

Fonte: Fusco (1995, *apud* MENON, 2008).

Por essa razão, as bielas diagonais comprimidas têm resistência à compressão diminuída em razão das fissuras diagonais que as atravessam (FUSCO, 1995).

2.3.2.1 Mecanismos básicos de resistência ao cisalhamento

As forças atuantes em uma fissura diagonal numa viga de concreto armado, conforme a Figura 2.8. De forma geral, considera-se a capacidade resistente nominal V_n como sendo igual à soma das contribuições dos diversos componentes resistentes individuais, estas incluem: a parcela V_{sw} resistida pela armadura de cisalhamento, a parcela V_d devida ao efeito de pino da armadura longitudinal, a parcela V_{cz} resistida pelo concreto não fissurado acima da fissura diagonal, e a componente vertical V_{ay} devida ao intertravamento dos agregados entre as faces da fissura (MENON, 2008). A Equação 2.1 sintetiza a capacidade resistente nominal V_n :

$$V_n = V_{sw} + V_d + V_{cz} + V_{ay} \quad (2.1)$$

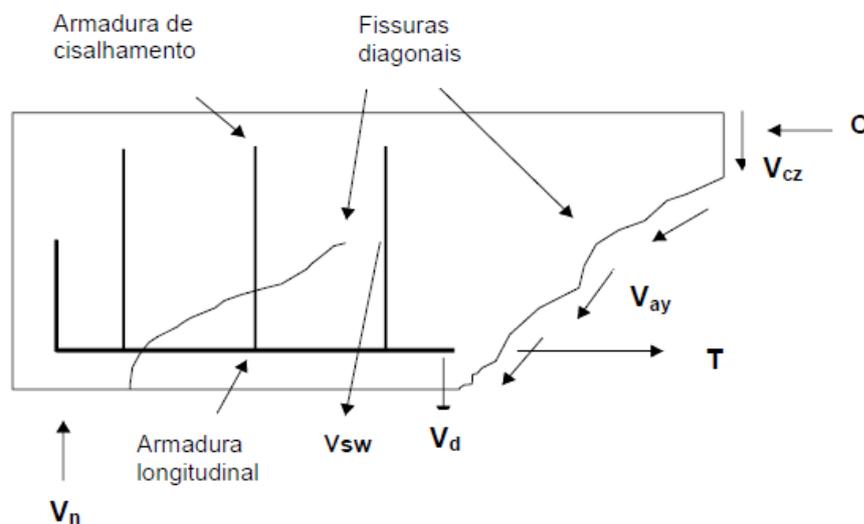


Figura 2.8 - Forças atuantes em uma fissura diagonal numa viga de concreto armado.
Fonte: Borges et al., (2002, apud MENON, 2008).

Conforme Menon (2008), especificamente, no caso de projeto, é comum efetuar o agrupamento dos três últimos termos citado no lado direito da Equação 2.1 em um único termo V_c , com isso, se atribui à resistência ao cisalhamento devida ao concreto. Levando em consideração, os mecanismos resistentes citados anteriormente, podem-se fazer as seguintes observações:

a) A resistência do concreto está intimamente ligada ao mecanismo resistente que atua na zona comprimida após a fissuração diagonal. Sendo também que o confinamento que ocorre pela armadura de cisalhamento contribui para elevar a resistência do concreto, aumentando, assim a parcela V_{cz} ;

b) Após a ocorrência da fissuração diagonal, o mecanismo resistente devido ao intertravamento dos agregados entre as faces da fissura é ativado, ao passo, que torna-o significativo à medida que deslizamento ocorre entre as faces da fissura. Ainda, esse mecanismo relaciona-se com a microestrutura do concreto (e em consequência com a sua resistência mecânica) e com a energia de fraturamento do concreto (responsável pelo grau de ductilidade do material). Ressalta-se que à medida na qual a resistência do concreto aumenta, a superfície de fraturamento se torna menos áspera (comportamento mais frágil), diminuindo sua ductilidade e, por conseguinte a parcela V_{ay} em termos relativos. Esta é aumentada devido à presença de armadura de cisalhamento que faz com que ocorra uma limitação da abertura da fissura, a elevar assim, a dissipação de energia decorrente do intertravamento dos agregados;

c) O mecanismo resistente devido ao efeito de pino da armadura longitudinal é dependente da aderência concreto-armadura e da rigidez à flexão das barras da armadura. Sendo esse mecanismo é mais expressivo em lajes do que em vigas. Logo, a presença de armadura de cisalhamento influencia decisivamente de maneira positiva no efeito de pino da armadura longitudinal.

Pode-se afirmar que a contribuição direta da armadura de cisalhamento V_{sw} é a menos complicada de se determinar. Porém, a sua contribuição indireta, que afeta de forma benéfica às outras três parcelas resistentes, embora seja difícil de ser estimada com precisão. Essa contribuição indireta é ignorada na maioria das normas de projeto, pois as mesmas consideram que a parcela V_c atende igualmente para vigas sem ou com armadura de cisalhamento (MENON, 2008).

Sendo que, nas vigas onde não há armadura de cisalhamento, a primeira fissura inclinada é formada ou pouco após isso quando ocorre o colapso por tração diagonal. Vários parâmetros influenciam a carga correspondente à fissuração diagonal, dos quais se destacam os seguintes: resistência à compressão do concreto, altura útil da viga e taxa de armadura longitudinal. A influência gerada por todos esses parâmetros, não é considerada explicitamente pelas normas em geral, pois as cargas de fissuração diagonal que são previstas,

na maioria vezes resultam maiores do que as experimentais, mostrando-se assim, como uma situação de insegurança (MENON, 2008).

Contudo, a presença de armadura de cisalhamento, sob a forma de um efeito compensatório, propicia indiretamente um aumento da parcela resistente devida ao concreto. No entanto, a necessidade de uma adequada margem de segurança na determinação de V_c para vigas sem armadura de cisalhamento, não elimina esse efeito.

2.3.3 Tipos de ruptura

2.3.3.1 Ruptura sem estribo

As vigas de concreto armado apresentam comportamento de forma mais complexa que as de material homogêneo e isotrópico. Para a sistematização deste estudo, é necessário fazer-se a análise dos tipos de ruptura de uma viga biapoiada com uma carga concentrada, armada à flexão e praticamente desprovida de armadura transversal na área de análise da ruptura, conforme Figura 2.9 (MENON, 2008).

Estas vigas demonstram três tipos de ruptura, segundo a mesma figura citada acima. Sendo assim, estas rupturas são:

- a) Por flexão: esta é uma ruptura dúctil, no qual as fissuras originam-se aproximadamente ortogonais à armadura de flexão, em uma região na qual a tensão de tração alcança seu máximo, a superar a resistência à tração do concreto;
- b) Por tração diagonal: logo após a formação das fissuras da flexão, surgem as fissuras inclinadas, provenientes de uma tração diagonal, ocorrem nas seções intermediárias entre os apoios e o centro do vão, porque a tensão principal de tração supera a resistência à tração do concreto. Quando ocorre geralmente em vigas protendidas, esse tipo de fissura leva ao rompimento brusco sendo proveniente da ação concomitante da flexão e força cortante;
- c) Por compressão no topo e tração diagonal: depois do surgimento das primeiras fissuras de flexão, surgem às fissuras diagonais (tração diagonal) que se manifestam em direção ao topo da viga, causando a diminuição da zona comprimida de concreto, com isso, esse processo leva a ruptura dessa região pelo esmagamento do concreto, isto é, a tensão principal de compressão supera a resistência à compressão do concreto;

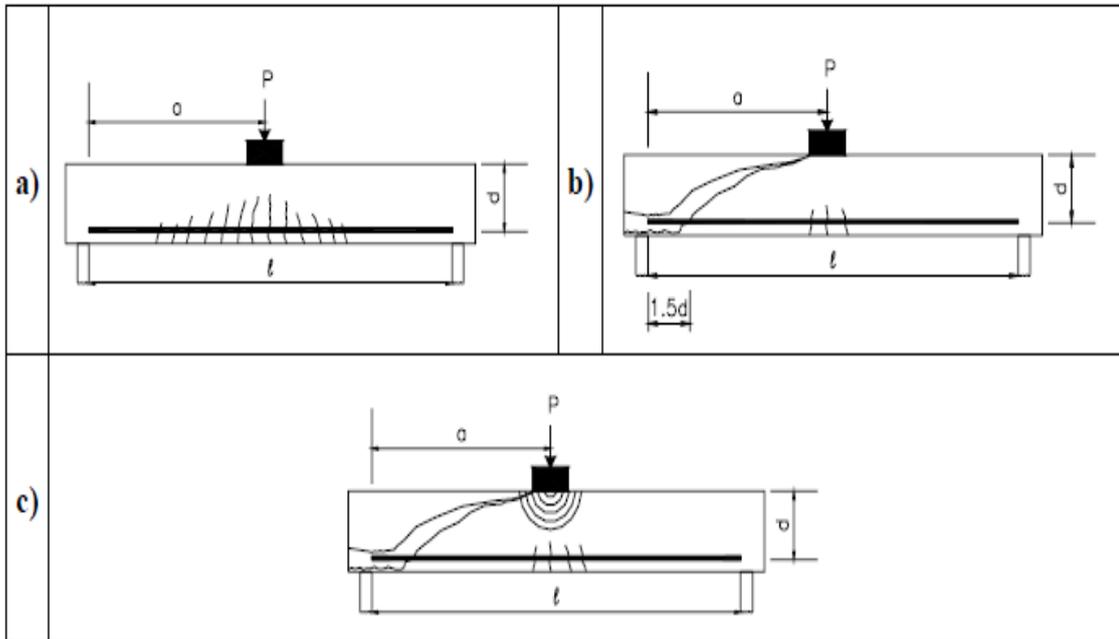


Figura 2.9 - Tipos de ruptura de vigas de concreto armado sem armadura transversal.
Fonte: Sanches (1999, apud MENON, 2008).

Desse modo, nos casos (b) e (c) a fissura diagonal pode manifestar-se em direção à armadura longitudinal, a resultar no deslocamento dessa armadura, caso haja uma ancoragem deficiente, ocasionando a ruptura por ancoragem da armadura de flexão.

Ainda de acordo com Menon (2008), estão abaixo listados, sendo apresentados os mecanismos internos que atuam na resistência das vigas à força cortante:

- a) a zona comprimida de concreto situada acima da linha neutra (LN);
- b) o engrenamento dos agregados;
- c) o encavilhamento de armadura longitudinal de flexão.

As Figuras 2.10, 2.11 e 2.12 esboçam um trecho elementar de viga, sob a ação dos três primeiros mecanismos citados. Sendo que o *aggregate Interlock*, isto é, engrenamento dos agregados ocorre ao longo das fissuras e corresponde a uma apreciável parcela de resistência à força cortante (MENON, 2008).

Cita-se ainda de maneira menos significativa o último, encavilhamento da armadura longitudinal de flexão (efeito de pino ou *dowel effect*), quando se compara com o segundo, engrenamento dos agregados (MENON, 2008).

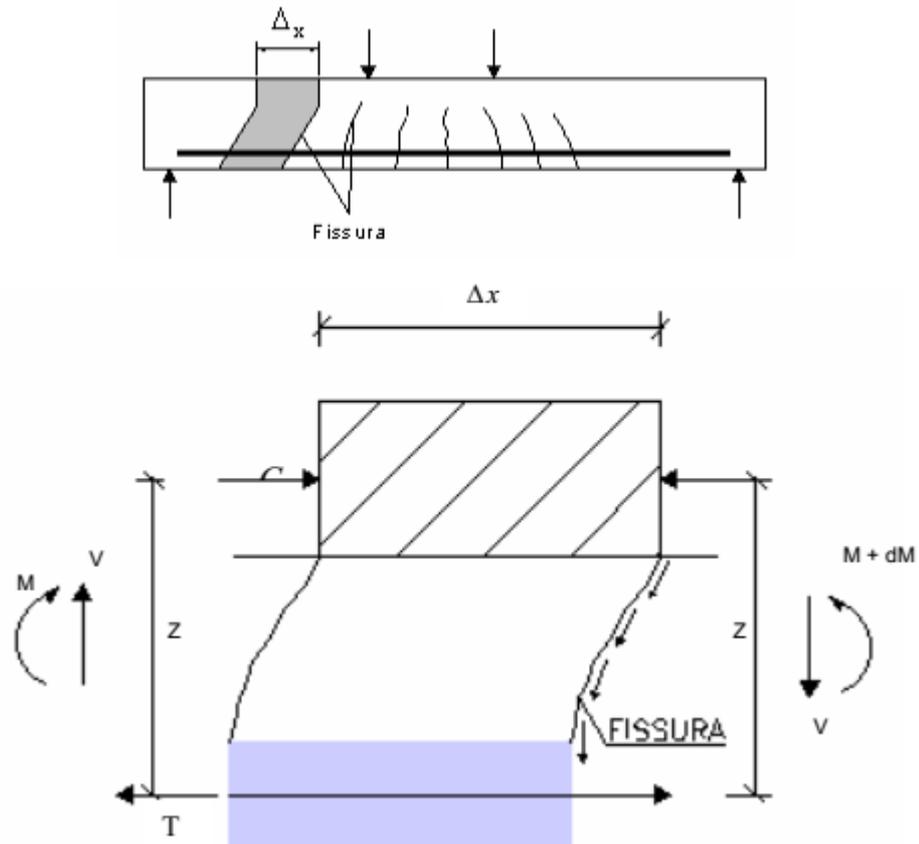


Figura 2.10 - Mecanismos internos resistentes.
 Fonte: Sánches (1999, *apud* MENON, 2008).

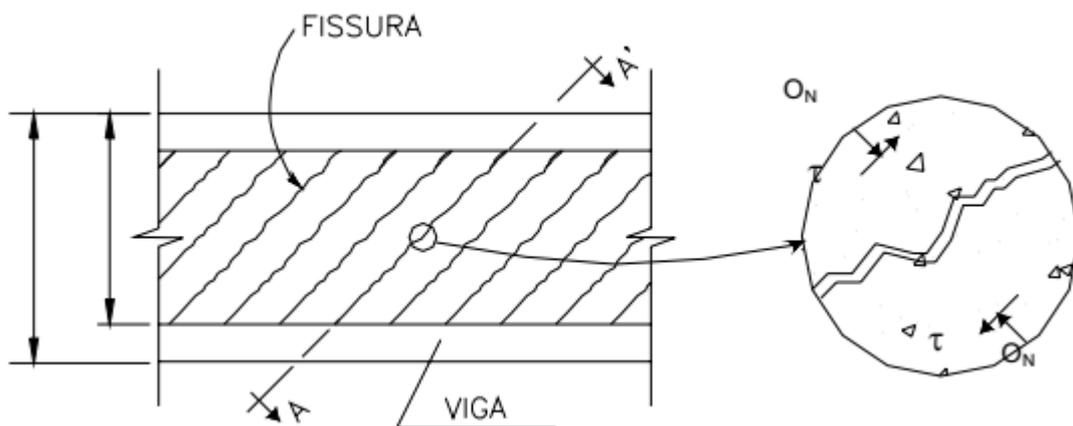


Figura 2.11 - Engrenamento dos agregados.
 Fonte: Sánches (1999, *apud* MENON, 2008).

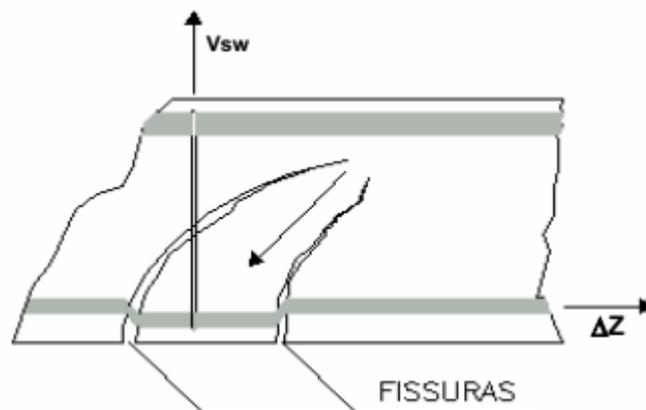


Figura 2.12 - Encavilhamento da armadura de flexão.
Fonte: Sánches (1999, apud MENON, 2008).

2.3.3.2 Ruptura com Estribo

Segundo Fusco (1984, *apud* MENON, 2008), os tipos de ruptura das vigas de concreto armado com armadura transversal submetida a forças cortantes são classificadas dos seguintes modos:

- a) Ruptura força cortante-compressão Figura 2.13a: peculiar de peças superarmadas transversalmente, nas quais ocorre esmagamento do concreto das bielas antes que a armadura transversal possa entrar em escoamento. Nesse ponto específico, a ruptura não há aviso prévio, pois esta é frágil. Já se a tensão tangencial de referência não extrapolar a tensão última, a segurança é garantida;
- b) Ruptura força cortante-tração Figura 2.13b: nesse tipo de ruptura ocorre em peças subarmadas transversalmente, isto é, aquelas cuja armadura transversal atinge o escoamento. Ocorrem grandes deformações na armadura transversal e fissuração excessiva. Já a segurança desse tipo de ruptura é garantida pelo uso de armadura transversal em quantidade suficientemente adequada;
- c) Ruptura força cortante-flexão Figura 2.13c: ocorre no momento em que as fissuras diagonais de cisalhamento cortam uma parte do banzo comprimido da peça. Com a espessura do banzo diminuída pode ocorrer o esmagamento do concreto. Em geral a seção de ruptura está localizada nas proximidades de elevadas forças concentradas. Por sua vez, a garantia da segurança é por meio de dimensionamento e detalhamento adequados da viga à flexão;

- d) Ruptura por flexão da armadura longitudinal Figura 2.13d: acontece por motivos de deficiência da armadura longitudinal de tração, os quais impedem o funcionamento como treliça. A garantia da segurança contra esse tipo de ruptura é a atenção aos critérios de arranjo das armaduras, principalmente, no que se refere à ancoragem e o espaçamento dos estribos;

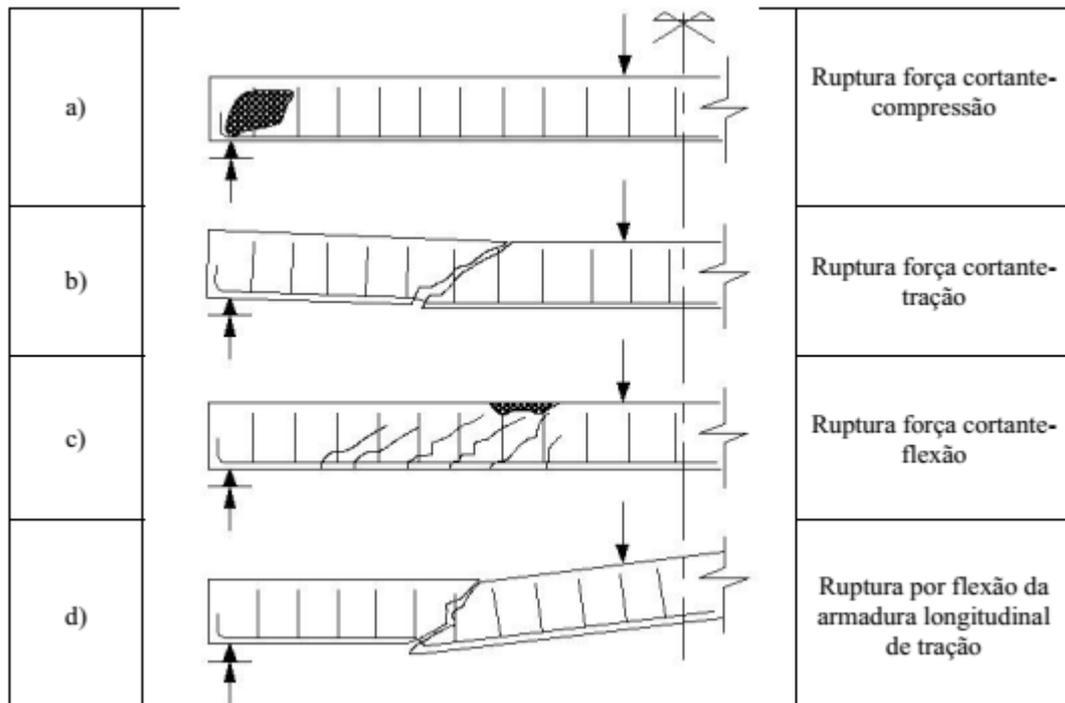


Figura 2.13 - Tipos de ruptura.
Fonte: Fusco (1984, apud MENON, 2008).

A ruptura por fendilhamento do concreto pode ocorrer em decorrência de uma inadequada ancoragem da armadura longitudinal. Conforme indicado na NBR 6118 (2014), deve-se fazer uma armadura de costura, no caso de não haver compressão do concreto transversalmente à armadura no trecho de ancoragem suficiente para impedir a fissuração do concreto.

De acordo com a NBR 6118 (2014) e em virtude de os possíveis tipos de rupturas decorrentes das forças cortantes acarretarem, provavelmente, o colapso não avisado da estrutura, é preciso se obter a garantia no dimensionamento que as solicitações tangenciais não sejam condicionantes da ruína. Sendo assim, como princípio fundamental de segurança, deve-se adotar que os elementos estruturais sejam projetados de tal forma que, na casualidade de sobrevir à ruína, esta decorra dos efeitos de solicitações normais ou de flexão.

2.4 Resistência ao cisalhamento unidirecional

2.4.1 Considerações iniciais

Segundo a NBR 6118 (2014), para garantir a resistência ao cisalhamento teórica das vigas, considere-se o preceito, segundo a Equação 2.2:

$$V_R = V_C + V_S \quad (2.2)$$

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.

2.4.2 Estados limites para vigas de concreto armado sob armadura de cisalhamento

Para que se combater aos esforços cisalhantes é necessário realizar verificações para garantir a resistência referida, isso para atender aos estados limites em uma viga armada, como na Figura 2.14. Esta apresenta um modelo de bielas e tirantes, nos quais as linhas tracejadas concebem as bielas comprimidas e as linhas contínuas representam os tirantes tracionados.

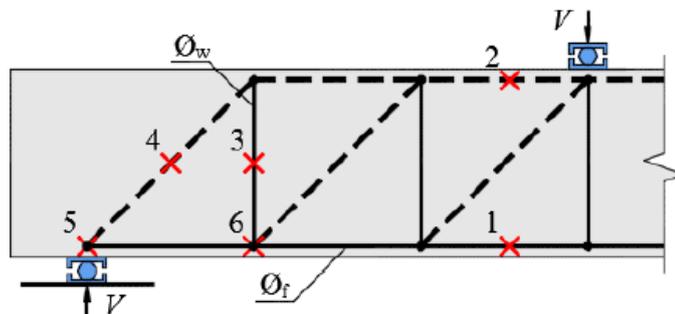


Figura 2.14 - Estados limites de vigas com armadura transversal
Fonte: Tapajós, 2017.

- Escoamento da armadura a flexão;
- Esmagamento do concreto na zona comprimida;

- c) Escoamento da armadura de cisalhamento;
- d) Esmagamento da biela inclinada;
- e) Falha de ancoragem de armadura a flexão;
- f) Falha de ancoragem de armadura de cisalhamento.

Em relação aos esforços de flexão é preciso realizar as verificações a atender o escoamento da armadura de flexão e bem como o esmagamento da zona comprimida, demonstrado nos pontos a e b da Figura 2.14. Também é necessária a verificação quanto ao cisalhamento, além da verificação quanto à flexão. Quando a armadura transversal de uma viga escoar, esta pode atingir a resistência última, como visto no ponto c. Destarte, quando a resistência ao cisalhamento é menor que à resistência a flexão, essa ocorrência é verificada em vigas com baixa taxa de armadura transversal, e/ou também em vigas com altas taxas de armadura longitudinal. Portanto, esse tipo de falha induz à ruptura da estrutura, se caracterizando numa ruptura por cisalhamento proveniente de tração diagonal. Logo, em vigas esbeltas sem armadura de cisalhamento pode ser ocasionado por uma ruptura por tração diagonal (TAPAJÓS, 2017).

Em relação ao ponto d demonstrado na Figura 2.14, uma viga pode falhar por cisalhamento após ocorrer o esmagamento da biela inclinada, podendo levar a citada à ruína. Normalmente esse tipo de ruptura pode acontecer em vigas muito curtas, em que a resistência à flexão é bem superior à resistência ao cisalhamento, sendo que devido à geometria, o incremento de tensões por tração diagonal é dificultado. É importante salientar, que é possível que esse fenômeno ocorra em vigas esbeltas, quando a viga possui altas taxas de armadura transversal e longitudinal (TAPAJÓS, 2017).

2.4.3 Normas

2.4.3.1 ACI 318 (2014)

Segundo os critérios adotados de cálculos pela norma que norteia as construções nos Estados Unidos da América, esta adota a resistência do concreto como variável que influencia na resistência ao cisalhamento conforme Equação 2.3.

$$V_{R,c} = 0,17 \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d \quad (2.3)$$

Onde:

f_c – é a resistência à compressão do concreto;

b_w – é a largura da viga;

d – é a altura útil da viga.

Sendo que esta norma baliza um valor para a resistência ao cisalhamento de acordo com a Equação 2.6, com o objetivo de garantir uma segurança em relação à ação máxima de cargas que os elementos poderão estar submetidos.

$$V_{R,CS} = V_{R,C} + V_{R,S} \quad (2.4)$$

$$V_{R,S} = \left(\frac{d}{s} \right) \cdot A_{S,W} \cdot f_{y,W} \cdot (\text{sen } \alpha + \text{cos } \alpha) \quad (2.5)$$

$$V_{R,Max} = 0,66 \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d \quad (2.6)$$

Onde:

S – é o espaçamento entre as camadas da armadura transversal;

$A_{S,W}$ – é a área de aço de uma seção transversal;

$f_{y,W}$ – é a tensão de escoamento da armadura transversal, limitada em 420 Mpa;

α – ângulo de inclinação entre a armadura transversal e a longitudinal.

2.4.3.2 ABNT NBR 6118 (2014)

Para a norma brasileira, foi adotado o uso de dois modelos de cálculos para se ter uma estimativa da resistência ao cisalhamento para elementos em concreto armado. De acordo com o Modelo I, o cálculo considera a resistência ao cisalhamento em vigas armadas de forma transversal ($V_{R,CSI}$), sendo dada pela somatória da parcela de contribuição da resistência do concreto ($V_{R,CI}$) em conjunto com a parcela de contribuição de resistência do aço ($V_{R,SI}$), segundo Equação 2.7. Este modelo de cálculo considera também a inclinação da biela fica estimada a 45° no momento do rompimento.

A contribuição do concreto é dada pela Equação 2.8, conforme definido por este modelo de cálculo, desta forma, a estimar a resistência ao cisalhamento de uma viga sem a

armadura transversal, considerando unicamente a resistência que o concreto possui em relação aos esforços de tração. Já para a parcela de contribuição da armadura de combate ao cisalhamento, é calculada a partir da Equação 2.9, considerando que a resistência última ($V_{R,max I}$) de cisalhamento é definida pela Equação 2.10, a estimar assim, a ruptura na biela comprimida.

$$V_{R,CSI} = V_{R,CI} + V_{R,SI} \quad (2.7)$$

$$V_{R,CI} = 0,6 \cdot f_{ctk,inf} \cdot b_w \cdot d \quad (2.8)$$

$$V_{R,SI} = \left(\frac{A_{ws}}{s} \right) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{yw} \cdot (\text{sen } \alpha + \cos \alpha) \quad (2.9)$$

$$V_{R,MaxI} = 0,27 \cdot \left(1 - \frac{f_c}{250} \right) \cdot f_c \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot g \alpha + 1) \quad (2.10)$$

Onde:

$f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{ct,m}$ - 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.

Ainda segundo a referida norma, para o modelo de cálculo II, considerar 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 ($V_{R,SII}$) segundo Equação 2.11. Em relação ao exposto, o modelo II considera também os efeitos de fissuração diagonal, a reduzir a inclinação da biela, e em consequência, a parcela de contribuição do concreto é reduzida. Neste modelo, o ângulo de inclinação está entre os ângulos de 30° a 45°, assim, a contribuição do concreto é dado de acordo com a Equação 2.12.

Logo, o calculo para a definição da contribuição da armadura de cisalhamento é obtido por meio da Equação 2.13 e sua resistência última ao cisalhamento ($V_{R,maxII}$) pela Equação 2.14.

$$V_{R,CSII} = V_{R,CII} + V_{R,SII} \quad (2.11)$$

$$V_{R,CII} = V_{R,CI} \cdot \frac{V_{R,max II} - V}{V_{R,max II} - V_{R,CI}} \leq V_{R,CI} \quad (2.12)$$

$$V_{R,SII} = \left(\frac{A_{WS}}{S} \right) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{yw} \cdot (\cot g \theta + \cot g \alpha) \cdot \text{sen} \alpha \quad (2.13)$$

$$V_{R,MaxII} = 0,54 \cdot \left(1 - \frac{f_c}{250} \right) \cdot f_c \cdot b_w \cdot d \cdot \text{sen}^2 \theta \cdot (\cot g \alpha + \cot g \theta) \quad (2.14)$$

Onde:

θ - ângulo de inclinação da biela no momento do rompimento, podendo variar entre 30° a 45°, segundo o modelo de cálculo II;

É importante a consideração em relação à ancoragem das armaduras transversais, sendo que esta norma comenda que os estribos envolvam as barras das armaduras de flexão, conforme a Figura 2.15.

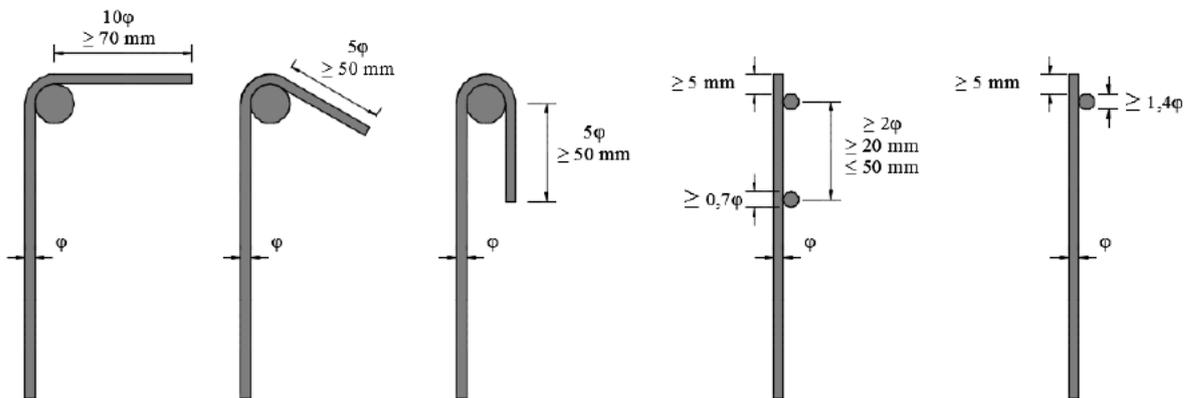


Figura 2.15 - Modelos recomendados para ancoragem de estribos

Fonte: ABNT – NBR 6118, 2014.

2.4.3.3 EUROCODE 2 (2004)

Para o cálculo da resistência ao cisalhamento em vigas desconsiderando a armadura transversal (V_{RC}), esta norma conhecida como EUROCODE 2 (2004) considera o uso da Equação 2.15 Assim, com esta equação pode-se verificar que a norma europeia leva em

consideração o efeito de escala e a taxa de armadura longitudinal, já que este apresenta influência ao cisalhamento devido ao efeito pino.

$$V_{R,C} = \max \left[\begin{array}{l} (0,18.k.(100.\rho_l.f_c)^{1/3})b_w.d \\ 0,035.K^{3/2}.\sqrt{f_c}.b_w.d \end{array} \right] \quad (2.15)$$

Onde:

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

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

ρ_L – parcela referente à taxa de armadura, sendo calculada pela seguinte equação:

$$\rho_l = \frac{A_s}{b_w.d} \leq 2, \text{ sendo } A_s \text{ a área longitudinal de aço} \quad (2.16)$$

A norma EUROCODE 2 (2004) usa a Equação 2.17 para fazer a estimativa da resistência ao cisalhamento em vigas com armaduras transversais ($V_{R,CS}$), sendo que esta faz referência só a parcela de contribuição oferecida pela armadura transversal, assim, tal resistência deverá obrigatoriamente ser maior que a de uma viga sem a armadura transversal. Com isso, segundo essa norma, o ângulo de inclinação da biela pode ser encontrado entre os ângulos de 21,8° e 45°. Desta forma, mediante a Equação 2.18, a resistência máxima que um elemento pode atingir com relação aos esforços de cisalhamento é calculada:

$$V_{R,CS} = \max \left[\begin{array}{l} \frac{A_{sw}}{S} . 0,9.d.f_{yw} . (\cot g\theta + \cot g\alpha) . \text{sen}\alpha \\ V_{R,C} \end{array} \right] \quad (2.17)$$

Onde:

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

$$V_{R,max} = \frac{0,9.b_w.d.v1.f_c.(cot g\theta + cot g\alpha)}{1 + cot g^2\theta} \quad (2.18)$$

Onde:

$$\nu_1 = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_c}{250} \right] \quad (2.19)$$

Em relação à verificação de qual é o menor ângulo a ser usado para a se determinar a estimativa da resistência de uma viga, de acordo com as características da mesma, esta referida norma prevê que as Equações 2.17 e 2.18 (anteriormente) sejam igualadas, a obter a (Equação 2.20).

$$\cot g \theta = \sqrt{\frac{b_w \cdot S \cdot \nu_1 \cdot f_c}{A_{sW} \cdot f_{yW} \cdot \text{sen} \alpha}} \quad (2.20)$$

A norma EUROCODE 2 (2004), faz uma recomendação de que quando não existe a possibilidade de os estribos transversais poderem envolver a armadura longitudinal, é necessário que essa ancoragem seja realizada por meio de soldagem entre os estribos e as armaduras longitudinais, segundo a Figura 2.16.

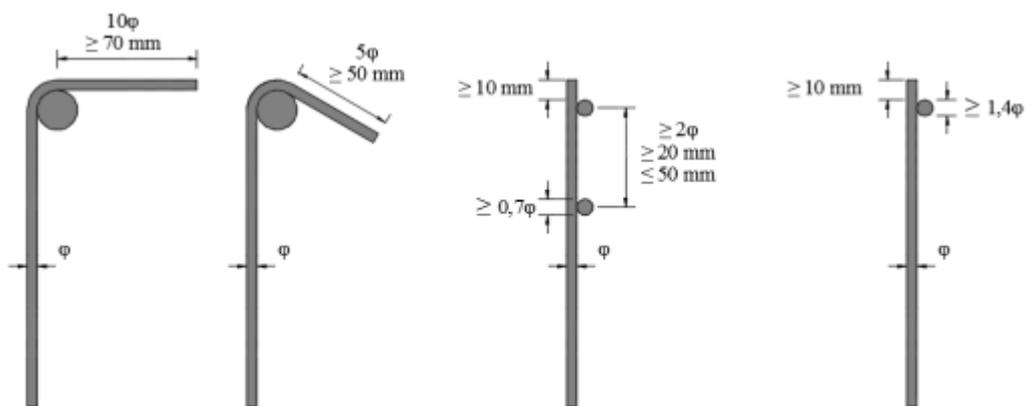


Figura 2.16 - Modelos recomendados para ancoragem de estribos

Fonte: EUROCODE 2, 2004.

2.4.4 Resistência à flexão em vigas

Tendo como referência a norma brasileira, conhecida como ABNT NBR 6118 (2014), para o dimensionamento de uma seção transversal de concreto armado, submetida a uma seção simples ou composta, as hipóteses básicas admitidas são:

– É aceito 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 aceito a existência de uma aderência perfeita entre o concreto e o aço. Com isso, as armaduras irão estar sujeitas as mesmas deformações do concreto que as envolvem;

– Conforme o diagrama parábola – retângulo conforme visto na Figura 2.17, definem-se as distribuições de tensões do concreto. Destarte, a tensão máxima de compressão é igual a $0,85 f_{cd}$, sendo que f_{cd} é a resistência à compressão de cálculo. Assim, diagrama citado pode ser substituído pelo retângulo de altura $0,8x$ (em que x é a profundidade da linha neutra).

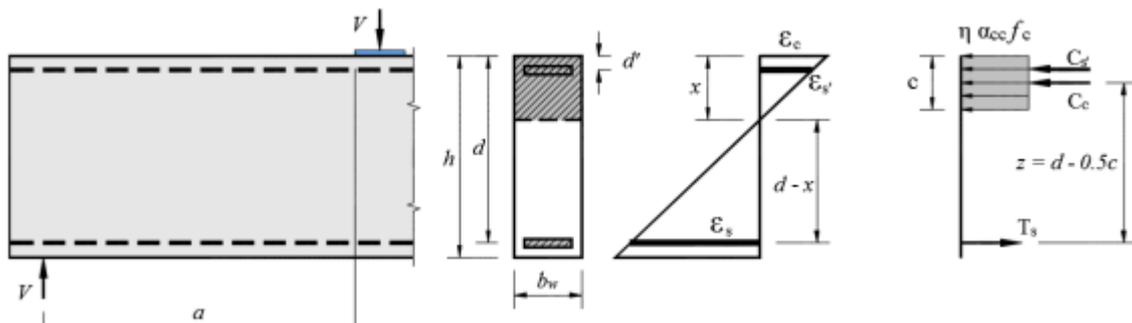


Figura 2.17 – Distribuição de tensão e deformação admitida para o estado limite último.

Fonte: ABNT – NBR 6118, 2014 - Adaptado.

$$C_C + C_S + T_S = 0 \quad (2.21)$$

$$(\eta \cdot f_c \cdot b_w \cdot c) + (A_{S'} \cdot f_{YS'}) = A_S \cdot f_{YS} \quad (2.22)$$

$$c = \frac{(A_S \cdot f_{YS}) - (A_{S'} \cdot f_{YS'})}{\eta \cdot f_c \cdot b_w} \quad (2.23)$$

$$M_{flex} = A_S \cdot f_{YS} \cdot z \quad (2.24)$$

$$V_{flex} = \frac{M_{flex}}{a} \quad (2.25)$$

Onde:

η - é a constante assumida com o valor 1 para seções constantes e 0,9 para os demais casos;

α_{CC} - é a 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.

2.5 Dosagem de concreto

2.5.1 Considerações Iniciais

Quando se trata da dosagem do concreto para o cidadão comum, esta não passa de uma mistura de materiais, sendo formado por: cimento, areia, pedra e água. No meio técnico têm o entendimento que a dosagem do concreto é visto como o resultado da combinação de cimento, agregado, água e em algumas situações aditivos. Ainda verifica que mesmo engenheiros se confundem quando a dosagem e traço do concreto.

Surge à necessidade de um conceito que melhor represente a dosagem, assim, de acordo com Neville e Brooks (2013), a esta pode ser definida como o processo de seleção dos componentes adequados e bem como a determinação de suas proporções com o intuito de produzir um concreto econômico, que tenha particularmente algumas propriedades mínimas, como: resistência, trabalhabilidade e durabilidade.

Com os dois conjuntos de exigências que são possíveis determinarem a composição da mistura, isto é, a dosagem. Sendo que o primeiro conjunto são as propriedades exigidas do concreto endurecido, na qual são especificadas pelo projetista estrutural, já o segundo diz respeito às propriedades do concreto fresco, que são determinadas pelas técnicas do transporte e lançamento, além do tipo da obra. Deve-se ainda considerar o nível de controle a ser executado na obra. Esses dois conjuntos, que possibilita a melhor dosagem.

Pode parecer uma tarefa bastante fácil se estabelecer um traço de concreto, especificamente quando não se leva em consideração a relevância às questões relacionadas à segurança, qualidade, viabilidade econômica e a durabilidade da estrutura do concreto. Em relação a esses aspectos, para a obtenção de um traço sem dúvidas que forneçam um concreto

com as tão qualidades técnicas almejadas isto vai muito além da simples mistura de seus constituintes básicos, havendo com isso, a necessidade de ser estabelecido o estudo da dosagem do concreto (ASSUNÇÃO, 2002).

Cita-se ainda, que o traço projetado no exato sentido da palavra não é possível, pois os materiais usados são variáveis levando em conta vários aspectos, e muitas de suas propriedades não podem ser avaliadas de forma inteiramente quantitativa, depois disso está sendo feita nada mais que uma hipótese inteligente de uma combinação ótima dos componentes com base nas relações. Por isso, não é surpresa que, com o objetivo de obter uma mistura satisfatória, sejam realizadas verificações das proporções com estimativas por meio de misturas experimentais e, caso seja necessário, serão realizados ajustes apropriados nas proporções até que seja obtida uma mistura satisfatória (NEVILLE e BROOKS, 2013).

2.5.2 Método de Dosagem de Concreto EPUSP-IPT

O método denominado EPUP-IPT, descrito no Manual de Dosagem e Controle de Concreto foi realizado na Escola Politécnica da USP e vem sendo tradicionalmente aplicado no país desde a década de 1970. Assim, este tem como base o método inicialmente desenvolvido pelo IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (HELENE & TERZIAN, 1992)

O referido método possibilita a realização de um ajuste experimental das proporções entre os materiais constituintes do concreto, isto é feito com base na busca de um conteúdo ideal de argamassa seca (α), por meio de um traço intermediário (1:m) em relação aos demais previstos (1:m-1; 1m+1, etc) que contenham ou estejam próximos ao traço resposta pretendido (SOUZA, 2017).

Com os cálculos realizados, é possíveis se gerar o diagrama dosagem conforme Figura 2.18, no qual apresenta três quadrantes, sendo que o primeiro no sentido horário relaciona resistência com relação água cimento, já segundo relação de massa com a consistência do concreto e o último obtemos o consumo do cimento.

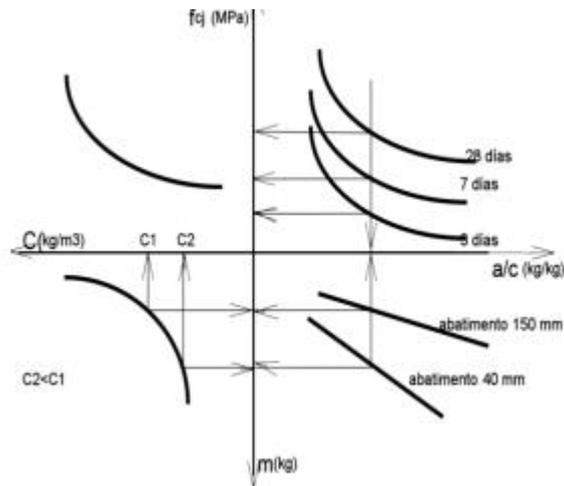


Figura 2.18 - Diagrama de Dosagem.
Fonte: Silva (2012, apud SOUZA, 2017).

Com isso, este método teve como resultado final o diagrama de dosagem e também mediante um gráfico de três quadrantes conforme a Figura 2.18, sendo que estão representadas as “leis de comportamento” expressas pelas correlações a seguir:

- a) Modelo de Powers (1966) ou Lei de Abrams (1918): “a resistência de um concreto, numa determinada idade (f_{cj}), é inversamente proporcional à relação água cimento (a/c)”, expresso na Equação 2.26.

$$f_{cj} = \frac{A}{B^x}, \text{ onde:} \quad (2.26)$$

Onde:

f_{cj} – resistência a compressão axial em MPa, na idade j (dias);

x – relação água/cimento, em massa (kg/kg);

- b) Lei de Lyse: “fixados o cimento e agregados, a consistência do concreto fresco depende preponderantemente da quantidade de água por m³ de concreto” e pode ser simplificada, expressa através da Equação 2.27.

$$m = k_3 + k_4 * x, \text{ onde:} \quad (2.27)$$

Onde:

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

$$m = (a+b) \quad (2.28)$$

Onde:

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

$$C = \frac{1000}{K_5 + K_6 \times m}, \quad (2.29)$$

Onde:

C – consumo de cimento por m³ de concreto

$$\alpha(\%) = 1 + \frac{a}{1+m} \times 100, \quad (2.30)$$

Onde:

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

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este estudo está relacionado a vigas retangulares de concreto armado, confeccionadas em laboratório e reforçadas ao cisalhamento com microfibras: de poliéster e de vidro. As principais variáveis deste experimento foram as diferentes variações de percentuais de fibras como adição a ser inserida ao concreto e a modelagem computacional da viga de referência.

3.1 Concepção das Vigas

Para a realização do estudo experimental de vigas de concreto armado foram confeccionadas 7 (sete) vigas, sendo 1 (uma) como referência sem a adição de fibras e, 6 (seis) vigas em concreto armado com a adições de fibras, sendo 3 (três) de poliéster e 3 (três) de vidro, ambas nas proporções de fibras de 0.024%, 0.036% e 0.048% por metro cúbico de concreto. Todas as vigas apresentam seção transversal de 15cm x 25cm e comprimento de 200 cm com as mesmas dimensões.

Neste estudo foram utilizados extensômetros para concreto e aço, o primeiro foi utilizado submerso na mistura e externos na área comprimida mais elevada, isto é, na porção que resiste ao maior esforço de compressão. Por sua vez, o segundo foi utilizado unicamente submerso na mistura. Ambos extensômetros são de suma importância para a verificação e consolidação das deformações ao cisalhamento e a flexão. A isso, cita-se ainda o uso de potenciômetro que medem o deslocamento.

3.2 Materiais Utilizados

3.2.1 Cimento

Optou-se por utilizar o cimento Portland CP II-Z-32 e suas características, conforme fabricante, apresentadas na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Características físicas do cimento.

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

Fonte: Itaguassu Agro Industrial S/A – Cimento Nassau, 2017 – adaptada pelo autor.

3.2.2 Agregados

3.2.2.1 Miúdo

O agregado miúdo utilizado nesta pesquisa foi doado pela Eletronorte e a caracterização feita no laboratório da Universidade Federal do Pará – Campus de Tucuruí, de acordo com as especificações definidas pelas normas da ABNT. A seguir são apresentados os resultados constatados durante os ensaios na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Características físicas da areia natural

Ensaio	Método	Resultados
Diâmetro Máximo (DMC) (mm)	NBR NM 248 (2003)	1,19
Módulo de finura (%)	NBR NM 248 (2003)	2,11
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 52 (2009)	2,67
Massa unitária (g/cm ³)	NBR NM 45 (2006)	1,58
Absorção de água (%)	NBR NM 30 (2001)	0,27

Fonte: Souza, 2017 – adaptada pelo autor.

3.2.2.2 Graúdo

O agregado graúdo utilizado nesta pesquisa foi doado pela Eletronorte e a caracterização feita no laboratório da Universidade Federal do Pará – Campus de Tucuruí, de

acordo com as especificações definidas pelas normas da ABNT. A seguir são apresentados os resultados constatados durante os ensaios na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Características físicas do agregado graúdo

Ensaio	Método	Resultados	
		Brita 19 mm	Brita 38 mm
Diâmetro Máximo (DMC) (mm)	NBR NM 248 (2003)	19	38
Módulo de finura (%)	NBR NM 248 (2003)	7,86	7,89
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 53 (2003)	2,8	2,55
Massa unitária (g/cm ³)	NBR NM 45 (2006)	1,51	1,44
Absorção de água (%)	NBR NM 53 (2003)	0,47	0,25

Fonte: Souza, 2017 – adaptada pelo autor.

3.2.3 Fibras de Vidro e Poliéster

3.2.3.1 Fibra de Vidro

As fibras de Vidro AR são utilizadas para evitar microfissuras e perda hidráulica do concreto. Sendo usadas as características fornecidas pelo fabricante conforme visto na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Características das Fibras de Vidro

Material - Fibra de vidro AR	
Tamanho	12 mm
Cor	Incolor
Resistência à tração	1.698 MPa
Diâmetro	13 a 15 microns
Densidade	2,68 g/cm ³
Módulo de elasticidade	72 GPa
Deformação a ruptura	2 - 3,5%
Resistência a álcali	Alta
Embalagens	25 kg
Aplicação	de 600 gr a 1,2 kg por m ³ de concreto

Fonte: MM FIBRAS, 2018.

3.2.3.2 Fibra de Poliéster

A FibraFix microfibras, material originado dos fios de poliéster como base de matéria prima. A matéria é composta por hastes de multifilamentos, adequadas para misturar ao concreto e ou argamassas e prover resistência à tração no estado plástico e endurecido e em todas as direções, propriedades que o concreto e argamassas convencionais não produzem (MM FIBRAS, 2017).

Estas misturadas aos agregados que compõem o concreto ou argamassa se espalham em milhares de microfibras que se distribuem em múltiplas direções e espalham em milhares de microfibras de acordo com a Tabela 3.5. Portanto, as características fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.5 - Características das Fibras de Poliéster

Quadro de Propriedades	
Densidade	1,34 gr/cm ³
Embalagens	de 1 kg
Longitude das hastes	10 e 15mm
Diâmetro da Fibra	20 a 25 microns
Ponto de Fusão	235 C
Ponto de Auto – Ignição	650 C
Condutibilidade Térmica Rel.	5,0 (relativa ao ar)
Resistência a água Hidrófugo	Não atacável
Resistência aos ácidos	Boa
Resistência aos álcalis	Muito boa
Absorção de água inferior	a 0,4%
Resistência à tração	0,3 – 0,5 kN /mm ²
Módulo de Young (elasticidade)	2500 kN/ mm ² %

Fonte: MM FIBRAS, 2018.

Também considerar as mesmas características das fibras de vidro apresentadas na (tabela 3.4), conforme fornecida pelos fabricantes.

3.2.4 Água

A água utilizada foi à fornecida pela rede de distribuição da Vila Permanente, provenientes da ETA que atende a população local.

3.2.5 Aditivos

O aditivo usado para balancear a perda de trabalhabilidade com as adições das microfibras de vidro e poliéster foi o plastificante multifuncional retardador de pega Muraplast FK 101, no qual o objetivo foi a obtenção de uma maior resistência do concreto a compressão (entre 25 MPa e 30 MPa), por meio da redução do fator água/cimento e garantir o abatimento mínimo do concreto (slump: 16±2).

Foi fornecido pelo o fabricante MC-Bauchemie (2018) as especificações a respeito do aditivo empregado durante a dosagem conforme mostrado a seguir na Tabela 3.6.

Propriedades:

- Reduz a tensão superficial da água de mistura;
- Boa dispersão das partículas de cimento;
- Melhora da trabalhabilidade;
- Ganho de tempo devido à facilidade da aplicação do concreto;
- Melhoria no adensamento junto à armadura;
- Provoca um pequeno retardo no tempo de pega;
- Permite ótimas formulações de concreto;
- Permite uma manutenção da trabalhabilidade adequada nos ambientes quentes.

Tabela 3.6 - Dados Técnicos - Muraplast FK 101

Características	Unidade	Valor	Observação
Densidade	g/cm ³	1,20	_____
Dosagem	%	0,2 a 1,0	Sobre o peso do cimento

Fonte: MC – Bauchemie Brasil, 2018.

3.2.6 Dosagem do concreto convencional

O método adotado teve como premissas o método EPUP-IPT, este têm as leis de comportamento os seguintes modelos que governam a interação das principais variáveis envolvidas: a Lei de Abrams, Lei de Inge Lyse e Lei de Molinari, entre outros. O referido método apresenta como parâmetros a fixação do teor de argamassa e do slump. Entretanto, neste trabalho foram considerados como fixos o teor de argamassa e o fator água/cimento, esta escolha se baseia na comparação efetiva após a adição das microfibras. Porque se sabe que de acordo com a Lei de Abrams, para certo conjunto particular de materiais, a resistência do concreto é função da relação a/c, logo, com valores fixos e com a mesma proporção nos traços do citado, poderá apresentar uma comparação efetiva e condizente com as características dos respectivos materiais em análise.

Tendo como base o traço normal e a escolha do slump de 16 ± 2 para o concreto sem a adição de fibras, foi possível se encontrar o teor de argamassa ideal e o fator a/c a serem utilizados para os demais traços com adições de fibras.

3.3 Determinação do Modelo Físico

Como características para as vigas, estas foram dimensionadas para a garantia que o rompimento ocorresse pelo esforço cortante, assim, a resistir ao momento fletor. Com isso, conforme citado neste capítulo, para o modelo físico adotado teve como seção de 15 X 25 cm e 200 cm de comprimento, sendo usados os critérios de cálculos com base na NBR 6118 (2014).

Em consonância ao dito até aqui, foram adotadas a utilização de cinco (05) barras de aço CA50 de 12,5 mm na região tracionada, a garantir desta forma sua capacidade resistente ao esforço de flexão. Já para a área superior das vigas foram usadas duas (02) barras de aço CA50 de 8,0 mm, estas com os objetivos de garantir a armação das armaduras e o posicionamento dos estribos para melhoria da questão de montagens das vigas e seus correlatos.

Por sua vez, os estribos usados foram de barras de aço de CA60 de 5,0 mm com o espaçamento de 10 cm entre os mesmos, sendo considerado por questões de praticidade, em 2/3 da viga, a restringir o cisalhamento nessas duas porções das vigas, e em 1/3 -próximo ao apoio- foram utilizados estribos a cada 30 cm, com a meta de garantia nesta região do cisalhamento da viga. Nesta região próxima ao apoio, se marcou os caminhamentos das fissuras de flexão e principalmente de cisalhamento, com isso, a Figura 3.1 mostra as considerações quanto à armação e posicionamento das armaduras.

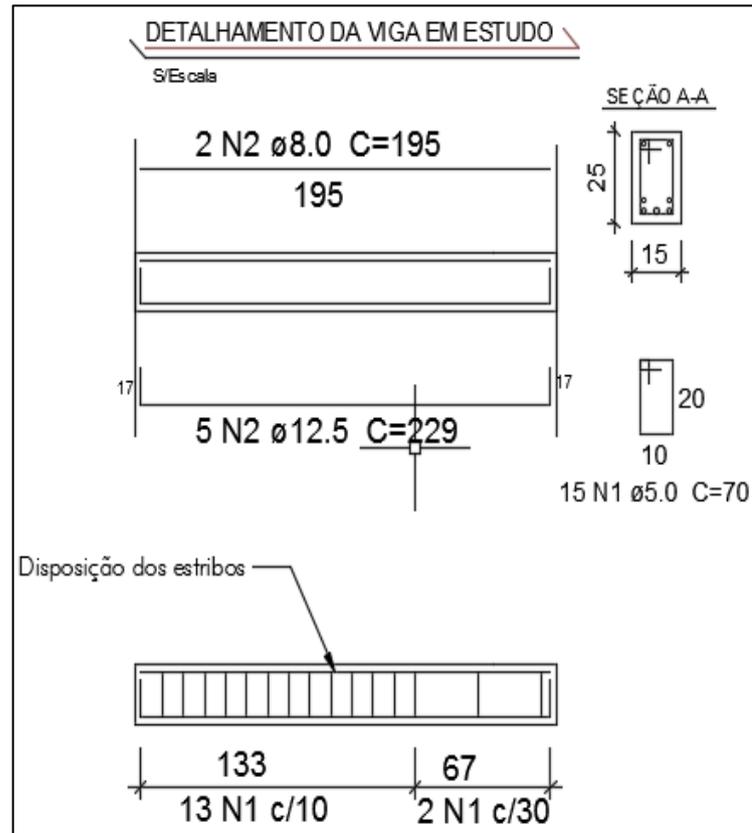


Figura 3.1 - Detalhamento da armadura utilizada nas vigas.

Para as armaduras longitudinais, o detalhamento das mesmas, foram usadas três barras na seção inferior e, devido ao pouco espaçamento em relação a largura das vigas, por questões normativas que o impediu dos usos das duas restantes no mesmo alinhamento das demais, foi necessário a adoção do posicionamento das duas restantes imediatamente acima em relação as duas das extremidades, seguindo as especificações da NBR 6118 (2014). Assim, as barras longitudinais tiveram seus posicionamentos como demonstrado na Figura 3.2. Ao passo que, o espaçamento entre eixos das barras verticais adotado foi de 3 cm, com o objetivo da garantia do envolvimento da pasta às barras de aço e a passagem do agregado graúdo entre as mesmas Figura 3.2 e na Figura 3.3. Atrelado a isso, a Figura 3.4 mostra as formas utilizadas para a colocação das referidas acima para sua posterior concretagem.

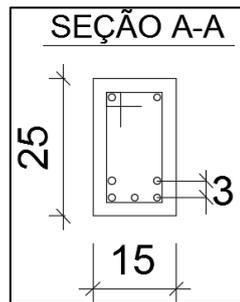


Figura 3.2 - Disposição das armaduras longitudinais.



Figura 3.3 - Armadura executada para a viga.



Figura 3.4 - Formas das vigas prontas.

3.4 Instrumentação das Vigas

3.4.1 Considerações iniciais

A instrumentação das vigas foi realizada de forma a se obter a capacidade máxima de resistência que cada material usado pode absorver no momento de trabalho submetido por uma viga. Reforça a isto, que a aplicação da carga central tem por objetivo o rompimento da viga por cisalhamento e não por flexão.

3.4.2 Deformações na armadura de flexão

Para o monitoramento das deformações na armadura longitudinal das vigas ensaiadas, foram coladas duas (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 referidas para cada armadura de flexão, uma vez que, no ponto de escolha referente ao meio do vão, tem o valor médio da seção transversal, com isso, o valor adotado representa a média aritmética das duas leituras. Assim, nesta região ocorrerá à tração máxima na viga, a isso reforça que, estas armaduras foram levadas em conta no dimensionamento para que não atinjam a tensão máxima de escoamento, caso isso ocorresse ocasionaria o rompimento da viga por flexão. A Figura 3.5a e 3.5b mostra os Strain Gages do aço.



a)



b)

Figura 3.5 - Strain gages do aço colados e protegidos para a posterior execução da concretagem.

3.4.3 Deformações no concreto

Para o monitoramento das deformações no concreto, foi utilizado 02 unidades de *strain gages* internos -2 cm abaixo da armadura longitudinal superior- na região central superior de cada uma das vigas, isto para a medição da máxima deformação por compressão nas quais tais vigas estarão submetidas durante os ensaios, conforme Figura 3.6. Outro extensômetro - elétrico- da marca Excel Sensores, foi colado para a análise da compressão do concreto, sendo colado na face lateral superior da viga na região do concreto a 3 cm de cada uma das vigas na região central superior das referidas, de forma a obter a máxima deformação por compressão das referidas, segundo Figura 3.7a, ao passo que, pode analisar ainda a abertura de fissuras na face do concreto, a garantir desta forma, uma maior eficácia da instrumentação, conforme demonstrado na Figura 3.7b.



Figura 3.6 - Strain gages internos do concreto pronto para a execução da concretagem.

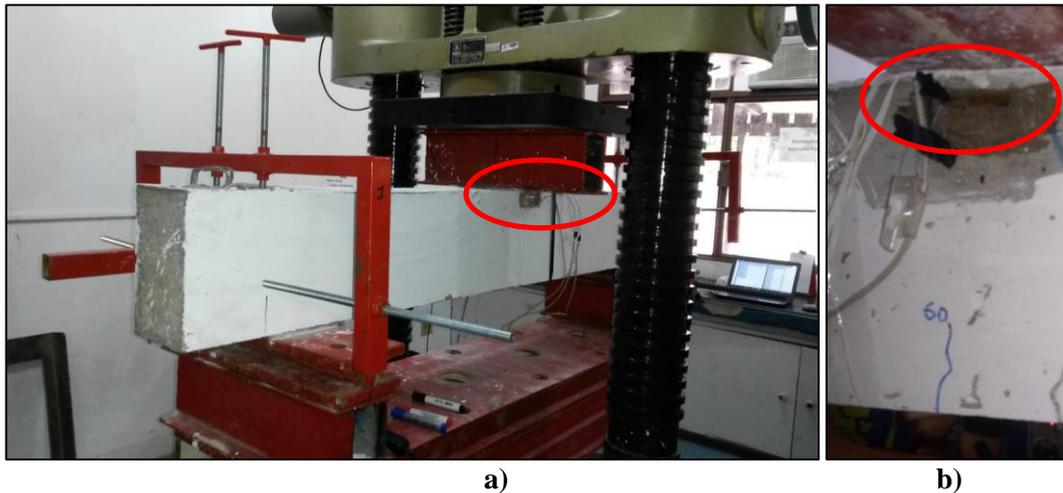


Figura 3.7 - Strain Gages externo do concreto já colado.

3.4.4 Deslocamento vertical

Para medição dos deslocamentos verticais das vigas ensaiadas, utilizou o Potenciômetro usado no meio do vão, com o auxílio de um Yoke, no qual este tem a função de posicionar o citado para permitir uma leitura sem qualquer interferência da acomodação da peça nos apoios e base - chapas metálicas usadas para o posicionamento das vigas-, sendo com o auxílio do Yoke, o potenciômetro e fixado nesse ponto, como mostra a Figura 3.8a. Optou-se por colar uma chapa de aço na face lateral da viga na região comprimida da viga mais acima do topo da referida, de forma a permitir uma leitura constante, mesmo após a ruptura da peça, como mostra a Figura 3.8b.



Figura 3.8 - a) Viga com o potenciômetro fixado ao Yoke b) O Potenciômetro posicionado na chapa metálica.

3.4.5 Modelo do Sistema de Ensaio das Vigas

Para o rompimento das vigas objetos de estudo, foi adotado o sistema já utilizado em estudos anteriores feitos no laboratório de engenharia civil – LEC, do Campus Universitário de Tucuruí – CAMTUC – UFPA. Com isso, foram utilizadas três chapas metálicas vazadas, tendo cada uma as seguintes dimensões: 70 mm de altura e 15 mm de espessura e 2000 mm de comprimento, sendo que, as referidas foram empilhadas e apoiadas sobre o centro da mesa da prensa, como visto na Figura 3.9.

Em seguida, foram colocados dois perfis “I” metálicos nas extremidades da chapa superior, com dimensões: 150 mm de largura x 150 mm de altura x 4 mm de espessura, após isso, foram apoiadas duas chapas metálicas com as dimensões: 150 mm de largura x 10 mm de espessura sobre os perfis citados, ao passo que, entre essas foram alocados dois roletes de diâmetro de 40 mm sem restrição ao deslocamento horizontal e outro com restrição, a simular desta forma, apoios de 1º e 2º gênero. Em seguida, foram realizados os posicionamentos das vigas sobre a estrutura já montada, com alinhamento centrado nos dois perfis “I” mencionados com suas dimensões. Após o término desta preparação, foram aplicadas carga por meio do apoio da prensa, com o objetivo de garantir a dimensão do vão de cisalhamento planejado para os ensaios, como demonstrado na Figura 3.9 e Figura 3.10.

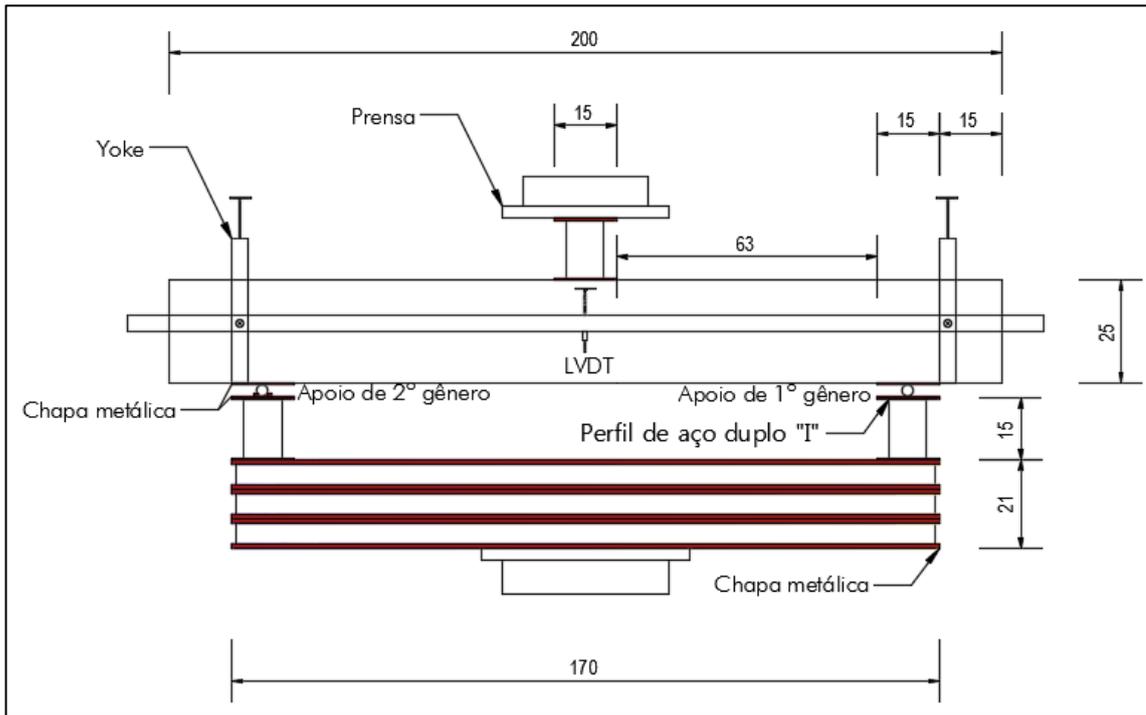


Figura 3.9 - Modelo do sistema adotado para ensaio das vigas.

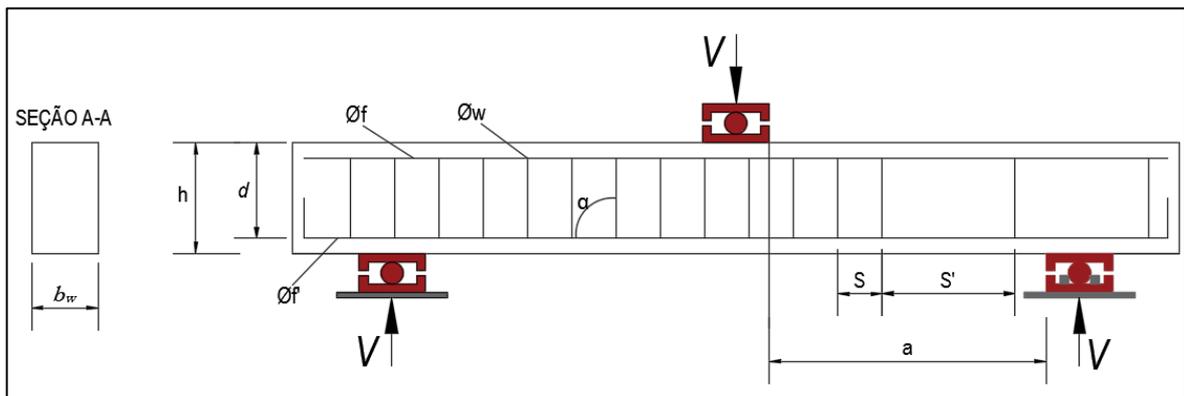


Figura 3.10 - Dados referentes aos elementos de ensaios.

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

3.5 Ensaios no estado fresco do concreto

3.5.1 Considerações iniciais

O concreto utilizado para moldagem de todas as vigas foi dosado no LEC. Sendo necessário aproximadamente 260,74 kg para moldagem das vigas e corpos de provas. Ao passo que, o cimento utilizado foi o CP-II-Z 32 (cimento Portland com adição pozolânica) da marca Poty conforme citado no início deste capítulo. Em relação aos agregados, o agregado graúdo utilizou-se a brita 01, com diâmetro máximo de 19 mm, e agregado miúdo (areia amarela média). Estes agregados são provenientes de jazidas localizadas aos arredores do município de Tucuruí-PA e fornecidos pela Eletronorte.

Para este estudo, foi adotado para a dosagem, um concreto entre 25 MPa e 30 MPa de resistência à compressão aos 28 dias e abatimento do tronco de cone de 16 ± 2 cm. Este slump adotado é devido a compensação da perda de trabalhabilidade com a adição das fibras.

Foi realizada a dosagem tendo como objetivo o alcance do *slump* dentro do proposto citado acima, assim, foi realizado o slump test, como recomendado pela ABNT NBR NM 67 (1998), de maneira a verificar se o referido se adequava ao solicitado, conforme Figura 3.11, logo após o ensaio, foi verificado que o mesmo atendeu às especificações.

Durante a concretagem das vigas, o concreto foi adensado para as três primeiras vigas, sendo elas: a viga de referência e as duas vigas com adição de microfibra de vidro manualmente em decorrência da falta de vibradores que o LEC ou mesmo o único que tinha estava quebrado. Para as últimas quatro vigas restantes, sendo as mesmas: a terceira com adição de microfibra de vidro e as três com adição de microfibra de poliéster o adensamento foi com auxílio de um vibrador mecânico do tipo agulha fornecido pela Empresa ConcreNorte, seguindo o procedimento estabelecido pela ABNT NBR 14931 (2004), segundo demonstrado Figura 3.12.e a Figura 3.13 estão vigas estão concretadas e curadas.

Já para os corpos de provas, foi realizado manualmente devido à falta de vibrador para as três primeiras e para as que usaram o tipo da agulha era muito espessa, assim, optou-se por realizar conforme as três vigas anteriormente, a isso, soma-se a questão de uniformização em relação à moldagem dos corpos de prova, como mostra a Figura 3.14 e de acordo com a NBR 5738 (2015).



Figura 3.11 - Ensaio de Slump Test.



Figura 3.12 - Concretagem das vigas com adensador mecânico.



Figura 3.13 - Vigas concretadas com os extensômetros.



Figura 3.14 - Corpos de provas moldados.

Na Tabela 3.7 resume as características das vigas e na Tabela 3.8 apresenta o plano de execução de concretagem das vigas, com seus quantitativos de materiais, e bem como as datas de concretagem, *slumps* e datas dos rompimentos.

Tabela 3.7 - Principais características das vigas.

Viga	a/d	d (mm)	ρ_l (%)	ρ_w (%)	Tipo de fibra	Percentual de fibra
VR	3,04	207,5	1,97	0,397	—	0
VFV01					Fibra de Vidro	0,024
VFV02						0,036
VFV03						0,048
VFP01					Fibra de Poliéster	0,024
VFP02						0,036
VFP03						0,036

Notas: VFV - Viga com adição de fibra de vidro; VFP – Viga com adição de fibra de poliéster; VR - Viga de referência; $b_w = 150$ mm; $h = 250$ mm; $A_s = 613,59$ mm²; $\rho_w = \frac{A_{sw}}{b_w d}$; $\rho_l = \frac{A_s}{b_w d}$; $\alpha = 90^\circ$; $a = 630$ mm; $\varnothing_f = 6,3$ mm; $\varnothing_f' = 12,5$ mm; $S = 100$ mm; $S' = 300$ mm; $L = 2000$ mm.

Tabela 3.8 - Plano execução de concretagem das vigas, com seus quantitativos de materiais, e bem como as datas de concretagem, slumps e datas dos rompimentos.

PLANO DE EXECUÇÃO DE CONCRETAGEM DE VIGAS									
NOME DA VIGA	MASSA FIBRA	MASSA AG. GRÁUDO	MASSA AG. MIÚDO	MASSA ÁGUA	MASSA CIMENTO	MASSA ADITIVO PLAST. (7%)	DATA CONCRETAGEM	SLUMP (CM)	ROMPIMENTOS (DIAS)
VFV01 – 0,024%	0,06260 KG	113,55 KG	75,55 KG	20,31 KG	47,23 KG	0,33061 KG	06/07/2018	18,0	84
VFV02 – 0,036%	0,09390 KG						06/07/218	18,0	87
VFV3 – 0,048%	0,12520KG						09/08/2018	18,0	87
VR	-----						26/06/2018	18,0	90
VFP01 – 0,024%	0,06260 KG						09/08/2018	17,5	87
VFP02 – 0,036%	0,09390 KG						09/08/2018	16,0	87
VFP03 – 0,048%	0,12520KG						13/08/2018	14,5	89
<p>Notas: VFV-Viga com adição de fibra de vidro; VFP-Viga com adição de fibra de poliéster; VR - viga de referência; massa total de concreto para cada traço será de 260,76 Kg – correspondente a concretagem de 01 viga e 10 moldes (10 x 20 cm), relação a/c=0,43, teor de argamassa=52%, resistência prevista para o concreto está entre 25 à 30 MPa.</p>									

3.6 Ensaios no estado endurecido do concreto e aço

3.6.1 Propriedades mecânicas do concreto

Com objetivo da determinação das propriedades mecânicas do concreto, foram necessárias as moldagens de corpos de provas cilíndricos a seguir os procedimentos e as recomendações da ABNT NBR 5738 (2008). O primeiro ensaio realizado foi o de compressão axial, a seguir recomendações da ABNT NBR 5739 (2007), sendo os corpos de provas com dimensões: de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, como mostrado na Figura 3.15. Para o segundo ensaio, as dimensões dos corpos de prova ensaiados à tração por compressão diametral são as mesmas dimensões do primeiro ensaio, conforme visto na Figura 3.16, este ensaio segue as recomendações da ABNT NBR 7222 (2011). Já para o terceiro ensaio, o módulo de elasticidade do concreto, seguiu as recomendações da ABNT NBR 8522 (2008), sendo as mesmas dimensões dos dois ensaios citado acima, de acordo com a Figura 3.17.



Figura 3.15 - Ensaio de compressão.



Figura 3.16 - Ensaio de compressão diametral.



Figura 3.17 - Ensaio de módulo de elasticidade.

Como medida da realização da caracterização das propriedades mecânicas do concreto, foram ensaiados 2 a 4 corpos de prova à compressão, 2 ou 3 à tração por compressão diametral e para obtenção do módulo de elasticidade, foram de 3 a 8 devido aos dois critérios usados para estes. Logo, os resultados adotados são equivalentes às médias de todos os corpos de prova, de acordo com a Tabela 3.9. Portanto, a consideração da média de todos os corpos de provas foi adotada para evitar uma maior dispersão dos resultados, uma vez que, o concreto usado para cada viga é diferente, isto é, são 7 traços diferentes, sendo os mesmos: um de referência sem adição de microfibras, 3 com adição de microfibras de vidro e 3 com adição de microfibras de poliéster. A isto reforça que, ambos foram rompidos após os 28 dias de idade, portanto, as propriedades mecânicas do concreto ficam praticamente as mesmas.

Tabela 3.9 - Resultados dos rompimentos dos Corpos de Provas.

CP	f_c (MPa)	f_{ct} (MPa)	E_c (GPa)
CP - CR	33,39	5,1	38,73
CP - CFV 01	29,55	2.956	32,77
CP - CFV 02	35,27	4.170	27,813
CP - CFV 03	40,32	4.556	35,216
CP - CFP 01	35,13	4.205	31,095
CP - CFP 02	40,41	3.672	32,093
CP - FP 03	37,21	4.210	32,119

CP – Corpo de prova, CR – Concreto de Referência, CFV – Concreto com adição de Fibra de Vidro, CFP – Concreto com adição de Fibra de Poliéster.

3.6.2 Propriedades mecânicas do aço

Para a determinação das propriedades mecânicas do aço, foram retiradas 03 amostras com 600 mm de comprimento de cada diâmetro utilizado nas peças ensaiadas, sendo: para a primeira usada como armadura longitudinal, diâmetro de 12,50 mm, isto é, de flexão e a segunda como armadura transversal, ou seja, de cisalhamento de acordo com as recomendações da NBR 6892 (2013). Sendo que para esta última, não possível a realização dos ensaios dos estribos, uma vez que, a prensa do LEC não consegue realizar esse ensaio devido aos diâmetros das barras serem muitos inferiores ao que a referida possa fixar com suas garras, ou seja, apresentando bitolas de 5,0 mm.

Foram ensaiadas à tração na prensa do LEC como demonstrado na Figura 3.18 nas barras longitudinais. Ainda foram demonstrados os gráficos de tensão x deformação das bitolas ensaiadas, conforme Figura 3.19, e também apresentadas as médias dos valores na Tabela 3.10.



Figura 3.18 - Ensaio a tração das armaduras.

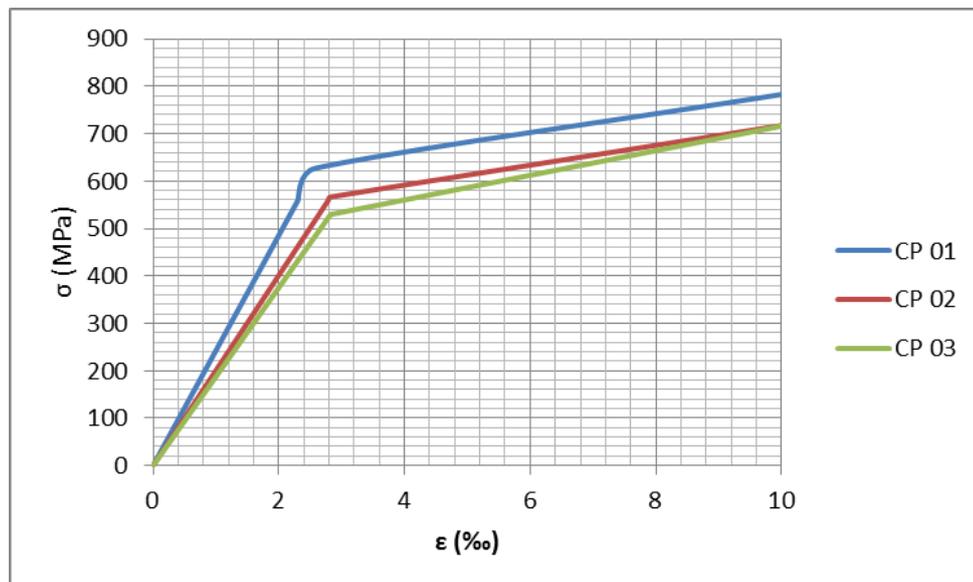


Figura 3.19 - Tensão X deformação do aço.

Tabela 3.10 - Propriedades mecânicas do aço.

Tipo de aço	Ø (mm)	f_{ys} (MPa)	E_{ys} (‰)	E_s (GPa)
CA 50 (Armadura de flexão)	12,5	574,63	2,73	210,35

4. ANÁLISE COMPUTACIONAL

4.1 Análise não linear utilizando o software Response 2000

Com o objetivo de produzir um modelo computacional para uma comparação com os resultados obtidos nos experimentais, foi usado o software chamado Response 2000, este programa tem como premissas a análise seccional não-linear utilizado como análise de elementos de concreto armado que estão submetidos ao cisalhamento, tendo como base a teoria do campo de compressão modificado¹. Com isso, o referido programa, foi desenvolvido por um candidato a doutorado na Universidade de Toronto, Evan Bentz, tendo como supervisão o professor M.P. Collins. É importante ressaltar que, a linguagem de programação utilizada foi a C ++ (BENTZ & COLLINS, 2001).

Sendo que os princípios orientadores acima foram utilizados no projeto dessas aplicações. Com o exposto, o response 2000 permite de se verificar uma rápida análise de erros que se apresenta na entrada, bem como também uma rápida interpretação dos resultados com gráficos amplos. Desse modo, esse foi desenvolvido com um diferencial que alguns programas de computador parecem fazer, isto é, deixa os usuários, a saber, do comportamento real do concreto (BENTZ & COLLINS, 2001).

Este programa, isto é, response 2000 possibilita a análise de colunas e vigas submetidas a combinações arbitrárias de carga axial, cisalhamento e momento. A isto, o mesmo, apresenta um método de integração do comportamento seccional para segmentos de viga prismáticos simples. Sendo que, segue a premissa que não há tensão de aperto transversal ao longo do feixe e que as suposições implícitas no programa são que as seções planas permanecem planas. Ao passo que, para as suposições excelentes são aquelas em que as seções de uma coluna ou viga estão a uma distância plausível de um suporte ou carga pontual. Estes são os mesmos locais em vigas que normalmente são locais críticos para falhas de cisalhamento frágil (BENTZ & COLLINS, 2001).

Com o exposto, foram inseridos os dados referentes a viga padrão ou de referência, com o objetivo de obter informações sobre o comportamento da citada segundo resultados do software Response 2000. Mediante a isto, foram utilizados os dados com maior proximidade da viga experimental para serem inseridos no software, como: área da seção, área de aço e

posicionamento das barras, assim como, a resistência característica a compressão resultante do rompimento dos corpos de provas do traço escolhido como base na Figura 4.1.

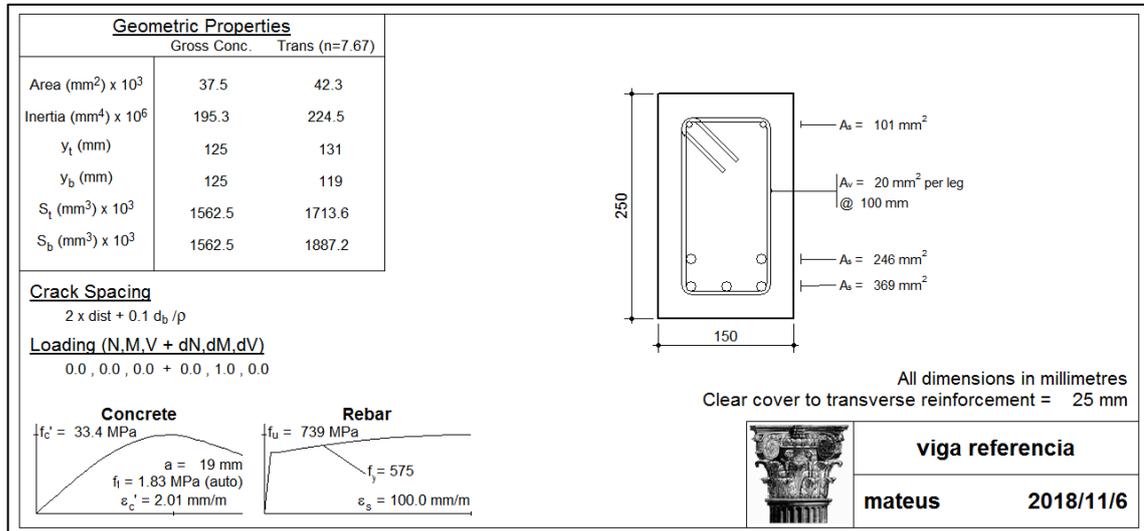


Figura 4.1 - Dados de entrada no Response 2000.

Com as informações obtidas pelo Response 2000, o mesmo gerou resposta dos resultados como: diagrama de fissuras, tensão longitudinal, esforços internos, fadiga longitudinal do concreto, bem como o momento máximo atuante na seção, conforme Figura 4.2, e também o diagrama de fissuração, como demonstrado na Figura 4.3. Logo, obtiveram-se informações como carga cortante e deslocamento ao longo de um possível rompimento da seção, assim, pode-se realizar a comparação pretendida entre a viga experimental e a gerada pelo software Response 2000.

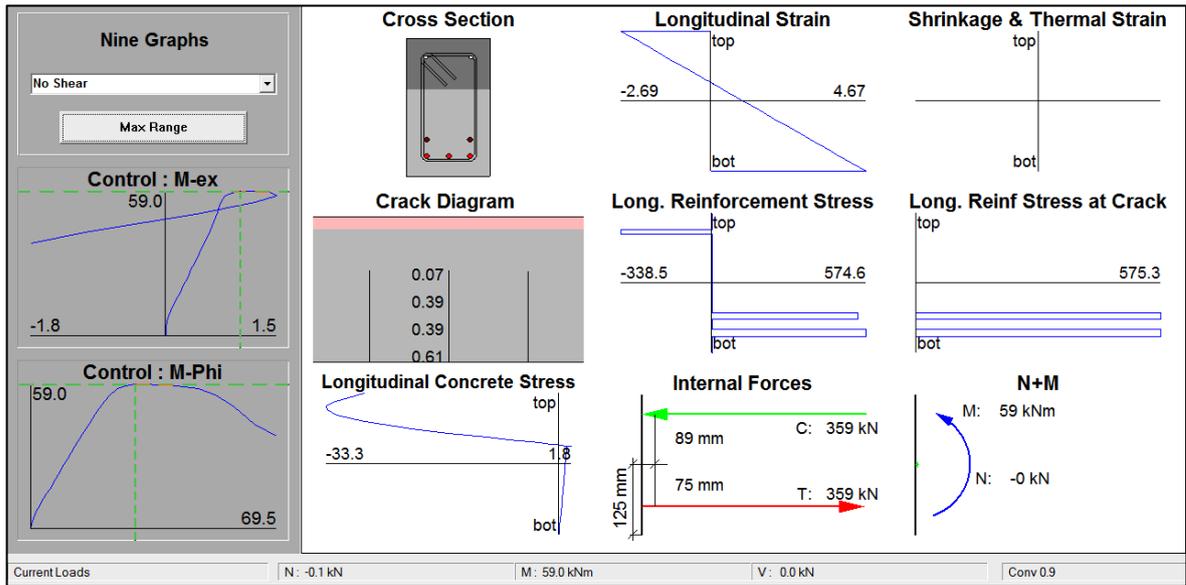


Figura 4.2 - Saída de dados no Response 2000.

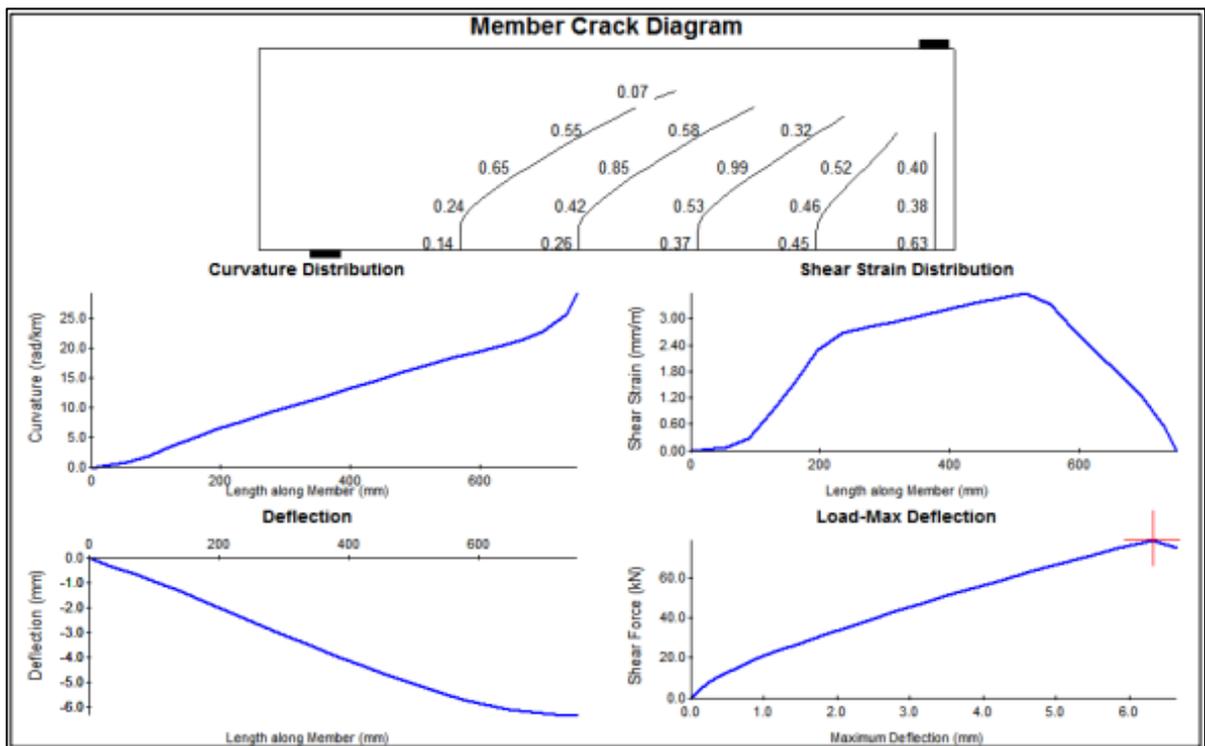


Figura 4.3 - Diagrama de fissuração no response 2000.

4.2 Análise não linear utilizando o software SAP 2000

Para o modelo criado para este estudo, respectivamente para o concreto com a inserção de dados não lineares, foi inserido referente a compressão nas linhas 1 a 6 e na tração nas linhas 8 e 9, em que no item 8.2.10 da NBR 8118 (2014) requer para o comportamento do concreto a compressão, sendo o diagrama para este comportamento, parábola-retângulo e a tração, tendo o comportamento bilinear, no terceiro quadrante e primeiro quadrante, conforme visto na Figura 4.4.

Point ID	Strain	Stress
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

Figura 4.4 – Posicionamento do potenciômetro durante o ensaio do elemento.

Foi considerado para o aço, o comportamento elastoplástico perfeito, tanto para compressão como para tração do material. Logo, segundo demonstrado na Figura 4.5, foi necessário caracterizar a deformação de escoamento para o aço CA50, a tensão de escoamento, deformação última, pois a NBR 6118 (2014), no item 8.2.6, permite que seja utilizado o mesmo comportamento para compressão e tração, contudo, esta análise versará sobre as características a tração do aço.

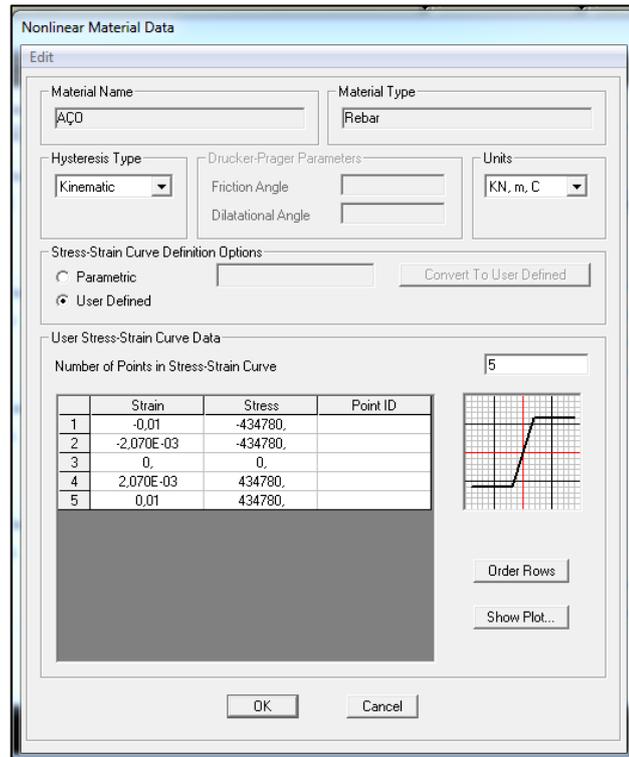


Figura 4.5 – Posicionamento do potenciômetro durante o ensaio do elemento.

É importante salientar que, para a análise, foi necessária a idealização de uma seção composta (concreto e aço), apresentado seção transversal de 25 x 15 cm e armadura longitudinal com cinco barras de 12,5 mm de diâmetro e espaçamento de acordo com os elementos considerados neste trabalho, a Figura 4.6 constata isto.

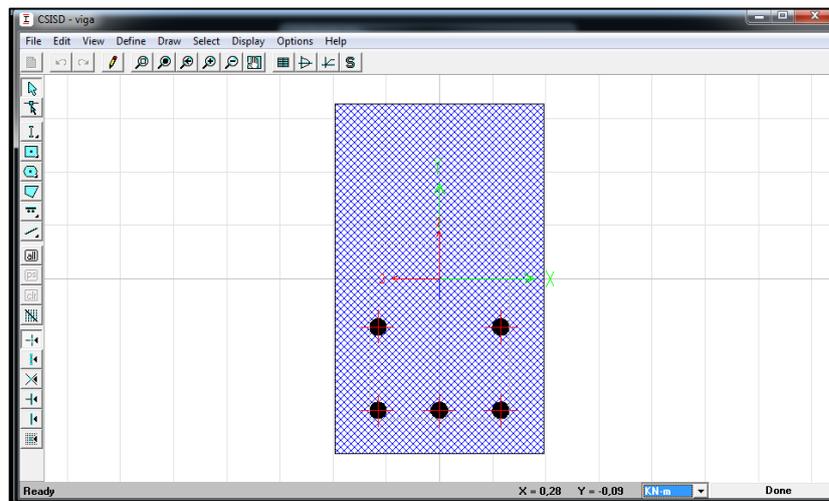


Figura 4.6 – Posicionamento do potenciômetro durante o ensaio do elemento.

Tendo como base a análise do diagrama momento-curvatura na Figura 4.7, permitiu-se a avaliação do comportamento da seção do concreto armado. Sendo que, o momento de fissuração está aproximadamente de 5,59 KN.m, com isso, infere-se que a armadura longitudinal não atinge o patamar de escoamento.

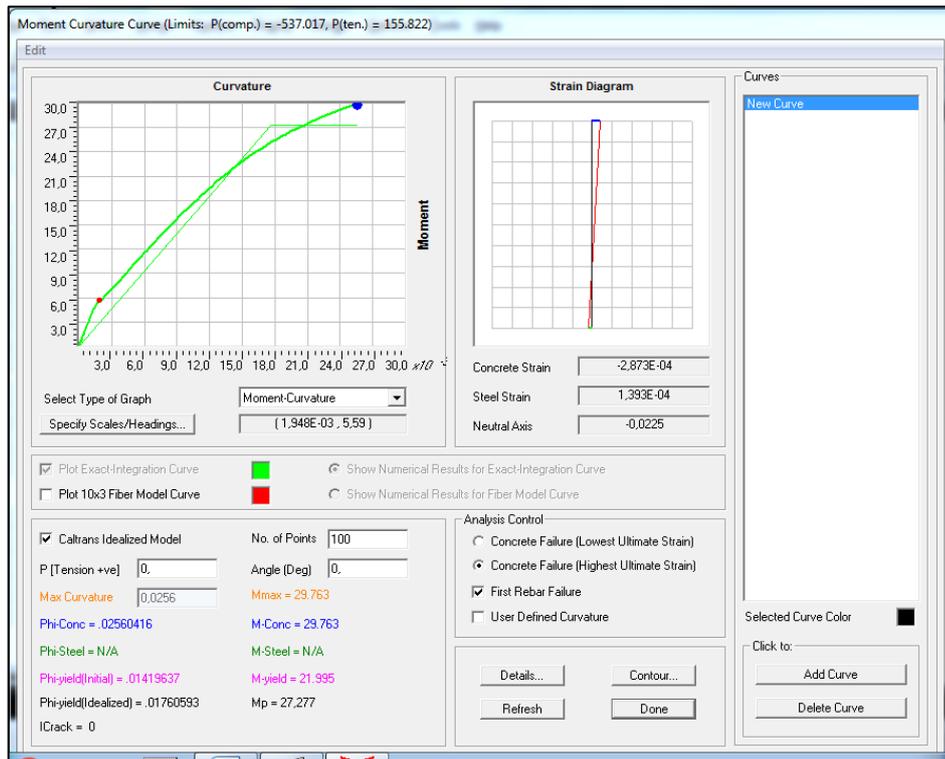


Figura 4.7 – Posicionamento do potenciômetro durante o ensaio do elemento.

De acordo com a Figura 4.8, foi verificado que o concreto alcançou o encurtamento máximo em torno de 3,5%, e o aço alongou até 2,11%, logo, pode-se perceber a baixa ductilidade desta seção. Também, a linha neutra apresentou um deslocamento para baixo, demonstrando o valor negativo de -0,0116, com isso, a armadura longitudinal contribuiu pouco devido a mesma está superarmada, visto que esta foi armada no domínio 3, 4.

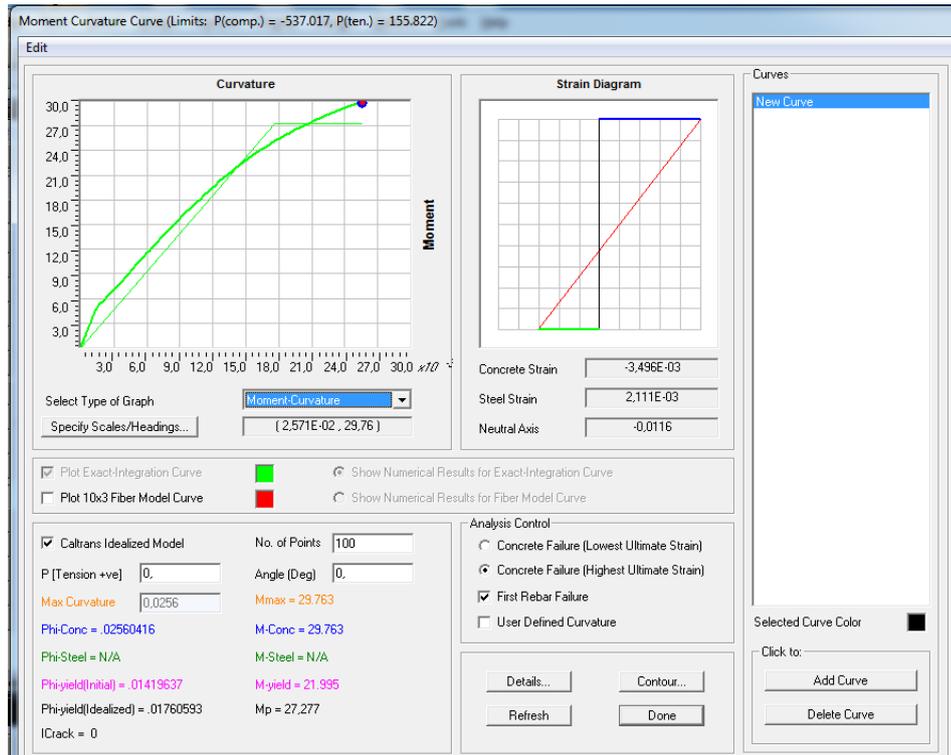


Figura 4.8 – Posicionamento do potenciômetro durante o ensaio do elemento.

Com a análise da evolução das tensões da seção, segundo Figura 4.9, percebeu-se que a armadura longitudinal alcançou uma menor faixa de tensões com relação ao concreto, pois esta foi considerada superarmada para garantia que o elemento estrutural romperia por tensão de cisalhamento. Deste modo, esta consideração, foi preponderante para as possíveis contribuições que adições de microfibras de vidro e poliéster daria à resistência aos esforços de cisalhamento em vigas de concreto armado objeto deste estudo.

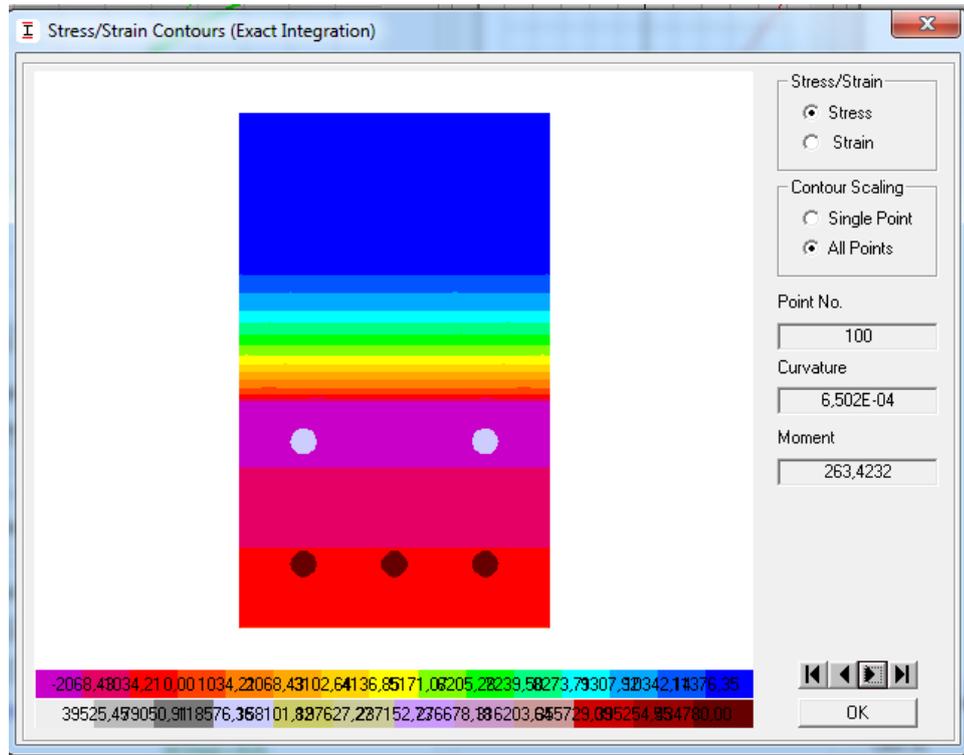


Figura 4.9 – Posicionamento do potenciômetro durante o ensaio do elemento.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com as pesquisas realizadas, foram constatados benefícios que as microfibras de vidro e poliéster proporcionam ao concreto convencional. Com isso, neste capítulo serão expostos os principais resultados encontrados.

5.1 Respostas à flexão das vigas

Com a finalidade de verificar a contribuição que as microfibras de vidro e poliéster demonstraram com suas respectivas adições ao concreto, compararam-se os resultados do cortante x deslocamento, cortante x deformação do concreto, cortante x deformação da armadura de flexão com os obtidos do Response 2000. Estas comparações foram utilizadas tendo como parâmetros a viga de referência x resultados fornecidos pelo response 2000 e viga de referência x vigas moldadas com adições de microfibras ao concreto.

5.1.1 Análise comparativa entre VR e Response 2000

De acordo com as figuras 5.1 a 5.3, verificou-se que houve uma diferença quando se comparou os dados como deslocamento vertical e deformação do concreto obtido pela viga de referência ao fornecido pelo response 2000. Este atingiu resultados melhores para o cortante máximo, isto é, próximo de 78 KN, enquanto a viga de referência apresentou 70 KN, bem como, um aumento em relação deslocamento e deformação do concreto. Isto se deu pelo fato que o programa Response 2000, que tem como característica resposta mais rápida de análise de seção, obteve melhores resultados devido à distribuição dos estribos estarem a cada 10 cm ao longo de toda a viga, com isso, a parcela V_{sw} resistida pela armadura de cisalhamento contribuiu para uma maior resistência, enquanto que na VR está com a mesma distribuição em relação as distância entre os estribos modelados no Response 2000, porém sua disposição era somente em 2/3 do elemento.

Já para a deformação da armadura longitudinal, os resultados demonstraram uma proximidade, isto confirma que o aço CA 50 estava de acordo com as características de inerentes a sua constituição.

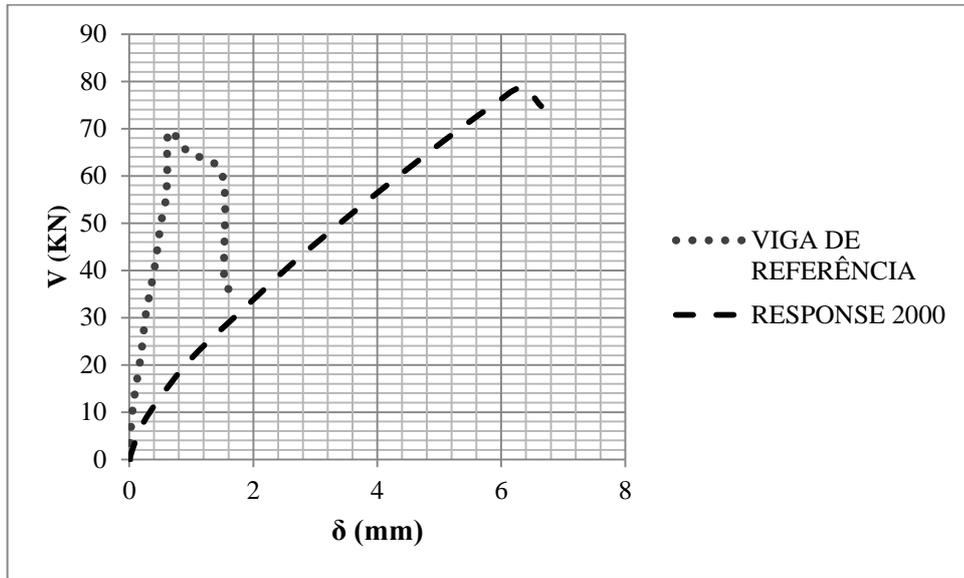


Figura 5.1 - Deslocamento vertical – VR/Response 2000.

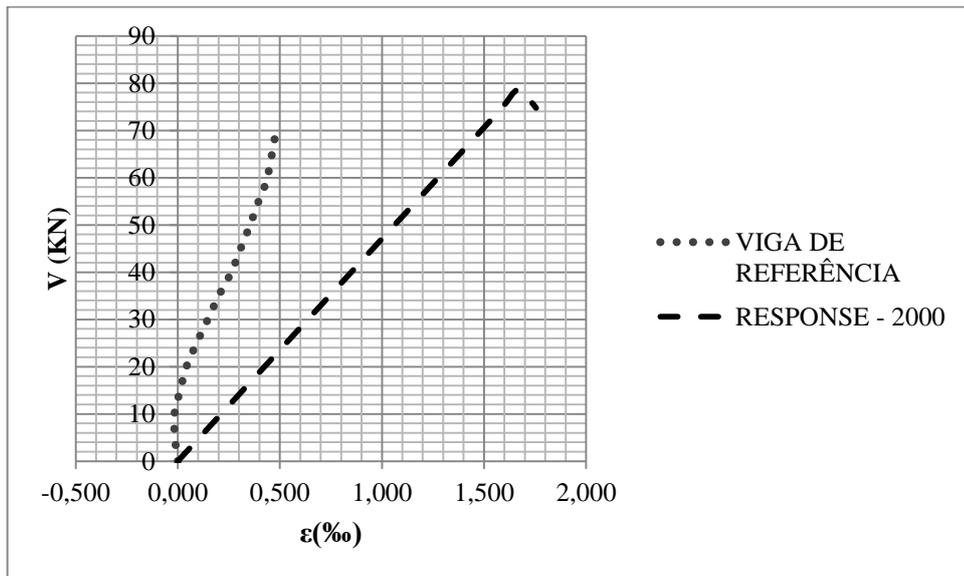


Figura 5.2 - Deformação no concreto – VR/Response 2000.

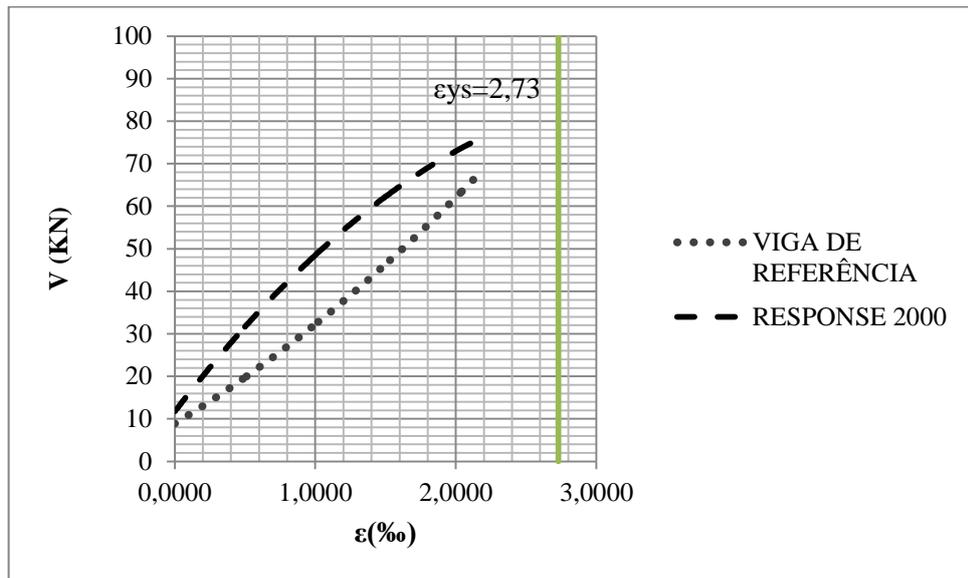


Figura 5.3 - Deformação na armadura de flexão – V/Response 2000.

5.1.2 Análise comparativa entre VFV01 e VR

Conforme visto nas Figuras 5.4 a 5.6, a VFV01 com percentual de 0,024%, demonstrou grande contribuição em relação ao deslocamento vertical, deformação no concreto e deformação na armadura longitudinal. Esta contribuição foi constatada ao perceber que as fibras servem como ponte de transferência de tensões, diminuindo a concentração das referidas tensões nas extremidades da fissura, assim, obteve uma maior carga resistente ao cisalhamento. Reforça que, a pós-fissuração a carga foi caindo de forma lenta e as microfibras impediram que as fissuras tivessem propagação mais facilitada.

Por sua vez, a viga de referência sem adição de fibra teve um comportamento predominante frágil ou não linear.

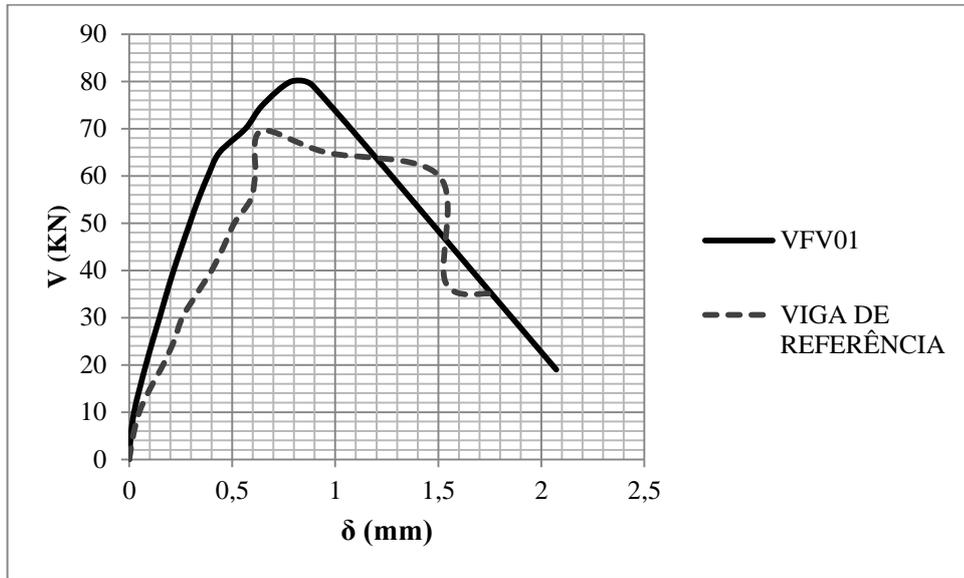


Figura 5.4 - Deslocamento vertical – VFV01/VR.

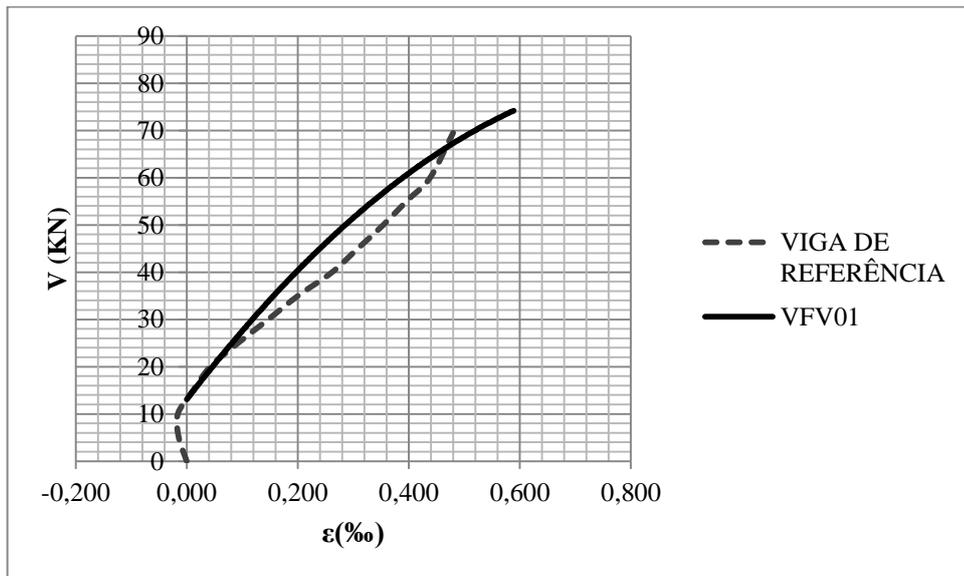


Figura 5.5 - Deformação no concreto – VFV01/VR.

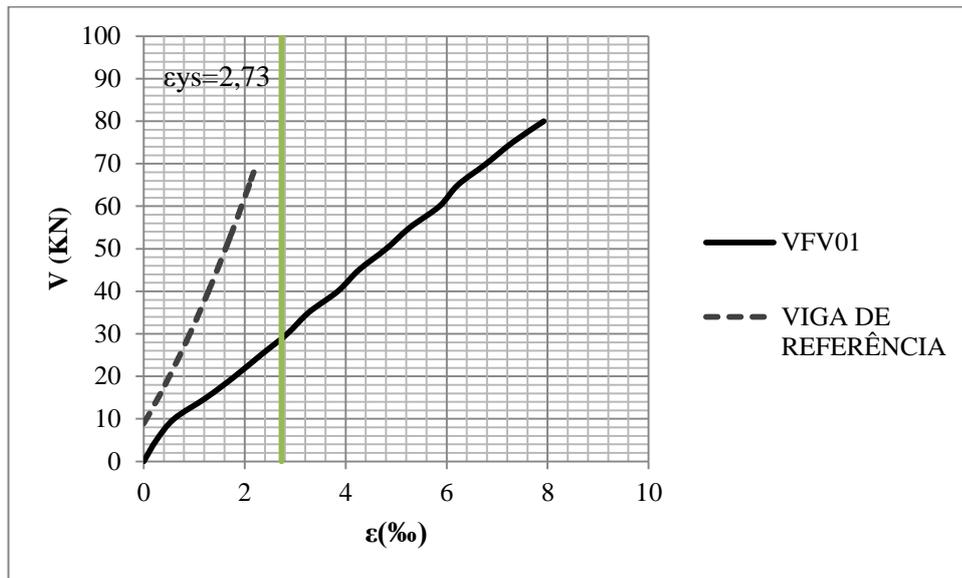


Figura 5.6 - Deformação na armadura de flexão – VFV01/VR.

5.1.3 Análise comparativa entre VFV02 e VR

Segundo a Figura 5.7 a 5.9, a VFV02 com percentual de 0,036%, apresentou a carga resistente ao cisalhamento e o deslocamento vertical um pouco mais baixa que da VR. Isto foi devido a problemas na dosagem e durante o ensaio destrutivo no laboratório do LEC, a ancoragem da armadura longitudinal foi ineficiente, pois a parcela V_d devida ao efeito de pino da armadura longitudinal contribui na resistência ao cisalhamento, com isso, ocasionou uma redução da capacidade que a mesma poderia suportar.

Em relação a deformação do concreto é possível verificar que a VFV02 apresentou um comportamento mais dúctil que a VR, e ainda a deformação da armadura longitudinal, para VFV02, a sua armadura de flexão atingiu a capacidade resistente para que seu escoamento pudesse ocorrer.

Reforça que o pós-pico ou pós-fissuração a carga foi caindo de forma lenta e as microfibras impedia que as fissuras tivessem propagação mais facilitada.

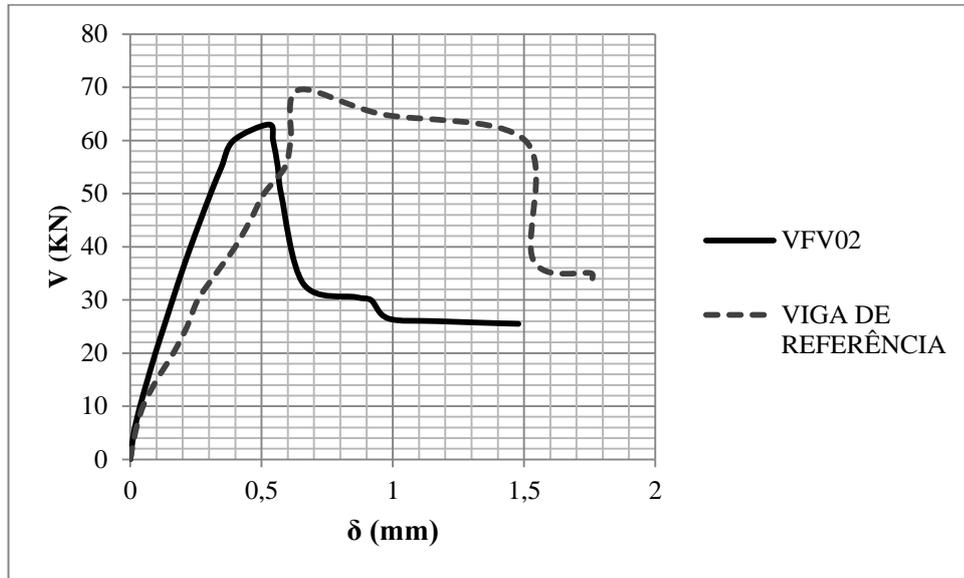


Figura 5.7 - Deslocamento vertical – VFV02/VR.

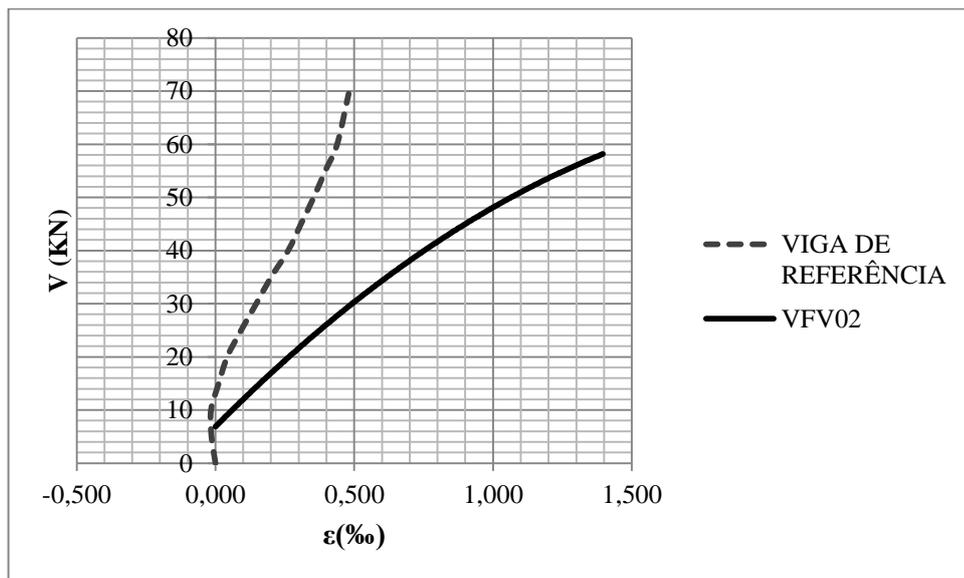


Figura 5.8 - Deformação no concreto – VFV02/VR.

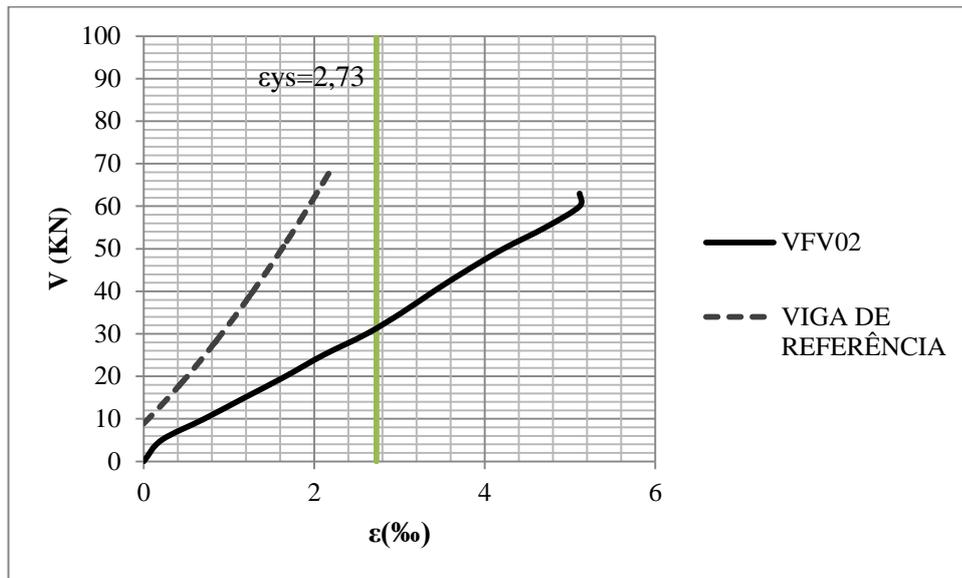


Figura 5.9 - Deformação na armadura de flexão – VFV02/VR.

5.1.4 Análise comparativa entre VFV03 e VR

De acordo com as figuras 5.10 a 5.12, a VFV03 com o percentual de 0,048%, demonstrou que a carga resistente ao cisalhamento foi muito próxima da obtida pela VR. Para o deslocamento vertical, deformação do concreto e deformação da armadura longitudinal, constatou que foi gerada grande contribuição, podendo inferir que esta ocorrência foi devido a distinção que a VFV03 apresenta adição de microfibras na constituição do concreto e a VR tem ausência das mesmas. Também, estas fibras servem como ponte de transferência de tensões, diminuindo a concentração das referidas tensões nas extremidades da fissura, assim, obteve uma maior carga resistente ao cisalhamento.

E ainda levando em consideração a deformação da armadura longitudinal, para VFV03, a sua armadura de flexão atingiu a capacidade resistente para que seu escoamento pudesse ocorrer.

Reforça que o pós-pico ou pós-fissuração a carga foi caindo de forma lenta e as microfibras impedia que as fissuras tivessem propagação mais facilitada.

Por sua vez, a viga de referência sem adição de fibra teve um comportamento predominante frágil ou não linear.

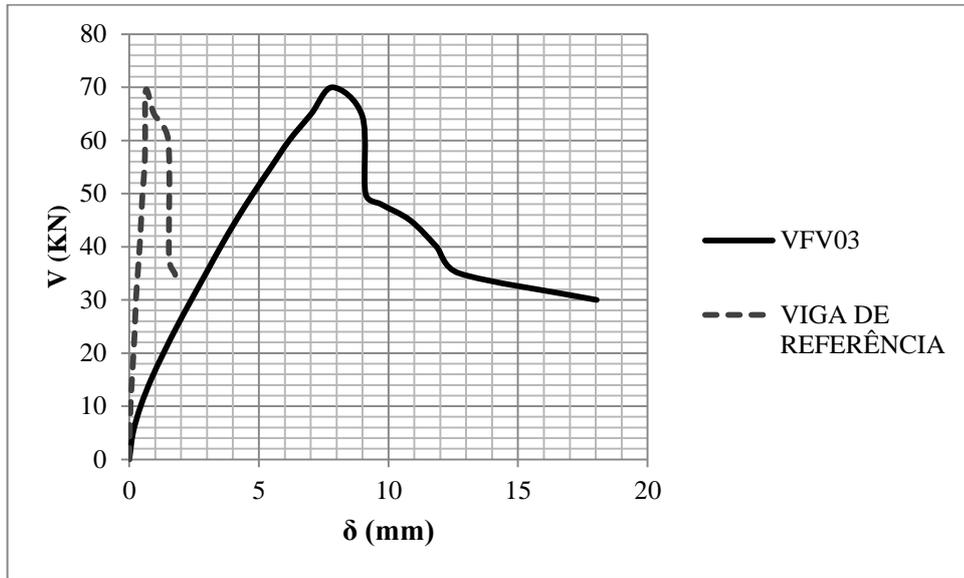


Figura 5.10 - Deslocamento vertical – VFV03/VR.

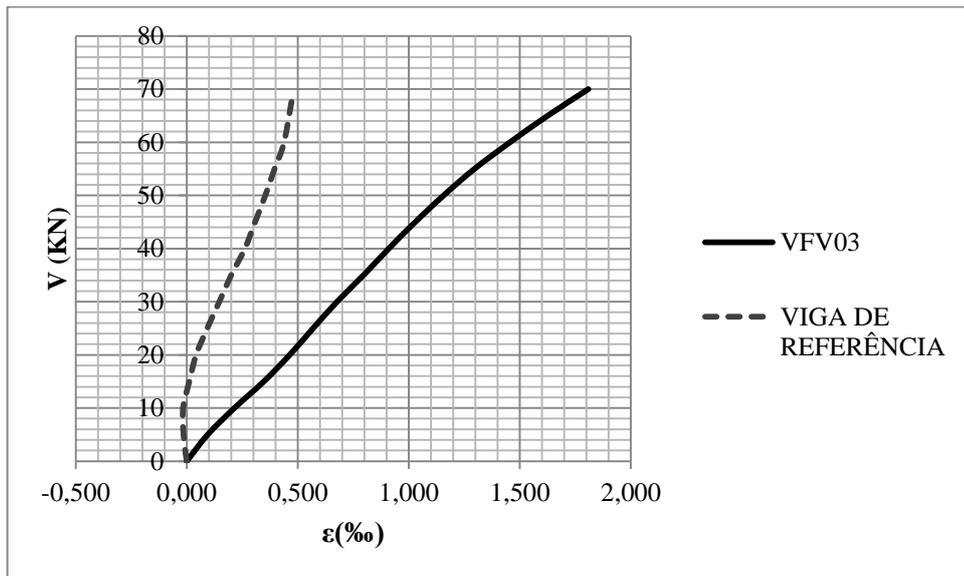


Figura 5.11 - Deformação no concreto – VFV03/VR.

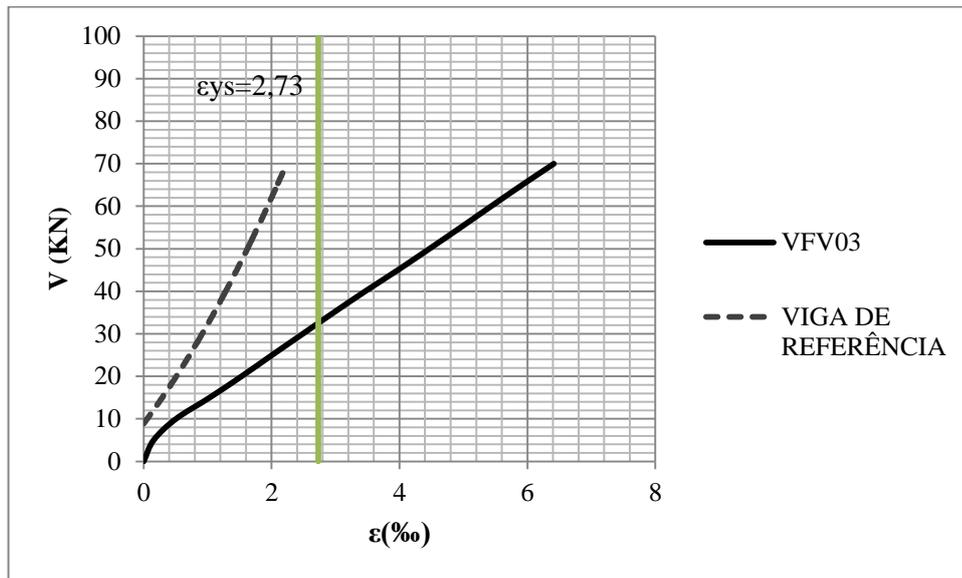


Figura 5.12 - Deformação na armadura de flexão – VFV03/VR.

5.1.5 Análise comparativa entre VFP01 e VR

Segundo as figuras 5.13 a 5.15, a VFP01 com o percentual de 0,024%, apresentou cortante máximo cerca de 10 KN menor quando comparado a VR e deslocamento vertical foi bem próximo, isto foi ocasionado devido a porcentagem de fibra por m³ de concreto ainda está abaixo do necessário para obter ganho/contribuição para a resistência ao cisalhamento do elemento estrutural objeto de estudo, isto é, em vigas.

Por sua vez, em relação a deformação do concreto foi verificado que a VFP01 apresentou um comportamento mais dúctil que a VR e ainda para deformação na armadura de flexão, para VFP01, a sua armadura de flexão atingiu a capacidade resistente para que seu escoamento pudesse ocorrer, já a VR sem fibras não atingiu.

Também cita que devido esta fibra ter dimensões maiores, densidade maior e se distribuírem em múltiplas direções e espalham em milhares de microfibras quando se compara a microfibras de vidro, esta demonstrou um deslocamento vertical melhor do que a VFV01 e um pouco melhor que a VFV02 para a deformação do concreto. É de suma importância salientar, que durante o ensaio verificou-se que as cargas demoravam um pouco para diminuir quando comparado aos das fibras de vidro no pós-pico ou pós-fissuração. E constatou que o rompimento não foi abrupto, isto é, não apresentou um comportamento predominantemente frágil ou não linear.

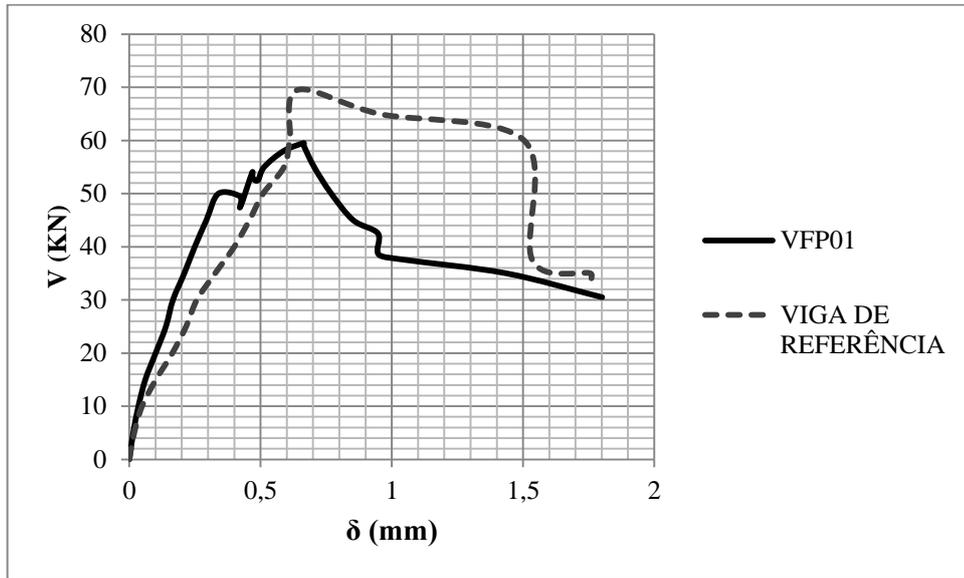


Figura 5.13 - Deslocamento vertical – VFP01/VR.

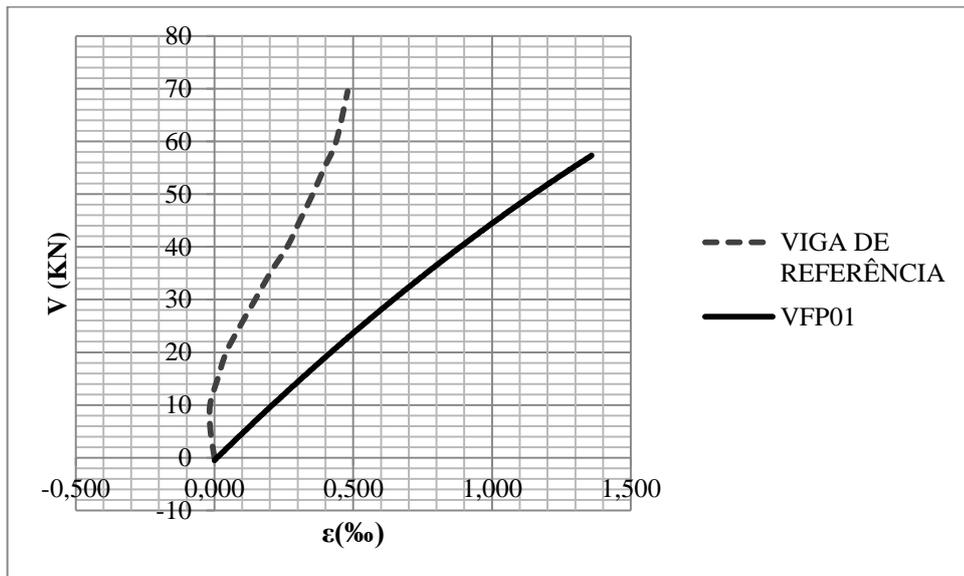


Figura 5.14 - Deformação no concreto – VFP01/VR.

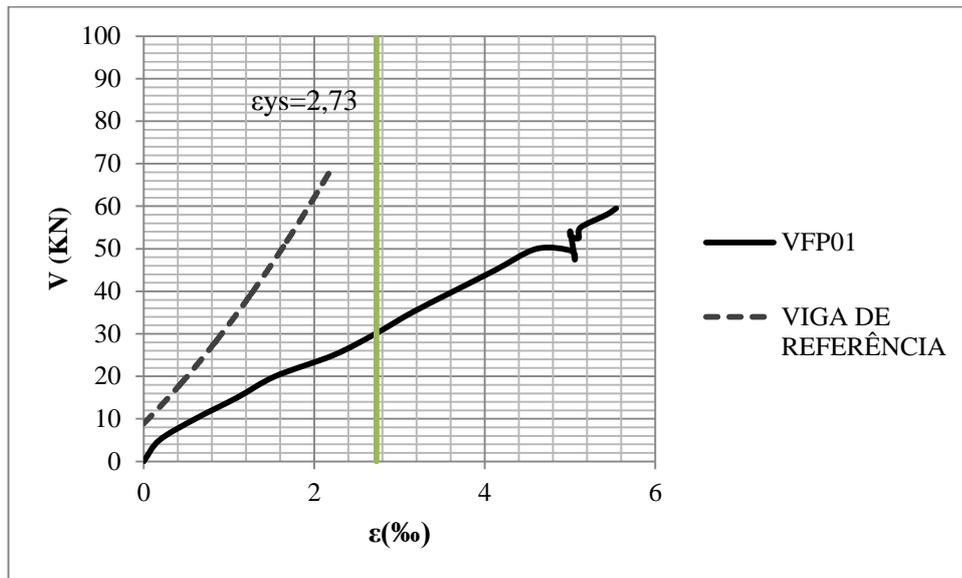


Figura 5.15 - Deformação na armadura de flexão – VFP01/VR.

5.1.6. Análise comparativa entre VFP02 e VR

Segundo as figuras 5.16 a 5.18, a VFP02, com o percentual de 0,036%, demonstrou uma contribuição significativa, isto é, aproximadamente de 15 KN a mais que a VR, assim, confirma que com o aumento das microfibras também teve um aumento na carga resistente ao cisalhamento da VFP02 quando se compara com a VFP01. Estas fibras servem como ponte de transferência de tensões, diminuindo a concentração das tensões nas extremidades da fissura.

Por sua vez, em relação a deformação do concreto foi verificado que a VFP02 apresentou um comportamento mais dúctil que a VR e ainda para deformação na armadura de flexão, para VFP02, a sua armadura de flexão atingiu a capacidade resistente para que seu escoamento pudesse ocorrer, já a VR sem fibras não atingiu.

Reforça que o pós-pico ou pós-fissuração a carga foi caindo de forma lenta e as microfibras impedia que as fissuras tivessem propagação mais facilitada. Por sua vez, a viga de referência sem adição de fibra teve um comportamento predominantemente frágil ou não linear.

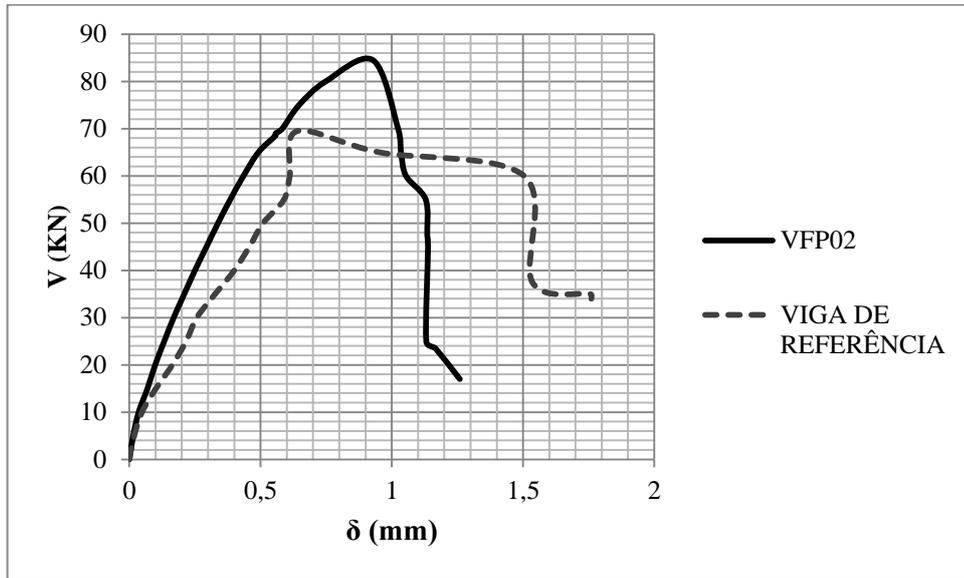


Figura 5.16 - Deslocamento vertical – VFP02/VR.

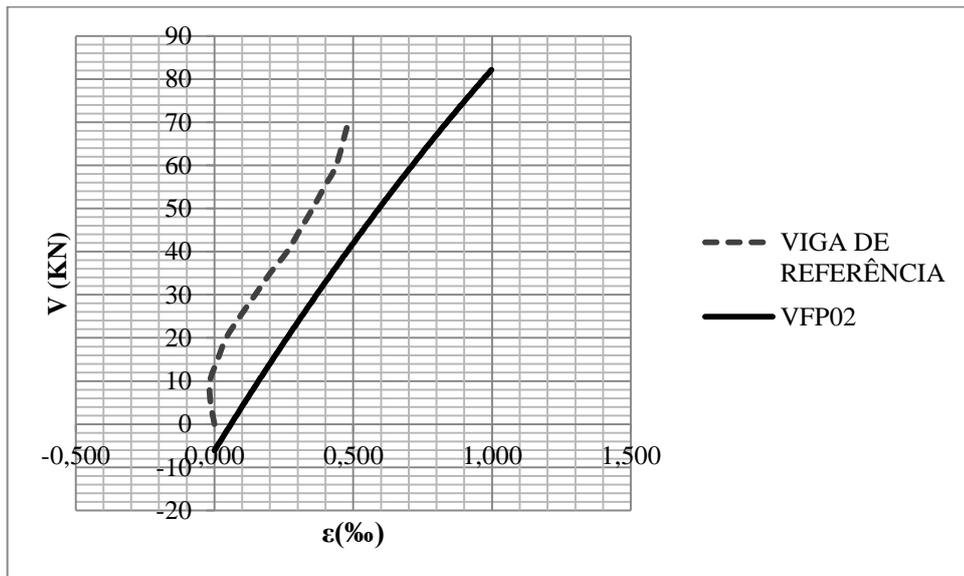


Figura 5.17 - Deformação no concreto – VFP02/VR.

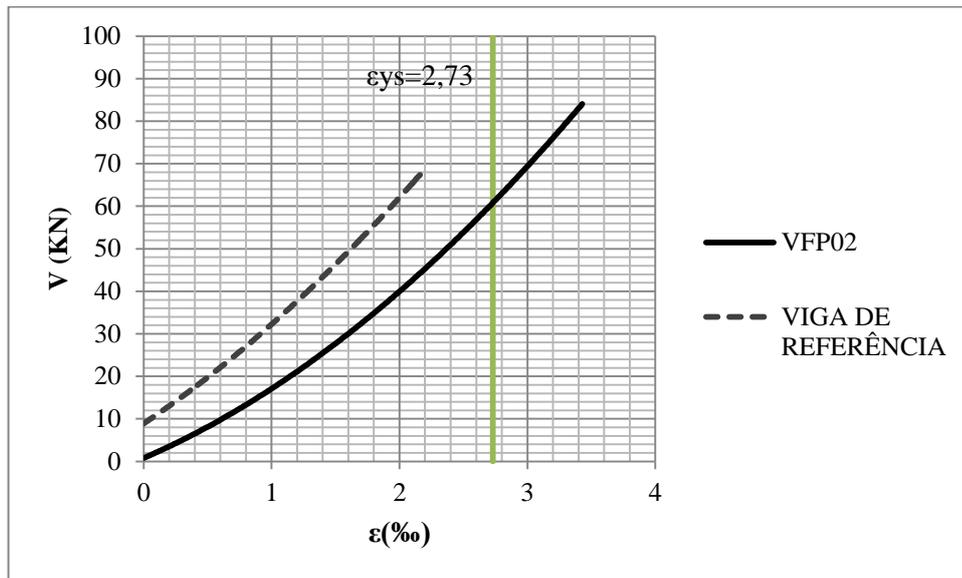


Figura 5.18 - Deformação na armadura de flexão – VFP02/VR.

5.1.7. Análise comparativa entre VFP03 e VR

Conforme as figuras 5.19 a 5.21, a VFP03, com o percentual de 0,048%, demonstrou um menor cortante máximo e em consequência a menor resistência ao cisalhamento do que a VR e deslocamento vertical um pouco maior do que a referida.

Por sua vez, para a deformação do concreto, foi verificado que a VFP03 apresentou um comportamento mais dúctil que a VR e ainda para deformação na armadura de flexão, para VFP03, a sua armadura de flexão atingiu a capacidade resistente para que seu escoamento pudesse ocorrer, já a VR sem fibras não atingiu.

Reforça que o pós-pico ou pós-fissuração a carga foi caindo de forma lenta e as microfibras impedia que as fissuras tivessem propagação mais facilitada.

Por sua vez, a VFP03, seu uso torna-se inviável devido as seguintes fatores: menor resistência ao cisalhamento quanto comparado a VR e as demais vigas com adição de poliéster, bem como, maior dificuldade de moldagem e maior custo econômico.

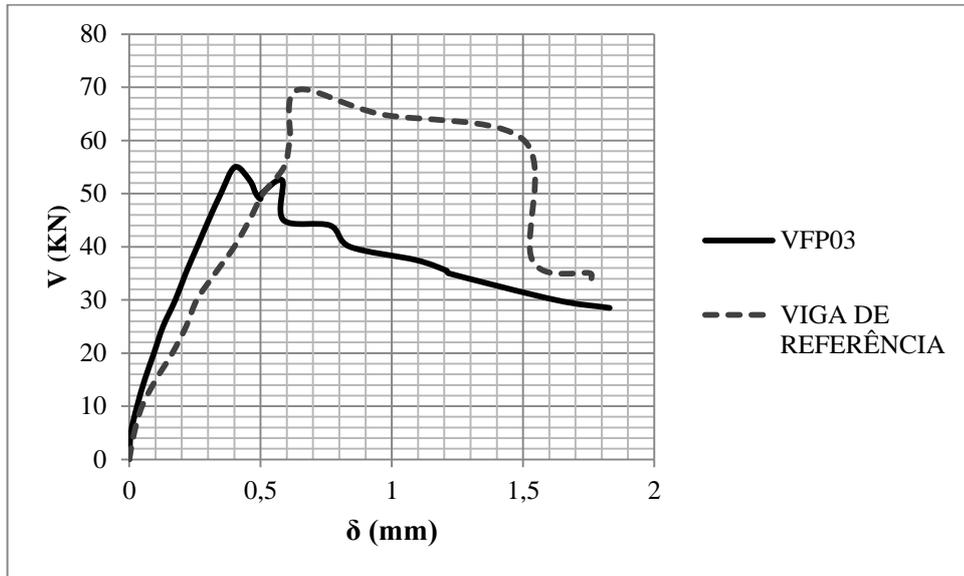


Figura 5.19 - Deslocamento vertical – VFP03/VR.

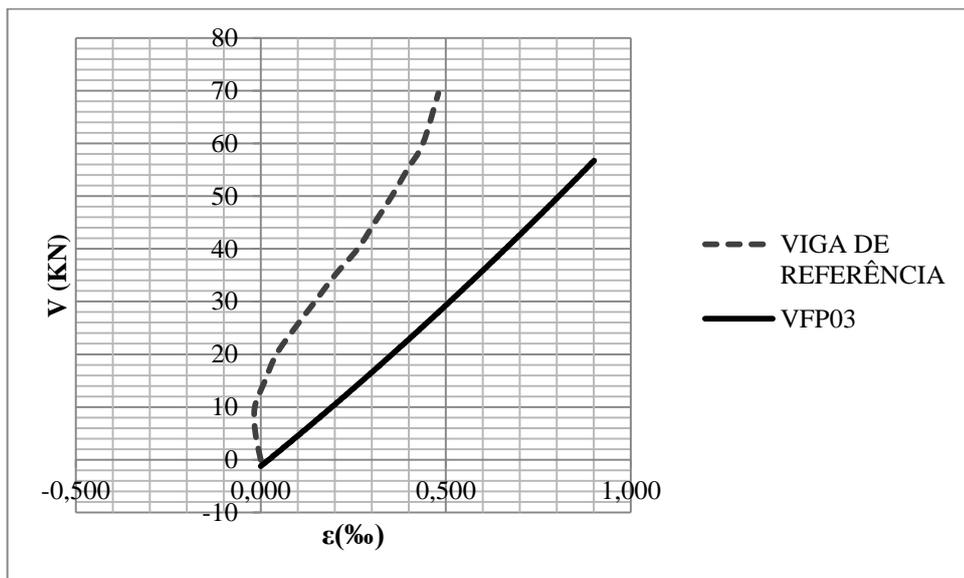


Figura 5.20 - Deformação no concreto – VFP03/VR.

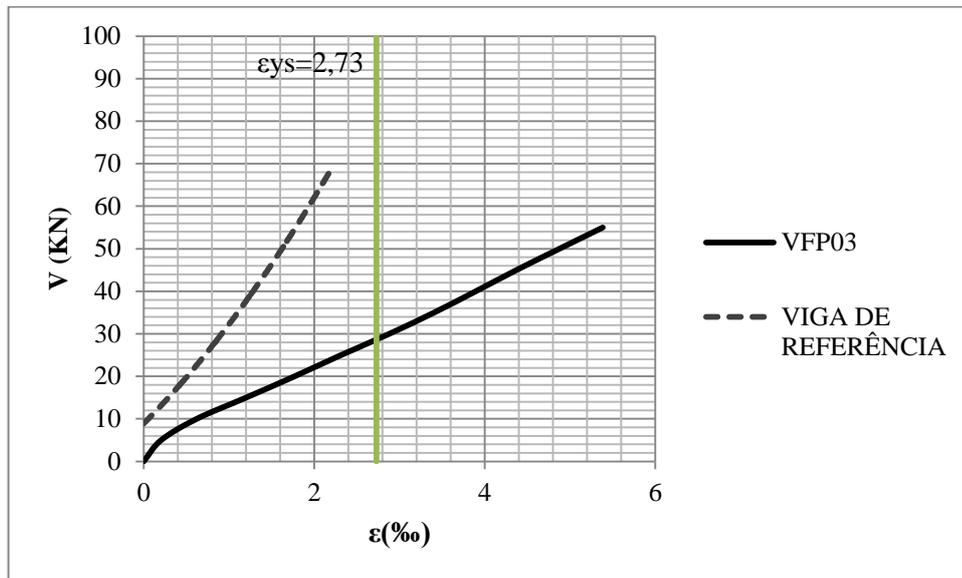


Figura 5.21 - Deformação na armadura de flexão – VFP03/VR.

5.2 Análises comparativas entre as vigas

5.2.1. Deslocamento vertical

Conforme resultados verificados nas Figuras 5.22 e 5.23, estes em relação ao cortante (V) máximo atingiram para VFP01 e VFP03, bem como a VFV02 mais baixo que a VR, e para a VFV03 foi praticamente o mesmo valor que a VR, já para VFP02 e VFV01 demonstraram valores maiores para o cortante (V) máximo que a VR.

Em relação ao deslocamento vertical no meio do vão (δ), as VFP01, VFP02, VFP03, VFV01 e VFV02 atingiram deslocamentos próximos ao da VR, porém para a VFV03 foram bem maiores que todos os demais, incluindo a VR. Assim, para a VFV03, apresentou uma maior resistência e ductilidade que às mesmas, podendo-se inferir que tal ocorrência se deu devido a uma maior presença de fibras nestas vigas e dimensões menores do que quando se compara com a VFP03 que apresenta o mesmo percentual de fibras, porém as dimensões desta são maiores.

Também, em posses desses valores, infere-se que a VFV03 teve um melhor comportamento em relação ao pós-pico ou pós-fissuração que todas as citadas anteriormente e atingiu uma resistência de cisalhamento muito boa, em torno de 70 KN. Sendo que, para as VFV01 e VFP02 foi constatado que estas tiveram um comportamento bem melhor em relação ao cortante (V) máximo.

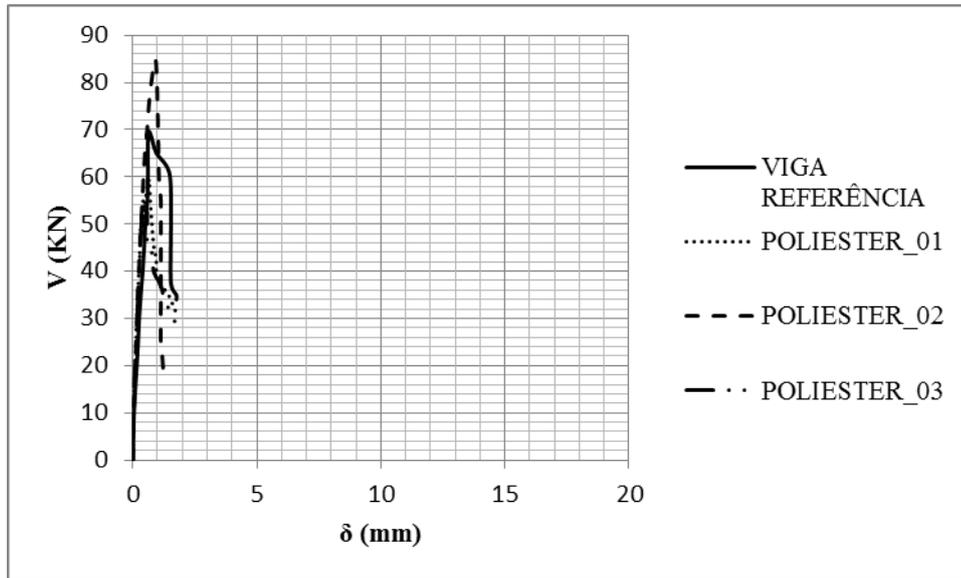


Figura 5.22 - Deslocamento vertical – VR/VFP01, VFP02 e VFP03.

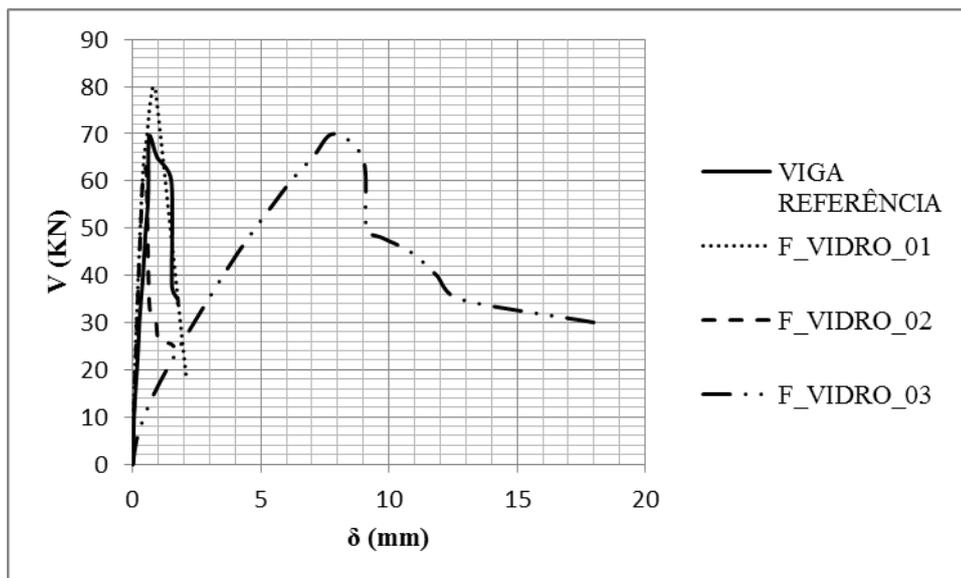


Figura 5.23 – Deformação vertical – VR/VFV01, VFV02 e VFV03.

5.2.2 Deformações do concreto

Com as análises referentes as Figuras 5.24 e 5.25, verificou-se que ao comparar a VFV03 teve um comportamento de forma geral bem melhor que todas as demais em relação a deformação do concreto, pois esta atingiu valores de deformação do concreto um pouco maior de 1,8%. Também, foi verificado que no pós-pico ou pós-fissuração a máxima quantidade de fibras da VFV03 contribuiu como barreira para a passagem das fissuras, logo, infere-se que

esta obteve um comportamento do ponto de vista de segurança, moldagem do elemento estrutural bastante relevante aos estudos que envolvem as adições de fibras no concreto estrutural, porque estudos que versam nessa área de adição de fibras de maneira geral são pequenos. Reforça que os estudos são ainda mais poucos desenvolvidos quando envolvem a adição de microfibras de vidro e poliéster.

Já para as vigas com adição de microfibras de poliéster, foi diagnosticado que, a VFP02 teve um comportamento em relação ao cortante (V) máximo bem melhor que as VFP01 e VFP03. Logo, infere-se que essa com um percentual médio adotado obteve um comportamento do ponto de vista de segurança, moldagem do elemento estrutural e economia bastante relevante, pois a mesma atingiu a maior resistência ao cisalhamento de aproximadamente de 80 KN, e uma deformação do concreto de 1,0‰, com isso, maior para as fibras de Poliéster e de VR. Importante citar que, do ponto de vista da deformação do concreto ($\epsilon\%$), a VFP01 atingiu próximo de 1,4‰, assim, maior para as vigas com adição de poliéster e segundo melhor deformação do concreto juntamente com a VFV02.

Logo, a utilização da VFV03 e VFP02 dependerá da escolha que o projeto estrutural necessitar, isto é, maior resistência ao cisalhamento com uma boa deformação do concreto utiliza-se a VFP02, já quando para um comportamento pós-fissuração melhor e com resistência ao cisalhamento muito boa pode utilizar a VFV03. A isto reforça que, todas as vigas com adições de microfibras de poliéster e vidro tiveram vantagens em comparação a de VR, quer seja em relação ao aumento da resistência de cisalhamento, na contribuição do pós-pico com as deformações do concreto e deslocamento maiores, ou mesmos quando se têm as duas características.

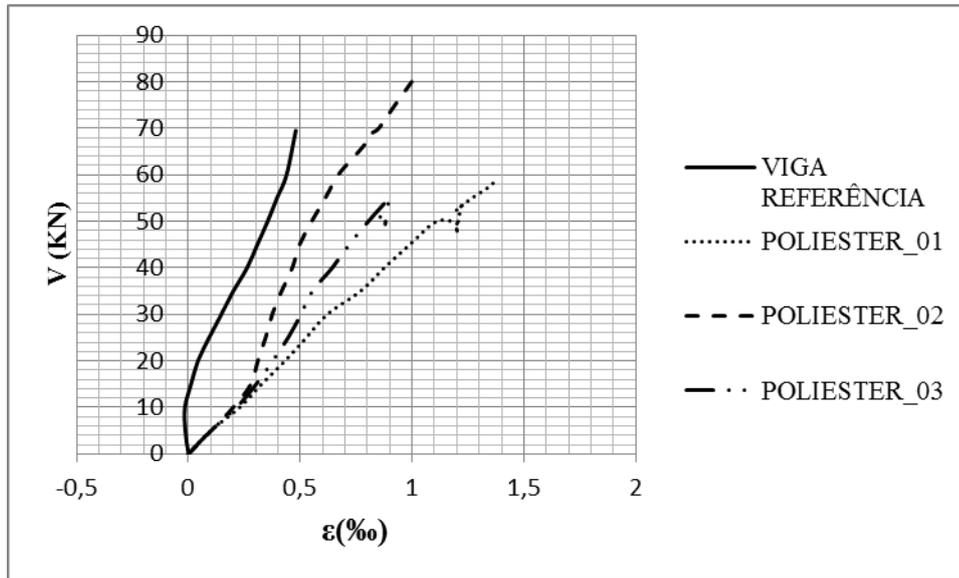


Figura 5.24 - Deformação no concreto – VR/VFP01, VFP02 e VFP03.

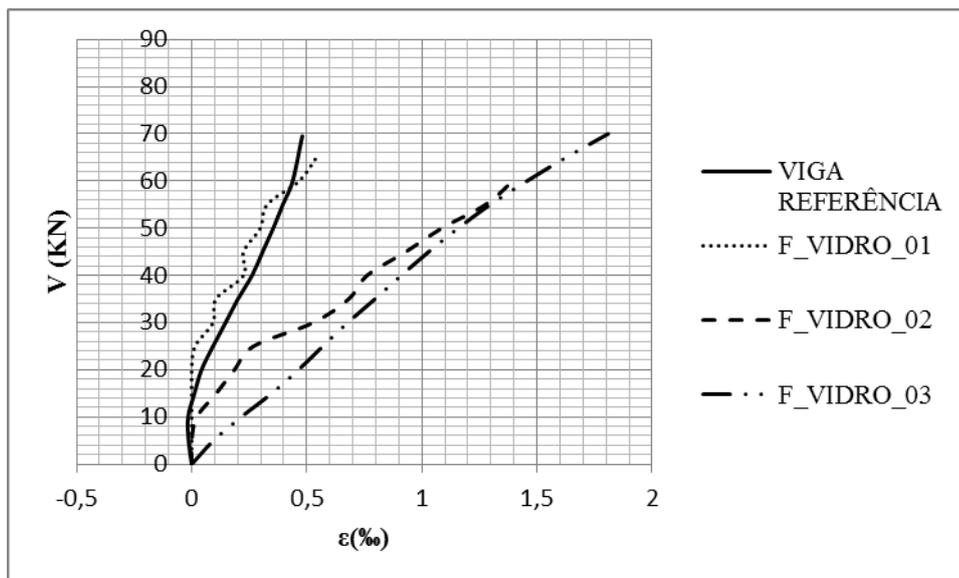


Figura 5.25 - Deformação no concreto – VR/VFV01, VFV02 e VFV03.

5.2.3. Deformações da armadura de flexão

Conforme as análises das Figuras 5.26 e 5.27, verificou-se com relação ao gráfico cortante (V) x deformação na armadura de flexão ($\epsilon\%$), que todas as vigas com adições de microfibras de vidro e poliéster obtiveram o escoamento da armadura após atingir a capacidade máxima resistente. Com isso, constata-se que as resistências que as fibras

proporcionaram ao concreto contribuíram para que as armaduras de flexão escoasse, assim, o concreto passa ter comportamento dúctil ou pseudo-dúctil.

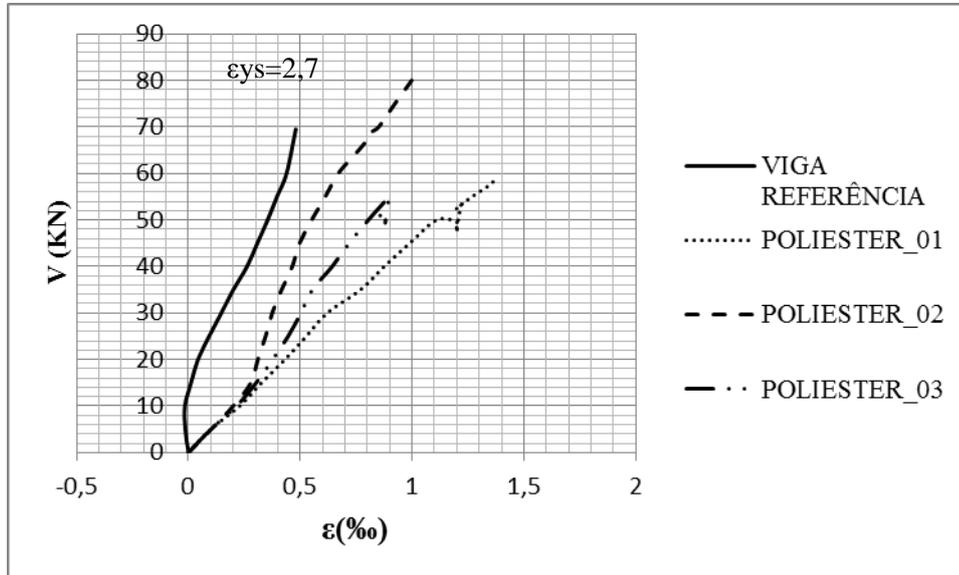


Figura 5.26 - Deformação na armadura de flexão – VR/VFP01, VFP02 e VFP03.

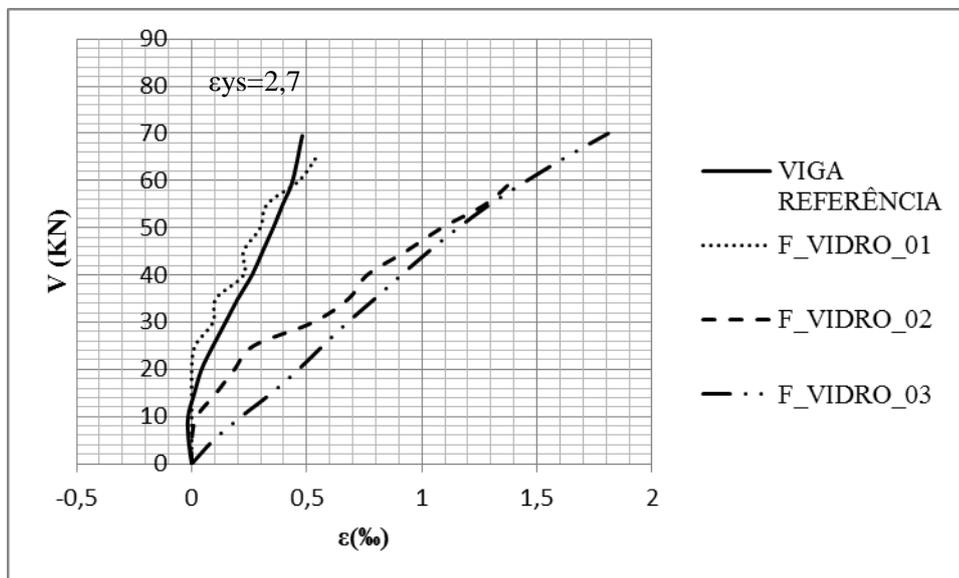
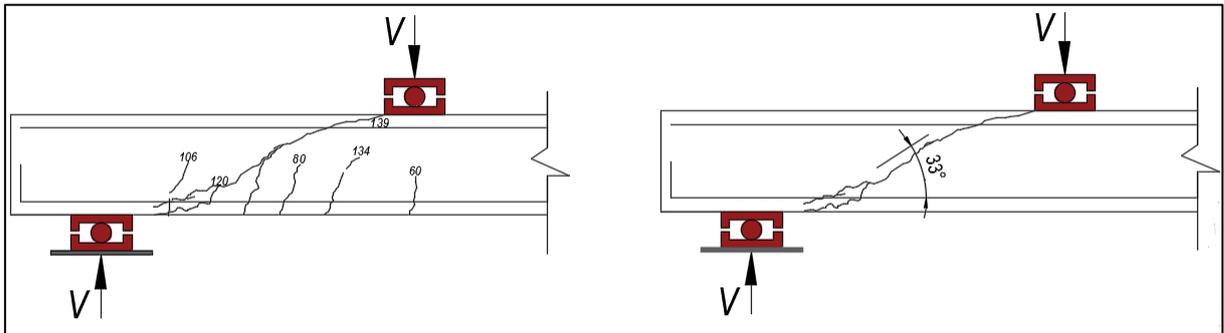


Figura 5.27 - Deformação na armadura de flexão – VR/VFV01, VFV02 e VFV03.

5.3 Mapas de fissuração e modo de ruptura

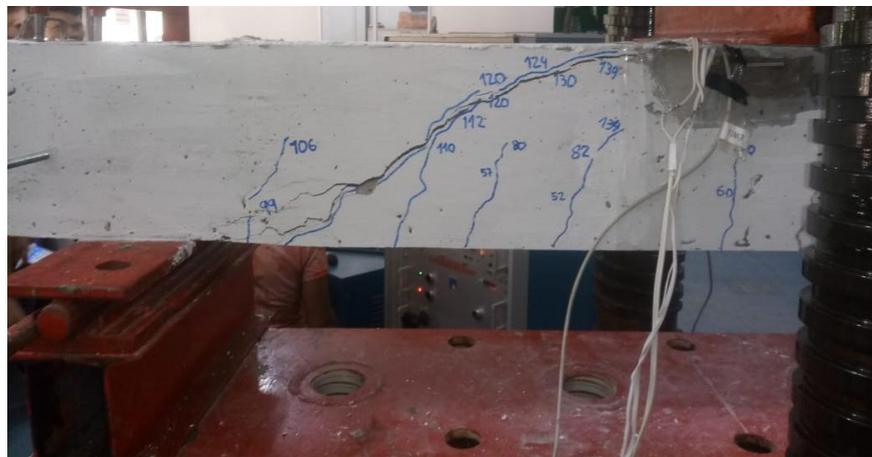
As figuras 5.28 a 5.34 mostram os aspectos quanto a pós-ruptura ou pós-fissuração das vigas ensaiadas na série completa. Observou-se que todas as vigas romperam por cisalhamento, sendo tais rompimentos ocorreram por ruptura sem estribo, especificamente,

por tração diagonal, sendo que este ocorre logo após a formação das fissuras da flexão, que são fissuras inclinadas, provenientes de uma tração diagonal, ocorrendo nas seções intermediárias entre os apoios e o centro do vão, porque a tensão principal de tração supera a resistência à tração do concreto. É importante salientar que quando ocorre geralmente em vigas protendidas, esse tipo de fissura leva ao rompimento brusco sendo proveniente da ação concomitante da flexão e força cortante.



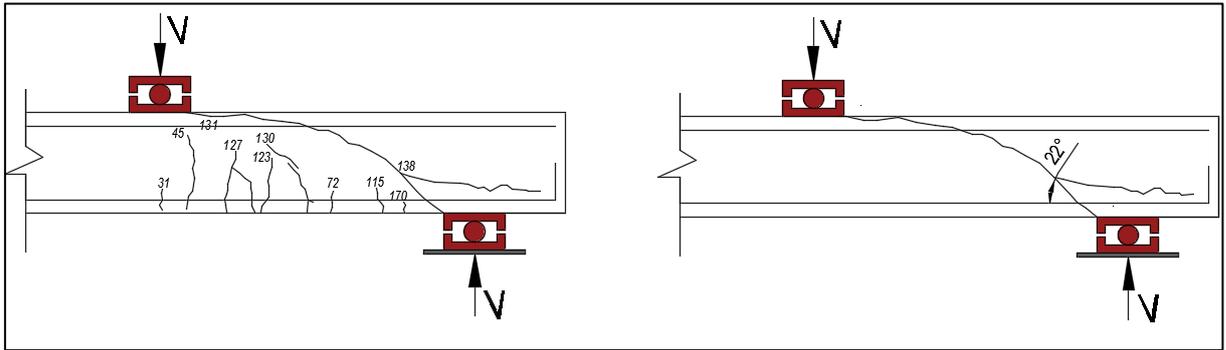
a) Mapa de fissuração

b) Superfície de ruptura



c) Viga após o ensaio

Figura 5.28 - Aspecto pós-ruptura da VR.



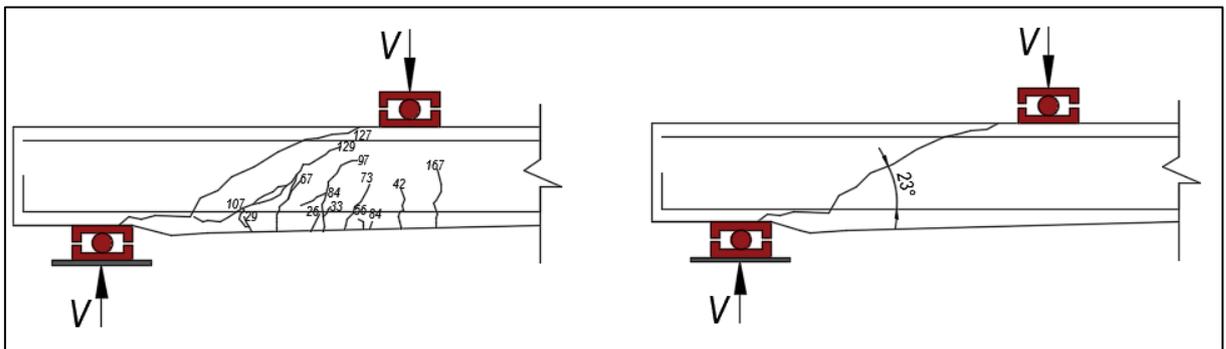
a) Mapa de fissuração

b) Superfície de ruptura



c) Viga após o ensaio

Figura 5.29 - Aspecto pós-ruptura da VFV01.



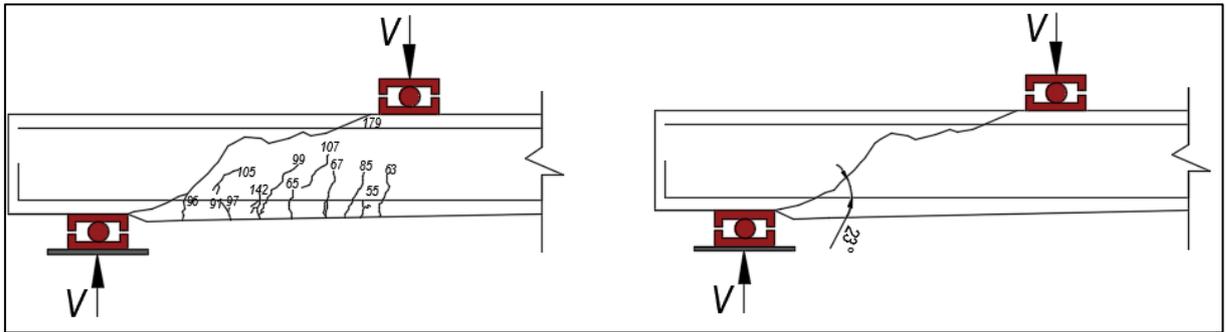
a) Mapa de fissuração

b) Superfície de ruptura



c) Viga após o ensaio

Figura 5.30 - Aspecto pós-ruptura da VFV02.



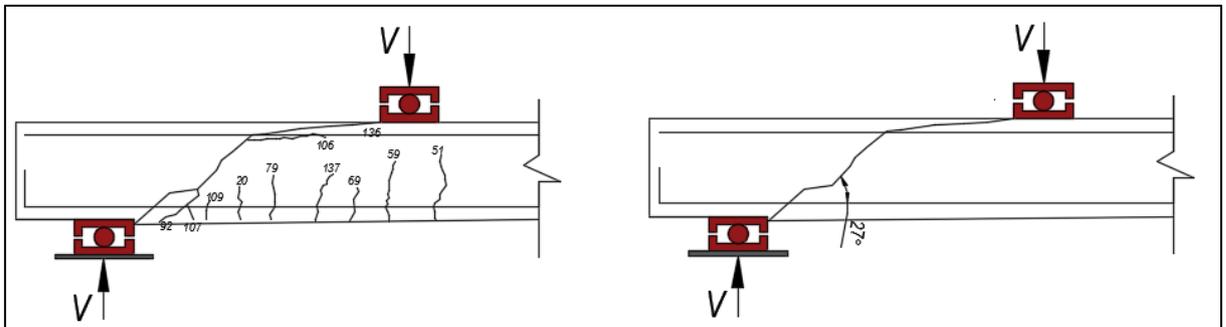
a) Mapa de fissuração

b) Superfície de ruptura



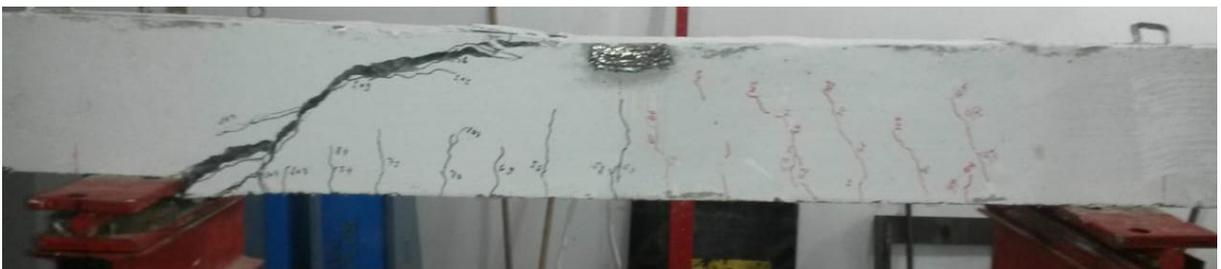
c) Viga após o ensaio

Figura 5.31 - Aspecto pós-ruptura da viga de vidro 03.



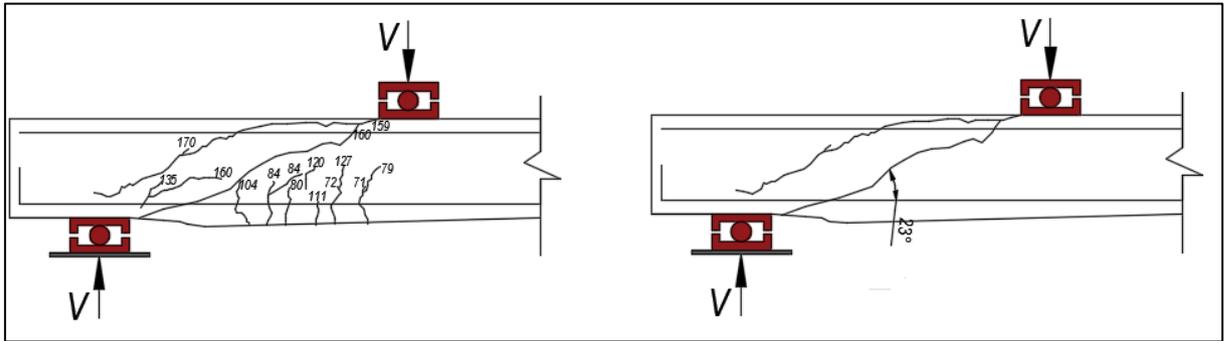
a) Mapa de fissuração

b) Superfície de ruptura



c) Viga após o ensaio

Figura 5.32 - Aspecto pós-ruptura da viga de poliéster 01.



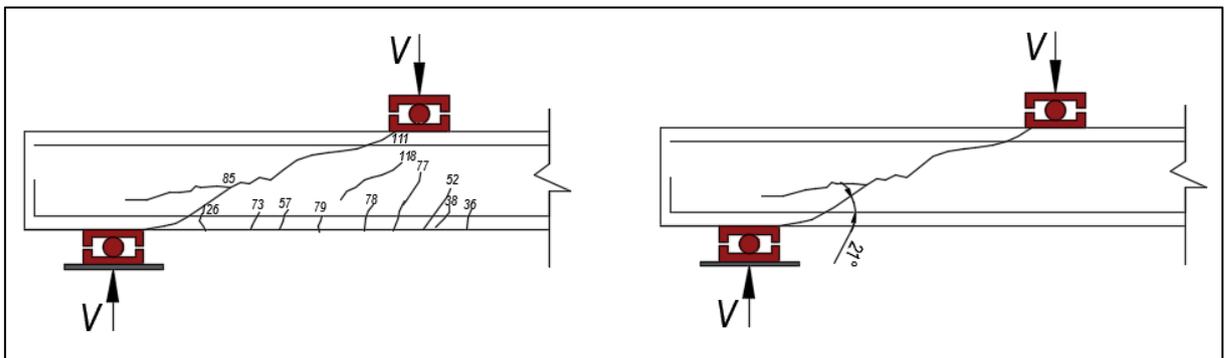
a) Mapa de fissuração

b) Superfície de ruptura



c) Viga após o ensaio

Figura 5.33 - Aspecto pós-ruptura da viga de poliéster 02.



a) Mapa de fissuração

b) Superfície de ruptura



c) Viga após o ensaio

Figura 5.34 - Aspecto pós-ruptura da viga de poliéster 03.

5.4 Cargas de rupturas dos elementos

Com a Tabela 5.1, têm-se as resistências obtidas pelas vigas ensaiadas, com isso, foi necessário realizar comparação entre as mesmas com as resistências à flexão para cada viga objeto de análise, isto é devido a observância do quanto as cargas últimas das referidas se aproximam do limite da resistência à flexão, e bem como a comparação da carga última com a resistência da viga de referência, com o objetivo de verificar o acréscimo de resistência que cada elemento com suas devidas aplicações de teores em massa de microfibras tenham alcançado.

Logo, levando em conta às cargas de ruptura, foi verificado que as vigas com aplicação de teor de microfibras de vidro e poliéster tiveram resistências no intervalo de 52,5 a 84,5KN, enquanto a viga de referência foi obtido uma carga máxima de 69,5 KN. Com isso, foi percebido que existiu um ganho de resistência com adições das fibras.

Assim, no primeiro momento, verificou-se que para a adição de fibras de vidro o ganho de resistência foi decrescente, e isto infere-se que com o aumento do percentual de fibras de vidro há uma redução da resistência V_u da referida fibras. Em relação a VFV02, foi observado que houve uma queda da resistência (63 KN) acentuada quando de compara a VFV01 (80 KN) e VFV03 (70 KN), isto provavelmente foi devido problemas de concretagem, por exemplo, adensamento, uma vez que o adensamento foi manual. Em relação a V_u/V_{ref} , foi diminuindo conforme o teor de fibras aumentasse, assim, cita-se que a VFV01 demonstrou melhor ganho, que as demais com adição de microfibras de vidro.

Por sua vez, no segundo momento, com adição de microfibras de poliéster, percebe-se teve um aumento significativo da resistência última (V_u) à medida que o teor de fibras aumentava, porém para a VFP01 (59,5 KN) houve uma queda de resistência, situação que possivelmente pode está relacionada a problemas na concretagem, como por exemplo, o adensamento e para a VFP03 (52,5 KN) também teve uma queda na resistência última (V_u), porém, isto ocorreu devido o aumento de fibras prejudicasse a concretagem, isto é, houve dificuldade de adensamento dos mesmos, mesmo utilizando adensador mecânico, com isso, não houve uma homogeneidade completa ou eficiente dos materiais constituintes. Sendo importante salientar, que foi verificado que o elemento concreto estava poroso.

Portanto, mesmo com os problemas de concretagem das vigas VFV02 e VFP01 e do alto teor de fibras da viga VFP03, pode-se inferir que houve contribuição com a aplicação de

teores de fibras de vidro, como para a viga VFV01 e VFV03 e também com aplicação de teores de fibras de poliéster como para VFP02 quando se compara essas três últimas a viga de referência (VR), assim, conferindo contribuição na aplicação de fibras utilizadas neste estudo.

Tabela 5.1 – Cargas de rupturas dos elementos.

Viga	V_u (KN)	V_u/V_{flex}	V_u/V_{ref}
VR	69,5	0,599	1,000
VFV01	80,0	0,689	1,151
VFV02	63,0	0,543	0,906
VFV03	70,0	0,603	1,007
VFP01	59,5	0,513	0,856
VFP02	84,5	0,728	1,216
VFP03	52,5	0,452	0,755

De acordo com a Tabela 5.2, foi verificado que, a Norma Americana, ou seja, ACI 318 (2014), os resultados estavam mais distantes dos obtidos experimentalmente neste estudo, demonstrando um caráter bem conservador, prezando a segurança.

A Eurocode 2, foi constatado que os resultados foram o terceiro que mais se aproximou dos experimentais, contudo ainda bem distantes da Norma 6118/2014, para o modelo II e principalmente para o modelo I.,

Logo, a norma ABNT NBR 6118 (2014), o modelo II demonstrou-se mais conservador quando comparado ao o modelo I da referida norma, com isso, apresentou esse modelo, isto é, o modelo I resultados mais próximos dos experimentais, pois este possibilita uma variação até os 30°, sendo que elementos estruturais, ou seja, das vigas objeto de estudo, em comparação as demais normas analisadas, permite um ângulo mínimo de inclinação das bielas de 21,8°. Portanto, pode-se verificar essa proximidade por meio do ângulo de inclinação exercido pela VFV01 de 22°, VFV02 de 23°, VFV03 DE 23°, VFP01 de 27°, VFP02 de 23° e VFP03, cujo mesmo foi de 21°. Por sua vez, o modelo II tem como característica a fixação do ângulo de rompimento por cisalhamento aos 45°.

Tabela 5.2 – Cargas de rupturas dos elementos-comparação às normas.

Viga	$V_u / V_{NBR I}$	$V_u / V_{NBR II}$	V_u / V_{ACI}	V_u / V_{EC2}
VREF	3,02	3,31	5,92	4,38
VFV01	3,93	5,66	7,3	5,7
VFV02	2,60	3,61	5,2	3,77
VFV03	2,55	3,54	5,36	3,69
VFP01	2,46	3,04	4,92	3,57
VFP02	3,07	4,26	6,47	4,45
VFP03	2,06	3,08	4,21	2,98
Média	2,60	3,54	5,36	3,77
Desvio Padrão	0,556	0,854	0,953	0,807

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Considerações Gerais

Por meio deste estudo foram avaliadas as contribuições que a aplicação de teores de microfibras oferece para com relação aos esforços cisalhantes. Sendo apresentada uma revisão bibliográfica, que versa sobre os mecanismos que influenciam na resistência ao cisalhamento de elementos de concreto armado, sem e com adição de fibras. Esse referencial teórico contribuiu decisivamente na idealização e realização do programa experimental.

6.2 Considerações sobre os resultados dos ensaios

Mediante as análises dos resultados experimentais e computacional, têm-se a demonstrar as seguintes conclusões deste trabalho.

6.2.1. Ensaios experimentais dos corpos de prova

Conforme as (Tabelas 3.6), com os rompimentos dos corpos de provas, as resistências a compressão teve aumento significativo para praticamente todas as vigas com adição de microfibras de vidro e poliéster, porém, para a VFV01, foi um pouco menor, mas mesmo assim, ficou com valores perto dos 30 MPa. Assim, ao se comparar os dois tipos de fibras, a fibra de poliéster teve um comportamento melhor do que a fibra de vidro em relação a resistência à compressão. Logo, infere-se que tal resultado, deu-se devido essa fibra ter dimensões maiores, densidade maior e se distribuírem em múltiplas direções e espalham em milhares de microfibras quando se compara a microfibras de vidro. Importante salientar que a resistência à compressão das microfibras de vidro teve seu aumento crescente conforme o aumento de fibras. Já para a microfibra de poliéster teve aumento de resistência à compressão até a segunda viga, isto é, VFP02, depois disso a VFP03 diminuiu em relação a já citada, mas mesmo assim, maior que a VFP01.

Para a resistência a tração, todas as vigas VFV01, VFV02, VFV03, VFP01, VFP02 e VFP03 foram menores, porém como as fibras utilizadas são microfibras e apresenta resistência e módulo melhores que quando compara com matriz de cimento, conforme visto

na (Tabela 2.1) e (Tabelas 3.4 e 3.5), estas resistências à atração contribuem decisivamente na resistência ao cisalhamento, pois o rompimento foi na tração diagonal do concreto.

Outro fator importantíssimo para o aumento da resistência ao cisalhamento, é o módulo de elasticidade, este conforme (Tabela 3.6), foram menores para todas as vigas objeto de estudo, com isso, comprova que as deformações do concreto foram melhores que a viga de referência.

6.2.2. Ensaio experimentais das vigas

A necessidade de maiores estudos quanto a ruptura por cisalhamento em concreto, pois o mesmo apresenta um comportamento predominantemente frágil. Logo, para a minimização este efeito, este estudo foi realizado para demonstrar que o reforço fibroso pode ser usado como eficiência no controle e bem como na melhoria do desempenho ao cisalhamento em concretos estruturais. Sendo que, a resistência ao cisalhamento depende do tipo e geometria da fibra, orientação e fração volumétrica utilizada.

A partir dos resultados dos ensaios de rompimentos das vigas, como as fibras de vidro e poliéster têm maiores resistência e módulo quando se compara com a matriz de cimento, diante dos dados apresentados pelas tabelas mencionadas no Item 6.6.1, foi verificado contribuição para o aumento da resistência ao cisalhamento dos elementos estruturais.

Com base nos gráficos: cortante x deslocamento, cortante x deformação do concreto e cortante x deformação na armadura de flexão, foi confirmado que para maiores teores de fibras de vidro teve como resultado redução da resistência ao cisalhamento última, porém tiveram maiores deslocamentos, deformações do concreto e deformações na armadura de flexão a medida do aumento do teor de fibras, sendo que para a viga VFFV02 devido problemas na concretagem o valor ter caído além do esperado. Já para os teores de fibras de poliéster a medida que aumenta seu teor há um aumento considerável da resistência de cisalhamento última, com exceção do maior percentual usado da viga VFFP03 que prejudicou na concretagem da viga, contribuindo para a redução já mencionada. Também, ainda em relação as fibras de poliéster, a viga VFFP02 também teve um problema na concretagem e no rompimento da mesma, sendo este provocado por uma ancoragem ineficiente.

Com isso, obteve ganho na resistência ao cisalhamento de 15,1% para a VFV01 em relação a VR, e de 21,6% da VFP02 para a VR. Logo, teve um percentual de cada tipo de fibra que contribuiu para tal ganho na resistência ao cisalhamento, com isso, o concreto passou a admitir uma maior deformação permitindo que a armadura de flexão conseguisse trabalhar, atingindo o escoamento que contribuiu para o ganho já mencionado. A isto, reforça que em todas as vigas a deformação do concreto atingiu o patamar de escoamento da armadura de flexão.

Outro ponto observado foi que todas as vigas com adições de microfibras de vidro e poliéster contribuíram para estabilidade com relação ao pós-pico ou pós-fissuração, uma vez que, as fibras permitiram transferências de tensões, no qual permitiu ao elemento estrutural, ou seja, as vigas suportar uma resistência antes que as mesmas se rompam de forma abrupta, dessa forma, servindo como aviso sobre a utilização de estruturas. Sendo que, as VFV03 e VFP01 foram as que mais contribuíram para o citado em relação a cada tipo de fibras, e destas duas, a VFV03 atingiu os maiores deslocamento, deformação do concreto e deformação da armadura de flexão.

As VFV03 e VFP02 armadas com armadura de cisalhamento em 2/3 ao longo de suas respectivas vigas, com uma secção de 1/3 destinado ao rompimento, demonstraram indícios que podem ser utilizadas como substituição parcial das armadura de cisalhamento. Pois, a VFV03 atingiu uma deformação do concreto aproximadamente de 1,8‰, carga última de 70 KN, deslocamento vertical de 18 mm e deformação da armadura de flexão de 6,4‰, e a VFP02 atingiu uma deformação do concreto de 1,0‰, carga última de 84,5 KN, deslocamento vertical de 1,9 mm e deformação da armadura de flexão de 3,5‰, ambas atingiram o patamar de escoamento da armadura de flexão, quando se compara com a VR modelada no programa Response 200, armada em toda viga com armaduras de cisalhamento, sendo que esta atingiu uma deformação no concreto de aproximadamente de 1,65‰, carga última em torno de 80 KN, deslocamento vertical de aproximadamente de 6,4 mm e deformação da armadura de flexão próxima de 2,2‰, não atingindo o patamar de escoamento. Portanto, modelagem do elemento estrutural, ou seja, uma viga com características similares ao da viga de referência experimental possibilitou ainda que prelimitar que as vigas: VFV03 e VFP02 podem ser usadas como substituição parcial das armaduras de cisalhamento.

6.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Considerando a importância da divulgação deste estudo para a comunidade acadêmica, bem como a necessidade de maiores estudos que versem sobre a adição de fibras na composição do concreto, surge a necessidade de um aprofundamento neste tema, a surgir algumas possíveis propostas de trabalhos futuros:

- ✓ Realizar ensaios ao cisalhamento em elementos estruturais com aplicação de outros teores de fibras de vidro e poliéster, com a finalidade de se buscar teores ideais para a maximização dos ganhos realizados;

- ✓ Realizar ensaios de flexão em elementos estruturais com aplicação dos mesmos teores de fibras usadas neste estudo, com o objetivo de avaliação das referidas aos elementos estruturais submetidos a esses esforços;

- ✓ Realizar estudo a torção nos elementos estruturais, pois como um dos resultados deste estudo foi a substituição parcial da armadura transversal, logo, se sabe que os mesmos são dimensionados para resistir também a torção;

- ✓ Realizar ensaio experimental ao cisalhamento de vigas toda armada com estribos ao longo das mesmas para uma comparação efetiva com as vigas armada em apenas 2/3 das mesmas;

- ✓ Realizar estudo sobre diminuição das seções da armadura longitudinal, uma vez, que o concreto reforçado com fibras contribuiu para a o escoamento da armadura de flexão, pois a eliminação parcial ou total se torna inviável devido aos esforços localizados e a fluência ao longo do tempo.

- ✓ Realizar a modelagem computacional de um modelo genérico visando o comportamento de elementos de concreto armado sobre influências destas microfibras e de outras;

7. 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.

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, 2014.

_____. **NBR 7211: Especificação – Agregados para concreto.** Rio de Janeiro, Brasil, 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).

_____. **NBR 14931: Execução de estruturas de concreto – Procedimento.** (ABNT, 2004).

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

ASSUNÇÃO, J.W. Curvas de dosagem para concretos convencionais e aditivos confeccionados com materiais da região noroeste do Paraná. Florianópolis, Santa Catarina.

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

BENTZ, E.C. Sectional Analysis of Reinforced Concrete. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 2000.

BENTZ, E.C., COLLINS, Michael P. **User Manual – Response-2000, Shell-2000, Triax-2000, Membrane-2000**. Version 1.1. September 2001.

BAUCHEMIE, MC. **Construir é Cuidar**. Disponível em: <<http://www.mc-bauchemie.com.br/>>. Acesso em 03 de Janeiro de 2018.

CALDAS, B. G. (2014). **Estrutura sanduíche de matriz poliéster reforçado com tecido de sisal conformado por infusão a vácuo**. Salvador, Brasil.

CUNHA, G. D., S. Junior, H. G., Maia, M. E., & Pinto, J. D. **Estudo do concreto reforçado com fibra de aço e fibra de bambu**. Belo Horizonte, Minas Gerais.

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.

FIBRAS, M. M. **Fibras para concreto**. Disponível em: <<https://www.mmfibras.com/untitled-con8>>. Acesso em: 04 de Janeiro de 2018.

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.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/293811669_Concreto_com_fibras>. Acesso em: 20 de Outubro de 2018.

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

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1ª Edição, São Paulo: Editora Pini LTDA, 2008.

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)**. Florianópolis, 2008.

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

PRADO, D. M. (2006). **Avaliação experimental de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com laminados de CFRP por meio de análise estática e modal**. São Carlos, São Paulo.

SILVA, A. O. **Reforço à flexão de vigas de concreto de elevada Resistência por meio da colagem de Manta Polimérica Reforçado com Fibras de Carbono**. Campinas, São Paulo, 2001.

TAPAJÓS, L. S. **Cisalhamento em elementos de concreto armado com estribos desconectados**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará: 118 p.; Belém, Pará, Brasil; 2017.

TAVARES, D. H. **Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de GFRP**. São Carlos, São Paulo, 2006.

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

VELASCO, R. V. **Concretos autoadensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas**. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

SOUZA, G. T. **Dosagem experimental de concreto massa com adição de sílica ativa aplicado em barragem**. Tucuruí, Pará, 2017.