

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS CURTAS DE AÇO E DE
NYLON NO COMPORTAMENTO E NA RESISTÊNCIA AO
ESFORÇO CORTANTE EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO**

Carla Maria Montanari Gonçalves

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS CURTAS DE AÇO E DE
NYLON NO COMPORTAMENTO E NA RESISTÊNCIA AO
ESFORÇO CORTANTE EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO"**

Carla Maria Montanari Gonçalves

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. José Marcio Fonseca Calixto
DEES/UFMG - (Orientador)

Prof. Dr. Flávio Antônio dos Santos
CEFET/MG

Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguilar
DEMC/UFMG

Belo Horizonte, 26 de setembro de 2003

À Deus, que me ilumina e me guarda. Aos meus pais, Lourdes e Reinaldo, que tanto me apoiam. Aos meus filhos, Thales e Gabriel, que são a minha força e a minha vontade para vencer. Obrigado a todos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar sempre ao meu lado me iluminando e me dando forças para vencer os obstáculos.

Ao meu orientador José Márcio Fonseca Calixto pelos conhecimentos transmitidos e pela atenção dispensada a mim durante o período de trabalho.

Ao professor Fernando Amorim pela credibilidade, apoio e incentivo durante o processo de seleção.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas e aos colegas do curso de mestrado, em especial à Cristiane Barbosa, pelo carinho, amizade e presteza.

Aos funcionários do LAEES, Laboratório de Análise Experimental de Estruturas da UFMG, Claudinei, Geraldo e Ricardo, que tanto contribuíram na execução dos ensaios.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro.

À Precon Industrial S.A., que em busca de novas tecnologias, contribuiu com este trabalho, doando as vigas ensaiadas e concedendo suas instalações e mão de obra para a realização dos experimentos.

À equipe técnica do laboratório de materiais da Precon S.A., em especial ao engenheiro Osório José dos Santos e ao laboratorista Derci Diniz dos Santos, pela imensurável ajuda na definição do traço do concreto com fibras, fabricação das vigas e execução dos ensaios das propriedades mecânicas do concreto.

À minha amiga Gláucia pela amizade, apoio, incentivo e ajuda na elaboração da apresentação deste trabalho.

À minha querida prima Barbara pelas noites e dias passados, trabalhando juntas na edição deste trabalho.

À minha amiga Marcilene, que foi fundamental para que eu conseguisse concluir esta etapa, cuidando dos meus filhos durante minha ausência.

Às minhas irmãs, Eliane e Gisele, pelo amor, compreensão e reconhecimento.

SUMÁRIO

	Página
Lista de Tabelas	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Fotos	v
Notação	vi
Resumo	ix
1. Introdução	
1.1 Considerações preliminares	01
1.2 Justificativa	03
1.3 Objetivos	05
1.4 Apresentação dos capítulos	06
2. Revisão Bibliográfica	
2.1 Introdução	07
2.2 A influência das fibras no comportamento do concreto	08
2.3 Influência das fibras na resistência ao cisalhamento	11
3. Caracterização dos Materiais	
3.1 Introdução	21
3.2 Fibra	22
3.3 Aço	23
3.4 Concreto	27
3.4.1 Materiais Constituintes	27
3.4.1.1 Agregados	27

3.4.1.2	Cimento	29
3.4.1.3	Aditivo	29
3.4.2	Ensaio de Caracterização	29
3.4.2.1	Consistência (“Slump”)	30
3.4.2.2	Resistência à Compressão Uniaxial	30
3.4.2.3	Resistência à Tração na Flexão	31
3.4.2.4	Módulo de Elasticidade Estático Secante	31
3.4.2.5	Cisalhamento Direto	31
3.4.3	Ensaio Preliminares do Concreto	32
3.4.4	Resultados dos Ensaio Preliminares do Concreto	33
3.4.4.1	Consistência (“Slump”)	33
3.4.4.2	Resistência à Compressão Uniaxial	34
3.4.4.3	Resistência à Tração na Flexão	34
3.4.4.4	Resistência ao Cisalhamento Direto	35
3.4.5	Análise dos Resultados dos Ensaio Preliminares	35
4.	Características das Vigas e Procedimentos de Fabricação e Ensaio	37
4.1	Introdução	37
4.2	Características das Vigas	38
4.3	Fabricação das Vigas	42
4.4	Instrumentação	43
4.5	Ensaio das Vigas	44
4.6	Cálculo da Capacidade portante das Vigas segundo a Norma Brasileira, NBR 6118 (2003)	46
4.6.1	Ruptura por Flexão	46
4.6.2	Ruptura por Cisalhamento (Esmagamento da Biela Comprimida)	48
4.6.3	Ruptura por Cisalhamento (Ruína por Tração Diagonal)	49
5.	Resultados dos Ensaio	51
5.1	Introdução	51
5.2	Propriedades Mecânicas do Concreto	52
5.3	Resultados dos Ensaio das Vigas	52

5.3.1	Série 5	52
5.3.2	Série 6	56
5.3.3	Série 7	59
5.3.4	Série 8	62
5.4	Resumo dos Resultados Ensaios das Vigas	65
5.5	Resumo dos Resultados dos Ensaios Realizados por Vidal Filho (1999)	67
6.	Análise dos Resultados	68
6.1	Introdução	68
6.2	Trabalhabilidade do Concreto	69
6.3	Propriedades Mecânicas do Concreto	69
6.3.1	Resistência à Compressão Uniaxial	70
6.3.2	Resistência à Tração na Flexão	71
6.3.3	Módulo de Elasticidade Estático Secante	72
6.4	Fissuração	73
6.4.1	Carga de Fissuração Teórica	73
6.4.2	Análise dos Resultados	74
6.5	Relação Carga x Flecha	75
6.6	Efeito das Fibras na Resistência ao Esforço Cortante	78
6.7	Deformação na Armadura Longitudinal	83
6.8	Deformações no Concreto	85
6.9	Capacidade Resistente (Flexão e Cisalhamento)	87
6.9.1	Análise dos Resultados Experimentais	87
6.9.2	Comparação dos Resultados Teóricos e Experimentais	88
7.	Conclusões	91
7.1	Introdução	91
7.2	Conclusões	92
7.3	Sugestões para Pesquisas Futuras	95
	Referências Bibliográficas	97

Apêndice A	101
Resultados Experimentais - Deformações no Concreto, na Armadura Longitudinal e nos Estribos	101
Apêndice B	110
Resultados Experimentais – Deslocamentos Verticais	110

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
3.1 Propriedades Mecânicas das barras e fios de aço	25
3.2 Características dos agregados	27
3.3 Resultados dos ensaios preliminares – Compressão uniaxial	34
3.4 Resultados dos ensaios preliminares – Tração na flexão	34
3.5 Resultados dos ensaios preliminares – Cisalhamento direto	35
4.1 Características das vigas	40
4.2 Tensões e cargas de ruptura segundo a NBR 6118 (2003)	50
5.1 Propriedades mecânicas dos concretos empregados nas vigas	52
5.2 Resumo dos ensaios das vigas	66
5.3 Propriedades mecânicas do concreto na data de ensaio das vigas	66
5.4 Propriedades mecânicas dos concretos empregados nas vigas – Vidal Filho	67
5.5 Resumo dos ensaios das vigas – Vidal Filho	68
5.6 Propriedades mecânicas do concreto na data de ensaio das vigas – V. Filho	68
6.1 Propriedades mecânicas do concreto	71
6.2 Evolução da resistência à compressão	71
6.3 Evolução da resistência à tração na flexão	72
6.4 Evolução do módulo de elasticidade estático secante	73
6.5 Cargas de fissuração	75
6.6 Análise da ductilidade das vigas	78
6.7 Cargas de mobilização, escoamento e ruptura dos estribos	79
6.8 Esforço cortante resistido pelos mecanismos do concreto na ruptura das vigas	83
6.9 Resultados relativos à ruptura das vigas	88
6.10 Comparação dos esforços cortantes de ruptura teóricos e experimentais	90
A1 Deformações Viga V5A	103
A2 Deformações Viga V5B	104
A3 Deformações Viga V6A	105

A4 Deformações Viga V6B	106
A5 Deformações Viga V7A	107
A6 Deformações Viga V7B	108
A7 Deformações Viga V8A	109
A8 Deformações Viga V8B	110
B1 Deslocamentos verticais Viga V5A	112
B2 Deslocamentos verticais Viga V5B	113
B3 Deslocamentos verticais Viga V6A	114
B4 Deslocamentos verticais Viga V6B	115
B5 Deslocamentos verticais Viga V7A	116
B6 Deslocamentos verticais Viga V7B	117
B7 Deslocamentos verticais Viga V8A	118
B8 Deslocamentos verticais Viga V8B	119

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
3.1 Diagrama tensão-deformação do aço para barras com diâmetro 16 mm	24
3.2 Diagrama tensão-deformação do aço para fios com diâmetro 3,4 mm	24
3.3 Diagrama tensão-deformação do aço para fios com diâmetro 4,2 mm	25
3.4 Curva de regressão polinomial do aço para fios com diâmetro 3,4 mm	26
3.5 Curva de regressão polinomial do aço para fios com diâmetro 4,2 mm	26
3.6 Análise granulométrica dos agregados miúdos	28
3.7 Análise granulométrica dos agregados graúdos	28
3.8 Ensaio de cisalhamento direto	32
4.1 Características geométricas das vigas	38
4.2 Detalhe da armação das vigas	41
4.3 Instrumentação das vigas	43
4.4 Esquema de ensaio das vigas	45
4.5 Estados de deformação e tensão – Estado limite último	47
5.1 Viga 5A – Fissuração final	53
5.2 Viga 5B – Fissuração final	55
5.3 Série 5 – Relação Carga x Flecha no meio do vão	55
5.4 Viga 6A – Fissuração final	57
5.5 Viga 6B – Fissuração final	58
5.6 Série 6 – Relação Carga x Flecha no meio do vão	58
5.7 Viga 7A – Fissuração final	60
5.8 Viga 7B – Fissuração final	61
5.9 Série 7 – Relação Carga x Flecha no meio do vão	62
5.10 Viga 8A – Fissuração final	63
5.11 Viga 8B – Fissuração final	64
5.12 Série 8 – Relação Carga x Flecha no meio do vão	65
6.1 Relação Carga x Flecha no meio do vão (Vigas com estribos de 3,4mm)	77
6.2 Relação Carga x Flecha no meio do vão (Vigas com estribos de 4,2mm)	77

6.3	Relação Esforço cortante total x Tensão nos estribos (Vigas com estribos de 3,4mm)	80
6.4	Relação Esforço cortante total x Tensão nos estribos (Vigas com estribos de 4,2mm)	81
6.5	Relação Carga x Deformação da Armadura Longitudinal (Vigas com estribos de 3,4mm)	84
6.6	Relação Carga x Deformação da Armadura Longitudinal (Vigas com estribos de 4,2mm)	85
6.7	Relação Carga x Deformação do Concreto no meio do vão (Vigas com estribos de 3,4mm)	86
6.8	Relação Carga x Deformação do Concreto no meio do vão (Vigas com estribos de 4,2mm)	87

LISTA DE FOTOS

Fotos	Página
3.1 Fibra de Nylon (DUPONT) e Fibra de Aço (XOREX)	22
4.1 Detalhe de uma viga na posição de ensaio	45
5.1 Detalhe da viga após a ruptura	54
5.2 Detalhe da viga após ruptura	61

NOTAÇÃO

Letras Romanas

- A_s - área da seção transversal da armadura longitudinal tracionada
- A_{sw} - área da seção transversal das barras da armadura de cisalhamento
- a - distância do ponto de aplicação da carga concentrada até o apoio
- b - largura da viga
- b_w - largura da alma da viga
- d - altura útil da viga
- E_c - módulo de deformação longitudinal do concreto
- E_{cc} - módulo de deformação longitudinal do concreto convencional
- E_{cf} - módulo de deformação longitudinal do concreto com fibras
- E_s - módulo de deformação longitudinal do aço
- f_c - resistência à compressão do concreto
- f_{cc} - resistência à compressão do concreto convencional
- f_{cd} - resistência de cálculo do concreto à compressão
- f_{cf} - resistência à compressão do concreto com fibras
- f_{cj} - resistência média do concreto à compressão, para a idade de j dias
- f_{ck} - resistência característica do concreto à compressão
- f_{cis} - resistência ao cisalhamento do concreto
- f_t - resistência à tração do concreto
- f_{tc} - resistência à tração do concreto convencional
- f_{tf} - resistência à tração do concreto com fibras
- f_{tk} - resistência característica do concreto à tração
- f_y - resistência de escoamento do aço
- f_{yd} - resistência de cálculo do aço à tração
- f_{yk} - resistência característica do aço à tração

- h - altura da viga
- k - coeficiente
- M_{fis} - momento fletor de fissuração
- M_u - momento fletor último
- P_b - carga de ruptura da viga devido ao esmagamento da biela comprimida
- P_{cis} - carga de ruptura da viga devido à ruptura dos estribos (cisalhamento-tração)
- P_f - carga de ruptura da viga devido à flexão
- P_{fis} - carga de fissuração
- P_{fl} - carga correspondente à flecha admissível
- P_{fvf} - carga correspondente à primeira fissura de flexão observada
- P_{fvc} - carga correspondente à primeira fissura de cisalhamento observada
- P_{te} - carga correspondente ao acionamento dos estribos
- P_{rup} - carga de ruptura
- R_c - força de compressão no concreto
- R_s - força de tração no aço
- s - espaçamento
- s_f - espaçamento médio entre as fissuras
- V_b - esforço cortante correspondente ao esmagamento da biela comprimida de concreto
- V_{cis} - esforço cortante correspondente à ruptura da viga por cisalhamento-tração
- V_{exp} - esforço cortante experimental na ruptura da viga
- V_f - esforço cortante correspondente à ruptura por flexão
- V_t - esforço cortante total
- V_{teo} - esforço cortante teórico de ruptura da viga segundo a NBR 6118
- w - abertura das fissuras

Letras Gregas

- ε_y - deformação específica de escoamento do aço
- ε_{yd} - deformação específica de cálculo no escoamento do aço
- ε_s - deformação específica do aço
- ε_c - deformação específica do concreto à compressão
- γ_c - coeficiente de minoração da resistência do concreto
- γ_s - coeficiente de minoração da resistência do aço
- σ_c - tensão normal de compressão no concreto
- σ_s - tensão normal de tração na armadura
- τ_w - tensão convencional de cisalhamento na alma da peça, adotada pela NBR 6118 (2003)
- τ_{wu} - tensão de cisalhamento última (máxima) suportada pela biela comprimida de concreto, segundo a NBR 6118 (2003)
- τ_u - tensão de cisalhamento última
- τ_c - tensão de cisalhamento resistida pelo concreto
- τ_s - tensão de cisalhamento resistida pela armadura transversal
- ρ_w - taxa geométrica da armadura transversal
- σ_{sw} - tensão de tração nos estribos

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados de um estudo experimental sobre a influência de diferentes tipos de fibras curtas no comportamento e na resistência ao esforço cortante de vigas de concreto armado. As fibras diferem tanto no seu material base, aço (Xorex) ou nylon (Du Pont), como também em sua forma e comprimento. As vigas foram ensaiadas na condição de simplesmente apoiadas e submetidas a duas cargas concentradas equidistantes dos apoios. Ao longo dos ensaios foram medidas flechas no meio do vão e deformações tanto no concreto quanto nas barras longitudinais e estribos. É feito também uma análise comparativa com relação aos resultados obtidos no estudo realizado por VIDAL FILHO, no qual vigas de mesmas características, sem fibras e com fibras de aço Dramix, foram ensaiadas. A análise dos resultados dos ensaios revela um desempenho significativamente melhor das vigas com fibras de aço. Estas vigas tiveram menores espaçamentos entre fissuras e aberturas destas e conseqüente maior rigidez e capacidade portante. Para estas vigas, as fibras de aço se comportaram com uma armadura transversal adicional reduzindo as tensões nos estribos. Em alguns casos, as fibras de aço também modificaram o modo de ruptura das vigas: de cisalhamento para flexão. Portanto, neste estudo, as vigas com fibras de aço apresentaram um melhor desempenho em relação às vigas com fibras de nylon.

PALAVRAS CHAVE: Concreto, fibras, cisalhamento

ABSTRACT

The results of an experimental investigation of the effects of short fibers on the shear behavior and strength of simply supported reinforced concrete beams are presented. Steel (Xorex) and nylon (Du Pont) fibers, with different shapes as well as lengths and cross-sections, were used in the beams. Midspan deflections and strains on the concrete and on the longitudinal and transversal reinforcement were measured during the tests. A comparative analysis with respect to the results obtained by VIDAL FILHO, in which similar beams without and with Dramix Steel fibers were tested, is also presented. The test results indicate expressively the better performance of the beams made with steel fibers. These beams exhibited smaller crack width and spacing and consequently more stiffness and load carrying capacity. The results also show that the steel fibers improve the shear resisting mechanisms of the concrete represented by the aggregate interlocking and dowel action and behave as an additional transverse reinforcement, consequently reducing the stresses in the stirrups. In this study, the steel fibers employed had a better performance than the nylon ones.

KEYWORD: Concrete, fibers, shear.

1

INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Preliminares

O concreto é um material de construção muito atraente devido a sua adaptação a qualquer tipo de forma, sua resistência à compressão, sua rigidez, seu baixo custo e sua durabilidade. Porém, apresenta baixa resistência à tração e pequena capacidade de deformação, o que o torna um material frágil. A idéia de se reforçar a matriz frágil de concreto para torná-la mais homogênea e mais dúctil vem de muito tempo, mas ganhou impulso com o surgimento do concreto armado.

A introdução de fibras curtas, segundo FURLAN (1995), melhora as características do concreto com relação a ductilidade, a resistência a impactos e a fadiga, ao controle da fissuração, ao comportamento pós fissuração e, em alguns casos, a resistência à tração. TESUKA (1989) ressalta que algumas destas vantagens são sensíveis à quantidade e ao tipo de fibra adicionada.

De acordo com AGOPYAN (1991), as fibras, em quantidade, comprimento e formato adequados, podem incorporar à matriz de concreto deformações plásticas

significativas, adequando-a para o uso na Construção Civil, já que se pode alterar o comportamento pós-fissuração tornando menos súbita a ruptura do material.

No concreto existem microfissuras e quando ele é submetido a deformações de tração, a energia se concentra rapidamente nas extremidades dessas microfissuras, provocando o alargamento incontrolado destas e por consequência gerando uma ruptura frágil do material, TESUKA (1989). Quando na matriz de concreto são introduzidas fibras curtas, estas reduzem o crescimento da abertura das microfissuras.

As fibras formam uma ligação entre as bordas das fissuras de modo que, para aumentar a abertura das mesmas é necessário mais energia. Caso ocorra a ruptura, ela se dará por deslizamento da fibra, por ruptura desta ou por desmoronamento da matriz de concreto nas vizinhanças da fibra. É este o comportamento que a fibra proporciona, por conseguinte gerando uma melhoria de outras propriedades como rigidez, ductilidade, absorção de energia, resistência ao impacto e a fadiga.

O concreto reforçado com fibras é composto por agregados miúdos, grãos e fibras curtas, descontínuas, distribuídas aleatoriamente. As fibras podem ser de vários tipos: aço, plástico, vidro, polipropileno e materiais naturais. As fibras podem ter várias formas, com seções transversais circulares, retangulares e irregulares. Sua geometria é descrita numericamente através de um parâmetro denominado relação de aspecto. Este parâmetro mede a razão entre o comprimento da fibra e seu respectivo diâmetro. No concreto, geralmente são usadas fibras com comprimento variando entre 10 e 75 mm, tendo relações de aspecto entre 30 e 150. Em termos de quantidade, as fibras participam na mistura em proporções variando entre 0,1 e 5% do volume total de concreto. Quando o volume de fibras é pequeno, até 2% do volume de concreto, não é preciso nenhum equipamento ou mão de obra adicional no preparo do mesmo. O lançamento em formas, adensamento e acabamento são convencionais.

A indústria de pré-fabricados tem utilizado muito o concreto reforçado com fibras, com os objetivos de controlar a fissuração e tornar o concreto mais dúctil e com maior resistência a impactos. Concreto com fibras tem sido também muito empregado na construção de túneis, aumentando a velocidade de execução bem como a durabilidade destes.

1.2 - Justificativa

A montagem da armadura transversal constitui uma das etapas mais trabalhosas do processo produtivo de peças de concreto armado. Assim, a diminuição das taxas de armadura transversal pode favorecer o aumento da mecanização e da produtividade, com possíveis vantagens em relação ao custo.

Para os elementos de concreto armado que apresentam taxa reduzida de armadura transversal e que têm comportamento típico de viga, mesmo que se garanta uma resistência compatível com a sua solicitação, persiste o problema da ruptura frágil, caso haja o colapso devido às solicitações tangenciais. Assim, desde que se respeitem alguns requisitos, como a limitação da tensão tangencial e a segurança contra a fissuração e ruptura do concreto, a resistência pode ser obtida através de mecanismos alternativos. Portanto, no caso das vigas, a redução da armadura transversal passa principalmente pelo efetivo controle da fissuração e por um comportamento mais dúctil na ruptura. Neste aspecto, a utilização das fibras curtas como reforço para o concreto pode ser importante. Além das vantagens decorrentes do controle da fissuração e do aumento da resistência proporcionado por elas, há uma melhoria nas características de ductilidade do elemento de concreto.

O modelo de analogia de treliça para o cálculo da armadura transversal, desenvolvido por Ritter e Morsch no início do século XX, admite, como hipótese básica, que, após a fissuração da viga, a totalidade da força cortante seja resistida pela armadura da alma e pelas diagonais de concreto. A treliça é composta de cordas paralelas, superior e inferior, de diagonais comprimidas (representadas pelo concreto) com inclinação de 45° em relação à horizontal além de diagonais tracionadas (armadura transversal) com inclinação entre 90° e 135° também em relação à horizontal.

Investigações experimentais em vigas de concreto armado, realizadas por Leonhardt [apud FERNANDES (1993, 1994 e 1997)] e por Grob e Thürlimann [apud FERNANDES (1993, 1994 e 1997)] nas décadas de 1960 e 1970, demonstraram que a teoria clássica de Morsch conduzia a armaduras superiores às necessárias, estando, portanto, a favor da segurança. Esse achado originou a criação do conceito de grau de

armação ao cisalhamento, representado pelo fator η . O valor numérico de η representa a relação entre a taxa de armadura transversal efetiva, ρ_w , e aquela calculada pela analogia da treliça clássica, segundo Mörsch, ρ_w, M .

Como os resultados dos ensaios demonstraram a confiabilidade de se reduzir as taxas de armadura transversal, sob o ponto de vista de segurança e economia, surgiram propostas para a correção da teoria clássica de Mörsch. Dentre essas propostas, uma é denominada Teoria Aditiva. A Teoria Aditiva considera no mecanismo resistente ao esforço cortante, duas componentes a saber: uma parcela τ_c , correspondente à parte resistida pelo banzo comprimido de concreto, pelo engrenamento dos agregados e pelo efeito de pino da armadura longitudinal, e a parcela τ_s , correspondente à parte resistida efetivamente pela armadura transversal existente. Assim a tensão resistente última é dada por:

$$\tau_u = \tau_c + \tau_s \quad (1.1)$$

Conseqüentemente, o dimensionamento da armadura transversal é feito para resistir a apenas uma parte da tensão resistente última τ_u dada por:

$$\tau_s = \tau_u - \tau_c \quad (1.2)$$

Como dito anteriormente, a principal conseqüência da incorporação de fibras ao concreto é a substancial melhora na resistência ao alargamento das fissuras. Esta redução na abertura das fissuras proporciona uma melhoria nos mecanismos de resistência do concreto, como o engrenamento entre agregados e efeito de pino, resultando em um aumento da contribuição do concreto (τ_c) e conseqüentemente numa diminuição da parcela τ_s , conforme mostra a equação 1.2, ou seja, numa redução do teor de armadura transversal. É baseado nesta hipótese de melhoria da contribuição do concreto na resistência a esforços de cisalhamento que esta pesquisa será levada a efeito.

1.3 - Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o efeito da adição de diferentes tipos de fibras curtas no comportamento e na resistência ao esforço cortante de vigas de concreto armado. As fibras curtas empregadas são de aço e de nylon. Dentro deste objetivo principal, os seguintes aspectos serão analisados:

- verificação das melhorias de desempenho (resistência, fissuração, deformação, ductilidade) de vigas de concreto armado reforçadas com adição de fibras curtas de aço (Xorex) e de nylon (DuPont);
- estudo do efeito da adição destas fibras curtas na resistência ao cisalhamento dessas mesmas vigas visando o potencial uso delas nos mecanismos internos resistentes; e
- estudo comparativo dos resultados obtidos neste estudo com os resultados da pesquisa desenvolvida por VIDAL FILHO (1999), onde foram realizados ensaios em vigas de mesmas dimensões e armaduras, porém fabricadas sem fibras e com outro tipo de fibras curtas de aço (Dramix).

1.4 - Apresentação dos Capítulos

Este estudo é composto por seis capítulos além deste primeiro, onde foram apresentados as considerações preliminares, justificativa e objetivos do estudo. O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com vários tipos de fibras curtas. No Capítulo 3 é feita a caracterização dos materiais utilizados, descrevendo-se os equipamentos empregados e os ensaios realizados. São apresentados também os resultados dos ensaios preliminares do concreto reforçado com fibras (aço e nylon) com os quais se definiu o traço ótimo utilizado na fabricação das vigas.

As características das vigas ensaiadas (geometria e detalhamento das armaduras), os procedimentos de fabricação e ensaio das mesmas são descritos no Capítulo 4. O Capítulo 5 apresenta os resultados dos ensaios das propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras e das vigas. A análise dos resultados é feita no Capítulo 6, onde se apresenta também o estudo comparativo com relação aos resultados da pesquisa desenvolvida por VIDAL FILHO (1999). As conclusões do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros, são descritas no Capítulo 7.

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Introdução

A idéia de se reforçar materiais frágeis com a adição de fibras vem desde a Antigüidade. O homem utilizava-se da palha para reforçar tijolos e crina de cavalo ou sisal para reforçar estuque. Na segunda metade do século XIX, pelo fato do concreto ser um material frágil com uma baixa resistência à tração, a engenharia passou a valer-se do uso de barras de aço nas zonas tracionadas, afim de suprir esta deficiência. A patente tida como a mais antiga, sobre concreto reforçado com fibras, é a de Berard, registrada em 1874 [apud TESUKA (1989); apud NAAMAN (1985)]. Esta patente criava uma pedra artificial adicionando ao concreto resíduos granulares de ferro. Em 1900, Hatscheck [apud TESUKA (1989); apud AGOPYAN (1991)] desenvolveu o cimento amianto que se tornou o primeiro material com fibras para a construção civil a ser industrializado, sendo muito usado para confecção de telhas e tubos. Em 1918, foi registrado uma patente por H. Alfsen, onde pequenas fibras longitudinais de ferro, madeira e outros materiais eram misturados ao concreto afim de melhorar sua resistência à tração [apud NAAMAN (1985)]. Várias patentes sobre concreto reforçado

com fibras foram registradas nas décadas de 1920 e 1930, porém, estes estudos tiveram um desenvolvimento mais expressivo a partir da década de 1960.

2.2 – A Influência das Fibras no Comportamento do Concreto

SHAH e RANGAN (1970) pesquisaram os efeitos das fibras de aço retas nas propriedades mecânicas do concreto. O trabalho foi dividido em três séries de testes de vigas concretadas nas dimensões de (5 x 5 x 25) cm. Na primeira série de testes, as vigas foram fabricadas com concreto com adição de fibras distribuídas aleatoriamente variando-se o volume e o comprimento das mesmas. As vigas desta série foram ensaiadas a flexão. Verificou-se uma melhora na resistência e na tenacidade das vigas ensaiadas quando se aumentava o volume de fibras no concreto. Observou-se também que para o volume de 1,25% de fibras, a tenacidade aumentava na ordem de 20 vezes enquanto que a resistência do concreto quase que dobrava. O mesmo fato foi observado ao aumentar-se a relação de aspecto até um certo limite. A combinação de armadura convencional e fibras foi também analisada. O volume de fibras de aço empregado foi o mesmo em ambos os casos. Os resultados revelaram que as vigas com armadura convencional e fibras suportaram uma carga três vezes maior do que as vigas reforçadas apenas com fibras.

A segunda série de testes investigou os efeitos da orientação, da relação de aspecto, e do volume de fibras na tração uniaxial. A eficiência das fibras aleatórias em relação às fibras alinhadas foi da ordem de 85%. As fibras perpendiculares à direção do carregamento foram totalmente ineficientes. Com relação à tenacidade, o melhor comportamento foi no caso das fibras orientadas paralelamente à aplicação da carga, seguida pelas fibras distribuídas aleatoriamente e por último as fibras orientadas perpendicularmente. As peças com fibras paralelas mostraram até 30% mais tenacidade do que as peças com fibras aleatoriamente distribuídas. O efeito da relação de aspecto foi investigado em corpos de prova contendo 0,5% de fibras distribuídas aleatoriamente. Embora o comprimento das fibras praticamente não tenha afetado a resistência à tração, ele influenciou significativamente a tenacidade, aumentando-a até um certo limite à

medida em que se aumentava a relação de aspecto. Para se estudar o efeito do volume de fibras sobre a resistência à tração uniaxial, corpos de prova de argamassas e concretos com fibras alinhadas na direção da aplicação da carga foram testados. Foi observado que um aumento no volume de fibras provocou uma maior resistência à tração e tenacidade dos compostos. Como havia se notado no caso da tração na flexão, neste caso também a melhora na tenacidade foi mais significativa do que na resistência.

A terceira série de testes ensaiou-se corpos de prova prismáticos quanto à compressão uniaxial. O concreto, com resistência à compressão na faixa de 25 MPa, continha 0,5% de seu volume em aço, sendo este volume, em um caso, constituído por fibras distribuídas aleatoriamente e, no outro, por estribos fechados. Corpos de prova sem nenhuma armadura foram também ensaiados para comparação. Curvas tensão-deformação mostraram que não existiu diferença significativa nas várias curvas até 80% da carga máxima aplicada. Verificou-se, também que a adição de fibras de aço ou estribos aumentou significativamente a ductilidade do concreto. Este aumento na ductilidade foi devido ao impedimento, provocado pelas fibras, do crescimento das fissuras.

SHAH e RANGAN (1970) concluíram que as fibras têm um efeito significativo de reforço após a fissuração da viga da mesma forma que a armadura de tração convencional e o estribo.

HANNANT (1978) estudou a adição de fibras em argamassa de cimento e em concretos. Ele verificou que na argamassa de cimento é possível adicionar até 10% do volume enquanto no concreto este volume não pode exceder a 2%. A quantidade máxima de fibras adicionadas ao concreto é influenciada pela dimensão máxima dos agregados, que dificultam a uniformização das fibras na matriz de concreto. Ele concluiu que o volume crítico de fibras pode ser calculado através da intersecção das curvas de resistência das etapas linear e pós-fissuração, onde se considera apenas a ação das fibras. O volume crítico depende da relação de aspecto da fibra, da distribuição das fibras (aleatórias ou direcionadas) e da aderência da fibra com a matriz de concreto. HANNANT verificou que quanto maior for a relação de aspecto menor é o volume

crítico, visto que, a superfície específica, onde se desenvolvem as tensões de aderência, é maior. Foi observado também que a contribuição das fibras é mais significativa quando o volume de fibras na matriz é maior que o volume crítico, já, que após a fissuração, a transferência de forças entre a matriz e as fibras se dá sem o arrancamento ou a ruptura da fibra, proporcionando um acréscimo da resistência e uma melhora na ductilidade.

Os efeitos de vários tipos de fibra de aço sobre as propriedades do concreto fresco e endurecido foram estudados por SOROUSHIAN e BAYASI (1991). As fibras testadas neste estudo foram do tipo retas-circulares, onduladas-circulares, onduladas-retangulares, dobradas nas extremidades (“hooked-single”) e coladas umas às outras formando feixes com as extremidades dobradas (“hooked-collated”). As relações de aspecto utilizadas foram de 60 e 75 para a fibra “hooked-collated”, 57 e 72 para a fibra reta-circular e de 57 a 60 para as demais fibras. Todas as misturas de concreto tinham 2% de fibras em volume. Para a caracterização do concreto no estado fresco, o ensaio utilizado foi o “slump test” convencional, padronizado pela norma americana ASTM C 995-94. Para determinar a relação carga-flecha foram ensaiados corpos-de-prova prismáticos de 15 x 15 x 50 cm enquanto que para a relação tensão-deformação na compressão foram usados cilíndricos de 15 x 30 cm. Os resultados apresentados com o concreto fresco mostraram que a inclusão de fibras diminui a trabalhabilidade do concreto para qualquer tipo de fibra, porém este efeito é mais pronunciado para fibras com relação de aspecto maior. Misturas com fibras onduladas mostraram-se um pouco mais plásticas em relação às misturas com as demais fibras. Nos ensaios de compressão, as fibras com as extremidades dobradas foram mais eficientes, principalmente no tocante à capacidade de absorção de energia após o pico de tensão. Porém, a adição de fibras praticamente não alterou a resistência à compressão do concreto, independente do tipo de fibra de aço adicionada. Nos testes de flexão, corpos de prova tendo fibras com as extremidades dobradas também tiveram resistências à flexão e capacidade de absorção de energia maiores do que aqueles com fibras retas e onduladas.

ROCHA (1995) avaliou a influência da fibra de aço na trabalhabilidade, na resistência à compressão axial, e na resistência à tração indireta do concreto. A fibra de aço utilizada

foi da marca Dramix, com as extremidades dobradas e coladas umas às outras formando feixes. A fibra tinha 30 mm de comprimento e relação de aspecto de 60. Foram confeccionados três tipos de concretos com resistências esperadas aos 28 dias de 40, 50 e 60 MPa. Foi utilizado cimento de alta resistência inicial e o agregado graúdo com diâmetro máximo de 19 mm. Os volumes de fibras adicionados ao concreto foram de 0,58% , 0,67% e 0,76%, respectivamente para os concretos de 40, 50 e 60 MPa. O autor verificou que as fibras no concreto fresco reduzem visivelmente a sua trabalhabilidade. Comparando os concretos fabricados com e sem a fibra de aço, os primeiros apresentaram um pequeno ganho de resistência à compressão axial. Nos ensaios de tração por compressão diametral verificou-se também um pequeno acréscimo na resistência com a adição das fibras.

2.3 – A Influência das Fibras na Resistência ao Cisalhamento

Na revisão bibliográfica realizada não foi encontrado nenhum estudo sobre a influência de fibras de nylon na resistência ao cisalhamento do concreto. Por isso são apresentadas somente as pesquisas realizadas com fibras de aço.

Um dos primeiros estudos que verificou a influência de fibras de aço no comportamento de vigas de concreto foi desenvolvido por BATSON *et al* (1972). As fibras de aço foram usadas para substituir os estribos em vigas retangulares de argamassa sujeitas a carga de flexão. Os resultados mostraram a possibilidade da substituição de estribos verticais por fibras de aço como armadura de cisalhamento.

Visando verificar a contribuição das fibras de aço como reforço de cisalhamento, SWAMY e BAHIA (1985) realizaram testes em nove vigas de seção T e duas de seção retangular. Nas vigas T variou-se o volume de fibras (entre 0 e 1,2%), a taxa de armadura longitudinal (entre 1,95 e 4,0%) e a quantidade de estribos na alma (valores mínimos requeridos pelas normas britânica CP110 e americana ACI 318). Em uma das vigas T, as fibras foram lançadas apenas na parte tracionada da viga. As duas vigas retangulares foram armadas sem estribos com a mesma taxa de armadura longitudinal,

sendo uma com fibra e outra sem fibra. O concreto usado nas vigas tinha uma resistência à compressão esperada aos 28 dias entre 40 e 45 MPa. Os resultados demonstraram a contribuição das fibras na resistência aos esforços de cisalhamento. Nas vigas T, sem estribos, com 4% de armadura longitudinal e volume de fibras entre 0,8 e 1,2%, a resistência ao cisalhamento foi aumentada em 80% em relação a viga sem fibras. Na viga retangular com 1,95% de armadura longitudinal e volume de fibras de 0,8%, a resistência ao cisalhamento teve um aumento de 30% sobre a correspondente viga sem fibras, sendo esta capaz de alcançar sua capacidade total de flexão. SWAMY e BAHIA concluíram também que fibras lançadas somente na zona de tração não contribuem nos mecanismos de cisalhamento. Os resultados mostraram também o efeito conjunto das fibras (0,85) com a taxa mínima de estribos. Nestes casos, as vigas apresentaram uma visível ductilidade com escoamento da armadura longitudinal, alcançando assim sua capacidade total de flexão. As rupturas ocorreram de forma dúctil, ainda que fissuras de cisalhamento tenham ocorrido antes da ruptura.

MANSUR *et al* (1986) conduziram um programa experimental para estudar o efeito das fibras de aço na resistência ao cisalhamento de vigas de concreto sem estribos, contendo apenas armadura longitudinal. De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que a adição de fibras curtas de aço na matriz de concreto produz um reforço significativo ao cisalhamento, tendendo a modificar o modo de ruptura de cisalhamento para flexão. Os pesquisadores concluíram também que a resistência ao cisalhamento cresce com o aumento do teor de fibra e com a redução da relação a/d (vão de cisalhamento/altura efetiva da viga).

SHARMA (1986) realizou um estudo sobre a influência de fibras de aço na resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado. As fibras empregadas tinham as extremidades dobradas e eram coladas umas às outras formando feixes (“hooked-collated”). Estas fibras tinham uma relação de aspecto igual a 80 e o teor de fibras adicionado ao concreto foi de 1% do volume total de concreto. Todas as vigas foram dimensionadas para romper por cisalhamento, e foram divididas em dois grupos: com estribos e com fibras e estribos. SHARMA fez também um estudo comparativo com os resultados de outros investigadores e propôs uma equação para cálculo da resistência ao

cisalhamento em vigas de concreto reforçadas com fibras. Nesta equação a resistência última de cisalhamento de uma viga de concreto armado reforçada com fibras e com estribos é dada por:

$$\tau_u = \tau_s + \tau_{cf} \quad (2.1)$$

onde τ_u é a tensão última de cisalhamento na seção, τ_s é a tensão de cisalhamento devido à armadura transversal existente e τ_{cf} é a tensão de cisalhamento do concreto com fibras. A componente τ_s pode ser calculada normalmente de acordo com as normas de concreto vigentes; já a tensão de cisalhamento do concreto com fibras, τ_{cf} , pode ser estimada usando uma relação empírica dada por:

$$\tau_{cf} = k \cdot f_t \cdot (d/a)^{0,25} \quad (2.2)$$

Na equação 2.2, k é uma constante igual a 2/3, d/a é a relação entre a altura efetiva da viga e o vão de cisalhamento (comprimento da viga onde o esforço é constante) e f_t é a resistência à tração indireta do concreto.

SHARMA concluiu também que a adição de fibras de aço na matriz de concreto aumenta a resistência ao cisalhamento das vigas. Ele relatou ainda que as vigas de concreto reforçadas com fibras de aço têm uma alta resistência pós fissuração, mais ductilidade e absorção de energia do que as vigas de concreto sem fibras e que a presença de fibras no concreto restringe a propagação de fissuras, permitindo uma fissuração mais uniforme.

Com o objetivo de analisar o comportamento a cisalhamento de vigas reforçadas com fibras de aço e o potencial emprego destas em substituição aos estribos, NARAYANAN e DARWISH (1987) ensaiaram 49 vigas de concreto armado. Seis das vigas não tinham armadura transversal, enquanto 10 vigas continham estribos convencionais ao longo do vão de cisalhamento. As outras 33 vigas possuíam fibras de aço onduladas (“crimped fibers”), mas sem estribo. Variou-se o volume de fibras, seu comprimento, a taxa de

armadura transversal e longitudinal, bem como o vão livre e o vão de cisalhamento da viga, além do traço de concreto. Dos resultados dos ensaios, os autores concluíram que a forma das fissuras desenvolvidas nas vigas de concreto reforçado com fibras foi, em geral, similar às observadas nas correspondentes vigas de concreto construídas com estribos; porém, o espaçamento das fissuras nas vigas de concreto com fibras foi reduzido a um quinto em relação às vigas com ou sem estribos. Isto se deveu à distribuição mais uniforme de tensões nas vigas de concreto com fibras. A carga correspondente ao aparecimento da primeira fissura de cisalhamento foi pouco maior do que aquela obtida em vigas com estribos convencionais, independente do teor de fibras empregado. A inclusão de fibras de aço nas vigas de concreto resultou em um aumento substancial da resistência última ao cisalhamento quando comparada à resistência das vigas de concreto armado sem estribos. A resistência ao cisalhamento nas vigas de concreto com fibras teve um aumento quando pequenas relações a/d (vão de cisalhamento/ altura útil) foram usadas. Este acréscimo foi atribuído ao efeito de arco. Apesar de Narayanan e Darwish terem testado 49 vigas, variando vários aspectos, nenhuma das vigas continha estribos e fibras, de modo que se pudesse observar o efeito combinado dos dois elementos e compará-lo com as vigas armadas apenas com estribos.

EL-NIEMA (1991) pesquisou os efeitos das fibras de aço em vigas de concreto armado sujeitas ao cisalhamento. Dez vigas de mesma armadura longitudinal e transversal foram testadas, sendo que nove delas continham fibras, em diferentes volumes e relação de aspecto. Durante os ensaios foram medidas deformações na armadura longitudinal e transversal das vigas. A influência das fibras no âmbito destas deformações foi significativa. Para uma mesma carga, as deformações nos estribos e na armadura longitudinal foram menores nas vigas com fibras quando comparadas com a viga sem fibras. Aumentos na relação de aspecto e no teor de fibras provocaram também reduções nas deformações dos estribos e da armadura longitudinal. Isto se deve ao fato de que parte da carga aplicada é resistida pelas fibras. O autor concluiu que o teor de fibras tem uma grande influência sobre a carga última de cisalhamento das vigas e que a tenacidade e ductilidade são melhoradas com o aumento no teor e na relação de aspecto das fibras.

O comportamento de vigas de concreto de alta resistência reforçadas com fibras de aço sujeitas a esforços de flexão e cisalhamento foi investigado por ASHOUR *et al* (1992). Foram testadas vigas com e sem fibras, contendo apenas armadura longitudinal. As fibras empregadas tinham seção transversal circular, relação de aspecto 75, com as extremidades dobradas e coladas umas às outras formando feixes (“hooked-collated”). A resistência à compressão do concreto das vigas na data de ensaio foi de cerca de 93 MPa. Os resultados mostraram que a presença das fibras provocou um aumento na rigidez das vigas, reduzindo conseqüentemente a deflexão para uma determinada carga, além de uma ruptura mais dúctil, especialmente para grandes valores da relação a/d (vão de cisalhamento/altura útil). Os autores concluíram também que a resistência ao cisalhamento das vigas aumenta com o aumento no teor de fibras e com o decréscimo da relação a/d . Baseado nos resultados dos testes, os autores propuseram duas equações para calcular a resistência ao cisalhamento de vigas de concreto armado de alta resistência reforçado com fibras de aço sem estribos. Estas equações tiveram boas correlações com a resistência ao cisalhamento das vigas testadas.

VALLE e BÜYÜKÖZTÜRK (1993) estudaram o comportamento do concreto reforçado com fibras de aço e polipropileno sujeito a cisalhamento direto. Concreto de alta resistência com sílica ativa (62 a 69 MPa) e de resistência normal (27 MPa), com fibras e sem fibras foram usados nos testes. O volume de fibras usado foi de 1% em relação ao volume total de concreto. Metade dos corpos de prova continham estribos atravessando o plano de cisalhamento, sendo que alguns deles continham estribos e fibras.

Os resultados dos testes mostraram um aumento de 60% e 17% na resistência ao cisalhamento, respectivamente para os concretos de alta resistência reforçados respectivamente com fibras de aço e de polipropileno, quando comparados com o concreto de alta resistência sem fibras e não armados. Quanto ao concreto de resistência normal, o aumento na resistência foi de 36% quando foram adicionadas fibras de aço e não houve aumento com a adição de fibras de polipropileno. O melhor desempenho das fibras no concreto de alta resistência é atribuída à melhor aderência entre a fibra e a matriz proporcionada pelo concreto de alta resistência com sílica ativa.

Em todos os casos, as fibras tornaram o concreto mais dúctil. A adição de fibras de aço aumentou em até 5 vezes a tenacidade do concreto de alta resistência. Este aumento na tenacidade foi de até 14 vezes para o concreto de alta resistência reforçado com fibras de polipropileno em comparação ao concreto de alta resistência sem fibras.

VALLE e BÜYÜKÖZTÜRK concluíram que o uso de fibras somente ou em combinação com estribos como reforço de cisalhamento no concreto tem um futuro promissor, especialmente para concreto de alta resistência. Eles concluíram também que o uso combinado de estribos e fibras como reforço de cisalhamento pode ser uma solução econômica para se obter concretos com maior resistência ao cisalhamento e maior ductilidade.

Em sua tese de doutoramento, FURLAN (1995) avaliou a influência da adição de fibras curtas no comportamento resistente ao cisalhamento em vigas de concreto de seção quadrada e duplo T. Foram usadas fibras de aço e polipropileno. A fibra de aço, de seção transversal retangular e perfil longitudinal ondulado, foi utilizada em dois comprimentos diferentes: 25,4 mm e 38,1 mm. Foram ensaiadas 14 vigas de seção quadrada (10 x 10 x 100 cm), executadas a partir de 7 misturas diferentes, variando-se o tipo e o volume de fibra adicionado. Para cada mistura, haviam dois modelos: um modelo com estribos e outro sem estribos. O volume da fibra de aço nas vigas de seção quadrada variou de 0 a 2%. Nas vigas de seção duplo T foram ensaiadas 3 vigas, todas com estribos, sendo uma com o concreto convencional, outra com 0,5% de fibra de polipropileno e outra com 1% de fibras de aço de 2,54 cm de comprimento. Durante os ensaios foram medidas as deformações do concreto, da armadura longitudinal e dos estribos, além das flechas no meio do vão.

Os resultados dos ensaios mostraram que nos concretos com fibras o espaçamento entre fissuras era menor e a evolução da abertura das fissuras mais lenta, especialmente no caso das fibras de aço. Conseqüentemente, as flechas são menores. As fibras também foram responsáveis pelo aparecimento de um maior número de fissuras inclinadas antes da peça atingir a ruína. FURLAN concluiu que a introdução das fibras aumenta a resistência ao cisalhamento e pode alterar a forma da ruptura. Em todos os modelos com

fibras, a ruptura foi mais dúctil e houve acréscimo de resistência. Ele observou também que a eficiência das fibras é maior nas vigas com estribos, e que as fibras podem ser analisadas como uma armadura transversal equivalente.

Nas vigas sem estribos, a eficiência das fibras foi menor. Somente com 2% de fibras de aço é que houve acréscimo significativo da ductilidade e da resistência adicional após a fissuração diagonal. Nestas peças, o desempenho foi similar ao da viga de concreto somente com estribos, comprovando a possibilidade de substituição dos estribos.

FURLAN observou também que os estribos, na região de momento fletor elevado, foram solicitados mais tardiamente nos modelos com fibras. As tensões nos estribos, nos modelos com fibras de aço, sempre foram comparativamente menores. Além da ação direta das fibras junto às fissuras inclinadas, aliviando a tensão nos estribos, a contribuição indireta proporcionada pela manutenção dos mecanismos alternativos por mais tempo também contribuiu para este fato.

ADEBAR *et al* (1997) analisaram a influência das fibras de aço na resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado sem estribos. Os corpos de prova foram ensaiados em um aparato especial de teste, conhecido como aparato de Adebar, que elimina o efeito de arco. As 11 vigas-parede testadas tinham 1,5 m de comprimento com uma seção transversal de 15x61 cm. As vigas diferenciaram-se principalmente quanto ao tamanho e a quantidade de fibras. Em três delas, tração axial foi aplicada em adição ao cisalhamento e à flexão. A fibra usada tinha as extremidades dobradas e eram coladas umas às outras formando feixes (“hooked-collated”), com comprimento de 30 e 50 mm e relações de aspecto de 60 e 100 respectivamente. A quantidade de fibras variou de 0 a 1,5% do volume total de concreto. Corpos-de-prova cilíndricos foram moldados para se verificar a resistência à compressão do concreto. Os resultados mostraram uma redução na resistência à compressão do concreto com o aumento na quantidade e tamanho da fibra. Os resultados dos ensaios das vigas revelaram que, à medida que se aumenta a quantidade de fibra, reduz-se a abertura das fissuras e conseqüentemente cresce a resistência ao cisalhamento, sendo da ordem de 117% o aumento máximo obtido. Para teores iguais de fibras, elementos contendo a fibra mais

longa (50 mm) tiveram resistências ao cisalhamento similares àqueles fabricados com fibras de 30 mm; porém, estes últimos apresentaram ductilidade menor. A tração axial adicional provocou uma redução na resistência ao cisalhamento.

A influência de diferentes tipos de fibras, metálicas e não metálicas, individualmente ou combinadas, na resistência ao cisalhamento e à flexão de vigas de concreto de alta resistência ($f_{cc} > 90\text{MPa}$) foi investigada por NOGHABAI (2000). Neste estudo, além de variar as fibras, variou-se o volume destas (entre 0,5% e 1%) bem como as dimensões das vigas, totalizando quatro séries a saber: Série A (200 x 250 x 1200) mm; Série B (200 x 300 x 1300) mm; Série C (200 x 500 x 3000) mm e por fim Série D (300 x 700 x 5000) mm. Foram ensaiadas vigas com e sem estribos. O carregamento das vigas das séries A e B constou de uma carga vertical concentrada no meio do vão. Para as séries C e D, foram aplicadas duas cargas concentradas independentes. Paralelamente aos ensaios de laboratório, foi desenvolvido também um modelo computacional baseado no método dos elementos finitos.

Os resultados mostraram que para as vigas de pequena altura (Série A), a adição de 1% de fibras em volume é excessiva visto que elas romperam por esmagamento do concreto comprimido. Para vigas altas (Série D), essa mesma quantidade de fibras foi, por outro lado, insuficiente para evitar uma ruptura brusca. Nas vigas de altura média (Série C), o teor de 1% foi suficiente para melhorar a rigidez, a capacidade portante e a tenacidade das vigas. A combinação de fibras de diferentes tamanhos também se mostrou eficiente. Todas as vigas fabricadas com a adição de 0,5% de fibras de aço curtas (6 mm) ou de 0,5% de fibras de aço longas (30mm) com ganchos na extremidade tiveram melhor desempenho que as vigas contendo 1% destas mesmas fibras.

Do ponto de vista de desempenho estrutural, NOGHABAI concluiu que vigas reforçadas com fibras de aço são competitivas em relação às vigas armadas com estribos. Porém, o que impede o uso das fibras em grande escala é seu maior custo e a falta de normalização de projeto dos elementos estruturais reforçados com fibras de aço.

A influência de fibras curtas de aço na resistência ao cisalhamento de vigas de concreto armado sem estribos foi analisada por KWAK *et al* (2002). Doze vigas de mesma seção transversal e armadura longitudinal, mas fabricadas com concreto resistência à compressão variando entre 31 e 69 MPa, foram ensaiadas na condição de simplesmente apoiadas. Três volumes diferentes de fibras (0%, 0,5% e 0,75%) e três relações vão de cisalhamento/ altura efetiva da viga (a/d de 2, 3, e 4) foram utilizados. Os resultados mostraram que a tensão correspondente ao surgimento das fissuras de cisalhamento e a resistência última ao cisalhamento aumentaram com o acréscimo do volume de fibras na mistura, com a redução do fator a/d e com o aumento da resistência à compressão do concreto. O aumento na resistência ao cisalhamento foi da ordem de 69 a 80%. Os autores concluíram também que a adição das fibras de aço reduziu o espaçamento e a abertura das fissuras, aumentando a capacidade de deformação e mudando a forma da ruptura das vigas de cisalhamento para flexão.

MIRSAYAH e BANTHIA (2002) estudaram a resistência ao cisalhamento de concretos reforçados com fibras de aço. Foram usados dois tipos de fibras de aço longa (50 mm), sendo uma com superfície lisa e seção transversal circular (tipo 1) e a outra com uma geometria ondulada (tipo 2). O volume de fibras variou entre 0 e 2%. Onze vigas foram concretadas, sendo uma sem fibras, cinco com fibras do tipo 1 e cinco com fibras do tipo 2. Os pesquisadores concluíram que para ambos os tipos de fibras houve um acréscimo na resistência ao cisalhamento e que esse acréscimo foi maior para volumes maiores de fibras. O concreto com adição de fibra do tipo 1 apresentou melhores resultados. MIRSAYAH e BANTHIA concluíram também que existe uma correlação entre os valores dos índices de tenacidade ao cisalhamento com os índices de tenacidade à flexão. Entretanto, dado a subjetividade deste tipo de comparação e ao limitado número de dados disponíveis, mais pesquisas são necessárias para compreender melhor esta correlação.

Segundo LEONHARDT e MÖNNIG (1977), a taxa de armadura longitudinal e a relação a/d (vão de cisalhamento / altura útil da viga) interferem na resistência ao esforço cortante. Eles enfatizam que o valor de a/d que conduz à menor capacidade resistente à força cortante se situa no intervalo entre 2,5 e 3,5. Para relações a/d

menores que 2,5, a capacidade resistente à força cortante aumenta bastante devido ao efeito de arco. Deste modo a taxa de armadura longitudinal bem como o valor de a/d a serem empregados nesta pesquisa serão os mesmos para todas as vigas.

A análise das diversas pesquisas sobre concreto reforçado com fibras de aço indica uma melhora expressiva nos mecanismos resistentes do concreto ao cisalhamento. Entretanto, na maioria das normas de dimensionamento, não há uma padronização sobre o uso de fibras como parte desse mecanismo resistente. Sendo assim, torna-se necessário mais estudos nesta área visando regulamentar esta prática e obter fórmulas para o dimensionamento de estruturas de concreto reforçadas com fibras de aço. É baseado nesta premissa que este estudo será realizado.

3

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1 - Introdução

Os materiais utilizados na fabricação das vigas são descritos neste capítulo. Os resultados dos ensaios preliminares do concreto que definiram o traço ótimo e o teor de fibras são também apresentados e analisados. É importante frisar que o traço do concreto sem adição de fibras foi desenvolvido anteriormente por VIDAL FILHO (1999) em sua pesquisa.

3.2 - Fibras

Dois tipos de fibras foram utilizados neste estudo, sendo uma fabricada em aço e a outra em nylon. A fibra de aço utilizada neste trabalho foi a Xorex fabricada pela Bombril. Ela possui formato ondulado, seção transversal retangular e massa específica de 7850 kg/m³. Suas dimensões são: 25 mm de comprimento, 2,25 mm de largura e 0,4 mm de espessura. Apesar da geometria ondulada melhorar as condições de aderência com a matriz, sua relação de aspecto (l/d) não é muito favorável, sendo na ordem de 33.

A fibra de nylon empregada é fabricada pela Du Pont. Ela tem formato de flocado, seção transversal circular e massa específica de 1,14 kg/m³. Suas dimensões são: 21 mm de comprimento e 18 micra de diâmetro.



Foto 3.1 – Fibra de Nylon (DUPONT) e Fibra de Aço (XOREX)

3.3 - Aço

As barras e fios de aço utilizados nas vigas foram:

- fios com diâmetro de 3,4 mm: aço CA-60 (armadura transversal);
- fios com diâmetro de 4,2 mm: aço CA-60 (armadura transversal);
- barras com diâmetro de 16 mm: aço CA-50A (armadura longitudinal).

As propriedades dos fios e das barras foram determinadas através de ensaios de três corpos de prova para cada um dos diâmetros. Em cada corpo de prova, tanto dos fios quanto das barras, foi colado um extensômetro para medir as deformações. Para a determinação das propriedades mecânicas do aço foram seguidas as especificações da norma brasileira, NBR 7480 da ABNT (1982).

Os diagramas tensão-deformação para cada um dos diâmetros estão apresentados nas figuras 3.1, 3.2 e 3.3. Estes diagramas foram obtidos plotando-se o valor das deformações médias resultantes dos ensaios de tração executados. Os valores médios das propriedades mecânicas investigadas estão indicados na tabela 3.1. O módulo de elasticidade foi obtido por regressão linear até a tensão de 500 MPa, considerada como limite de proporcionalidade, para o aço da armadura longitudinal. Para os fios, os pontos limites de proporcionalidade foram correspondentes à tensão de 605 MPa para o diâmetro de 3,4 mm e de 540 MPa para o diâmetro de 4,2 mm.

Nas figuras 3.4 e 3.5 estão indicadas nas curvas obtidas por regressão polinomial para os fios de diâmetro 3,4 e 4,2 mm. As equações de regressão obtidas estão também mostradas nas figuras. Nestas equações, y corresponde à tensão e x à deformação específica do aço.

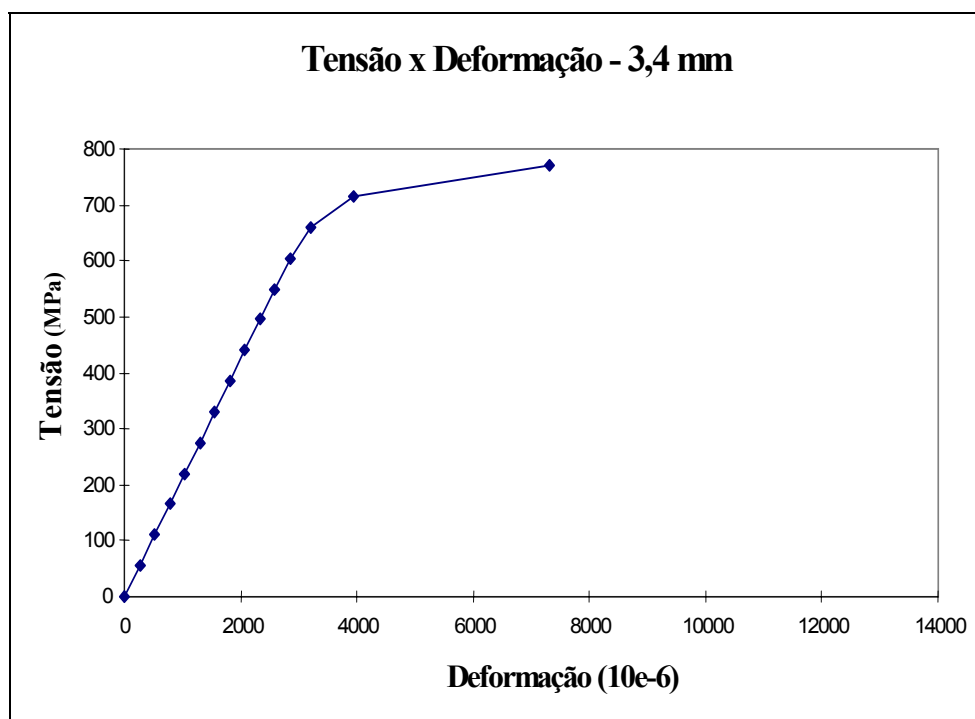


Figura 3.1 - Diagrama tensão-deformação para o fio com diâmetro de 3,4 mm, determinado em ensaio de tração axial do aço

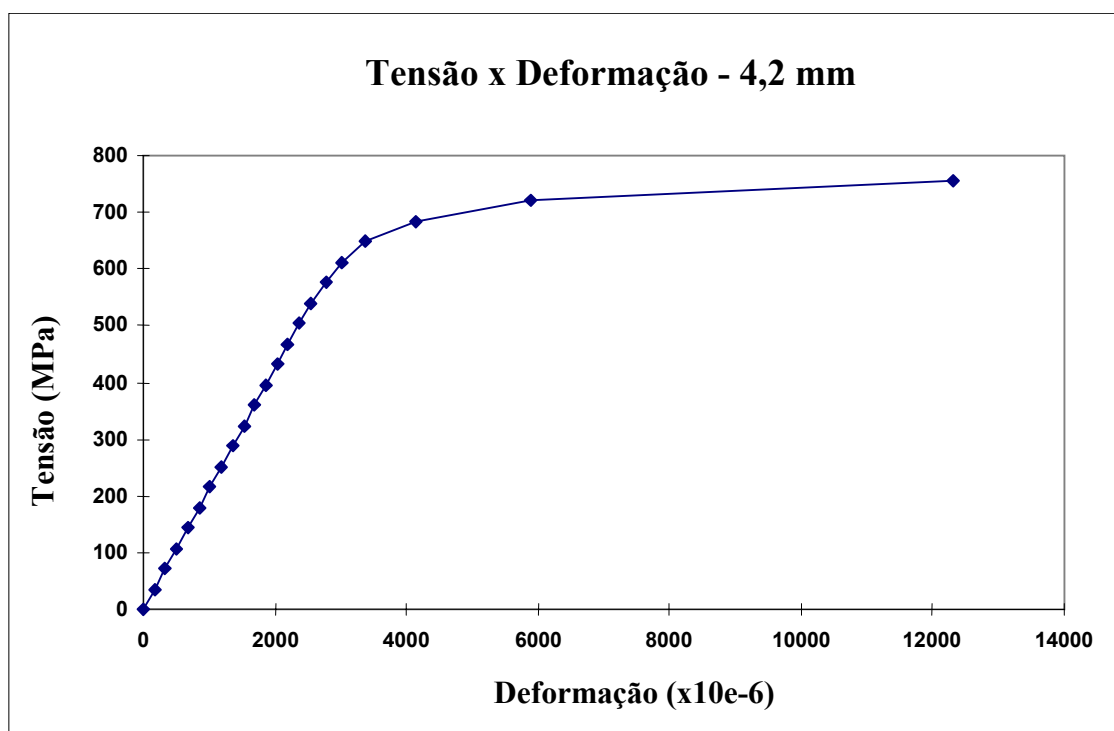


Figura 3.2 - Diagrama tensão-deformação para o fio com diâmetro de 4,2 mm, determinado em ensaio de tração axial do aço

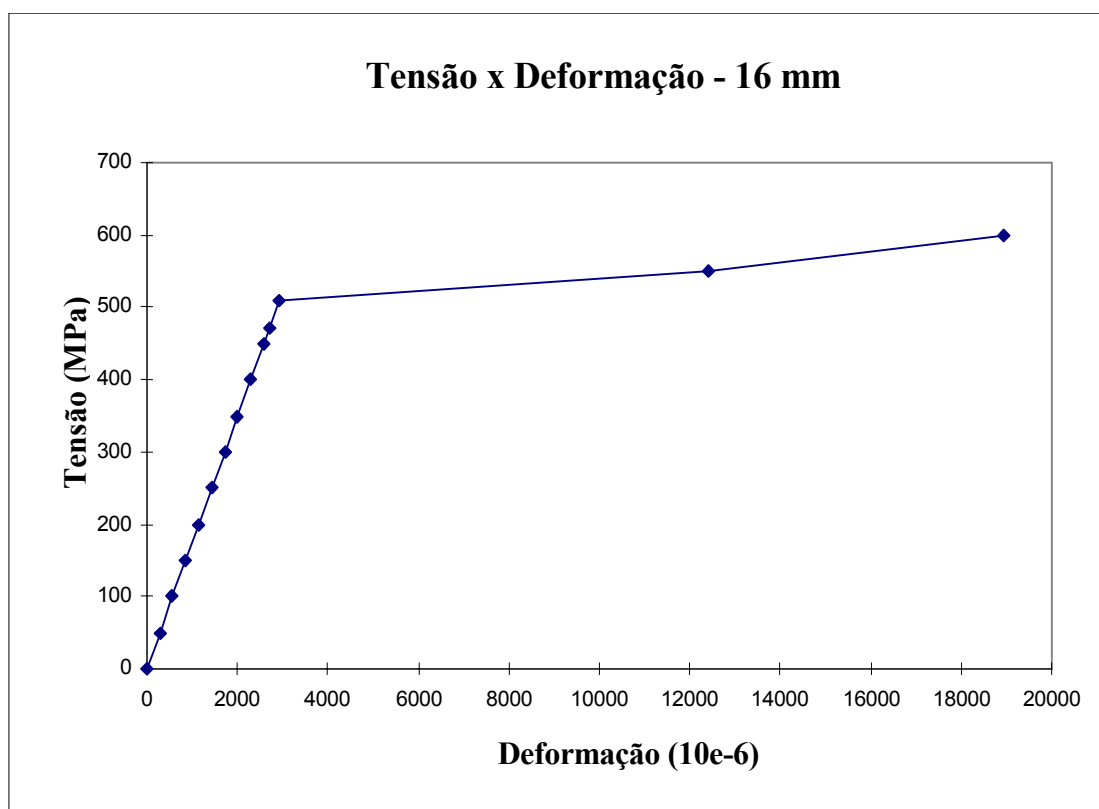


Figura 3.3 - Diagrama tensão-deformação para a barra com diâmetro de 16 mm, determinado em ensaio de tração axial do aço

Tabela 3.1 - Propriedades Mecânicas das Barras e Fios de Aço

Propriedades	Diâmetro das barras de aço		
	3,4 mm	4,2 mm	16 mm
Tensão de escoamento (MPa)	740	710	510
Tensão de ruptura (MPa)	798	757	798
Deformação de escoamento (%)	0,55	0,54	0,29
Módulo de deformação longitudinal (MPa)	210000	210000	174000

É importante ressaltar que as equações polinomiais obtidas para os dois fios só podem ser aplicadas até os valores de deformações específicas iguais a 0,0073 e 0,012300, respectivamente para os diâmetros de 3,4 e 4,2 mm. Estas foram as últimas deformações médias medidas para os dois fios.

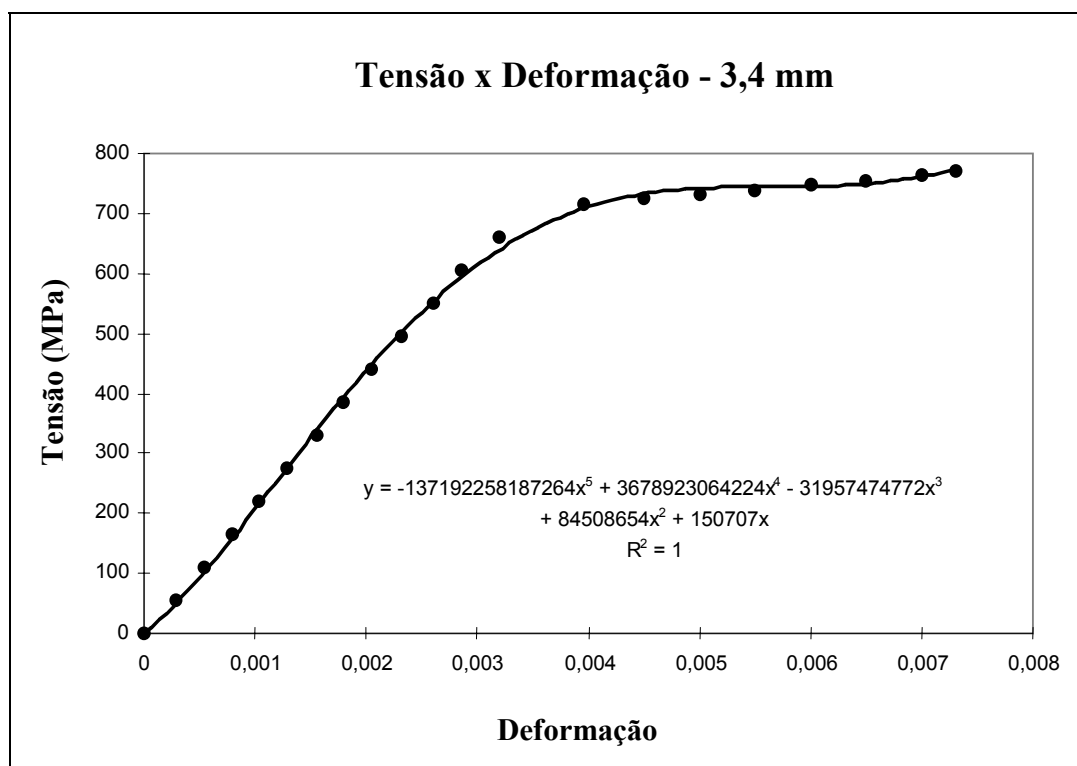


Figura 3.4 - Curva de regressão polinomial para o fio com diâmetro de 3,4 mm, determinada com base no ensaio de tração axial do aço

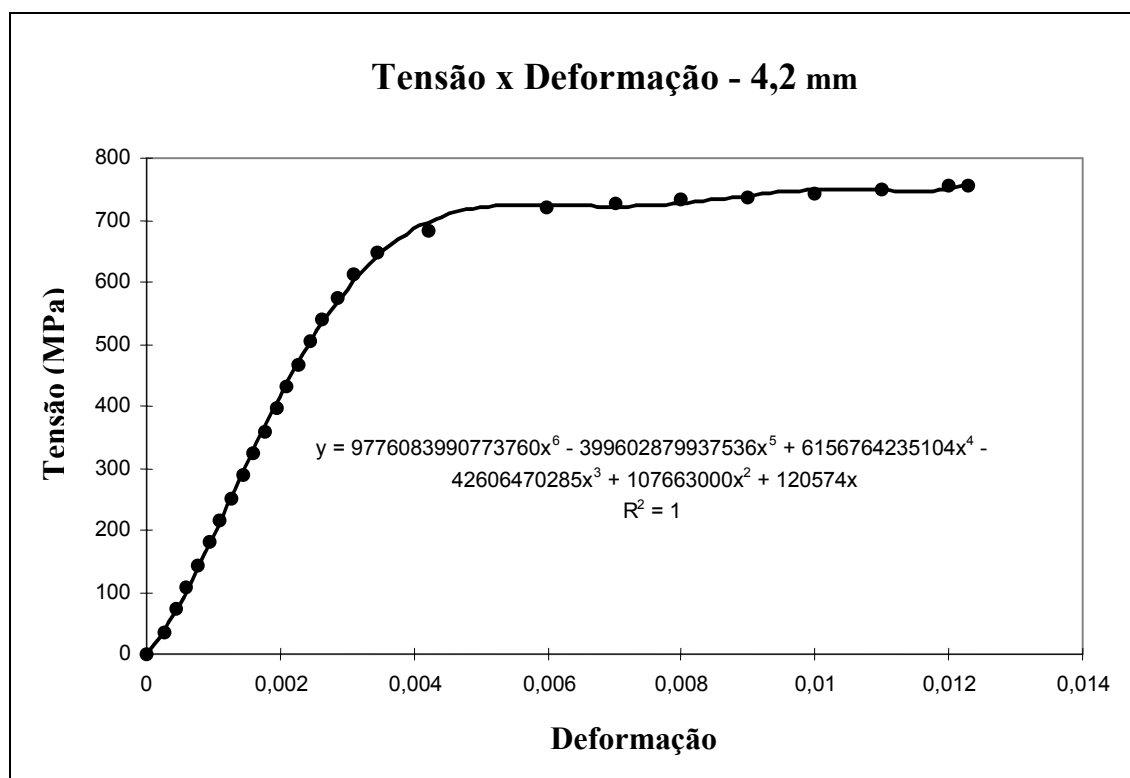


Figura 3.5 - Curva de regressão polinomial para o fio com diâmetro de 4,2 mm, determinada com base no ensaio de tração axial do aço

3.4 - Concreto

3.4.1 - Materiais Constituintes

3.4.1.1 - Agregados

O concreto foi fabricado utilizando pó de pedra e areia quartzosa como agregado miúdo e brita de calcáreo, em duas granulometrias, como agregado graúdo. Os resultados da análise granulométrica dos agregados miúdos e graúdos encontram-se respectivamente nas figuras 3.6 e 3.7. As principais características dos agregados são apresentadas na tabela 3.2. A classificação dos agregados foi feita de acordo com a norma brasileira, NBR 7211 da ABNT - “Agregado para Concreto” (1991). O pó de pedra não se enquadrou em nenhuma das zonas indicadas pela NBR 7211. Por este motivo, ele se encontra sem classificação na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Características dos agregados

AGREGADOS				
CARACTERÍSTICAS	AGREGADO MIÚDO		AGREGADO GRAÚDO	
	Pó de Pedra	Areia Quartzosa	Brita A Calcáreo	Brita B Calcáreo
Massa Específica Real (Kgf/dm ³)	2,740	2,604	2,746	2,733
Massa Específica Aparente (Kgf/dm ³)	1,70	1,33	1,42	1,38
Diâmetro Máximo (mm)	2,4	2,4	12,5	25
Módulo de Finura	1,95	2,22	6,02	6,97
Argila em Torrões (%)	0,0	0,8	0,0	0,0
Materiais Pulverulentos (%)	7,4	2,6	0,4	0,6
Impurezas Orgânicas (ppm)	-----	< 300	-----	-----
Classificação	-----	Zona 3 - Média	Graduação 0	Graduação 1

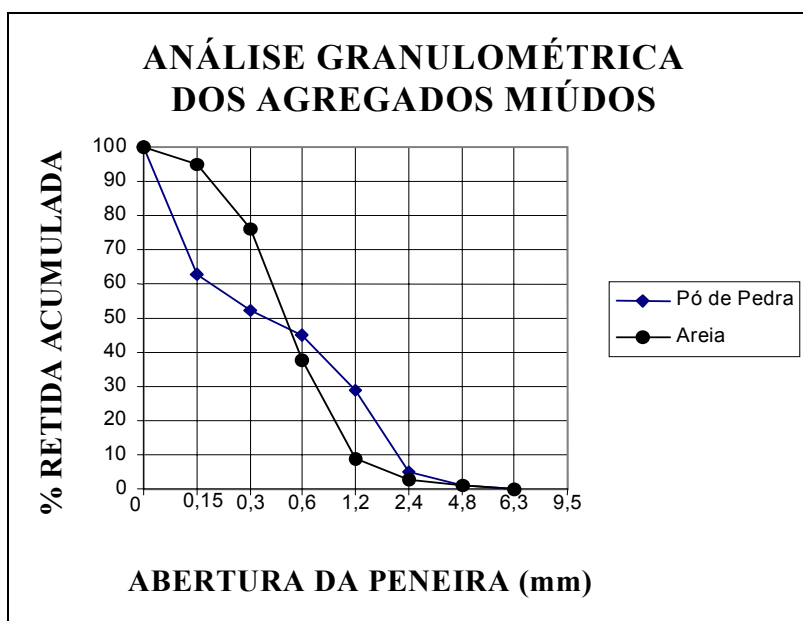


Figura 3.6 - Análise Granulométrica dos Agregados Miúdos

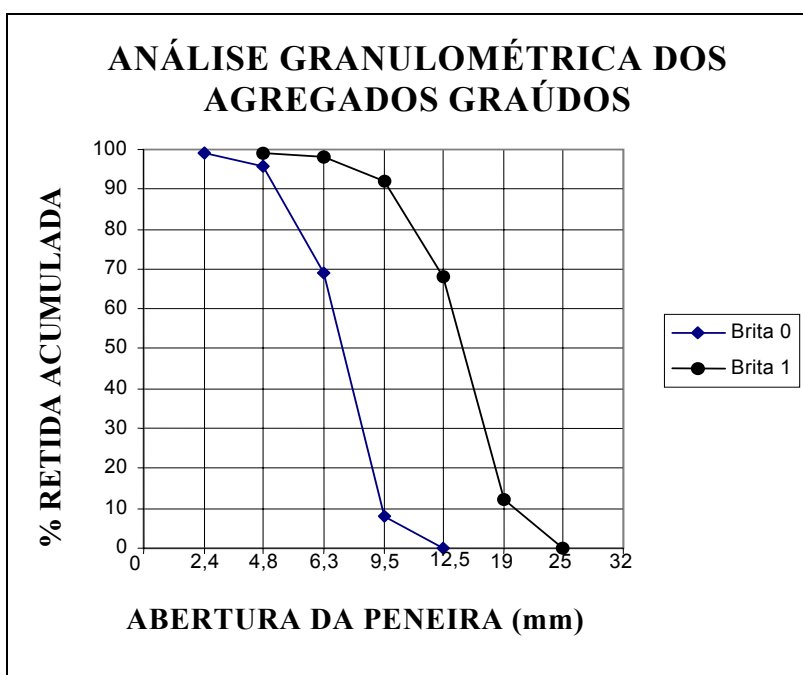


Figura 3.7 - Análise Granulométrica dos Agregados Graúdos

3.4.1.2 - Cimento

O cimento utilizado foi o CP V - ARI PLUS, de alta resistência inicial (ARI), fabricado pela Ciminas.

3.4.1.3 - Aditivo

Foi utilizado o aditivo plastificante RX 322N fabricado pela REAX Indústria e Comércio. Trata-se de um aditivo líquido de cor marrom isento de cloretos e pronto para ser usado sem que seja necessária a diluição do mesmo. Segundo o fabricante, o aditivo RX 322N facilita a trabalhabilidade do concreto, reduz a água de amassamento e diminui os efeitos da segregação. Portanto, ele deve ser utilizado em concretos que exijam muita plasticidade, pega normal e alto desempenho.

A utilização do aditivo RX 322 nesta pesquisa foi devido à necessidade de se obter um concreto de maior resistência e elevada plasticidade com pouca água de amassamento principalmente quando da presença das fibras, visto que elas tornam o concreto menos trabalhável.

3.4.2 - Ensaio de Caracterização

Ao longo deste estudo foi necessária a realização de ensaios de caracterização das propriedades mecânicas do concreto. Através destes ensaios foi possível a determinação da quantidade de fibras que seria utilizada na fabricação das vigas bem como para o controle tecnológico dos concretos empregados nas vigas a serem ensaiadas. É importante frisar que o traço do concreto sem fibras já havia sido definido anteriormente por VIDAL FILHO (1999).

Para a definição da quantidade de fibras no concreto foram analisadas as seguintes propriedades: consistência no estado fresco, resistência à compressão uniaxial, resistência à tração na flexão e resistência ao cisalhamento direto. No concreto utilizado nas vigas foram pesquisadas as seguintes propriedades: resistência à compressão uniaxial, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático secante. A descrição destes ensaios e os resultados dos ensaios preliminares para a obtenção do traço ótimo são apresentados nos sub-itens a seguir. Os resultados dos ensaios de caracterização do concreto empregado nas vigas estão apresentados no Capítulo 5.

3.4.2.1 - Consistência (“Slump”)

A determinação da consistência do concreto foi obtida através do ensaio de abatimento do tronco de cone (“slump”) de acordo com a norma brasileira NBR 7223 da ABNT (1982).

A determinação da consistência é necessária para se ter um melhor controle de qualidade no preparo do concreto. Neste caso ele foi empregado também para a determinação da quantidade ótima de fibras de modo a se ter a trabalhabilidade necessária para lançamento, adensamento e acabamento do concreto. Este ensaio foi realizado todas as vezes em que foram preparadas as misturas de concreto.

3.4.2.2 - Resistência à Compressão Uniaxial

Os ensaios de resistência à compressão uniaxial foram executados conforme prescreve a norma brasileira, NBR-5739 da ABNT (1980), em corpos de prova cilíndricos com as dimensões de 10 x 20 cm. Nos ensaios preliminares foi empregada uma prensa hidráulica da marca EMIC-Brasil, com capacidade de 1200 kN, enquanto nos ensaios de controle do concreto das vigas foi empregada uma outra prensa hidráulica, da marca Alfred J. Amsler & Co.- Suíça, com capacidade de 1000 kN.

3.4.2.3 - Resistência à Tração na Flexão

Os ensaios para determinação da resistência à tração na flexão foram executados de acordo com a norma brasileira, MB 3483 da ABNT (1991), em corpos de prova prismáticos de 15 x 15 x 50 cm. As prensas hidráulicas utilizadas foram as mesmas dos ensaios de compressão uniaxial, EMIC nos ensaios preliminares e Alfred J. Amsler & Co. nos ensaios de controle dos concretos das vigas.

3.4.2.4 - Módulo de Elasticidade Estático Secante

O Módulo de Elasticidade Estático Secante foi determinado de acordo com a norma brasileira, NBR 8522 da ABNT (1984), seguindo-se o plano de carga III. O valor do módulo secante foi determinado para uma tensão correspondente a 40% da tensão de ruptura. Corpos de prova cilíndricos de 15 x 30 cm foram utilizados para a determinação do módulo. Para a medida das deformações do concreto empregou-se um sistema composto por dois transdutores de deslocamento axial ISM-04, fabricados pela Straintec, e um compressômetro, acoplado ao corpo de prova. A alimentação dos transdutores foi feita por uma fonte de excitação EQE-01 da marca Straintec. A leitura dos transdutores de deslocamento foi feita através de uma maleta extensométrica de dez canais, MDC-10 da Sodmex.

3.4.2.5 - Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento foi executado com o objetivo de se verificar a influência das fibras na resistência ao cisalhamento direto. Foi realizado um ensaio qualitativo e não quantitativo, na medida em que não se pretendia medir a resistência ao cisalhamento do concreto com fibras, mas sim avaliar o teor de fibras a partir do qual se obteria uma melhora na resistência ao cisalhamento do concreto. Este ensaio, do modo como foi executado, não é regulamentado por nenhuma norma brasileira. O corpo de prova era

formado por três cubos de 15 x 15 x 15 cm, e o esquema de carregamento conforme mostra a figura 3.8. A tensão de cisalhamento última é obtida dividindo-se metade da carga aplicada ($P/2$) pela seção transversal da peça (área rachurada), conforme o corte AA da figura 3.8.

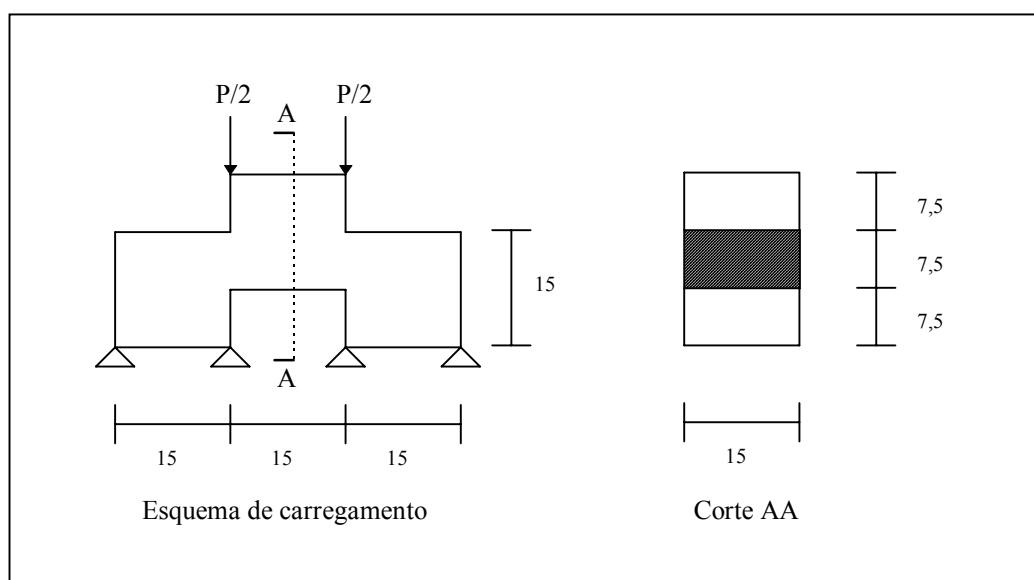


Figura 3.8 - Ensaio de Cisalhamento Direto

3.4.3 - Ensaios Preliminares do Concreto

O objetivo dos ensaios preliminares era a determinação do teor de fibras para a fabricação das vigas com seção transversal em duplo T. O traço a ser estudado deveria ter uma resistência à compressão aos 28 dias de no mínimo 40 MPa e seu “slump”, com a adição de fibras, deveria ficar entre 4 e 6 cm, devido às dificuldades de lançamento e adensamento do concreto em função da geometria da viga.

O traço preliminar do concreto a ser utilizado foi desenvolvido pela PRECON Industrial S.A., respeitando as características mencionadas anteriormente. Após algumas modificações para compatibilizar a resistência do concreto à trabalhabilidade que seria necessária quando da adição das fibras, chegou-se às seguintes proporções: 1:0,43:1,15:1,02:1,54 (proporções em peso, de cimento, pó de pedra, areia quartzosa,

brita 0 e brita 1). O consumo de cimento foi de 427 Kg por m³ de concreto e a relação água/cimento igual a 0,49. A quantidade de aditivo plastificante adicionada ao concreto foi de 0,25% em relação ao peso de cimento.

Para definir o teor de fibras na composição do concreto utilizaram-se, inicialmente, as seguintes proporções de fibras: para as fibras de aço Xorex foram usados teores de 62,8 e 78,5 Kg de fibras por metro cúbico de concreto, correspondentes a 0,8% e 1,0% do volume total de concreto. Já para as fibras de nylon Du Pont teores de 39,25 e 62,8 Kg de fibras por metro cúbico de concreto, correspondentes a 0,5% e 0,8% do volume total de concreto foram empregados. Estes concretos com fibras de nylon apresentaram muito baixa trabalhabilidade, o que levou a reduzir a quantidade de fibras para 15,7 e 23,55 Kg de fibra por metro cúbico, correspondendo a 0,2% e 0,3% do volume total de concreto.

As fibras foram adicionadas gradualmente na betoneira depois do lançamento de todos os outros materiais sem interrupção do processo de mistura. O adensamento do concreto foi realizado mecanicamente com um vibrador de imersão.

3.4.4 - Resultados dos Ensaios Preliminares do Concreto

3.4.4.1 - Consistência (“Slump”)

O valor do “slump” médio obtido inicialmente foi de 2,4 cm e 1,3 cm respectivamente para os concretos com 0,5% e 0,8% de fibra de nylon e de 5,6 cm e 5,3 cm para os concretos com 0,8 e 1,0 % de fibras de aço. Os valores de “slump” obtidos para os concretos com fibra de aço se enquadraram dentro da faixa previamente estabelecida. Por outro lado, os concretos com fibras de nylon apresentaram valores de “slump” bem inferiores aos propostos. Por isso, novas misturas foram feitas com teores correspondentes a 0,2% e 0,3% do volume de concreto. Com estas quantidades os

valores medidos de “slump” subiram para 6,0 cm e 5,5 cm respectivamente se enquadrando dentro da faixa preestabelecida.

3.4.4.2 - Resistência à Compressão Uniaxial

Na tabela 3.3 estão apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial, realizados nas idades de 3, 7 e 28 dias. Os valores indicados para cada idade correspondem à média de dois corpos de prova.

Tabela 3.3 - Resultados dos Ensaios Preliminares - Compressão Uniaxial

Fibra	Teor %	“Slump” (cm)	Resistência à Compressão (MPa)		
			3 dias	7 dias	28 dias
Nylon DuPont	0,2	6,0	34,10	41,30	49,40
	0,3	5,5	32,70	39,60	47,32
	0,5	2,1	32,77	41,00	46,96
	0,8	1,4	34,72	38,96	49,26
Aço Xorex	0,8	5,8	33,36	41,51	42,21
	1,0	6,0	30,64	38,81	37,79

3.4.4.3 - Resistência à Tração na Flexão

Os ensaios de resistência à tração na flexão foram executados aos 7 dias de idade. A resistência à tração, apresentada na Tabela 3.4, representa a média de dois corpos de prova.

Tabela 3.4 - Resultados dos Ensaios Preliminares – Tração na flexão

Fibra	Teor %	“Slump” (cm)	Resistência à Tração (MPa) 7 dias
Nylon DuPont	0,2	6,0	-
	0,3	5,5	-
	0,5	2,1	4,27
	0,8	1,4	4,24
Aço Xorex	0,8	5,8	4,67
	1,0	6,0	5,20

3.4.4.4 - Resistência ao Cisalhamento Direto

A resistência ao cisalhamento direto também foi avaliada aos 7 dias de idade. Os valores apresentados na tabela 3.5 representam a média de dois corpos de prova.

Tabela 3.5 - Resultados dos Ensaios Preliminares – Cisalhamento direto

Fibra	Teor %	“Slump” (cm)	Resistência ao Cisalhamento (MPa) 7 dias
Nylon DuPont	0,2	6,0	-
	0,3	5,5	-
	0,5	2,1	4,23
	0,8	1,4	4,32
Aço Xorex	0,8	5,8	5,11
	1,0	6,0	4,45

3.4.5 - Análise dos Resultados dos Ensaios Preliminares

Para o concreto com fibras de aço, a análise dos resultados dos ensaios preliminares revela uma maior resistência à tração do concreto para um teor de fibras de 1 %. Por outro lado, os valores de resistência à compressão e ao cisalhamento direto foram maiores com 0,8 % de fibras na mistura. Assim sendo optou-se por empregar um teor de 0,8 % de fibras de aço Xorex no concreto das vigas resultando também num custo menor de fabricação.

Com relação ao concreto com fibras de nylon Du Pont, os resultados dos ensaios preliminares indicaram valores de “slump” bem inferiores aos valores preestabelecidos para teores de fibra de 0,5 % e 0,8 %. Por outro lado, os valores de resistência à compressão, nas diversas idades, de resistência à tração na flexão e de resistência ao cisalhamento direto, aos 7 dias, não apresentaram diferenças significativas para estas duas quantidades de fibras. Com a redução da quantidade de fibras para 0,2 % e 0,3 %, nota-se que valores do “slump” atingem os valores previamente fixados, porém sem alteração significativa na resistência à compressão. Este fato sugere que o mesmo deveria acontecer com relação à resistência à tração na flexão e ao cisalhamento direto,

justificando a não execução destes ensaios, nesta fase, para os concretos com 0,2 % e 0,3 % de fibras. Assim sendo, optou-se por empregar o teor de 0,2 % de fibras de nylon Du Pont no concreto das vigas, já que com esta menor quantidade de fibras não houve redução de resistência à compressão e que uma menor quantidade também implica em uma maior economia no custo final do concreto.

4

CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS E PROCEDIMENTOS DE FABRICAÇÃO E ENSAIO

4.1 - Introdução

Neste capítulo são apresentadas as características geométricas das vigas, bem como o detalhamento de suas armaduras de flexão e cisalhamento. São descritos também os detalhes dos procedimentos de fabricação, instrumentação e ensaio das vigas. Finalizando o capítulo, é apresentado o cálculo da capacidade portante das vigas segundo os critérios da nova norma brasileira NBR 6118 (2003).

4.2 - Características das Vigas

Com o traço ótimo obtido nos ensaios preliminares, foram executadas oito vigas de seção transversal duplo T. Essas vigas foram construídas ao longo do ano de 1996 e portanto seguiram os critérios da NBR 6118 (1978) em termos de dimensões mínimas e taxas mínimas de armaduras longitudinal e transversal. As vigas tinham um comprimento de 3300 mm e seção transversal de 200 mm por 350 mm, conforme mostra a figura 4.1. A largura da nervura da peça (b_w) de 80 mm, visou respeitar o mínimo requerido pela norma brasileira NBR 6118 (1978).

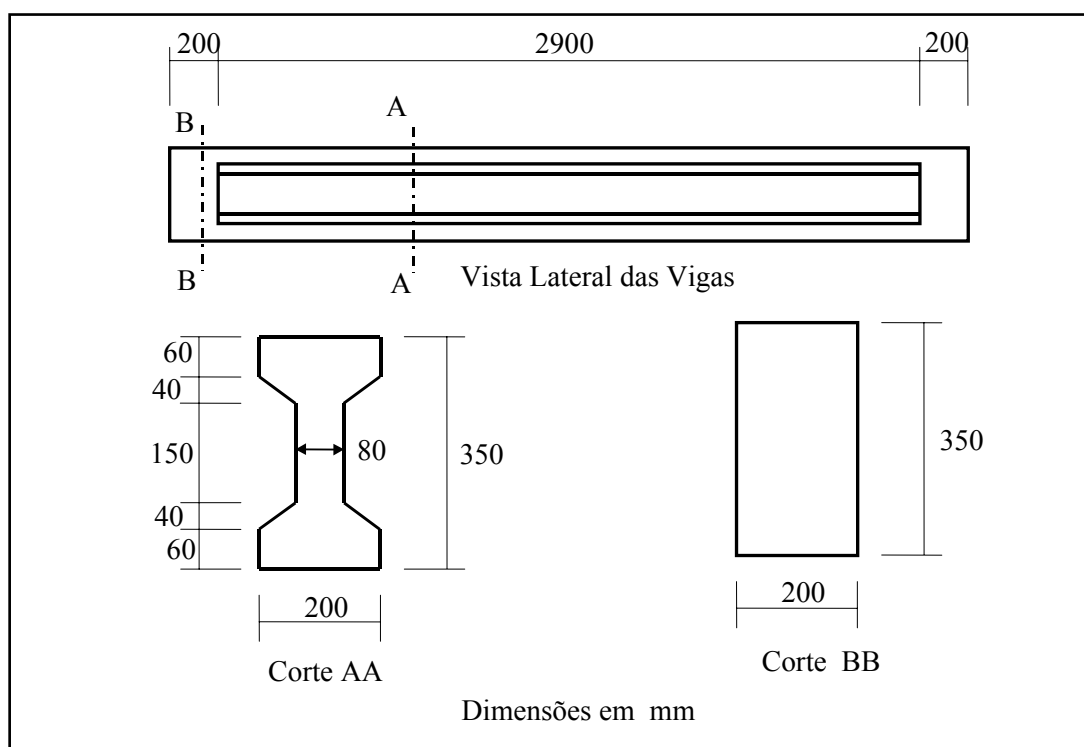


Figura 4.1 – Características geométricas das vigas

As vigas foram divididas, em termos de armadura transversal e teor de fibras adicionado ao concreto, em quatro séries. A numeração das séries foi feita dando seqüência àquela utilizada por VIDAL FILHO (1999), e por isso começa com o número 5. As séries são:

- Série 5 - Duas vigas fabricadas com concreto reforçado com fibras de aço Xorex (teor de 0,8% em volume) e taxa mínima de armadura transversal prescrita pela norma NBR 6118 (1978) (0,14 % de $b_w \cdot s$);
- Série 6 - Duas vigas fabricadas com concreto reforçado com fibras de aço Xorex (teor de 0,8% em volume) e taxa de armadura transversal igual a 0,217 % de $b_w \cdot s$;
- Série 7 - Duas vigas fabricadas com concreto reforçado com fibras de nylon DuPont (teor de 0,2% em volume) e taxa mínima de armadura transversal prescrita pela norma NBR 6118 (1978) (0,14 % de $b_w \cdot s$); e
- Série 8 - Duas vigas fabricadas com concreto reforçado com fibras de nylon DuPont (teor de 0,2% em volume) e taxa de armadura transversal igual a 0,217 % de $b_w \cdot s$.

Para as vigas das séries 5 e 7, com área de armadura transversal igual a 0,14% de $b_w \cdot s$, foram adotados estribos de diâmetro nominal igual a 3,4 mm, espaçados a cada 16 cm, o que representa $1,14 \text{ cm}^2/\text{metro}$ ($\rho_w = 0,142\%$). Para as vigas das séries 6 e 8, com área de armadura transversal igual a 0,217% de $b_w \cdot s$, foram adotados estribos de diâmetro nominal igual a 4,2 mm com espaçamento de 16 cm, o que representa $1,74 \text{ cm}^2/\text{metro}$ ($\rho_w = 0,217\%$). O espaçamento entre estribos adotado satisfaz os critérios da norma brasileira, NBR 6118 (1978), que determinam um espaçamento máximo igual a $0,5d$, não podendo ser maior que 30cm.

A taxa de armadura longitudinal é a mesma para todas as vigas. Foram utilizados 4 diâmetros de 16 mm perfazendo um total de 1,7% da área da seção transversal da viga. A ancoragem de extremidade da armadura transversal seguiu os critérios do item 4.1.6.2 da NBR 6118 (1978), assegurando assim a não ruptura por deficiência de

ancoragem da armação longitudinal sobre o apoio. Na figura 4.2 é mostrado o detalhamento das armaduras.

A nomenclatura empregada para cada viga será composta por um algarismo e uma letra, precedidos pela letra V, seguindo o critério adotado no trabalho do VIDAL FILHO (1999). O algarismo inicial corresponde à série, e a letra A ou B denomina cada uma das vigas daquela série. Portanto, as vigas da série 5 serão denominadas V5A e V5B, as da série 6 serão denominadas V6A e V6B, as da série 7 serão denominadas V7A e V7B e as da série 8 serão denominadas V8A e V8B. A tabela 4.1 resume as características das quatro séries de vigas, que diferem apenas pelo volume de fibra e pela taxa de armadura transversal.

Tabela 4.1 – Características das vigas

Série	Viga	Teor de Fibra (%)	ρ_w (%)	Diâmetro do estribo (mm)	Espaçamento dos estribos (cm)	A_{sw} (cm ² /m)	A_s (cm ²)
5	V5A	0,8	0,142	3,4	16,0	1,138	8,04
	V5B						
6	V6A	0,8	0,217	4,2		1,738	
	V6B						
7	V 7A	0,2	0,142	3,4		1,138	
	V7B						
8	V8A	0,2	0,217	4,2		1,738	
	V8B						

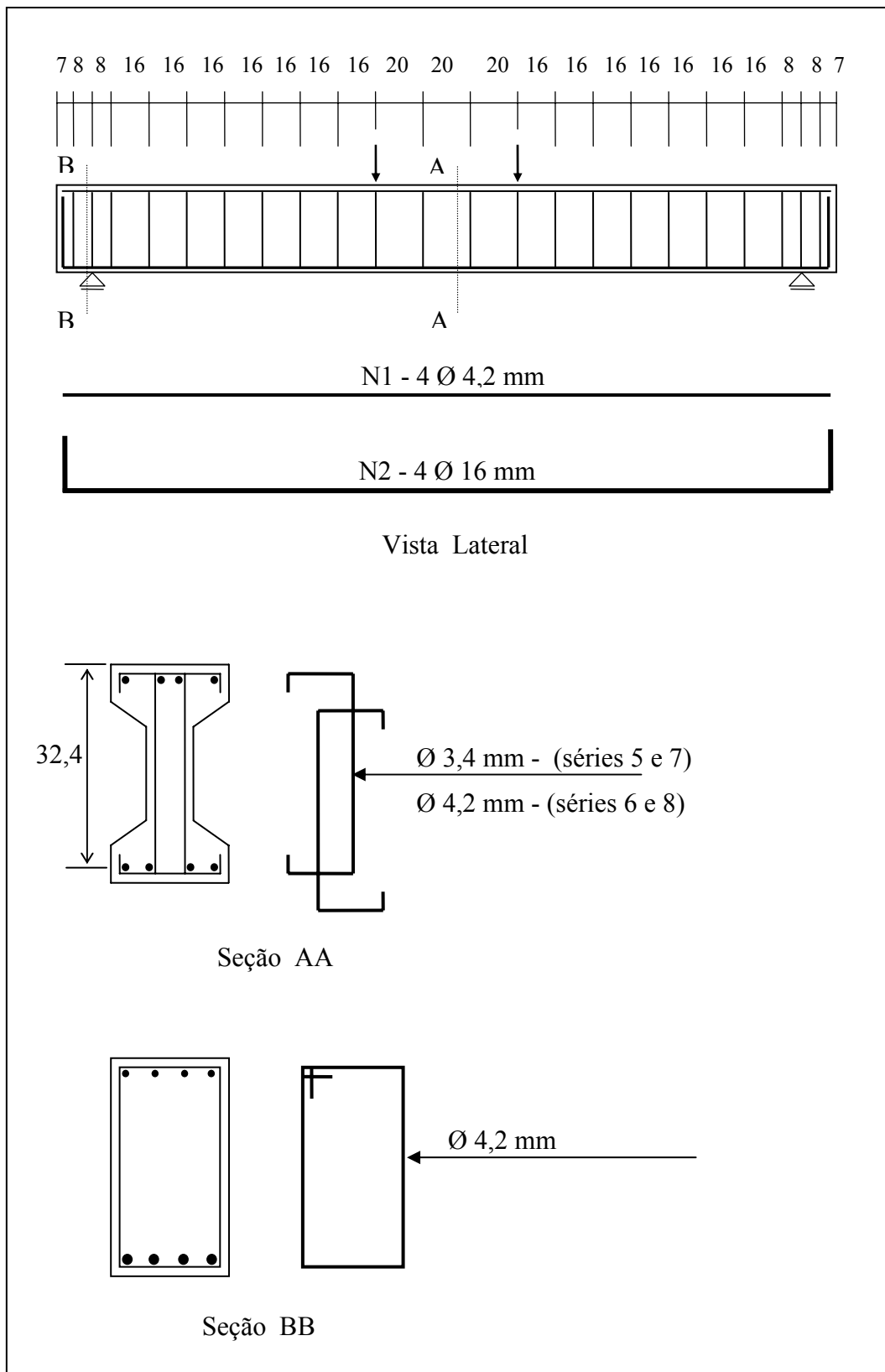


Figura 4.2 – Detalhe da armação das vigas

4.3 - Fabricação das Vigas

As duas vigas de cada série foram concretadas na fábrica da PRECON Industrial S.A., de uma só vez, empregando-se formas metálicas. O concreto foi preparado e adensado seguindo-se os mesmos procedimentos adotados nos ensaios preliminares. Antes e após a adição das fibras, era medido o slump do concreto. Simultaneamente à concretagem das vigas, foram moldados corpos de prova cilíndricos (10 x 20 cm) e (15 x 30 cm) e prismáticos (15 x 15 x 50 cm) para os ensaios de caracterização do concreto.

Para cada viga foram moldados dois corpos de prova cilíndricos de (10 x 20 cm), dois corpos de prova cilíndricos de (15 x 30 cm) e dois corpos de prova prismáticos de (15 x 15 x 50 cm) para se determinar respectivamente a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a resistência à tração na flexão na data de ensaio de cada viga.

Além disso, para cada série, foram moldados também, doze corpos-de-prova cilíndricos de (10 x 20 cm), doze corpos-de-prova cilíndricos de (15 x 30 cm) e quatro corpos-de-prova prismáticos de (15 x 15 x 50 cm). Estes corpos de prova foram utilizados na determinação da resistência à compressão, do módulo de elasticidade e da resistência à tração na flexão do concreto, respectivamente. Os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram realizados, nos corpos-de-prova cilíndricos, nas idades de 3, 7 e 28 dias. Foram utilizados quatro corpos-de-prova por idade para cada tipo de ensaio. O ensaio de resistência à tração na flexão foi feito, nos corpos-de-prova prismáticos, nas idades de 7 e 28 dias, sendo ensaiados dois corpos-de-prova por idade.

4.4 - Instrumentação

Para a avaliação das deformações, as vigas foram instrumentadas utilizando-se extensômetros elétricos. Foram instalados extensômetros na zona comprimida do concreto, na armadura longitudinal e nos estribos. No concreto foram instalados dois extensômetros, no meio do vão na face superior da viga. Na armadura longitudinal foram instalados também dois extensômetros, em duas barras no meio do vão.

Quatro estribos receberam extensômetros, nos seus dois ramos. Os estribos escolhidos para instrumentação foram o quarto e o quinto contados a partir do apoio, nos dois lados da viga (esquerda e direita). Estes estribos foram selecionados por se acreditar que eles seriam cortados pela fissura crítica de cisalhamento na alma da viga.

Os extensômetros do concreto foram simbolizados pela letra C, seguidos pelo número 1 ou 2 que se refere ao lado da viga em que eles estavam localizados, frente e trás, respectivamente. A mesma regra vale para os extensômetros da armadura longitudinal, representados pela letra L. Para os estribos, utilizaram-se as letras E ou D, que se referem aos estribos instrumentados do lado esquerdo ou direito da viga, respectivamente. Os ramos são identificados pelos números 1 e 2, que correspondem aos lados frente e trás. Os números 4 e 5 que antecedem as letras E e D, se referem ao quarto e ao quinto estribo, contados a partir do apoio. A figura 4.3 apresenta as posições dos extensômetros e a nomenclatura utilizada para identificá-los.

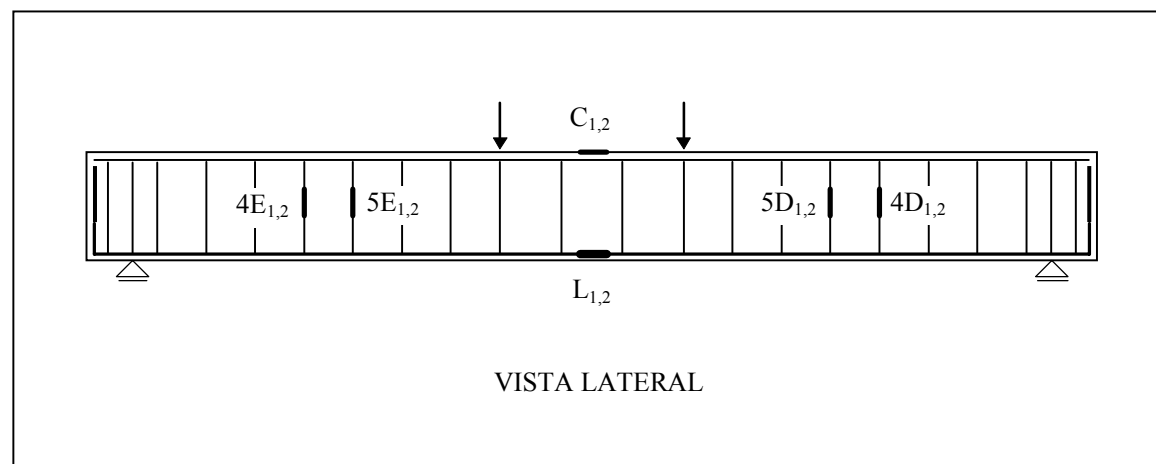


Figura 4.3 – Instrumentação das vigas

4.5 - Ensaio das Vigas

Para cada viga ensaiada, o sistema de carregamento consistiu na aplicação de duas cargas concentradas, eqüidistantes dos apoios e de mesma intensidade. As vigas eram simplesmente apoiadas e, sendo assim, ficaram na região central, submetidas à flexão pura (entre as duas cargas) e nas extremidades sujeitas a cisalhamento constante. A distância entre cada carga aplicada e o apoio mais próximo foi de 120 cm, proporcionando uma relação a/d (vão de cisalhamento/altura efetiva da viga) igual a 3,72.

As cargas foram aplicadas através de um macaco hidráulico com capacidade para 500 kN, ligado a uma bomba de acionamento manual. As leituras dos carregamentos foram realizadas através de anel dinamométrico com capacidade de 500 kN, equipado com relógio comparador. As flechas foram medidas, através de relógios comparadores posicionados no meio e a $\frac{1}{4}$ do vão da viga. A figura 4.4 apresenta o esquema de ensaio das vigas, e a foto 4.1 ilustra uma viga na posição de ensaio.

O carregamento das vigas foi feito sempre de modo crescente. A cada acréscimo de carga eram realizadas as leituras das flechas e a marcação das fissuras. A leitura das deformações foi feita com o emprego de um sistema automatizado de aquisição de dados acoplado a um microcomputador. Os relógios comparadores foram retirados quando a viga estava próxima da ruptura, a fim de preservar a integridade dos aparelhos.

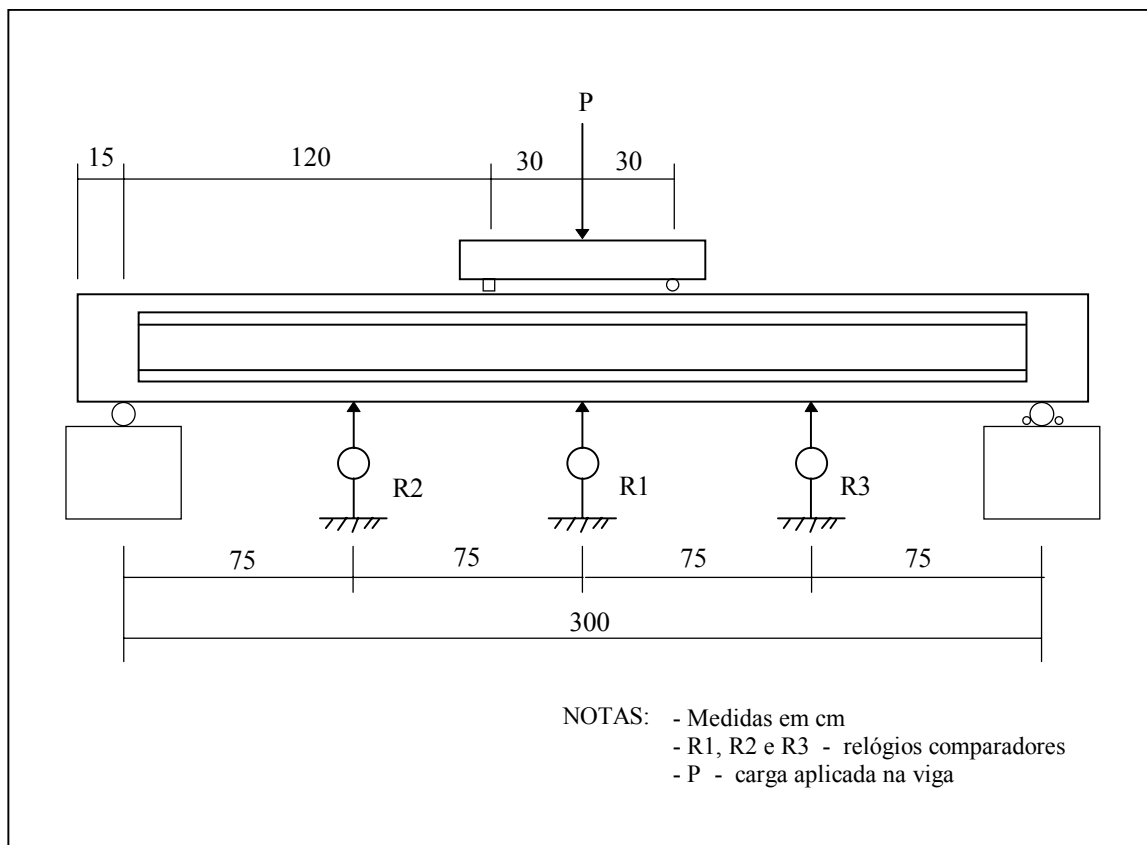


Figura 4.4 – Esquema de ensaio das vigas

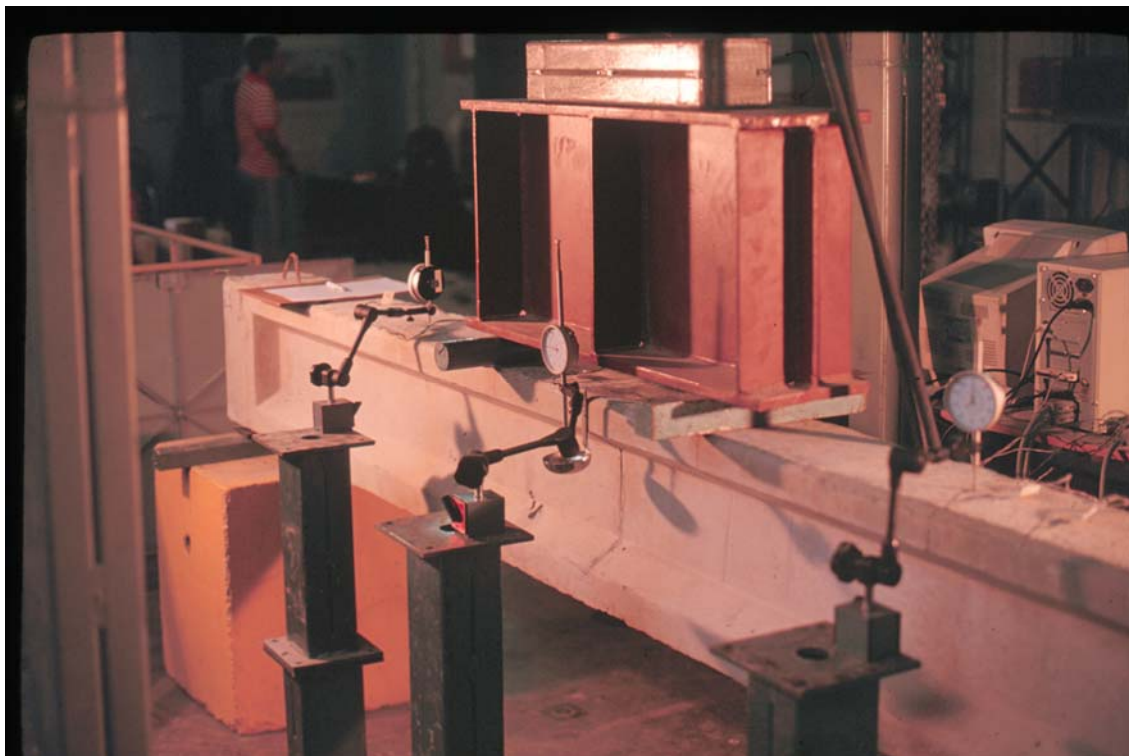


Foto 4.1 - Detalhe de uma viga na posição de ensaio

4.6 - Cálculo da Capacidade Portante das Vigas segundo os Critérios da nova Norma - NBR 6118 (2003)

Serão apresentados, nos próximos subitens, os cálculos para determinação das cargas teóricas de ruptura das vigas, segundo as hipóteses da NBR 6118 (2003). Nesses cálculos foram utilizados, para as propriedades mecânicas dos aços, os valores obtidos nos ensaios. Assim para o aço da armadura longitudinal utilizou-se: $f_{yk} = 510$ MPa e $E_s = 174.000$ MPa; para os estribos com diâmetro de 3,4 mm: $f_{yk} = 740$ MPa e $E_s = 210.000$ MPa; e para os estribos com diâmetro de 4,2 mm: $f_{yk} = 710$ MPa e $E_s = 210.000$ MPa. Adotou-se uma resistência característica à compressão (f_{ck}) para o concreto igual a 45 MPa, também em função dos resultados dos ensaios preliminares do concreto. Os coeficientes de segurança adotados para estes materiais (concreto, $\gamma_c = 1,4$ e aço, $\gamma_s = 1,15$) são prescritos no item 12.4.1 da NBR 6118 (2003).

4.6.1 - Ruptura por Flexão

Para o cálculo do momento fletor último (M_u), utilizou-se, para o concreto, o diagrama retangular equivalente, conforme o item 17.2.2 da norma. Não foi considerado nos cálculos o coeficiente de minoração de 0,85, correspondente ao efeito Rüsç pois os ensaios foram de curta duração. Para o aço, foi utilizado o diagrama do item 8.3.6 da referida norma. Com os coeficientes de minoração prescritos anteriormente, os valores da resistência de cálculo do aço à tração (f_{yd}) e do concreto à compressão (f_{cd}) valem respectivamente 443 MPa e 32,1 MPa. A figura 4.5 ilustra os estados de deformação e de tensão utilizados nos cálculos.

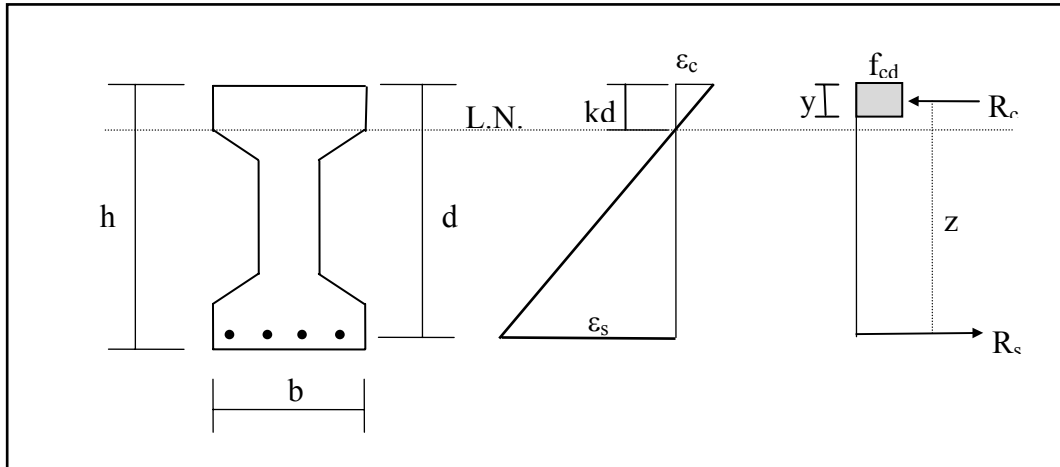


Figura 4.5 – Estados de deformação e tensão – Estado Limite Último

Para o cálculo da resultante da força de tração na armadura, utilizaram-se as seguintes equações:

$$R_s = A_s \cdot \sigma_s \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_{yd} = f_{yd} / E_s \quad (4.2)$$

$$\sigma_s = \varphi_s \cdot f_{yd} \quad (4.3)$$

onde: $\varphi_s = 1$ para $\varepsilon_s \geq \varepsilon_{yd}$ e

$$\varphi_s = E_s \cdot \varepsilon_s / f_{yd} \text{ para } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{yd} .$$

Para a determinação da resultante de força no concreto para a situação em que $y = 0,8 \cdot kd \leq 6 \text{ cm}$, vem:

$$R_c = b \cdot y \cdot f_{cd} \quad (4.4)$$

As equações de equilíbrio ficam então:

$$\sum N = 0 \Rightarrow R_c - R_s = 0 \quad (4.5)$$

$$\sum M = 0 \Rightarrow M_u = R_c \cdot z \quad (4.6)$$

sendo o valor de z igual a $(d - 0,4 \cdot kd)$.

Portanto a relação entre o momento fletor de ruptura, M_u , (em kN.m) e a carga aplicada, P_{fl} , bem como o esforço cortante de extremidade ficam iguais a:

$$P_{fl} = M_u / 0,6 \quad (4.7)$$

$$V_{fl} = P_{fl} / 2 \quad (4.8)$$

Os valores calculados do esforço cortante e da carga total aplicada correspondentes à ruptura por flexão das vigas de cada série se encontram na tabela 4.2.

4.6.2 - Ruptura por Cisalhamento (Esmagamento da Biela Comprimida)

O cálculo do esforço cortante (V_{esm}) correspondente ao esmagamento da biela comprimida de concreto, para vigas com estribos verticais ($\alpha = 90^\circ$) e diagonais de compressão inclinadas de θ em relação ao eixo da viga, é feito através da seguinte equação:

$$V_{esm} = 0,54 \alpha_v f_{cd} b_w \cdot d \text{ sen}^2 \theta (\text{cotg } \alpha + \text{cotg } \theta) \quad (4.9)$$

com $\alpha_v = (1 - f_{ck}/250)$. Assumindo inicialmente que o ângulo θ seja igual a 45° e com a resistência característica à compressão do concreto igual a 45 MPa, os valores do esforço cortante (V_b) e da carga de ruptura (P_b) ficam iguais a:

$$V_{esm} = 0,2214 f_{cd} b_w \quad (4.10)$$

$$P_{esm} = 2 \cdot V_{esm} \quad (4.11)$$

Os resultados da carga de ruptura (P_{esm}) e do esforço cortante (V_{esm}) devido ao esmagamento da biela comprimida encontram-se também na tabela 4.2.

4.6.3 - Ruptura por Cisalhamento (Ruína por Tração Diagonal)

De acordo com o item 17.4.2 da nova NBR 6118 (2003), a força cortante relativa à ruína por tração diagonal é dada por :

$$V_{\text{rtd}} = V_c + V_{\text{sw}} \quad (4.12)$$

onde V_c é a parcela da força cortante absorvida pelos mecanismos complementares ao da treliça (banzo comprimido de concreto, engrenamento dos agregados e efeito de pino da armadura transversal) e V_{sw} a parcela absorvida pela armadura transversal. As parcelas V_c e V_{sw} são dadas por:

$$V_c = 0,6 f_{\text{ctd}} b_w \cdot d \quad (4.13)$$

$$V_{\text{sw}} = 0,9 \cdot (A_{\text{sw}} / s) \cdot d \cdot f_{\text{ywd}} \cdot \sin \alpha \cdot (\cotg \alpha + \cotg \theta) \quad (4.14)$$

Empregando a relação entre a resistência característica à compressão do concreto (f_{ck} em MPa) e f_{ctd} preconizada pelo item 8.2.5 da norma NBR 6118 (2003), o ângulo dos estribos igual a 90° , e assumindo inicialmente que o ângulo θ seja igual a 45° , os valores de V_c e de V_{sw} ficam iguais a:

$$V_c = 0,09 f_{\text{ck}}^{2/3} b_w \cdot d \quad (4.15)$$

$$V_{\text{sw}} = 0,9 \cdot (A_{\text{sw}} / s) \cdot d \cdot f_{\text{ywd}} \quad (4.16)$$

Portanto o valor da carga de ruptura da viga devido ao ruína por tração diagonal é dada por:

$$P_{\text{rtd}} = 2 \cdot V_{\text{rtd}} \quad (4.17)$$

Os valores da carga de ruptura (P_{rtd}) e do esforço cortante (V_{rtd}) devido à ruína por tração diagonal, segundo os critérios da nova NBR 6118, encontram-se também na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Tensões e cargas de ruptura segundo a NBR 6118 (2003)

Série	Diâmetro do Estribo (mm)	Ruptura por Flexão		Ruptura por Cisalhamento			
				Esmagamento da Biela Comprimida		Ruína por Tração Diagonal	
		V_{fl} (kN)	P_{fl} (kN)	V_{esm} (kN)	P_{esm} (kN)	V_{rtd} (kN)	P_{rtd} (kN)
5 e 7	3,4	87,6	175,2	184,2	368,4	50,9	101,8
6 e 8	4,2	87,6	175,2	184,2	368,4	60,8	121,6

A análise dos resultados da tabela acima indica que, de acordo com os critérios da NBR 6118 (2003), a ruptura das vigas ocorrerá por cisalhamento com ruína por tração diagonal.

5

RESULTADO DOS ENSAIOS

5.1 – Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados das propriedades mecânicas dos concretos utilizados na fabricação das vigas bem como dos ensaios destas mesmas vigas. Os resultados serão apresentados, individualmente, para cada viga ensaiada e por série no que tange às propriedades mecânicas do concreto. As deformações na armadura e no concreto encontram-se no Apêndice A deste trabalho, tabelas A1 a A8. Os valores das flechas medidas no meio e a $\frac{1}{4}$ do vão estão apresentadas nas tabelas B1 a B8 do Apêndice B. A análise dos resultados dos ensaios das vigas será apresentada no capítulo 6.

5.2 – Propriedades Mecânicas do Concreto

Os resultados das propriedades mecânicas estudadas do concreto, resistência à compressão uniaxial, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático secante, estão mostrados na tabela 5.1. Os resultados correspondem às médias aritméticas das resistências e do módulo de elasticidade do concreto, nas idades pesquisadas.

Tabela 5.1 – Propriedades mecânicas dos concretos empregados nas vigas

Série	Tipo de Fibra	Teor de Fibra (%)	“Slump” (cm)	Resistências (MPa)					Módulo de Elasticidade (MPa)		
				Compressão			Tração		3d	7d	28d
				3d	7d	28d	7d	28d			
5	Aço	0,8	5,5	30,9	38,1	42,4	3,7	4,7	23417	33856	-*
6			5,5	33,8	38,0	43,5	4,7	6,3	30951	33932	38390
7	Nylon	0,2	4,0	35,8	41,1	45,4	4,0	4,7	28089	29124	30002
8			3,2	32,8	39,2	46,2	4,2	4,6	25144	26521	29568

* - O número de corpos de prova moldados foi insuficiente.

5.3 – Resultados dos Ensaios das Vigas

Como este trabalho é uma sequência do estudo realizado por VIDAL FILHO (1999), os ensaios seguiram a mesma metodologia. Assim sendo foram determinados, na data de ensaio de cada viga, a resistência à compressão do concreto, a resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade estático secante.

5.3.1 – Série 5

As vigas desta série foram fabricadas com fibras de aço Xorex num teor de 0,8% e estribos de 3,4 mm de diâmetro espaçados a cada 16 centímetros.

Viga V5A

A viga V5A foi ensaiada 298 dias após a sua concretagem. O concreto apresentou uma resistência à compressão de 47 MPa, resistência à tração na flexão de 5,5 MPa e um módulo de elasticidade de 41929 MPa.

Visualmente, as primeiras fissuras de flexão surgiram com a carga de 40 kN e a primeira fissura de cisalhamento com a carga de 44,5 kN. Após estas cargas, as fissuras foram surgindo gradativamente. A carga referente ao início de trabalho dos estribos foi de 71,2 kN para todos os estribos. Para a determinação desta carga de acionamento dos estribos foi considerado um valor de deformação igual ou superior a $100 \mu\epsilon$, para a média das duas pernas. Para resguardar os equipamentos, em função da violência da ruptura detectada num dos ensaios realizado por VIDAL FILHO (1999), as leituras das flechas e das deformações nas armaduras e no concreto foram feitas, respectivamente, até as cargas de 173,5 e 164,6 kN. Até esta carga, apenas o 4E apresentou deformações acima do limite de escoamento.

A ruptura da viga em cisalhamento, por tração diagonal com ruína dos estribos, ocorreu do lado direito da viga com a carga máxima de 177,9 kN. A fissura diagonal crítica apresentou inclinação de 42° em relação ao eixo da viga. O espaçamento médio entre fissuras, avaliado ao final do ensaio, foi de 13,5 cm. O mapeamento das fissuras pode ser visto na Figura 5.1 e a Foto 5.1 mostra o detalhe da viga após a ruptura.

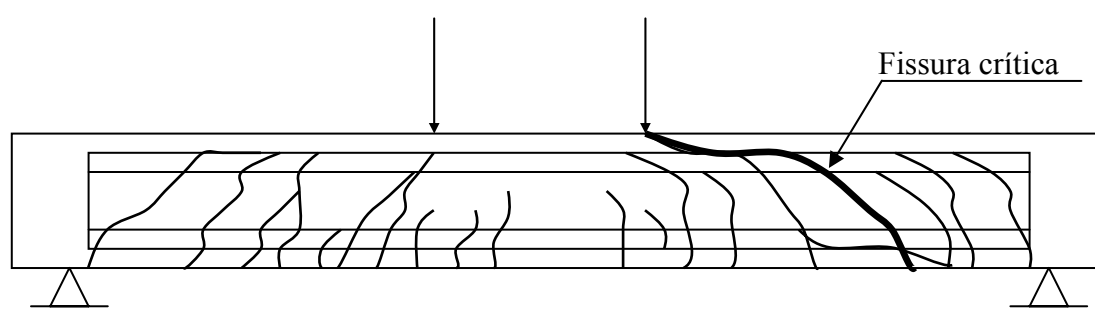


Figura 5.1 – Viga V5A - Fissuração final

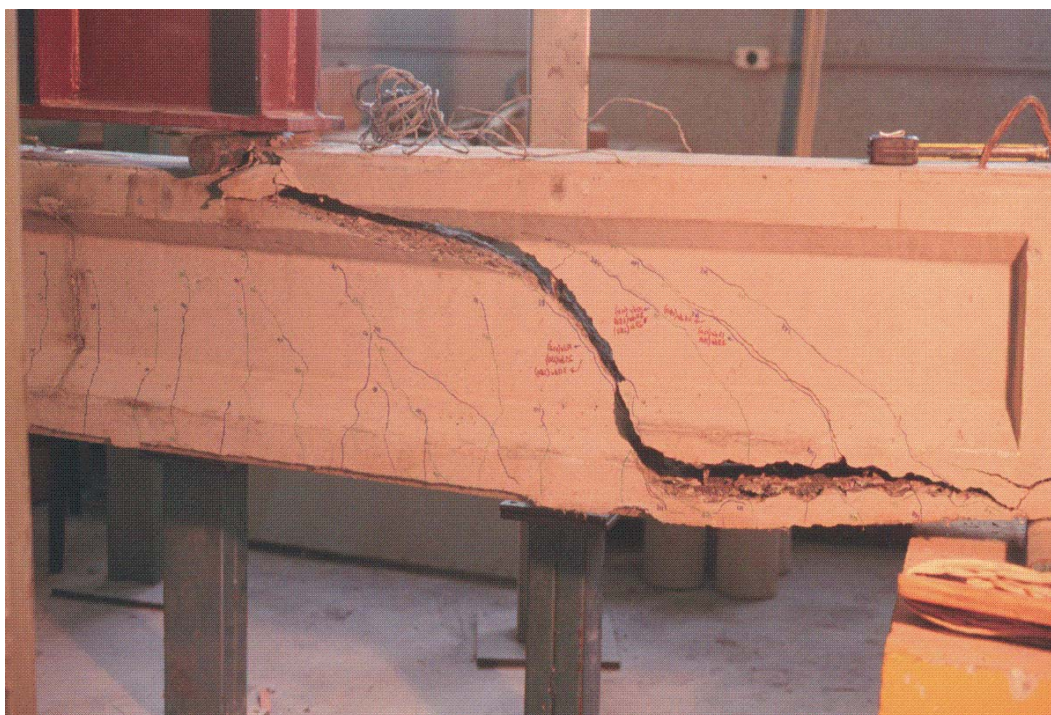


Foto 5.1 – Viga V5A – Detalhe da viga após a ruptura

Viga V5B

A viga V5B foi rompida 303 dias após a sua execução. Esta viga foi concretada junto com a viga anterior, completando assim, a série 5. Os resultados dos ensaios das propriedades mecânicas do concreto nesta data foram: 47 MPa para a resistência à compressão, 5,5 MPa para resistência à tração na flexão e 41929 MPa para o módulo de elasticidade estático secante.

A primeira fissura de flexão, observada visualmente, ocorreu com a carga de 35,6 kN e a primeira fissura de cisalhamento surgiu com a carga de 40,0 kN. O início de trabalho dos estribos ocorreu para a carga de 71,2 kN, relativo o estribo 5E. Para os demais estribos, a carga de acionamento foi de 89 kN. Os relógios comparadores foram retirados com a carga de 173,5 kN registrando uma flecha no meio do vão igual 14,24 mm. As deformações foram lidas até a carga de 177,9 kN. Até esta carga, não foram observadas deformações acima do limite de escoamento tanto nos estribos monitorados quanto na armadura longitudinal.

Com a carga de 188,6 kN ocorreu a ruína da viga. O modo de falha foi também neste caso por cisalhamento em tração diagonal com ruptura dos estribos. A inclinação da fissura diagonal crítica foi de 40° e o espaçamento médio entre as fissuras foi de 10,5 cm. A figura 5.2 apresenta o estado de fissuração ao final do ensaio.

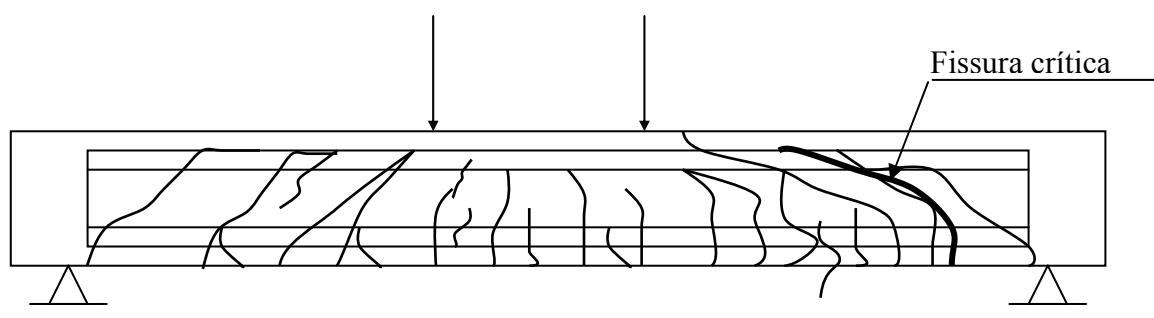


Figura 5.2 – Viga V5B - Fissuração final

A relação carga versus flecha no meio do vão para as duas vigas da Série 5 está apresentada na figura 5.3. Observa-se que o comportamento de ambas as vigas foi praticamente idêntico.

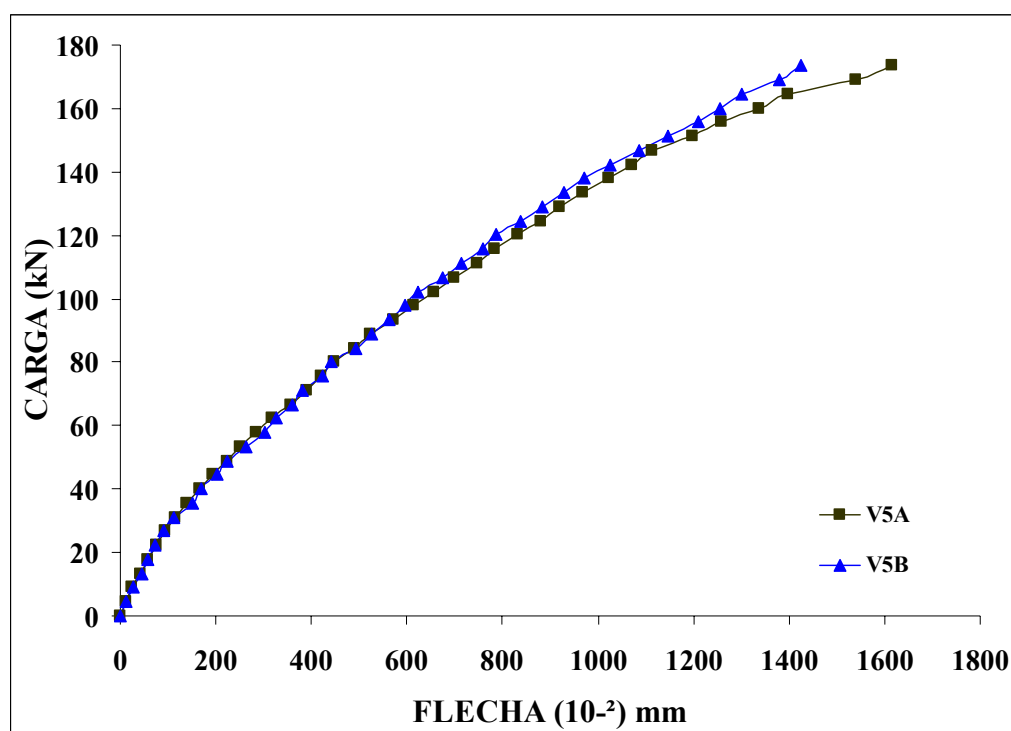


Figura 5.3 – Série 5 - Relação Carga x Flecha no meio do vão

5.3.2 – Série 6

As vigas desta série eram similares às vigas da Série 5 porém com estribos de 4,2 mm de diâmetro espaçados a cada 16 centímetros.

Viga V6A

A viga V6A foi ensaiada 283 dias após a sua concretagem. Nesta data, o concreto apresentou uma resistência à compressão de 41,3 MPa, resistência à tração na flexão de 4,5 MPa e um módulo de elasticidade secante de 43058 MPa.

As primeiras fissuras de flexão foram observadas com a carga de 35,6 kN e as primeiras fissuras de cisalhamento surgiram com a carga de 40,0 kN. A carga de acionamento dos estribos foi de 89 kN, exceto para o estribo 4E que começou a trabalhar com uma carga de 97,9 kN.

A armadura longitudinal atingiu a deformação de escoamento na carga de 169 kN. Os estribos também escoaram mas para uma carga bem mais elevada: 195,7 kN. As últimas leituras das flechas foram feitas para a carga de 173,5 kN e os últimos registros das deformações correspondem à carga de 209 kN.

A ruptura da viga ocorreu por flexão pura, com o esmagamento do concreto no banzo comprimido, na região de momento fletor máximo entre os pontos de aplicação de carga. A carga de ruptura da viga foi de 216,2 kN. O espaçamento médio entre fissuras, avaliado ao final do ensaio, foi de 11 cm. O panorama da fissuração pode ser visto na figura 5.4.

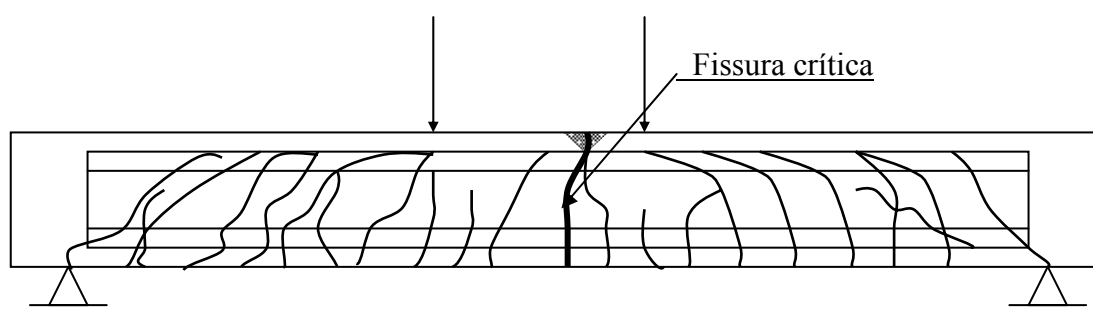


Figura 5.4 – Viga V6A - Fissuração final

Viga V6B

Esta viga completa a Série 6 e tem as mesmas características da viga V6A. Ela foi rompida 293 dias após a sua concretagem. Os resultados dos ensaios das propriedades mecânicas do concreto da viga foram os seguintes: 52,9 MPa para a resistência à compressão, 5,7 MPa para a resistência à tração na flexão e 45032 MPa para o módulo de elasticidade.

As primeiras fissuras de flexão apareceram com 40kN de carga e as primeiras fissuras de cisalhamento surgiram com a carga de 48,9 kN. A carga de início de trabalho dos estribos foi de 62,3 kN, referente ao estribo 4D, e de 89 kN para os demais estribos.

A armadura longitudinal atingiu a deformação de escoamento na carga de 151 kN. Os estribos também escoaram mas para uma carga bem mais elevada: 195,7 kN. A leitura das flechas e o registro das deformações no concreto e nas armaduras foram feitos até uma carga de 204,6 kN.

A carga de ruína da viga foi de 217 kN. O modo de ruptura ocorreu por esmagamento do concreto do banzo comprimido na região de momento fletor máximo, no ponto de encontro de duas fissuras: uma vertical e outra inclinada. A figura 5.5 ilustra este fato. O espaçamento médio entre as fissuras foi de 10,10 cm.

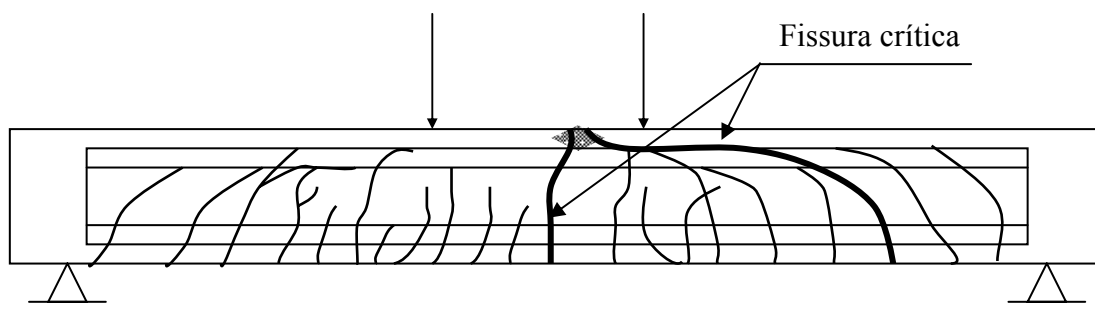


Figura 5.5 – Viga V6B - Fissuração final

A relação carga versus flecha no meio do vão para as duas vigas da Série 6 está apresentada na figura 5.6. Apesar de ambas as vigas terem tido praticamente a mesma carga de ruptura a viga V6B mostrou-se mais rígida.

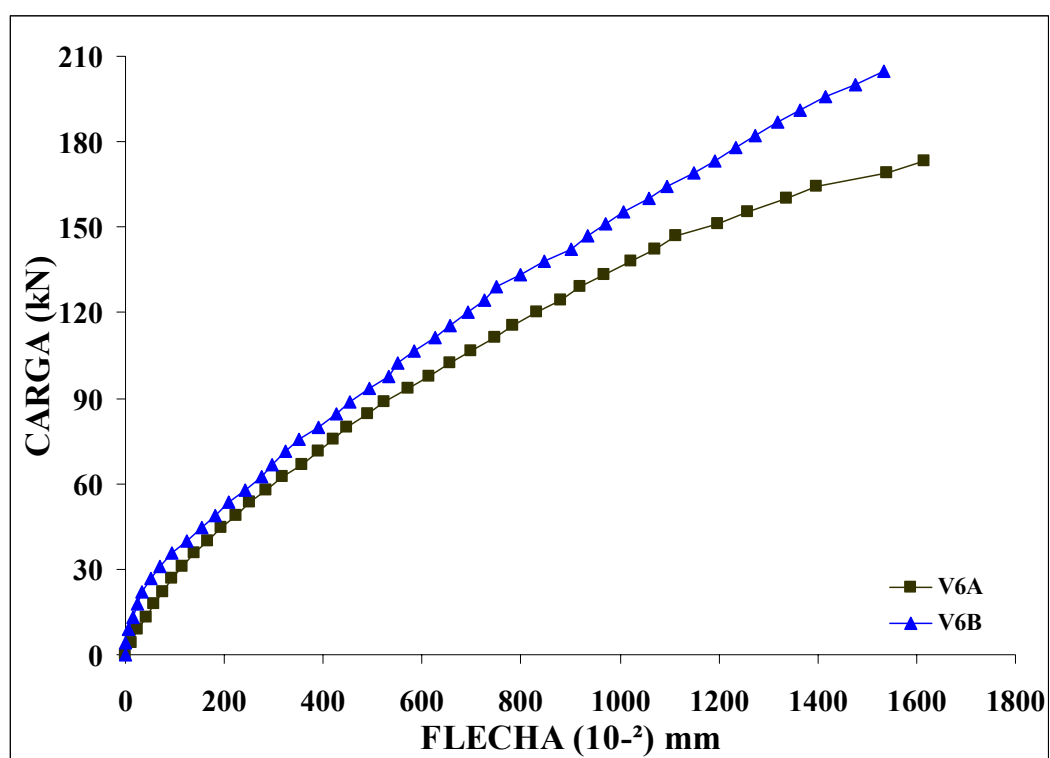


Figura 5.6 – Série 6 - Relação Carga x Flecha no meio do vão

5.3.3 – Série 7

As vigas desta série foram fabricadas com fibras de nylon Du Pont num teor de 0,2% e estribos de 3,4 mm de diâmetro espaçados a cada 16 centímetros.

Viga V7A

A viga V7A foi a primeira viga com fibra de Nylon a ser ensaiada. O ensaio foi realizado 304 dias após a sua concretagem. Nesta data, o concreto apresentou resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade de, respectivamente, 56,1 MPa, 5,5 MPa e 40603 MPa.

As primeiras fissuras de flexão foram observadas para a carga de 26,7 kN enquanto que as primeiras fissuras de cisalhamento surgiram com a carga de 40 kN. O início de trabalho dos estribos correspondeu à carga de 48,93 kN, relativo ao estribo 4D. Os estribos 4E e 5E começaram a absorver o esforço com uma carga de 53,37 kN e o estribo 5D com uma carga de 62,27 kN.

Os estribos do lado esquerdo atingiram a deformação de escoamento na carga de 137,7 kN, enquanto do lado direito isto ficou evidenciado apenas na última leitura de deformações correspondente a carga de 146,8 kN. Até esta carga, não foram observadas deformações acima do limite de escoamento na armadura longitudinal.

A ruína da viga ocorreu por cisalhamento (tração diagonal com ruptura dos estribos) para a carga de 160,11 kN. A peça rompeu bruscamente no lado esquerdo e houve desmoronamento de partes do concreto na região de ruína. Duas fissuras críticas, uma do lado esquerdo e outra do lado direito, estendendo-se desde o ponto de aplicação de carga até as proximidades dos apoios foram identificadas com inclinações de 41° e 42°, respectivamente, em relação à horizontal. A figura 5.7 ilustra este fato. Apesar da ruptura ocorrer apenas do lado esquerdo, a fissura crítica do lado direito ficou com as mesmas características, dando a impressão de serem espelhadas. A distância média entre fissuras foi de 11,2 cm.

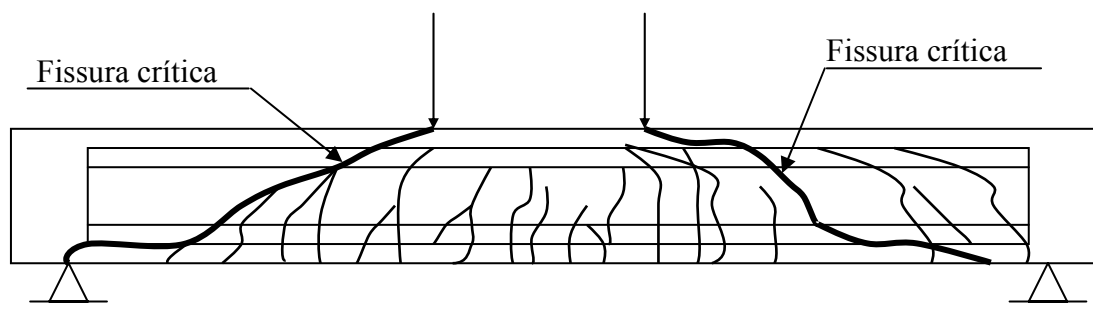


Figura 5.7 – Viga V7A - Fissuração final

Viga V7B

Esta viga é o par da viga anterior (V7A) e foi rompida 311 dias após a sua concretagem. Os ensaios das propriedades mecânicas do concreto, nesta data, apresentaram os seguintes resultados: 55,2 MPa para a resistência à compressão, 5,1 MPa para a resistência à tração na flexão e 46550 MPa para o módulo de elasticidade estático secante.

As primeiras fissuras de flexão perceptíveis foram observadas para a carga de 35,6 kN, e a primeira fissura de cisalhamento surgiu com a carga de 40 kN. O início de trabalho dos estribos correspondeu à carga de 62,3 kN, relativo ao estribo 5E. O estribo 4D foi acionado aos 75,6 kN de carga, enquanto que para os estribos 4E e 5D este fato ocorreu para uma carga de 80 kN.

O escoamento dos estribos de ambos os lados da viga ficou evidenciado apenas na última leitura de deformações correspondente a 151,2 kN de carga. Não foram observadas deformações acima do limite de escoamento na armadura longitudinal.

Com a carga de 164,6 kN ocorreu o colapso da viga bruscamente com desmoronamento de partes do concreto na região da ruína. O modo de falha foi por cisalhamento em tração diagonal com ruptura dos estribos. Duas fissuras críticas do lado direito foram identificadas com inclinações de 48° e 33° em relação à horizontal. A região de ruína se estendeu desde o ponto de aplicação de carga atingindo a armadura longitudinal a

aproximadamente 50 cm do apoio da direita da viga. O panorama da fissuração, ao final do ensaio, está mostrado na figura 5.8. A distância média entre fissuras foi de 13,3 cm. A foto 5.2 apresenta detalhes da viga após a ruptura.

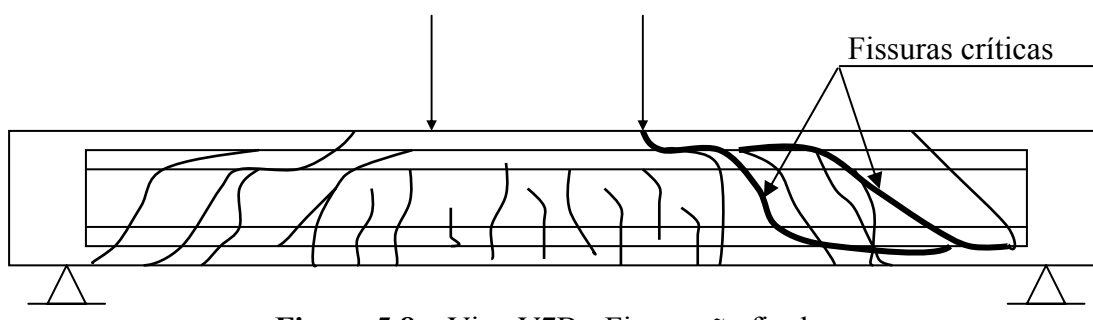


Figura 5.8 – Viga V7B - Fissuração final



Foto 5.2 – Viga V7B – Detalhes da viga após a ruptura

A relação carga versus flecha no meio do vão para as duas vigas da Série 7 está apresentada na figura 5.9. O comportamento de ambas as vigas foi bem similar.

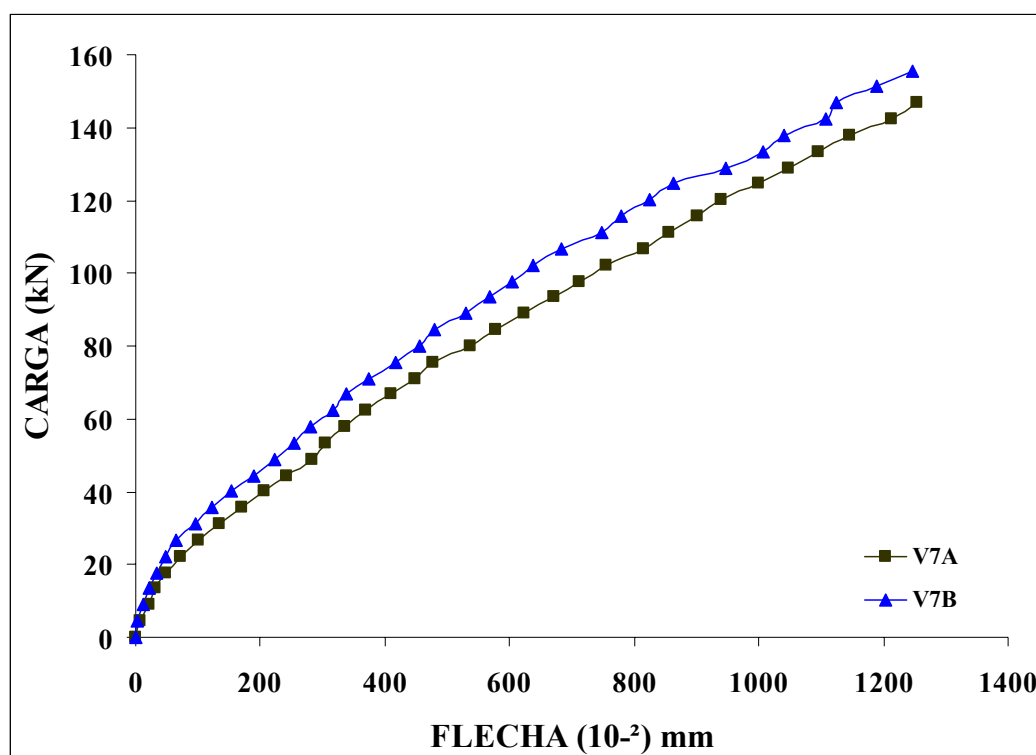


Figura 5.9 – Série 7 - Relação Carga x Flecha no meio do vão

5.3.4 – Série 8

As vigas desta série eram similares às vigas da Série 7 porém com estribos de 4,2 mm de diâmetro espaçados a cada 16 centímetros.

Viga V8A

O rompimento desta viga se deu 309 dias após a sua concretagem. Nesta data, os resultados dos ensaios das propriedades mecânicas do concreto foram: 52,1 MPa para a resistência à compressão; 5,1 MPa para a resistência à tração na flexão e 37717 MPa para o módulo de elasticidade estático secante.

As primeiras fissuras de flexão foram observadas com a carga de 31,1 kN e a primeira fissura de cisalhamento surgiu com uma carga de 35,6 kN. O início de trabalho nos

estribos 4D e 5E ocorreu para uma carga de 53,4 kN. Nos estribos 5D e 4E este fato se deu com 71,2 kN de carga.

Os estribos do lado esquerdo atingiram a deformação de escoamento na carga de 151,2 kN, enquanto do lado direito isto ficou evidenciado apenas na última leitura de deformações correspondente a carga de 169 kN. Até esta carga, não foram observadas deformações acima do limite de escoamento na armadura longitudinal.

O colapso da viga ocorreu para uma carga de 182,4 kN. O modo de ruína foi por cisalhamento em tração diagonal com ruptura dos estribos. A fissura diagonal crítica apresentou inclinação de 45° em relação ao eixo da viga. O espaçamento médio entre fissuras, avaliado ao final do ensaio, foi de 10 cm. O mapeamento das fissuras pode ser visto na Figura 5.10.

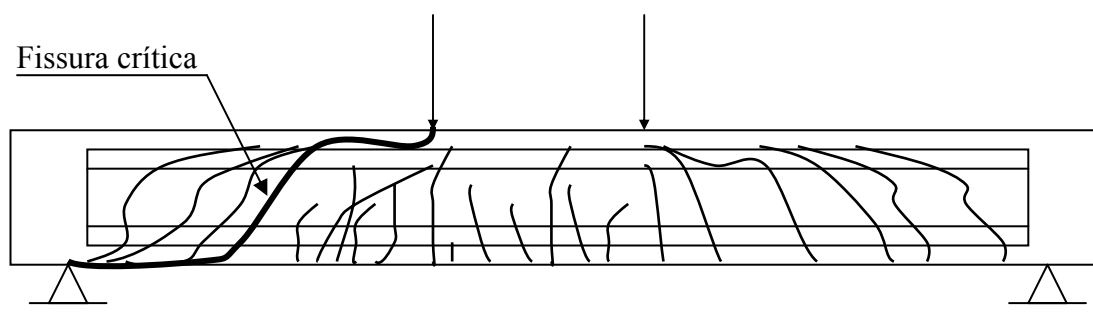


Figura 5.10 – Viga V8A - Fissuração final

Viga V8B

A viga V8B foi a última viga a ser ensaiada e era o par da anterior, a viga V8A. A ruptura da viga ocorreu 314 dias após a sua concretagem. O concreto apresentou uma resistência à compressão de 53,6 MPa, resistência à tração na flexão de 5,9 MPa e um módulo de elasticidade de 38820 MPa.

As primeiras fissuras de flexão foram observadas com a carga de 26,7 kN e as primeiras fissuras de cisalhamento surgiram com a carga de 31,1 kN. O início do trabalho do

estribo 5D ocorreu para uma carga de 71,16 kN. A carga de acionamento dos estribos 4D e 4E foi de 80,06 kN e de 97,85 kN para o estribo 5E.

Foi observado escoamento dos estribos do lado direito apenas na última leitura de deformações correspondente a carga de 182,3 kN. Não foi detectado escoamento da armadura longitudinal e dos estribos do lado esquerdo até então.

A viga rompeu bruscamente com uma carga de 186,8 kN. O modo de falha foi por cisalhamento em tração diagonal com ruptura dos estribos. A fissura crítica do lado direito apresentou inclinação de 34° em relação à horizontal. O panorama da fissuração, ao final do ensaio, está mostrado na figura 5.11. A distância média entre fissuras foi de 10,7 cm.

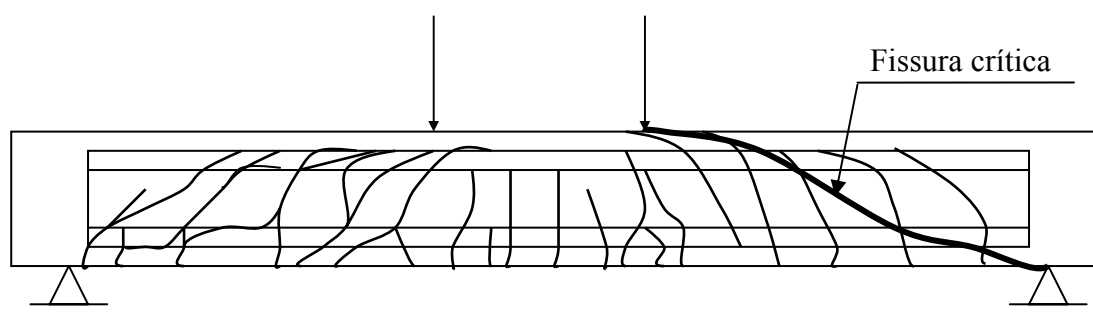


Figura 5.11 – Viga V8B - Fissuração final

A relação carga versus flecha no meio do vão para as duas vigas da Série 8 está apresentada na figura 5.12. Observa-se que o comportamento de ambas as vigas foi praticamente idêntico.

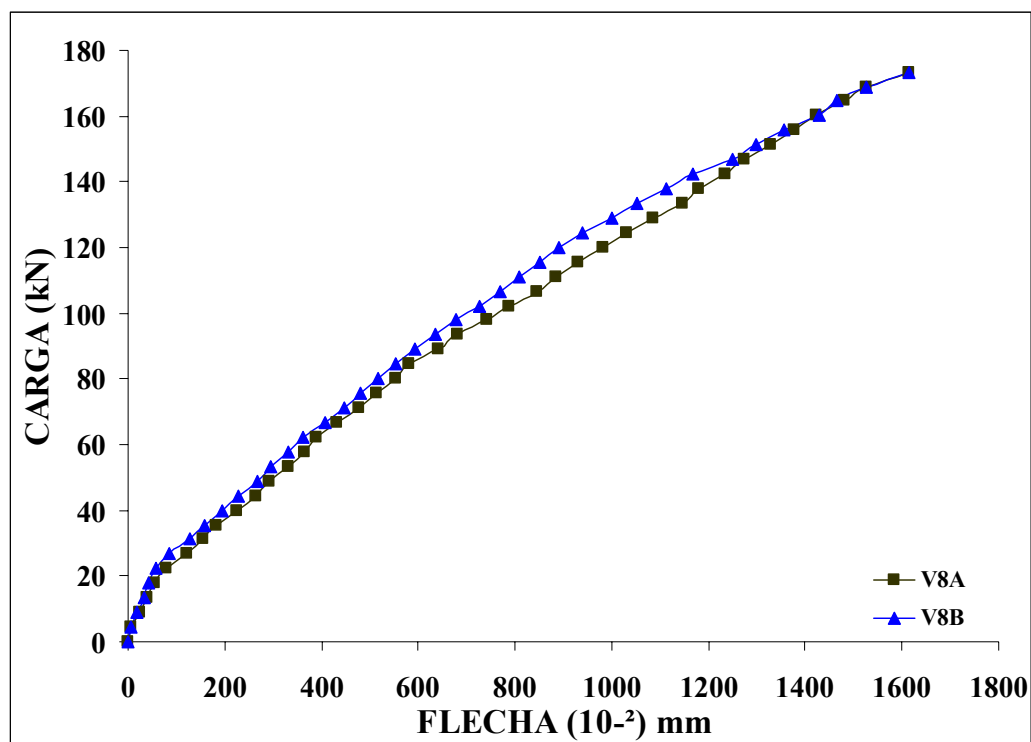


Figura 5.12 – Série 8 - Relação Carga x Flecha no meio do vão

5.4 – Resumo dos Resultados dos Ensaios das Vigas

Um resumo dos resultados dos ensaios das vigas e das propriedades mecânicas do concreto na data de ensaio das vigas é apresentado nas tabelas 5.2 e 5.3.

Na tabela 5.2 são apresentados para todas as vigas:

P_{fvf} = carga correspondente à primeira fissura de flexão observada;

P_{fvc} = carga correspondente à primeira fissura de cisalhamento observada;

P_{te} = carga correspondente ao início de entrada em trabalho dos estribos;

P_{fl} = carga correspondente à flecha admissível;

s_f = espaçamento médio entre as fissuras; e

P_{rup} = carga de ruptura.

Tabela 5.2 – Resumo dos ensaios das vigas

Viga	Diâmetro do estribo (mm)	Tipo de Fibra	Teor de Fibra (%)	Data de Ensaio (dias)	P_{fvf} (kN)	P_{fvc} (kN)	P_{te} (kN)	P_{fl} (kN)	S_f (cm)	P_{rup} (kN)	P_{fn}	Tipo de Ruptura	Inclin. da fissura diagonal crítica (°)
V5A	3,4	Aço Xorex	0,8	298	40,0	44,5	71,2	151,2	13,5	177,9	1,18	cisalhamento*	42
V5B				303	35,6	40,0	71,2	155,7	10,5	188,6	1,21	cisalhamento*	40
V6A	4,2			283	35,6	40,0	89	151,2	11,0	216,2	1,43	flexão	-
V6B				293	40,0	48,9	62,3	173,5	10,1	217,0	1,25	flexão	-
V7A	3,4	Nylon DuPont	0,2	304	26,7	40,0	48,9	142,3	11,2	160,1	1,13	cisalhamento*	41
V7B				311	35,6	40,0	62,3	151,2	13,3	164,6	1,09	cisalhamento*	40
V8A	4,2			309	31,1	35,6	53,4	142,3	10	182,4	1,28	cisalhamento*	45
V8B				314	26,7	31,1	71,2	146,8	10,7	186,8	1,27	cisalhamento*	34

* - Ruína por cisalhamento em tração diagonal com ruptura dos estribos

A flecha admissível foi tomada como sendo o valor de 1/250 do vão da viga, o que no presente caso representa 12 mm. Este valor foi tomado como referência seguindo-se a tabela 13.2 do item 13.3 da nova NBR 6118 (2003).

Na tabela 5.3 são apresentadas, para todas as vigas e nas datas de ensaios das mesmas, a resistência à compressão do concreto (f_c), a resistência à tração na flexão (f_t), e o módulo de elasticidade estático secante (E_c).

Tabela 5.3 – Propriedades mecânicas do concreto na data de ensaio das vigas

Viga	Tipo de fibra	Teor de fibra (%)	Data de ensaio (dias)	Resistências		E_c (MPa)
				f_c (MPa)	f_t (MPa)	
V5A	Aço Xorex	0,8	298	47	5,5	41929
V5B			303	47	5,5	41929
V6A			283	41,3	4,5	43058
V6B			293	52,9	5,7	45032
V7A	Nylon DuPont	0,2	304	56	5,5	40603
V7B			311	55,2	5,1	46550
V8A			309	52,1	5,1	37717
V8B			314	53,6	5,9	38720

5.5 – Resumo dos Resultados dos Ensaios realizados por Vidal Filho (1999)

Nas tabelas que se seguem são apresentados os resultados dos ensaios realizados por VIDAL FILHO (1999) em vigas com mesmas características das descritas neste trabalho. Estas vigas fabricadas com concreto convencional (Séries 1 e 3) e com adição de fibras de aço Dramix (Séries 2 e 4). Nas Séries 1 e 2 os estribos eram contituídos de fios com diametro de 3,4 mm espaçados a cada 16 centímetros enquanto que nas Séries 3 e 4 foram empregados fios com diametro de 4,2 mm. Portanto as Séries 1 e 2 de Vidal Filho são semelhantes às Séries 5 e 7 deste estudo. Esta mesma semelhança existe entre as Séries 3 e 4 de Vidal Filho com as Séries 6 e 8 desta estapa. No capítulo 6 serão feitas as análises comparativas destes resultados com os obtidos nesta etapa do estudo.

Tabela 5.4 – Propriedades mecânicas dos concretos empregados nas vigas testadas por VIDAL FILHO (1999)

Série	Tipo de Fibra	Teor de Fibra (%)	“Slump” (cm)	Resistências (MPa)					Módulo de Elasticidade (MPa)		
				Compressão			Tração		3d	7d	28d
				3d	7d	28d	7d	28d			
1	Sem fibra	0	10	37	42,1	47,8	4,0	5,2	28086	29466	31764
2	Aço	0,8	3,2	39,9	43,4	44,0	3,4	5,8	29630	31055	31725
3	Sem fibra	0	9,8	38,7	41,2	45,7	4,0	5,2	29510	30457	31761
4	Aço	0,2	3,6	32,9	41	43,9	4,0	5,6	23425	29252	31072

Tabela 5.5 – Resumo dos ensaios das vigas testadas por VIDAL FILHO (1999)

Viga	Diâmetro do estribo (mm)	Tipo de Fibra	Teor de Fibra (%)	Data de Ensaio (dias)	P _{fvf} (kN)	P _{fvfc} (kN)	P _{te} (kN)	P _{fn} (kN)	S _f (cm)	P _{rup} (kN)	P _{rup} P _{fn}	Tipo de Ruptura	Inclin. da fissura diagonal crítica (°)
V1A	3,4	Sem fibra	0	73	43,2	55,8	53,1	-	17,0	-	-	-	-**
V1B				106	34,2	58,5	67,5	125,9	16,0	130,4	1,04	cisalhamento*	43
V2A		Aço Dramix	0,8	175	36	58,5	90	157,4	9,4	211,4	1,34	flexão	-
V2B				182	45	81	90	173	8,9	223,1	1,29	flexão	-
V3A	4,2	Sem fibra	0	118	33,3	45,0	45,0	-	15,6	179,9	-	cisalhamento*	34
V3B				130	27,0	40,5	45,0	134,9	12,6	157,4	1,17	cisalhamento*	32
V4A		Aço Dramix	0,8	189	36,0	63,0	72,0	157,4	9,3	220,4	1,40	flexão	-
V4B				194	36,0	45,0	63,0	148,4	9,1	214,1	1,44	flexão	-

*- Ruína por cisalhamento em tração diagonal com ruptura dos estribos

** - A viga torceu durante o ensaio.

Tabela 5.6 – Propriedades mecânicas do concreto na data de ensaio das vigas testadas por VIDAL FILHO (1999)

Viga	Tipo de fibra	Teor de fibra (%)	Data de ensaio (dias)	Resistências		E _c (MPa)
				f _c (MPa)	f _t (MPa)	
V1A	Sem fibra	0	73	48,7	-	32484
V1B			106	47,8	5,0	32383
V2A	Aço Dramix	0,8	175	47,8	6,4	31464
V2B			182	49,7	6,2	32385
V3A	Sem fibra	0	118	53,5	5,2	32046
V3B			130	53,5	5,6	32511
V4A	Aço Dramix	0,8	189	48,7	6,6	31956
V4B			194	48,7	6,4	31108

6

ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 – Introdução

Neste capítulo são analisados os resultados dos ensaios apresentados no capítulo 5. Inclui-se nesta análise os resultados obtidos por VIDAL FILHO (1999) em dissertação de mestrado. Serão comparados os resultados de cada série de vigas sem fibras com as séries de vigas com fibras de aço (Dramix e Xorex) e as fibras de nylon Du Pont. Serão analisadas as resistências, as deformações no concreto e nas armaduras, o modo de ruptura, os deslocamentos e a fissuração nas vigas. Os resultados das propriedades mecânicas (compressão uniaxial, tração na flexão e módulo de elasticidade) do concreto sem e com fibras também serão analisados.

6.2 - Trabalhabilidade do Concreto

As fibras reduziram muito a trabalhabilidade do concreto. Durante a fabricação do concreto, foram analisados o “slump” tanto antes quanto após a adição das fibras. Enquanto na matriz convencional obteve-se um “slump” médio de 9,5 cm, nas vigas com fibras de aço este valor caiu para 5,5 cm e nas vigas com fibras de nylon o “slump” médio foi de 3,6 cm (Tabela 5.1).

As fibras de nylon não dificultaram muito o adensamento do concreto, visto que elas são maleáveis e assim não atrapalharam a fabricação das vigas. Já as fibras de aço tornaram o acabamento das vigas mais trabalhoso devido ao seu formato; porém não influenciaram muito o adensamento do concreto, que foi mecânico.

6.3 - Propriedades Mecânicas do Concreto

Neste item serão analisados e comparados os resultados referentes aos ensaios de caracterização do concreto, resistência à compressão uniaxial, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático secante, apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.4 do Capítulo 5. Estes resultados correspondem à média aritmética de quatro corpos de prova para cada idade pesquisada, nos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade e de dois corpos de prova no ensaio de resistência à tração na flexão. Como no processo de fabricação do concreto foi utilizado um controle tecnológico cuidadoso, garantindo-se, portanto, uma maior uniformidade do mesmo, a média das propriedades das séries das vigas será empregada para caracterizar os concretos com fibras e sem fibras. A tabela 6.1 apresenta os resultados destas médias.

Tabela 6.1 – Propriedades mecânicas do concreto

Tipo de Fibra	Teor de Fibra (%)	Resistências (MPa)					Módulo de Elasticidade (MPa)		
		Compressão			Tração		3d	7d	28d
		3d	7d	28d	7d	28d			
-	0,0	37,9	41,7	46,8	4,0	5,2	28798	29962	31763
Aço Dramix	0,8	36,4	42,2	44,0	3,7	5,7	26528	30154	31399
Aço Xorex	0,8	32,4	38,1	43,0	4,2	5,5	27184	33894	38390
Nylon Du Pont	0,2	34,3	40,2	45,8	4,1	4,7	26617	27823	29785

6.3.1 - Resistência à Compressão Uniaxial

Para realizar uma análise comparativa da evolução da resistência à compressão ao longo do tempo tomou-se como referência, o valor obtido na idade de 28 dias. A tabela 6.2 apresenta esta evolução da resistência à compressão, assim como a relação f_{cf} / f_{cc} (resistência à compressão do concreto com fibras / resistência à compressão do concreto convencional).

Tabela 6.2 – Evolução da resistência à compressão

Idade (dias)	Concreto sem fibras		Concreto com fibras Dramix		Relação f_{cf} / f_{cc}	Concreto com fibras Xorex		Relação f_{cf} / f_{cc}	Concreto com fibras de nylon		Relação f_{cf} / f_{cc}
	f_{cc} (MPa)	% (f_{cc})28	f_{cf} (MPa)	% (f_{cf})28		f_{cf} (MPa)	% (f_{cf})28		f_{cf} (MPa)	% (f_{cf})28	
3	37,9	81,0	36,4	82,7	0,96	32,4	75,4	0,85	34,3	74,9	0,91
7	41,7	89,1	42,2	95,9	1,01	38,1	88,6	0,91	40,2	87,8	0,96
28	46,8	100	44,0	100	0,94	43,0	100	0,92	45,8	100	0,98

A análise da Tabela 6.2 indica uma pequena redução ($\leq 8\%$) na resistência média à compressão do concreto com a adição de fibras. Esta redução já foi verificada por outros pesquisadores (SHAH e RANGAN - 1971) e pode estar relacionada a trabalhabilidade do concreto, que como dito anteriormente, diminui bastante com a adição de fibras.

A evolução da resistência à compressão dos concretos sem fibras e com fibras, ao longo do tempo, vista na tabela 6.2, demonstra um ganho de resistência à compressão gradativo e semelhante entre os resultados apresentados. Comparando os resultados dos

concretos com fibras, verificamos que o concreto com fibra de aço Dramix teve um desempenho melhor em relação às demais fibras.

6.3.2 - Resistência à Tração na Flexão

Fazendo uma análise comparativa da evolução da resistência à tração na flexão ao longo do tempo também tomou-se como referência, o valor obtido na idade de 28 dias. A tabela 6.3 apresenta esta evolução da resistência à tração na flexão, bem como a relação f_{tf} / f_{tc} (resistência à tração na flexão do concreto com fibras / resistência à tração na flexão do concreto convencional).

Tabela 6.3 – Evolução da resistência à tração na flexão

Idade (dias)	Concreto sem fibras		Concreto com fibras Dramix		Relação f_{tf} / f_{tc}	Concreto com fibras Xorex		Relação f_{tf} / f_{tc}	Concreto com fibras de nylon		Relação f_{tf} / f_{tc}
	f_{tc} (MPa)	% (f_{tc})28	f_{tf} (MPa)	% (f_{tf})28		f_{tf} (MPa)	% (f_{tf})28		f_{tf} (MPa)	% (f_{tf})28	
7	4,0	76,9	3,7	64,9	0,93	4,2	76,4	1,05	4,1	87,2	1,03
28	5,2	100	5,7	100	1,10	5,5	100	1,06	4,7	100	0,90

Os resultados mostrados na tabela 6.3 demonstram que a adição de fibras não provocou alterações significativas na resistência à tração na flexão nas idades pesquisadas. A relação resistência à tração na flexão do concreto com fibras / resistência à tração na flexão do concreto convencional foi mais uniforme no concreto com adição de fibras Xorex. O concreto com fibra de nylon apresentou um desempenho inferior entre os concretos com fibras.

Com relação à taxa de crescimento da resistência à tração na flexão ao longo do tempo, observa-se um comportamento similar entre o concreto convencional e os concretos com fibras.

6.3.3 - Módulo de Elasticidade Estático Secante

A Tabela 6.4 apresenta a evolução do módulo de elasticidade estático secante ao longo do tempo. A idade de referência também será 28 dias, como nas resistências à compressão e à tração na flexão. Esta tabela apresenta também a relação E_{cf} / E_{cc} (módulo de elasticidade do concreto com fibras / módulo de elasticidade do concreto convencional).

Tabela 6.4 – Evolução do módulo de elasticidade estático secante

Idade (dias)	Concreto sem fibras		Concreto com fibras Dramix		Relação	Concreto com fibras Xorex		Relação	Concreto com fibras de nylon		Relação
	E_{cc} (MPa)	% (E_{cc})28	E_{cf} (MPa)	% (E_{cf})28	E_{cf} / E_{cc}	E_{cf} (MPa)	% (E_{cf})28	E_{cf} / E_{cc}	E_{cf} (MPa)	% (E_{cf})28	E_{cf} / E_{cc}
3	28798	90,7	26528	84,5	0,92	27184	70,8	0,94	26617	89,4	0,92
7	29962	94,3	30154	96,0	1,01	33894	88,3	1,13	27823	93,4	0,93
28	31763	100	31399	100	0,99	38390	100	1,21	29785	100	0,94

Analisando os resultados da tabela, verifica-se que apenas no concreto com adição de fibras de aço Xorex, nas idades de 7 dias e 28 dias, obteve-se um ganho considerável no módulo de elasticidade secante em relação ao concreto convencional. Também neste caso, o concreto com fibra de nylon apresentou valores menores entre os concretos com fibras.

Com relação à taxa de crescimento ao longo do tempo do módulo de elasticidade, nota-se que no concreto sem fibras ela foi maior do que nos concretos com adição de fibras.

6.4 - Fissuração

6.4.1 - Carga de Fissuração Teórica

O momento de fissuração teórico das vigas foi determinado de acordo com o item 17.3.1 da nova NBR6118 (2003). De acordo com este item, “o momento de fissuração pode ser calculado pela seguinte expressão aproximada:”

$$M_r = \frac{\alpha f_{ct} I_c}{y_t} \quad (6.1)$$

Na expressão acima α é o fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta sendo igual a 1,2 para seções T ou duplo T. O termo f_{ct} é a resistência à tração direta do concreto, sendo que para determinação do momento de fissuração deverá ser empregado o quantil inferior. I_c é o momento de inércia da seção bruta de concreto e y_t a distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada.

Em função do esquema de carregamento da viga, a relação entre o momento de fissuração, M_r , (em kN.m) e a carga de fissuração, P_{fis} , é dada por:

$$P_{fis} = M_r / 0,6 \quad (6.2)$$

Para o cálculo das cargas de fissuração foram utilizados os valores da resistência à tração na flexão obtidos na data de ruptura das vigas (Tabelas 5.3 e 5.6 – Capítulo 5) e α igual a 1 na expressão 6.1

6.4.2 - Análise dos Resultados

A tabela 6.5 apresenta os valores das cargas de fissuração teóricas (P_{teo}), obtidas segundo os critérios da NBR 6118 (2003), e os valores experimentais, determinados visualmente (P_{fvf}), pela diminuição da rigidez nos gráficos de deslocamentos verticais (P_{desl}) e pela evolução das deformações na armadura longitudinal (P_{Asl}). Os valores de P_{desl} foram obtidos quando se teve um acréscimo na flecha no vão central (Δ_{desl}) maior do que o que vinha ocorrendo, para um mesmo incremento de carga (ΔP). Já os valores de P_{Asl} foram determinados quando ocorreu um acréscimo na deformação da armadura longitudinal ($\Delta \epsilon$) maior do que o que vinha ocorrendo, para um mesmo incremento de carga (ΔP). Na comparação entre os valores teóricos e experimentais foi utilizada a média dos três valores experimentais (P_{exp}).

Tabela 6.5 – Cargas de Fissuração

Viga	Tipo de Fibra	Carga de Fissuração				
		P_{fvf} (kN)	P_{desl} (kN)	P_{Asl} (kN)	P_{exp} (kN)	P_{teo} (kN)
V1A	Sem fibra	-	-	-	-	-
V1B		34	31	31	32	31
V3A		33	27	33	31	32,3
V3B		27	27	27	27	34,8
V2A	Aço Dramix	36	36	36	36	39,8
V2B		45	36	36	39	38,5
V4A		36	36	27	33	41,0
V4B		36	36	36	36	39,8
V5A	Aço Xorex	40	35,6	35,6	37,1	34,2
V5B		35,6	35,6	35,6	35,6	34,2
V6A		35,6	40	35,6	37,1	28,0
V6B		40	40	31	37	35,4
V7A	Nylon Du Pont	26,7	26,7	22,2	25,2	34,2
V7B		35,6	31,1	35,6	34,1	31,7
V8A		31,1	26,7	31,1	29,6	31,7
V8B		26,7	26,7	22,2	25,2	36,7

Analisando a tabela 6.5, observa-se que nas vigas com adição de fibras de aço, as cargas de fissuração experimentais são maiores que nas vigas sem fibras e com adição de fibra de nylon, com ganhos médios da ordem de 20%. Para as vigas sem adição de fibras, os valores teóricos ficaram muito próximos dos resultados experimentais, exceto a viga V3B, onde a carga teórica ficou bem acima da carga experimental.

As cargas experimentais de fissuração das vigas com fibras de aço Dramix foram inferiores aos valores teóricos, com exceção da viga V2B. O mesmo ocorreu com as vigas com adição de fibras de nylon, exceto a viga V7B. Por outro lado, todas as vigas com adição de fibras de aço Xorex tiveram os valores experimentais para a carga de fissuração maiores que os resultados teóricos.

6.5 - Relação Carga x Flecha

A relação carga–flecha no meio do vão é um bom indicativo do comportamento global da viga. Assim sendo, é apresentada na Figura 6.2 a relação carga-flecha para as vigas com taxa de armadura transversal igual a 0,142% (estribos de 3,4 mm @ 16 cm) enquanto que a Figura 6.3 mostra esta mesma relação, porém para as vigas com taxa de armadura transversal igual a 0,217% (estribos de 4,2 mm @ 16 cm). Nos gráficos estão apresentados também os resultados das vigas ensaiadas por VIDAL FILHO (1999). São mostrados, ainda nos gráficos, a carga de ruptura das vigas e a flecha máxima admissível ($L/250 = 12$ mm) conforme a nova NBR 6118 (2003). A flecha no instante da ruptura não foi medida, visto que os aparelhos eram retirados antes, para não danificá-los.

Observando-se os gráficos das figuras 6.1 e 6.2, verifica-se, até a fissuração, um comportamento similar entre as vigas com e sem fibras. Após a fissuração e para cargas mais elevadas, as vigas com fibras apresentaram menores flechas no meio do vão indicando uma maior rigidez delas. Esta diferença nas rigidezes das vigas, após a fissuração, expressa a contribuição das fibras no controle das aberturas das fissuras.

Dentre as vigas com fibras, as vigas com fibras de nylon apresentaram um desempenho inferior em relação às vigas com fibras de aço.

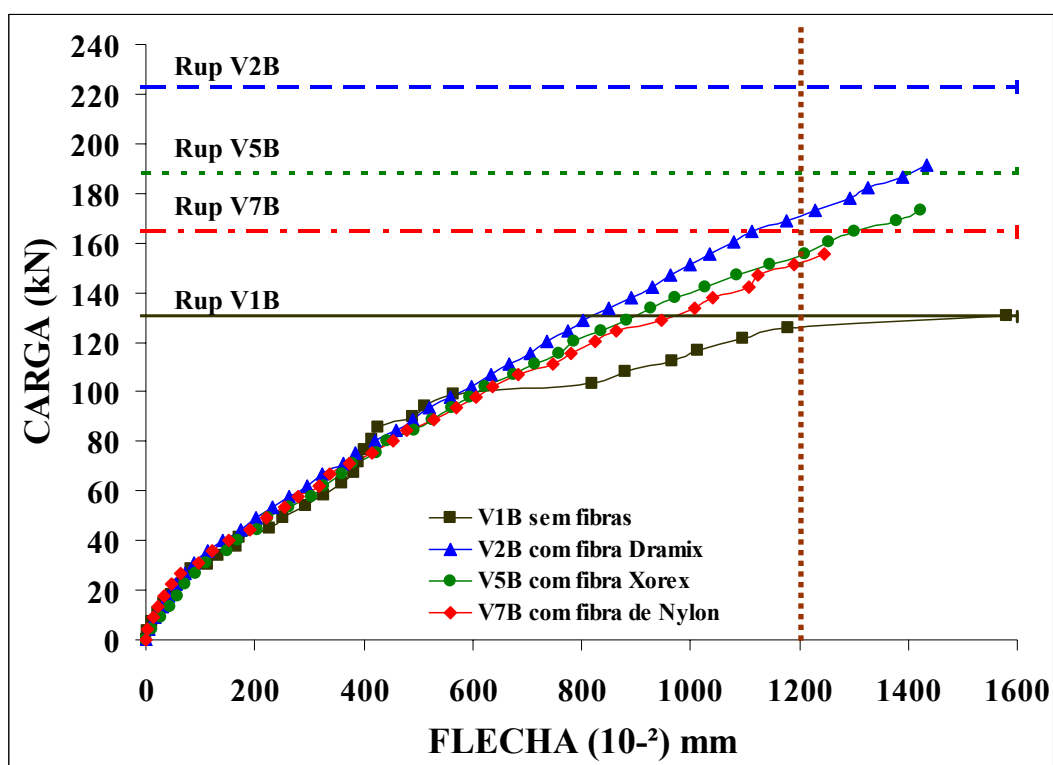


Figura 6.1 – Relação Carga x Flecha no meio do vão (Vigas com estribos de 3,4 mm)

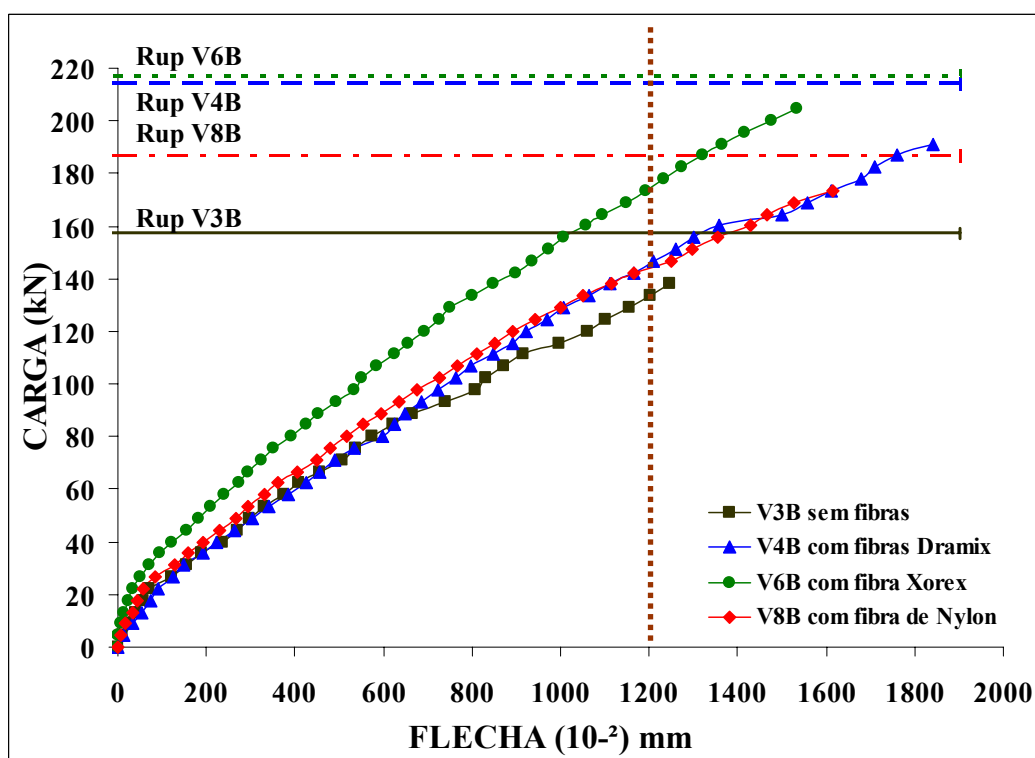


Figura 6.2 – Relação Carga x Flecha no meio do vão (Vigas com estribos de 4,2 mm)

Pode-se observar ainda, que as cargas correspondentes à flecha máxima, $L/250$ estipulada pela nova NBR 6118 (2003), foram sempre maiores nas vigas com fibras, comprovando mais uma vez a eficiência no aumento da rigidez das vigas.

A ductilidade das vigas foi analisada através da comparação das flechas nas vigas para uma relação carga/carga de ruptura (P/P_{rup}) estipulada. Foi adotada esta conduta, uma vez que a flecha, no instante da ruptura, nem sempre foi medida, visto que os relógios comparadores que faziam esta medição já haviam sido retirados. Para as vigas com armadura transversal composta de estribos com diâmetro de 3,4 mm, a relação (P/P_{rup}) adotada foi igual a 0,75; para as vigas contendo estribos com diâmetro de 4,2 mm, esta relação foi de 0,80. A Tabela 6.6 apresenta estes resultados.

Observa-se que as vigas com fibras apresentaram, em relação às vigas sem fibras, flechas sempre maiores para a mesma relação P/P_{rup} . Portanto se tornaram mais dúcteis uma vez que sofreram maiores deformações antes da ruptura. Porém o ganho na ductilidade foi menor nas vigas com adição de fibras de Nylon.

Tabela 6.6 – Análise da ductilidade das vigas

Viga	Tipo de Fibra	Teor de Fibra (%)	Armadura Transversal	P/P_{rup}	Flecha (mm)	Flecha Média (mm)
V1A	Sem fibra	0	ϕ 3,4 @ 16 cm	-	-	5,7
V1B					5,7	
V2A	Aço Dramix	0,8		0,75	12,1	11,6
V2B					11,1	
V3A	Sem fibra	0	ϕ 4,2 @ 16 cm	-	-	11,0
V3B					11,0	
V4A	Aço Dramix	0,8		0,80	13,9	14,8
V4B					15,6	
V5A	Aço Xorex	0,8	ϕ 3,4 @ 16 cm	0,75	9,7	10
V5B					10,3	
V6A			ϕ 4,2 @ 16 cm	0,80	16,1	14
V6B					11,9	
V7A	Nylon Du Pont	0,2	ϕ 3,4 @ 16 cm	0,75	9,4	8,9
V7B					8,4	
V8A			ϕ 4,2 @ 16 cm	0,80	12,7	12,6
V8B					12,5	

6.6 - Efeito das Fibras na Resistência ao Esforço Cortante

Para avaliação da contribuição das fibras na resistência ao esforço cortante, torna-se necessário a determinação da carga de mobilização e da carga de escoamento dos estribos e quando ocorreu, da sua carga de ruptura. Na tabela 6.7 estão apresentados estes valores para as vigas ensaiadas.

Tabela 6.7 – Cargas de mobilização, escoamento e ruptura dos estribos

Viga	Tipo de Fibra	Teor de Fibra (%)	Armadura Transversal	Carga (kN)			
				Mobilização	Escoamento	Ruptura	
V1A	Sem fibra	0	ϕ 3,4 @ 16 cm	-	-	-	
V1B				58,5	116,9	130,4	
V2A	Aço Dramix	0,8		90,0	Sem registro	Não ocorreu	
V2B				90,0	Sem registro	Não ocorreu	
V3A	Sem fibra	0	ϕ 4,2 @ 16 cm	45,0	157,4	179,9	
V3B				45,0	126,0	157,4	
V4A	Aço Dramix	0,8		72,0	Não ocorreu	Não ocorreu	
V4B				63,0	214,1	Não ocorreu	
V5A	Aço Xorex	0,8		ϕ 3,4 @ 16 cm	71,2	151,2	177,9
V5B					71,2	Sem registro	188,6
V6A				ϕ 4,2 @ 16 cm	89	195,7	Não ocorreu
V6B					62,3	195,7	Não ocorreu
V7A	Nylon Du Pont	0,2	ϕ 3,4 @ 16 cm	48,9	137,9	160,1	
V7B				62,3	146,8	164,6	
V8A			ϕ 4,2 @ 16 cm	53,4	151,2	182,4	
V8B				71,2	177,9	186,8	

A análise da tabela 6.8 revela que a carga correspondente à mobilização dos estribos de diâmetro 3,4 mm nas vigas com fibras de aço foi, em média, 36% maior do que nas vigas sem fibra. Porém, nas vigas com fibras de nylon este aumento não foi observado. Para as vigas com estribos de diâmetro 4,2 mm, a carga de acionamento dos estribos foi sempre maior nas vigas com fibras. Nas vigas com fibras de aço o aumento médio foi de 60% enquanto que nas vigas com fibras de nylon este aumento foi de 38%. Observa-se novamente que as fibras de aço apresentaram um melhor desempenho em relação às fibras de nylon.

Estes resultados indicam que na vigas com adição de fibras, principalmente de aço, ocorre um aumento significativo na resistência dos mecanismos do concreto ao esforço cortante (intertravamento dos agregados e efeito pino). As fibras participam destes mecanismos resistentes do concreto fazendo com que a carga necessária para o início de trabalho dos estribos seja maior nas vigas com fibras.

Com o intuito de analisar a influência das fibras no desenvolvimento das tensões na armadura transversal, estão apresentadas, nas figuras 6.3 (vigas com estribos de 3,4 mm) e 6.4 (vigas com estribos de 4,2 mm), as relações esforço cortante total V_t versus tensão nos estribos σ_{sw} . Os gráficos apresentam também as tensões nos estribos calculadas através da analogia da treliça clássica de Morsch. As tensões nos estribos foram obtidas das equações polinomiais apresentadas no item 3.3 do Capítulo 3 e correspondem à média das tensões nos estribos instrumentados de um dos lados da viga, em cada uma das vigas ensaiadas.

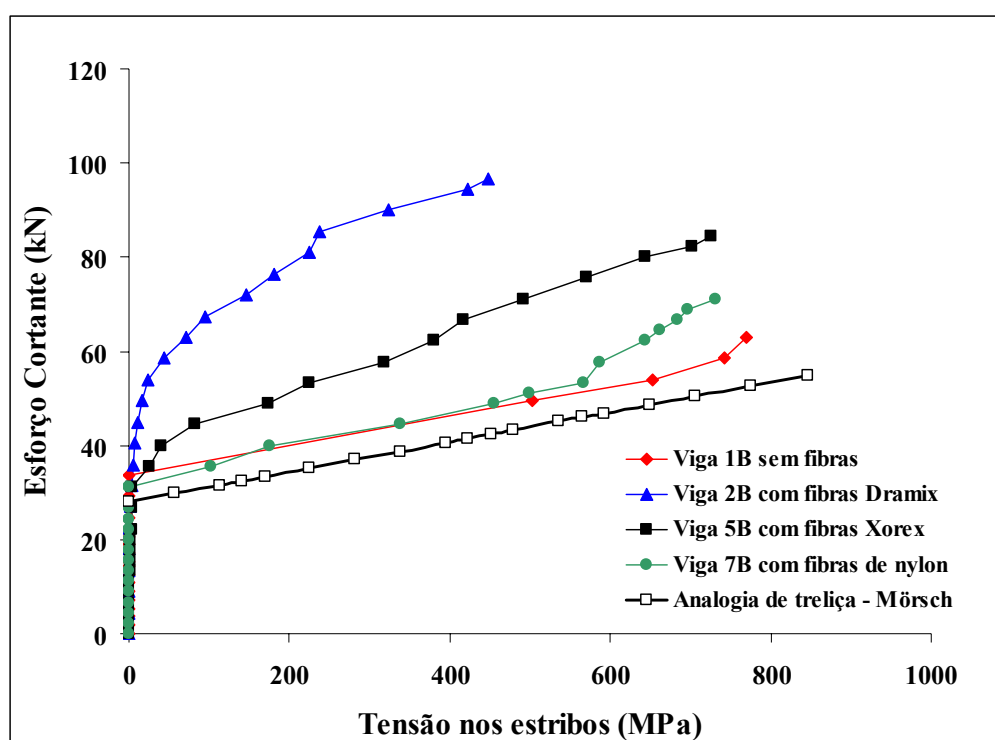


Figura 6.3 – Relação Esforço Cortante Total x Tensão nos Estribos (Vigas com estribos de 3,4 mm)

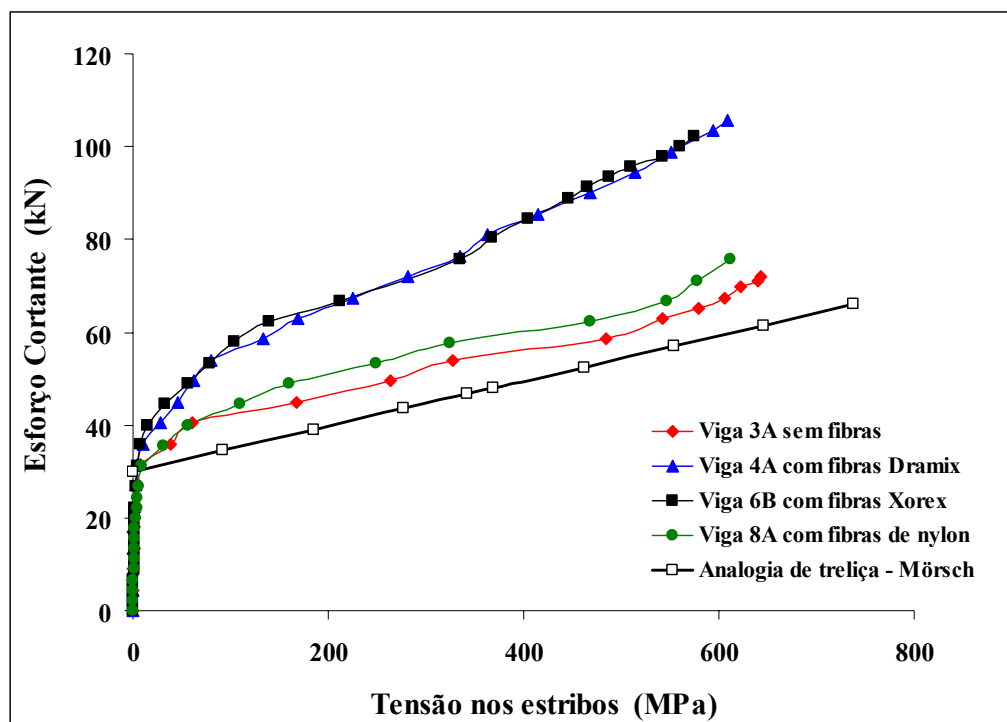


Figura 6.4 – Relação Esforço Cortante Total x Tensão nos Estribos (Vigas com estribos de 4,2 mm)

Primeiramente pode-se verificar, através das figuras 6.3 e 6.4, que até um certo nível de esforço cortante, a tensão nos estribos permanece nula. Isto indica que o esforço cortante é absorvido pelos mecanismos resistentes do concreto. Quando a capacidade destes mecanismos chega a seu limite, os estribos são acionados e começam a trabalhar. Nas figuras, este ponto corresponde ao surgimento de tensões nos estribos. Nas vigas com fibras de aço, o valor do esforço cortante correspondente o surgimento de tensões nos estribos é ligeiramente maior do que nas outras vigas. Isto provavelmente ocorreu porque as fibras de aço adicionadas ao concreto funcionaram como uma micro armadura aumentando a capacidade resistente dos mecanismos internos do concreto retardando o início de trabalho dos estribos.

Observa-se também que, após a mobilização dos estribos, o comportamento das vigas sem fibras e com fibras de nylon são muito similares entre si e que para pequenos incrementos de esforço cortante as tensões nos estribos crescem rapidamente. Este comportamento acompanha a teoria preconizada pela treliça clássica de Morsch.

Para as vigas com fibras de aço esta transferência de força para os estribos se dá de forma mais gradual, não acompanhando a teoria da treliça de Mörsch. Este fato é atribuído à ação conjunta das fibras de aço com os estribos, fazendo com que ambos resistam aos incrementos de esforço cortante. Resultado similar já havia sido encontrado por FURLAN (1995), que enfatiza que “as fibras de aço contribuem indiretamente nos mecanismos alternativos do concreto, seja pelo controle na abertura e prolongamento das fissuras bem como pela atuação conjunta delas com as armaduras transversais”.

As observações acima indicam um comportamento diferenciado entre as vigas com fibras de aço em relação às vigas sem fibras e com fibras de nylon. Nestas últimas o escoamento da armadura transversal ocorreu para cargas bem inferiores das demais vigas, da ordem de 28%, e elas romperam por cisalhamento. As vigas com adição de fibras de aço Xorex e estribo 3,4 mm, também tiveram ruptura por cisalhamento; entretanto a carga de ruptura média foi cerca de 45% maior do que nas vigas sem fibra. Já as vigas com fibra de aço Xorex e estribo de 4,2mm, e as vigas com fibra de aço Dramix romperam por flexão, demonstrando a significativa contribuição das fibras. Elas impedem o alargamento das fissuras, prolongando por mais tempo o intertravamento entre os agregados, aumentando assim a capacidade resistente dos mecanismos internos do concreto. Além disso, a energia necessária para promover o arrancamento da fibra de aço é muito grande, o que pode justificar o acréscimo de carga de ruptura e a mudança da forma de ruptura.

A análise da contribuição das fibras na resistência ao esforço cortante na ruptura das vigas é feita a seguir. Para a realização deste estudo, foi utilizada a Eq. 4.14 apresentada no capítulo 4 que, de acordo com NBR 6118 (2003), determina a parcela da força cortante resistida pelos estribos relativa à ruína por tração diagonal. No cálculo desta parcela foi empregado para o ângulo θ o valor correspondente à inclinação da fissura crítica na ruptura e para a tensão última nos estribos o valor verificado nos ensaios de cada viga. A parcela do esforço cortante total referente aos mecanismos do concreto foi calculada subtraindo do esforço cortante último a parte resistida pelos estribos (Eq. 4.14). A tabela 6.8 apresenta estes resultados.

Tabela 6.8 – Esforço cortante resistido pelos mecanismos do concreto na ruptura das vigas

Viga	Tipo de Fibra	Armadura Transversal	Esforço Cortante (kN)		
			Total	Parcela Resistida pelos estribos V _{sw}	Parcela Resistida pelo concreto V _c
V1A	Sem fibra	φ 3,4 @ 16 cm	-	-	-
V1B			65,2	28,32	36,88
V2A	Aço Dramix		105,7	24,49	81,21
V2B			111,6	24,49	87,11
V3A	Sem fibra	φ 4,2 @ 16 cm	90,0	56,68	33,32
V3B			88,7	61,18	27,52
V4A	Aço Dramix		110,2	35,86	74,34
V4B			107,1	35,44	71,66
V5A	Aço Xorex	φ 3,4 @ 16 cm	89,0	29,33	59,67
V5B			94,3	31,48	62,82
V6A		φ 4,2 @ 16 cm	108,1	35,86	72,24
V6B			108,5	35,86	72,64
V7A	Nylon Du Pont	φ 3,4 @ 16 cm	80,1	30,38	49,72
V7B			82,3	31,48	50,82
V8A		φ 4,2 @ 16 cm	91,2	56,68	34,52
V8B			93,4	38,23	55,17

Verifica-se, através dos resultados da tabela 6.8, que as vigas reforçadas com fibras apresentaram, de um modo geral, uma maior capacidade portante dos mecanismos resistentes do concreto ao cisalhamento. Ao impedirem o alargamento das fissuras inclinadas, as fibras prolongam por mais tempo o intertravamento dos agregados, aumentando a capacidade portante da viga. No caso das fibras de aço, essas contribuições foram ainda mais significativas demonstrando mais uma vez a atuação delas junto com os estribos.

Em termos quantitativos, as fibras de aço Dramix aumentaram a capacidade resistida pelo concreto nas vigas em 128% (estribo 3,4mm) e 140% (estribo 4,2mm) em relação às vigas sem fibras. Para as fibras de aço Xorex, este ganho foi da ordem de 66% (estribo 3,4mm) e 138% (estribo 4,2mm). Já as fibras de nylon promoveram um ganho bem inferior em relação às outras fibras: 36% (estribo 3,4mm) e 47% (estribo 4,2mm).

Em resumo, as fibras ajudam na limitação da fissuração diagonal das vigas prolongando por mais tempo o intertravamento dos agregados. As fibras de aço atuam também em

conjunto com os estribos diminuindo as tensões nestes e conseqüentemente aumentando ainda mais a capacidade portante das vigas.

6.7 - Deformações na Armadura Longitudinal

As figuras dos gráficos 6.5 e 6.6 apresentam as relações carga total versus deformação na armadura longitudinal no meio do vão das vigas com estribos de diametro 3,4 mm e das vigas com estribos de diametro 4,2 mm, respectivamente. As deformações mostradas correspondem à média das deformações medidas nos dois extensômetros colados na armadura longitudinal.

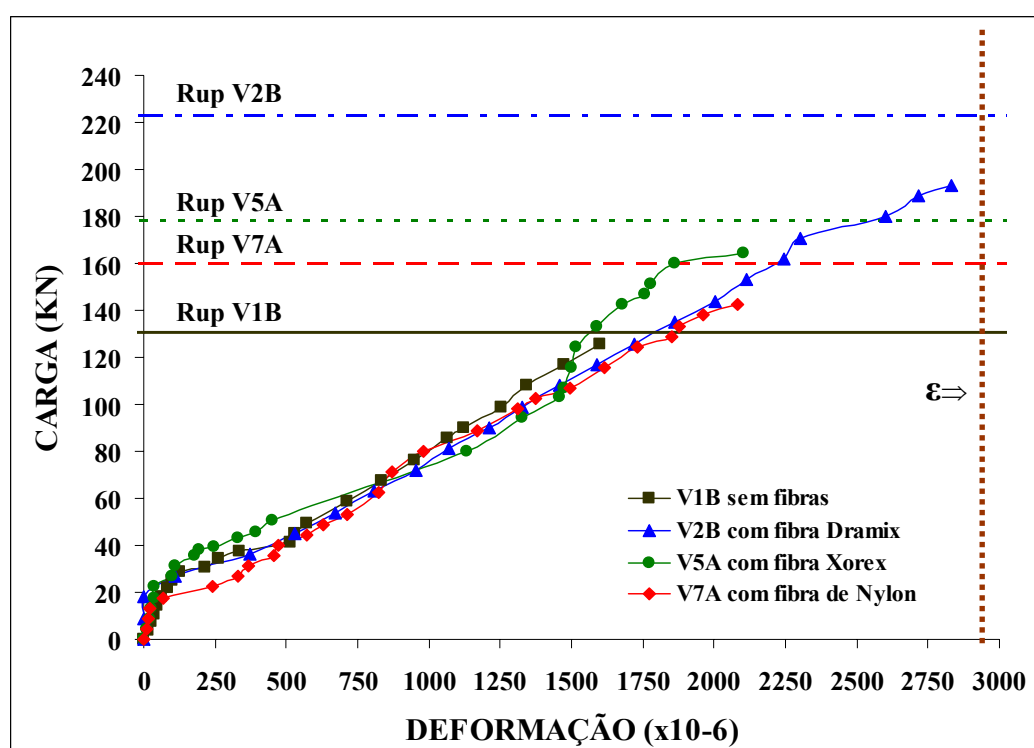


Figura 6.5 – Relação Carga Total x Deformação na Armadura Longitudinal (Vigas com estribos de 3,4 mm)

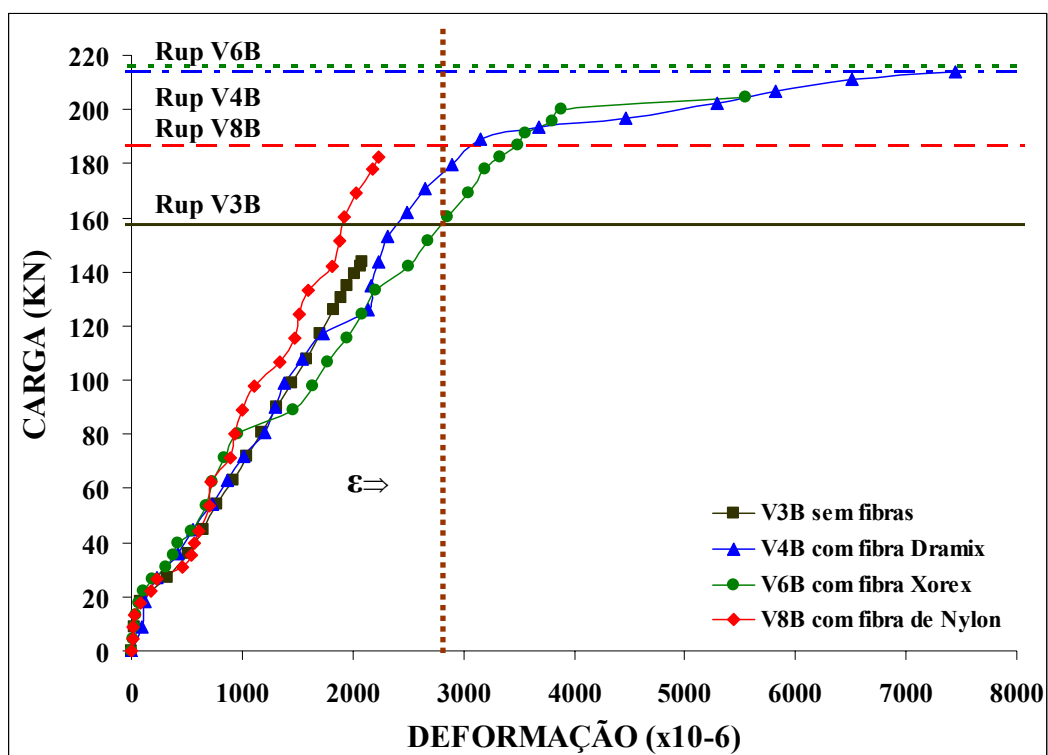


Figura 6.6 – Relação Carga Total x Deformação na Armadura Longitudinal (Vigas com estribos de 4,2 mm)

Analisando o gráfico da figura 6.5, verifica-se que o comportamento das vigas, quer sem fibras, quer com fibras (nylon ou aço), é muito similar. Basta observar a inclinação das retas. Mas apesar da semelhança, pela tabela 6.5, podemos notar que as vigas sem fibras e as vigas com fibras de nylon tiveram a armadura longitudinal acionadas primeiro. Não registrou-se o escoamento da armadura longitudinal das vigas.

O gráfico da figura 6.6 também apresenta curvas bem similares, mas é visível que para as vigas com fibras de aço a peça sofreu maiores deformações antes de atingir a ruína, que foi por flexão, ocorrendo o escoamento da armadura longitudinal. As vigas com fibras de nylon apresentaram um comportamento semelhante ao das vigas sem fibras. Ambas não tiveram a armadura longitudinal escoada.

Em resumo, as fibras de aço, apesar de não influenciarem nas tensões da armadura longitudinal, até o instante de ruptura da viga sem fibras, possibilitaram um melhor desempenho das vigas aumentando a sua resistência ao cisalhamento e, assim, levando a armadura longitudinal ao escoamento.

6.8 - Deformações no Concreto

As figuras dos gráficos 6.7 e 6.8 apresentam as relações carga total versus deformação do concreto na face superior no meio do vão das vigas com estribos de diâmetro 3,4 mm e das vigas com estribos de diâmetro 4,2 mm, respectivamente. As deformações mostradas correspondem à média das deformações medidas nos dois extensômetros colados no concreto.

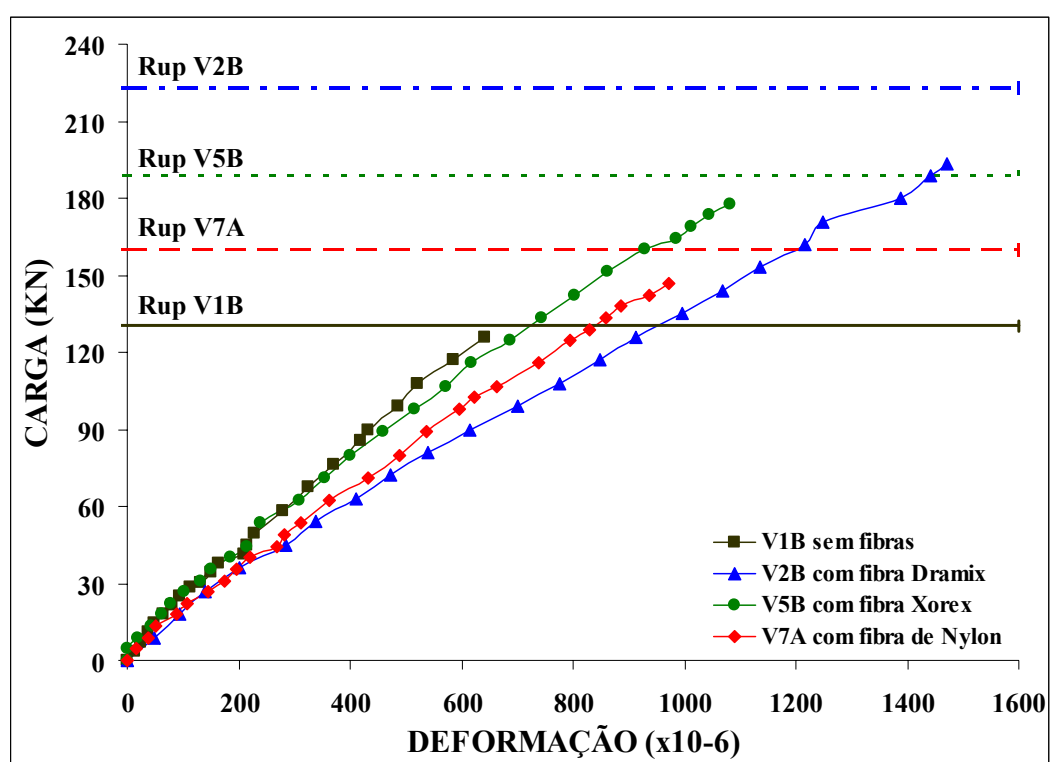


Figura 6.7 – Relação Carga Total x Deformação no Concreto no meio do vão (Vigas com estribos de 3,4 mm)

A análise da figura 6.7 certifica que as deformações no concreto com adição de fibras até a ruptura das vigas sem fibras foram bem maiores para uma mesma carga. Este desempenho revelou-se também após à ruptura da viga sem fibra, sendo mais evidente nas vigas com adição de fibras de aço Dramix.

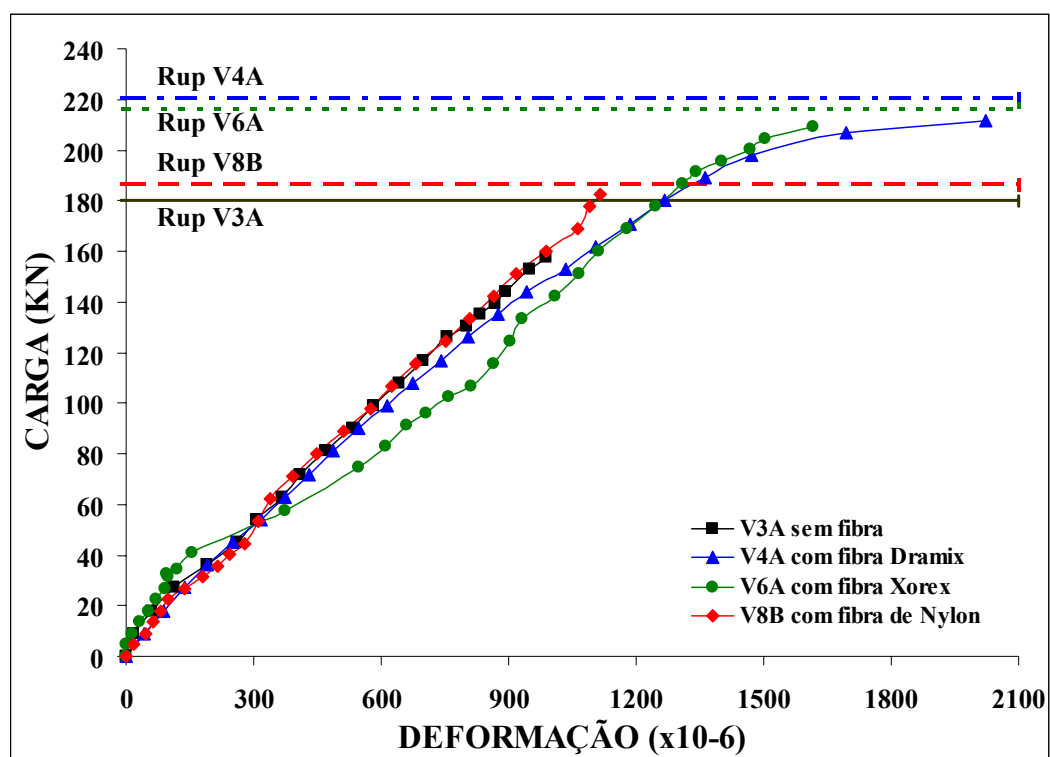


Figura 6.8 – Relação Carga Total x Deformação no Concreto no meio do vão das vigas com estribos de 4,2 mm

Analisando a figura 6.8, verifica-se, primeiramente, que as deformações no concreto até a ruptura das vigas sem fibras foram bem similares às deformações das vigas com fibras. Portanto a presença das fibras não afetou significativamente as deformações no concreto até o momento de ruptura das vigas sem fibras.

Entre as vigas com fibras, nota-se que deformações maiores foram observadas nas vigas com fibras de aço. Estas fibras, ao aumentarem mais a resistência ao cisalhamento das vigas, levaram o concreto do banzo comprimido das vigas a níveis mais elevados de deformação.

6.9 - Capacidade Resistente (Flexão e Cisalhamento)

6.9.1 - Análise dos Resultados Experimentais

Os principais resultados obtidos nos ensaios das vigas ensaiadas, bem como das propriedades mecânicas concreto na data de ensaio das mesmas, estão apresentados na Tabela 6.9. Encontram-se também na tabela os resultados do trabalho de VIDAL FILHO (1999).

Tabela 6.9 – Resultados relativos à ruptura da vigas

Vigas	Data de Ruptura (dias)	Tipo de Fibras	Teor de Fibras (%)	Armadura Transversal	Resistências		E _c (MPa)	P _{rup} (kN)	Tipo de Ruptura
					f _c (MPa)	f _t (MPa)			
V1B	106	Sem fibra	0	φ 3,4 mm @16	47,8	5	32383	130,4	cisalhamento
V2A	175	Aço Dramix	0,8		47,8	6,4	31464	211,4	flexão
V2B	182				49,8	6,2	32385	223,1	flexão
V3A	118	Sem fibra	0	φ 4,2 mm @16	53,5	5,2	32046	179,9	cisalhamento
V3B	130	Aço Dramix			0,8	53,5	5,6	32511	157,4
V4A	189		48,7			6,6	31956	220,4	flexão
V4B	194			48,7	6,4	31108	214,1	flexão	
V5A	298	Aço Xorex	0,8	φ 3,4 mm @16	47,0	5,5	41929	177,9	cisalhamento
V5B	303				47,0	5,5	41929	188,6	cisalhamento
V6A	283			φ 4,2 mm @16	41,3	4,5	43058	216,2	flexão
V6B	293				52,9	5,7	45032	217,0	flexão
V7A	304	Nylon	0,2	φ 3,4 mm @16	56,1	5,5	40603	160,1	cisalhamento
V7B	311				55,2	5,1	51799	164,6	cisalhamento
V8A	309			φ 4,2 mm @16	52,1	5,1	42060	182,4	cisalhamento
V8B	314				53,6	5,9	37717	186,8	cisalhamento

Baseado nos resultados acima, observa-se, primeiramente, que a adição de fibras às vigas aumentou a capacidade portante delas em relação às vigas com concreto convencional. O teor de aumento foi diferenciado entre as fibras, sendo que em todos os casos ele foi menor para as vigas com fibras de nylon. Estas vigas tiveram, em média, um acréscimo na carga de ruptura de aproximadamente 25% para as vigas com estribos de 3,4 mm e de 9,5% para as vigas armadas com estribos de 4,2 mm. Para as vigas com fibras de aço os acréscimos foram de 67% e 41%, respectivamente, para fibras Dramix e

Xorex no caso da armadura transversal ser constituída de fios com 3,4 mm de diâmetro. No caso de vigas com estribos de 4,2 mm, o aumento foi de 28% para ambas as fibras, Dramix e Xorex.

A presença das fibras alterou também, em certos casos, o modo de colapso das vigas de cisalhamento, por ruptura dos estribos, para flexão por esmagamento do concreto comprimido. Este fato ocorreu somente nas vigas com fibras de aço e particularmente com a fibra Dramix. Com a fibra Xorex isto aconteceu apenas nas vigas com armadura transversal compostas de fios com diâmetro de 4,2 mm. Nestas vigas, a presença das fibras de aço proporcionou um aumento significativo na resistência ao cisalhamento permitindo que a armadura longitudinal entrasse em escoamento. Desta forma a capacidade última de flexão foi atingida proporcionando um modo muito mais dúctil de ruptura. Estes resultados revelam que as fibras curtas de aço, em vigas com taxas reduzidas de armadura transversal, contribuem muito para um melhor desempenho das mesmas.

Com relação às diferentes fibras de aço empregadas, os resultados acima indicam um melhor desempenho das fibras Dramix.

6.9.2 - Comparação dos Resultados Experimentais e Teóricos

As cargas de ruptura teóricas foram calculadas segundo os critérios da nova NBR 6118 (2003). As hipóteses básicas e as equações necessárias aos cálculos foram apresentadas no item 4.6 do Capítulo 4. Como o objetivo deste item é comparar os resultados experimentais com os teóricos, segundo a norma NBR 6118 (2003), e não estimar a capacidade portante das vigas, alguns ajustes se fazem necessários. Estes ajustes se referem, exclusivamente, aos valores de tensões a serem empregados e não às hipóteses de cálculo. Assim sendo, os valores das tensões utilizados correspondem aos resultados dos ensaios de caracterização dos materiais sem a inclusão dos fatores de minoração de resistência. Este procedimento é válido devido à pequena variabilidade dos resultados dos ensaios de caracterização.

Para o aço da armadura longitudinal, a tensão de escoamento de cálculo f_{yd} foi tomada igual a 510 MPa. Já para os aços da armadura transversal, os valores adotados foram de 798 MPa para os fios com diâmetro de 3,4 mm e de 757 MPa para fios com 4,2 mm de diâmetro. Estes dois últimos valores correspondem à tensão de ruptura destes aços. A resistência à compressão do concreto f_c na data de ruptura das vigas foi considerada igual a f_{cd} . Os resultados teóricos das cargas de ruptura se encontram na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 – Comparação dos esforços cortantes de ruptura teóricos e experimentais

Vigas	Esforço cortante teórico		Modo de Ruptura	V_{teo} (kN)	V_{exp} (kN)	V_{exp}/V_{teo}
	V_{fl} (kN)	V_{cis} (kN)				
V1B	102,90	59,05	Cisalhamento	59,05	65,2	1,10
V2A	102,90	57,14	Flexão	102,90	105,7	1,03
V2B	103,18	57,95	Flexão	103,18	111,6	1,08
V3A	103,68	70,27	Cisalhamento	70,27	90,0	1,28
V3B	103,68	73,22	Cisalhamento	73,22	78,7	1,07
V4A	103,04	56,16	Flexão	103,04	110,2	1,07
V4B	103,04	56,16	Flexão	103,04	107,1	1,04
V5A	102,78	59,71	Cisalhamento	59,71	89,0	1,49
V5B	102,78	61,86	Cisalhamento	61,86	94,3	1,52
V6A	101,76	52,93	Flexão	101,76	108,1	1,06
V6B	103,60	57,93	Flexão	103,60	108,5	1,05
V7A	103,97	64,53	Cisalhamento	64,53	80,1	1,24
V7B	103,88	65,30	Cisalhamento	65,30	82,3	1,26
V8A	103,50	69,69	Cisalhamento	69,69	91,2	1,31
V8B	103,69	58,22	Cisalhamento	58,22	93,4	1,60

Segundo a NBR 6118 (2003), era previsto que a ruptura das vigas ocorresse por cisalhamento com ruína por tração diagonal. Observando a tabela acima, verifica-se que as vigas sem adição de fibras (séries 1 e 3) e as vigas com fibras de nylon (séries 7 e 8) tiveram esse comportamento. As vigas V5A e V5B com adição de fibras de aço Xorex também romperam por cisalhamento. No entanto, os valores experimentais das cargas de ruptura das vigas sem fibras foram sempre ligeiramente superiores (15% em média) aos valores teóricos calculados para uma ruptura por cisalhamento. Já nas vigas com fibras esta diferença foi muito maior (40% em média).

As demais vigas com adição de fibras de aço tiveram uma ruptura por flexão e não por cisalhamento como era esperado. Isto se deveu à presença das fibras de aço na matriz de concreto, que elevaram consideravelmente a resistência ao cisalhamento das vigas ao ponto de alterar suas formas de ruptura. Os valores teóricos obtidos para ruptura à flexão ficaram bem próximos dos valores experimentais, como pode ser visto na tabela 6.10. Isto demonstra a validade das hipóteses de cálculo para um concreto convencional, adotados pela NBR 6118, mesmo no caso da presença das fibras.

No caso das vigas que romperam por cisalhamento, verifica-se uma maior cautela nos critérios da NBR 6118 (2003), visto que o valor da carga experimental é sempre maior do que a carga teórica. Esta cautela é devida à ruptura frágil característica do cisalhamento. Nestes casos é necessária uma maior margem de segurança.

7

CONCLUSÕES

7.1 - Introdução

Este estudo teve como objetivo analisar a influência da adição de fibras curtas de aço e de nylon no comportamento e na resistência de vigas de concreto armado. Para isso foram fabricadas oito vigas de seção transversal duplo T, tendo todas a mesma armadura longitudinal. Metade destas vigas tinham a taxa mínima de armadura transversal, determinada pela NBR 6118 (1978), igual a 0,142% enquanto que na outra metade este valor foi 0,217%. Os teores de fibra empregados foram de 0,8% em volume para as fibras de aço Xorex e de 0,2% para as fibras de nylon Du Pont. As vigas foram instrumentadas com extensômetros elétricos para determinação das deformações na região comprimida do concreto, na armadura longitudinal e nos estribos.

Foi feito também um estudo comparativo com relação aos resultados da pesquisa desenvolvida por VIDAL FILHO (1999), onde o comportamento de oito vigas, de mesmas características das ensaiadas neste trabalho, foi analisado. Quatro dessas vigas eram sem fibras e as outras quatro continham fibras de aço Dramix num teor de 0,8% em volume.

Foram analisadas também as propriedades mecânicas do concreto bem como a trabalhabilidade do concreto sem fibras e com a adição dos diferentes tipos de fibras. Além disso, comparou-se os resultados obtidos nos ensaios com os resultados teóricos segundo a NBR 6118 (2003).

7.2 - Conclusões

As conclusões deste estudo estão intimamente ligadas às características dos experimentos desenvolvidos ao longo do trabalho, relacionados nos seguintes itens:

- todas as vigas tinham seção sub-armada;
- todas as vigas foram ensaiadas na condição de simplesmente apoiadas;
- o carregamento aplicado consistiu de duas cargas concentradas, equidistantes dos apoios e de mesma intensidade; as cargas foram estáticas, crescentes e de curta duração;
- a relação entre o vão de cisalhamento e a altura útil das vigas ensaiadas foi de 3,72.

Com base nos resultados dos ensaios e nas análises desenvolvidas no Capítulo 6, chegou-se às seguintes conclusões:

- A introdução de fibras na matriz de concreto reduziu substancialmente a trabalhabilidade do concreto, especialmente no caso da fibra de nylon.
- A resistência à compressão do concreto com fibras apresentou uma pequena redução ($\leq 8\%$) em relação ao concreto sem fibras. Esta redução já havia sido verificada por outros pesquisadores (SHAH e RANGAN - 1971) e pode estar relacionada a trabalhabilidade do concreto. A evolução da resistência à compressão dos concretos com e sem fibras ao longo do tempo mostrou um ganho de resistência à compressão gradativo e semelhante.

- Os resultados obtidos indicaram que a adição de fibras de aço e de nylon não provocou alterações significativas na resistência à tração na flexão nas idades pesquisadas. Com relação à taxa de crescimento da resistência à tração na flexão ao longo do tempo, observou-se um comportamento similar entre o concreto convencional e os concretos com fibras.
- O concreto com adição de fibras de aço Xorex apresentou, nas idades de 7 e 28 dias, um ganho considerável no valor do módulo de elasticidade secante em relação ao concreto convencional. No caso da fibra de aço Dramix, não houve diferença significativa em relação ao concreto sem fibras. A taxa de crescimento ao longo dos 28 dias do módulo de elasticidade no concreto sem fibras foi maior do que nos concretos com adição de fibras.
- As vigas com adição de fibras de aço, Dramix e Xorex, apresentaram cargas de fissuração de flexão maiores do que as vigas sem fibras. Porém nas vigas com fibras de nylon ocorreu o contrário.
- Após a fissuração, as vigas com fibras apresentaram um maior número de fissuras, com menores aberturas e menor espaçamento. Conseqüentemente, os deslocamentos verticais medidos foram menores evidenciando uma maior rigidez destas vigas. Portanto as fibras contribuem no controle da fissuração.
- As tensões nos estribos são praticamente nulas até o aparecimento das primeiras fissuras de cisalhamento. Nesta etapa, os esforços de cisalhamento são absorvidos pelos mecanismos resistentes do concreto (engrenamento dos agregados e efeito pino).
- A efetiva mobilização dos estribos ocorreu com cargas mais elevadas nas vigas com fibras de aço. Estes resultados indicam que a adição de fibras de aço provoca um aumento significativo na resistência dos mecanismos do concreto ao esforço cortante (engrenamento dos agregados e efeito pino).

- Após a mobilização da armadura transversal, as tensões nos estribos das vigas sem fibras e com fibras de nylon cresceram rapidamente para pequenos incrementos da força cortante, acompanhando razoavelmente o comportamento previsto pela analogia da treliça clássica de Morsch. Porém nas vigas com fibras de aço o crescimento das tensões nos estribos foi mais lento e gradual revelando uma ação conjunta destas fibras com os estribos nos mecanismos resistentes ao esforço cortante.
- As cargas correspondentes ao escoamento da armadura transversal, nos casos registrados, foram significativamente maiores nas vigas com fibras de aço e de nylon em relação às vigas sem fibras.
- Independentemente do tipo, as fibras proporcionaram uma limitação no processo da fissuração das vigas promovendo com isso uma melhoria nos mecanismos internos de resistência ao cisalhamento do concreto conseqüentemente gerando um melhor desempenho destas.
- As fibras de aço podem ser analisadas como uma armadura transversal equivalente já que elas atuam de duas formas. Em função do impedimento ao alargamento da abertura das fissuras diagonais, elas melhoram os mecanismos resistentes do concreto (engrenamento entre os agregados e efeito de pino). Após a mobilização dos estribos elas continuam atuando fazendo com que as tensões nestes cresçam de forma mais lenta.
- As vigas com fibras tanto de aço quanto de nylon apresentaram cargas de ruptura maiores em relação às vigas sem fibras. Em alguns casos, a forma de ruptura também mudou passando de cisalhamento para flexão.
- As fibras de aço, principalmente a Dramix, proporcionaram um aumento significativo na resistência ao cisalhamento das vigas permitindo que a armadura longitudinal de flexão atingisse sua deformação de escoamento. Isto por sua vez permitiu que a capacidade última de flexão das vigas fosse atingida proporcionando um modo mais dúctil de ruptura.

- Apesar de uma melhora no controle da fissuração, as fibras de nylon não se mostraram eficazes no que tange à ductilidade das vigas. A ruptura destas peças foi brusca tal qual as peças sem fibras.
- Com relação às diferentes fibras de aço empregadas, os resultados indicaram um melhor desempenho das fibras Dramix.
- Mesmo nos casos de ruptura por cisalhamento, a formulação da nova NBR 6118 (2003) estimou com segurança a capacidade resistente ao cisalhamento das vigas, principalmente aquelas fabricadas com fibras. Esta cautela é necessária em função da ruptura frágil característica do cisalhamento.
- As cargas de ruptura à flexão, calculadas de acordo com os critérios da nova NBR 6118 (2003), ficaram bem próximas dos valores experimentais. Este fato revela a validade das hipóteses de cálculo da referida norma mesmo no caso da presença das fibras.

7.3 – Sugestões para Pesquisas Futuras

O estudo de elementos de concreto armado reforçado com diferentes tipos de fibras é um assunto ainda muito vasto, apesar de estar sendo pesquisado desde muito tempo. Baseado neste trabalho as seguintes sugestões são feitas para pesquisas futuras.

- Outros tipos de fibras devem ser testadas, variando não apenas o material constituinte das fibras, mas a forma, o comprimento, relação de aspecto, o volume e outras características que possam influenciar as propriedades e o comportamento do concreto.

- A relação a/d (vão de cisalhamento / altura útil da viga) influencia a capacidade resistente ao cisalhamento das vigas, de forma que vigas com relação a/d diferentes devem ser estudadas.
- A influência das fibras nos mecanismos resistentes à punção em placas surge naturalmente.
- Peças de concreto submetidas a carregamentos dinâmicos com fibras também devem ser ensaiadas, afim de se avaliar a eficiência das fibras em estruturas sujeitas a terremotos.
- O reforço de estruturas de concreto armado com adição de fibras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEBAR, P; MINDESS, S; OLUND, B. Shear Test of Fiber Beams without Stirrups. ACI Structural journal, janeiro–fevereiro 1997, vol. 94, n. 1, p 68-76.

AGOPYAN, V. Materiais reforçados com fibras para construção civil. Tese de livre-docência, Escola Politécnica, USP, 199170.

AMERICAN CONCRET INSTITUTE, Commitee 544, Design considerations for steel fiber reinforced concrete. ACI journal, Detroit, set-out 1988, p 563-580

ASHOUR, S. A; HASANAIN G. S; WAFI, F.F., Shear behavior of high-strength fiber reinforced concrete beams. ACI Structural Journal, Detroit, março-abril 1992, p 176-184..

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, EB 1763, Aditivos para concreto de cimento Portland, ABNT, Rio de Janeiro, 1992, 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, MB 3483, Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos, ABNT, Rio de Janeiro, 1991, 3p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5738, Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto cilíndricos ou prismáticos, ABNT, São Paulo, 1980, 3p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5739, Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto, ABNT, Rio de Janeiro, 1980, 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6118, Projeto e execução de obras de concreto armado, Rio de Janeiro, 1978, 76p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6118, Projeto de estruturas de concreto- Procedimento, Rio de Janeiro, 2003, 170p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7211, Agregado para Concreto, Rio de Janeiro, maio 1991, 9p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7223, Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, ABNT, Rio de Janeiro, 1982, 6p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7480, Barra e Fios de Aço Destinados a Armaduras para Concreto Armado Rio de Janeiro, agosto 1982, 15p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 8522, Concreto - Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação, ABNT, Rio de Janeiro, 1984, 9p.

BATSON, G; JENKINS, E; SPATNEY, R. Steel fibers as shear reinforcement in beams. ACI Journal, Detroit, outubro 1972, p 640-644.

BAUER, L. A. F., Materiais de construção, LTC - Livros Técnicos e Científicos, vol 1, 3a edição, Rio de Janeiro, 1987, 403p

EL-NIEMA, E. I., Reinforced concrete beams with steel fibers under shear, ACI Structural Journal, Detroit, março - abril 1981, p 178-183.

FURLAN JR, S., Vigas de concreto com taxas reduzidas de armadura de cisalhamento: influência do emprego de fibras curtas e de protensão, São Carlos, Tese (doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, 1995, 373 p.

HANNANT, D. J., Fibre cements and fibre concretes. Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, 1978.

KWAK, Y.; EBERHARD, M. O; KIM, W; KIM, J. Shear strength of steel fiber-reinforced concrete beams without stirrups, ACI Structural Journal, julho-agosto 2002, p 530-538.

LEONHARDT, F; MÖNNING, E. Construções de Concreto; Princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado. 1.ed. Rio de Janeiro. Interciência, 1977, vol.1, 296p.

MANSUR, M.A; ONG, C.G; PARAMASIVAM, P. Shear strength of fibrous concrete beams without stirrups. Journal of Structural Engineering, setembro 1986, v 112, n 9, p 2066-2079.

METHA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., Concreto: Estrutura, propriedades e materiais, Pini, 1a edição 1994, p 434-446.

MIRSAYAH, A. A; BANTHIA, N. Shear strength of steel fiber- reinforced concrete, ACI Materials Journal, setembro-outubro 2002, p 473-479.

NAAMAN, A. E., Fiber reinforcement for concrete, Concrete International, março 1985, p 21-25.

NARAYANAN, R; DARWISH, I. Y. S., Use of steel fibers as shear reinforcement. ACI Structural Journal, Detroit, maio - junho 1987, p 216-226.

NOGHABAI, K., Beams of Fibrous Concrete in Shear and Bending: Experiment and Model. ASCE Journal of Structural Engineering, vol. 126, February 2000, p 243-251.

ROCHA, G. G. N., Concreto de alto desempenho fabricado com fibras de aço, Belo Horizonte, Trabalho de Iniciação Científica CNPq / PRPq, UFMG, 1995.

SHAH, S. P; RANGAN, B. V. Fiber reinforced concrete properties, ACI Journal, Detroit, fevereiro 1970, p 126-135.

SHARMA, A. K. . Shear strength of steel fiber reinforced concrete beams. ACI Journal, Detroit, julho-agosto 1986, p 624-628.

SOROUSHIAN, P; BAYASI, Z. Fiber type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete, ACI Materials Journal, Detroit, março-abril 1991, v.88, n 2, p 129-134.

SUSSEKIND, J. C., Curso de Concreto: concreto armado, Globo, vol. 1, 6a edição, São Paulo, 1989, 376p.

SWAMY, R. N.; BAHIA, H. M., The effectiveness of steel fibers as shear reinforcement, *Concrete International*, março – abril 1985, p 35

TAN, K. H.; MURUGAPPAN, K.; PARAMASIVAM, P., Shear behavior of steel fiber reinforcement concrete beams, *ACI Structural Journal*, janeiro – fevereiro 1993, p 3

TESUKA, Y. Concreto armado com fibras, Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, agosto 1989, p 1-20.

VALLE, M; BUYUKOSTURK, O. Behavior of fiber reinforced high-strength concrete under shear, *ACI Materials Journal*, Detroit, março-abril 1993, p 122-133.

VIDAL FILHO, L. S., Influência da adição de Fibras Curtas de Aço no Comportamento e Resistência ao Esforço Cortante em Vigas de Concreto Armado, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da UFMG, 1999, 130 p.

APÊNDICE A

Resultados Experimentais

Deformações no Concreto, na Armadura Longitudinal e nos Etribos

TABELA A1 - VIGA 5A - BOMBRIL 0,8% - ESTRIBO 3,4 mm

Observações	Carga (kN)	4E1 (x10E-6)	4E2 (x10E-6)	4D1 (x10E-6)	4D2 (x10E-6)	5E1 (x10E-6)	5E2 (x10E-6)	5D1 (x10E-6)	5D2 (x10E-6)	C1 (x10E-6)	C2 (x10E-6)	L1 (x10E-6)	L2 (x10E-6)
	0,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,448	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	18	0
	8,895	0	0	0	0	0	0	0	0	38	43	18	28
	13,343	0	0	0	0	0	0	0	0	45	69	26	30
	17,790	0	0	0	0	0	0	0	0	47	100	32	36
	22,238	0	0	0	0	0	0	0	0	57	105	36	40
Past	26,685	0	0	0	0	0	0	0	0	58	134	94	103
	31,133	0	0	0	0	0	0	0	0	96	202	102	120
	35,580	0	0	0	0	0	0	0	0	162	246	115	245
P/vf	40,028	0	0	0	0	0	0	0	0	223	299	127	261
	44,475	0	0	0	0	0	0	0	0	257	322	161	330
	53,370	0	0	49	0	0	0	0	0	265	345	197	467
	62,265	2	0	57	0	9	7	13	17	271	384	203	581
Pte	71,160	342	361	560	882	855	518	153	315	377	408	340	360
	80,055	450	379	621	981	969	772	276	385	666	683	1044	1224
	88,950	685	700	727	1078	1023	829	363	532	707	781	1233	1425
	97,845	735	692	793	1256	1456	954	411	818	755	885	1263	1658
	106,740	826	792	927	1388	1862	1029	614	976	788	934	1288	1662
	115,635	907	1082	1026	1730	2090	1120	801	1259	812	957	1316	1687
	124,530	1095	1356	1173	1981	2209	1278	897	1342	845	987	1320	1712
	133,425	1616	1740	1362	2158	2634	1561	1043	1553	894	1032	1387	1791
	142,320	1992	2022	1940	2638	3130	1651	1131	1782	944	1083	1496	1860
	146,768	2270	2716	2391	2919	3487	1934	1240	1894	963	1138	1654	1864
Esc. est.	151,215	24677	3099	2628	3085	3879	2097	1344	2047	1009	1179	1662	1896
	160,110	24677	3396	3323	3274	4712	2151	1443	2215	1063	1251	1723	2004
	164,558	24677	3846	4023	3850	4732	2579	1806	2508	1132	1325	2095	2111
Ruptura	177,900												

TABELA A2 - VIGA 5B - BOMBRIL 0,8% - ESTRIBO 3,4 mm

Observações	Carga (kN)	4E1 (x10E-6)	4E2 (x10E-6)	4D1 (x10E-6)	4D2 (x10E-6)	5E1 (x10E-6)	5E2 (x10E-6)	5D1 (x10E-6)	5D2 (x10E-6)	C1 (x10E-6)	C2 (x10E-6)	L1 (x10E-6)	L2* (x10E-6)
	0,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	4,448	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	
	8,895	0	0	0	0	0	0	0	0	12	25	7	
	13,343	0	0	0	0	0	0	0	0	37	47	22	
	17,790	0	0	0	0	0	0	0	0	53	70	75	
	22,238	0	0	0	0	0	0	0	0	66	88	38	
P _{asl}	26,685	0	0	0	0	0	0	0	21	87	118	94	
	31,133	0	0	0	0	0	0	0	24	114	151	112	
P _{f_{vf}}	35,580	0	0	0	0	0	1	0	27	124	177	216	
P _{f_{vc}}	40,028	0	0	0	0	0	4	0	29	158	214	286	
	44,475	0	0	0	0	0	7	14	32	185	244	357	
	53,370	0	0	0	0	0	8	19	37	207	273	424	
	62,265	0	0	0	0	74	12	28	37	262	358	466	
P _{te}	71,160	0	0	92	74	312	259	40	45	307	401	597	
	80,055	50	59	116	100	392	422	44	49	349	452	692	
	88,950	244	243	280	179	605	679	195	227	402	517	816	
	97,845	422	489	290	274	623	989	617	724	453	579	871	
	106,740	801	819	493	355	654	1134	931	1014	500	641	973	
	115,635	812	866	500	373	660	1315	1484	1613	542	690	1015	
	124,530	893	1028	525	394	666	1500	1799	1978	607	767	1024	
	133,425	1017	1216	603	428	666	1672	2044	2122	660	826	1027	
	142,320	1215	1506	614	476	679	1955	2275	2565	713	892	1039	
	151,215	1432	1650	646	550	679	2281	2496	3132	767	956	1090	
	160,110	1887	1962	1069	846	679	2618	2935	3834	827	1030	1143	
	164,558	2255	2241	2364	1870	679	3037	3359	4690	881	1091	1192	
	169,005	2424	2379	2625	2154	685	3353	3634	5229	907	1118	1224	
	173,453	2664	2607	2986	2490	687	3357	4063	-	936	1153	1242	
Ruptura	188,600												

* Extensômetro com defeito

TABELA A3 - VIGA 6A - BOMBIL 0,8% - ESTRIBO 4,2 mm

Observações	Carga (kN)	4E1 (x10E-6)	4E2 (x10E-6)	4D1 (x10E-6)	4D2 (x10E-6)	5E1 (x10E-6)	5E2 (x10E-6)	5D1 (x10E-6)	5D2 (x10E-6)	C1 (x10E-6)	C2 (x10E-6)	L1 (x10E-6)	L2 (x10E-6)
	0,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,448	0	1	0	6	2	3	3	0	3	0	5	0
	8,895	0	3	0	6	10	4	5	0	15	12	25	20
	13,343	0	3	0	6	11	6	7	0	32	32	38	39
	17,790	0	4	0	6	12	7	9	0	56	50	51	52
	22,238	0	5	0	8	18	8	9	0	73	65	66	71
P _{asl}	26,685	0	7	1	9	22	10	10	0	96	88	89	101
	31,133	0	9	2	11	35	11	11	0	110	88	109	128
P _{f_{vf}}	35,580	0	10	3	15	38	14	12	0	151	38	221	349
P _{f_{vc}}	40,028	0	14	4	16	39	15	13	3	171	69	295	414
	44,475	0	14	5	18	43	17	14	4	208	99	398	509
	53,370	0	16	10	30	46	18	15	5	231	514	443	558
	62,265	0	31	23	61	52	31	17	7	278	816	584	709
	71,160	0	35	32	79	55	45	20	16	340	884	706	846
	80,055	0	49	35	116	73	60	31	31	387	933	813	955
P _{te}	88,950	1	82	99	198	156	121	164	181	445	968	964	1102
	97,845	3	228	193	310	200	165	284	293	496	1021	1087	1232
	106,740	174	403	259	414	499	345	488	477	549	1078	1204	1353
	115,635	730	695	480	603	697	468	686	695	593	1134	1316	1474
	124,530	1411	1061	886	1006	987	822	1038	938	641	1166	1659	1520
	133,425	1574	1261	1015	1224	1288	1047	1258	1338	688	1175	1679	1709
	142,320	1875	1472	1258	1469	1886	1222	1668	1827	747	1269	1683	1749
	151,215	2090	1682	1512	1723	2213	1650	2013	1963	806	1328	1702	1849
	160,110	2734	1952	2204	2024	2791	2041	2282	2176	859	1367	2417	2414
	169,005	3110	2218	2384	2284	3100	2233	2608	2378	914	1446	2478	3669
	177,900	3339	2337	2800	2493	3659	2420	2648	3173	979	1514	2663	3886
	186,795	3572	2389	2862	2794	4917	2620	3105	4379	1049	1573	2782	4298
	195,690	4266	2838	3350	3678	7343	3508	6504	6773	1172	1631	3413	5066
	200,138	4376	3167	3590	3838	7489	3682	6877	7365	1241	1696	3588	6275
	204,585	4419	3799	3830	4410	-	3929	8093	7636	1285	1723	3827	8020
	209,033	-	3996	4259	4423	-	4178	9227	4625	1389	1844	5788	9196
Ruptura	216,200												

TABELA A4 - VIGA 6B - BOMBIL 0,8% - ESTRIBO 4,2

Observações	Carga (kN)	4E1 (x10E-6)	4E2 (x10E-6)	4D1 (x10E-6)	4D2* (x10E-6)	5E1 (x10E-6)	5E2 (x10E-6)	5D1 (x10E-6)	5D2* (x10E-6)	C1 (x10E-6)	C2 (x10E-6)	L1 (x10E-6)	L2 (x10E-6)
	0,000	0	0	0		0	0	0		0	0	0	0
	4,448	0	0	0		0	1	0		12	11	14	25
	8,895	0	4	0		0	3	1		34	29	26	35
	13,343	0	5	0		0	6	5		52	48	42	41
	17,790	0	6	0		0	7	6		62	57	54	74
	22,238	0	10	0		0	10	8		90	71	76	137
	26,685	0	13	0		0	11	9		115	90	99	278
Pass	31,133	2	16	0		0	14	9		154	124	291	335
	35,580	5	17	0		2	15	13		182	153	360	395
Pfvf	40,028	6	11	0		5	17	15		199	170	417	435
	44,475	8	11	0		8	20	19		233	205	492	590
	53,370	11	21	25		22	32	22		297	260	638	721
Pte	62,265	16	31	162		82	34	25		353	305	739	735
	71,160	36	42	273		106	48	32		410	362	862	830
	80,055	39	147	469		128	77	114		465	405	972	945
	88,950	366	294	645		210	128	288		519	448	1083	1849
	97,845	529	395	866		293	193	488		584	501	1201	2080
	106,740	687	502	1073		474	290	575		636	550	1306	2248
	115,635	954	686	1343		631	389	706		693	596	1429	2481
	124,530	1204	847	1528		824	515	868		758	648	1548	2631
	133,425	1513	1057	1738		1395	825	1068		815	698	1654	2756
	142,320	2020	1418	2043		1720	1013	1575		880	754	1770	3227
	151,215	2362	1671	2260		1928	1139	1708		946	808	1881	3480
	160,110	2952	1836	2716		2121	1252	1852		1012	861	2006	3718
	169,005	3365	1930	3065		2329	1386	2022		1074	917	2131	3965
	177,900	3950	2024	3642		2568	1540	2236*		1144	974	2258	4121
	182,348	4270	2037	4212		2699	1630	2322		1179	1004	2321	4326
	191,243	4898	2089	5482		3118	1889	2472		1245	1064	2451	4671
Esc. Est.	195,690	5422	2152	6274		3305	24436	2680		1310	1116	2645	4973
	200,138	6770	2395	7222		3496	24436	2793		1355	1153	2745	5038
	204,585	7546	2725	-		3707	24436	2901		1418	1193	2924	8180
Ruptura	217,000												

* Extensômetro com defeito

TABELA A5 - VIGA 7A - NYLON 0,2% - ESTRIBO 3,4 mm

Observações	Carga (kN)	4E1 (x10E-6)	4E2 (x10E-6)	4D1 (x10E-6)	4D2 (x10E-6)	5E1 (x10E-6)	5E2 (x10E-6)	5D1 (x10E-6)	5D2 (x10E-6)	C1 (x10E-6)	C2 (x10E-6)	L1 (x10E-6)	L2 (x10E-6)
	0,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,448	0	0	0	0	0	0	0	0	13	19	0	25
	8,895	0	0	0	0	0	0	0	0	25	50	13	22
	13,343	0	0	0	0	0	0	0	0	37	63	19	25
	17,790	0	0	0	0	0	0	0	0	75	100	94	37
Pass	22,238	0	34	0	0	0	0	0	0	87	125	169	313
	26,685	0	46	0	0	0	0	0	0	125	163	276	383
	31,133	0	94	0	0	0	24	0	0	149	200	307	433
P1vf	35,580	6	103	7	24	0	49	12	12	168	226	344	573
P1vc	40,028	6	106	-31	36	-24	61	42	18	187	251	351	589
	44,475	12	115	38	133	-24	73	48	24	237	301	503	639
	48,923	18	161	433	211	-12	152	73	36	249	313	506	749
Pte	53,370	24	267	705	349	0	268	109	61	274	351	588	839
	62,265	24	273	791	433	0	280	133	73	324	401	700	952
	71,160	24	288	890	685	388	341	145	473	386	476	775	965
	80,055	559	521	1048	481	1340	1575	1021	909	436	539	938	1028
	88,950	1943	2046	1888	1308	1785	2310	1681	1343	485	589	1087	1253
	97,845	2633	2301	2333	1833	2505	3300	2251	1903	535	658	1170	1448
	102,293	2908	2316	2818	1928	2755	3490	2291	2173	560	683	1275	1478
	106,740	3213	2346	2908	2358	3180	3850	2856	2588	597	727	1415	1578
	115,635	3543	2646	2748	2418	3605	4030	3081	2993	672	802	1620	1608
	124,530	4133	3136	3168	2628	3625	4540	3811	3313	722	865	1745	1718
	128,978	4903	3156	3313	2798	3625	4765	4011	3463	759	902	1930	1768
	133,425	5668	3196	3623	3038	3625	5150	4226	3633	784	934	1955	1798
	137,873	6533	6319	3813	3128	3625	5810	4341	3893	809	965	2095	1828
	142,320	25213	6901	5553	3688	3625	6865	4351	4233	859	1015	2205	1958
Esc. est./long.	146,768	25213	12146	7108	23828	3625	8039,5	25791	23973	909	1037	13785	13478
Ruptura	160,100												

TABELA A6 - VIGA 7B - NYLON 0,2% - ESTRIBO 3,4 mm

Observações	Carga (kN)	4E1 (x10E-6)	4E2 (x10E-6)	4D1 (x10E-6)	4D2 (x10E-6)	5E1 (x10E-6)	5E2* (x10E-6)	5D1 (x10E-6)	5D2* (x10E-6)	C1 (x10E-6)	C2 (x10E-6)	L1 (x10E-6)	L2 (x10E-6)
	0,000	0	0	0	0	0		0		0	0	0	0
	4,448	0	0	0	0	0		0		8	0	54	37
	8,895	0	0	0	0	0		0		16	31	67	50
	13,343	0	0	0	0	0		0		34	44	73	69
	17,790	0	0	0	0	0		0		47	56	92	93
	22,238	0	0	0	0	0		0		72	81	110	112
	26,685	0	0	0	0	21		0		97	105	135	130
	31,133	6	0	0	4	33		0		110	130	154	173
P _{vf} / Pasl	35,580	10	6	0	9	46		0	*	136	155	235	248
P _{vc}	40,028	22	11	0	12	58		0		161	179	248	303
	44,475	35	15	35	21	70		13		199	216	256	409
	48,923	48	24	42	43	83		25		212	241	329	557
P _{te}	53,370	65	35	48	55	100		38		275	266	460	625
	62,265	87	39	50	67	132		50		313	303	560	712
	71,160	91	41	55	91	143		60		327	339	797	842
	75,608	93	56	67	156	204		62		364	376	890	937
	80,055	110	98	79	181	228		166		390	402	960	1019
	84,503	307	251	85	242	241		202		415	414	1029	1106
	88,950	516	305	107	303	253		411		440	426	1079	1149
	93,398	1131	366	378	462	265		533		466	464	1148	1231
	97,845	1388	396	520	646	277		669		491	501	1211	1312
	106,740	1610	408	809	793	290		1160		504	526	1267	1381
	115,635	2076	439	1117	1747	387		2301		593	614	1443	1567
	124,530	2204	450	1352	1821	449		2314		606	638	1499	1636
	128,978	2938	498	1438	2127	706		2363		656	701	1606	1742
	133,425	3570	530	1536	3816	3317		2437		694	713	1656	1798
	137,873	4045	587	2005	4171	3917		2510		720	751	1707	1860
	139,652	4267	590	2830	4501	4409		2547		732	776	1776	1910
	142,320	5350	607	3237	4795	5130		2572		745	788	1801	1960
	146,768	5611	650	3508	5211	6172		2633		770	801	1832	1991
	151,215	6326	690	3830	5921	6209		2928		809	838	1896	2001
Ruptura	164,560												

* Extensômetro com defeito

TABELA A7 - VIGA 8A - NYLON 0,2% - ESTRIBO 4,2 mm

Observações	Carga (kN)	4E1 (x10E-6)	4E2 (x10E-6)	4D1 (x10E-6)	4D2 (x10E-6)	5E1 (x10E-6)	5E2 (x10E-6)	5D1 (x10E-6)	5D2 (x10E-6)	C1 (x10E-6)	C2 (x10E-6)	L1 (x10E-6)	L2 (x10E-6)
	0,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,450	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
	8,890	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	32
	13,340	0	0	14	0	7	0	0	0	0	0	31	55
	17,790	0	0	70	0	33	0	0	0	0	361	33	66
	22,240	0	0	74	0	37	0	0	15	0	369	55	92
	26,690	59	0	77	0	38	0	0	17	0	374	78	136
Pfvf / Pasl	31,130	68	0	81	0	40	0	0	21	0	402	111	170
Pfvc	35,580	71	0	83	0	43	0	4	28	0	406	127	196
	40,030	74	46	87	51	46	0	11	31	247	420	156	233
	44,480	76	51	95	60	130	5	12	38	275	468	175	265
	48,920	77	54	106	74	147	37	15	43	300	521	195	295
Pte	53,370	79	58	116	86	192	121	16	52	323	531	218	321
	62,270	80	69	157	168	308	223	41	55	401	542	252	380
	71,160	107	141	512	658	527	435	72	142	667	560	284	429
	80,050	160	211	603	703	900	713	257	532	712	617	332	490
	88,950	476	358	798	996	1511	1016	953	1450	721	746	371	548
	97,840	812	589	975	1208	1824	863	1379	2048	787	886	419	608
	106,740	1221	984	1280	1649	2313	1675	1741	2413	837	996	463	669
	115,630	1596	1268	1566	2027	2728	1878	2123	2714	872	1036	509	730
	124,530	2054	2124	2172	2852	3295	2386	2559	3195	888	1063	549	783
	133,420	2298	2692	2610	3480	4311	2862	3109	3921	907	1135	601	857
	142,320	2374	2799	2877	3989	5252	3142	3500	5165	915	1348	642	912
	146,770	2376	2679	2980	4226	5635	3129	3615	5760	919	1572	665	941
	151,210	2419	2894	3254	5067	5683	3271	3977	6926	953	1705	689	975
	155,660	2498	3074	3508	5878	5994	3453	4356	7945	961	1798	711	1007
	160,110	2537	3082	3663	6173	6287	3475	4554	8946	1033	1812	740	1040
	164,560	2651	3447	4016	7192	6494	3779	5065	10486	1341	2104	763	1073
	169,000	2776	4165	4369	8526	6680	4245	5896	11733	1398	2727	778	1096
Ruptura	182,400												

TABELA A8 - VIGA 8B - NYLON 0,2% - ESTRIBO 4,2 mm

Observações	Carga (kN)	4E1 (x10E-6)	4E2 (x10E-6)	4D1 (x10E-6)	4D2 (x10E-6)	5E1 (x10E-6)	5E2 (x10E-6)	5D1 (x10E-6)	5D2 (x10E-6)	C1 (x10E-6)	C2 (x10E-6)	L1 (x10E-6)	L2 (x10E-6)
	0,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,448	0	0	0	0	0	0	0	0	17	18	15	14
	8,895	0	0	0	0	0	0	0	0	43	49	20	15
	13,343	0	0	2	0	0	0	0	0	58	69	27	22
	17,790	9	9	6	8	0	0	0	0	74	86	84	68
Passl	22,238	10	10	10	11	0	0	0	0	88	112	228	130
PfVf	26,685	15	12	10	13	0	0	0	0	119	158	312	151
Pfvc	31,133	20	15	19	15	0	0	0	0	162	201	498	417
	35,580	24	16	21	16	0	0	0	0	195	237	512	564
	40,028	29	21	22	19	0	0	0	0	219	268	547	589
	44,475	35	27	29	22	0	0	2	0	252	306	617	608
	53,370	38	32	30	27	0	0	4	0	279	343	717	690
	62,265	43	40	32	32	5	0	5	68	303	377	724	720
Pte	71,160	55	46	38	38	33	6	8	314	349	433	796	992
	80,055	203	214	328	320	74	80	17	401	400	500	846	1018
	88,950	441	479	714	674	77	89	19	535	458	566	936	1068
	97,845	707	720	992	951	112	118	31	620	514	634	1069	1148
	106,740	1548	1343	1389	1390	262	210	152	912	561	685	1138	1530
	115,635	1735	1356	1531	1569	433	461	171	992	612	753	1405	1543
	124,530	1896	1392	1692	1769	608	733	179	1246	678	828	1487	1556
	133,425	2118	1472	1920	1994	862	1155	375	1527	726	893	1569	1626
	142,320	2435	1535	2273	2356	1840	2149	1940	2837	775	952	1792	1841
	151,215	2728	1562	2720	2771	2428	2900	2593	3878	826	1013	1832	1945
	160,110	3047	1509	3318	3346	2745	3440	2967	4177	887	1092	1887	1966
	169,005	3217	1609	4792	5286	3087	4272	3325	5409	952	1170	1967	2087
	177,900	3248	1659	5152	5999	3237	4559	3392	6322	978	1202	2114	2242
	182,348	3379	1693	5794	7109	3526	5185	3558	7357	1002	1232	2163	2300
Ruptura	186,800												

APÊNDICE B

Resultados Experimentais

Deslocamentos Verticais

TABELA B1 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS - VIGA V5A

Observações	Carga (kN)	Flechas (x 0,01 mm)		
		1/4 vão	1/2 vão	1/4 vão
	0,000	0	0	0
	4,448	11	12	7
	8,895	20	25	19
	13,343	32	42	33
	17,790	41	58	42
	22,238	53	77	56
	26,685	63	94	66
	31,133	75	114	79
Pdesl	35,580	90	139	95
Pfvf	40,028	101	165	110
Pfvc	44,475	112	194	125
	48,923	125	223	142
	53,370	137	251	158
	57,818	151	283	197
	62,265	169	317	177
	66,713	188	356	219
	71,160	205	391	238
	75,608	221	422	257
	80,055	235	448	272
	84,503	257	491	298
	88,950	275	524	316
	93,398	306	572	342
	97,845	327	613	364
	102,293	350	655	391
	106,740	374	699	415
	111,188	395	747	439
	115,635	411	783	458
	120,083	431	832	497
	124,530	451	880	522
	128,978	469	919	541
	133,425	487	967	562
	137,873	508	1022	588
	142,320	529	1071	607
	146,768	547	1113	625
	151,215		1197	
	155,663		1258	
	160,110		1337	
	164,558		1397	
	169,005		1540	
	173,453		1614	
Ruptura	177,900			

TABELA B2 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS - VIGA V5B

Observações	Carga (kN)	Flechas (x 0.01 mm)		
		1/4 vão	1/2 vão	1/4 vão
	0,000	0	0	0
	4,448	7	12	5
	8,895	15	28	13
	13,343	24	44	23
	17,790	31	57	28
	22,238	42	72	36
	26,685	52	90	46
	31,133	67	112	60
Pdesl/ Pfvf	35,580	90	150	82
Pfvc	40,028	105	170	100
	44,475	127	204	120
	48,923	141	224	136
	53,370	164	262	163
	57,818	188	304	194
	62,265	207	328	211
	66,713	227	359	235
	71,160	241	380	249
	75,608	270	423	280
	80,055	292	443	306
	84,503	318	493	330
	88,950	342	525	350
	93,398	373	562	373
	97,845	400	596	397
	102,293	417	623	412
	106,740	450	675	451
	111,188	477	715	478
	115,635	506	758	505
	120,083	524	787	521
	124,530	559	837	553
	128,978	589	882	580
	133,425	615	928	604
	137,873	641	971	629
	142,320	670	1027	655
	146,768	703	1086	684
	151,215	733	1146	713
	155,663	762	1209	743
	160,110	786	1255	766
	164,558		1302	
	169,005		1378	
	173,453		1424	
Ruptura	188,600			

TABELA B3 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS - VIGA V6A

Observações	Carga (kN)	Flechas (x 0,01 mm)		
		1/4 vão	1/2 vão	1/4 vão
	0.000	0	0	0
	4.448	11	12	7
	8.895	20	25	19
	13.343	32	42	33
	17.790	41	58	42
	22.238	53	77	56
	26.685	63	94	66
	31.133	75	114	79
Pfvf	35.580	90	139	95
Pdes/ Pfv	40.028	101	165	110
	44.475	112	194	125
	48.923	125	223	142
	53.370	137	251	158
	57.818	151	283	197
	62.265	169	317	177
	66.713	188	356	219
	71.160	205	391	238
	75.608	221	422	257
	80.055	235	448	272
	84.503	257	491	298
	88.950	275	524	316
	93.398	306	572	342
	97.845	327	613	364
	102.293	350	655	391
	106.740	374	699	415
	111.188	395	747	439
	115.635	411	783	458
	120.083	431	832	497
	124.530	451	880	522
	128.978	469	919	541
	133.425	487	967	562
	137.873	508	1022	588
	142.320	529	1071	607
	146.768	547	1113	625
	151.215		1197	
	155.663		1258	
	160.110		1337	
	164.558		1397	
	169.005		1540	
	173.453		1614	
Ruptura	216.200			

TABELA B4 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS - VIGA V6B

Observações	Carga (kN)	Flechas (x 0,01 mm)		
		1/4 vão	1/2 vão	1/4 vão
	0,000	0	0	0
	4,448	4	0	7
	8,895	14	7	16
	13,343	21	14	30
	17,790	30	23	32
	22,238	38	33	40
	26,685	48	50	50
	31,133	63	70	62
	35,580	81	95	79
Pdes/ Pfvf	40,028	101	123	97
	44,475	123	155	120
Pfvc	48,923	142	181	133
	53,370	163	210	152
	57,818	182	241	172
	62,265	207	274	193
	66,713	220	295	208
	71,160	247	324	226
	75,608	256	350	240
	80,055	290	391	265
	84,503	316	426	288
	88,950	336	453	305
	93,398	364	493	325
	97,845	386	533	342
	102,293	410	551	358
	106,740	427	583	375
	111,188	453	625	401
	115,635	476	655	420
	120,083	497	692	439
	124,530	519	725	457
	128,978	537	750	470
	133,425	567	799	498
	137,873	589	847	530
	142,320	641	900	559
	146,768	664	935	578
	151,215	688	972	598
	155,663	711	1008	617
	160,110	742	1059	642
	164,558	764	1095	659
	169,005	797	1150	686
	173,453	824	1191	709
	177,900	850	1233	728
	182,348		1275	
	186,795		1320	
	191,243		1364	
	195,690		1415	
	200,138		1475	
	204,585		1535	
Ruptura	217,000			

TABELA B5 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS - VIGA V7A

Observações	Carga (kN)	Flechas (x 0,01 mm)		
		1/4 vão	1/2 vão	1/4 vão
	0,000	0	0	0
	4,448	9	6	14
	8,895	21	21	30
	13,343	42	32	34
	17,790	55	48	43
	22,238	72	73	56
Pdes/ Pfvf	26,685	108	100	79
	31,133	129	134	102
	35,580	155	170	131
Pfvc	40,028	179	207	168
	44,475	203	242	191
	48,923	223	283	220
	53,370	239	305	238
	57,818	255	336	260
	62,265	268	369	283
	66,713	289	411	311
	71,160	313	448	338
	75,608	343	477	357
	80,055	355	538	397
	84,503	384	578	422
	88,950	411	623	448
	93,398	455	671	469
	97,845	480	713	489
	102,293	503	754	509
	106,740	515	815	536
	111,188	533	857	555
	115,635	579	902	575
	120,083	613	939	592
	124,530	654	1000	622
	128,978		1048	
	133,425		1095	
	137,873		1147	
	142,320		1214	
	146,768		1254	
Ruptura	160,100			

TABELA B6 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS - VIGA V7B

Observações	Carga (kN)	Flechas (x 0,01 mm)		
		1/4 vão	1/2 vão	1/4 vão
	0,000	0	0	0
	4,448	8	2	14
	8,895	18	13	23
	13,343	26	22	33
	17,790	38	33	43
	22,238	51	47	55
	26,685	67	64	71
Pdesl	31,133	90	97	92
Pfvf	35,580	106	122	109
Pfvc	40,028	127	153	132
	44,475	154	190	158
	48,923	179	222	180
	53,370	202	255	202
	57,818	220	280	217
	62,265	246	317	238
	66,713	261	338	250
	71,160	287	373	269
	75,608	322	416	296
	80,055	348	455	317
	84,503	364	480	334
	88,950	397	530	361
	93,398	422	569	382
	97,845	444	605	402
	102,293	465	637	419
	106,740	495	683	441
	111,188	550	747	472
	115,635	574	780	491
	120,083	601	825	510
	124,530	626	864	529
	128,978	658	946	556
	133,425		1008	
	137,873		1041	
	142,320		1107	
	146,768		1124	
	151,215		1190	
	155,663		1246	
Ruptura	164,600			

TABELA B7 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS - VIGA V8A

Observações	Carga (kN)	Flechas (x 0,01 mm)		
		1/4 vão	1/2 vão	1/4 vão
	0,000	0	0	0
	4,448	6	7	0
	8,895	16	25	7
	13,343	27	40	16
	17,790	38	56	32
	22,238	52	80	45
Pdesl	26,685	81	123	78
Pfvf	31,133	105	156	97
Pfvc	35,580	124	181	115
	40,028	152	224	141
	44,475	178	264	165
	48,923	200	293	182
	53,370	228	330	206
	57,818	252	364	226
	62,265	269	390	242
	66,713	302	433	269
	71,160	331	476	295
	75,608	355	513	313
	80,055	384	554	335
	84,503	414	582	357
	88,950	447	643	385
	93,398	478	681	405
	97,845	517	741	437
	102,293	545	788	472
	106,740	577	844	498
	111,188	603	885	523
	115,635	630	931	541
	120,083	660	981	565
	124,530	687	1031	584
	128,978	722	1085	610
	133,425	759	1147	636
	137,873	783	1181	653
	142,320	813	1233	674
	146,768	838	1273	690
	151,215	870	1330	713
	155,663	900	1378	733
	160,110	927	1423	752
	164,558		1481	
	169,005		1526	
	173,453		1614	
Ruptura	182,400			

TABELA B8 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS - VIGA V8B

Observações	Carga (kN)	Flechas (x 0,01 mm)		
		1/4 vão	1/2 vão	3/4 vão
	0,000	0	0	0
	4,448	5	6	9
	8,895	14	18	19
	13,343	24	33	29
	17,790	34	44	41
	22,238	43	58	51
Pdesl	26,685	60	85	70
Pf _{vf}	31,133	88	129	100
Pf _{vc}	35,580	109	159	125
	40,028	131	194	152
	44,475	154	229	181
	48,923	180	267	207
	53,370	201	294	229
	57,818	221	330	251
	62,265	243	361	273
	66,713	268	406	303
	71,160	292	448	338
	75,608	310	479	359
	80,055	332	517	383
	84,503	353	553	409
	88,950	377	593	435
	93,398	408	635	467
	97,845	433	677	498
	102,293	437	728	526
	106,740	485	768	550
	111,188	510	810	577
	115,635	531	851	603
	120,083	551	891	626
	124,530	582	941	654
	128,978	608	999	685
	133,425	642	1052	712
	137,873	683	1114	745
	142,320	710	1167	776
	146,768	746	1250	818
	151,215	769	1298	845
	155,663	796	1356	872
	160,110	839	1428	907
	164,558		1467	
	169,005		1527	
	173,453		1614	
Ruptura	186,800			