

Marconi Oliveira de Almeida

**ESTUDO DA TENACIDADE E PROPOSTA DE NOVA
CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO DE FLEXÃO EM
PLACAS PARA OS CONCRETOS REFORÇADOS
COM FIBRAS DE AÇO**

**Dissertação apresentada ao Curso
de Pós-Graduação em Engenharia
Civil da Universidade Federal de
Santa Catarina, como parte dos
requisitos para a obtenção do título
de Mestre em Engenharia Civil.**



0.313.107-3

UFSC-BU

**Florianópolis
1999**

**ESTUDO DA TENACIDADE E PROPOSTA DE NOVA
CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO DE FLEXÃO EM
PLACAS PARA OS CONCRETOS REFORÇADOS
COM FIBRAS DE AÇO**

Marconi Oliveira de Almeida

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

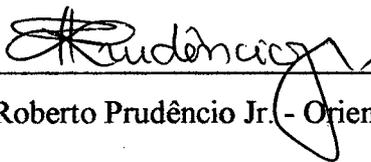
Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr.

Florianópolis
1999

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

FOLHA DE APROVAÇÃO

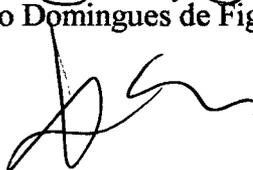
Dissertação defendida e aprovada em 24/09/99, pela comissão examinadora



Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr. - Orientador - Moderador



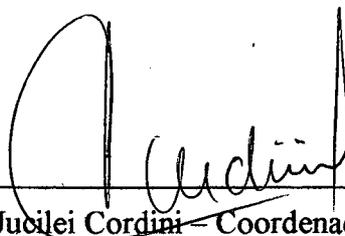
Prof. Dr. Antônio Domingues de Figueiredo - USP



Prof. Dr. Philippe Gleize - UFSC



Prof. Dr. Malik Cheriaf - UFSC



Prof. Dr. Jucilei Cordini - Coordenador do CPGEC

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a todos aqueles de que qualquer forma, seja da maneira mais singela, ajudaram na realização deste trabalho, e especialmente:

Aos meus pais, Heleno, Therezinha e Maria Helena; meu irmão, Hudson e meus familiares, em especial Gláucia de Oliveira Assis, que sempre me apoiaram para a realização dos meus estudos.

Ao professor e amigo Luiz Roberto Prudêncio Jr., por acreditar na realização deste trabalho e orientar de forma séria e competente, além de colocar literalmente a mão na massa, não medindo esforços para que este trabalho fosse realizado.

A USP, Universidade de São Paulo, através da pessoa do professor Antônio Domingues de Figueiredo, pela indispensável e essencial colaboração para o aperfeiçoamento deste trabalho, colocando os laboratórios e o seu tempo à disposição.

Aos amigos Dorval Aguiar e sua esposa Andrea, pela recepção calorosa e amigável na cidade de São Paulo durante a realização dos testes iniciais, além da colaboração nos laboratórios do CPQDCC (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Construção Civil, USP).

Ao professor Luís Alberto Gomez pelo suporte indispensável, na área da informática.

Ao amigo Régis Sandro Bazuco, pela ajuda e colaboração, além da grande amizade iniciada neste mestrado compartilhando os momentos de seriedade e diversão.

Aos grandes amigos Artêmio Frasson Júnior, Alexandre Oliveira e Renata Regina Schlindwein, pelo inestimável e fundamental apoio durante a execução dos ensaios e ao longo de todo trabalho.

Agradecimentos

Aos amigos de mestrado Keller A. Z. de Oliveira, Giovanna Patrícia Gava, Leila Cristina Meneghetti, pela colaboração inestimável durante a realização dos ensaios.

Aos amigos Marco Fábio Yoshii, Marcelo Mano e José Roberto Rossi Filho, companheiros de residência, compartilhando dos momentos de seriedade e de lazer.

Aos funcionários do laboratório de Materiais de Construção Civil, Luis Henrique dos Santos e Renato Santana da Lapa, pelo apoio, paciência e colaboração nas atividades do laboratório.

À Belgo-Mineira Bekaert Arames S.A., através da pessoa do Engenheiro Antônio Alexandre de Moraes, pelo apoio financeiro e fornecimento das fibras de aço, indispensáveis e fundamentais para a confecção e realização dos testes.

A companhia de Cimentos Votoran, na pessoa de Evaldo José Meneghel, Pela doação do cimento utilizado.

À CAPES, pelo suporte financeiro.

Por último e mais importante, gostaria de agradecer a uma pessoa que em todos os momentos, seja nos de alegria ou nos mais difíceis, sempre esteve do meu lado fazendo com que as dificuldades fossem ultrapassadas e com que os sonhos se realizassem. Essa pessoa só podia ser DEUS.

“Jamais mostre ao seu DEUS o tamanho do seu problema, e sim , ao seu problema o tamanho de seu DEUS”

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	xi
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
<hr/>	
2. CONCRETO COM FIBRAS	8
<hr/>	
2.1) Conceito e Tipos de Fibras	8
2.2) Interação Fibra x Matriz	13
2.2.1) Interface Fibra x Matriz	13
2.2.2) Características Das Fibras	15
2.2.3) Fator de Forma	16
2.2.4) Forma e Textura da Superfície	18
2.2.5) Revestimento de Superfície	19
2.3) Compatibilidade da Fibra com a Matriz	20
2.3.1) Módulo de Elasticidade	20
2.3.2) Trabalhabilidade	21
2.3.3) Resistência a Compressão do Concreto	22
2.3.4) Resistência ao Impacto	23
2.3.5) Resistência à Tração	24
2.3.6) Coeficiente de Poisson	26
2.3.7) Permeabilidade e Resistência ao Choque Térmico	26
2.3.8) Durabilidade	27
3. TENACIDADE	29
<hr/>	
3.1) Conceituação	29
3.2) Fatores que Afetam a Tenacidade	32
3.3) Ensaio De Tenacidade	35
3.3.1) Considerações Iniciais	35

3.3.2) Medidas de Tenacidade	40
3.3.2.1) Considerações Iniciais	40
3.3.2.2) Considerações sobre Máquinas e Medidores de Deflexão para Testes	40
3.3.2.3) Critério de Barr e Evans e Barr e Thomas	42
3.3.2.4) Método Norte-Americano	43
3.3.2.5) Método Japonês	54
3.3.2.6) Método Europeu (EFNARC e Noruegês)	57
3.3.2.7) Ensaio de Flexão em Placa	59
3.3.2.8) Novas Configurações, Medições e Propostas para Avaliação da Tenacidade	63
4. METODOLOGIA	66
<hr/>	
4.1) Definição do Programa Experimental	66
4.2) Desenvolvimento do Ensaio de Tenacidade em Placa Triangular	69
4.3) Adequação para os Ensaio em Placa Quadrada e em Viga	78
4.4) Seleção, Caracterização e Proporcionamento dos Materiais	79
4.4.1) Cimento	79
4.4.2) Agregados	80
4.4.2.1) Agregado graúdo	80
4.4.2.2) Agregado miúdo	81
4.4.3) Fibras	82
4.4.4) Aditivo	83
4.4.5) Água	84
4.4.6) Proporcionamento dos Materiais	84
4.5) Descrição dos Ensaio	86
4.5.1) Confeção e Moldagem dos Corpos De Prova	86
4.5.2) Ensaio de Flexão em Placa Triangular	91
4.5.3) Ensaio de Flexão em Placa Quadrada	91
4.5.4) Ensaio de Flexão em Corpos Prismático (Vigas)	92
4.5.5) Ensaio de Resistência à Compressão	93

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	95
<hr/>	
5.1) Trabalhabilidade no Concreto Fresco	95
5.2) Resistência à Compressão	99
5.3) Ensaio de Flexão em Corpos Prismáticos (Vigas)	101
5.3.1) Tipo de Fibra	101
5.3.2) Volume de Fibra	105
5.3.3) Fator de Tenacidade (JSCE-SF4) e Resistência à Tração	111
5.3.4) Tipo de Matriz	114
5.3.5) Discussão Sobre Os Valores Dos Índices De Tenacidade Pela ASTM C1018	115
5.4) Ensaio de Flexão em Placas Quadradas	119
5.4.1) Tipo de Fibra	121
5.4.2) Volume de Fibra	122
5.4.3) Tipo de Matriz	125
5.5) Ensaio de Flexão em Placas Triangulares	128
5.5.1) Tipos de Fibra	131
5.5.2) Volume de Fibra	132
5.5.3) Tipo de Matriz	135
5.5.4) Tenacidade	136
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	139
<hr/>	
6.1) Trabalhabilidade e Resistência à Compressão	139
6.2) Ensaio de Flexão em Vigas	140
6.3) Ensaio de Tenacidade em Placas Quadradas	143
6.4) Ensaio De Tenacidade Em Placas Triangulares	144
6.5) Sugestões para Trabalhos Futuros	147
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148
<hr/>	

8. ANEXOS	163
<hr/>	
Anexo I - Resultados dos Testes com a Trabalhabilidade	166
Anexo II - Resultados Dos Ensaio De Compressão Em Corpos De Prova Cilíndricos	169
Anexo III - Resultados do Ensaio de Flexão em Placas Quadradas	172
Anexo IV - Resultados do Ensaio de Flexão em Placas Triangulares	179
Anexo V - Resultados do Ensaio de Flexão em Vigas	186

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 -	Curva tensão x deformação na tração de uma matriz frágil de compósito reforçado com fibra	9
FIGURA 2.2 -	Curva típica carga x deflexão para cimento com sílica ativa reforçado com micro-fibras de argonite (9% de fibra em volume)e da matriz sem reforço	10
FIGURA 2.3 -	(A) Modelo simplificado de arrancamento para simular ligação, arrancamento, e transferência de tensões no compósito reforçado com fibra; (B) balanço de forças ao longo da fibra.....	13
FIGURA 2.4 -	Distribuição das tensões de cisalhamento na interface fibra/matriz e resistência à tração ao longo da fibra no ensaio de arrancamento: (a) transferência de tensão elástica, (b) transferência de tensão friccional, (c) transferência de tensões elástica e friccional combinadas.....	14
FIGURA 2.5 -	Compósito com fibras de coco, $a/c= 0,46$, 28 dias. Zona de transição com espessura média de $30\mu\text{m}$. Seta 1: portlandita; seta 2: microfissura; seta 3: descolamento.....	15
FIGURA 2.6 -	Simulação dos esforços ao qual as fibras estão sujeitas após a ruptura da matriz, nos compósitos reforçados com fibras.....	17
FIGURA 2.7 -	Fibras com geometria especial para aumentar a adesão com a matriz de cimento endurecida através de ancoragem mecânica: (a) fibras de aço com as extremidades em ganchos; (b) fibras de polipropileno fibriladas.....	19

FIGURA 2.8 -	Equipamentos para a medida da consistência do concreto (a) aparelho VEBE; (b) aparelho para a medida do fator de compactação.....	22
FIGURA 2.9 -	Ensaio de resistência ao impacto.....	24
FIGURA 3.1 -	Curva carga x deflexão típica para os concretos reforçados com fibras.....	31
FIGURA 3.2 -	Curva carga x deflexão para definição do índice de tenacidade proposto por BARR E EVANS.....	43
FIGURA 3.3 -	Parâmetros de tenacidade pelo método da ASTM C1018.....	45
FIGURA 3.4 -	Curva carga X deflexão para um material de comportamento elasto-plástico perfeito.....	46
FIGURA 3.5 -	Curva carga x deflexão obtida no ensaio de flexão em prismas para o concreto de 35 MPa e 80 kg/m ³ de fibra de aço colada, obtida no programa experimental desta dissertação.....	49
FIGURA 3.6 -	Curva carga x deflexão obtida no ensaio de flexão em prismas para o concreto de 35 MPa e 80 kg/m ³ de fibra de aço colada, obtida no programa experimental desta dissertação.....	49
FIGURA 3.7 -	Compósitos de mesmo índice de tenacidade, contendo um comportamento mecânico diferenciado, de acordo com o critério da ASTM C1018.....	51
FIGURA 3.8 -	Curva carga X deflexão e índices para a medição da tenacidade pelo o método JSCE-SF4.....	54
FIGURA 3.9 -	Materiais de comportamento elástico diferentes, com similar valor de tenacidade, segundo o critério da JSCE-SF4.....	56
FIGURA 3.10 -	Ensaio de flexão em placa quadrada preconizado pela EFNARC (1996). a) Planta baixa do ensaio, b) Vista lateral do ensaio.....	60

FIGURA 3.11 -	Estudo do ensaio de flexão em elementos finitos: a) Configuração de apoio das placas, b) análise do ensaio de flexão feita por elementos finitos em dois casos de descontinuidade no apoio, observando a parte inferior onde ocorre os esforços de tração; c) possível processo de fissuração ocorrido nas placas devido à descontinuidade.....	61
FIGURA 3.12 -	Ensaio de flexão com três pontos de carregamento, utilizando o sistema CMOD para leitura de abertura de fissura.....	64
FIGURA 4.1 -	Análise em elementos finitos (SAP2000) mostrando a região de tensões máximas de tração, ocorridas para o concreto no ensaio em placa quadrada.....	71
FIGURA 4.2 -	Placas triangulares sujeitas ao ensaio de flexão em quatro pontos: A) estudo em elementos finitos (SAP2000) mostrando a região inferior da placa, onde ocorrem as maiores tensões de tração com a possível região de ruptura, B) Exata configuração de fissuração no ensaio de flexão em placas triangulares.....	72
FIGURA 4.3 -	Dispositivo cilíndrico utilizado para medir a deformação central provocada pelo esmagamento da superfície puncionada: A) corte longitudinal do cilindro com as devidas cotas, B) corte transversal do cilindro.....	75
FIGURA 4.4 -	Ensaio de flexão em placa triangular, mostrando todos os dispositivos utilizados (dispositivos central, de apoio e de leitura de deflexão).....	76
FIGURA 4.5 -	Configuração final do ensaio de flexão em placa triangular, utilizando polivinil expandido como apoio do dispositivo central.....	77
FIGURA 4.6 -	Moldagem das placas quadradas para o ensaio de flexão.....	88

FIGURA 4.7 -	Corte de placas quadradas, moldadas especialmente para a extração de corpos de prova prismáticos (vigas), para ensaio de flexão.....	90
FIGURA 4.8 -	Ensaio de flexão em placa quadrada, com a medida de deflexão sendo realizada na parte superior.....	92
FIGURA 4.9 -	Ensaio de flexão em corpos prismáticos, utilizando o sistema de <i>yoke</i> para a fixação do sensor de deslocamento.....	93
FIGURA 5.1 -	Comparação das perdas de abatimento para os quatro tipos de concretos, com três teores (20,40 e 80 kg/m ³) e dois tipos de fibras (AS, aço solta e AC, aço colada)....	96
FIGURA 5.2 -	Estudo de correlação entre perda de abatimento de acordo com o aumento do volume de fibra, para as resistências de 35 e 45 MPa.....	97
FIGURA 5.3 -	Estudo de correlação entre perda de abatimento de acordo com o aumento do volume de fibra, para os dois tipos de fibra de aço, solta e colada.....	98
FIGURA 5.4 -	Resistências à compressão (f_{cj}) dos concretos sem e com a adição de fibras de aço, nos três teores utilizados	99
FIGURA 5.5 -	Valores médios de resistência à compressão (f_{cj}) dos concretos, sendo que a média dos concretos com fibras são para os dois tipos de fibra e para os três teores.....	100
FIGURA 5.6 -	Valores dos índices de tenacidade obtidos nos gráficos das curvas carga x deflexão para o ensaio de flexão em prismas.....	102
FIGURA 5.7 -	Comparação dos índices de tenacidade para dois tipos de fibra de aço sendo uma fornecida colada e a outra solta.....	103
FIGURA 5.8 -	Curvas carga x deflexão para o concreto de 35 MPa, utilizando as fibras de aço colada, com os três teores....	106
FIGURA 5.9 -	Curvas carga x deflexão para o concreto de 35 MPa, utilizando as fibras de aço solta, com os três teores.....	106

FIGURA 5.10 -	Curvas carga x deflexão para o concreto de 45 MPa, utilizando as fibras de aço colada, com os três teores....	107
FIGURA 5.11 -	Curvas carga x deflexão para o concreto de 45 MPa, utilizando as fibras de aço solta, com os três teores.....	107
FIGURA 5.12 -	Conjunto de corpos de prova ensaiados, referente ao concreto de 45 MPa utilizando 80 Kg/m ³ de fibras de aço colada.....	109
FIGURA 5.13 -	Valores de resistência à tração e fator de tenacidade encontrado nos ensaio à flexão, para todos os tipos de concretos.....	113
FIGURA 5.14 -	Correlação entre a resistência à tração e fator de tenacidade para cada um dos tipos de concretos ensaiados.....	114
FIGURA 5.15 -	Comparação dos valores dos índices de tenacidade I ₅ e I ₁₀ , obtidos segundo a ASTM C1018 (1994) para matrizes de resistência diferentes.....	115
FIGURA 5.16 -	Curva carga x deflexão para o concreto de 35 MPa , contendo 40 Kg/m ³ de fibras de aço colada, com as respectivas áreas para o cálculo do valor de I ₅	116
FIGURA 5.17 -	Resultados de carga de pico e energia (25mm) para o ensaio de flexão em placas quadradas.....	120
FIGURA 5.18 -	Curvas de carga x deflexão para os três teores utilizados nos concretos reforçados com a fibra de aço colada, na resistência de 35 MPa.....	123
FIGURA 5.19 -	Curvas de energia x deflexão para os três teores utilizados nos concretos reforçados com a fibra de aço colada, na resistência de 35 MPa.....	123
FIGURA 5.20 -	Curvas de carga x deflexão para os três teores utilizados nos concretos reforçados com a fibra de aço solta, na resistência de 45 MPa.....	124
FIGURA 5.21 -	Curvas de energia x deflexão para os três teores utilizados nos concretos reforçados com a fibra de aço solta, na resistência de 45 MPa.....	124

FIGURA 5.22 -	Valores de energia média para cada teor e tipo de fibra, mostrando a diferença para as duas matrizes utilizadas (placa quadrada).....	126
FIGURA 5.23 -	Correlação entre as energias absorvidas no ensaio de flexão em placa quadrada e no de flexão em prismas....	127
FIGURA 5.24 -	Curva carga x deflexão obtida no ensaio de flexão em placa triangular, com e sem a inclusão da deformação ocorrida no centro da placa, devido a cravação do dispositivo aplicador de carga.....	128
FIGURA 5.25 -	Curva energia x deflexão obtida no ensaio de flexão em placa triangular, com e sem a inclusão da deformação ocorrida no centro da placa.....	129
FIGURA 5.26 -	Resultados de carga de pico e energia (25mm) para o ensaio de flexão em placas triangulares.....	130
FIGURA 5.27 -	Curvas de carga x deflexão para os três teores utilizados nos concretos reforçados com a fibra de aço colada, na resistência de 35 MPa.....	132
FIGURA 5.28 -	Curvas de energia x deflexão para os três teores utilizados nos concretos reforçados com a fibra de aço colada, na resistência de 35 MPa.....	133
FIGURA 5.29 -	Curvas de carga x deflexão para os três teores utilizados nos concretos reforçados com a fibra de aço solta, na resistência de 45 MPa.....	133
FIGURA 5.30 -	Curvas de energia x deflexão para os três teores utilizados nos concretos reforçados com a fibra de aço solta, na resistência de 45 MPa.....	134
FIGURA 5.31 -	Valores de energia média para cada teor e tipo de fibra, mostrando a diferença para as duas matrizes utilizadas (placa triangular).....	136
FIGURA 5.32 -	Correlação entre as energias absorvidas (joules) nos ensaios de flexão em placas quadradas e placas triangulares.....	137

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 -	Algumas das propriedades da matriz de cimento portland comum.....	11
TABELA 2.2 -	Propriedades de algumas fibras.....	12
TABELA 3.1 -	Um resumo de vários testes especificados para medida de tenacidade dos concretos reforçados com fibras.....	38
TABELA 3.2 -	Tensões residuais na flexão das classes e dimensões recomendadas pela NBP N°7 (1993), associação Norueguesa do concreto.....	58
TABELA 3.3 -	Tensões residuais na flexão das classes e dimensões recomendadas pela EFNARC (1996).....	58
TABELA 3.4 -	Energia absorvida necessária para uma deflexão específica.....	60
TABELA 3.5 -	Níveis de tenacidade em função da resistência residual na flexão.....	63
TABELA 4.1 -	Discriminação e quantificação dos corpos de prova cilíndricos confeccionados no programa experimental..	67
TABELA 4.2 -	Discriminação e quantificação dos corpos de prova utilizados para os estudos de tenacidade.....	68
TABELA 4.3 -	Características físicas, químicas e mecânicas do cimento CPV-ARI.....	79
TABELA 4.4 -	Caracterização do agregado graúdo.....	81
TABELA 4.5 -	Caracterização do agregado miúdo.....	82
TABELA 4.6 -	Características das fibras de aço colada (ZP 305) e solta (RL 45/30 BN).....	83
TABELA 4.7 -	Características dos aditivos.....	84
TABELA 4.8 -	Proporcionamento das misturas para o traço 1:4,0.....	85
TABELA 4.9 -	Proporcionamento das misturas para o traço 1:3,7.....	86
TABELA 5.1 -	Resultados do ensaio de tenacidade em corpos prismáticos.....	101

TABELA 5.2 -	Guia de como e em qual nível de desempenho deverá ser especificado os vários tipos de fibra.....	105
TABELA 5.3 -	Classificação dos concretos reforçados com fibras de acordo com a EFNARC e a ASTM C1116.....	105
TABELA 5.4 -	Equações e coeficientes de correlação obtidos entre os índices de tenacidade (ASTM C1018) e o aumento do volume de fibras.....	110
TABELA 5.5 -	Equações e coeficientes de correlação obtidos entre as relações de tenacidade ou fator de resistência residual (ASTM C1018) e o aumento do volume de fibras.....	110
TABELA 5.6 -	Equações e coeficientes de correlação, obtidos entre os fatores de tenacidade (JSCE-SF4) e o aumento do volume de fibras.....	112
TABELA 5.7 -	Resultados dos testes do ensaio de flexão em placas quadradas.....	119
TABELA 5.8 -	Classificação dos concretos, através da energia absorvida até a deflexão de 25mm, segundo EFNARC.	120
TABELA 5.9 -	Resultados dos testes do ensaio de flexão em placas triangulares.....	130
TABELA 5.10 -	Coefficientes de variação total para três níveis de deflexão.....	135
TABELA 5.11 -	Equações e coeficientes de correlação obtidos entre os níveis de energia encontrado no ensaio de flexão em placas.....	137

RESUMO

ALMEIDA, Marconi Oliveira. **Estudo da Tenacidade e Proposta de Nova Configuração do Ensaio de flexão em Placas para os Concretos Reforçados com Fibras de Aço**. Florianópolis, 1999. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina.

Nas últimas três décadas, a quantidade de pesquisas realizadas com os materiais cimentícios reforçados com fibras, tais como concretos, argamassas e pastas, mostra o grande interesse de toda comunidade científica em aperfeiçoar e conhecer cada vez mais os compósitos. É fato que os concretos reforçados com fibras possuem vantagens sobre os *concretos convencionais em certas propriedades tais como a resistência à fadiga, tração, impacto, flexão e controle da retração*. Entretanto, a principal característica dos compósitos está no aumento da tenacidade, ou seja, a capacidade de absorver energia sem o colapso eminente e desavisado.

Apesar da vantagem atribuída à tenacidade deste tipo de material, não existe ainda um consenso no meio científico, de qual a melhor maneira de se avaliar e quantificar esta propriedade, mesmo com a quantidade considerável de normas e testes existentes.

Visando conhecer as características dos concretos reforçados com fibras e contribuir para o desenvolvimento do tema, este trabalho teve como objetivo criar uma nova configuração de ensaio da propriedade tenacidade, além de observar o comportamento dos compósitos utilizando dois tipos de fibra com três teores diferentes, em duas matrizes de resistências distintas, utilizando as normas japonesas (JSCE-SF4), norte americana (ASTM-C1018) e a européia (EFNARC).

Os resultados indicaram que a trabalhabilidade dos concretos fica consideravelmente afetada, havendo perda de abatimento com o uso das fibras. Essa perda de abatimento foi maior para quando se utilizou teores de fibras mais elevados. Na resistência à compressão não houve diferença significativa devido ao uso das fibras.

O ensaio de flexão em vigas mostrou que, quanto maior o teor de fibra utilizado, mais elevadas foram a resistência à tração e a tenacidade dos concretos. Para este ensaio, as formas mais usuais de avaliar-se tenacidade, foram capazes de mostrar a superioridade das fibras de aço colada em relação às soltas. Os resultados mostraram que, em alguns casos, os índices de tenacidade não são capazes de distinguir o ganho de tenacidade, bem como estão sujeitos à subjetividade do pesquisador.

No ensaio de tenacidade em placas quadradas, constatou-se também o aumento da tenacidade de acordo com o teor de fibra, além do melhor desempenho das fibras coladas. O novo ensaio de tenacidade, chamado de flexão em placas triangulares, foi realizado com sucesso e mostrou com eficiência o aumento da tenacidade variando-se o teor de fibra empregado, a eliminação das deformações nos apoios e na cravação do dispositivo aplicador de carga, além de outras vantagens.

ABSTRACT

ALMEIDA, Marconi Oliveira. **Study of The Toughness and Proposal of a New Configuration of the Flexural Plate Test in Steel Fiber Reinforced Concretes.** Florianópolis, 1999. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina.

In the last three decades the amount of researches accomplished with fiber reinforced cementitious materials, like concretes, mortars and pastes, shows the great interest of the whole scientific community to improve and get to know more about composites. It is a fact that concretes reinforced with fibers have advantages in relation to the conventional concretes in some properties like fatigue, tensile and flexural strength, impact loading resistance and shrinkage control. However, the principal characteristic of the composites is the increase of toughness, in other words, the capacity of absorbance of energy without a eminent and imprudent collapse.

In spite of the advantage attributed to toughness of this kind of material, there is not a consensus in the scientific community as yet, as to how is the best way to test and compute this property, even with all the standards and tests that exist.

With the purpose of knowing more about the characteristics of fibers reinforced composites and contribute to the improvement of this subject, the aim of this research was developing a new test configuration for estimate the toughness property, and observing the behaviour of the composites using two types of fibers with three different contents, in two matrices with different resistances, according to Japanese (JSCE-SF4), North American (ASTM-C1018) and European (EFNARC) standards.

The results showed that workability of these concretes is considerably affected, as the amount of fiber increase. The loss of fluidity was higher when higher fiber contents were used. In the compression strength there was not significant difference due to the use of fibers.

The flexural test in beams showed that as the amount of fiber increase, the tensile strength and toughness of the fiber reinforced concretes increase. For this test, the ways usually used to test toughness, were capable of showing the superiority of steel glued fibers in relation to loose steel fibers. The results showed that in some cases, the toughness indexes are not able to show the improvement on toughness and also were dependent to the subjectivity of the researcher.

The square plate toughness test, also registered the increase in toughness according to the amount of fiber, and the better performance of the glue fibers. The new toughness test called triangular plate flexural test, was performed with success and showed with efficiency the increase in toughness using different amounts of fiber, the elimination of the deformation of the supports and the deformation of the setting of the load device applier, and other advantages.

1)INTRODUÇÃO

Os materiais mais usados na área da Construção Civil são aqueles à base de cimento, tais como, argamassas, pastas e concretos, devido à grande capacidade de serem moldados em diversas formas, além de proporcionarem uma durabilidade apreciável. Entretanto, esses materiais são frágeis, além de sofrerem fissurações, pelo fenômeno da retração entre outros, causando degradações que diminuem a capacidade de uso. Por essas fissurações existentes, tais materiais possuem baixa resistência à tração e pequena capacidade de deformar antes de entrar em colapso.

Para suprir ou minimizar essas deficiências, surgiram os materiais reforçados com fibras denominados de compósitos armados com fibras, que possuem uma maior resistência à tração, ao impacto, à fadiga, à abrasão, são mais tenazes e dúcteis. Além disso, a presença das fibras inibe a propagação das fissuras através da matriz. A função das fibras é alterar o comportamento dos concretos reforçados com fibras pois, uma vez fissurada a matriz, essas funcionam como ponte de transferência de tensão promovendo ductilidade pós-fissuração (MINDESS, 1991).

Apesar da moderna tecnologia dos compósitos armados com fibras ter apenas duas décadas, a idéia de diminuir a fragilidade dos materiais que possuem essas características é bem antiga. Segundo a história, de acordo com o Êxodos 5:6, os egípcios usavam a palha para reforçar tijolos de barro. Há evidências de que as fibras de asbesto (amianto) foram usadas para reforçar postes de argila há cerca de 5000 anos (METHA E MONTEIRO, 1994).

O uso de palha para reforçar tijolos de barro, de crina de cavalo ou sisal para armar estuque, são conhecidos desde a antiguidade. Na Finlândia, o amianto era utilizado desde 2500 A.C. para enrijecer material cerâmico para fabricação de utensílios de cozinha (TEZUKA, 1989). Um exemplo prático da natureza é o João de barro, um pequeno pássaro, que constrói os seus ninhos no alto das árvores utilizando somente barro reforçado com palha.

O primeiro moderno e sofisticado exemplo de materiais reforçados com fibras de produção em massa e com um nível apreciável de qualidade, é a fabricação do cimento amianto pelo processo Hatschek por volta de 1900 (JOHNSTON, 1992; MINDESS, 1991).

Na observação de patentes arquivadas, estas revelam que sistemas de cimento contendo fibras de aço foram introduzidas somente neste século. Várias patentes pertinentes aos concretos reforçados com fibras de aço foram outorgadas entre 1920 e 1935 (RAMACHANDRAN, FELDMAN E BEAUDOIN, 1981).

Segundo MARIKUNTE E SHAH 1994, recentemente, com a variação nas técnicas de processamento, tem sido possível incorporar até 15% de fibra por volume, nos materiais cimentícios, a um preço extremamente elevado. Assim, o comportamento mecânico do compósito é fundamentalmente diferente do comportamento da matriz, se aproximando das estruturas em aço que possuem uma maior ductilidade.

Existe uma grande variedade de fibras para o uso em matriz de cimento: fibras de silicatos cristalinos como o amianto; de vidro; de metal como aço carbono e aço inox; de carbono; vegetal como o sisal, cânhamo, juta, coco; de polímeros, como polipropileno, polietileno, poliéster, aramide, nylon e etc. A escolha da fibra é função das características que se deseja do compósito.

As fibras como a de polipropileno ou de polietileno, que tem módulo de elasticidade menor e alongamento maior do que a matriz de cimento, fornecem compósitos com capacidade de absorver grandes energias e, portanto, maior resistência ao impacto e tenacidade quando comparados com os concretos sem fibras.

Por outro lado, fibras de módulo de elasticidade elevado e grande resistência, tais como as fibras de aço, vidro e carbono, produzem compósitos, principalmente, de elevada resistência à tração, rigidez e absorção de cargas dinâmicas, além de uma elevada tenacidade (TEZUKA, 1989).

As fibras de vidro resistentes aos álcalis para evitar uma rápida deterioração no concreto, o CEM-FIL desenvolvido em 1967 na Inglaterra, estão sendo produzidas comercialmente no Reino Unido, Estados Unidos e Japão. As fibras naturais orgânicas são usadas nos países em desenvolvimento na produção de placas. Entretanto, a

durabilidade dos compósitos feitos com estas fibras, tem sido identificada como sendo um problema com o passar do tempo.

O aumento do desempenho dos concretos reforçados com fibras sobre os concretos convencionais, é baseado no fato de haver um aumento da capacidade de absorção de energia, ou seja, uma maior tenacidade, sendo esta propriedade o carro chefe dos concretos com fibras. A energia absorvida durante a ruptura do compósito é considerada como um resultado de vários eventos de ruptura induzidos pela deformação, começo da fissuração e propagação (GLINICKI, 1994). Enquanto a matriz convencional sofre uma ruptura brusca, ocasionada pelas tensões de fissuração, as fibras dúcteis, quando adicionadas ao concreto, conferem uma capacidade de suportar estas tensões mesmo após a matriz estar fissurada, o que ajuda a manter a integridade estrutural, além de uma maior coesão do material.

CÁNOVAS (1997) explica que, se observarmos a curva de carga x deflexão dos concretos convencionais, veremos que esta é aproximadamente linear até uma tensão igual ou ligeiramente superior a de primeira fissura, para posteriormente a curva descer bruscamente, quase na vertical, devido à falta de capacidade de resistência do concreto fissurado. Contudo, se o concreto está reforçado com fibras, observa-se que, passada a tensão de primeira fissura, a curva se move com maior ou menor declive, ou talvez de forma ascendente até um ponto máximo chamado de módulo de ruptura.

Além de um aumento da capacidade de absorção de energia, que ocorre nos compósitos, muitas propriedades desse material são melhoradas. Essas propriedades não estão ligadas somente ao carregamento estático, mas em outras propriedades tais como resistência ao impacto, fadiga e resistência ao ciclo térmico, podemos também observar os benefícios alcançados (MORGAN, MINDESS E CHEN, 1995; TEZUKA, 1989; BANTHIA E TROTTIER, 1995a).

Através de todos ganhos e melhoras observadas nos concretos reforçados com fibras, as pesquisas conduzidas neste material são cada vez mais frequentes. Em 1995, o total de pesquisas publicadas relacionadas com materiais à base de cimento reforçado com fibras, foi de aproximadamente 8000 (TROTTIER, MORGAN E FORGERON, 1997). Apesar desse número, é surpreendente observar que muitas indústrias de concreto ainda não usam estes compósitos e o consideram como material de pesquisa e não uma

tecnologia comprovada. Muitos pesquisadores atribuem isto à falta de uma adequada transferência de tecnologia para as indústrias da construção, enquanto outros colocam a culpa no fato de que muitas pesquisas são de caráter teórico e muito pouco voltadas para o campo prático.

Os trabalhos utilizando os concretos com fibras, já são consagrados e amplamente executados em vários países. Como um dos inúmeros exemplos, podemos citar o uso altamente favorável, das fibras para o revestimento externo de uma barragem em Denver (USA), onde haviam problemas de infiltração que foram solucionados com o uso do compósito, onde mesmo após 10 anos, a mesma se encontrava em plenas condições, se não fossem problemas nas juntas devido aos invernos rigorosos, que causaram problemas no material selante (MASS, 1997).

Outro desempenho das fibras pode ser visto, em obras marinhas sujeitas a ventos e carregamentos provocados pelas ondas, onde 1% em volume de fibra de aço é suficiente para proporcionar um ganho de 60 a 90% da resistência última, o que conseqüentemente proporciona um aumento da tenacidade (JUN E STANG, 1998).

No Brasil, apesar do uso ter começado de modo incipiente apenas nos anos 80, prevê-se um aumento considerável para esta década atual, já que várias empresas começam a adotar esta tecnologia em sistemas construtivos. Nos anos de 1994 e 1995 houve uma grande ampliação e construção de fábricas industriais, de bebidas, etc., utilizando-se os pavimentos ou pisos de concreto (SILVA, MENTONE E PITTA, 1996). Assim sendo, para REGATTIERI, SILVA, HELENE, AGOPYAN E ABREU (1996), é indispensável um estudo mais aprofundado dos materiais fibrosos, com o objetivo de contribuir para o seu desenvolvimento e consolidar a sua aplicação.

JÚNIOR E MORAES (1996), citam algumas das inúmeras aplicações dos concretos reforçados com fibra no Brasil:

✓ Pisos Industriais:

BRAHMA- Campo Grande RJ,

TECA Galeão- Rio de Janeiro RJ,

G. M.- Sorocaba SP,

B. M. B.- Itaúna MG;

- ✓ Concreto Projetado:
 - Túnel da Hidroelétrica Guilma-Amorin;
- ✓ Estabilização de Taludes:
 - Encosta de barramentos da hidroelétrica de Guilma-Amorin;
- ✓ Elementos Pré-fabricados:
 - Projeto Sarah Kubitchek.

Além desses, ALBUQUERQUE, FILHO E BARRETO (1996), falam sobre a utilização de concreto reforçado com fibra de poliéster para a confecção de pré-fabricados, que foram utilizados para a construção dos degraus da arquibancada do Autódromo Internacional Nelson Piquet.

Claro que, corretamente utilizadas, as fibras podem promover melhoras consideráveis no comportamento do concreto. É estimado por MINDESS já em 1995, que cerca de 5% ou mais de todo concreto utilizado na América do Norte contem fibras. Apesar de tudo, é importante observar-se que, mesmo com todos os incrementos do compósito junto à matriz frágil, o concreto reforçado com fibra não é a panacéia de todos os problemas e deve ser utilizado de forma correta.

Como os concretos e cimentos reforçados com fibras tornaram-se amplamente utilizados entre 1970 e 1980, várias organizações se preocuparam com as especificações e testes destes concretos, atentando-se para o desenvolvimento de normas e guias, com o intuito de especificar e testar este material para o reconhecimento e demonstração da capacidade dos vários tipos de fibras (JOHNSTON, 1991).

A fim de se poder quantificar os benefícios da adição das fibras, uma variedade de diferentes sistemas de medição de tenacidade e ensaios vêm sendo desenvolvidos em vários países. A tenacidade pode ser caracterizada em termos de tenacidade na tração, tenacidade na compressão e tenacidade na flexão. Muitos esforços de padronização vêm, contudo, sendo baseados no teste de tenacidade na flexão usando vigas carregadas em quatro pontos (MORGAN, MINDESS E CHEN, 1995).

Entretanto, para essas normas, MORGAN (1995) observa que, dificuldades têm sido experimentadas no sentido de obter uma constância de resultados entre diferentes laboratórios, usando diferentes maquinários para a aplicação de cargas, e diferentes

equipamentos para medição da deflexão. Também, segundo FIGUEIREDO (1997), pesquisadores acham importante a intenção de vincular o desempenho pós-fissuração com a matriz, que sofre uma grande instabilidade para baixos volumes de fibras, além da necessidade de comparar os seus resultados com os índices obtidos pela ASTM C1018 (americana) e JSCE-SF4 (japonesa).

Outro ensaio utilizado nos concretos reforçados com fibras, é o ensaio de tenacidade em placa quadrada, o qual a recomendação Européia, EFNARC (1996), sugere para a medição da capacidade de energia absorvida para os concretos projetados. Entretanto, neste ensaio, os corpos de prova estão sujeitos a sofrerem empenamentos, devido ao processo de confecção. Isso, por sua vez, proporciona uma fissuração diferenciada para cada exemplar testado, durante a realização do ensaio, alterando os resultados de tenacidade.

Devido a estes problemas, é proposto neste trabalho um estudo do comportamento dos concretos reforçados com fibras, no ensaio de flexão em vigas e de tenacidade em placa, a fim de se tentar estabelecer uma correlação entre as formas mais usuais de medição da tenacidade utilizadas pelo meio científico. É também objetivo, propor uma nova configuração de ensaio de tenacidade em placas de formato triangular, para que se possa ter um resultado mais confiável e preciso, diminuindo a variabilidade dos resultados.

São objetivos específicos deste trabalho:

- 1º) Avaliar os concretos reforçados com relação ao tipo de fibra e a resistência da matriz,
- 2º) Executar ensaios de tenacidade em vigas sujeitas a carregamento em quatro cutelos e analisar os resultados sob a ótica das normas mais utilizadas;
- 3º) Executar ensaios de tenacidade em placa quadrada, e avaliar os resultados segundo a EFNARC (1996);
- 4º) Elaborar e executar o ensaio de tenacidade em placa triangular interpretando os resultados segundo critério da EFNARC (1996), além de verificar a sua variabilidade;
- 5º) Tentar estabelecer uma correlação entre os ensaios de tenacidade em placas triangular e quadrada;

- 6º) Análise comparativa da resistência a compressão, para os concretos com e sem a adição das fibras de aço, para a verificação da perda ou ganho nesta propriedade;
- 7º) Observar as características do concreto fresco reforçado com fibra, em relação à trabalhabilidade.

Com isso, é também objetivo difundir a utilização e a pesquisa dos concretos reforçados com fibras, que se encontram limitados, em sua grande maioria, ao uso em concreto projetado e em pisos industriais. Suas características particulares, proporcionam um material de menor fissuração e maior tenacidade, fazendo com que este possa e deva ser aplicado em todas as formas de construção onde essas características são necessárias.

Para alcançar os objetivos estabelecidos, esta dissertação está dividida em sete (7) capítulos, onde no segundo (2) são abordados tópicos com relação às fibras, suas propriedades, seu comportamento junto à matriz e características gerais. No terceiro (3) capítulo, é feito um levantamento sobre o estado da arte sobre a tenacidade e sobre os ensaios, mostrando os pontos fracos e fortes dos métodos mais utilizados. No quarto (4), é apresentada a metodologia para execução e ensaio dos corpos de prova, sendo no quinto (5) capítulo, apresentado os resultados obtidos nos testes juntamente com as análises sobre todos os valores obtidos. No sexto (6) capítulo, consta as considerações finais e sugestões para novos trabalhos. Em fim, no sétimo (7) e último capítulo é apresentada a lista bibliográfica utilizada do decorrer deste estudo.

2) CONCRETO COM FIBRAS

2.1) CONCEITO E TIPOS DE FIBRAS

O concreto contendo um cimento hidráulico, água, agregados graúdos e miúdos e fibras discretas descontínuas é chamado de concreto reforçado com fibras. O mesmo pode conter pozolanas ou outro tipo de adições utilizadas nos concretos convencionais (METHA E MONTEIRO, 1994; ACI 544.3R, 1993).

J. J. ZONVELD *apud* DANTAS, F. A. (1987), ao se referir aos concretos que contêm fibras de baixo módulo de elasticidade, os chama de concretos com fibras, deixando a denominação de concretos reforçados com fibras para quando estas possuírem alto módulo de elasticidade. Vários tipos de fibras, com formas e tamanhos diferenciados, produzidas em aço, polímeros, vidro e materiais naturais, têm sido usados largamente, sendo as de aço, solicitadas com maior frequência.

Como explicado no 1º capítulo existem diversas formas de fibra que partiram da necessidade de se aumentar a funcionabilidade, bem como incrementar de forma significativa a adesão entre a fibra e a matriz que, assim como na interface agregado graúdo x matriz, possui um zona interfacial mais porosa e com produtos de hidratação menos resistentes, indicando um plano de fraqueza.

Além da resistência e tenacidade, que são aumentadas pela utilização das fibras com uma boa aderência, uma terceira característica, não menos importante, seria a modificação do desenvolvimento das fissuras, através de um controle eficiente nos compósitos. As fibras têm a capacidade de inibir a propagação de fissuras, o que subsequentemente aumenta a energia absorvida. Isto pode ser observado em pisos e pavimentos, onde os concretos com fibras possuem um amplo uso pelo fato de permitirem uma redução do número de juntas e das espessuras das peças, levando a um melhor desempenho (CHENKUI E GUOFAN, 1995). Além disso, inibem o aparecimento de fissuras radiais ao redor dos pilares ou de peças vazadas, comuns em

pavimentos de concreto simples, (CARNEIRO *et. al.*, 1997). As fibras ainda possuem a característica de controlar a retração plástica, como é o caso das fibras de polipropileno em baixos teores, o que não permite um aumento da resistência, mas um ganho considerável em tenacidade e ductilidade (ALHOZAIMY, SOROUSHAN E MIRZA, 1996).

Existe uma contradição a respeito da geometria da fibra para alcançar a eficiência máxima no concreto endurecido, e uma boa trabalhabilidade no concreto fresco. Fibras longas de diâmetro pequeno, proporcionam um maior reforço do concreto endurecido pelo aumento na resistência de arrancamento, porém, são prejudiciais para a trabalhabilidade do concreto fresco.

Para resolver tais problemas três soluções estão disponíveis:

- ✓ Modificação da fibra alterando a sua forma e aumentando a aderência com a matriz;
- ✓ Modificação das propriedades reológicas da matriz;
- ✓ Utilização de técnicas especiais, como jateamento (projeção das fibras) ou processo tipo pasta, baseado na desumificação da pasta, como o processo HATSCHECK na indústria de cimento amianto.

AVESTON *et al apud* BENTUR (1989) propôs um modelo de comportamento do compósito, quando submetido à tração, também conhecido como modelo ACK, composto de três fases, como na figura 2.1:

- a) Região não fissurada
- b) Estágio de multifissuração
- c) Pós multifissuração

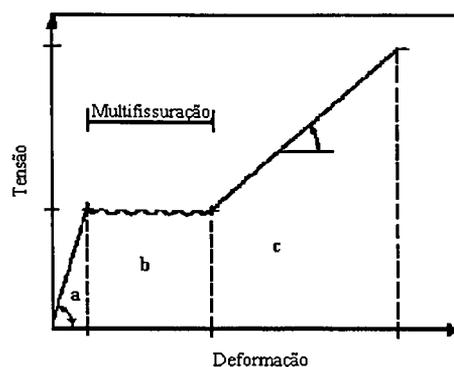


Fig.2.1.: Curva tensão x deformação na tração de uma matriz frágil de compósito reforçado com fibra (BENTUR, 1989).

No estágio de multifissuração, a matriz estaria fissurada em blocos aproximadamente perfeitos e no estágio seguinte, as fibras passariam a suportar esse carregamento. Assim, seria assumido que a fibra sofreria ruptura preferencialmente, antes de haver o descolamento.

O comportamento acima descrito (figura 2.1), pode ser observado no trabalho de BEAUDOIN, GU E LIN (1996), onde no ensaio de flexão em viga utilizando 9% de micro fibra de argonite, é mostrada uma curva de carga x deflexão, no qual estas três regiões podem ser observadas com extrema clareza.

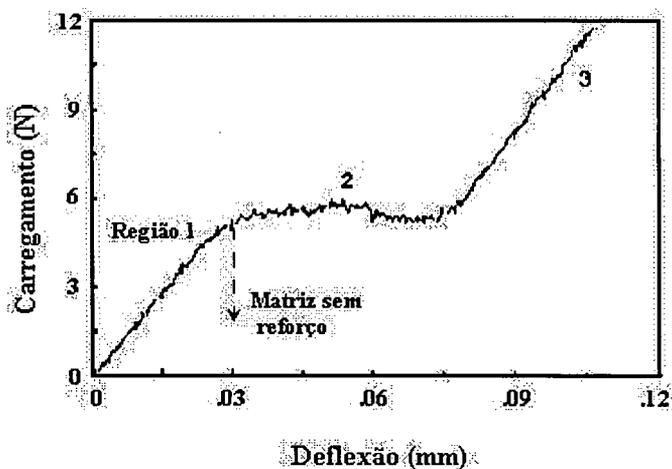


Fig. 2.2.: Curva típica carga x deflexão para concreto com sílica ativa reforçado com micro-fibras de argonite (9% de fibra em volume) e da matriz sem reforço (BEAUDOIN, GU E LIN, 1996).

Existe uma grande variedade de fibras para o uso em matriz de concreto. Dentre elas existem as fibras de aço que são encontradas no mercado e podem ser produzidas de acordo com quatro métodos, segundo DANIELLETO (1993):

- ✓ Cut-wire- As fibras produzidas por este método, tem seção transversal circular e varia de comprimento;
- ✓ Sheared-fibre- Produz as fibras de aço a partir de uma fina placa de metal e tem seção transversal próxima à forma retangular;

- ✓ Melt-extracted- Como sugere o próprio nome, é produzida diretamente do aço derretido. Estas fibras são atiradas para fora devido à força centrífuga de um disco gigante parcialmente imerso no material derretido;
- ✓ Milled-cut- A fibra é extraída de uma lâmina de aço, sem lubrificante ou qualquer produto para reduzir a temperatura.

As fibras de polipropileno possuem ótima resistência ao meio alcalino dos concretos. Entretanto, quando expostas aos raios ultravioletas sofrem deterioração. As fibras de poliéster, assim como as de vidro, possuem problemas de deterioração em meio alcalino e as fibras de poliéster vêm sendo utilizadas como substitutas para as fibras de amianto, consideradas prejudiciais à saúde.

As fibras de módulo de elasticidade elevado e grande resistência, tais como as fibras de aço, vidro e carbono, produzem compósitos de elevada resistência à tração, rigidez e absorção de cargas dinâmicas (TEZUKA, 1989).

Nas tabelas 2.1 e 2.2 são apresentadas algumas propriedades de matrizes de cimento e propriedades de fibras, respectivamente:

Tabela 2.1: Algumas das propriedades da matriz de cimento portland comum (TESUKA, 1989).

Matriz	Massa específica (kg/m ³)	Módulo Young (KN/mm ²)	Resistência à tração (N/mm ²)	Alongamento Ruptura (%)
Pasta	2000 a 2200	10 a 30	3 a 8	0,01 a 0,05
Argamassa	2200 a 2300	25 a 35	2 a 4	0,005 a 0,015
Concreto	2300 a 2450	30 a 40	1 a 4	0,005 a 0,015

Tabela 2.2 - Propriedades de algumas fibras

Tipo de fibra	Diâmetro (µm)	Massa específica (Kg/m ³)	Coefficiente Poisson	Resistência à tração (N/mm ²)	Módulo de Young (kN/mm ²)	Alongamento ruptura (%)	Teores típicos volume (%)	Resistência ao álcalis
Amianto (crisotila)	0,20 a 20,0	2550	0,3	3500	168	2,0 a 3,0	10,0	boa
Aço	5,0 a 500,0	7840	0,28 a 0,33	1000 a 3000	196 a 210	3,0 a 4,0	5,0 a 2,0	boa
Vidro <i>E</i>	9,0 a 15,0	2550	0,22 a 0,25	2100 a 3500	77	2,0 a 3,5	1,0 a 8,0	pobre
Vidro <i>CEM-FIL</i>	10,0 a 20,0	2700	0,22	2000 a 2800	70 a 84	2,0 a 3,0	1,0 a 8,0	razoável
Carbono	8,0	1900	0,2 a 0,4	2450 a 3150	230 a 315	1,0	2,0 a 12,0	boa
KEVLAR PRD 49 (*)	10,0	1450	0,32	2900	130 a 140	2,0	< 2	boa
Polipropileno fibrilado	4,0 a 30,0	910	0,29 a 0,46	300 a 400	6,0 a 8,0	8,0	0,2 a 2,0	boa
Coco	100,0 a 400,0	-	-	120 a 200	19 a 26	10,0 a 25,0	1,0 a 5,0	pobre
Sisal	7,0 a 47,0	-	-	280 a 568	13 a 26	3,0 a 5,0	1,0 a 5,0	pobre
Juta	20,0 a 100,0	-	-	250 a 350	26 a 32	1,5 a 2,0	1,0 a 5,0	pobre

(*) KEVLAR - poliamida aromática da Du Pont.

Fonte.: TESUKA, Y., 1989.

2.2) INTERAÇÃO FIBRA X MATRIZ

2.2.1) INTERFACE FIBRA X MATRIZ

Assim como no concreto convencional, segundo METHA E MONTEIRO (1994), é um material composto por três fases: pasta, agregados e zona de transição, que é uma região situada entre a pasta de cimento e o agregado. Os compósitos com fibras também possuem essa mesma zona ao redor das fibras, considerada mais porosa, onde também, é depositada uma maior quantidade de portlandita (hidróxido de cálcio), que é um produto de baixa resistência resultante da hidratação do cimento.

Portanto, essa seria uma região debilitada, onde as fissuras propagariam com maior facilidade. Nesta região, a aderência entre a fibra e a matriz fica comprometida proporcionando assim uma diminuição do trabalho pós-fissuração dos concretos reforçados com fibras.

A ligação e o comportamento de transferência de tensão, podem ser simulados pela modelo simplificado de arrancamento, como na figura 2.3.

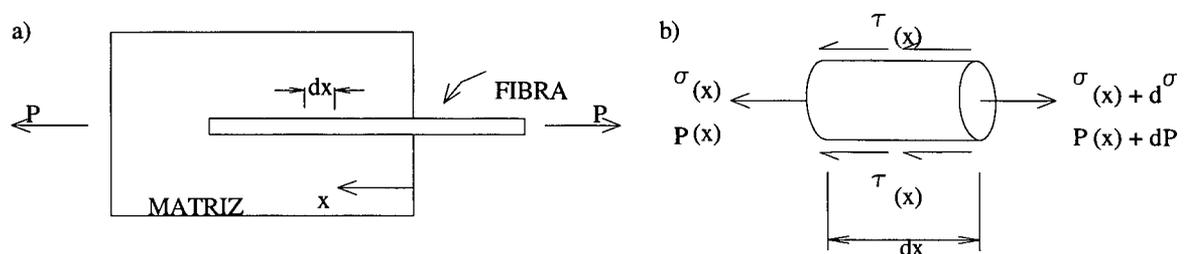


Fig. 2.3: (A) Modelo simplificado de arrancamento para simular ligação, arrancamento, e transferência de tensões no compósito reforçado com fibra; (B) balanço de forças ao longo da fibra (BENTUR, 1989).

O modelo proposto na figura 2.3, leva a uma distribuição de tensão na fibra e na interface representada na figura 2.4.

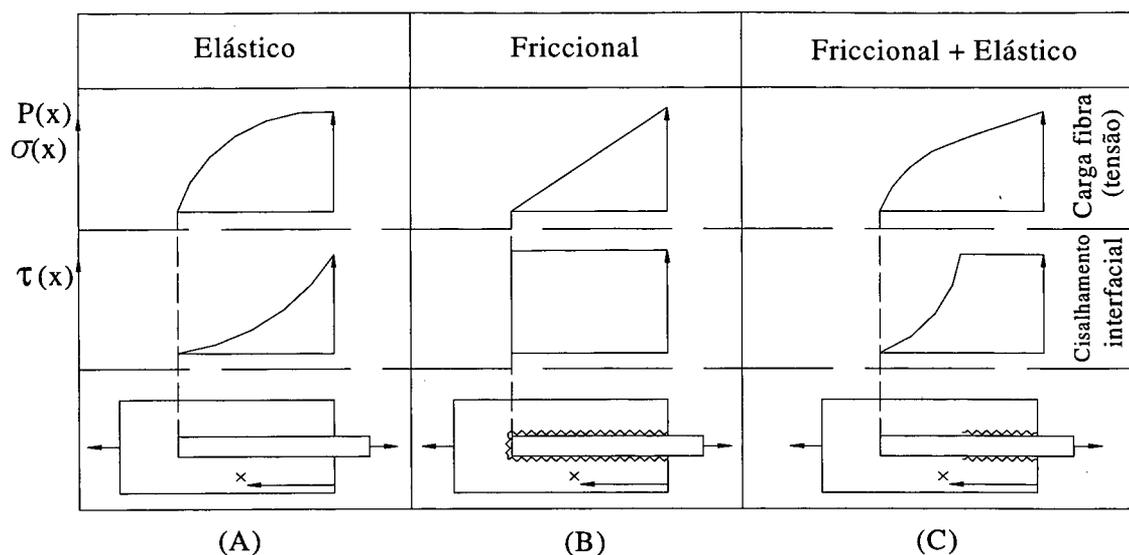


Fig.2.4.: Distribuição das tensões de cisalhamento na interface fibra/matriz e resistência à tração ao longo da fibra no ensaio de arrancamento: (a) transferência de tensão elástica, (b) transferência de tensão friccional, (c) transferência de tensões elástica e friccional combinadas (BENTUR, 1989).

A distribuição das tensões de cisalhamento interfacial, sugere que uma considerável concentração dessas tensões serão geradas no ponto de entrada da fibra na matriz. Na prática, a concentração de tensões pode originar o descolamento neste ponto, mesmo no estágio onde o carregamento P de arrancamento é relativamente pequeno (menor do que o carregamento necessário para a ruptura da fibra). Deste modo, duas alternativas deverão ser consideradas:

- ✓ Depois do descolamento nenhuma tensão de cisalhamento poderia ser suportada pela interface, e o resultado será um rompimento catastrófico, com o arrancamento em seguida, sendo a fibra extraída da matriz mantida a carga constante.
- ✓ Depois do descolamento, a resistência ao escorregamento poderia ser induzida por um mecanismo friccional, o qual proporcionaria uma resistência constante às tensões de cisalhamento friccional (σ_{fu}) ao longo da zona descolada. A ruptura não seria catastrófica, pois ocorreria um descolamento progressivo ao longo da fibra. Neste estágio progressivo, o cisalhamento friccional e o cisalhamento elástico ocorrerão simultaneamente, como mostrado na figura 2.4 (c). Quando o descolamento for completado ao longo de todo o comprimento da fibra, uma tensão

de cisalhamento friccional uniforme irá acontecer ao longo da fibra, mostrado na figura 2.4 (b) (BENTUR,1989).

A qualidade da interface nos compósitos cimentícios reforçados, é um parâmetro importante no controle de todo o desempenho do compósito (IGARASHI, BENTUR E MINDESS, 1996). Isto é claramente observável, por exemplo, nos compósitos com fibras vegetais. Neste caso, ocorre um problema na interface causado pela estrutura deste tipo de fibra que permite uma grande absorção de água e proporciona uma espessura excessiva da zona de transição, causando uma grande dispersão dos grãos de cimento formando uma estrutura mais porosa. Além disso, a variação dimensional da fibra, que ocorre a medida que a fibra vai perdendo a água absorvida no processo de mistura, é responsável pelo seu descolamento. Essa variação volumétrica das fibras ocorre durante o processo de hidratação do cimento e proporciona também, a deposição de portlandita (hidróxido de cálcio), permitindo uma aderência não muito favorável (figura2.5).

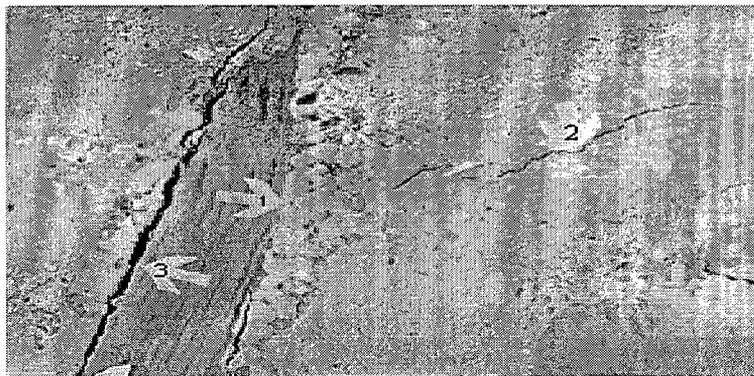


Fig.2.5: Compósito com fibras de coco, $a/c= 0,46$, 28 dias (200 μm). Zona de transição com espessura média de 30 μm . Seta 1: portlandita; seta 2: microfissura; seta 3: descolamento (SAVASTANO, DANTAS E AGOPYAN,1994).

Por isso se tornam necessários os estudos a fim de se aumentar a aderência entre a fibra e a matriz, para que seja proporcionada uma maior utilização das mesmas em conjunto com o concreto, melhorando assim o seu desempenho.

2.2.2) CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS

As fibras em uma matriz de cimento podem, em geral, ter dois importantes efeitos. Primeiro, elas tendem a reforçar o compósito sobre todos os modos de carregamento que causam tensões de tração, tais como, tração direta, flexão e cisalhamento e, em segundo lugar, elas aumentam a ductilidade e a tenacidade (JOHNSTON, 1992).

Geralmente o concreto que contém fibras, possui a característica de reduzida exudação quando comparado com o concreto convencional. Para o concreto endurecido, talvez as mais importantes propriedades conferidas pelas fibras, estariam diretamente relacionadas com o processo de fissuração. A melhora dessas propriedades, varia de acordo com cada tipo de fibra sendo que certas características físicas e geométricas também possuem um grande efeito na sua eficácia.

2.2.3) FATOR DE FORMA

O parâmetro numérico mais conveniente para descrever a geometria de uma fibra, é a relação entre o seu comprimento e o diâmetro da circunferência com área equivalente à seção transversal da fibra, denominada relação de aspecto ou fator de forma (ACI 544-4r.88, reprovado em 1994; ASTM A820, 1990).

Esta relação comprimento/diâmetro varia de 30 a 150, com comprimentos de fibras variando entre 10mm e 76mm (TESUKA, 1989). O efeito do fator de forma pode ser ilustrado, usando uma distribuição linear de tensões, mostrando que quando um compósito é carregado até a ruptura, esta pode ocorrer de duas formas:

Se a fibra é mais curta do que um certo comprimento crítico (l_c), a ruptura acontece por deslizamento devido a falta de um comprimento de ancoragem adequado ou por uma aderência ineficiente, pois a tensão na fibra (σ_1) é menor do que a resistência da fibra ($\sigma_{m\acute{a}x}$), sendo arrancada da matriz pela ruptura na interface de ligação. Sendo a fibra maior que o l_c , eventualmente, esta sofrerá ruptura por tração, devido ao fato da tensão na fibra ser igual a $\sigma_{m\acute{a}x}$ (BENTUR, 1989). O comprimento crítico pode ser definido como sendo o limiar entre a ruptura e o descolamento entre fibra e matriz, ou seja, é quando no teste de arrancamento a ruptura deixa de ser pelo arrancamento e passa a ser por ruptura da fibra (BALAGURU E SHAH, 1992).

Através da figura 2.6 podemos observar uma ilustração dos esforços aos quais as fibras estariam sujeitas após a fissuração da matriz, causando tensões de tração ao longo de todo comprimento da fibra.

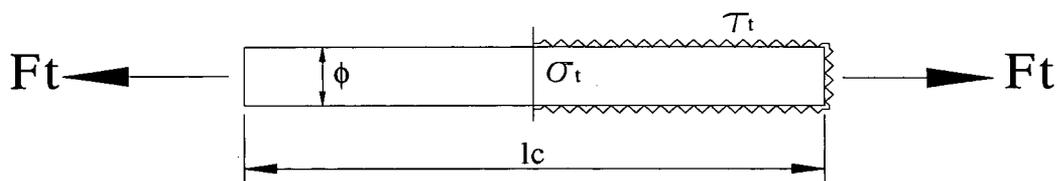


Fig. 2.6.: Simulação dos esforços ao qual as fibras estão sujeitas após a ruptura da matriz, nos compósitos reforçados com fibras.

Com os esforços apresentados na figura 2.6, pode-se determinar quais os parâmetros que irão influenciar na determinação do comprimento crítico da fibras:

$$F_t = F_s$$

$$\sigma_t * \pi \frac{\phi^2}{4} = \tau_t * \frac{l}{2} * \pi \phi$$

$$l_c = \frac{\sigma_t}{2 \tau_t} * \phi$$

onde:

F_t = força de tração,

F_s = força de aderência,

σ_t = tensão de tração,

τ_t = tensão de cisalhamento,

ϕ = diâmetro da fibra,

l_c = comprimento crítico

Como pode ser visto no modelo matemático, a tensão de tração da fibra, a resistência ao cisalhamento e o diâmetro da fibra são fundamentais para a determinação do melhor comprimento crítico a ser obtido para os vários tipos de concretos.

NUNES (1998), estudou o fator de forma para tipos geométricos diferenciados de fibras, avaliando o comportamento dessas no processo de pós-fissuração do compósito. Seus resultados mostraram que em quase todas as medidas de tenacidade estudadas, o fator de forma influi significativamente na tenacidade do compósito. Entretanto, concluiu que os

índices de tenacidade preconizados pela ASTM C1018, mostraram-se poucos sensíveis à variação do fator de forma não sendo adequados para avaliar a diferença de tenacidade.

Para fibras de mesmo tamanho, a tenacidade aumenta de acordo com o fator de forma. Isso entretanto, pode ser atribuído ao fato de haver uma maior quantidade de fibra na seção fissurada. Já para as fibras de mesmo diâmetro e comprimentos diferenciados, o aumento de tenacidade para as fibras mais compridas, pode estar ligado ao fato de haver uma maior ancoragem dessas com a matriz, aumentando assim o trabalho de arrancamento, que é de suma importância para o comportamento dos compósitos, mesmo havendo uma menor quantidade de fibras na seção fissurada.

Como descrito acima, a perfeita relação entre o comprimento e diâmetro das fibras é essencial para a melhor utilização das fibras junto com a matriz de concreto. Devido a isso, é importante se trabalhar com um fator de forma que possa fornecer o melhor desempenho possível dos compósitos reforçados com fibras de aço.

2.2.4) FORMA E TEXTURA DA SUPERFÍCIE

Obviamente, algumas técnicas para aumentar a resistência de cisalhamento interfacial, aumentando a tensão que se pode conseguir na fibra, melhoram a sua eficiência (JOHNSTON, 1992).

Algumas técnicas, incluindo processos físicos para produzir fibras com superfícies rugosas ou deformadas, extremidades alargadas ou em ganchos, ou em seções longitudinalmente encrespadas ou onduladas, vêm sendo utilizadas preferencialmente àquelas que produzem as fibras lisas. Estas não proporcionam uma boa aderência à matriz, o que contribui para diminuir a capacidade de desempenho do compósito.

Alguns tipos de fibras plásticas são produzidas em monofilamentos, multifilamentos ou fibriladas (em forma de rede). Por exemplo, monofilamentos plásticos lisos de polipropileno aderem de forma pobre à pasta. Já os tipos fibrilados com ramificações oferecem um aumento mecânico de ligação. Outro exemplo, são as fibras de vidro em feixes multifilamentados que permanecem unidos mesmo após a produção do

compósito. Como resultados esses feixes são flexíveis, proporcionando que os filamentos deslizem livremente uns pelos outros. Já na versão monofilamentada ou quando existe a deposição de produtos de hidratação entre os filamentos, há o aumento da aderência fibra/matriz, diminuindo a flexibilidade dos feixes através do aumento da rigidez, tornando o material mais frágil.

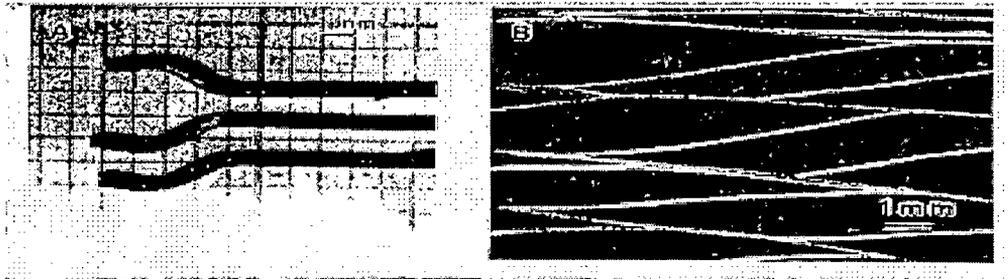


Fig. 2.7.: Fibras com geometria especial para aumentar a adesão com a matriz de cimento endurecida através de ancoragem mecânica: (a) fibras de aço com as extremidades em ganchos; (b) fibras de polipropileno fibriladas (BENTUR,1989).

Quando as fibras não possuem uma boa aderência, elas não deformam na proporção que deveriam, para aumentar as propriedades de ductilidade dos materiais frágeis.

2.2.5) REVESTIMENTO DE SUPERFÍCIE

Revestindo as fibras de diversas formas, pretende-se aumentar a adesão de ligação ou proteger o material original das fibras de danos ou má dispersão durante a mistura, além dos ataques químicos causados pelos constituintes do cimento hidratado, que podem dessa forma influenciar no desempenho das mesmas.

Um exemplo, é o tratamento da superfície das fibras de carbono com ozônio (O_3), para aumentar a resistência à tração devido a uma maior aderência dessas à matriz. O tratamento consiste em expor as fibras ao gás O_3 (0,3 vol. %, em ar) por 10 minutos a 160 C° , sendo anteriormente secas a 110 C° por 1 hora (XULI, F., WEIMING, L. E CHUNG, D., 1996). Também as fibras de aço muitas vezes são fornecidas em feixes unidos com uma cola solúvel em água, que permite uma melhor distribuição das mesmas na hora da mistura. As fibras de vidro, devido à sua baixa resistência ao meio

alcalino, sofrem um tratamento para suprir essa deficiência, produzindo as fibras AR (alkalis resistance) que são resistentes aos álcalis.

2.3) COMPATIBILIDADE DA FIBRA COM A MATRIZ

A compatibilidade física e química das fibras em ambientes alcalinos, são decorrentes das características da pasta de cimento, importantes para a tecnologia dos concretos reforçados com fibras. Através dessa compatibilidade é que serão definidas as áreas de uso, bem como as propriedades dos concretos que serão melhoradas, sem que haja uma perda nesse reforço com o passar do tempo, mantendo assim, a integridade da peça quanto ao uso ao qual foi solicitada.

No concreto fresco, fibras em grandes quantidades podem causar perdas excessivas de trabalhabilidade, assim como promover uma diminuição da água de exudação. No concreto endurecido, estas podem ser atacadas pela água ou pela alcalinidade presente na solução da pasta de cimento. Um exemplo desta degradação são as fibras vegetais como algodão, sisal e outras que, em ambientes úmidos, sofrem mineralização, assim como as fibras de vidro que deterioram em meio alcalino.

2.3.1) MÓDULO DE ELASTICIDADE

Pode-se assumir que tanto o concreto convencional como o concreto reforçado com fibras, comportam-se quase linearmente até a resistência de primeira fissura. Após isto, passam a ter comportamentos completamente diferentes.

Para o volume de fibras normalmente empregado, a influência dessas no limite elástico não é significativa. Uma idéia aproximada da influência das fibras na propriedade elástica pode ser dada usando-se a equação (modelo ACK proposto por AVESTON *et al* *apud* BENTUR 1989):

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m, \text{ onde:}$$

E_c , E_f , E_m = módulos de elasticidade do compósitos, fibra e matriz respectivamente,
 V_f = volume das fibras,

V_m = volume de fração matriz.

Essa equação entretanto, só é válida para compósitos com fibras contínuas, comportamento elástico de ambos os materiais e perfeita aderência entre as fibras e a matriz. Geralmente, o aumento do módulo de elasticidade é insignificante até a ruptura da matriz, pois muitas aplicações dos concretos reforçados com fibras utilizam um baixo volume de fibras.

2.3.2) TRABALHABILIDADE

A trabalhabilidade da mistura de concreto fresco é a medição para sua capacidade de mistura, manuseio, transporte e o mais importante, a colocação e consolidação com a perda mínima de homogeneidade e com a menor quantidade de ar aprisionado (ACI 544.2R-89).

É conhecido que a adição de qualquer tipo de fibra no concreto simples, reduz o abatimento. Independente do tipo de fibra, a perda dessa propriedade é proporcional à concentração volumétrica de fibras no concreto. Desde que estas conferem considerável estabilidade à massa de concreto fresco, o ensaio de abatimento (abatimento do tronco de cone test) não é um índice de trabalhabilidade perfeito. Como exemplo, a introdução de 1,5% em volume de fibras de aço ou de vidro, a um concreto com abatimento de 200mm, pode proporcionar uma redução de 25mm neste valor, mas o lançamento do concreto e sua compactação por vibração podem ainda ser satisfatórios (METHA E MONTEIRO, 1994). Além disso, BALAGURU e SHAH (1992) mencionam que este teste só é aconselhável para abatimento que excedam a 50mm. O ensaio vebe é considerado o mais adequado para avaliar a trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras. O tempo necessário para remoldar o concreto da forma tronco-cônica para a cilíndrica, até que o disco esteja em contato com o concreto, é a medida da consistência e este valor é anotado como sendo o índice de Vebe, em segundos (figura 2.8, A).

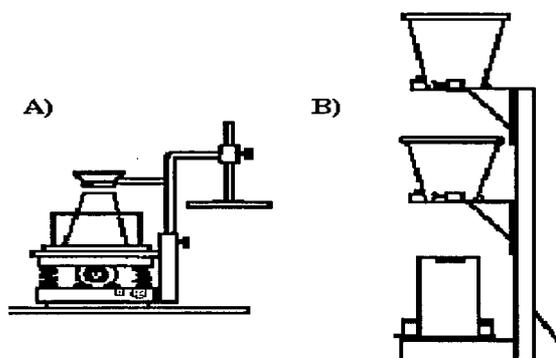


Fig. 2.8.: Equipamentos para a medida da consistência do concreto (a) aparelho VEBE; (b) aparelho para a medida do fator de compactação (METHA E MONTEIRO, 1994).

Além desses métodos, são mencionados outros dois, que são o teste do cone invertido, que se resume em inverter o cone do ensaio de abatimento e introduzir o vibrador, cronometrando o tempo necessário para haver o escoamento do material. É importante salientar que este teste não é aconselhado para um abatimento do tronco de cone acima de 100mm (BALAGURU e SHAH, 1992). Outro teste utilizado para a medição desta propriedade e que poderia ser utilizado para os compósitos, seria o ensaio de fator de compactação mostrado na letra B da figura 2.8.

Segundo o estudo realizado por CECCATO, NUNES E FIGUEIREDO (1997) na avaliação da trabalhabilidade através dos métodos mais conhecidos, Vebe, abatimento do tronco de cone e cone invertido, concluí-se que o abatimento do tronco de cone (slump) é eficiente para medida de consistência de concretos com teores de fibras inferiores a 80 kg/m^3 , sendo que, acima deste valor, o mesmo perde sensibilidade. O ensaio com o cone invertido apresentou sérias limitações quanto à consistência do concreto, sendo inadequado para concretos com baixa consistência e a compactabilidade medida pelo ensaio de Vebe foi praticamente insensível às mudanças de consistência.

2.3.3) RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DO CONCRETO

A resistência à compressão do concreto não é usualmente acrescida pela inclusão de fibras, sendo às vezes até prejudicial. Isto ocorre, devido à maior incorporação de vazios proporcionada pelas mesmas, como por exemplo quanto ao uso das fibras de

polipropileno. Por esta razão, esta propriedade dos compósitos não tem sido amplamente difundida. Quando um corpo de prova está sujeito à compressão, a sua ruptura se dá por elevadas tensões de cisalhamento e é conhecido que as fibras possuem a característica de melhorar a resistência ao cisalhamento dos compósitos. Entretanto, JOHNSTON (1991) afirma que neste tipo de ensaio, as fibras inibem as fissuras e estas são induzidas por alguma forma de carregamento de tração. Com isso, a resistência à compressão, obtidas em corpos cilíndricos, não é devidamente afetada pelas fibras.

Apesar disto, o compósito tem um comportamento particular e diferenciado no ensaio à compressão. Embora a resistência, em certos casos, possa ser menor que a da matriz sem adição, o comportamento do compósito é completamente diferente daquele apresentado pela matriz fissurada, sendo que esta diferença pode ser mais nítida após o material ter atingido a carga máxima. A peça, mesmo após a ruptura, permanece coesa sem o descolamento de pedaços.

ARMELIN (1992) apresenta em seu trabalho uma discussão sob a influência das fibras com relação a resistência à compressão, onde pode-se observar claramente a falta de um consenso entre vários pesquisadores mencionados. Alguns encontram ganhos significativos nesta propriedade, devido à adição de fibras e outros não. Os trabalhos que apresentam perda na propriedade, estão diretamente associados a problemas de compactação inadequada. Isso mostra que esta propriedade ainda merece um estudo mais aprofundado, a fim de mostrar a real influência das fibras na resistência à compressão.

2.3.4) RESISTÊNCIA AO IMPACTO

As peças de concreto mostram um aumento substancial nesta propriedade, quando há adição de fibras, pois diminuem a fragilidade proporcionando um aumento da tenacidade após o aparecimento da primeira fissura.

A alta resistência ao impacto dos compósitos, é devida à grande quantidade de energia absorvida, quando processa-se a eliminação da aderência, e o arrancamento das fibras, que ocorre após a matriz ter sido fissurada (DANTAS, F. A., 1987).

As medidas desta propriedade são de difícil realização, devido ao fato de que o comportamento das tensões de tração e flexão do material sob carregamento lento, não é diretamente válido no caso dinâmico.

Pesquisadores da University of British Columbia em Vancouver (WANG, MINDESS E KEITH KO, 1996), desenvolveram uma metodologia para a determinação, que consiste em um martelo de impacto de 60,3 kg, distante 1,50 m do corpo a ser ensaiado. Uma célula de carga é instalada na extremidade do martelo para gravar a carga do impacto. Um medidor é posicionado na parte central da peça e os sinais enviados por ambos o aparelhos, acelerômetro e célula de carga, sendo os dados coletados a cada 10 μ s usando um computador. O esquema deste aparelho é mostrado na figura 2.9.

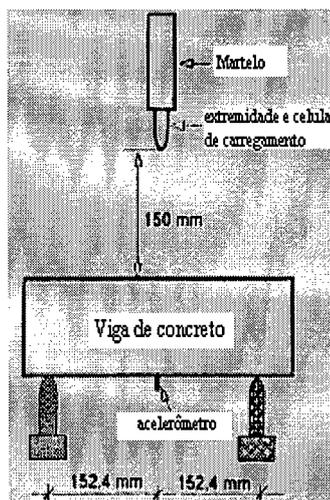


Fig. 2.9 .: Ensaio de resistência ao impacto (WANG, MINDESS E KEITH KO, 1996).

Em seus resultados pode-se observar que 0,5% de fibras de polipropileno trouxe um aumento modesto na energia de ruptura, enquanto os melhores desempenhos ficaram com as fibras de aço nas porcentagens variando entre 0,5 e 0,75%.

2.3.5) RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Os ensaios à tração são divididos de duas formas : ensaio de tração direta e indireta. O ensaio de tração direta tem sido aplicado em compósitos com fibras dispostas aleatoriamente na matriz com um determinado volume. Para este ensaio, a definição da melhor forma do corpo de prova é de suma importância, pois as garras que são posicionadas nas extremidades devem proporcionar o mínimo de tensão localizada, para

evitar uma ruptura nestes pontos. Sendo assim, uma das formas utilizada com frequência, é o corpo de prova em forma de osso, devido a sua semelhança com o mesmo, que permite uma melhor fixação das garras.

Já o ensaio de tração indireta, é realizado com o método de corpos prismático (vigas) à flexão, o qual é bastante utilizado não só como medida indireta de resistência á tração, como da ductilidade dos materiais fibrosos (SAVASTANO JR *et. al.* 1994). Além desse ensaio, são também utilizados os ensaios de tração por fendilhamento, cuja a análise é feita sobre a evolução de uma fratura pré-induzida, que pode ser realizado com as fibras dispostas aleatoriamente ou alinhadas.

As fibras que possuem módulo de elasticidade baixo, não proporcionam uma contribuição significativa na resistência a tração dos concretos reforçados, sendo em alguns casos, deletérios na resistência à tração. Por outro lado, fibras de aço, carbono e de vidro, que possuem um alto módulo, quando adicionadas no concreto, em quantidades adequadas (acima do volume crítico), promovem um aumento substancial desta propriedade.

Segundo SAVASTANO JR. *et. al* (1994), apesar de não haver um aumento interessante nos ensaios à tração direta utilizando-se fibras de polipropileno, as mesmas trazem resultados interessantes nos ensaios de tração por fendilhamento com fibras dispersas aleatoriamente e alinhadas. Para as fibras distribuídas aleatoriamente, as de polipropileno obtiveram um comportamento satisfatório com relação às fibras de amianto, coco, juta e sisal.

É observado para as fibras de carbono, após terem sofrido um tratamento superficial com ozônio, um aumento na resistência à tração de 38% segundo os resultados apresentados por XULI, WEIMING E CHUNG (1996).

A ductilidade proporcionada pelas fibras de baixo módulo é evidente, e está associada à extensão da zona de multifissuração. Para fibras de módulos elevados, esta zona de multifissuração é reduzida, tornando os compósitos aparentemente mais frágeis, mas com uma resistência à tração apreciável.

SHAH (1991) mostra em seu estudo que quando uma matriz à base de cimento é reforçada com teores menores que 1% em volume (abaixo do volume crítico), as fibras quase não influem na resistência à tração da matriz e somente após a matriz estando fissurada, é que as fibras contribuem unindo as fissuras. Quando os teores são de 2%, as fibras proporcionam um aumento significativo da resistência, além de influenciarem na capacidade de deformação da matriz.

Em concretos reforçados com pequenos volumes de macro fibras, estas se encontram distantes umas das outras, evitando o processo de formação de micro fissuras. Assim sendo, a matriz entre as poucas fibras presentes, apresenta-se necessariamente sem reforço, onde a nucleação e propagação das finas micro fissuras são inevitáveis (MINDESS E BANTHIA, 1994). Com isso observa-se que os reais ganhos nesta propriedade estão relacionados com os altos teores de fibra.

2.3.6) COEFICIENTE DE POISSON

Os comportamentos das fibras na matriz modificam-se para diferentes coeficiente de Poisson. Se o coeficiente de uma fibra é mais alto que o da matriz, significa que quando tracionada ao longo de seu eixo, estas contraem transversalmente, o que ocasiona um descolamento da pasta de cimento, diminuindo assim a aderência da fibra, o que compromete o ganho no comportamento pós-fissuração.

Para as fibras que possuem um alto coeficiente de poisson, as tensões compressivas sobre estas são altas, devido a maior deformação da matriz. Com isso, a componente de fixação entre a fibra e a matriz é aumentada, havendo um melhor adesão que proporciona um aumento nas propriedades ligadas aos concretos reforçados com fibras.

2.3.7) PERMEABILIDADE E RESISTÊNCIA AO CHOQUE TÉRMICO

Em ambas as propriedades, as fibras desempenham um papel importante devido a um fator em comum que é a diminuição das microfissuras, através do controle da distribuição destas ao longo da matriz.

As mudanças de volume em um concreto podem ser decorrentes da absorção e evaporação de água, de sedimentação, segregação, hidratação do cimento e mudanças térmicas. Quando estas mudanças de volume são restringidas pela presença de agregado, armadura e contato com outra superfície, a retração proporcionará a formação de tensões internas na massa de concreto que, ao superarem a sua resistência, induzirão a formação de fissuras. A incorporação das fibras de baixo módulo de elasticidade, como as de polipropileno, tem como função controlar a fissuração por retração (TANESI, TORNERI E FIGUEIREDO, 1997).

A melhor distribuição das microfissuras causa uma redução significativa da permeabilidade, pois a passagem da água pelas mesmas, no compósitos que possuem uma abertura reduzida, é dificultada. Para a resistência às variações térmicas, as peças de concreto com a adição de alguns tipos de fibra, são mais dúcteis e capazes de sofrerem essas mudanças sem grandes prejuízos provocados por esta variação volumétrica.

2.3.8) DURABILIDADE

Teoricamente, a durabilidade das peças de concreto que estão menos fissuradas, é maior do que daquelas que apresentam várias aberturas, pela diminuição de portas de entrada para agentes agressivos. MINDESS E BANTHIA (1994) afirmam que se espera das fibras um aumento da durabilidade do concreto, por causa de sua eficiência no controle de micro e macro fissuras, fato o qual é geralmente verificado.

Com relação à resistência a meios agressivos, como sal de degelo, mais importante para os países do hemisfério norte, existem controvérsias sobre o desempenho. Existem pesquisas que apresentam resultados, onde o auxílio das fibras não foi observado, sendo que em outras, observou-se um desempenho satisfatório, aumentando assim a durabilidade dos concretos (CANTIN E PIGEON, 1996; PIGEON PLEAU AZZABI E BANTHIA, 1996). De uma forma geral o aumento do desempenho pode até existir, mas não são valores que causem espanto, pois parte desta contribuição é atribuída ao ar incorporado devido a adição de fibras.

Em uma pesquisa realizada em Quebec, no Canadá, os resultados dos ciclos de gelo e degelo e teste de sal de degelo, mostraram que microfibras reduzem a taxa de deterioração causada por estes fenômenos, mas não previne completamente os prejuízos (PIGEON, AZZABI E PLEAU, 1996). É importante dizer que, neste caso, a contribuição atribuída ao ar incorporado foi minimizada, pois as misturas foram confeccionadas à vácuo.

Neste capítulo foram apresentadas as peculiaridades dos concretos reforçados com fibras e suas propriedades, tipos de fibras e algumas peculiaridades ligadas às fibras. Entretanto, a propriedade que é responsável por uma grande investigação no meio científico, que é a tenacidade, não foi abordada pois recebeu uma atenção especial e é apresentada no capítulo que segue. No seguinte capítulo, são apresentadas as normas e as maneiras de se avaliar e estudar tenacidade, além das vantagens e desvantagens encontradas nas formas mais usuais de se computar a tenacidade.

3) TENACIDADE

3.1) CONCEITUAÇÃO

Se as fibras são suficientemente fortes, estão apropriadamente ligadas à matriz e são adicionadas na quantidade suficiente, elas irão ajudar a manter as fissuras em um tamanho adequado e permitir ao concreto reforçado com fibra suportar tensões extras, com um aumento da capacidade de deformação no estágio de pós-fissuração. Desta forma elas irão promover uma pseudo ductilidade na zona fissurada do compósito, sendo mais comumente expressada como tenacidade (MINDESS, 1995).

A propriedade tenacidade em particular, é o objetivo principal deste estudo devido ao fato de que esta, mais do que nenhuma outra, é significativa para os concretos com adições de fibras, pois é onde se encontra o melhor ganho, sendo este, indiscutível para os compósitos (fibra-matriz) com características peculiares, principalmente no que diz respeito ao processo de absorção de energia.

Segundo LI E MAALEJ, 1996a, o mecanismo de tenacidade dos concretos sem o reforço das fibras, é governado por uma série de tipos de fissuras, relacionados com a forma e local de propagação dessas fissuras. Esses tipos de fissuras recebem várias denominações como: microfissuração da pasta, fissuração ao redor do agregado, através do agregado, agregado funcionando com ponte de transferência de tensão e um tipo de fissura que fica aprisionada entre agregados impedindo a sua propagação. Todas essas formas de tenacidade nem sempre podem ser medidas devido à grande interação de todos estes fenômenos, o que torna difícil a sua determinação. Cada tipo de material cimentício, sendo ele pasta, argamassa ou concreto, possui um conjunto de processos de fissuração que não necessariamente serão os mesmos, variando assim de acordo com a resistência, tipo de agregado e outras variáveis que estes materiais possuem.

Embora agregados graúdos e miúdos modifiquem a característica de fragilidade, essas mudanças são desprezíveis em argamassa e concreto. Ambos os materiais, são ainda muito frágeis quando comparados com outros materiais de construção comuns, como

ação e madeira. Para tentar minimizar essa fragilidade e aumentar a tenacidade, que é definida como sendo a quantidade de energia absorvida até a ruptura, é que se adicionam fibras descontínuas no concreto (JOHNSTON, 1992).

Para os concretos reforçados com fibras, LI E MAALEJ (1996b), associam a tenacidade desses materiais a vários tipos de interações fibra/matriz, que resultam em uma absorção de energia na zona de transferência de tensões. Entre elas estão incluídas o descolamento na interface, a fricção no escorregamento e efeitos de ângulos inclinados associados à dispersão aleatória das fibras, onde existe o esmagamento da matriz na zona comprimida da fibra e uma fricção extra devido ao escorregamento da fibra.

Sendo assim, todo aumento de tenacidade está intimamente ligado ao processo de arrancamento das fibras da matriz, que é devido ao descolamento e o desenvolvimento da energia friccional, causado por este arrancamento.

O aumento do desempenho dos concretos reforçados com fibras sobre os concretos convencionais, é baseado no fato de haver um aumento da capacidade de absorção de energia. Enquanto a matriz convencional sofre uma ruptura de maneira frágil, o que é comum nos materiais à base de cimento ocasionada pelas tensões de fissuração, as fibras dúcteis, quando adicionadas ao concreto, conferem a este uma capacidade de portar estas tensões mesmo após a matriz estar fissurada, o que ajuda a manter a integridade estrutural, além de uma maior coesão do material.

O mecanismo de tenacidade é explicado por Shah (Apud METHA E MONTEIRO, 1994) quando ele diz que “o compósito suportará cargas cada vez maiores, após a primeira fissura da matriz, se a resistência das fibras ao arrancamento na primeira fissura for maior do que a carga na primeira fissuração; em uma seção fissurada, a matriz não resiste a nenhuma tração e as fibras suportam todo o carregamento do compósito. Com um aumento de carga no compósito, as fibras tendem a transferir a tensão adicional para a matriz, através das tensões de aderência. Se essas tensões de aderência não excedem a resistência de aderência, pode haver uma fissuração adicional na matriz. Este processo de fissuração múltipla continuará até que haja ou o rompimento ou o seu arrancamento, devido à perda de aderência local acumulada.”

É importante dizer que a união fibra/matriz nas propriedades mecânicas e no processo de microfissuração dos compósitos à base de cimento, é fundamental para o seu melhor desempenho (BANTHIA E YAN, 1996). Esforços vem sendo feitos para proporcionar um melhor desempenho da união fibra/matriz, e isto inclui a adição de sílica ativa e polímero, além de modificações nas fibras como revestimento e variações na forma através do aumento ou diminuição do comprimento ou diâmetro (BANTHIA E TROTTIER, 1995b; KATZ, LI E KAZMER, 1995).

Outro fator que explica este aumento de desempenho, está vinculado ao processo de multifissuração que ocorre nos concretos reforçados com fibras (CRF), quando existe uma dispersão adequada destas na matriz, havendo uma melhor distribuição de energia e fazendo com que haja uma propagação das microfissuras de forma bem distribuída. Com isso as fibras passam a funcionar como uma ponte de transferência de tensões, sendo que essa transferência diminui com o aumento da abertura de fissura (MAALEJ E LI, 1994).

O mecanismo básico de reforço da fibra pode ser melhor visualizado através da resistência à flexão, onde a tenacidade ou a quantidade de energia absorvida, é entendida como sendo a área sob a curva carga X deflexão do compósito, mostrada na figura 3.1 (BALAGURU E SHAH, 1992).

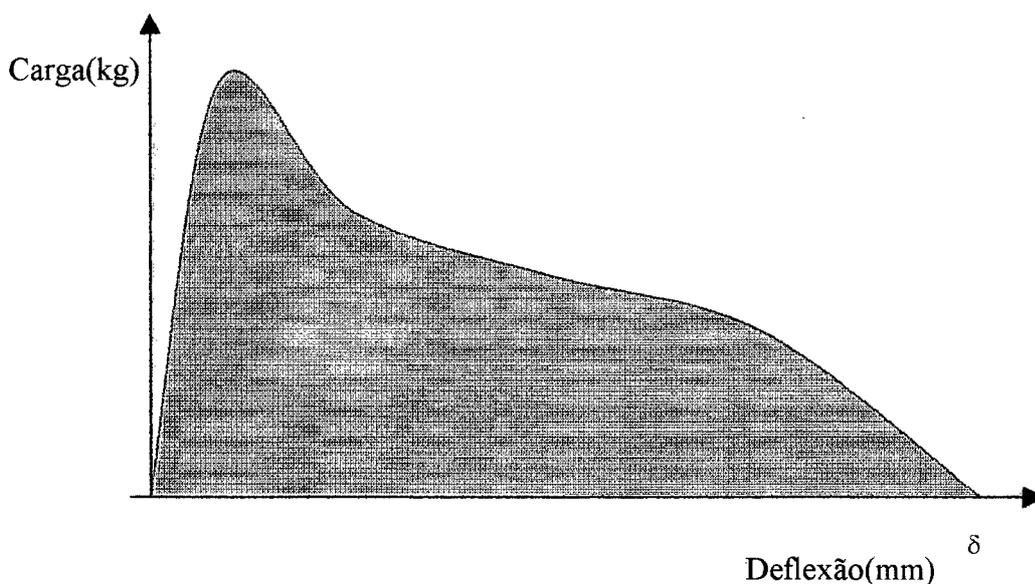


Fig. 3.1: Curva carga x deflexão típica para os concretos reforçados com fibras (BALAGURU E SHAH, 1992).

Para o concreto reforçado com fibras, existem pelo menos duas aproximações teóricas para o modelamento do seu mecanismo de reforço: a convencional teoria de reforço relacionada com a resistência dos materiais, e uma aproximação pela energia absorvida na interceptação da fissura relacionada com o mecanismo de ruptura (ZOLLO, 1996).

Segundo BENTUR E MINDESS (1990), o melhor papel desenvolvido pelas fibras ocorrem na zona pós-fissuração, na qual as fibras ligam a matriz fissurada. Em um compósito bem confeccionado, as fibras podem ter duas funções nesta região:

- 1) Elas podem aumentar a resistência do compósito acima daquela suportada pela matriz, fornecendo uma forma de transferência de tensão e carga através da fissura;
- 2) E a mais importante, que seria o aumento da tenacidade do compósito fornecendo um mecanismo de absorção de energia, relacionado com os processos de descolamento e de arrancamento das fibras que ligam as fissuras.

3.2) FATORES QUE AFETAM A TENACIDADE

O comportamento pós-fissuração dos concretos reforçados com fibras depende de vários fatores que podem mudar completamente o seu desempenho. Esses fatores têm que ser observados previamente a fim de ser obter a máxima capacidade dos compósitos. Sendo assim, uma vez definidas as características do compósito e da forma que será empregado, a modificação de alguns desses itens poderá proporcionar mudanças significativas na tenacidade do material.

Os agregados são um dos fatores que deve ser observado na confecção dos concretos reforçados, pois a variação da sua dimensão máxima irá fornecer valores de tenacidade diferenciados. Para o ACI COMMITTEE 544(3r-93) os agregados graúdos não devem ser maiores do que 19mm, apesar de citar o uso de agregado de 38mm com sucesso, sendo que para DANTAS (1987) o agregado graúdo deve ficar em torno de 9,5mm para proporcionar uma boa mistura. O agregado graúdo, em tamanhos pequenos e em pouca quantidade, pode fornecer uma perda na resistência à abrasão. Além disso, é importante que uma correta proporção entre os agregados seja observada, pois a sua variação pode

comprometer mais a tenacidade do que o comprimento da fibra utilizado ou até mesmo o tamanho do agregado, uma vez que foi constatado em estudos experimentais que concretos reforçados com fibras utilizando agregados com dimensão máxima de 40mm bem proporcionados, apresentaram resultados bem parecidos com aqueles que utilizaram agregados de menores dimensões (CHENKUI E GUOFAN, 1995).

Um dos fatores que modificam drasticamente o comportamento dos compósitos é o tipo, tamanho, forma e quantidade de fibra a ser utilizada. Fibras produzidas com diferentes materiais, possuem módulos de elasticidade e aderência distintos, levando a diferentes valores de tenacidade. Uma vez fixado o tipo de material das fibras, a variação no tamanho e forma, implicará na mudança da força necessária para seu arrancamento da matriz. Fibras mais delgadas e compridas contribuem para o aumento da tenacidade. Entretanto, são prejudiciais à trabalhabilidade da mistura. Com relação a quantidade, o aumento do número de fibras no compósito, conduz ao aumento da tenacidade. Para fibras de fator de forma adequado, teores entre 0,25 e 1% em volume, são os mais recomendados para o caso das fibras de aço. No caso das fibras de polipropileno, mesmo uma quantidade de 0,1% é suficiente para promover três vezes mais tenacidade e resistência à ruptura no ensaio de carregamento dinâmico, como o ensaio de impacto que reproduz o que acontece no caso de estacas ou materiais sujeitos a explosão (MANOLIS, GAREIS, TSONOS E NEAL, 1997; MINDESS, WANG, RICH E MORGAN, 1998).

A temperatura ao qual os compósitos estarão sujeitos, deve ser observada cuidadosamente, sendo que temperaturas elevadas, como 60° C, proporcionam mudanças na tenacidade do material devido ao aumento da velocidade de reação de hidratação na matriz (KATZ E BENTUR, 1995). O mesmo efeito pode ser visto em temperaturas inversas, como de 30° a 50° C negativos, onde a tenacidade do compósito é também afetada (BANTHIA, YAN E SAKAI (1998); PIGEON E CANTIN (1998). Porém os danos devido a variação de temperatura poderiam ser muito mais prejudiciais, se não fosse a utilização das fibras para melhorar a capacidade de absorção de energia do concreto reforçado com fibra, em condições severas de temperatura.

O processo de confecção dos concretos reforçados com fibras, aparece como sendo um dos fatores que também influenciam a tenacidade, pois a maneira como são adicionados os materiais e o processo de mistura, são de suma importância na disposição das fibras

por toda massa de concreto. Uma das formas de execução dos compósitos que pode alterar de modo significativo a tenacidade, é através do processo de extrusão que consiste na produção em massa contínua, o qual é capaz de aplicar uma compressão e forças de cisalhamento extras, para compactar fibras curtas com a matriz e controlar a orientação das mesmas durante o processo de formação. Os compósitos feitos pelo processo de extrusão possuem uma tenacidade excepcional, com um ganho de comportamento pós-pico, aumentando sua resistência (SHAO E SHAH, 1997).

O tipo de concreto possui um papel fundamental no desempenho dos compósitos, pois através da união fibra/matriz é que se dá todo processo de fissuração e ganho de tenacidade, com as fibras funcionando como ponte de transferência de tensões. Para minimizar os efeitos de desgaste das obras com o passar do tempo, que afligem a construção civil, não só as fibras devem ser levadas em conta, mas um matriz que desenvolva uma boa resistência mecânica deve ser observada para que haja um aumento da tenacidade (LI E MATSUMOTO, 1998; NAAMAN E HAMMOUND, 1998).

Esse fator é fundamental para os concretos de elevada e elevadíssima resistência (entre 100 e 200 MPa), uma vez que a tenacidade fica consideravelmente afetada pela alta fragilidade deste tipo de matriz. Apesar de possuírem vantagens econômicas importantes através da redução das dimensões e peso, além da diminuição da manutenção e um baixo impacto ambiental, os efeitos desses concretos sobre a tenacidade deve ser levado em conta para melhorar o seu desempenho. Quando adicionadas nas devidas proporções, as fibras podem fornecer um ganho de resistência à flexão nos concretos de alta resistência, que obedece um a comportamento linear até um determinado volume (BIOLZI, GUERRINI E ROSATI, 1997; ROSSI, 1997; ROSSI, SEDRAN, RENWEZ E BELLOC, 1995). Assim como os concretos, alguns tipos especiais de cimento também podem afetar a capacidade de energia absorvida pelos compósitos tornando-os mais frágeis (MAGGIO *et. al.*, 1997).

Como pôde ser observado existem uma série de fatores que possuem influência direta sobre o comportamento dos concretos reforçados com fibras. Para que haja um desempenho máximo do compósito esses fatores devem ser levados em conta na hora da definição do produto final a ser utilizado, atentando-se ao fato que qualquer mudança em um componente, seja na matriz ou na fibra a ser utilizada, pode acarretar em mudanças significativas no comportamento pós-fissuração deste material.

3.3) ENSAIOS DE TENACIDADE

3.3.1) CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para poder-se quantificar os benefícios da adição das fibras, com relação à absorção de energia, uma variedade de diferentes sistemas de medição de tenacidade e ensaios vêm sendo desenvolvidos em vários países. A tenacidade pode ser caracterizada em termos de tenacidade de tração, tenacidade de compressão e tenacidade na flexão. Muitos esforços de padronização têm, contudo, sua base no teste de tenacidade na flexão usando vigas carregadas em três pontos (MORGAN, MINDESS E CHEN, 1995).

Os ensaios de tenacidade são utilizados com quatro objetivos básicos:

- Controle de projeto;
- Controle da qualidade do concreto reforçado com fibra;
- Diferenciar o desempenho dos vários tipos de fibras;
- Diferenciar o efeito dos distintos teores de fibras;
- Diferenciar o desempenho de matrizes de diferentes resistências.

Segundo GOPALARATNAM E GETTU (1995), o ensaio de flexão é o mais popular porque ele simula de forma mais real as condições de muitas situações práticas e é mais simples de se conduzir do que o ensaio à tração. Além disso, os estudos de MAALEJ E LI (1994) mostraram que a resistência à flexão foi cinco vezes maior que a resistência à tração, apesar de ser conhecido que no ensaio de flexão, os materiais à base de cimento são dependentes do módulo de ruptura à tração. Essa maior resistência obtida no ensaio à flexão é interessante, pois através desse ensaio poderá se obter uma leitura de deflexão mais ampla mesmo com medidores de menor precisão, o que proporcionará uma melhor análise da região abaixo da curva do gráfico carga x deflexão, além de um maior tempo de ensaio para a observação do comportamento do material.

Além disso, o volume crítico de fibra na flexão, pode ser 40 % do volume crítico utilizado na tração, empregando assim, uma menor quantidade de fibra para se observar o ganho de desempenho no compósito após a carga de pico. Outro efeito significativo, é a suavização da curva, na zona de primeira fissura, no ensaio à flexão, sendo que isso

não pode ser acompanhado no ensaio de tração, onde uma drástica mudança na inclinação da curva é observada (BENTUR E MINDESS, 1990).

A curva carga X deflexão obtida no ensaio à flexão, se difere da curva tensão X deformação referente ao ensaio à tração, basicamente na porção pós-fissurada pois, com relação à porção elástica, estas são similares em ambos os gráficos.

A dificuldade de se executar o teste de tração direta no CRF (concretos reforçados com fibras), dificulta o seu uso na avaliação da tenacidade, fazendo com que o teste à flexão pura seja o mais recomendado para a obtenção dessa propriedade. Outra dificuldade encontrada neste ensaio, é com relação a determinação da tensão após a fissuração da matriz, pois esta não se comporta como o aço, onde as deformações medidas ocorrem na mesma direção da tensão principal, sendo facilmente determinada (FIGUEIREDO, 1997).

Além disso, o ensaio de tração é difícil de ser realizado devido aos problemas de concentração de tensões no local onde as garras se situam, causando uma instabilidade pós-pico (GOPALARTNAM E GETTU, 1995). Com isso, JOHNSTON (1991) afirma que a importância do comportamento à flexão, em muitas aplicações dos concretos reforçados com fibras, e a menor complexidade comparado com o teste de tração, para a especificação e controle da qualidade do compósito, faz do ensaio à flexão o mais adequado.

Mesmo utilizando-se os ensaios de tenacidade à flexão, deve ressaltar-se que a propriedade medida é influenciada por uma grande quantidade de fatores tais como:

- Tipo de fibra,
- Geometria da fibra,
- Volume da fibra,
- Composição da matriz,
- Tamanho do corpo de prova,
- Precisão dos medidores de deformação.

Alguns dos fatores anteriormente citados, que podem influenciar e fornecer valores de tenacidade diferenciados, foram mostrados no item 3.2.

Existem várias normas e recomendações para a determinação da tenacidade na flexão de concretos com fibras dentre as quais algumas são citadas abaixo:

- Norte Americanas : ACI 544 e ASTM C1018(1992)
- Japão : JSCE-SF4(1984)
- Europa : EFNARC(1996)
- Noruega : NBP N° 7(1993)

Além dessas normas e recomendações, existem algumas propostas individuais. Dentre elas, está a realizada por BANTHIA E TROTTIER (1995a), que será descrita no item 3.3.9. Muitas destas normas são baseadas umas nas outras, como acontece com as normas Austríaca e Espanhola UNE 83-600-94 (VANDEWALLE, 1996; FIGUEIREDO,1997), onde são utilizados os índices de tenacidade da ASTM e a resistência à flexão equivalente utilizada na norma Japonesa. Um outro exemplo ocorre com a norma Norueguesa (NPB N°7) e a recomendação europeia (EFNARC), que possuem várias semelhanças, como dimensões de corpos de prova e as classes dos CRF (concretos reforçados com fibras). Essa diversidade de normas, pode ser visualizada na tabela 3.1 que segue, onde são apresentadas as características peculiares de cada uma.

A maioria dos procedimentos de norma recomendam ensaios de flexão em vigas . Além destas, existe outro tipo de ensaio de tenacidade utilizado nos concretos reforçados com fibras, que é o ensaio em placas, que a recomendação Europeia, EFNARC (1996), sugere para a medição da capacidade de energia absorvida para os concretos projetados. A diferença básica entre os dois tipos de testes, é que o ensaio de flexão em vigas está sujeito a um estado uniaxial de tensões, o que o torna mais hábil no entendimento do mecanismo básico de comportamento do compósito. Por sua vez, o ensaio de tenacidade em placas utiliza uma flexão biaxial, fazendo com que surja um estado triaxial de tensões, contribuindo para que os corpos de prova suportem deformações da ordem de 25mm, como recomendada na EFNARC (1996).

Tab.3.1- Um resumo de vários testes especificados para medida de tenacidade dos concretos reforçados com fibras (GOPALARATNAM E GETTU, 1995)

Referência	Forma e Carga	Dimensões dos corpos	Parâmetros monitorados	Velocidade de deflexão e limite do teste	Medida de tenacidade	Outras medidas definidas
ACI guias ACI 544 (velho)	Viga carregada em três pontos	b = d = 100mm L = 300mm S = 350mm	Carga total de deflexão no vão central	0,05-0,10mm/min $\delta_t > 1,9\text{mm}$	Relação de energia absorvida até 1,9mm por energia na deflexão δ_f	Resis. a primeira fissura
ACI guias ACI 544	Viga carregada em três pontos	b = d = 100mm L = 300mm S = 350mm	Carga total de deflexão no vão central	0,05-0,10mm/min teste até ruptura completa	Relação de energia absorvida do CRF até ruptura por aquela do concreto convencional	
Norma Espanhola UNE 83-510-89	Viga carregada em três pontos	d/b < 1,5 L = 3d s > 3d + 50mm	Carga total de deflexão no vão central	1/1000-1/3000/min $\delta_t > 1,1$ (1/150) e $\delta_t > 1,1$ (15,5 δ_f)	Energia absorvida até a deformação de 1/150 Relação de energia absorvida até 15,5 δ_f para aquela até δ_f	Resis. a primeira fissura
Normalização Francesa P 18-409	Viga carregada em três pontos	b = d = 140mm L = 420mm S = 560mm	Carga total de deflexão no vão central (média)	0,25 ± 0,03mm/min $\delta_t = 3\text{mm}$	Relação da carga na deflexão δ pra carga P_f ($\delta = 0,7; 1,4; 2,8\text{mm}$)	P_f de acordo com um gráfico
ASTM C1018-92	Viga carregada em três pontos	100 x 100 X 350mm com variações permitidas	Carga total de deflexão no vão central ou deflexão nos pontos de carga	0,05-0,10mm/min $\delta_t > 5,5\delta_f$ maior limite quanto necessário	Relação da energia absorvida até n δ_f para aquela absorvida até δ_f (n = 3 e 5,5) Elevado n é chamado de fator de resistência residual	Resis. a primeira fissura, deflexão a prim. Fissura, energia absorvida até δ_f , fator de resistência residual
CUR (Holanda) Recomendações	Viga carregada em três pontos Concreto referência	b = d = 150mm L = 450mm S = 600mm	Carga total de deflexão no vão central	0,2 ± 0,04mm/min $\delta_t = 3\text{mm}$	Energia absorvida até deflexão δ ($\delta = 1,5; 3\text{mm}$) Resistência à flexão equivalente até deflexão δ Relação da resis. à flexão equivalente pela resis. da primeira fissura	Resis. a primeira fissura
DBV (Alemanha) Recomendações	Viga carregada em três pontos	b = d = 150mm L = 600mm S = 700mm	Carga total de deflexão no vão central (média)	0,2mm/min $\delta_t = 3,5\text{mm}$	Capacidade de suporte de carga equivalente até a deflexão $\delta_{\text{limite}} = (G_{\text{fibra}}/\delta)$ Resis. a flexão equivalente até a deflexão δ_{limite}	Resis. a primeira fissura

Tab.3.1 (Continuação)- Um resumo de vários testes especificados para medida de tenacidade dos concretos reforçados com fibras (GOPALARATNAM E GETTU, 1995)

EFNARC Especificações	Viga carregada em três pontos	b =125mm d=75mm L=450mm S=600mm	Carga total de deflexão no vão central	0,25 ±0,05mm/min $\delta_t = 5\text{mm}$	Resis. residual até deflexões de 1mm e 3mm Parâmetros ASTM C1018 I_{10} , I_{20} , I_{50} e R_{10-20} , R_{20-50}	Classificação da tenacidade baseado na energia absorvida, resis. a prim. Fissura, resis. flexão
	Punção no centro da placa	600 X 600mm 100mm de espessura dimensão da punção 100 X 100mm	Carga de deflexão no centro da placa	1,5mm/min $\delta_t = 25\text{mm}$	Capacidade de absorção de energia até deflexão de 25mm	Primeira fissura e carga máxima Curva de energia de deformação Classificação de tenacidade baseado na energia absorvida
Norma Belga NBN B15-238	Viga carregada em três pontos	b =d=150mm L=3d 4d ≤ s ≤ 5d	Carga total de deflexão no vão central	0,07±0,04mm/min p/ δ_t ≤0,5mm 0,5 ± 0,2mm/min p/ δ >0,5mm $\delta_t > l/150$	Relação de carga na deflexão de l/n até a carga de primeira fissura (n= 600, 450, 300, 150) Energia absorvida até a deflexão l/n (n= 300,150) Resistência a flexão equivalente até a deflexão l/n (n=300,150)	Resis. a primeira fissura, resis. a flexão
Instituto de medidas do Japão JCI-SF4	Viga carregada em três pontos	b =d=100mm para $l < 40\text{mm}$ b =d=150mm para $l > 40\text{mm}$ L=3d + 80mm	Carga total de deflexão no vão central ou deflexão nos pontos de carga	l/1500-l/3000/min	Energia absorvida até a deflexão de l/150 Resis. a flexão equivalente até a deflexão de l/150	Resis. a flexão, relação de cargas $P_{m\acute{a}x}^* / P_{m\acute{a}x}$ $P_{m\acute{a}x}^* =$ máxima carga de recarregamento depois de descarregado até 0,9 $P_{m\acute{a}x}$ na região pós pico $P_{m\acute{a}x} =$ carga máxima
Associação do Concreto Norueguês NCA N° 7	Viga carregada em três pontos	b =125mm d=75mm L=450mm S=550mm	Carga total de deflexão no vão central	0,25 ±0,05mm/min $\delta_t = 5\text{mm}$	Resis. a flexão residual até deflexões de 1mm e 3mm	Classificação de tenacidade baseado na resis. residual a flexão, resis. a flexão

Observa-se, na tabela 3.1, que o ensaio de flexão utilizando quatro cutelos, é quase unanimidade, com exceção do ensaio de tenacidade em placas da recomendação europeia. De acordo com esta tabela, os tamanhos dos corpos de prova diferenciam-se pouco, ficando em torno de uma seção de 15 x 15 cm e um comprimento de 60cm. Para fibras curtas com comprimento $l_f < 3\text{cm}$, é aconselhável uma seção de 10 x 10 cm. Vigas com dimensões menores são frequentemente recomendadas para aplicações em concreto projetado (GOPALARTNAM E GETTU, 1995).

3.3.2) MEDIDAS DE TENACIDADE

3.3.2.1) CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Na literatura existem várias formas de medidas da propriedade tenacidade, baseadas em diferentes tipos de ensaios. Nos itens subsequentes será feita uma descrição e análise destas formas de medida. Serão estudados critérios de alguns pesquisadores e principalmente, da normas mais utilizadas internacionalmente, dando-se ênfase ao método norte americano. Também serão estudados o critério da norma prescrita pela *Japan Society of Civil Engineers* (JSCE-SF4,1984) e a recomendação Europeia (EFNARC, *European Federation of Producers and Applications of Specialist Products for Structures*, 1996), o qual possui dois métodos: um de ensaio de tração na flexão em corpos prismáticos (vigas) e outro em placas quadradas, que se assemelha muito à norma Norueguesa (MORGAN, MINDESS, CHEN, 1995; BANTHIA E TROTTIER, 1995b; MORGAN,1995). Para a realização destes ensaios, são utilizados diversos tipos de equipamentos e sistemas de medição cujo funcionamento adequado é fundamental para a obtenção de medidas confiáveis. No item seguinte apresenta-se algumas considerações sobre eles.

3.3.2.2) CONSIDERAÇÕES SOBRE MÁQUINAS E MEDIDORES DE DEFLEXÃO PARA TESTES

Um sistema realimentado (closed-loop) de teste, promove a capacidade de controlar diretamente a deformação de um corpo de prova carregado. Este sistema é

imprescindível para testar materiais frágeis, como rocha e concreto, cuja a ruptura é instável e catastrófica. Um dos primeiros sistemas realimentados, como na prensa servo-controlada, foi utilizado em Minnesota em 1960 para testes em rocha. Com isso, observa-se que um sistema servo-controlado é importante para testes, tanto em materiais como em estruturas, para aumentar a precisão, para melhorar a estabilidade do ensaio e para testes abrangentes (GETTU *et. al.*, 1996).

A velocidade de carregamento é um importante fator que pode influenciar no comportamento da curva tensão x deformação ou carga x deflexão, como observado por GLINICKI (1994). Em seus experimentos, foram ensaiados concretos reforçados com fibras sujeitos à tração com quatro velocidades de carregamento, onde observou que o aumento da velocidade causava um acréscimo, tanto na tensão de pico como na área sob a curva (tenacidade).

Para garantir uma maior acuidade no levantamento da curva carga x deflexão, é recomendável a utilização do controle eletrônico de deslocamento através de um transdutor do tipo LVDT (*Linear Voltage Differential Transducer*) (FIGUEIREDO, 1997; FIGUEIREDO E HELENE, 1997a). Para evitar deformações externas, o LVDT deve ser apoiado num suporte chamado “yoke”, utilizado pela JSCE-SF4 (1984), pois este sistema vem sendo apontado como sendo de maior confiabilidade (BANTHIA E TROTTIER, 1995b).

As medidas de deflexão são geralmente feitas através do deslocamento do êmbolo da prensa utilizada para o teste. Estas deflexões superestimam a medida de deflexão central da viga relativa a linha neutra e devem ser evitadas. Entretanto, um número de formas de medição de deflexão têm aparecido nos últimos anos (BARR, B.; GETTU, S. K.; AL-ORAIMI E BRYANS, 1996).

No caso de se apoiar o LVDT na base da prensa, podem incidir sobre o equipamento deformações do cutelo, do contato destes com o corpo de prova, ou deslocamento da coluna da prensa devido à falta de rigidez e deformações do aparelho de transmissão de carga ao corpo de prova (FIGUEIREDO E HELENE, 1997a; SANCHES E BINA, 1996). Essas deformações externas gravadas, são aproximadamente 200 % maiores do que a do real ponto de primeira fissura. Isto pode implicar em um erro de magnitude

similar para o módulo de elasticidade e a tenacidade, uma vez que estes são determinados através do ponto de primeira fissura (GOPALARATNAM *et. al.*, 1991).

Ainda, dentro do mesmo pensamento, MORGAN (1995) observa que a ASTM permitia o uso de sistemas de deflexões que incluíam essas deformações externas, resultando numa deflexão para primeira fissura, até 30 vezes maior do que a teoricamente calculada. BANTHIA E TROTTIER (1995b), possuem a mesma opinião concordando que esse efeito é maior no ponto de primeira fissura, pois as deformações são pequenas, fazendo com que o erro seja relativamente grande.

A relativa e total magnitude das deformações externas dependem da configuração do teste. As deformações externas incluem: deformações elásticas e inelásticas do sistema de aplicação de carga, esmagamento do corpo de prova nos pontos de carga e apoios, deflexão devido a falta de apoio completo do corpo de prova e deformações devido ao empenamento da base

ARMELIN (1992), com relação às medidas que possam causar a inclusão de deformações indesejáveis, verificou que o aparato experimental empregado apresentou erro sistemático da ordem de 1 a 2mm, sendo 0,8mm devido ao apoio flexível e 0,8mm devido à prensa. Por isso, um correto sistema de medição, feito com um sistema servo-controlado e medidores posicionados corretamente, é de suma importância para que os resultados obtidos tenham crédito e expressem da forma mais real o comportamento do material.

3.3.2.3) CRITÉRIO DE BARR E EVANS E BARR E THOMAS

Uma forma de medir tenacidade, é a proposta por BARR E EVANS (1986) (*apud* FIGUEIREDO, 1997), baseada em ensaios de flexão em vigas, cujo o gráfico pode ser visto na figura 3.2. Neste gráfico, pode-se observar um comportamento típico de um concreto reforçado com um baixo teor de fibra, pois o trecho pós-fissuração se encontra bem abaixo da carga de pico. Nota-se ainda, que o gráfico apresenta um comportamento elástico bem definido e uma carga residual constante, quando é conhecido que esta forma pouco representa o real comportamento do compósito.

Este índice pode ser calculado segundo as duas fórmulas:

$$\text{Índice de Tenacidade (A)} = \frac{A + B}{4A}$$

$$\text{Índice de Tenacidade (B)} = \frac{B}{3A} * 100(\%) \text{ (BARR E THOMAS, 1986 apud FIGUEIREDO, 1997).}$$

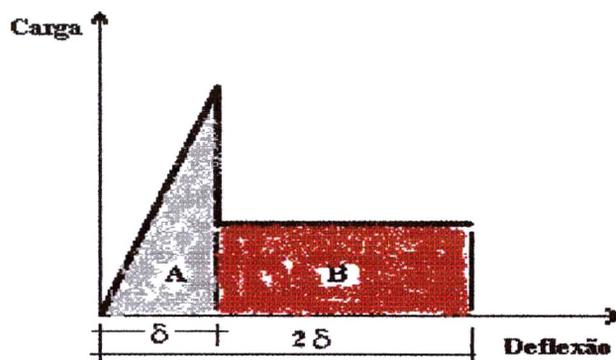


Fig. 3.2.: Curva carga x deflexão para definição do índice de tenacidade proposto por BARR E EVANS (*apud* FIGUEIREDO, 1997)

Um das críticas que se faz a estes índices, é que as deformações utilizadas são muito pequenas para analisar o comportamento do compósito, pois essas deformações se encontram dentro da zona de instabilidade pós pico (FIGUEIREDO, 1997).

3.3.2.4) MÉTODO NORTE-AMERICANO

A tenacidade na flexão e a resistência à primeira fissura, podem ser determinadas ensaiando vigas carregadas em quatro cutelos, onde algum alinhamento preferencial das fibras pela superfície do molde, pode influenciar o resultado dos testes, particularmente para seções pequenas com fibras longas (ACI COMMITTEE 544.2R, 1989). Com isso, a resistência a flexão é medida na seção de momento máximo, correspondente ao pico de tensão na fibra à tração, baseando-se na suposição de um comportamento elástico.

A primeira versão do ACI 544 definia tenacidade, como sendo uma relação da área sob a curva carga X deflexão até uma deflexão de 1,9mm, pela área sob a mesma curva até a deflexão de primeira fissura. Entretanto, caiu em desuso por problemas de dificuldade na determinação do ponto de primeira fissura e pelo fato de que a deflexão de 1,9mm, era um valor arbitrário (GOPALARATNAM E GETTU, 1995).

Se apenas a resistência a flexão máxima for de interesse, esta poderá ser medida através do ASTM C78 e, se a determinação da tenacidade ou a avaliação do comportamento carga x deflexão forem necessários, a ASTM C1018 deve ser usada. É interessante observar que os resultados obtidos no teste de carregamento controlado, como no ASTM C78, pode ser diferente daquele obtido usando a deflexão controlada, como no caso da ASTM C1018.

Como é descrito pelo ACI Committee 544.2R (1989), no concreto reforçado com fibra, o modelo ideal para definir tenacidade é através do índice I_t , como segue abaixo:

$$I_t = \frac{\text{Área sob a curva carga X deflexão até que a carga chegue a zero no compósito}}{\text{Área sob a curva carga X deflexão até que a carga chegue a zero no concreto convencional}}$$

As vantagens atribuídas a este índice é que, além de ser adimensional, ele representa o relativo aumento da capacidade de absorção de energia devido à utilização de fibras no concreto convencional. Outro aspecto está ligado ao fato de que o I_t (índice de tenacidade) diminui a influência de certos fatores que são:

- Relação dimensão / vão;
- Configuração de carga;
- Tipo de controle do teste;
- Velocidade de carga.

Entretanto, este método sofre críticas no que diz respeito ao fato de não ser possível confeccionar vigas idênticas de concreto convencional. Além disso, para alguns compósitos, como por exemplo nos reforçados com fibras de vidro quando carregados, algumas vezes demoram a alcançar o ponto de carga zero, por suportarem grandes deflexões (BALAGURU E SHAH, 1992).

O método padronizado pela ASTM C1018, é o mais amplamente usado para a caracterização da tenacidade juntamente com o método japonês, sendo assim, discutido em vários trabalhos. Este é baseado na determinação da quantidade de energia necessária, até uma determinada deflexão, para a abertura da primeira fissura e da

quantidade de energia correspondente a deflexões múltiplas em relação à primeira. A primeira fissura, é assumida como o ponto onde a curva carga X deflexão desvia da porção linear na parte referente ao comportamento elástico.

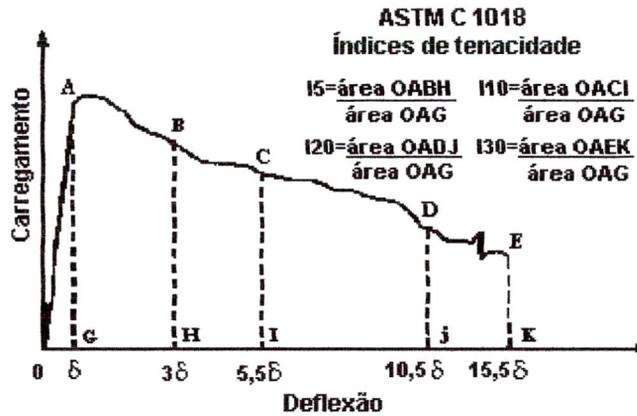


Fig.3.3.: Parâmetros de tenacidade pelo método da ASTM C1018 (MORGAN, 1995).

A figura 3.3. acima, mostra os índices de tenacidade $I_5, I_{10}, I_{20}, I_{30}$, que são baseados na relação entre a energia absorvida nos múltiplos do ponto de primeira fissura δ , que são $3\delta, 5,5\delta, 10,5\delta$ e $15,5\delta$, pela energia absorvida até o ponto de primeira fissura δ . Os índices podem ser expresso através da fórmula abaixo:

Área (energia absorvida) sob a curva carga X deflexão até um certo múltiplo da deflexão de primeira fissura

$$I_n = \frac{\text{Área (energia absorvida) sob a curva carga X deflexão até um certo múltiplo da deflexão de primeira fissura}}{\text{Área (energia absorvida) sob a curva carga X deflexão até a deformação de primeira fissura}},$$

Área (energia absorvida) sob a curva carga X deflexão até a deformação de primeira fissura

Onde:

I_n = Índice de tenacidade

Estes índices são baseados em um material de comportamento elasto-plástico, onde subentende-se um material de comportamento perfeito, cujos valores dos índices representam a relação entre a área sob a curva até uma determinada deformação e a área correspondente até o ponto de primeira fissura δ . Implicitamente, o esquema assume que o concreto convencional é idealmente frágil, conseqüentemente os índices de tenacidade neste caso assumem um valor constante de 1. Para os concretos com um suposto comportamento elasto-plástico perfeito, os índices de tenacidade I_5, I_{10}, I_{20} e I_{30} ,

assumem os valores respectivos de 5, 10, 20 e 30. A curva da figura 3.4 pode ser melhor entendida observando-a logo abaixo:

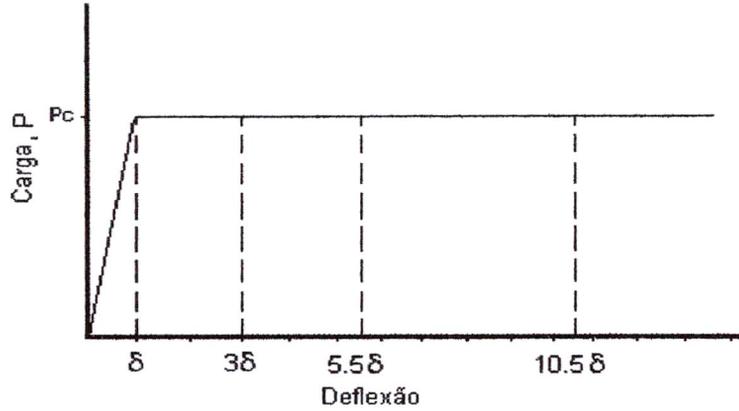


Fig. 3.4.: Curva carga X deflexão para um material de comportamento elasto-plástico perfeito (BALAGURU E SHAH, 1992).

Outro valor obtido neste método, é o do fator residual de resistência, que nada mais é do que uma relação entre os índices de tenacidade, e que pode ser expresso como sendo:

$$R_{x,y} = C (I_y - I_x), \text{ onde:}$$

$R_{x,y}$ = fator residual de resistência ou relação de tenacidade entre os índices de referência x e y,

I_y, I_x = Índices de tenacidade,

$C = 100 / (Y - X)$, é uma constante.

Para um comportamento elasto-plástico perfeito, este fator residual de resistência assume o valor de 100.

Podemos expor como exemplo:

Cálculo de $R_{5,10}$:

$$R_{5,10} = \frac{100}{10 - 5} * (I_{10} - I_5) = 20 * (I_{10} - I_5)$$

Cálculo de $R_{10,30}$:

$$R_{10,30} = \frac{100}{30-10} * (I_{30} - I_{10}) = 5 * (I_{30} - I_{10})$$

Esta relação identifica níveis de resistência retida após a primeira fissura. Cada fator representa o nível médio de resistência retida através de um intervalo de deflexão específica, expresso como uma porcentagem da resistência da primeira fissura (JOHNSTON, 1991). Assim, para um material elasto-plástico perfeito, esta relação sempre será 100:

Cálculo de $R_{5,10}$ para $I_5 = 5$ e $I_{10} = 10$:

$$R_{5,10} = \frac{100}{10-5} * (10-5) = 20 * 5 = 100$$

Cálculo de $R_{10,30}$ para $I_{10} = 10$ e $I_{30} = 30$:

$$R_{10,30} = \frac{100}{30-10} * (30-10) = 5 * 20 = 100$$

ARMELIN E BANTHIA (1997) em seus estudos, além da esperada tenacidade para altos teores de fibras, através de uma comparação entre duas misturas, uma com 0,75% e outra com 1,5% de fibras de aço (em volume) para uma dada deflexão de 3mm, observaram que mesmo havendo em média duas vezes mais fibras ligando a região fissurada, a capacidade de carregamento residual não é proporcionalmente o dobro.

Entretanto, as vantagens atribuídas a esta metodologia são que, através de seus índices I_5 , I_{10} , I_{20} , é possível fazer um acompanhamento do material testado, com relação ao comportamento ideal de um compósito elasto-plástico perfeito. Além disso, estes índices apresentam uma avaliação do comportamento do conjunto fibra/matriz (FIGUEIREDO, 1997; FIGUEIREDO E HELENE, 1997b).

Segundo BALAGURU E SHAH (1992), os índices de tenacidade, segundo estudos realizados, mostram-se insensíveis à dimensão dos corpos de prova. Contudo, uma série de outros estudos já comprovaram que tanto o método da ASTM C1018 quanto o JSCE-SF4, mostram-se sensíveis com a variação de tamanho e forma dos corpos, afetando a tenacidade e resistência (CHEN, MINDESS E MORGAN, 1994; ZOLLO, 1997).

Pela pesquisa realizada por CHEN, MINDESS E MORGAN (1994), a variação das dimensões influenciam não somente a curva carga X deflexão na primeira fissura e na resistência máxima, mas também todos os parâmetros de tenacidade. Concluíram ainda, que a tenacidade diminui com o aumento da relação comprimento/altura, dos corpos de prova, e que se mantidos a altura e o vão constantes, a tenacidade ganha valores à medida que se aumenta a largura. Outra característica observada, é que o aumento no valor dos índices, com a diminuição do vão, pode ser atribuído ao aumento na rigidez de cisalhamento, e além disso, os métodos não se mostram afetados pelas dimensões quando estas são similares.

Os índices da ASTM C1018, I_5 , I_{10} , I_{20} , I_{30} , como explicado anteriormente, são medidos através de uma relação de áreas referentes a múltiplos do ponto de primeira fissura que, segundo a norma americana, é o ponto onde o trecho elástico deixa de ter um comportamento retilíneo. Entretanto, estes índices foram baseados no comportamento de um material elasto-plástico perfeito, onde o trecho elástico é retilíneo. Estes índices têm como função fornecer a tenacidade relativa destas deflexões e informações da forma aproximada do comportamento pós-fissuração na curva carga x deflexão (GOPALARATNAM *et. al.*, 1991).

Os valores obtidos pela ASTM C1018, dependem fortemente da determinação do ponto de primeira fissura, o que não é simples e pode levar a diferentes valores (FIGUEIREDO E HELENE, 1997a; KATZ E BENTUR, 1995). Mesmo se o equipamento for padronizado com alta precisão, o lugar da primeira fissura é altamente subjetivo, o que é suficiente para levar a grandes variações entre operadores e laboratórios (BANTHIA E TROTTIER, 1995a). Parece haver um consenso de que a determinação do ponto de primeira fissura, em muitos casos, é considerado extremamente complicado, e o uso da carga de pico para a sua determinação será um imprevisto (BARR, B.; GETTU, S. K.; AL-ORAIMI E BRYANS, 1996). Um exemplo deste problema pode ser melhor visualizado nas figuras 3.5 e 3.6.

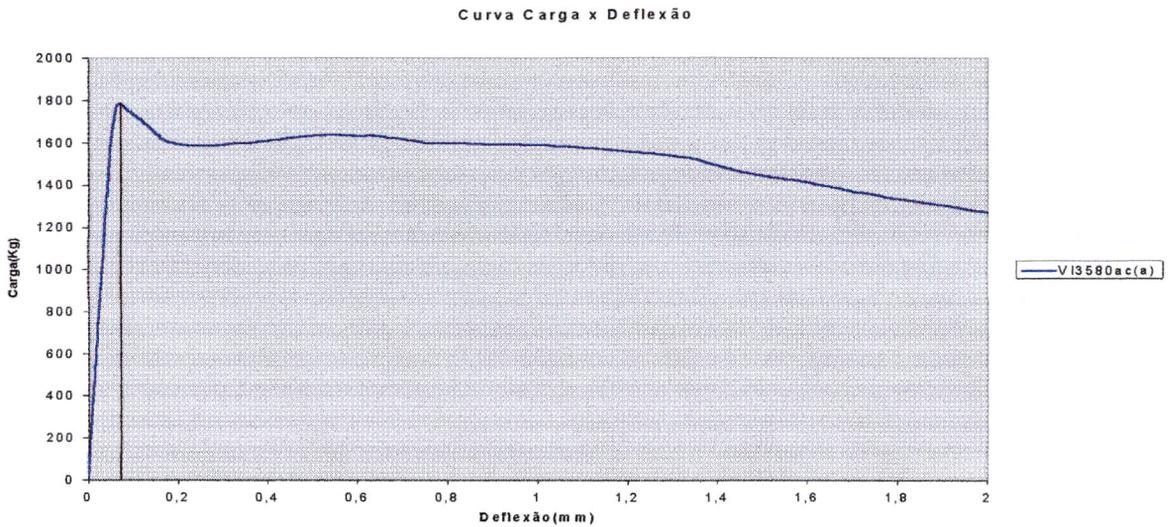


Fig. 3.5.: Curva carga x deflexão obtida no ensaio de flexão em prismas para o concreto de 35 MPa e 80 kg/m³ de fibra de aço colada, obtida no programa experimental desta dissertação.

Como podemos observar, a leitura do ponto de primeira fissura no gráfico da figura 3.5 acima, mostra o ponto exato onde o trecho elástico muda de comportamento, sendo este valor é de 0,068664mm. Entretanto, se aumentarmos a escala deste mesmo gráfico veremos que este valor irá mudar e poderá ficar a critério de quem o está interpretando, como pode ser visto na figura 3.6.

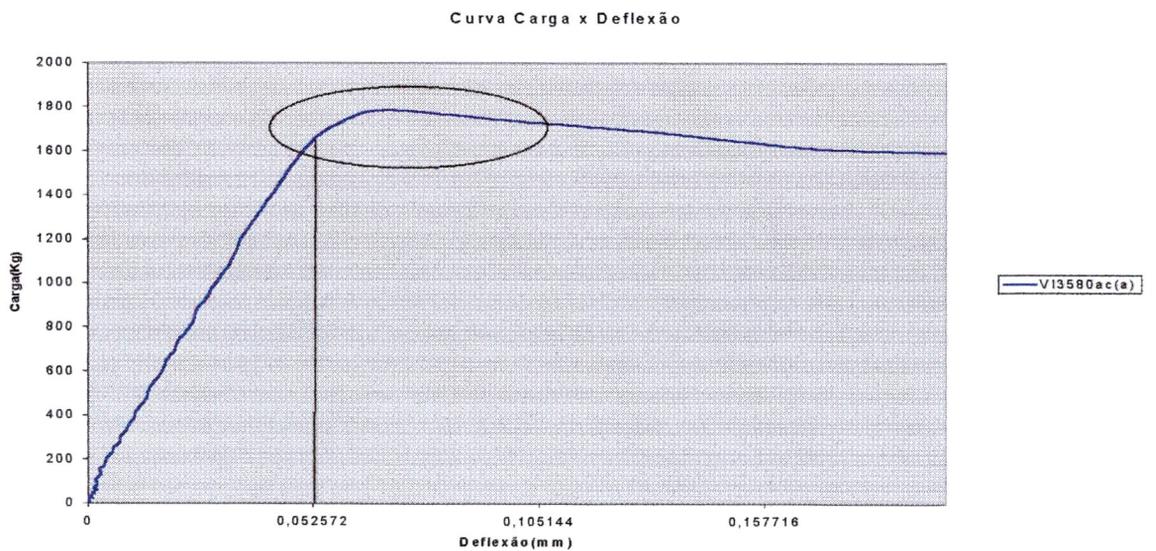


Fig. 3.6.: Curva carga x deflexão obtida no ensaio de flexão em prismas para o concreto de 35 MPa e 80 kg/m³ de fibra de aço colada, obtida no programa experimental desta dissertação.

Como podemos observar na figura 3.6, o ponto de primeira fissura, de acordo com a mudança do comportamento elástico, passa a ser o valor de 0,052572, o que ocasiona em uma mudança significativa nos índices, principalmente os que se situam na região de pós-fissuração, como é o caso de I_5 e I_{10} . A área destacada, representa a região onde ocorre o processo de multifissuração ao qual os concretos reforçados com fibras estão sujeitos, diferenciando assim o trecho elástico e dificultando a determinação do exato ponto de primeira fissura.

Em um teste de carregamento controlado com uma prensa de rigidez moderada, o ponto de carga máxima também é o ponto de instabilidade, onde a energia de deformação armazenada na prensa é bruscamente aliviada. Este alívio brusco irá causar uma queda instantânea da curva carga X deflexão, sendo que esta mudança é maior em fibras de menor eficiência. Contudo, nesta região, mais comumente chamada de instabilidade pós-pico, é aonde se encontram os índices de tenacidade, principalmente o I_5 e I_{10} , e estes, por sua vez, podem sofrer um erro de leitura.

No experimento realizado por BALAGURU, NARAHARI E PATEL (1992), as leituras de deflexão foram gravadas de acordo com intervalos de carga até o ponto de primeira fissura. Após o ponto de primeira fissura, as leituras de carga foram gravadas por uma escolhida leitura de deflexão, porque assim, na região de pós fissuração, o aumento nas deflexões, ao contrário do decréscimo na carga, seguiriam uma medida estável. Além disso, as medidas de deflexão na região de instabilidade pós-pico podem sofrer alterações na velocidade de aquisição dos dados, o que poderia promover uma melhor interpretação da zona de instabilidade, melhorando o seu comportamento.

Este fato fez com que FIGUEIREDO, A. D.; CECCATO, R. E TORNERI (1997), ao realizarem um estudo de tenacidade avaliando o fator de forma para fibras de mesmo diâmetro e diferentes comprimentos, retirassem dos gráficos obtidos as regiões de instabilidade pós pico, evitando leituras fictícias dos medidores de deformação.

Os erros dos índices de tenacidade ainda atingem os compósitos de propriedades completamente diferentes, aonde os seus valores podem ser exatamente os mesmos (figura 3.7).

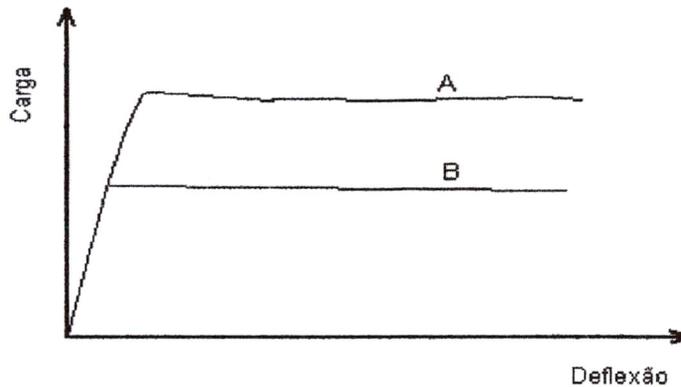


Fig.3.7.: Compósitos de mesmo índice de tenacidade, contendo um comportamento mecânico diferenciado, de acordo com o critério da ASTM C1018 (FIGUEIREDO, 1997; FIGUEIREDO E HELENE, 1997a).

Podemos ter materiais de comportamento elasto-plástico completamente diferente e obter índices de tenacidade exatamente iguais, o que não estaria representando a diferença significativa, tanto no trecho pré-fissurado como no pós-fissurado, ou seja, o material pode apresentar um baixo desempenho quanto à resistência e ter elevados índices.

Com relação à instabilidade pós-pico, que acontece principalmente para compósitos que utilizam baixas quantidades de fibras, existe outra falha dos índices da ASTM C1018, que não são capazes de sentir esta diferença no comportamento do material. Essa instabilidade pós-pico se torna mais pronunciada, à medida em que se aumenta a resistência da matriz, como é o caso dos concretos de alta resistência, onde este fenômeno é visto nos estudos realizados por BANTHIA E TROTTIER (1995a). Com relação a esta instabilidade, FIGUEIREDO (1997), observa que isto não ocorre nos compósitos quando ensaiados às primeiras idades, onde a resistência dos concretos ainda não alcançou níveis elevados.

JOHNSTON (1993) realizou ensaio em vigas carregadas em quatro cutelos, a fim de avaliar a influência da velocidade de carregamento e da idade sobre os CRF (concretos reforçados com fibras), utilizando o método da ASTM C1018 e concluiu que a primeira fissura sofre influência de acordo com o aumento dos parâmetros de estudo. É interessante citar que, apesar de sofrer esta influência no ponto de primeira fissura, os

índices de tenacidade e os fatores residuais de resistência não sofreram alterações a um certo nível de significância, para o aumento da taxa de carregamento.

Os índices de tenacidade I_5 e I_{10} para concretos de baixa e média resistência, são frequentemente obtidas na zona de instabilidade e são irrealistas. Até mesmo para o índice I_{20} , que provavelmente estaria fora da estabilidade pós-pico, aparece sujeito a esta interferência em concretos de altas resistências (BANTHIA E TROTTIER, 1995b).

Pode-se observar, que a maioria das críticas sofridas pelo método, giram em torno da determinação da primeira fissura, pois dela dependem todos os parâmetros estudados pela ASTM C1018, sendo assim, suscetíveis a todas essas influências, tornando-se interessante perguntar o porquê da utilização deste valor, que está limitado por tantas variáveis que inviabilizam o seu uso para algumas aplicações dos concretos reforçados com fibras.

No experimento de CHENKUI E GUOFAN (1995), somente o I_{10} conseguiu mostrar os efeitos da incorporação de mais ou menos fibras no valor da tenacidade. Entretanto, este se mostrou ineficiente para detectar os efeitos do aumento do comprimento de fibra e do tamanho dos agregados.

Em estudo realizado por BALAGURU, NARAHARI E PATEL (1992), utilizando três tipos de fibras de aço diferentes, os índices I_5 e I_{10} computados segundo a norma da ASTM, não mostraram uma boa indicação das variações no comportamento carga x deflexão. Eles aconselham que índices de tenacidade elevados, como I_{100} , deveriam ser usados para a avaliação dos concretos reforçados com fibras. Ainda cita que, em fibras de extremidades em gancho, o comprimento não afeta significativamente a tenacidade e o aumento da resistência da matriz geralmente leva à queda rápida de carga pós-pico que pode ser resolvida drasticamente com a adição 1,5% de fibras de aço.

No estudo do concreto projetado, que possui propriedades reológicas um pouco diferenciadas do concreto convencional, GOPALAKRISHNAN *et. al.*(1998), realizaram ensaios de flexão em vigas carregadas em quatro pontos. Nos gráficos obtidos, a tenacidade foi estudada através dos índices da ASTM, onde I_5 , I_{10} , e I_{30} não mostraram sensibilidade suficiente para captar as variações no comportamento devido

ao volume das fibras, utilizando-se três teores diferentes. O mesmo atenta para o fato que os índices I_{50} e I_{100} mostram um aumento para teores de 1% de fibra.

GOPALARATNAM, SHAH, BATSON, CRISWELL, RAMAKRISHNAN E WECHARATANA (1991), realizaram um amplo estudo, onde foram envolvidas, em uma primeira fase, seis universidades. Nesta primeira fase, foram estudados o tamanho dos corpos de prova, volume de fibra, tipo de fibra e o efeito do entalhe nas vigas para os ensaios de flexão, para observar problemas com relação às medidas de tenacidade, propriedades do material e a possibilidade de uma nova medição de tenacidade. Neste trabalho, as medições de tenacidade utilizaram duas configurações: incluindo e excluindo as deformações externas (deformações de apoios e acomodações do corpo de prova e da máquina de ensaio).

Os índices de tenacidade I_5 e I_{10} , mais uma vez, foram relativamente insensíveis ao tipo de fibra sendo que, para o volume de fibras, se mostraram menos sensíveis quando comparados com a energia absorvida para esses compósitos, que foi definida como sendo a energia absorvida por unidade de área transversal do corpo de prova em um dado nível de deflexão. Quanto ao volume de fibra, os índices também se mostraram menos sensíveis para as medidas feitas sem as deformações externas, do que com essas deformações. Ainda concluem que o I_5 se mostra insensível para as variações no tamanho do corpo de prova.

Entretanto, JOHNSTON (DISCUSSION, 1992) faz várias críticas a este trabalho em relação à variabilidade do material empregado, fabricação do corpo de prova, o número de amostras e quanto à interpretação da norma ASTM C1018. Ele critica a forma com que os autores utilizaram a norma, não respeitando as diretrizes, além de tratá-la como um guia, apresentando coeficientes de variação para o índice de I_{80} , quando a norma prescreve até I_{20} . Os autores se defendem dessas críticas e concluem dizendo que o intuito foi de simular as atuais formas de se confeccionar e testar este material utilizado pelas indústrias.

Contudo, é notório que os índices da ASTM C1018, não são uma medida de tenacidade completamente eficiente na distinção de compósitos de volume, tipo e forma de fibras diferenciadas, sendo necessária uma revisão em sua essência, a fim de proporcionar uma medida confiável para a determinação do trecho pós-pico.

3.3.2.5) MÉTODO JAPONÊS

Assim como o método Norte Americano, este também é estudado amplamente pelos pesquisadores. Neste ensaio, é obtida a área abaixo da curva carga deflexão plotada até um ponto de $L/150$, que é chamada de tenacidade. Além deste valor, este método calcula o fator de tenacidade a flexão, que é calculado conforme na figura 3.8:

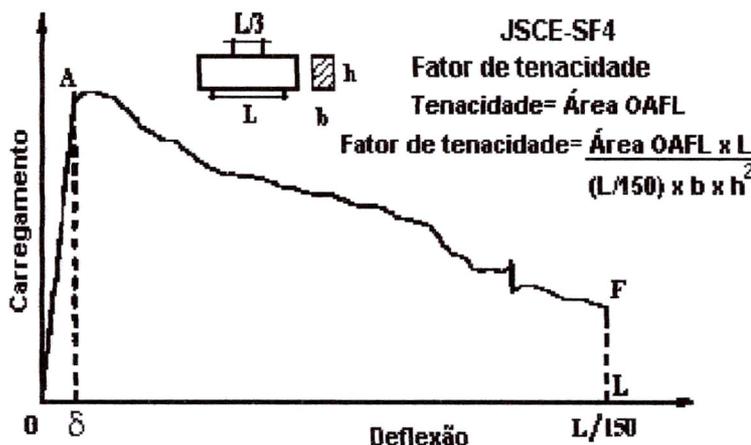


Fig. 3.8.: Curva carga X deflexão e índices para a medição da tenacidade pelo o método JSCE-SF4 (MORGAN, 1995).

As maiores vantagens deste método com relação ao da ASTM C1018, é o fato de não sofrer tantas variações no cálculo do fator de tenacidade devido a instabilidade pós-pico, pois como visto anteriormente, este valor é determinado através da medição da área total da curva carga X deflexão até a deformação de $L/150$, o que corresponderia uma deformação de 2mm para corpos de prova de vão 300mm e de 3mm para um vão de 450mm (MORGAN, MINDESS E CHEN, 1995). Segundo MORGAN (1995), esta instabilidade pós-pico pode ser muito menos sentida neste método do que no da ASTM C1018.

Isso é explicado por BANTHIA E TROTTIER (1995a), como sendo devido ao fato de que a deflexão de $L/150$ está em um ponto suficientemente afastado da curva para não ser afetado pela instabilidade, que ocorre na porção inicial.

Outra observação feita à JSCE-SF4, diz respeito a esta poder distinguir as diferenças entre o comportamento de concretos contendo distintos tipos e volumes de fibras,

mostrando uma boa sensibilidade a estes fatores (BALAGURU E SHAH, 1992; MORGAN, MINDESS E CHEN, 1995).

Isto é confirmado em pesquisas que dizem que a absorção de energia como medida de tenacidade, é capaz de distinguir compósitos com características diferentes, mas é importante dizer que somente energia absorvida não é suficiente para se estimar tenacidade (JOHNSTON DISCUSSION, 1992; GOPALARATNAM *et. al.*, 1991).

O fator de tenacidade da norma japonesa, não sofre variações de acordo com os tipos de medição da deformação, pois os efeitos das deformações externas, como ocorre com o preconizado pela ASTM C1018, são eliminados pelas medições feitas utilizando o sistema “YOKE”, onde os valores de deformação nos apoios são automaticamente subtraídos das medidas de deflexão. O mesmo não acontecesse com o “LVDT” em contato com o topo do corpo de prova ou medida pela decida do “CROSS ARM”, outras formas de medição da deformação (BANTHIA E TROTTIER, 1995a). A norma japonesa conta ainda com a vantagem de não ter que determinar o ponto de primeira fissura, que traz grande dificuldade para o seu exato valor.

Assim como a norma Norte Americana, essa também está sujeita às críticas que podem inviabilizar o seu uso na determinação da resistência à flexão e dos parâmetros de tenacidade. Esta técnica é criticada por BANTHIA E TROTTIER (1995a e 1995b), por falhar em não fazer distinções entre os comportamentos pré-pico e pós-pico, que são importantes para algumas aplicações, e por empregar uma aproximação rejeitada, usando uma combinação com a área sob a curva, para a determinação do fator de tenacidade.

Nestes trabalhos, são considerados que os resultados dos corpos de prova são dependentes da geometria, o que faz com que uma correlação com o uso em campo, seja preferencialmente dificultada. Outro estudo realizado sobre o efeito da geometria, com esses dois métodos, mostrou também que principalmente o método japonês é consideravelmente influenciado. ZOLLO (1996) também concorda que tanto a tenacidade quanto a resistência são afetadas pela forma e tamanho dos corpos testados.

Contudo, os seus fatores foram completamente independentes do tamanho dos corpos de prova, quando estes foram geometricamente similares na proporção de 1:1:3 (largura:

altura : vão) e em alguns casos mostraram-se menos sensíveis do que os índices da ASTM (CHEN, MINDESS E MORGAN, 1994).

O fator de tenacidade utilizado pela norma é uma aproximação, onde é determinada uma carga média, através do qual se calcula uma tensão de tração equivalente, utilizando a teoria elástica, não representando assim, o real comportamento do compósito.

A região de compressão de uma viga no ensaio, é normalmente menor do que 10mm para uma deflexão central de 1mm. Portanto, um cálculo de resistência residual, baseado na teoria elástica (que assume a linha neutra no meio da viga), irá superestimar de forma grosseira a verdadeira tensão residual do compósito, resultando em um erro no valor da tensão (ARMELIN E BANTHIA, 1997). Sendo assim, a teoria de flexão é aplicável somente até o ponto de tensão de primeira fissura e não possibilita a interpretação para o comportamento na flexão além deste ponto (BENTUR E MINDESS, 1990).

Críticas também são feitas ao método, por este não ser capaz de fazer distinção de comportamentos elásticos e de pós fissuração completamente diferentes (gráficos C e D da figura 3.9). Ainda apresenta um mesmo nível de consumo de energia para materiais com tensões de pico diferentes, onde um deles possui um ganho no comportamento pós-pico (gráficos C e A), como mostrado na figura 3.9.

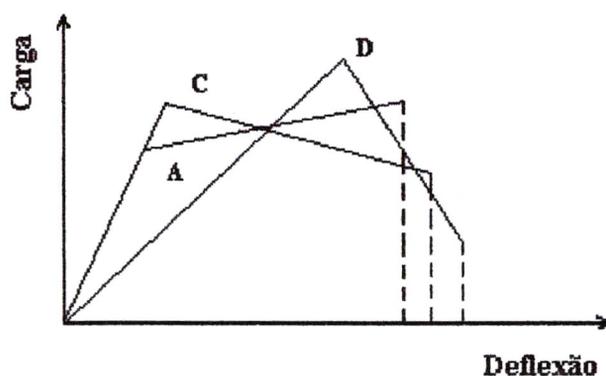


Fig.3.9.: Materiais de comportamento elástico diferentes, com similar valor de tenacidade, segundo o critério da JSCE-SF4 (MORGAN, MINDESS E CHEN, 1995; FIGUEIREDO, 1997).

Entretanto, é importante observar que, para um processo de confecção, transporte e aplicação do concreto reforçado com fibra, onde são respeitadas todas as exigências de execução, discrepâncias de tal forma dificilmente ocorrerão e, mesmo que ocorram, esses valores poderão ser considerados espúrios.

Outras observações são feitas com relação ao ensaio, que proporciona uma grande abertura de fissura, de modo que esta deflexão é considerada como exagerada para os limites de aplicação dos CRF. Além disso, esta deflexão de $L/150$ utilizada no cálculo, é um valor puramente arbitrário (MORGAN, 1995; MORGAN, MINDESS E CHEN, 1995; BANTHIA E TROTTIER, 1995a). Devido a esta grande abertura de fissura exigida pela norma, nem sempre é possível concluir o ensaio e determinar os parâmetros exigidos para o teste, principalmente no caso do uso de pequenos teores de fibras (20 kg/m^3).

Apesar de todas essas limitações apresentadas para ambos os métodos, ASTM C1018 e JSCE-SF4, estes continuam sendo utilizados como parâmetros de avaliação dos concretos reforçados com fibras (FIGUEIREDO, 1997).

3.3.2.6) MÉTODO EUROPEU (EFNARC E NORUEGÊS)

Outros índices de avaliação da propriedade tenacidade, vêm sendo propostos tais como os da norma Norueguesa (NBP.Nº7, 1993) e recomendação européia (EFNARC, 1996), em função da dificuldade da correta determinação do local da deflexão da primeira fissura, além da influência dos equipamentos utilizados nos resultados dos testes. As considerações aqui realizadas são comuns a ambas as normas, pelo fato de que estas possuem várias similaridades com relação ao método utilizado para a determinação da tenacidade, principalmente aplicado para os concretos projetados. As diferenças dos dois métodos reside basicamente nas classes de tenacidade utilizadas e nas dimensões dos corpos de prova prismáticos.

Com relação ainda às diferenças, quanto aos corpos de prova prismáticos (vigas) ensaiados à flexão em quatro cutelos e as classes de tenacidade utilizadas, estas podem ser observadas nas tabelas 3.2 e 3.3.

Tab.3.2: Tensões residuais na flexão das classes e dimensões recomendadas pela NBP N°7 (1993), associação Norueguesa do concreto.

Classes de tenacidade	Tensões residuais de flexão na deflexão		Dimensões (mm)
	1mm	3mm	
0	Concreto projetado	Sem fibra	b= 125 h= 75
1		Com tipo e dosagem de fibra pré-especificado	l =450 c =550
2		2,0 MPa	1,5 MPa
3	3,5 MPa	3,0 MPa	

Tab.3.3: Tensões residuais na flexão das classes e dimensões recomendadas pela EFNARC (1996).

Classe de tenacidade	Deflexões (mm)				Dimensões (mm)
	0,5	1	2	4	
0	Concreto projetado sem reforço				b= 125 h= 75
1	1,5 MPa	1,3MPa	1,0MPa	0,5MPa	l =450 c =600
2	2,5MPa	2,3MPa	2,0MPa	1,5MPa	
3	3,5MPa	3,3MPa	3,0MPa	2,5MPa	
4	4,5MPa	4,3MPa	4,0MPa	3,5MPa	

Algumas vantagens e desvantagens são citadas por MORGAN, MINDESS E CHEN (1995) para esses critérios e são relacionadas abaixo:

Vantagens desses critérios:

- ✓ São independentes da determinação da deflexão na primeira fissura;
- ✓ As deflexões de 1mm e 3mm (NBP. N.º 7) e de 0,5mm (EFNARC) não sofrem influência na instabilidade pós-pico da curva carga X deflexão;
- ✓ Os valores de tenacidade são expressos em termos de resistência residual, com valores em MPa, pelo qual se torna uma ferramenta no cálculo de estruturas utilizado pelos engenheiros;
- ✓ O método fornece um padrão muito simples, pelo qual as curvas carga X deflexão podem ser comparadas.

Desvantagens:

- ✓ Esse ensaio é baseado em um corpo de prova que possui dimensões diferentes daqueles preconizados pela ASTM C1018 e JSCE-SF4, o que dificulta a sua comparação;
- ✓ Segundo FIGUEIREDO (1997), a tensão residual é calculada através de um modelo elástico, o que o afasta da realidade, superestimando a tensão de tração e subestimando a de compressão.

Segundo GOPALARTNAM E GETTU (1995), a recomendação da EFNARC, é utilizar classificações de tenacidade idênticas às propostas pela Associação Norueguesa do Concreto, e que este tipo de aproximação, para caracterizar tenacidade, pode ser impróprio para o propósito de uso geral.

3.3.2.7) ENSAIO DE FLEXÃO EM PLACA

A EFNARC preconiza o ensaio de flexão em placas que é utilizado na avaliação de concretos projetados, simulando o uso de tirantes em túneis, o que caracterizaria a punção. Este ensaio foi recentemente proposto com um objetivo específico para medição da tenacidade no concreto projetado reforçado com fibras (FIGUEIREDO E HELENE, 1997b).

O mesmo teria sido criado através de um programa desenvolvido pelo *SNCF (Société Nationale des Chemins de Fer Français)* em conjunto com o *Alpes Essais Laboratory de Grenoble* para caracterizar o desempenho do concreto projetado com fibra. A vantagem deste ensaio em relação aos outros citados, é a de que verifica a distribuição de esforços ao longo do plano, em duas direções, observando melhor o desempenho e a distribuição de esforços das fibras em estruturas planas tipo lajes e casca, para revestimento de túneis (SANCHES E BINA, 1996).

No ensaio de flexão em placas, as mesmas possuem as dimensões de 60 x 60 x 10cm (comprimento, largura e altura) apoiada nos quatro lados ficando um vão de 50 x 50cm, sendo flexionada por uma carga aplicada no centro da superfície superior, em uma região de 10cm X 10cm, como na figura 3.10.

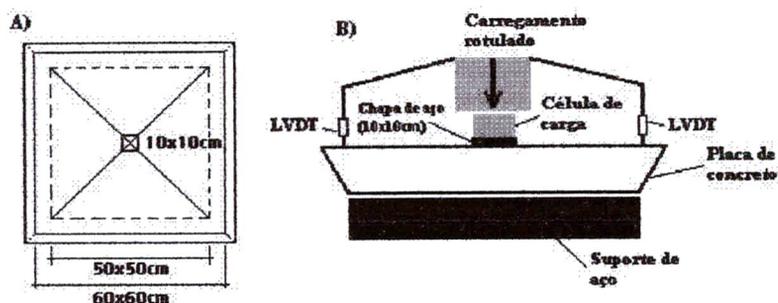


Fig. 3.10.: Ensaio de flexão em placa quadrada preconizado pela EFNARC (1996). a) Planta baixa do ensaio, b) Vista lateral do ensaio.

A curva carga x deflexão é medida até uma deflexão de 25mm e as tenacidades necessárias são dadas como absorção de energia específica até este nível de deflexão, como mostra a tabela 3.4.

Tab.3.4.: Energia absorvida necessária para uma deflexão específica (EFNARC, 1996).

Classificação de tenacidade	Energia absorvida em joules para a deflexão até 25mm
A	500
B	700
C	1000

Entretanto, existem fatores negativos no ensaio de flexão em placa:

- ✓ Um deles é que a deformação imposta é de 25mm, o que causa uma abertura de fissura, que de maneira alguma, representa o real comportamento do material quando aplicado em obras correntes;
- ✓ Outra restrição é observada por FIGUEIREDO (1997), onde os corpos de prova necessários para os ensaios podem chegar a aproximadamente 100Kg, o que dificulta o manuseio para a execução do teste;
- ✓ Além disso, a forma do corpo de prova fica sujeita ao esforço de projeção (impacto do jato), que passa a apresentar deformações que em muito dificulta as condições de

apoio e, conseqüentemente, concentra esforços durante o ensaio (FIGUEIREDO E HELENE, 1997b).

A presença das fibras diminui a velocidade de propagação das fissuras. Isso ocorre porque para transpor uma fibra, exige-se um trabalho adicional de deformação, como o arrancamento ou a ruptura desta fibra. O mesmo efeito é responsável pelo surgimento de multifissuras, aumentando ainda mais a dissipação de energia (REGATTIERI *et. al.*, 1996).

A falta de um apoio contínuo ao longo de toda a borda da placa, causada pelo empenamento do corpo de prova, é responsável por uma concentração de tensões que pode provocar um processo de fissuração diferenciado nos corpos de prova, mesmo que estes façam parte de um mesmo lote a ser ensaiado. Podemos ver, pela figura 3.11, uma variação na distribuição das tensões máximas devido a uma descontinuidade no apoio, através de uma análise por elementos finitos (sap2000), onde se observa a região inferior da placa, cujos esforços de tração são máximos.

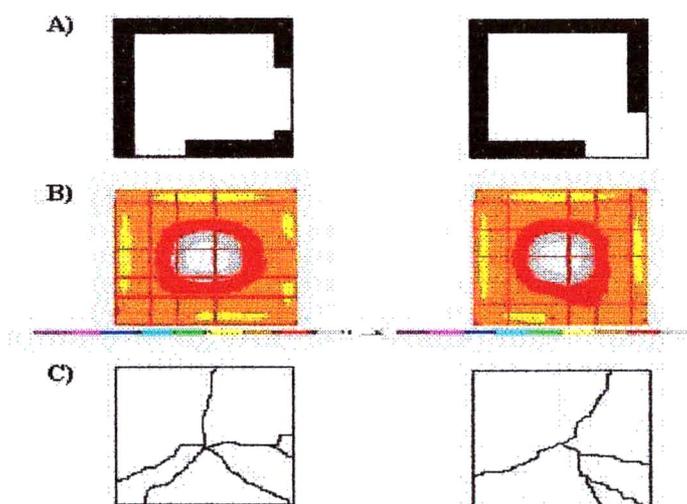


Fig. 3.11.:Estudo do ensaio de flexão em elementos finitos: a) Configuração de apoio das placas, b) análise de tensões no ensaio de flexão feita por elementos finitos em dois casos de descontinuidade no apoio, observando a parte inferior onde ocorre os esforços de tração; c) possível processo de fissuração ocorrido nas placas devido à descontinuidade.

Com isso, podemos observar que o processo de fissuração será diferenciado, havendo uma maior ou menor quantidade de fissura nas placas. No caso de um estudo de eficiência de diferentes tipos de fibras, este efeito se torna muito importante pois como vimos, quanto maior o processo de fissuração, maior será a dissipação de energia, o que acarretará num comportamento diferenciado na curva carga x deflexão. Desta forma, havendo uma maior fissuração, haverá uma maior quantidade de fibras sofrendo um processo de arrancamento, que é de suma importância e diretamente responsável pelo aumento da tenacidade nos compósitos.

Sendo assim, fica a dúvida se o valor medido neste tipo de ensaio realmente reflete a real eficiência de cada tipo de compósito testado, uma vez que a forma de fissuração influi diretamente na tenacidade (curva carga x deflexão) de cada material, podendo causar uma interpretação equivocada.

Entretanto, o ensaio de flexão em placas quadradas continua sendo utilizado com o intuito de se fazer um controle do concreto e do desempenho das fibras, não havendo a certeza se o ganho de tenacidade está vinculado ao tipo, volume ou forma de fibra, ou se é devido aos comportamento de ruptura do material no ensaio.

Apesar de todas essas normas, MORGAN (1995) observa que dificuldades têm sido experimentadas no sentido de se obter uma constância de resultados entre diferentes laboratórios, usando diferentes maquinários para a aplicação de cargas com vários equipamento para medição da deflexão. Também, segundo FIGUEIREDO (1997), pesquisadores acham importante a intenção de vinculação do desempenho pós-fissuração com a matriz, que sofre uma grande instabilidade para baixos volumes de fibras, além da necessidade de comparar os seus resultados com os índices obtidos pela ASTM C1018 (americana) e JSCE-SF4 (japonesa).

3.3.2.8) NOVAS CONFIGURAÇÕES, MEDIÇÕES E PROPOSTAS PARA AVALIAÇÃO DA TENACIDADE

Uma série de novas propostas para ensaio e determinação da propriedade tenacidade, vem sendo apresentadas em várias publicações. BANTHIA E TROTTIER (1995a) propõem uma forma de avaliação da tenacidade, o PCSm (resistência pós-pico a uma deflexão m), que tem como referência a norma japonesa (JSCE-SF4), onde não se utiliza a área do trecho de pré-fissuração. São calculadas resistências de pós-fissuração (PCSm) para vários níveis de deflexão que variam entre, segundo recomendações, de $L/3000$ até $L/150$. A área da região de pré-pico é definida através do ponto de carga de pico e não em relação ao ponto de primeira fissura.

Outra forma de avaliar tenacidade segundo MORGAN, MINDESS E CHEN (1995), é através de níveis de tenacidade que são obtidos pela relação entre resistência residual e resistência de primeira fissura, isso para duas deflexões, uma de $L/600$ e outra de $L/150$ do vão, como podemos observar na tabela 3.5. Esses níveis de tenacidade foram baseados em milhares de curvas, carga x deflexão, e numa ampla pesquisa de trabalhos e projetos de construção, representando o aumento do nível de tenacidade em relação ao volume e eficiência das fibras.

Tab. 3.5.: Níveis de tenacidade em função da resistência residual na flexão (MORGAN, MINDESS E CHEN, 1995).

Níveis de tenacidade	Resistência residual na deflexão	
	L/600 (0,5mm)	L/150 (2,0mm)
0	Concreto sem reforço	
I	15%	5%
II	30%	15%
III	50%	30%
IV	75%	45%

A bibliografia vem apresentando diversas formas da determinação da tenacidade (área sob as curvas carga x deflexão ou tensão x deformação), seja através de ensaios de compressão, de tração ou de flexão, utilizando diversas formas de configurações.

BIOLZI, GUERRINI E ROSATI (1997) utilizaram em seus experimentos, o ensaio de tração direta feito em corpos de prova cilíndricos com um entalhe de 7mm de profundidade ao longo de toda seção transversal, para a obtenção da curva tensão x

deformação, onde pode-se observar o aumento da tenacidade com o aumento do volume de fibra. Além desse ensaio, foram feitos ensaios de flexão e compressão (para obtenção da tenacidade), onde os resultados mostraram alguns aspectos: a quantidade de fibra é importante na compressão quando observada a ductilidade, o módulo de Young praticamente não altera com o teor de fibra e as fibras, no ensaio à flexão, melhoram a resistência de pico, energia de ruptura e tenacidade.

A resistência à tração, nos concretos reforçados com fibras, também tem sido determinada de forma indireta através do ensaio de torção, onde é criada uma tensão no plano perpendicular à seção longitudinal da viga (TAYLOR, LYNDON E BARR, 1997). Medidas de taxas de energia dissipada, em função da área sob a curva carga x deslocamento vertical até o ponto de instabilidade, vêm sendo determinadas através do ensaio de cisalhamento (SOROUSHIAN, ELYAMANY, TLILI E OSTOWARI, 1998).

Em 1991, foi sugerido uma mudança (GOPALARATNAN *et. al.*) no ensaio de flexão em corpos prismáticos, onde passaria a ser observado não a deflexão em relação ao vão central e sim, o deslocamento da abertura de fissura, *CMOD* (crack mouth opening displacement). O ensaio consiste em vigas entalhadas no vão central, ensaiadas à flexão com três pontos de carregamento, modificando o tradicional ensaio de flexão em quatro pontos de carregamento (figura 3.12).

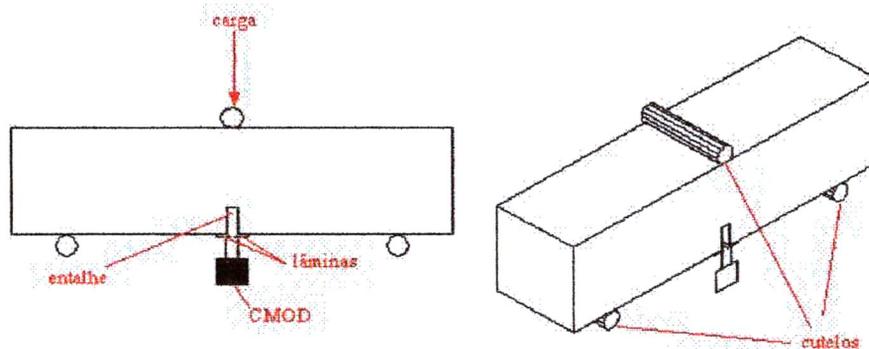


Fig. 3.12.: Ensaio de flexão com três pontos de carregamento, utilizando o sistema CMOD para leitura de abertura de fissura.

JAMET, GETTU, GOPALARATNAN E AGUADO (1995) trabalharam com esta nova forma de medição de tenacidade e citam como principais vantagens com relação ao outro método: I) a relativa facilidade de fabricar e testar, II) lida-se apenas com uma seção crítica e propagação de uma microfissura, fazendo com que a análise e o modelamento sejam fáceis, III) O entalhe força a fissura ao longo do plano, reduzindo a variabilidade do local de fissura e das deformações assimétricas, podendo ocorrer ambas no ensaio em quatro pontos de carga e IV) torna possível ensaiar a tenacidade dos concretos convencionais (sem fibra), onde em ensaios em vigas utilizando metodologia anteriores, a leitura de tenacidade pós-pico era praticamente nula.

Assim sendo, como pôde ser observado ao longo deste capítulo, muito se tem feito e muito ainda há por se fazer, no campo dos concretos reforçados com fibras, principalmente quanto à tenacidade, para que este material de características diferenciadas do concreto convencional possa ser utilizado de forma correta, a fim de que se extraia o máximo proveito dos seus benefícios. Esses esforços não se concentram apenas em novas formas de ensaiar os concretos reforçados com fibras, mas também no intuito de determinar uma maneira de se quantificar tenacidade, seja por classificação ou por índices, pois como disse MINDESS(1995), parece não haver um consenso universal sobre a melhor forma de se avaliar esta propriedade.

4)METODOLOGIA

4.1) DEFINIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Em função do que foi apresentado nos capítulos 2 e 3, referente às formas de avaliação da propriedade tenacidade e as características relacionadas com os concretos reforçados com fibras, um programa experimental foi definido para atender os seguintes objetivos:

- a) Avaliar os concretos reforçados com relação ao tipo de fibra e a resistência da matriz;
- b) Observar as características do concreto fresco com e sem fibra, com relação a trabalhabilidade.
- c) Análise comparativa da resistência a compressão em corpos de prova cilíndricos, para os concretos com e sem a adição das fibras de aço, para a verificação da perda ou ganho nesta propriedade;
- d) Executar ensaios de tenacidade em vigas sujeitas a carregamento em quatro cutelos e analisar os resultados sob a ótica das normas mais utilizadas;
- e) Executar ensaios de tenacidade em placa quadrada, e avaliar os resultados segundo a EFNARC (1996);
- f) Desenvolver um ensaio alternativo de medição de tenacidade (flexão de placas triangulares em quatro pontos);
- g) Tentar estabelecer uma correlação entre os ensaios de tenacidade em placa triangular e quadrada;

O programa experimental está dividido em várias etapas:

- 1) Definição da melhor configuração e confecção de peças para o ensaio de tenacidade em placas triangulares;
- 2) Confecção de peças necessárias para realização dos ensaios de tenacidade em placas quadradas e de flexão em vigas carregadas em quatro cutelos, já normatizados respectivamente pela EFNARC(1996) e JSCE- SF4(1984);
- 3) Seleção, caracterização e proporcionamento dos materiais a serem utilizados;

- 4) Realização dos ensaios de trabalhabilidade, resistência à compressão e tenacidade em vigas e de flexão em placas quadradas e triangulares, utilizando dois tipos de fibras de aço, duas relações água/cimento e três teores distintos destas fibras.

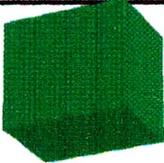
Grande parte das atividades do programa experimental foi realizada no LMCC, Laboratório de Materiais de Construção Civil, do departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Os testes preliminares, fundamentais para a elaboração do ensaio de tenacidade em placas triangulares, contaram com a indispensável colaboração da Universidade de São Paulo (USP), através da utilização dos laboratórios do CPQDCC (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Construção Civil).

O programa experimental pode ser melhor visualizado através das tabelas 4.1 e 4.2, onde são mostrados os tipos e quantidades de fibras, níveis de resistências das matrizes e tipos de ensaios utilizados neste trabalho, a fim de se obter as tenacidades e outras propriedades para a avaliação do concreto reforçado com fibras.

Tabela 4.1- Discriminação e quantificação dos corpos de prova cilíndricos confeccionados no programa experimental.

Matriz	Tipo de fibra	Ensaio de resistência a compressão			Nº de corpos de prova
		Teor de fibra em kg/m ³	Corpos de prova		
			Com fibra	Sem fibra	
35MPa	Colada	20	2	6	8
		40	2	6	8
		80	2	6	8
	Solta	20	2	2	4
		40	4	4	8
		80	2	6	8
45MPa	Colada	20	2	6	8
		40	2	6	8
		80	2	6	8
	Solta	20	2	6	8
		40	2	6	8
		80	2	6	8
Total				92	

Tabela 4.2- Discriminação e quantificação dos corpos de prova utilizados para os estudos de tenacidade.

Matriz (MPa)	Fibras de aço							Números de corpos de prova*
		Prisma de 10x10x40cm (b:h:c)		Placa quadrada de 60x60x10cm (b:c:h)		Placa triangular equilátera de 60cm (a)		
		Quantidade de fibra em Kg/m ³	Corpos de prova	Quantidade de fibra em Kg/m ³	Corpos de prova	Quantidade de fibra em Kg/m ³	Corpos de prova	
35	Aço colada 	20	4	20	4	20	4	12
		40	4	40	4	40	4	12
		80	4	80	4	80	4	12
	Aço solta 	20	4	20	4	20	4	12
		40	4	40	4	40	4	12
		80	4	80	4	80	4	12
45	Aço colada 	20	4	20	4	20	4	12
		40	4	40	4	40	4	12
		80	4	80	4	80	4	12
	Aço solta 	20	4	20	4	20	4	12
		40	4	40	4	40	4	12
		80	4	80	4	80	4	12
Total								144

Como pôde ser observado nas tabelas 4.1 e 4.2, foram moldados 236 corpos de provas utilizados para a obtenção dos resultados e mais 12 peças para os acertos finais dos ensaios, somando um total de 248. Para conduzir estes testes fixou-se as variáveis do estudo, sendo estas descritas abaixo:

- **Tipos de ensaios** : Foram realizados três tipos de ensaios, para a determinação da tenacidade, sob a ótica das normas mais utilizadas para esta propriedade, que são a européia, japonesa e americana: O ensaio em vigas (tração na flexão) e o ensaio em placas quadradas e triangulares, todos com deformação controlada;
- **Tipos de fibras** : Utilizou-se dois tipos de fibras de aço colada e solta, contendo extremidades deformadas;
- **Volume de fibras** : Para observar-se o ganho de tenacidade, foram utilizados três teores de fibras em massa de 20, 40 e 80 kg/m³, equivalentes a aproximadamente 0,25%, 0,50% e 1% em volume de concreto;
- **Resistência à compressão** : Foi observada também a variação da resistência à compressão para concretos com e sem fibras de aço, para os dois tipos de fibras e os seus respectivos teores.

Em função das variáveis descritas acima, tentou-se analisar os concretos reforçados com fibras para a obtenção de algumas respostas e características peculiares a esse material.

4.2) DESENVOLVIMENTO DO ENSAIO DE TENACIDADE EM PLACA TRIANGULAR

Como já abordado no item 3.3.1, os ensaios de flexão em vigas apresentam como vantagem o conhecimento prévio da forma de fissuração dos corpos de prova. Entretanto produzem resultados geralmente dispersos, devido à reduzida área fissurada, que está solicitada à tração e conseqüente pequeno número de fibras mobilizado durante o ensaio.

Já o ensaio em placas quadradas, especialmente desenvolvido para os concretos projetados, apresenta como vantagem a sollicitação de uma seção tracionada bastante grande, fazendo com que um grande número de fibras seja mobilizado durante o ensaio. Contudo, como não existe uma disposição previsível das fissuras geradas durante os ensaios, os resultados obtidos também são dispersos e muitas vezes difíceis de serem analisados.

Esses problemas de alteração ou variabilidade na configuração de fissuras no ensaio de placas quadradas, são geralmente decorrentes de um empenamento sofrido pelos corpos de prova no processo de confecção, proporcionado pelo jato de projeção. Como o ensaio é realizado com a placa apoiada nas quatro bordas, este apoio fica comprometido pelas imperfeições das amostras, ocasionando diferentes quantidades de fissuras de um corpo de prova para outro. Com isso, os corpos de prova que possuem uma maior quantidade de fissuras sofrerão um processo de arrancamento mais prolongado, o que ocasionará um aumento na dissipação de energia, proporcionando um ganho na propriedade tenacidade, que não estará diretamente relacionado com o tipo, a forma ou a quantidade de fibras no compósito.

Desta forma o desenvolvimento do ensaio de tenacidade em placa triangular apoiada em três pontos, surgiu da necessidade de se obter um ensaio onde o processo de fissuração fosse conhecido e previsível, gerando uma grande área fissurada, sollicitada a esforços de tração, permitindo a mobilização de um maior número de fibras do compósito durante o teste.

É importante salientar e deixar bem claro que a proposta do ensaio em placa triangular, não tem o intuito de substituir o teste de tenacidade em corpo de prova quadrado, proposto pela EFNARC(1996) e pela NBP.Nº7(1993), e sim de trabalhar conjuntamente para uma melhor avaliação da propriedade tenacidade. Deve-se lembrar que este ensaio foi concebido para tentar reproduzir uma condição de sollicitação em concretos projetados, utilizados no revestimento de túneis, onde se utilizam tirantes fixados em rocha.

Assim sendo, o carregamento sofrido na camada de proteção do maciço, não está sujeito a uma distribuição de carga e reações, como é proposto para a placa triangular. A carga é concentrada, mas o sistema de apoio possui uma configuração aleatória podendo estar

contínua na região de contorno do tirante ou com algumas descontinuidades (pontos de menor tensão), o que no ensaio de placa quadrada estaria muito bem representado. Uma vez havendo uma distribuição de esforços uniforme, o diagrama de tensões se apresenta como sendo radial podendo apresentar quaisquer tipos de fissuração, como pode ser visto na figura 4.1

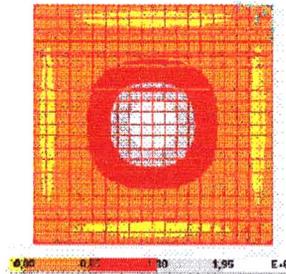


Fig. 4.1- Análise em elementos finitos (SAP2000) mostrando a região de tensões máximas de tração, ocorridas para o concreto no ensaio em placa quadrada.

Desta forma a realização do ensaio de tenacidade em placa triangular apoiada em três pontos e carregada centralmente, teria a função de proporcionar uma condição mais bem definida para avaliar-se o desempenho de tipos e formas de fibras diferenciadas, assim como o comportamento destas dentro de matrizes de diferentes, além de uma possível comparação com o emprego de tela.

O ensaio em placa triangular, diferentemente do em placa quadrada, não possui uma norma específica para o teste, tendo que ser concebido em sua totalidade para que pudesse proporcionar uma estudo confiável de tenacidade. Como foi citado anteriormente, a placa triangular possui um processo de fissuração totalmente previsível, e uma região de fissuração bem definida, como pode ser observado através de uma simulação em elementos finitos (SAP2000). A simulação mostra os esforços ao qual a placa estaria sujeita, demonstrando uma região de fissuração na zona tracionada bem delimitada, observada na figura 4.2.

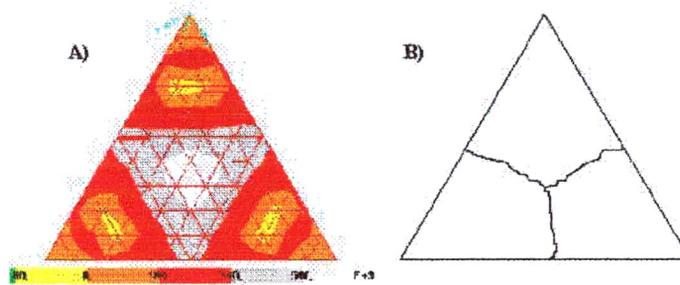


Fig. 4.2- Placas triangulares sujeitas ao ensaio de flexão em quatro pontos: A) estudo em elementos finitos (SAP2000) mostrando a região inferior da placa, onde ocorrem as maiores tensões de tração com a possível região de ruptura, B) Exata configuração de fissuração no ensaio de flexão em placas triangulares.

A concepção do ensaio de flexão em placa triangular baseou-se na metodologia empregada em um estudo feito por PRUDÊNCIO (1993), para verificar a variação da resistência do concreto devido à penetração do íon sulfato. O referido autor, utilizou um ensaio de flexão em discos de concreto de 6,3mm de espessura em média, obtidas por corte em testemunhos extraídos, apoiados em três pontos. Neste ensaio foi observado que o plano de ruptura respeitava sempre a mesma configuração de três fissuras específicas, sendo assim tomada como base para o ensaio de flexão em placas triangulares, também apoiadas em três pontos. A opção pela geometria triangular, ao invés da circular, deu-se pela facilidade de confecção das formas e pela redução, pela metade, no peso dos corpos de prova.

O ensaio de placa triangular utiliza como apoio três pontos, que é suficiente para definir um plano, ou seja, mesmo que a placa tenha algum empenamento, ocorrerá o acomodamento perfeito dos corpos de prova neste apoio. Mesmo havendo a irregularidade na superfície a ser apoiada, é importante salientar que o processo de fissuração continuará sendo de apenas três fissuras, como ilustrado na letra B da figura 4.2.

O processo de elaboração da configuração deste ensaio passou por testes preliminares, onde foram moldadas placas triangulares equiláteras em escala reduzida (aresta =30cm e altura =5cm). Para a realização dos ensaios utilizou-se a norma europeia (EFNARC, 1996) como referência, e os primeiros ensaios nas placas com dimensões reduzidas, foram realizados com um carregamento centrado na parte superior em uma área circular, através de um cilindro metálico e os apoios eram três esferas situadas próximas aos vértices da placa. Observou-se que esta forma de carregamento concentrava tensões em algumas placas, proporcionando o aparecimento de apenas duas fissuras, devido a falta de um contato perfeito na parte superior, ocasionado por imperfeições na superfície de carregamento.

Após isto, ao invés de utilizar uma aplicação de carga em uma área circular, procurou-se aplicar o carregamento de forma pontual no centro, utilizando uma esfera. Com esta modificação, 100% da amostras testadas sofreram o processo de fissuração desejado em três fissuras bem distintas, sendo assim considerada esta configuração de apoio e carregamento como a final.

As medidas de deflexão, nos ensaios de tenacidade, devem ser realizadas de modo que se possa evitar ou eliminar qualquer tipo de deformação extra, que venha a ser computada no teste. Uma das formas de se fazer esta medição, seria pela decida do pistão da prensa, uma vez que a deformação é controlada e monitorada pelo equipamento. Mas esta forma de leitura pode proporcionar uma deflexão final, cerca de 3 a 3,5mm maior que a deflexão real, devido ao esmagamento do corpo de prova junto ao apoio e logo abaixo do ponto de aplicação de carga, e estas deformações deveriam ser contabilizadas e descontadas da leitura do equipamento.

Para o ensaio de tenacidade em placa quadrada, na grande maioria dos trabalhos, a medição da deflexão é realizada por um único medidor de deformação posicionado na parte central inferior do corpo de prova (FIGUEIREDO, 1997). Esta forma de medição apresenta como dificuldade para sua realização os seguintes problemas:

- 1) A base utilizada como apoio para as placas é confeccionada em perfis metálicos e deve percorrer toda a borda do corpo de prova, o que dificulta extremamente tanto a fixação como o manuseio do medidor de deformação, caso haja algum problema.

- 2) Esta forma de medição não consegue eliminar as deformações causadas pelo esmagamento do corpo de prova no apoio, a menos que o extensômetro esteja fixado no próprio corpo de prova.
- 3) Neste ensaio, o extensômetro fica posicionado na parte inferior central do corpo de prova, como dito anteriormente. Por sua vez, é nesta região onde acontece o processo de abertura de fissuras. Desta forma, a agulha do extensômetro poderá entrar facilmente dentro de uma dessas aberturas, podendo comprometer todo o teste, principalmente na obtenção do valor de 25 mm de deflexão exigido pela EFNARC (1996).

Sendo assim, tanto para o ensaio em placa quadrada como em placa triangular, optou-se por realizar as leituras de deformação pela parte superior do corpo de prova, utilizando dois extensômetros fixados no dispositivo de aplicação de carga em posição adjacente ao corpo de prova. Com isso pôde-se eliminar estes inconvenientes, além da deformação extra causada pela acomodação do corpo de prova no apoio.

Nos testes preliminares, com as leituras realizadas na parte superior das placas triangulares, a extremidade dos extensômetros foi apoiada em pequenas chapas metálicas, previamente fixadas. Posteriormente, utilizou-se uma peça metálica triangular, vazada na parte central, onde o apoio na superfície do corpo de prova foi feito por parafusos que permitiam a regulagem do nível da superfície mantendo-a sempre plana. As pequenas chapas metálicas, posteriormente foram retiradas, pois as superfícies dos corpos de prova utilizados neste trabalho, eram consideravelmente planas e permitiam o deslizamento dos parafusos (com pontas arredondadas) à medida que a placa flexionava. Entretanto, no caso de peças confeccionadas com concreto projetado, que possuem uma superfície muito mais irregular, recomenda-se a utilização das referidas chapas ou a regularização prévia dos pontos de contato dos parafusos por meio de argamassa.

Apesar das deformações de acomodação terem sido eliminadas, a deformação por esmagamento do concreto abaixo do ponto de aplicação de carga, no ensaio de placa quadrada, ainda persiste. Devido a isto, para o ensaio de flexão em placa triangular projetou-se um dispositivo que pudesse aplicar o carregamento pontual e, ao mesmo tempo, abrigar um extensômetro, que seria responsável pela medição desta deformação extra, sendo posteriormente retirada das leituras totais de deflexão. Este dispositivo se

resume em um corpo cilíndrico com duas aberturas laterais e com uma peça semi-hesférica vazada, acoplada na parte inferior, responsável pela aplicação pontual do carregamento. As duas aberturas foram confeccionadas para poder-se observar as leituras de deformação, no caso da utilização de medidores de deformação digitais ou analógicos, sendo os dois furos necessários para que houvesse uma distribuição de carga uniforme por todo o dispositivo de aço. Este dispositivo pode ser melhor visualizado através da figura 4.3.

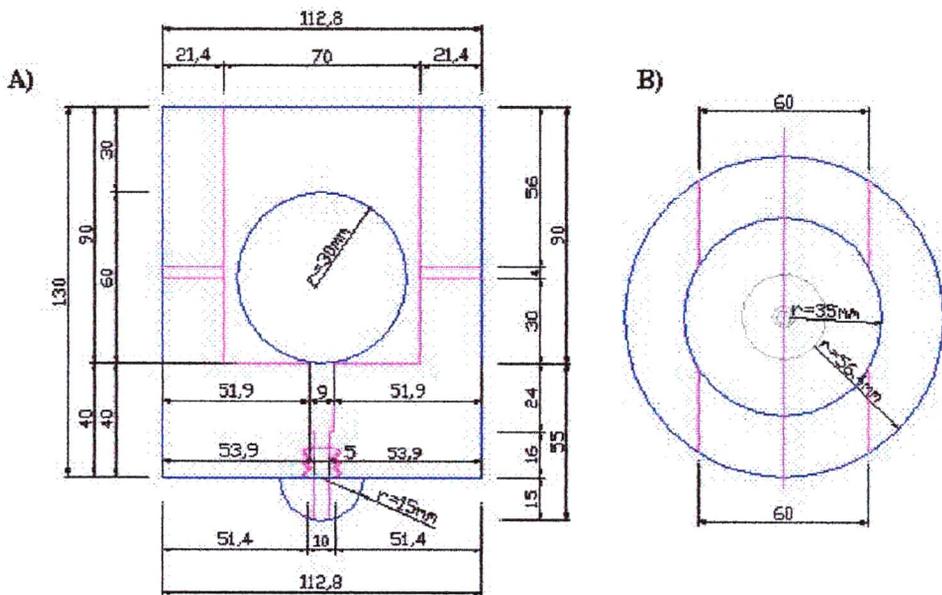


Fig. 4.3- Dispositivo cilíndrico utilizado para medir a deformação central provocada pelo esmagamento da superfície puncionada: A) corte longitudinal do cilindro com as devidas cotas, B) corte transversal do cilindro.

Os medidores de deformação, extensômetro ou medidores digitais, utilizados dentro do dispositivo, eram fixados por parafusos através de duas aberturas laterais (fig. 4.3, A). Para efetuar as medições de deformação, foram projetados prolongadores que acoplavam-se nos medidores. Para que fossem feitas as medidas de deformação, foi produzido um furo na parte central do corpo de prova de 2,5 a 3cm de profundidade, onde a extremidade do prolongador foi apoiada. Sendo assim, enquanto o ensaio se realizava e a cravação do dispositivo ocorria, a extremidade do prolongador permanecia apoiada no fundo proporcionando a medição do quanto o dispositivo tinha decido em relação à superfície, sendo este valor posteriormente retirado da medida de deflexão total.

Após definido o uso do dispositivo de aplicação de carga para o ensaio de flexão em placa triangular, foram feitos os primeiros testes em escala real, utilizando o concreto projetado empregado no revestimento primário do túnel da BR 101 em Balneário Camburiu. Foram moldadas nove placas triangulares de 60cm de lado e espessura de 10cm, utilizando dois tipos de fibras diferentes. Estas placas foram transportadas, posteriormente, para a Universidade de São Paulo (USP), onde com a colaboração e apoio do prof. Dr. Antônio Domingues de Figueiredo, foram realizados os ensaios no laboratório do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Construção Civil da USP, contando também com a colaboração dos técnicos de laboratório.

Os primeiros ensaios foram realizados utilizando três medidores de deformação digitais, sendo dois acoplados externamente e um utilizado dentro do dispositivo para a medição da deflexão central. Passada esta fase para a avaliação da forma de medição e do comportamento do conjunto, o restante dos testes foram executados de forma a proporcionar uma leitura automática das deflexões externas, utilizando dois sensores de deslocamento baseado em LVDTs (*Linear Voltage Differential Transducer*) acoplados externamente, e um medidor analógico na parte central para medir o cravamento do dispositivo, como pode ser visto na figura 4.4.

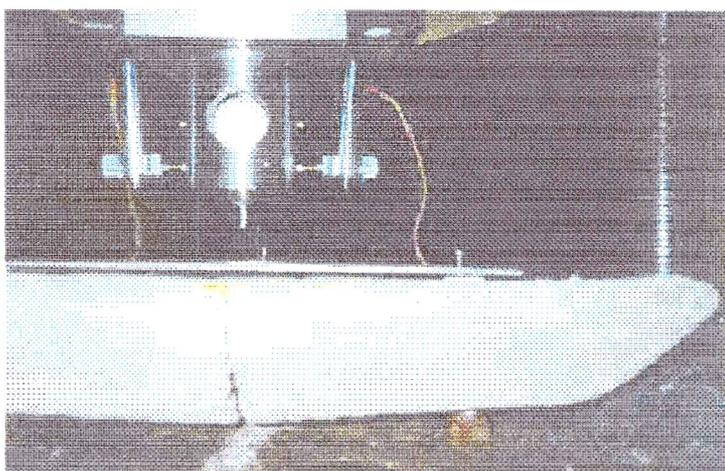


Fig.4.4- Ensaio de flexão em placa triangular, mostrando todos os dispositivos utilizados (dispositivos central, de apoio e de leitura de deflexão).

Como foi observado nos ensaios preliminares, todas as placas ensaiadas na USP respeitaram e repetiram o comportamento de fissuração que proporcionou o aparecimento de três fissuras definidas, alcançando assim as expectativas. Após a

análise dos gráficos obtidos destes testes finais, concluiu-se que o ensaio estava potencialmente preparado para a avaliação da propriedade tenacidade, proporcionando uma suavização da curva no trecho pós-fissuração, mostrando o trabalho das fibras.

A configuração final do ensaio, realizada na Universidade Federal de Santa Catarina, utilizou três extensômetros baseado em *strain gauges*, onde dois foram fixados externamente, para fazer as medidas de deflexão pela parte superior do corpo de prova, sendo o valor final uma média entre eles. Estes medidores foram fixados à prensa através de braços magnéticos, que permitiam ótima mobilidade, proporcionando o perfeito posicionamento destes para a melhor leitura. Na parte central, conjuntamente com o dispositivo aplicador de carga, existia um extensômetro responsável pela medida de cravação, que posteriormente era subtraída da média das medidas de deflexão. Para a obtenção dos valores de carga foi utilizado uma célula de carga de capacidade de 20T, que vinha apoiada acima do dispositivo, localizado na parte central. Esta configuração pode ser melhor visualizada através da figura 4.5.

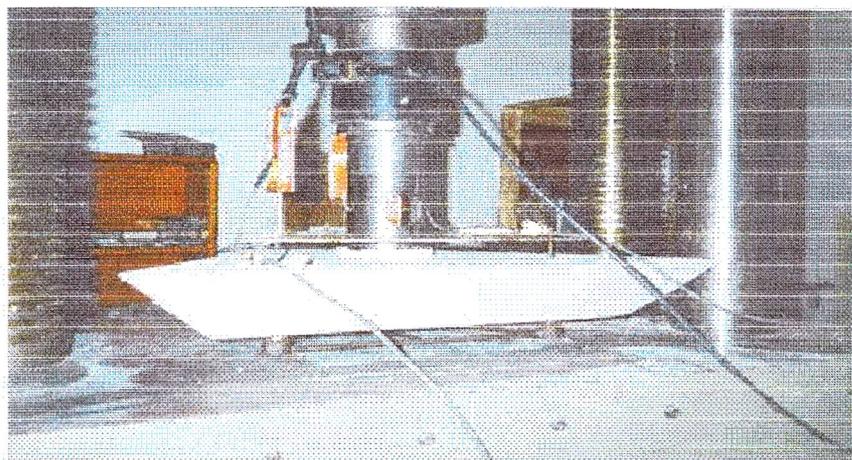


Fig. 4.5- Configuração final do ensaio de flexão em placa triangular, utilizando polivinil expandido como apoio do dispositivo central.

A aplicação de carga foi feita através de uma prensa servo-controlada, onde se conseguia aplicar uma velocidade de deformação ou de decida do pistão constante, exigida tanto para este ensaio como para os outros dois empregados neste programa experimental. A velocidade de deformação e o valor máximo de deflexão impostos ao ensaio, foram baseados na norma europeia EFNARC(1996), sendo respectivamente de 1,5mm/min e 25mm

As leituras feitas eram capturadas por um sistema de aquisição de dados (data logger), HP-VXI com voltímetro de $6^{1/2}$ dígitos, que proporcionou uma maior precisão das medidas. A velocidade de aquisição de dados foi fixo de 1/segundo, sendo que este valor poderia ser alterado ao longo do ensaio, principalmente perto da região de carga máxima, o que conduziria a uma leitura mais real na área crítica de instabilidade pós-pico. O software utilizado no ensaio foi o VEE da *Hewlett Packard*, para o qual foi desenvolvido um método específico para a aquisição dos dados. Este mesmo software foi empregado no monitoramento dos ensaios de tenacidade em vigas e nas placas quadradas. Através dos resultados armazenados neste programa, obteve-se as curvas de carga x deflexão, das quais foram retidas as demais informações que serão apresentadas posteriormente.

4.3) ADEQUAÇÃO PARA OS ENSAIOS EM PLACA QUADRADA E EM VIGA

Para a realização dos ensaios de flexão em placas quadradas e em vigas carregadas em quatro pontos, tiveram que ser confeccionados dispositivos específicos prescritos pelas normas EFNARC(1996), ASTM C1018(1994b) e JSCE-SF4(1984).

Para o ensaio em placas quadradas se adequar à norma européia, foi necessária a confecção de uma base metálica, com perfis de viga I, para suportar o peso dos corpos de prova além do carregamento imposto durante o ensaio. Também foi fabricada uma pastilha de aço de 10x10 cm, que foi utilizada para transferir o carregamento para as amostras, através da parte central.

Para o ensaio de flexão em prismas, o carregamento da parte superior do corpo de prova foi aplicado em dois pontos equidistantes do vão central. Esta peça possuía folgas de 20mm, que davam a capacidade de perfeito contato com o topo da amostra, mesmo que este possuísse algum empenamento, conseguindo, assim, aplicar a carga uniformemente. Para a fixação do extensômetro utilizou-se o sistema YOKE, prescrito na norma japonesa, para eliminar as deformações externas decorrentes da realização do ensaio, proporcionando um valor confiável de deflexão. Desta forma, o Laboratório de Materiais de Construção Civil do curso de Engenharia Civil da UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina), ficou capacitado a realizar estes ensaios com ótima precisão, dominando assim as técnicas mais usuais para a medição da propriedade tenacidade.

4.4) SELEÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E PROPORCIONAMENTO DOS MATERIAIS

4.4.1) CIMENTO

O cimento utilizado nesta pesquisa, foi o cimento Portland de alta resistência inicial, CPV-ARI. Optou-se por este tipo de cimento porque as 10 amostras deveriam ser moldadas em um mesmo dia, tendo de ser desmoldadas no dia seguinte, sendo necessário que os corpos de prova apresentassem uma resistência apreciável em 24 hs, para evitar danos nas peças. As características deste cimento podem ser encontradas na tabela 4.3.

Tabela 4.3- Características físicas, químicas e mecânicas do cimento CPV-ARI.

Determinações	Método de ensaio	Unidade	Valores obtidos	Exigência da norma NBR 5733
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS				
Massa Específica absoluta	NBR 6474	g/cm ³	3,14	-
Finura – Índice de finura	NBR 7215	%	0,12	≤ 6,0%
Finura – Área específica	NBR 7224	m ² /kg	499,89	≥ 300 m ² /kg
Expansibilidade à quente	-	mm	0,45	-
Água de consistência normal	-	%	29,65	-
Início de pega	NBR 7115	H	2:52	≥ 1h
Fim de pega	NBR 7115	H	3:51	-
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS				
Perda ao fogo	NBR 5743	%	3,69	≤ 4,0%
Resíduo insolúvel	NBR 5744	%	0,70	< 1,0%
Equivalente alcalino	-	%	0,46	-
SiO ₂	NBR 5749	%	18,38	-
Al ₂ O ₃	NBR 5749	%	4,12	-
Fe ₂ O ₃	NBR 5749	%	3,34	-
CaO	NBR 5749	%	59,97	-
MgO	NBR 5749	%	6,00	≤ 6,5%
K ₂ O	NBR 5747	%	0,89	-
Na ₂ O	NBR 5747	%	0,00	-
SO ₃	NBR 5745	%	3,43	≤ 3,5%

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

Resistência a compressão				
1 dia	NBR 7215	MPa	26,00	$\geq 11\text{MPa}$
3 dias			35,12	$\geq 22\text{MPa}$
7 dias			41,09	$\geq 31\text{MPa}$
28 dias			48,53	

Fonte: laboratório da companhia de cimento Portland Rio Branco, Votoran, outubro, 1998.

Como pode ser observado na tabela 4.3, todos os valores obtidos na caracterização estão de acordo com as normas relativas ao cimento Portland CPV-ARI (NBR 5733), estando assim apto para a utilização.

4.4.2) AGREGADOS

Procurou-se utilizar agregados que fossem compatíveis com os recomendados para a confecção dos concretos reforçados com fibras, citados na bibliografia estudada. Além disso, foi proposta deste trabalho que o concreto confeccionado fosse o mais parecido possível com a composição de materiais encontrada nos concretos projetados, onde são realizados amplamente os ensaio de tenacidade para caracterização do material.

4.4.2.1) Agregado graúdo

Para a confecção dos concretos reforçados com fibras em geral, não recomenda-se agregados graúdos maiores do que 19mm, apesar de se conhecer o uso de agregado de 38mm com sucesso (ACI COMMITTEE 544.3R-93). Entretanto, para DANTAS (1987) o agregado graúdo deve ficar em torno de 9,5mm para proporcionar uma boa mistura, sendo este valor amplamente utilizado para os concretos projetados. Na tabela 4.4 consta a caracterização do agregado graúdo utilizado na confecção dos concretos com fibras

Tabela 4.4- Caracterização do agregado graúdo.

Determinações	Valores obtidos		Norma	
Composição granulométrica	Abertura de peneiras ABNT(mm)	Porcentagem retida em massa (%)		NBR 7217
		Individual	Acumulada	
	19	0	0	
	12,5	0	0	
	9,5	1	1	
	6,3	29	30	
	4,8	37	67	
	2,4	25	92	
	1,2	4	96	
	Fundo	4	100	
Total	100	-		
	Valores obtidos	Exigências de norma		
Dimensão máxima característica (mm)	9,5	-		NBR 7217
Módulo de finura	5,44	-		
Massa específica (g/cm ³)	2,632	-		NBR 9777
Massa unitária (g/cm ³)	1,34	-		NBR 7251
Material Pulverulento %	1,36	< 5%		NBR 7219

4.4.2.2) Agregado miúdo

As características referentes ao agregado miúdo podem ser observadas na tabela 4.5, sendo este caracterizado pela análise granulométrica como areia média (zona 3) pela NBR 7211 (1983).

Tabela 4.5- Caracterização do agregado miúdo.

Determinações	Valores obtidos		Norma	
	Abertura de peneiras ABNT(mm)	Porcentagem retida em massa (%)		
		Individual	Acumulada	
Composição granulométrica				NBR 7217
	9,5	0	0	
	6,3	0	0	
	4,8	0	0	
	2,4	2	2	
	1,2	17	19	
	0,6	30	49	
	0,3	32	81	
	0,15	14	95	
	Fundo	5	100	
	Total	100		
	Valores obtidos	Exigências de norma		
Dimensão máxima característica (mm)	2,4	-		NBR 7217
Módulo de finura	2,46	-		
Massa específica (g/cm ³)	2,658	-		NBR 9776
Matéria orgânica (ppm)	OK	< 300ppm		NBR 7220
Massa unitária (g/cm ³)	1,439	-		NBR 7251
Material Pulverulento %	2,34	< 5%		NBR 7219

4.4.3) FIBRAS

As fibras de aço, utilizadas neste trabalho, foram de dois tipos com extremidades deformadas para uma melhor aderência, pois as fibras do tipo enrugadas, de superfície onduladas ou com extremidades em ganchos, produzem resistência superior a das fibras lisas para uma mesma concentração em volume, ou ainda, permitem uma resistência compatível com as lisas, mesmo utilizando um volume inferior (ACI 544.4R-88).

Uma das fibras com extremidades deformadas, foi fornecida em feixes colados com um tipo de cola solúvel em água que quando adicionadas no concreto, através do processo de mistura, passavam a ter uma distribuição uniforme e individual por toda massa. O outro tipo de fibra, também em aço com extremidades deformadas, foi fornecida em unidades separadas (soltas).

As fibras de aço com extremidades deformadas foram escolhidas, pois além de possuírem ótima resistência ao processo de mistura, apresentaram bons resultados no estudo realizado por FIGUEIREDO (1997).

A ASTM A820 (1991) traz especificações para as fibras de aço utilizadas no concreto reforçado, tais como tolerância na variação das dimensões, resistência à tração necessária, geometria e outros requisitos para um maior controle e aceitação do material a ser empregado. As características das fibras utilizadas podem ser observadas através da tabela 4.6

Tabela 4.6- Características das fibras de aço colada (ZP 305) e solta (RL 45/30 BN).

Características	Fibra de aço: ZP 305 (colada) Valores obtidos (média de 18 amostras)	Fibra de aço RL 45/30 BN (solta) Valores obtidos (média de 18 amostras)
Bitola (mm)	0,544	0,644
LR da ancoragem (N/mm ²) *	982,23	918,7
LR do corpo (N/mm ²) *	1337,67	1262,1
LR anc./LR corpo (%)	73,48%	72,73%
Comprimento da fibra (mm)	30,28	28,80
Fator de forma (comp./bitola)	55,66	44,72

* LR : tensão de ruptura em N/mm².

Fonte: Laboratório da companhia Belgo-Mineira Bekaert Arames S.A., situada em Hortolândia-SP, maio, 1999.

4.4.4) ADITIVO

Os problemas com relação à diminuição da trabalhabilidade com a adição de maiores volumes de fibras, podem ser resolvidos com a utilização de aditivos redutores de água, que, possuindo boa compatibilidade com o cimento, fornecem concretos mais fluidos, proporcionando a utilização de baixas relações água/cimento sem a necessidade de se aumentar significativamente a quantidade de cimento.

Para esse estudo, foram empregados aditivos do tipo plastificante e superplastificante, denominados respectivamente de PLASTIMIXER-N e SIKAMENT-300, da marca SIKA. A escolha destes, se deu devido aos bons resultados obtidos nos trabalhos realizados por SPONHOLZ (1998) e GAVA (1999), no Laboratório de Materiais de Construção Civil desta Universidade. As características destes aditivos podem ser vistas na tabela 4.7

Tabela4.7- Características dos aditivos.

Nome	Tipo	Densidade (g/cm ³)	Teor de sólidos (%)	Valores recomendados %
PLASTIMIXER-N	plastificante	1,16	30	0,2 a 0,5
SIKAMENT-300	superplastificante	1,21	38	0,6 a 3

4.4.5) ÁGUA

Para a confecção dos corpos de prova utilizou-se a água oriunda da rede de abastecimento local, sendo que para cura dos corpos de prova cilíndricos utilizou-se uma mistura de água e cal.

4.4.6) PROPORCIONAMENTO DOS MATERIAIS

Para a obtenção dos traços, foi fixado um valor piloto de 1:3,8 (cimento:agregados), sendo este comumente utilizado na produção dos concretos projetados por via úmida. Este valor também se assemelha com os encontrados por FIGUEIREDO (1997) na reconstituição de traços. Apesar de tentar-se utilizar um concreto moldado semelhante ao concreto projetado, é notório que existem diferenças reológicas e com relação ao nível de compactação.

Para promover uma melhor trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras, segundo o ACI 544-3R(1993), é necessário uma maior quantidade de pasta na mistura. Além disso, no caso de concreto projetado, é fundamental um teor mínimo de argamassa para minimizar a reflexão dos agregados e fibras. Vários são os valores sugeridos na bibliografia. DANTAS (1987) recomenda o valor de 60% e FIGUEIREDO (1997), na dosagem do concreto projetado por via seca, utilizou 70,5%. Por isso utilizou-se um valor de teor de argamassa (α) de 68%. Esse teor foi fixado na confecção dos concretos utilizados nos testes preliminares de definição do ensaio de flexão em placa triangular e mostrou-se adequado.

Definido este teor de argamassa, foram utilizados dois traços sendo 1:4,0 e 1:3,7 (1:m), para que se pudesse obter duas resistências diferentes, sendo uma estimada em 35 MPa e outra em 45 MPa, respectivamente. A relação água/cimento (a/c) foi fixada em 0,65 para o maior valor de m e 0,50 para o outro, sendo que o abatimento do tronco de cone

ficou estabelecido como sendo de 100mm para a menor relação a/c sem aditivo, a fim de se proporcionar uma boa trabalhabilidade. Ao iniciar-se o programa experimental propriamente dito, utilizou-se, na primeira massada, uma relação a/c de 0,63 para evitar uma possível fluidez exagerada. Entretanto, constatou-se posteriormente que este valor foi insuficiente, não proporcionando um abatimento do tronco de cone adequado, sendo então alterado para o valor final de 0,65. A relação água/materiais secos (H) ficou em torno de 10,6% para a/c de 0,5 e de 13% para a a/c de 0,65, através do uso diferenciado de aditivos.

Definidos os traços a serem utilizados, foram produzidas 13 misturas diferenciando resistência, teor e tipo de fibra, sendo que o primeiro conjunto foi utilizado para os acertos finais de todos os ensaio que seriam realizados, evitando assim qualquer falha nos procedimentos. As tabelas 4.8 e 4.9 mostram as composições utilizadas para a confecção das amostras.

Tabela 4.8- Proporcionamento das misturas para o traço 1:4,0.

MISTURAS DO TRAÇO 1:4,0 (1:2,4:1,6)							
Materiais		M3520as	M3540as	M3580as	M3520ac	M3540ac	M3580ac
Cimento (kg/m ³)		406,32	403,07	402,86	403,07	403,07	402,86
Areia (kg/m ³)		975,16	967,36	966,86	967,36	967,36	966,86
Brita (kg/m ³)		650,11	644,93	644,57	644,93	644,93	644,57
Água (l/m ³)		255,89	262,00	261,86	262,00	262,00	261,86
Plastificante (l/m ³)		1,22	1,21	1,61	1,21	1,21	1,61
Fibra (kg/m ³)	Solta	20	40	80	-	-	-
	Colada	-	-	-	20	40	80

Onde: M3520as- Concreto de 35 MPa e 20 kg/m³ de fibra de aço solta

M3540as- Concreto de 35 MPa e 40 kg/m³ de fibra de aço solta

M3580as- Concreto de 35 MPa e 80 kg/m³ de fibra de aço solta

M3520ac- Concreto de 35 MPa e 20 kg/m³ de fibra de aço colada

M3540ac- Concreto de 35 MPa e 40 kg/m³ de fibra de aço colada

M3580ac- Concreto de 35 MPa e 80 kg/m³ de fibra de aço colada

Tabela 4.9- Proporcionamento das misturas para o traço 1:3,7.

MISTURAS DO TRAÇO 1:3,7 (1:2,2:1,5)							
Materiais		M4520as	M4540as	M4580as	M4520ac	M4540ac	M4580ac
Fibra (kg/m ³)	Solta	20	40	80	-	-	-
	Colada	-	-	-	20	40	80
Cimento (kg/m ³)		447,64					
Areia (kg/m ³)		984,79					
Brita (kg/m ³)		671,50					
Água (l/m ³)		223,86					
Plastificante (l/m ³)		1,79					
Superplastificante (l/m ³)		6,71					

Onde: M4520as- Concreto de 45MPa e 20kg/m³ de fibra de aço solta

M4540as- Concreto de 45MPa e 40kg/m³ de fibra de aço solta

M4580as- Concreto de 45MPa e 80kg/m³ de fibra de aço solta

M4520ac- Concreto de 45MPa e 20kg/m³ de fibra de aço colada

M4540ac- Concreto de 45MPa e 40kg/m³ de fibra de aço colada

M4580ac- Concreto de 45MPa e 80kg/m³ de fibra de aço colada

4.5) DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

Os ensaios que serão especificados a seguir foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Para a realização dos testes foram necessárias a confecção e moldagem dos corpos de prova, que são também especificados a seguir. Os ensaios de flexão em placas triangular, quadrada e em prismas e de resistência a compressão, foram executados após 64 dias de cura, uma vez que a idade não era foco deste estudo.

4.5.1) CONFECÇÃO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

O desempenho das fibras no concreto reforçado com fibras, moldado ou projetado, depende fortemente da suscetibilidade destas em não sofrerem problemas físicos durante a mistura ou processo de projeção (ASTM C1116-91).

A norma americana ASTM C1116 (1991) especifica padrões para a confecção dos concretos reforçados com fibras e concretos projetados, através de recomendações

desde a dosagem até o lançamento e amostragem a ser utilizada para a caracterização. Contudo, o importante para a confecção dos concretos reforçados é com relação à forma de adição das fibras, que podem sofrer empelotamento mesmo antes da sua colocação na mistura, podendo comprometer a homogeneidade .

Sendo assim, definido o proporcionamento dos materiais para as 13 misturas a serem executadas, passou-se para a produção dos concretos que contou com uma betoneira de eixo inclinado de 320 l, preocupando-se especialmente com o problema de empelotamento das fibras. As 13 misturas foram executadas em 13 dias consecutivos, sendo rodados 330 l a cada dia, somando um total de 4,29 m³ de concreto ao final de todo o programa experimental. É importante lembrar que o primeiro lote foi utilizado apenas para os acertos finais com relação aos ensaios.

A ordem de colocação dos materiais foi a mesma desde o começo, sendo mantida constante por todo processo mostrado a seguir:

- 1) 100% de brita,
- 2) 100% de areia,
- 3) 100% de cimento.

Para evitar perda de material pela mistura feita com os materiais seco (sem a adição de água), principalmente o cimento, a boca da betoneira era tampada até a obtenção de mistura uniforme. Após a produção desta mistura seca, a água era adicionada aos poucos, até um valor aproximado de 50%. Feito isto, os 50% restantes eram utilizados em conjunto com o plastificante, para os traços de relação água/cimento 0,65, sendo que para a a/c de 0,50, este valor foi completado com mais plastificante e superplastificante, observando se a mistura encontrava-se completamente desgrudada da betoneira (JSCE-SF1, 1984). Posteriormente à observação de completa homogeneidade da mistura, as fibras eram adicionadas manualmente com a betoneira em pleno funcionamento, de forma pausada até que se obtivesse uma distribuição uniforme por toda massa (JSCE-SF1, 1984).

É importante salientar que devido a grande variabilidade climática a que estes concretos estavam sujeitos, havendo manhãs de sol forte seguidas de chuvas torrenciais em um mesmo dia, foi feito um controle da umidade dos agregados, que eram mantidos

cobertos para se conseguir uma relação água/cimento constante ao longo de todo o estudo.

Devido ao tamanho das formas e o volume necessário para enche-las, o processo de fabricação dos concretos, em cada dia, era realizado em três betonadas, sendo que na primeira e na segunda eram rodados 95 l de concreto por vez, necessários para preencher as placas quadradas de 60x60x10cm (figura 4.6). A terceira e última betonada de 140 l, necessitava-se de um maior cuidado, pois o processo de mistura era dificultado pela grande quantidade de material, mesmo sendo a betoneira de 320 l. Esta última betonada era realizada para confeccionar as placas de formato triangular (60cm de lado e 10cm de altura) e para as duas placas quadradas de 40x40x10cm, necessárias para a extração dos corpos de prova prismáticos (vigas).



Fig. 4.6- Moldagem das placas quadradas para o ensaio de flexão.

Os corpos de prova cilíndricos de 10x20cm (NBR 5739,1994), responsáveis pelo controle da resistência à compressão, eram moldados em moldes metálicos de acordo com as três betonadas, sendo que para cada uma das duas primeiras eram retiradas duas amostras antes da adição das fibras. Já para a terceira e última produção, era retirado um par de corpos de prova sem a adição das fibras e outros dois após a adição, somando ao final de um dia o total de 8 corpos de prova. Os mesmos foram moldados e adensados por processo manual, seguindo a norma NBR 5738 (1994), realizado em duas camadas de 20 golpes cada.

O tempo de mistura foi estabelecido em função da obtenção da melhor distribuição dos materiais na massa de concreto, sendo o valor máximo de 15min. nas misturas de maior

quantidade de cimento e fibra. Este tempo era suficiente para uma boa mistura e extremo para se evitar a perda da contribuição dos aditivos redutores de água na trabalhabilidade.

A trabalhabilidade foi medida através do teste de abatimento do tronco de cone (NBR 7223, 1992), sendo importante que o valor mínimo de 10cm fosse respeitado para proporcionar um bom manuseio do concreto. Os resultados superaram o valor mínimo, chegando em alguns casos em 23cm, possuindo assim uma consistência parecida com a dos concretos projetados por via úmida. As medidas de consistência foram realizadas antes e depois da colocação das fibras, a fim de se estudar a perda de trabalhabilidade nos concretos reforçados com fibras de aço.

Os corpos de prova utilizados nos ensaios de tenacidade (placas e vigas), foram moldados em duas camadas e adensados utilizando um vibrador de agulha por imersão, sendo que esta vibração foi realizada pontualmente saindo do centro para as extremidades, tentando evitar o contato do vibrador com o fundo. Utilizou-se um tempo de imersão suficiente para que não houvesse o risco de que este processo de vibração proporcionasse uma orientação preferencial das fibras. Para cada ensaio foram moldados quatro corpos de prova, atendendo perfeitamente a JSCE-SF2 (1984) que prescreve um mínimo de três amostras para os ensaios em concretos reforçados com fibras.

As formas das placas eram apoiadas no solo observando sempre a planicidade, através de régua de bolha, evitando assim irregularidades que poderiam interferir nos resultados. Após a confecção e moldagem dos corpos de prova, os mesmos tiveram suas superfícies regularizadas, sendo posteriormente identificados e cobertos com lona para a realização da cura. Antes da moldagem das amostras, foi utilizado um desmoldante nas formas de compensado plastificado, para proporcionar após 24hs, uma perfeita e fácil desmoldagem, pois as mesmas tiveram que ser utilizadas durante 13 dias, sofrendo o mínimo de danos.

As placas, devido às suas grandes dimensões, foram estocadas no pátio externo do Laboratório de Materiais da Construção Civil, estando sujeitas a todo tipo de intempéries durante o período de 64 dias, quando posteriormente foram transportadas para o interior para serem testadas. Por sua vez, os corpos cilíndricos foram curados em

água de cal, durante os mesmos 64 dias. Um total de 4 corpos de prova prismáticos foram extraídos de 2 placas quadradas (40x40x10cm), especialmente confeccionadas para este fim, através de uma serra circular, após 30 dias de execução destes concretos como pode ser observado na figura 4.7.



Fig. 4.7- Corte de placas quadradas, moldadas especialmente para a extração de corpos de prova prismáticos (vigas), para ensaio de flexão.

Para a JSCE-SF3 (1984), a extração por serra circular dos corpos de prova deve ser realizadas quando o concreto tiver resistência e ligação das fibras na matriz suficientemente boas, devendo obedecer um tempo mínimo de 14 dias, sendo assim respeitado neste programa. Os prismas, diferentemente das placas, foram estocados em um palete localizado no interior do laboratório, permanecendo neste local de temperatura razoavelmente constante até o início dos testes.

Apesar de serem curadas externamente, as placas foram observadas diariamente para evitar depredações, sendo que nesse tempo de espera foram marcados os pontos de apoio das placas triangulares e do furo central, no qual o dispositivo aplicador da carga e medidor da cravação seria posicionado durante o ensaio. Foram realizados testes preliminares com a primeira série confeccionada, para eliminação das últimas dúvidas com relação ao ensaio e aquisição dos dados. O transporte das placas para a sala de testes foi realizado diariamente com os devidos cuidados, para evitar quaisquer danos que viessem a prejudicar o desempenho das mesmas na bateria de testes.

4.5.2) ENSAIO DE FLEXÃO EM PLACA TRIANGULAR

O ensaio de flexão em placa triangular teve parte da sua metodologia explicada anteriormente. Como não possuía uma norma específica, este ensaio foi conduzido segundo algumas observações existentes na EFNARC (1996), tais como deformação central de 1,5 mm/min e uma deflexão de 25mm na parte central, gravadas na curva carga x deflexão. O apoio, igualmente ao dispositivo aplicador de carga e medidor da cravação na parte central, foi feito pontualmente através de três esferas que formavam um triângulo equilátero, de 40cm de lado, equidistante das extremidades.

O dispositivo foi posicionado na parte central, onde o prolongador do medidor de esmagamento se encontrava posicionado em um furo, determinado através do encontro das bissetrizes do triângulo. Entretanto, com a colocação da célula de carga sobre o dispositivo, o equilíbrio do conjunto foi dificultado, devido ao contato pontual, sendo solucionado posteriormente com a colocação de pastilhas de polivinil expandido na parte inferior do dispositivo (como observado na figura 4.5).

Os medidores de deformação, baseados em *strain gauges*, faziam a medição pela parte superior do corpo de prova, e a extremidade dos medidores não era apoiada diretamente na superfície do concreto e sim em uma placa metálica triangular vazada na parte central, que mantinha-se plana durante todo ensaio, não recebendo qualquer esforço.

4.5.3) ENSAIO DE FLEXÃO EM PLACA QUADRADA

O ensaio de flexão em placa quadrada foi realizado obedecendo a norma européia (EFNARC, 1996), utilizando a mesma velocidade de deformação central e deflexão final, de 1,5mm/min e 25mm respectivamente. O carregamento foi realizado na parte central da parte superior, através de uma superfície de contato de 10x10cm, sendo a célula de carga, de 20T, posicionada acima desta peça para as leituras de carga.

Para a determinação da deflexão, foi utilizado a média dos valores medidos por dois extensômetros. As medições foram realizadas com os extensômetros posicionados na parte superior da placa, em cima do ponto de giro desta sob a base metálica, onde teoricamente existe total contato e a deflexão é nula (figura 4.8). Como apesar de remota, existe a possibilidade do empenamento, seria recomendável que se fizesse leituras em vários pontos diferentes, sobre o topo, na posição de giro. Para uma solução

definitiva do problema, poder-se-ia apoiar extensômetros em braços metálicos, ligados diretamente à base metálica, que fariam as leituras de empenamento, proporcionando a exclusão destes valores. Os medidores foram posicionados na direção de cada vão, sendo que esta forma de medição diferencia-se daquela utilizada por FIGUEIREDO (1997), cuja a medida foi feita na parte central inferior da placa. O ensaio durava em média, um tempo de 18min para a realização das medidas de deflexão até 25mm.

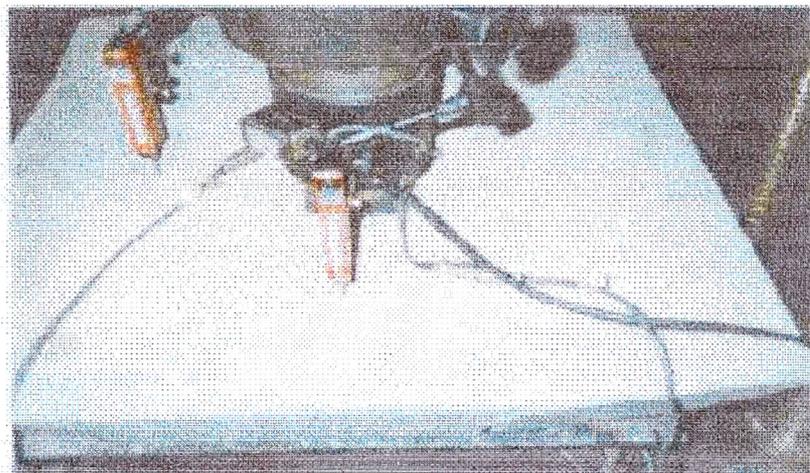


Fig. 4.8- Ensaio de flexão em placa quadrada, com a medida de deflexão sendo realizada na parte superior.

Além do tipo de aquisição de dados, o software para o armazenamento destes dados foi o mesmo utilizado no ensaio das placas triangulares, porém com uma sub-rotina específica para este ensaio.

4.5.4) ENSAIO DE FLEXÃO EM CORPOS PRISMÁTICO (VIGAS)

O ensaio de flexão em corpos prismáticos carregados em quatro cutelos é realizado em pequenas vigas de 10x10x35cm ou em vigas um pouco maiores de 15x15x45cm, que são utilizadas para fibras de maior comprimento. Esses tamanhos são normatizados pelas normas utilizadas como referência para a realização deste ensaio, sendo elas a ASTM C1018 (norte americana) e a JSCE-SF4 (japonesa). Essas normas definem essas dimensões, pois a menor medida não pode ser inferior a três vezes o tamanho da fibra, para se evitar um alinhamento preferencial das fibras.

Apesar das normas fixarem o valor de velocidade de aplicação de carga de 0,05 a 0,2mm/min, para este ensaio foi utilizado a velocidade de 0,5mm/min, pois este foi o

valor mínimo aceito pela prensa servo-controlada utilizada nesta pesquisa, sendo gastos em média 12min para uma leitura de 6mm de deflexão da parte central. Diferentemente dos ensaios de flexão em placas, este utilizou uma célula de carga de 4 T para a aquisição das leituras de carregamento.

O ensaio de flexão em vigas consiste em apoiá-las em dois cutelos, de forma que exista uma distância de 30cm de vão central, e aplicar o carregamento através de outros dois cutelos posicionados na parte superior, equidistantes 10cm do alinhamento dos suportes inferiores, promovendo assim uma flexão em quatro pontos. Para a leitura da deflexão central, utilizou-se um extensômetro baseado em *strain gauges* posicionado na parte central e localizado no meio do corpo de prova, sendo fixado utilizando o sistema *yoke* preconizado pela norma japonesa (figura 4.9).

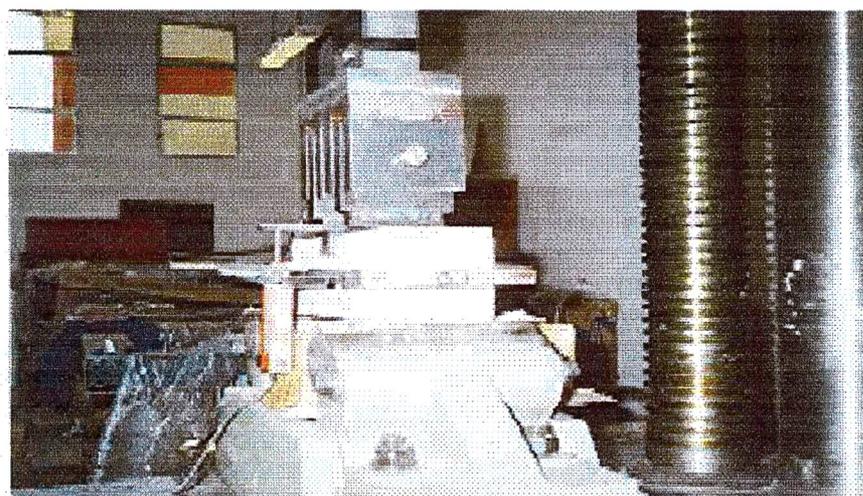


Fig. 4.9- Ensaio de flexão em corpos prismáticos, utilizando o sistema de *yoke* para a fixação do sensor de deslocamento.

Para o ensaio das vigas, utilizou-se folhas de papelão nos apoios para proporcionar uma melhor distribuição dos esforços. Para este trabalho foram utilizadas vigas de 10x10x39cm em média, após a devida extração feitas em placas de 40x40x10cm. Assim como para os demais ensaios, o sistema de aquisição de dados foi o mesmo, havendo também no programa utilizado, um método específico para o teste de flexão.

4.5.5) ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para o ensaio de compressão axial em corpos cilíndricos, utilizou-se 92 amostras que foram ensaiadas de acordo com a NBR 5739 (1994). Na primeira mistura efetiva

empregada no programa experimental, foram moldados apenas 4 corpos de prova sendo 2 sem fibra e 2 com fibras, por acreditar-se inicialmente que apenas um conjunto seria suficiente para representar todas as betonadas de um dia. Mas, devido à variabilidade do clima observada no período de um dia, passou-se então a fazer um par para cada betonada.

O ensaio foi realizado na mesma prensa servo-controlada, utilizando como regulador de superfície, para melhor distribuição dos esforços, uma chapa de madeira aglomerada, pois testes preliminares realizados com este material mostravam uma ótima forma de ruptura em duplo cone. Contudo, observou-se que em seis séries testadas, ocorreu um esmigalhamento do topo seguido de ruptura antes da formação do duplo cone. Com isso optou-se por passar a utilizar a regularização feita por enxofre, solucionando assim este problema de concentração de tensões.

O capítulo a seguir contém os resultados obtidos em cada um dos testes realizados, além das análises pertinentes e cabíveis para a obtenção de conclusões sobre esse estudo, realizado com os concretos reforçados com fibras de aço.

5) APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados todos os resultados obtidos dos ensaios e testes realizados nos concretos reforçados com fibras, além de toda análise necessária para a obtenção das conclusões.

Como visto no capítulo quatro (4), os concretos reforçados com fibras de aço foram confeccionados para a obtenção da tenacidade no ensaio de flexão em placas quadradas e triangulares, além do ensaio de flexão em corpos prismáticos (vigas) e de resistência à compressão da matriz, sendo estes para os concretos no estado endurecido. Já para o concreto no estado fresco, tentou-se estudar a propriedade trabalhabilidade, devido a adição das fibras.

5.1) TRABALHABILIDADE NO CONCRETO FRESCO

É fato conhecido por todos os estudiosos dos concretos reforçados, que a adição de qualquer tipo de fibra simples reduz o abatimento. Para MEHTA E MONTEIRO (1992), uma vez que as fibras conferem uma considerável estabilidade na massa de concreto, o ensaio de abatimento do tronco de cone não é um índice de trabalhabilidade perfeito. Contudo, em estudo realizado por CECCATO, NUNES E FIGUEIREDO (1997), concluiu-se que, para teores de fibras inferiores a 80 kg/m^3 , o abatimento do tronco de cone é eficiente para a medida de consistência dos concretos.

Sendo assim, utilizou-se este teste para avaliar a trabalhabilidade dos concretos com dois níveis de resistência, dois tipos e três teores de fibras, sendo feitas medidas antes e após a adição das fibras de aço. Como pode ser observado na figura 5.1, a perda de trabalhabilidade ou ganho de consistência devido a colocação de fibras, parece ser indiscutível para todos os tipos de misturas, sendo que os valores obtidos não seguiram um mesmo padrão para todos os tipos de concretos.

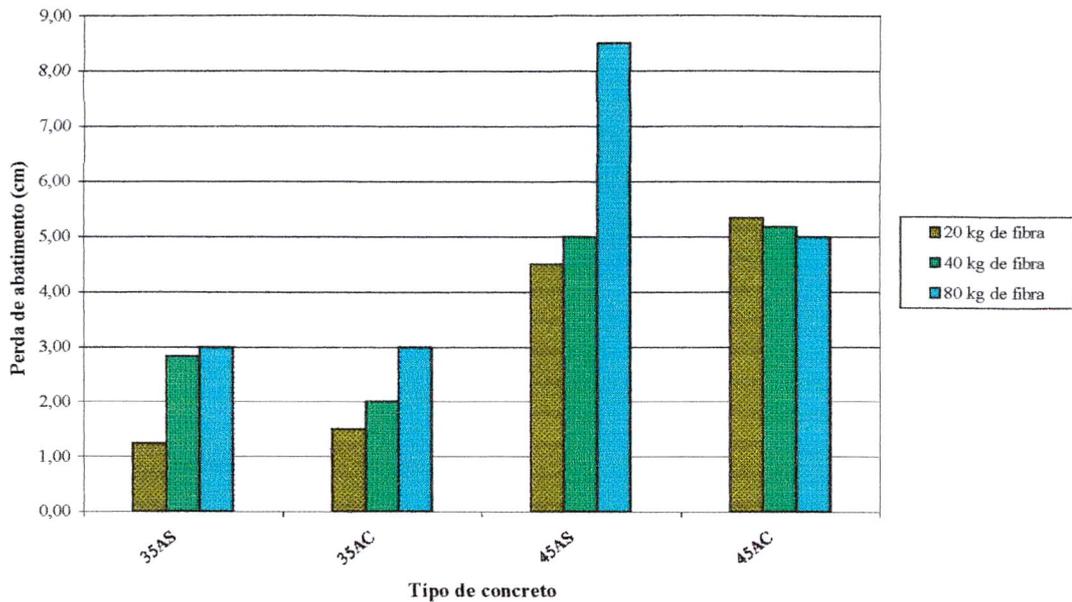


Fig. 5.1.: Comparação das perdas de abatimento para os quatro tipos de concretos, com três teores (20,40 e 80 kg/m³) e dois tipos de fibras (AS, aço solta e AC, aço colada).

Para facilitar o entendimento das figuras apresentadas, os concretos foram classificados por códigos, especificados de acordo com o tipo de matriz e de fibra a serem utilizadas. Como exemplo, o código 35AS que refere-se ao concreto de 35 MPa de resistência média estimada (f_{cj}), utilizando fibras de aço soltas, sendo 45AC referente aos concretos de 45 MPa utilizando fibra de aço colada (AC).

A adição das fibras tendem a reduzir a trabalhabilidade, a mobilidade e a fluidez dos concretos devido a vários fatores:

- ✓ Devido ao atrito entre fibras e agregados e entre as próprias fibras (CARNEIRO *et al*, 1997);
- ✓ Devido ao fato da própria fibra funcionar com um tipo de agregado lamelar, o que prejudica a trabalhabilidade dos concretos;
- ✓ Pela aderência da água na superfície das fibras, o que contribui para um ganho na consistência;
- ✓ Devido ao empelotamento das fibras, por falta de uma adição correta na mistura.

Através de um estudo estatístico, tentou-se correlacionar a perda de abatimento do tronco de cone com o volume de fibra, para matrizes de concreto de 35 e 45 MPa, onde a equação e o valor de correlação podem ser observados na figura 5.2.

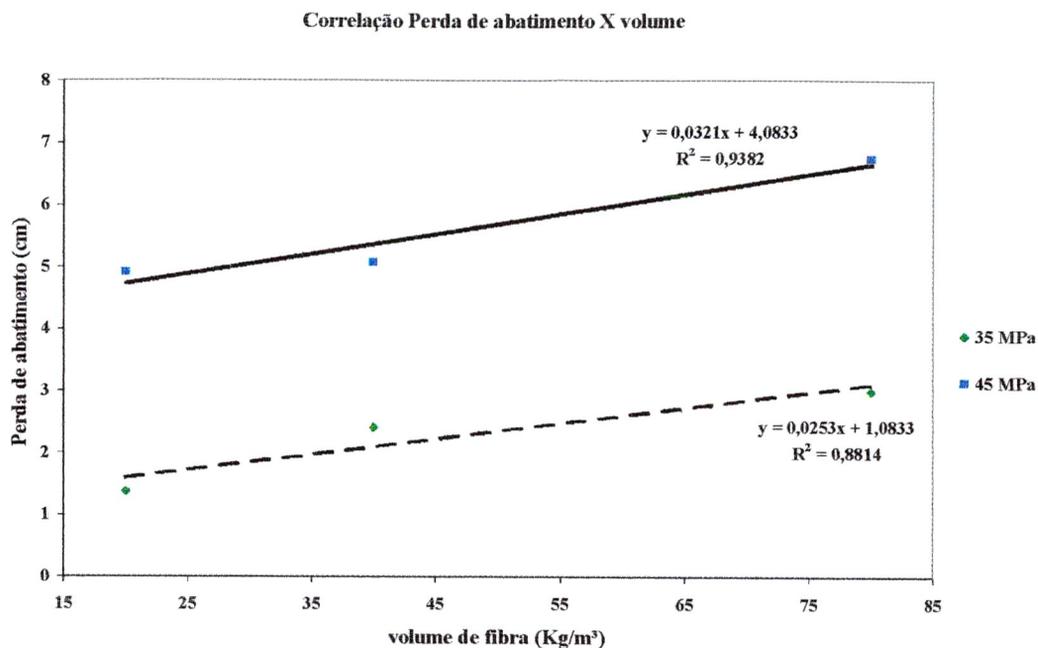


Fig. 5.2.: Estudo de correlação entre perda de abatimento de acordo com o aumento do volume de fibra, para as resistências de 35 e 45 MPa.

Para as resistências de 45 MPa, os valores obtidos ajustaram-se bem ao modelo retilíneo proposto, o mesmo não acontecendo na mesma intensidade, para os concretos de 35 MPa. A perda de abatimento para os concretos de 45 MPa foi maior, como pode ser visto na figura 5.2. Contudo, é importante salientar que nas misturas de maior resistência, trabalhou-se com valores de abatimento em torno de 21cm obtidos com a adição de plastificante e superplastificante, enquanto que, para a resistência de 35 MPa, os valores ficaram em torno de 12cm, onde utilizou-se apenas plastificante.

A perda de trabalhabilidade maior para o concreto de 45 MPa, pode ser atribuída ao fato de que esta mistura utilizou uma maior quantidade de cimento, o que consequentemente eleva a consistência. Com a adição das fibras, esta consistência foi aumentada com a ajuda da coesão já existente, proporcionando menores abatimentos no ensaio do tronco de cone. Além disso, parte desta perda pode ser atribuída à redução da eficiência do aditivo superplastificante no tempo decorrido entre as determinações dos abatimentos do concreto com e sem fibra.

Na figura 5.3 são apresentadas as curvas referentes às perdas de abatimento do tronco de cone com relação aos dois tipos de fibras utilizados, nos três teores já conhecidos.

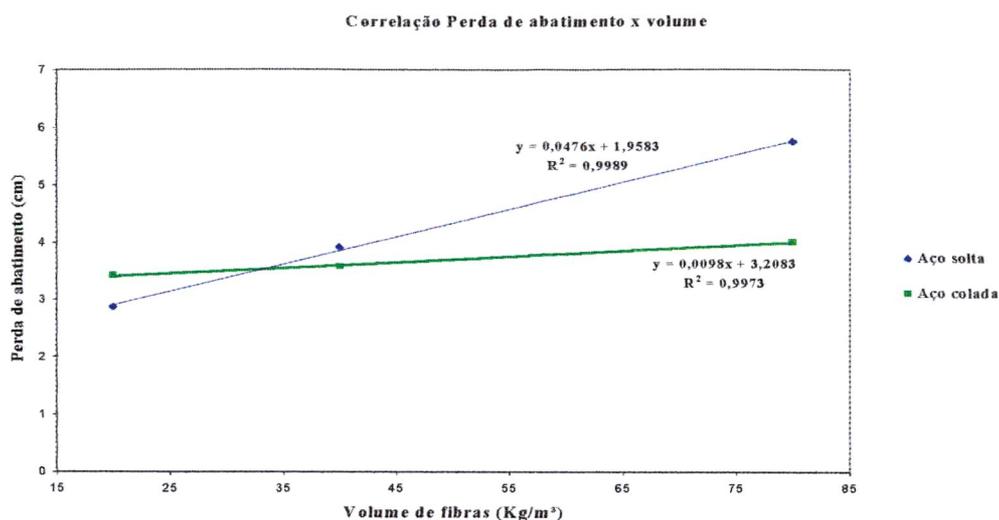


Fig. 5.3.: Estudo de correlação entre perda de abatimento de acordo com o aumento do volume de fibra, para os dois tipos de fibra de aço, solta e colada.

Apesar do modelo linear explicar a perda de abatimento em função do volume de fibra, observa-se na figura 5.3, que a curva representante das fibras de aço colada tem pouca inclinação, indicando que, mesmo com o aumento do volume de fibra, a perda de abatimento continuou constante. Isto pode ser justificado pelo fato de que, mesmo sendo a cola das fibras solúvel em água, uma dispersão completa dos feixes só se dá quando uma energia de mistura adequada for aplicada.

Com isso, acredita-se que a utilização de um agregado graúdo de dimensão máxima característica pequena além do fato de se trabalhar com a betoneira cheia, pode ter proporcionado uma energia de mistura insuficiente, ocasionando a má distribuição destas fibras pela massa de concreto. Apesar da betoneira ser de 320 l, trabalhou-se com uma pequena inclinação da mesma, o que consequentemente diminuiu a energia de mistura necessária, para uma distribuição uniforme por toda massa. Essa dispersão imperfeita pôde ser observada durante o processo de ensaio dos corpos de prova, onde encontrou-se algumas fibras unidas após a ruptura.

Contudo, de um modo geral, os concretos reforçados com fibras possuem uma estrutura interna e características de fluidez diferenciada dos concretos convencionais, pois mesmo com o aumento da consistência, pela a adição das fibras, estes possuem uma ótima capacidade de serem moldados por meio de vibração, como observado neste trabalho.

5.2) RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O estudo da resistência à compressão foi realizado após 64 dias, como mostrado na metodologia, pois a idade não seria umas das variáveis a serem analisadas neste trabalho. Sendo assim, procurou-se apenas mostrar a influência das fibras na resistência da matriz, pois existe uma contradição no meio científico, com relação à perda ou ganho nesta propriedade. Como dito na revisão bibliográfica, alguns pesquisadores encontraram um ganho na resistência e os que mostraram o contrário, atribuíram este mal desempenho a problemas na mistura.

Na figura 5.4, são apresentados os valores obtidos tanto para os concreto sem a adição das fibras, chamados de referência, como para os concretos com a adição das fibras, além dos seus respectivos teores.

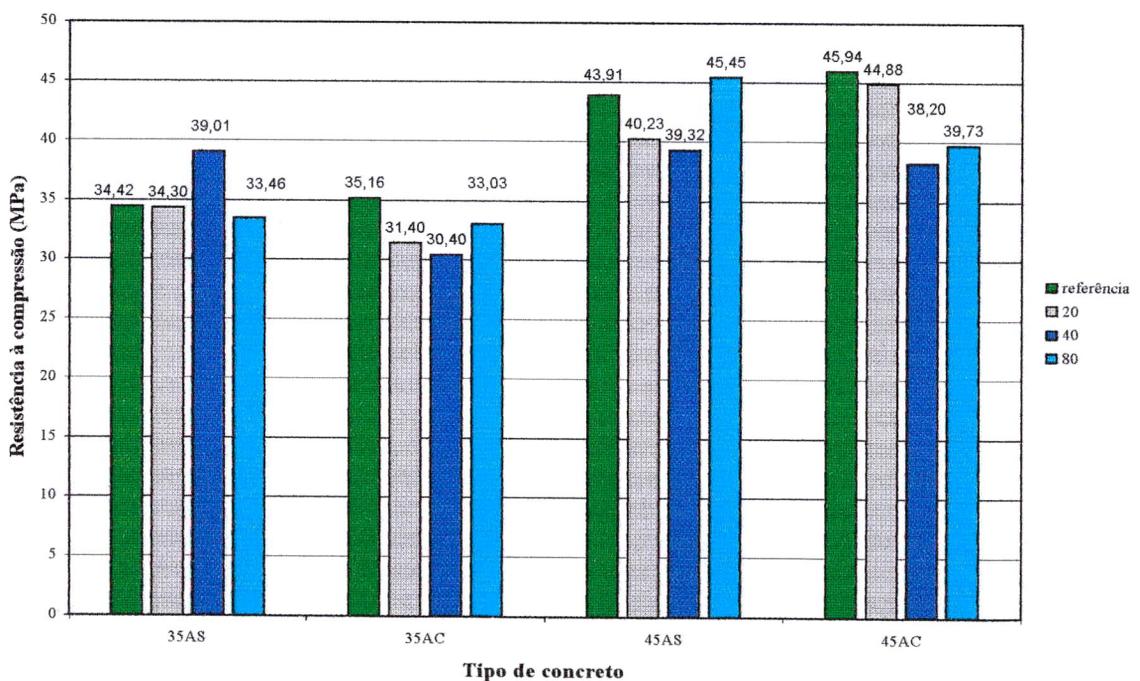


Fig. 5.4.: Resistências à compressão (f_{cj}) dos concretos sem e com a adição de fibras de aço, nos três teores utilizados.

Através dos valores apresentados na figura 5.4, observa-se que a maioria dos concretos de referência possuem uma resistência maior do que a dos concretos reforçados, havendo uma exceção para os concretos de 35 MPa com 40 kg/m³ de fibra de aço solta e para o de 45 MPa com 80kg/m³ de aço solta.

Na figura 5.5 são apresentados os valores médios dos resultados à compressão dos concretos, com e sem adição das fibras de aço.

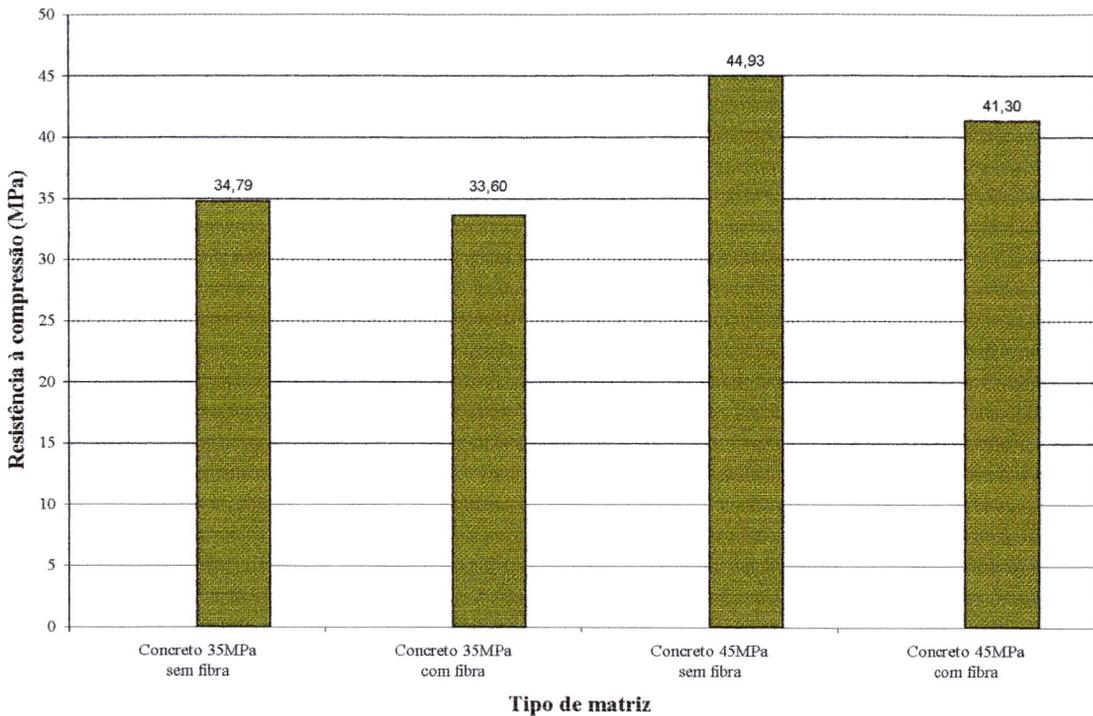


Fig. 5.5.: Valores médios de resistência à compressão (f_{cj}) dos concretos, sendo que a média dos concretos com fibras são para os dois tipos de fibra e para os três teores.

A mesma tendência observada na figura 5.4, pode ser visto na figura 5.5, mostrando que em média, os concretos reforçados apresentaram uma resistência um pouco inferior aos concretos convencionais. Apesar disso, através de uma análise estatística pelo teste de hipótese, pode-se afirmar com 99% de confiabilidade, que não existe uma diferença significativa entre os concretos de 35 MPa com e sem fibras, sendo assim também para os concretos de 45 MPa.

Entretanto, é observado uma mudança no comportamento de ruptura dos corpos de prova cilíndricos pela adição das fibras. Os concretos de referência utilizados apresentaram uma ruptura explosiva, característica essa, peculiar aos concretos de resistência elevada. Devido à adição das fibras, essa forma de ruptura foi transformada em um comportamento mais suave, sem a explosão característica. Sendo assim, apesar de não ter influenciado no valor da resistência, as fibras alteraram o comportamento frágil para uma ruptura dúctil, demonstrando um ganho de tenacidade.

Outro motivo para a inexistência de aumento nos valores de resistência à compressão, é o aumento da incorporação de ar, que é proporcionado pela adição das fibras. Entretanto, neste trabalho, observou-se que a incorporação de ar não parece ser proporcional ao volume de fibra utilizado, pois em alguns casos (nos concretos com 80 kg/m³ de fibras), obteve-se um aumento da resistência com relação aos outros dois teores utilizados.

5.3) ENSAIO DE FLEXÃO EM CORPOS PRISMÁTICOS (VIGAS)

5.3.1) TIPO DE FIBRA

Os ensaios de flexão em corpos prismáticos (vigas), foram realizados conforme descrição feita no capítulo 4, para a obtenção da propriedade tenacidade utilizando como referência as normas americana (ASTM C1018, 1994) e japonesa (JSCE-SF4, 1984). A tabela 5.1 apresenta os valores de tenacidade e de resistência à flexão, encontrados e exigidos pelas referidas normas.

Tab. 5.1.: Resultados do ensaio de tenacidade em corpos prismáticos

Misturas	Resistência à flexão (MPa)	Índice de tenacidade (ASTM C1018)				Fator de resistência residual (ASTM C1018)			Fator de tenacidade (JSCE-SF4)
		I ₅	I ₁₀	I ₂₀	I ₃₀	R _{5,10}	R _{10,20}	R _{20,30}	
3520AC	4,53 *(0,19)	4,29 *(0,20)	7,65 *(1,69)	12,78 *(1,20)	15,43 *(1,07)	67,25 *(8,59)	51,29 *(8,26)	26,58 *(14,58)	1,34 *(0,26)
3520AS	4,67 *(0,41)	4,07 *(0,39)	7,22 *(0,95)	11,42 *(1,32)	14,08 *(1,17)	62,92 *(3,37)	42,04 *(8,88)	26,55 *(2,25)	1,68 *(0,16)
3540AC	5,22 *(0,47)	4,42 *(0,17)	8,16 *(0,48)	12,96 *(1,46)	17,03 *(2,23)	74,90 *(10,84)	47,95 *(10,30)	40,72 *(9,21)	2,62 *(0,20)
3540AS	4,95 *(0,48)	4,37 *(0,39)	7,43 *(1,52)	13,60 *(1,97)	17,94 *(2,16)	61,25 *(28,73)	61,67 *(4,89)	43,41 *(13,51)	1,97 *(0,38)
3580AC	6,04 *(0,64)	4,83 *(0,54)	9,36 *(1,86)	16,97 *(5,44)	24,39 *(8,89)	90,57 *(26,65)	76,08 *(38,43)	74,17 *(35,23)	4,02 *(0,98)
3580AS	5,08 *(0,85)	4,39 *(0,18)	8,26 *(0,70)	13,90 *(1,46)	18,61 *(0,63)	77,46 *(10,92)	56,41 *(8,21)	47,12 *(12,80)	2,26 *(0,04)

Obs.: *(desvio padrão), CV (coeficiente de variação total em porcentagem).

Tab. 5.1.: Resultados do ensaio de tenacidade em corpos prismáticos (continuação)

Misturas	Resistência à flexão (MPa)	Índice de tenacidade (ASTM C1018)				Fator de resistência residual (ASTM C1018)			Fator de tenacidade (JSCE-SF4)
		I ₅	I ₁₀	I ₂₀	I ₃₀	R _{5,10}	R _{10,20}	R _{20,30}	
4520AC	5,69 *(0,22)	4,70 *(0,29)	8,75 *(1,01)	14,18 *(1,49)	17,18 *(0,97)	81,06 *(15,13)	54,27 *(7,98)	30,08 *(13,34)	1,76 *(0,36)
4520AS	5,51 *(0,21)	4,62 *(0,19)	8,70 *(0,91)	13,44 *(1,05)	16,50 *(0,42)	81,64 *(14,46)	47,39 *(1,45)	30,65 *(8,09)	2,19 *(0,12)
4540AC	5,19 *(0,39)	4,64 *(0,27)	8,30 *(0,63)	13,83 *(2,24)	18,53 *(3,61)	73,30 *(8,79)	55,31 *(16,42)	47,01 *(13,78)	2,65 *(0,22)
4540AS	5,59 *(0,26)	4,45 *(0,46)	8,46 *(1,16)	14,38 *(0,61)	18,69 *(1,43)	80,07 *(15,42)	59,27 *(5,66)	43,03 *(13,63)	2,49 *(0,51)
4580AC	5,31 *(0,30)	4,41 *(4,41)	7,82 *(0,89)	11,54 *(2,36)	13,92 *(2,95)	68,12 *(14,72)	37,19 *(15,00)	23,84 *(8,46)	1,67 *(0,31)
4580AS	6,16 *(0,51)	4,84 *(0,18)	9,21 *(0,91)	16,89 *(3,53)	24,29 *(6,19)	87,35 *(15,28)	76,79 *(27,59)	74,01 *(26,67)	4,57 *(1,25)
CV total	8,00	6,84	13,52	18,31	21,57	20,43	25,93	34,70	21,64

Obs.: *(desvio padrão), CV (coeficiente de variação total em porcentagem).

Nas figuras 5.6 e 5.7 podem ser observados os valores dos índices de tenacidade, para todos os tipos de concretos confeccionados, além da comparação destes índices para os dois tipos de fibra utilizados neste trabalho.

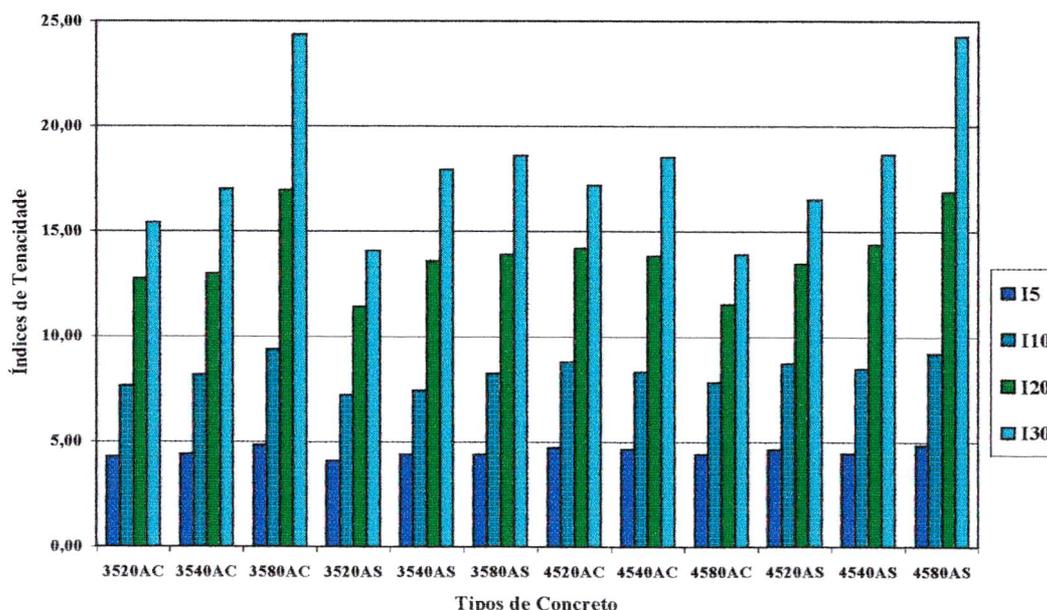


Fig. 5.6.: Valores dos índices de tenacidade obtidos nos gráficos das curvas carga x deflexão para o ensaio de flexão em prismas.

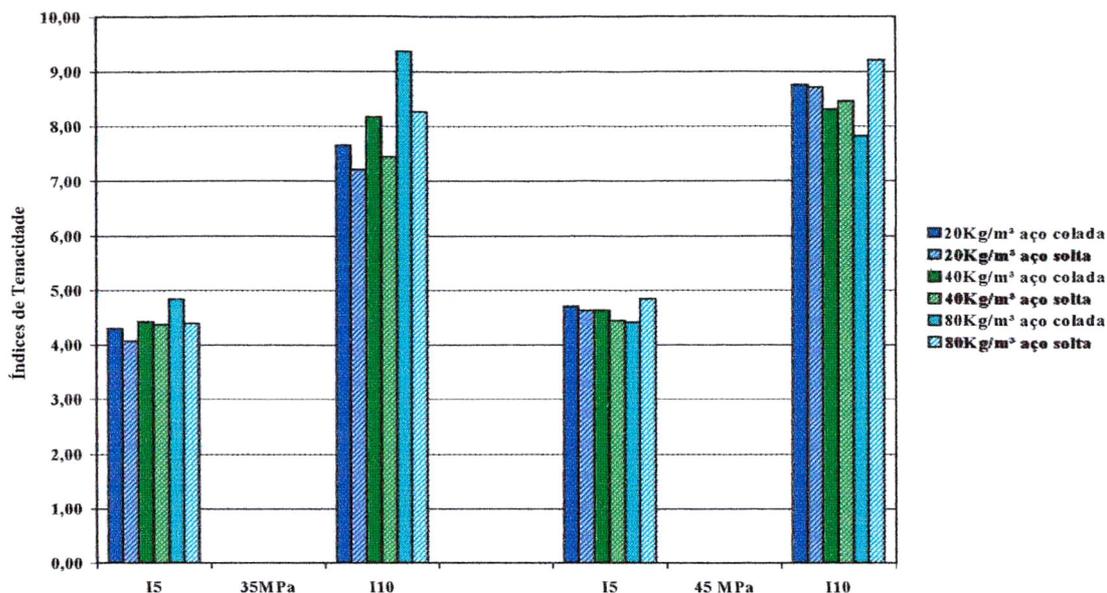


Fig. 5.7.: Comparação dos índices de tenacidade para dois tipos de fibra de aço sendo uma fornecida colada e a outra solta.

Para a melhor compreensão dos resultados, assim como explicado nas propriedades já citadas, os concretos receberam uma nomenclatura que seguem a seguinte forma: os dois primeiros dígitos se referem à resistência média alcançada pelos concretos (35 e 45 MPa), os dois dígitos seguintes dizem respeito aos três teores de fibra de aço utilizados (20,40,80 kg/m³) e finalmente as letras indicam o tipo de fibra de aço utilizada, ou seja, se a mesma é do tipo colada (AC) ou solta (AS).

Feita esta observação, nota-se através das figuras 5.6 e principalmente 5.7, que as fibras de aço colada desenvolveram maiores valores de índices de tenacidade do que as fibras de aço solta, principalmente na matriz com resistência de 35 MPa, onde esta diferença é mais visível. Essa diferença para a matriz de menor resistência, pode ser observada em todos os três teores de fibra utilizados, mostrando que as fibras de aço colada, que possuem um maior fator de forma, desenvolveram um melhor trabalho de arrancamento da matriz após a carga de pico. O mesmo aconteceu para a matriz de 45 MPa somente no teor de 20 kg/m³, sendo que os índices perderam a sensibilidade, à medida que se trabalhou com teores mais elevados, pois no teor de 40kg/m³, somente o valor de I₅ com fibra de aço colada, supera o valor encontrado para a fibra de aço solta.

Isso mostra que o fator de forma desenvolve um papel importante na escolha de uma fibra de qualidade, pois esta característica pode ter sido responsável pelos aumentos de

tenacidade, como já constatado por FIGUEIREDO, CECCATO E TORNERI (1997), onde fibras de diferentes fatores de forma, apresentaram comportamentos distintos.

Entretanto, é importante salientar que para as misturas de maior quantidade de cimento, as fibras de aço colada não se dispersaram completamente na massa de concreto, como pôde ser visto através de constatação visual, após a realização dos ensaios. Devido a essa má dispersão, após o término de alguns ensaios, observou-se que algumas fibras ainda se encontravam em pequenos feixes (reduzindo assim o fator de forma), o que provavelmente diminuiu o potencial deste tipo de fibra, como visto para a mistura de 80 kg/m³.

Como citado no item 5.1, isso pode ter ocorrido por uma falta de energia de mistura, pois se trabalhou com agregado graúdo de pequena dimensão máxima e, o mais importante, utilizou-se a betoneira com uma quantidade elevada de material, dificultando uma correta mistura. Essa problema se agrava para a matriz de 45 MPa, onde se utilizou uma maior quantidade de cimento, o que aumentou a coesão dificultando ainda mais o processo de mistura.

Como foi mostrado na tabela 3.3, item 3.3.2.6, a EFNARC (1996), define classes de tenacidade para os concretos reforçados com fibras, de acordo com a tensão residual após a carga de pico. Essas classes foram definidas para o ensaio de tenacidade em vigas. Além da EFNARC, a ASTM C1116 (1991), também define níveis de desempenho, que são apresentados na tabela 5.2, para os concretos reforçados com fibras, baseados na determinação das índices de tenacidade através da ASTM C1018 (1994). A tabela 5.3, mostra a classificação dos concretos confeccionados para este estudo, de acordo com as normas anteriormente citadas. Essa classificação através dos índices de tenacidade é apresentada, mesmo com a ressalva de que, no caso da ASTM C1116, só valeria para os concretos rompidos aos 28 dias e, no caso da EFNARC (1996), as dimensões das vigas ensaiadas, diferem daquelas preconizada pela norma.

Tabela 5.2.: Classificação do nível de desempenho pela norma, para os concretos reforçados com fibra (ASTM C1116, 1991).

Nível de desempenho	Índice de tenacidade, I_5		Índice de tenacidade, I_{10}	
	Valor especificado	Resultado de teste*	Valor especificado	Resultado de teste*
I	2,7	3,0	5,4	6,0
II	3,6	4,0	7,2	8,0
III	4,5	5,0	9,0	10,0
IV	5,4	6,0	10,8	12,0

Obs.: * valores apresentados pela norma a título de exemplo, não se relacionando com os valores experimentais deste trabalho.

Tabela 5.3.: Classificação dos concretos reforçados com fibras de acordo com a EFNARC e a ASTM C1116.

Misturas	EFNARC (valores médios)				Classe	ASTM C1116		Nível de desempenho
	0,5mm	1,0mm	2,0mm	4,0mm		I_5	I_{10}	
3520AC	1,02	0,96	0,58	0,24	0	4,29	7,65	II
3520AS	1,49	1,45	1,09	0,66	1	4,07	7,22	II
3540AC	2,57	2,41	1,95	1,36	2	4,42	8,16	II
3540AS	1,70	1,63	1,39	0,69	1	4,37	7,43	II
3580AC	4,64	3,87	2,99	2,07	3	4,83	9,36	III
3580AS	2,18	1,95	1,69	1,21	1	4,39	8,26	II
4520AC	1,36	1,15	0,94	0,59	0	4,70	8,75	III
4520AS	2,18	1,86	1,46	1,07	1	4,62	8,70	II
4540AC	2,91	2,44	1,88	1,27	1	4,64	8,30	II
4540AS	1,89	1,70	1,38	1,06	1	4,45	8,46	II
4580AC	1,44	1,14	0,81	0,50	0	4,41	7,82	II
4580AS	5,13	4,62	3,57	2,24	3	4,84	9,21	III

5.3.2) VOLUME DE FIBRA

Tentou-se avaliar o desempenho das fibras, quanto à tenacidade, através do aumento de volume de fibra, variando em três teores. As figuras de 5.8 a 5.11, mostram os ganhos de tenacidade devido adição de maiores volumes de fibras, sendo que as curvas escolhidas para representar tal comportamento, não são curvas médias e sim valores escolhidos dentre as quatro amostras existentes, ensaiadas para cada tipo de concreto.

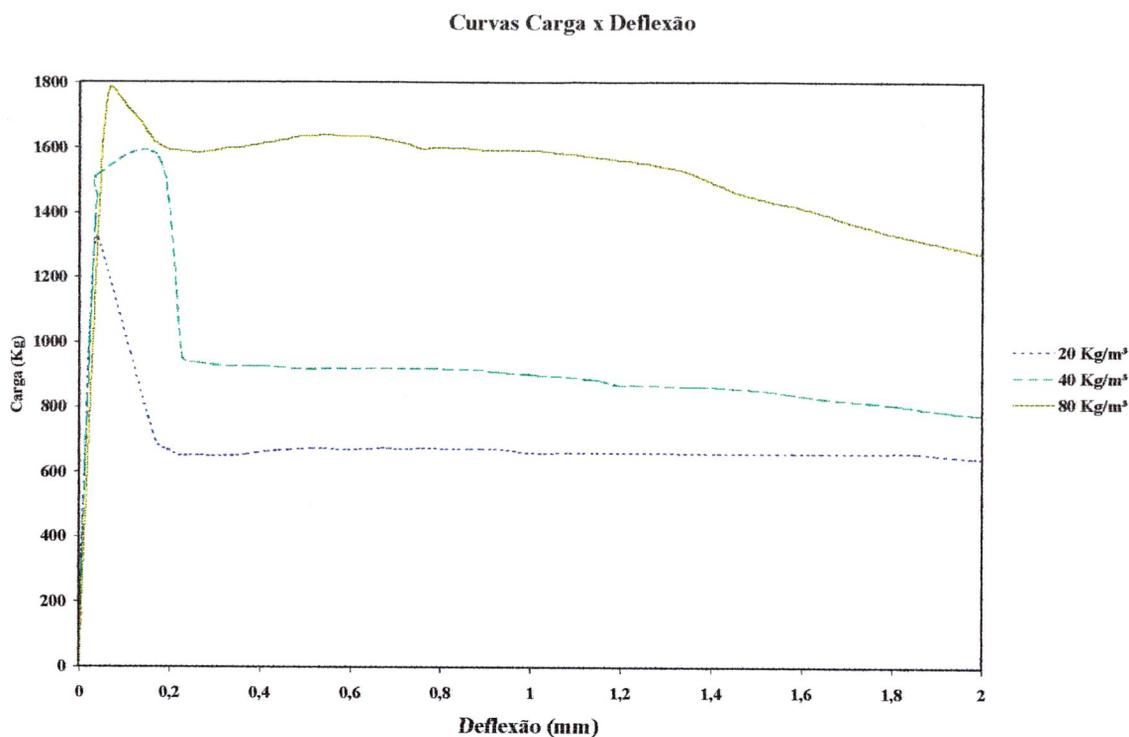


Fig. 5.8.: Curvas carga x deflexão para o concreto de 35 MPa, utilizando as fibras de aço colada, com os três teores.

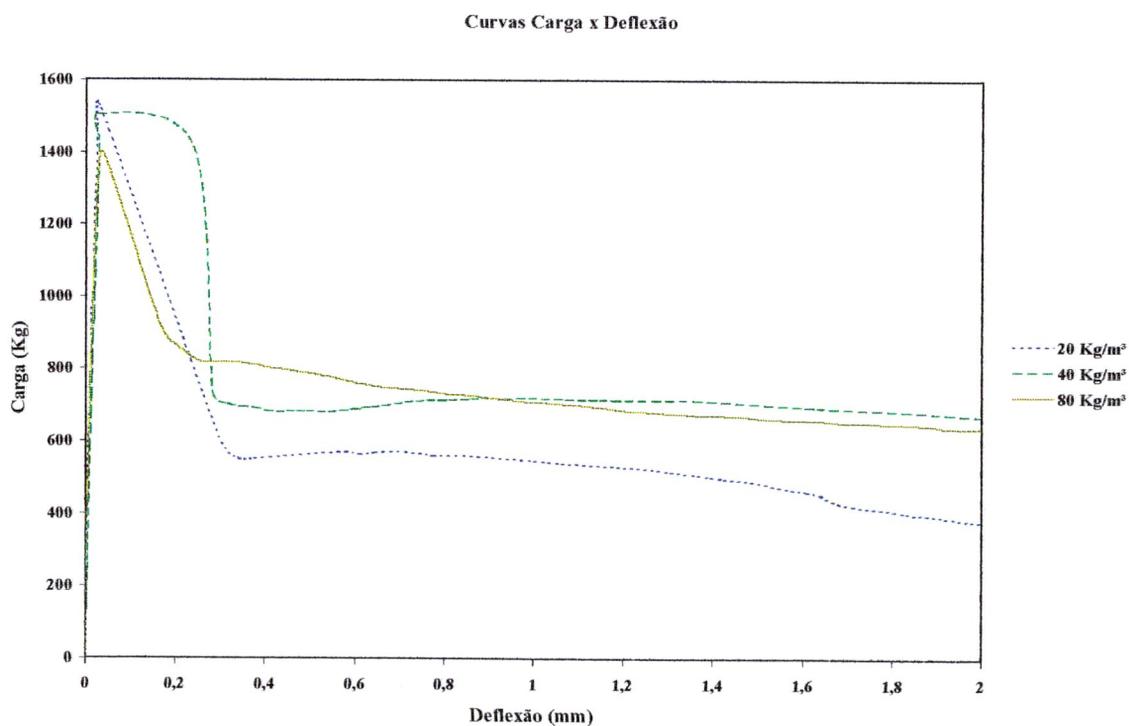


Fig. 5.9.: Curvas carga x deflexão para o concreto de 35 MPa, utilizando as fibras de aço solta, com os três teores.

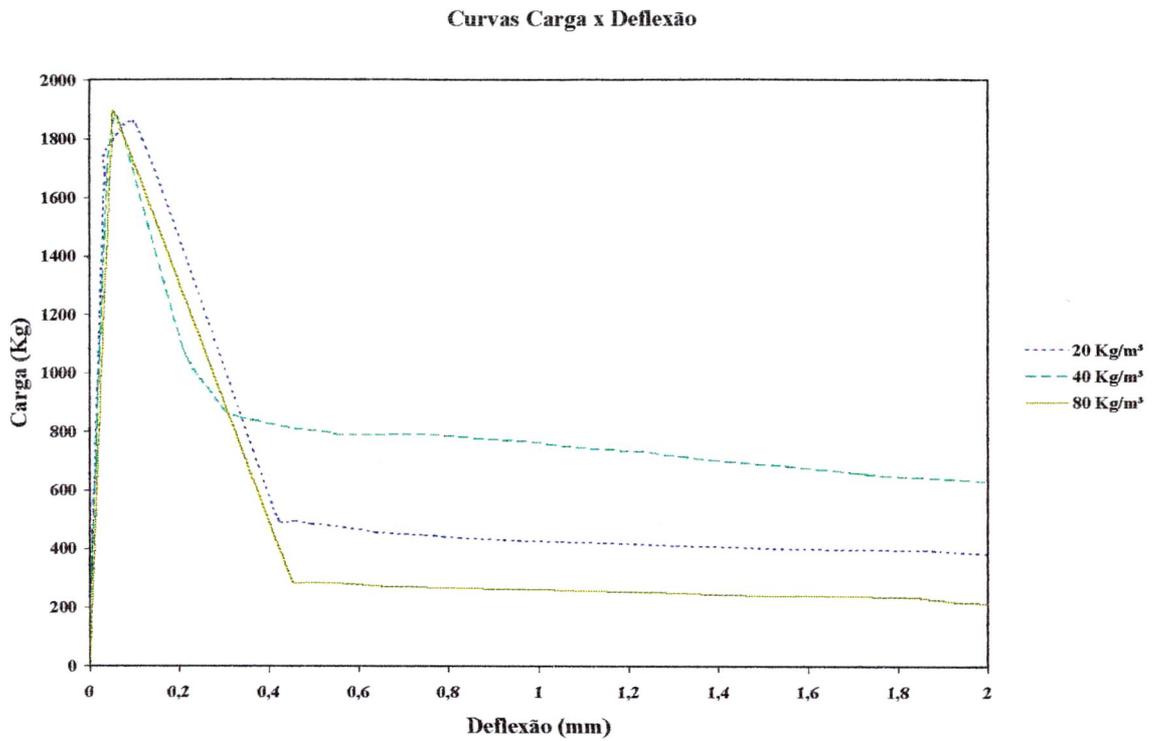


Fig. 5.10.: Curvas carga x deflexão para o concreto de 45 MPa, utilizando as fibras de aço colada, com os três teores.

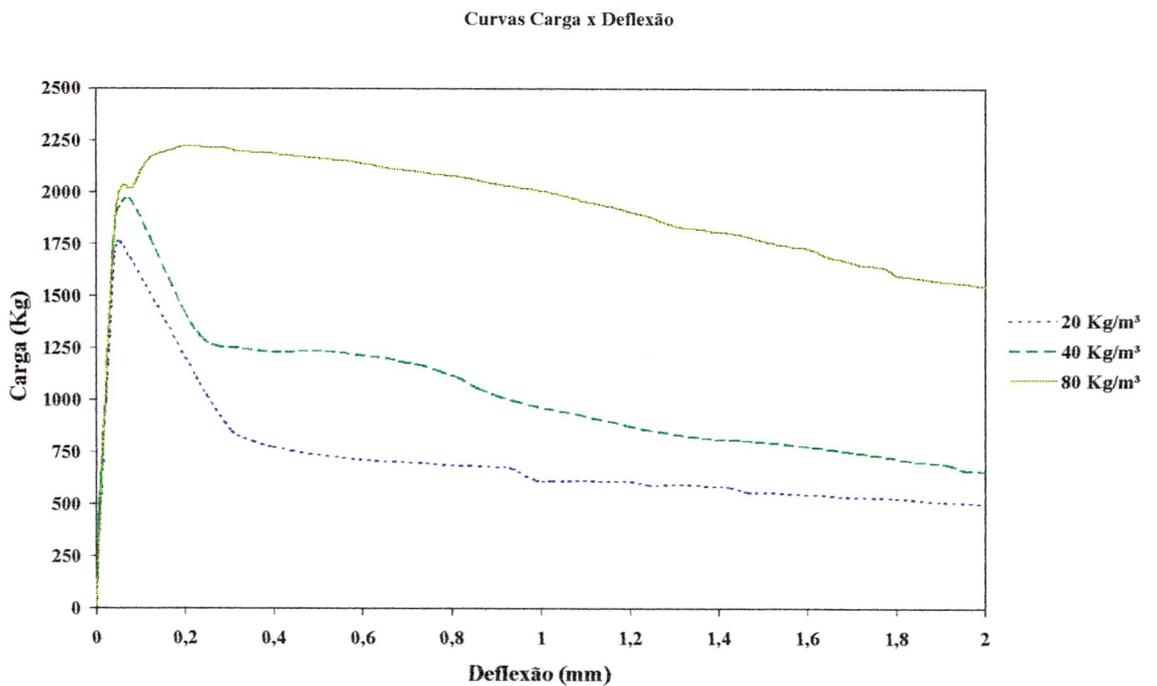


Fig. 5.11.: Curvas carga x deflexão para o concreto de 45 MPa, utilizando as fibras de aço solta, com os três teores.

Para os concreto de 35 MPa com fibras de aço colada e 45 MPa com fibras de aço solta, a melhora de desempenho devido à adição de maiores teores de fibras é nítido, ou seja, quanto maior o volume utilizado junto à matriz de concreto, maiores são os ganhos de tenacidade, proporcionado pela maior quantidade de fibra funcionando com ponte de transferência de tensão. Isto também foi observado por BALAGURU, NARAHARI E PATEL (1992), que constataram que o aumento na quantidade de fibra, leva a um aumento da ductilidade e da capacidade de absorção de energia. Este aumento, no entanto, não é diretamente proporcional, pois percebe-se que os ganhos no comportamento pós-pico, do volume de 20 para 40 kg/m³ de fibra, é menor do que o salto de 40 para 80 kg/m³, ou seja, o fato de se utilizar o dobro de fibra não implica em um aumento de mesma ordem na tenacidade do material.

Para o concreto de 35 MPa com fibra de aço solta, nota-se o aumento pronunciado da tenacidade quando o teor de fibra aumenta de 20 para 40 kg/m³. Entretanto, no incremento do teor de 40 para 80 kg/m³, esta diferença praticamente não existe. Isto pode ser observado nos índices de tenacidade apresentados na tabela 5.1, onde os valores estão bem próximos uns dos outros. Já para o concreto de 45 MPa com fibras de aço colada, o valor referente a 80 kg/m³ não alcançou o valor esperado, ficando abaixo até mesmo do teor de 20 kg/m³. Esse fato pôde ser observado durante os ensaios realizados com essa série, onde mesmo com uma quantia de fibra elevada, as mesmas se encontravam posicionadas do meio das vigas para cima. Com isso, no momento da ruptura, a queda sofrida pelos corpos de prova era de forma brusca, uma vez que se trabalhava com relação água/cimento mais baixa.

Com essa ruptura brusca, proporcionava-se um arrancamento prévio das fibras, diminuindo assim o comprimento de ancoragem, o que minimizou o trabalho das fibras após o aparecimento da fissura, além da perda já proporcionada pela má dispersão das mesmas, explicada anteriormente. Esses problemas não foram observados em casos isolados, mas sim em todas as amostras como é mostrado na figura 5.12. No caso do volume de 20 kg/m³, para o mesmo concreto (45 MPa), as fibras apesar de serem poucas, se posicionaram na parte inferior do corpo de prova e além disso proporcionaram os maiores valores de carga de pico, conseguindo-se também um dos maiores valores de índice de tenacidade (I_5).

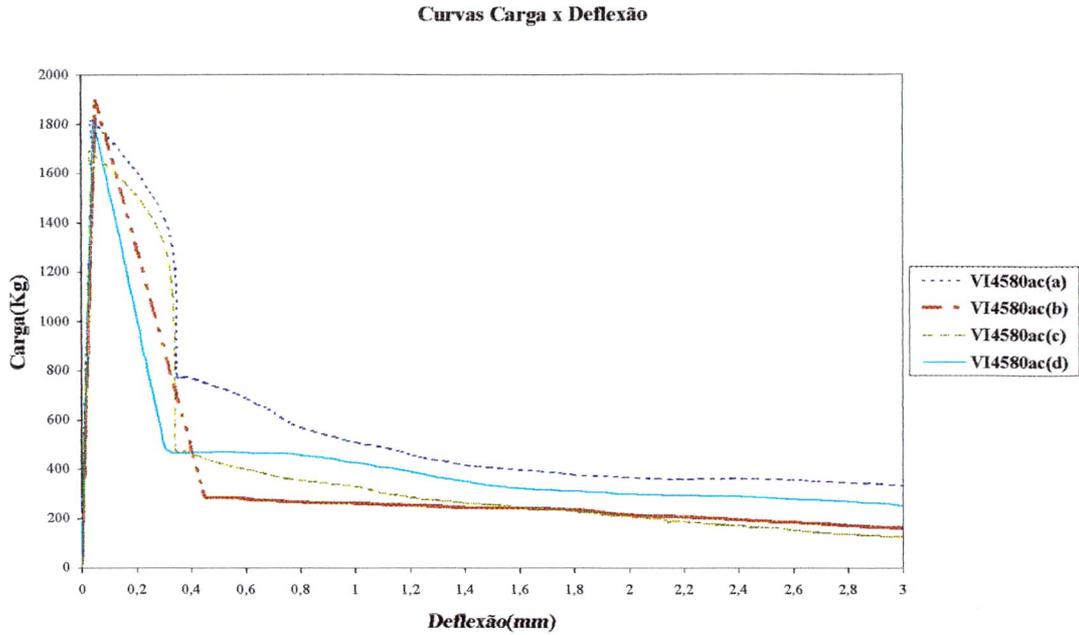


Fig. 5.12.: Conjunto de corpos de prova ensaiados, referente ao concreto de 45 MPa utilizando 80 kg/m^3 de fibras de aço colada.

Observa-se que todas as amostras possuem praticamente um mesmo comportamento, apesar de possuírem um volume de 80 kg/m^3 de fibra, ficando assim, distante do comportamento condizente com tal teor. Na tabela 5.1, apresentada anteriormente, nota-se que os valores dos coeficientes de variação são elevados e aumentam para as medições que são realizadas nos pontos de maior deflexão. Isso mostra que valores que são calculados nestes pontos, como $R_{20,30}$ e o fator de tenacidade, possuem alta variabilidade. Isso vem, entretanto, informar que o número mínimo de três corpos de prova para representar este tipo de ensaio, talvez seja insuficiente, devendo trabalhar-se com uma quantidade tal, que seja compatível com a variabilidade observada. Com isso, este problema seria minimizado, uma vez que as placas triangulares mostraram um maior consumo de energia para o teor mencionado, apesar de que, tanto as vigas como as placas triangulares, foram confeccionadas em uma mesma virada, o que deveria ter conduzido a comportamentos semelhantes.

Tentou-se estabelecer correlações entre as medidas de tenacidade mais usuais, com o aumento do volume de fibra, partido da mesma equação do tipo potencial, utilizada com êxito por FIGUIREDO (1997) em seu trabalho, obtendo ótimos valores. As equações

encontradas juntamente com os respectivos valores dos coeficientes de correlações, são apresentadas nas tabelas 5.4 e 5.5.

Tab. 5.4.: Equações e coeficientes de correlação obtidos entre os índices de tenacidade (ASTM C1018) e o aumento do volume de fibras.

Matriz e tipo de fibra	Índice de tenacidade (ASTM C1018)			
	I ₅	I ₁₀	I ₂₀	I ₃₀
	Equação e coeficiente de correlação	Equação e coeficiente de correlação	Equação e coeficiente de correlação	Equação e coeficiente de correlação
35AC	$Y = 3,288X^{0,0855}$ $R^2 = 0,9241$	$Y = 4,8873X^{0,1455}$ $R^2 = 0,9585$	$Y = 6,636X^{0,2045}$ $R^2 = 0,7869$	$Y = 5,493X^{0,3303}$ $R^2 = 0,9026$
35AS	$Y = 3,4945X^{0,0546}$ $R^2 = 0,7951$	$Y = 5,3291X^{0,0971}$ $R^2 = 0,9011$	$Y = 7,6612X^{0,1410}$ $R^2 = 0,8321$	$Y = 7,9744X^{0,2012}$ $R^2 = 0,8467$
45AC	$Y = 5,4277X^{-0,0459}$ $R^2 = 0,894$	$Y = 11,168X^{-0,0811}$ $R^2 = 0,9988$	$Y = 22,715X^{-0,1486}$ $R^2 = 0,8395$	$Y = 28,753X^{-0,1518}$ $R^2 = 0,5038$
45AS	$Y = 4,0944X^{0,0336}$ $R^2 = 0,3055$	$Y = 7,5489X^{0,0411}$ $R^2 = 0,433$	$Y = 8,0763X^{0,1648}$ $R^2 = 0,9474$	$Y = 6,9922X^{0,2789}$ $R^2 = 0,9596$

Obs.: Y é referente aos índices de tenacidade e X diz respeito ao volume de fibra em kg/m^3 .

Tab. 5.5.: Equações e coeficientes de correlação obtidos entre as relações de tenacidade ou fator de resistência residual (ASTM C1018) e o aumento do volume de fibras.

Matriz e tipo de fibra	Fator de resistência residual (ASTM C1018)		
	R _{5,10}	R _{10,20}	R _{20,30}
	Equação e coeficiente de correlação	Equação e coeficiente de correlação	Equação e coeficiente de correlação
35AC	$Y = 34,864X^{0,2147}$ $R^2 = 0,97521$	$Y = 20,029X^{0,2844}$ $R^2 = 0,6251$	$Y = 2,8109X^{0,7403}$ $R^2 = 0,9906$
35AS	$Y = 38,44X^{0,1499}$ $R^2 = 0,654$	$Y = 24,091X^{0,2121}$ $R^2 = 0,5376$	$Y = 8,2273X^{0,4139}$ $R^2 = 0,8548$
45AC	$Y = 117,5X^{-0,1255}$ $R^2 = 0,9918$	$Y = 131,63X^{-0,2726}$ $R^2 = 0,7124$	$Y = 59,971X^{-0,1677}$ $R^2 = 0,1135$
45AS	$Y = 69,303X^{0,0488}$ $R^2 = 0,5476$	$Y = 16,602X^{0,3482}$ $R^2 = 0,9982$	$Y = 4,4095X^{0,6359}$ $R^2 = 0,9826$

Obs.: Y é referente às relações de tenacidade e X diz respeito ao volume de fibra em kg/m^3 .

Os coeficientes de correlação para o concreto de 35 MPa, usando tanto a fibra solta como a fibra colada, apresentam valores razoáveis, mostrando que o aumento de volume de fibra, proporciona um crescimento nos valores de todos índices de tenacidade. Estes

valores não podem ser considerados excelente, mas mostram uma tendência clara deste ganho de tenacidade, como também pôde ser visto graficamente, através da figura 5.6.

Para a classe dos concretos de 45 MPa utilizando fibras de aço solta, os resultados não apresentaram bons índices de correlação para os valores iniciais de tenacidade I_5 e I_{10} . Isto pode ser atribuído aos problemas de instabilidade pós-pico, que abrangem principalmente estes dois valores, pois os valores utilizados nos cálculos encontram-se exatamente neste trecho da curva carga x deflexão, como já explicado por BANTHIA E TROTTIER (1995a). Entretanto, para I_{20} e I_{30} , que são calculados a partir de pontos que se encontram mais afastados da região de instabilidade pós-pico, as correlações apresentam ótimos valores, mostrando o ganho de tenacidade com o aumento do teor de fibra para um mesmo índice.

Assim como nas análises já feitas, os concretos de 45 MPa com fibra de aço colada, apesar de apresentarem ótimos coeficientes de correlação, uma das constantes tem o valor negativo, representando um decréscimo dos índices de tenacidade como a adição de maiores volumes de fibras. Este resultado pode ser atribuído, em partes, ao problema com a série de 80 kg/m³, mas também com a falta de sensibilidade dos índices, além dos problemas com a instabilidade pós-pico, que não mostraram os aumentos de tenacidade do teor 20 para 40 kg/m³. Já para os valores de fator de tenacidade, assim como para o I_{30} que são medidos em pontos mais afastados da curva, o aumento da tenacidade do teor de 20 para 40 kg/m³, foi observado.

5.3.3) FATOR DE TENACIDADE (JSCE-SF4) E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Para o valor de tenacidade da norma japonesa, tentou-se também estabelecer uma correlação com o aumento do teor de fibra, mostrando assim, o ganho de absorção de energia através do aumento do volume. Estes valores podem ser observados na tabela 5.6, assim como os valores de fator de tenacidade e de resistência à tração, na figura 5.13.

Tab. 5.6.: Equações e coeficientes de correlação, obtidos entre os fatores de tenacidade (JSCE-SF4) e o aumento do volume de fibras.

Matriz e tipo de fibra	Fator de tenacidade (JSCE-SF4)
	Equação e coeficiente de correlação
35AC	$Y = 0,1293X^{0,7935}$ $R^2 = 0,9844$
35AS	$Y = 0,8831X^{0,2158}$ $R^2 = 0,9977$
45AC	$Y = 2,3047X^{-0,0408}$ $R^2 = 0,0126$
45AS	$Y = 0,5437X^{0,4456}$ $R^2 = 0,8971$

Obs.: Y é referente ao fator de tenacidade e X diz respeito ao volume de fibra em kg/m^3 .

Como pode ser visto, os valores mostram uma ótima correlação indicando o ganho de tenacidade para o fator de tenacidade, à medida que se adicionou fibra, exceto para o concreto de 45AC. Pode ser visto na figura 5.13, que os valores de fator de tenacidade e de resistência à tração para a matriz de 35MPa, desenvolveram um ganho mais elevado de um volume para outro, quando se utilizou as fibras de aço colada. A superioridade também pode ser vista, quando se compara um mesmo volume que utiliza os dois tipos de fibras. Este melhor desempenho das fibras de aço colada, pode estar atribuído ao fato de que estas, possuem uma tensão de ruptura e um fator de forma maiores do que a fibra de aço solta. Este aumento da resistência à flexão com o acréscimo do volume de fibra, foi mostrado também por BANTHIA E SHENG (1996), trabalhando com teores de fibras mais elevados.

Apesar dos bons resultados na matriz de 35 MPa, o mesmo não pode ser afirmado com relação a matriz de 45 MPa com fibra de aço colada, devido a problemas associados aos resultados obtidos com esta série, já citados anteriormente, observando-se apenas o ganho no fator de tenacidade na variação do teor de fibras de 20 para 40 kg/m^3 . Para a resistência à tração, o mesmo concreto não obteve um valor crescente com o aumento do teor de fibra, devido aos grandes valores de carga de pico alcançados pelo teor de 20 kg/m^3 , fornecendo altos valores para esta propriedade. Entretanto, os valores de resistência à flexão, se mantiveram em um patamar condizente com os demais. Já a

outra série de 45 MPa, utilizando fibra de aço solta, apresenta as mesmas características de aumento, como observado no conjunto de 35 MPa. Os bons valores do fator de tenacidade, mostram que a instabilidade pós-pico não afetou esta determinação, que é realizada a partir da área definida até o ponto de deflexão (2mm), muito distante da região crítica que se situa logo após o ponto de 1ª fissura, que ficou em torno de 0,03 e 0,05 mm.

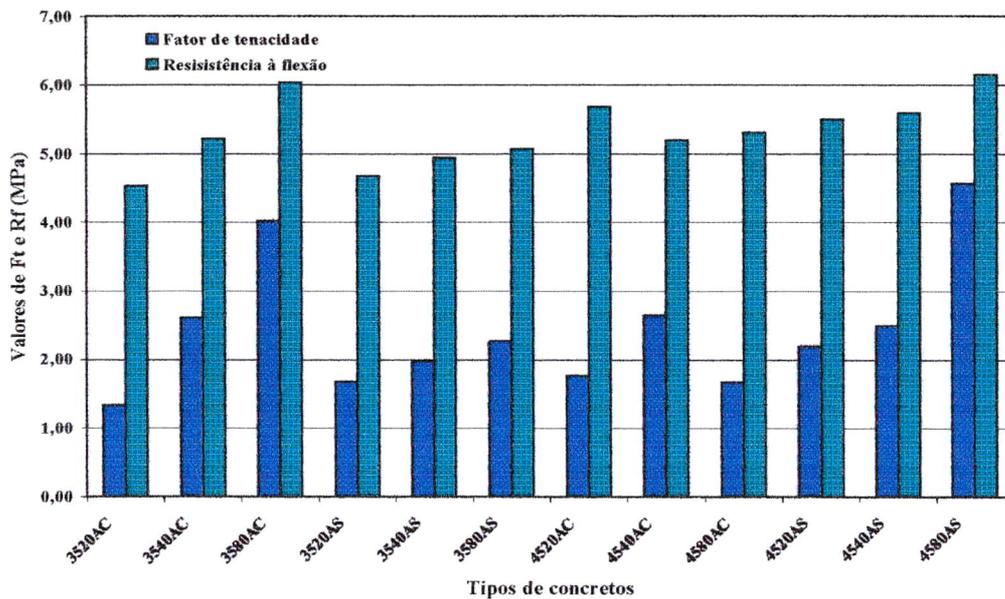


Fig. 5.13.: Valores de resistência à tração e fator de tenacidade encontrado nos ensaio à flexão, para todos os tipos de concretos.

Apesar de saber-se que o comportamento de um concreto reforçado com fibra não é elástico, algumas normas utilizam a teoria elástica para estimar uma tensão de tração equivalente, como é o caso da norma japonesa. Desta forma, tentou-se também estabelecer uma correlação entre o fator de tenacidade e resistência a tração, uma vez que o fator de tenacidade nada mais é do que uma tensão de tração equivalente, calculada através de um valor de carga média, pela teoria elástica. Estas correlações podem ser observadas através da figura 5.14, onde são apresentadas as equações encontradas e os coeficientes de correlação referente a cada equação.

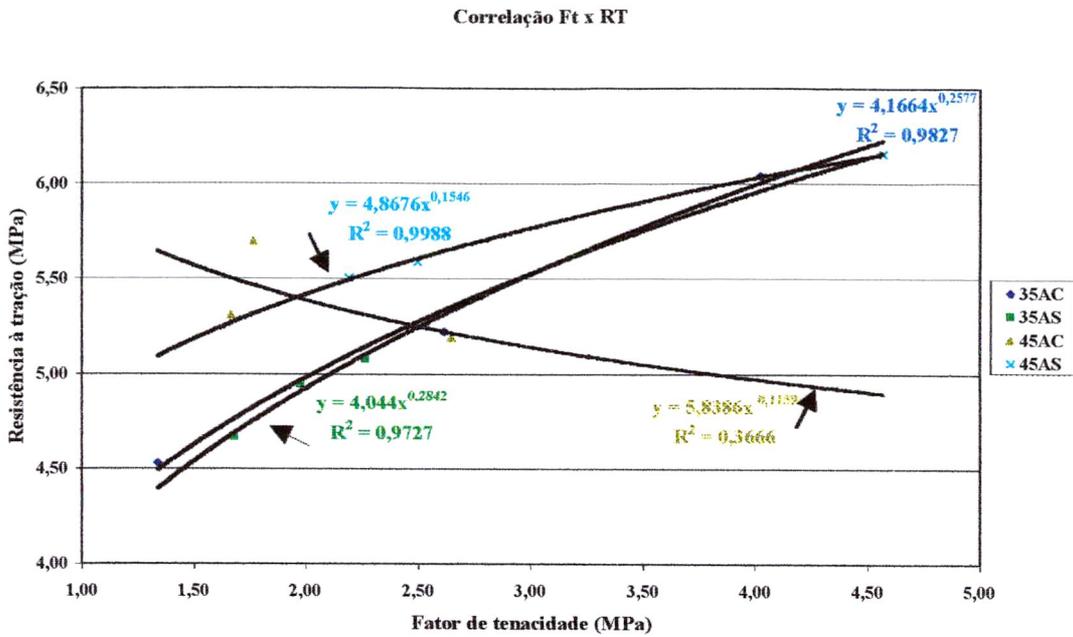


Fig. 5.14.: Correlação entre a resistência à tração e fator de tenacidade para cada um dos tipos de concretos ensaiados.

Pode-se observar, que existe uma ótima correlação para matriz de 35MPa com os dois tipos de fibras e para a matriz de 45 MPa para a fibra de aço solta, sendo que para a outra matriz de 45 MPa, com fibra colada, o fator de tenacidade no teor de 80 kg/m³, impediu a obtenção de uma boa correlação. Nas curvas que representam as matrizes de 35 MPa, pode ser visto que independente do tipo de fibra, as curvas são praticamente coincidentes. Através desses resultados, constata-se que um aumento no teor de fibra proporciona um acréscimo simultâneo na resistência à flexão, e no aumento no fator de tenacidade, quando se mantém constante a matriz.

5.3.4) TIPO DE MATRIZ

A influência da matriz, no desenvolvimento da tenacidade, tem um papel fundamental, pois é da melhor união entre fibra e matriz, através de uma massa de concreto mais compacta, é que se consegue um trabalho efetivo das fibras no processo de arrancamento, aumentando assim os valores de energia absorvida. Para vários pesquisadores, o aumento desta compactidade pela diminuição da relação água/cimento ou pela adição de sílica ativa, provoca um aumento na carga de primeira fissura, proporcionando uma queda brusca pós-pico. Isto, por sua vez, promove um aumento da

região elástica (área OAB pré-pico), desenvolvendo um comportamento mais frágil, que não seria suportado imediatamente pelas fibras após a ruptura, diminuindo assim os índices de tenacidade (FIGUEIREDO, 1997; BALAGURU, NARAHARI, PATEL, 1992).

Entretanto, os resultados apresentados na figura 5.15, mostram que o aumento da resistência da matriz gerou um ganho nos valores dos índices de tenacidade.

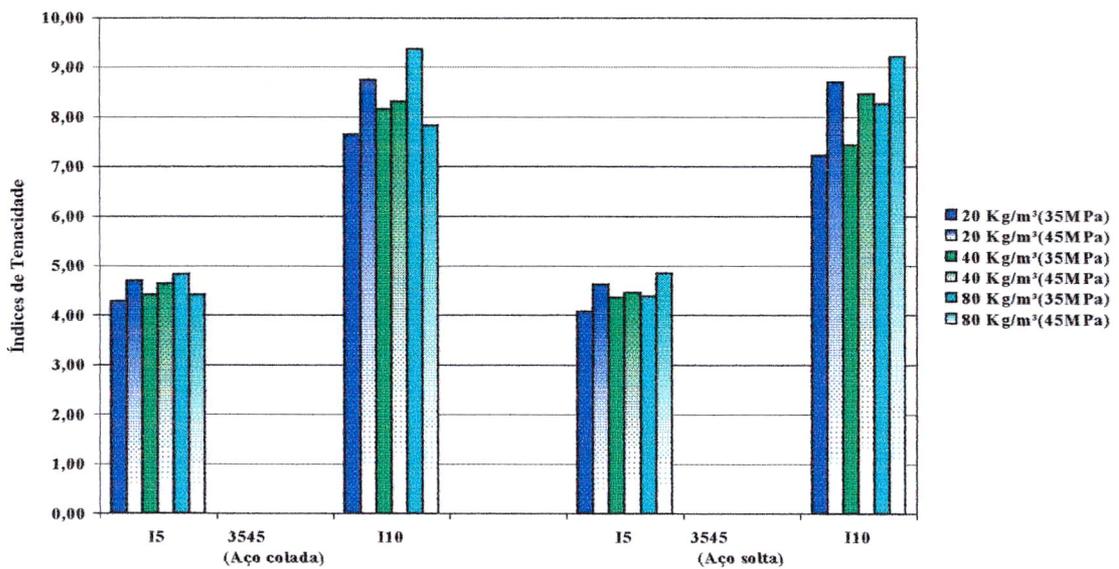


Fig. 5.15.: Comparação dos valores dos índices de tenacidade I_5 e I_{10} , obtidos segundo a ASTM C1018 (1994) para matrizes de resistência diferentes.

Este aumento está intimamente ligado com a melhora da união entre fibra e matriz, promovendo um aumento nos valores de I_5 e I_{10} , devido ao acréscimo da resistência da matriz, com exceção do valor de 80 kg/m³ de fibra de aço colada (45MPa). O comportamento dos dois tipos de fibras é praticamente o mesmo, mantendo-se em um mesmo patamar, não havendo assim, a superação de um tipo sobre o outro.

5.3.5) DISCUSSÃO SOBRE OS VALORES DOS ÍNDICES DE TENACIDADE PELA ASTM C1018

Ao longo deste capítulo, foram realizados estudos com relação aos índices de tenacidade utilizados pela norma americana ASTM C 1018 (1994), cujo o cálculo envolve uma relação entre áreas, como explicado no capítulo 3. Os valores surgem da

relação de área sob a curva carga x deflexão, para múltiplos de deflexão da primeira fissura, dividido pela área da curva até o ponto de primeira fissura. Sendo assim, se um material possui um comportamento elasto-plástico perfeito, esses índices assumem o valor total correspondente (Ex.: $I_5 = 5$; $I_{10} = 10$). Esse comportamento, está diretamente relacionado com o volume crítico de fibra, que é definido como sendo o volume de fibras que pode suportar a carga que o compósito resistia antes da fissuração, ou seja, mesmo após a fissuração da matriz, o nível de carregamento deveria permanecer constante.

Então, se um material que obtiver um ganho de comportamento pós-pico (como na figura 5.11), os valores dos índices de tenacidade deveriam ultrapassar o seu valor total correspondente, mas, em alguns casos, isto não acontece, como foi observado ao longo de todos os gráficos analisados. Através da figura 5.16, foram calculados vários valores para um mesmo índice, mostrando o porque de não se obter resultados superiores aos valores totais correspondentes, sendo que o comportamento pós-pico é superior ao de um material elasto-plástico perfeito. Para a determinação das áreas abaixo da curva carga x deflexão, utilizou-se uma integral numérica com os pontos de carga e de deflexão registrados durante a realização dos ensaios.

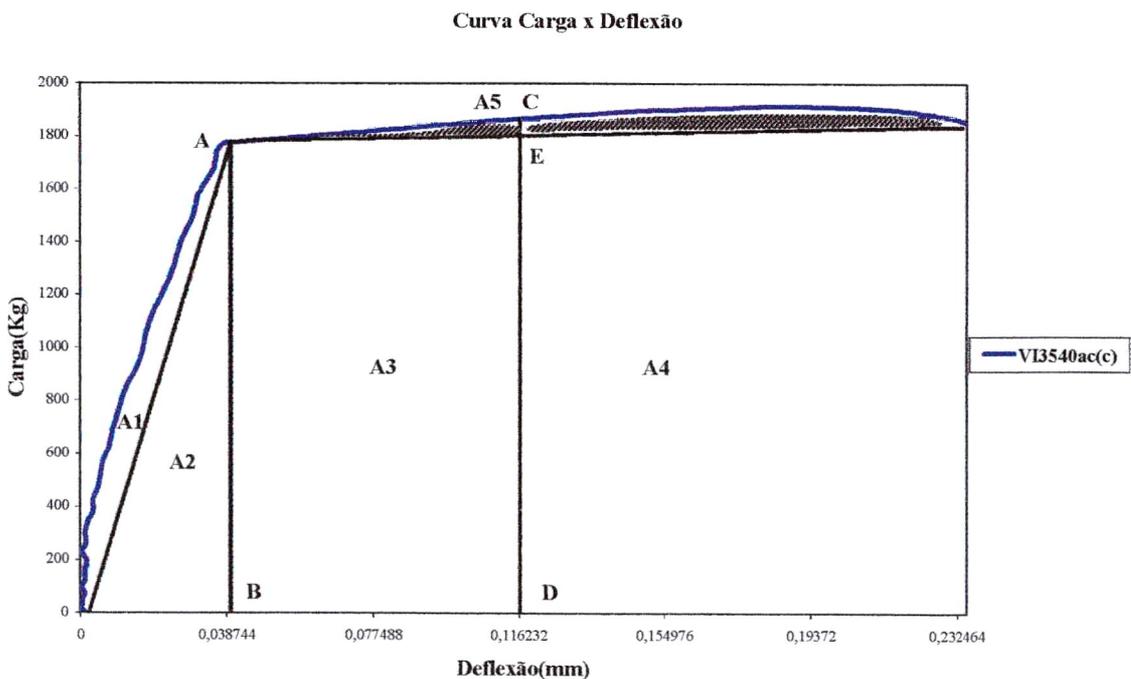


Fig.5.16.: Curva carga x deflexão para o concreto de 35 MPa , contendo 40 kg/m³ de fibras de aço colada, com as respectivas áreas para o cálculo do valor de I_5 .

As áreas apresentadas na figura 5.16 possuem os seguintes valores:

$$A_1 = 0,0858494 \text{ KN.mm}$$

$$A_2 = 0,3436156 \text{ KN.mm}$$

$$A_3 = 1,3862657 \text{ KN.mm}$$

$$A_4 = 2,1742877 \text{ KN.mm}$$

$$A_5 = 0,0239499 \text{ KN.mm}$$

Para os cálculos feitos para este exemplo, as cargas foram determinadas através de interpolação, pois estes valores se encontravam entre as deflexões de 0,038744 e 0,2352. Isto aconteceu, pois após o momento de ruptura, que ocorreu na deflexão de 0,038744 devido a queda do corpo de prova provocado pelo rompimento brusco, houve um aumento súbito para 0,2352. Isto acontece pelo problema de instabilidade pós-pico, entretanto, poderíamos minimiza-lo com o aumento da velocidade de leitura, o que forneceria mais pontos para esta região, melhorando o cálculo da área por integral numérica. Com isso o valor de $I_{5\text{CÁLC.}}$, é apresentado logo abaixo:

$$I_{5\text{CÁLC.}} = \frac{A_3 + A_2 + A_1}{A_2 + A_1} = \frac{1,3862657 + 0,3436156 + 0,0858494}{0,3436156 + 0,0858494} = 4,23$$

Acreditava-se inicialmente que a perda da área rachurada, referente ao cálculo de I_5 , provocava a diminuição do seu valor. Então, adicionou-se a área A_5 (área ACE) para a obtenção do novo valor.

$$I_{5\text{REAL}} = \frac{A_3 + A_2 + A_1 + A_5}{A_2 + A_1} = \frac{1,3862657 + 0,3436156 + 0,0858494 + 0,0239499}{0,3436156 + 0,0858494} = 4,28$$

Entretanto, como pode ser observado, os valores de $I_{5\text{CÁLC.}}$ é aproximadamente igual ao valor de $I_{5\text{REAL}}$, havendo apenas um aumento de 1,18%, o que não é o suficiente para fornecer um resultado acima de 5. Sendo assim, a perda neste valor teria que estar associada a outro motivo, pois uma vez que o I_5 é decorrente de uma relação de área, um ganho maior do que 5 deveria ter sido encontrado para o exemplo da figura 5.16. Para o valores de I_{10} , talvez a perda da área fizesse mais diferença no valor final, mas assim como no I_5 , o aumento no ganho de tenacidade foi de apenas 2,27%, ficando assim, bem abaixo de 10.

CÁNOVAS (1997), afirma em seu trabalho que a linearidade da curva até alcançar a primeira fissura ou o limite elástico, pode ser perfeita ou sofrer deslocamentos se o volume de fibra for elevado. No exemplo utilizado, que possui metade do volume considerado como crítico, podemos observar o completo deslocamento do trecho elástico, não havendo assim, a linearidade da curva até o ponto de primeira fissura. Como o valor de I_5 é uma relação da área 0ACD pela área 0AB, esse deslocamento provoca um aumento do valor de 0AB, diminuindo assim o resultado do índice, já que a norma supõe o trecho elástico, como sendo completamente retilíneo. O fato de não haver um aumento do I_{5REAL} com a inclusão da área A_5 , é porque o acréscimo é modesto (1,73%), enquanto que para o trecho linear, o ganho chega ao valor de 25%. Supondo-se então o trecho elástico como sendo retilíneo, o novo valor do índice é apresentado abaixo:

$$I_{5TEÓRICO} = \frac{A_3 + A_2 + A_5}{A_2} = \frac{1,3862657 + 0,3436156 + 0,0239499}{0,3436156} = 5,10$$

Com a eliminação desta plastificação ocorrida no trecho elástico, obteve-se um valor condizente com o comportamento de ganho de tenacidade, observado na curva da figura 5.16. A norma americana, ASTM C1018 (1994), trata o problema de convexidade do trecho elástico, dizendo que “a linha retilínea deve ser utilizada preferencialmente, para o cálculo da área, ao invés do trecho com o deslocamento”. Já, em outra parte, a mesma diz que o denominador dos índices de tenacidade é composto da “área até o ponto de primeira fissura”. Admitindo-se o trecho elástico como linear, estaríamos medindo um valor fictício, mascarando assim o real comportamento do material, o que também não seria correto.

A ASTM C1116 (1991), especifica uma tabela que contém vários níveis de desempenho, através dos índices de tenacidade, que podem ser especificados para o controle dos concretos reforçados com fibra. Estes níveis variam de I a IV, sendo que os valores mostrados e discutidos aqui, se enquadram entre os níveis II e III, estando mais próximos do nível II. Isto significa que, mesmo com os problemas de misturas, bons resultados foram obtidos, atendendo assim as expectativas de um elevado nível de tenacidade obtidos pelos concretos com fibras confeccionados.

5.4) ENSAIO DE FLEXÃO EM PLACAS QUADRADAS

Os ensaios de flexão em placas quadradas foram realizadas conforme o apresentado no capítulo 4, para a obtenção das curvas de carga x deflexão e as devidas análises. Para este ensaio, foi utilizada a recomendação europeia, EFNARC (1996), sendo respeitado uma leitura máxima de deformação de 25mm, além da obtenção das curvas de energia absorvida, até a referida deflexão. Serão apresentados a seguir os resultados obtidos, assim como todas as análises estatísticas pertinentes a este estudo.

O procedimento de ensaio adotado difere dos usualmente realizados, na forma da medição da deflexão, uma vez que foi realizada na parte superior do corpo de prova, através da média do resultado da leitura de dois extensômetros. Esta forma foi escolhida, para evitar problemas que ocorrem com a medição realizada na parte inferior pois, quando a placa se encontra em um elevado nível de fissuração, a extremidade do extensômetro pode entrar na abertura provocada, o que pode ocasionar uma completa perda das leituras. Os resultados de energia e carga máxima encontrados nos testes, são apresentados na tabela 5.7 e na figura 5.17.

Tab. 5.7.: Resultados dos testes do ensaio de flexão em placas quadradas.

Misturas	Carga de pico	Energia absorvida até a deflexão de 25mm (joules)
3520AC	5266,23 (18,44)*	659,37 (20,81)*
3540AC	6411,99 (16,89)*	917,95 (12,70)*
3580AC	8241,42 (10,91)*	1143,53 (5,55)*
3520AS	4764,94 (7,22)*	569,86 (6,77)*
3540AS	7423,48 (11,69)*	752,41 (5,30)*
3580AS	8925,81 (13,20)*	943,40 (8,85)*
4520AC	6758,10 (17,23)*	696,82 (6,95)*
4540AC	7343,10 (8,53)*	904,29 (0,52)*
4580AC	8122,71 (14,97)*	957,85 (4,67)*
4520AS	6637,37 (16,05)*	565,92 (17,69)*
4540AS	7596,37 (16,10)*	1002,80 (6,73)*
4580AS	10647,99 (12,63)*	1237,89 (9,20)*
CV (%) total	13,24	9,37

Obs.: CV *(coeficiente de variação em porcentagem).

Resultados dos ensaios em placas quadradas

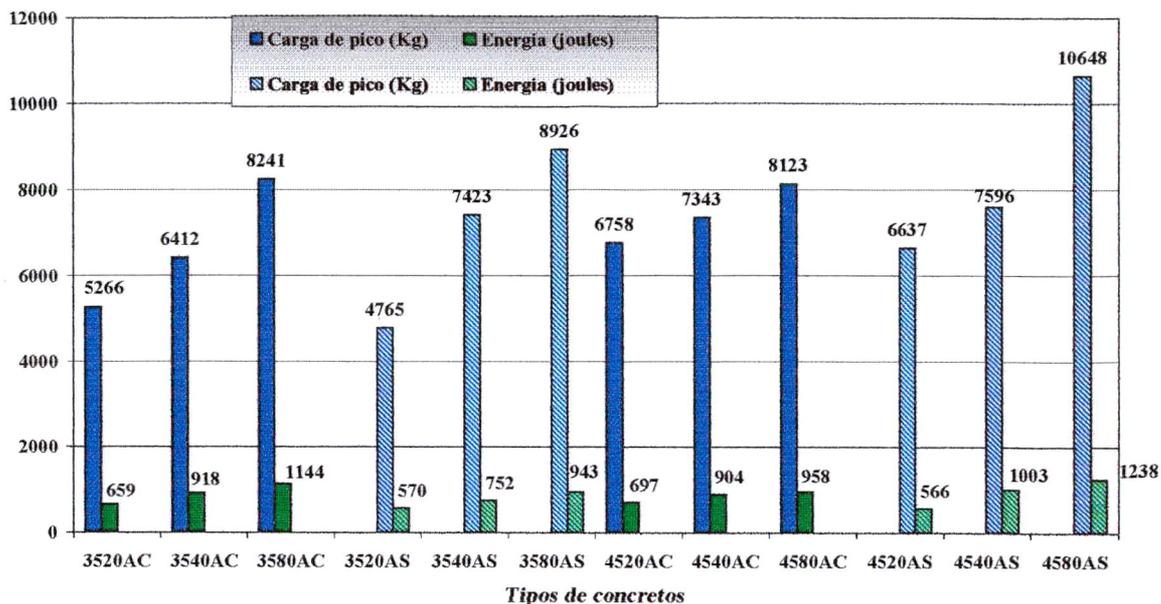


Fig. 5.17.: Resultados de carga de pico e energia (25mm) para o ensaio de flexão em placas quadradas.

Para efeito de classificação, a EFNARC, além de definir classes para o ensaio de flexão em vigas, também define classes de tenacidade para o ensaio de placas quadradas, que são encontradas na tabela 3.4 do item 3.3.2.7. Para os diferentes tipos de misturas testadas, a tabela 5.8 mostra em que classe os níveis de energia, determinados neste trabalho, se encontram.

Tabela 5.8.: Classificação dos concretos, através da energia absorvida até a deflexão de 25mm, segundo EFNARC.

Misturas	Energia (valores médios)	Classificação de acordo com a EFNARC
3520AC	659,37	A
3520AS	569,86	A
3540AC	917,95	B
3540AS	752,41	B
3580AC	1143,53	C
3580AS	943,40	B
4520AC	696,82	A
4520AS	565,92	A
4540AC	904,29	B
4540AS	1002,80	C
4580AC	957,85	B
4580AS	1237,89	C

5.4.1) TIPO DE FIBRA

Como pode ser visto na figura 5.17, para os concretos de 35 MPa, as placas com fibras de aço colada, tiveram um desempenho superior ao das placas com fibras soltas, quanto à absorção de energia até a deformação de 25mm. O mesmo não aconteceu para os concretos de 45 MPa, onde apenas os corpos de prova com teor de 20 kg/m³ de fibra de aço colada, mostrou uma maior capacidade de absorver energia. Entretanto, essas diferenças não são significativas, com um nível de 99 % de confiança, sendo que apenas no concreto 4580AS foi verificado um aumento de energia de 29% em relação ao 4580AC, o que mostrou ser uma diferença significativa.

Um vez que as fibras coladas possuíam um maior fator de forma e um comprimento similar, esperava-se que a tenacidade e provavelmente a carga de pico dos concretos reforçados, com este tipo de fibra, superasse o desempenho daqueles reforçados com as fibras soltas pois, para um mesmo teor de fibras/m³ de concreto, haveria mais unidades de fibras funcionando como pontes de transferência de tensão nas fissuras.

Comparando os resultados obtidos, observou-se que esta tendência só se verificou no caso dos teores de 20 kg/m³, para as duas matrizes testadas. No caso da matriz de 35 MPa, para os teores de fibra de 40 e 80 kg/m³, constatou-se que houve uma superação nas energias absorvidas para o caso das fibras coladas, apesar da carga de pico ter apresentado comportamento oposto. Constata-se com isso, que a região pós fissuração se torna parte determinante para o cálculo do valor da tenacidade, uma vez que essa área é significativamente maior do a área pré-pico. Já para os concretos de 45 MPa, verificou-se perdas de tenacidade e carga de pico para os teores de 40 e 80 kg/m³ de fibras.

Esses comportamentos inesperados, provavelmente ocorreram, devido à má dispersão das fibras coladas nos concretos, fato este citado anteriormente. Isto foi particularmente significativo no caso da matriz de 45 MPa, devido, possivelmente, à maior coesão da mistura que dificultou ainda mais o processo de dispersão das fibras.

5.4.2) VOLUME DE FIBRA

Como pôde ser visto na tabela 5.5, o coeficiente de variação total permaneceu dentro de um valor aceitável de no máximo 10 %, mostrando que a dispersão dos resultados permaneceu constante, proporcionando bons resultados. Entretanto, essa baixa variabilidade do ensaio não é comum e pode ser atribuída ao fato do concreto ter sido moldado, ao invés de sofrer todos os danos a que estão sujeitas as amostras, quando são confeccionadas pelo processo de projeção. Esses danos afetam diretamente os resultados, pois interferem na planicidade da placa, fornecendo um apoio de má qualidade, o que causa um aumento da variabilidade dos resultados. Além disso, o fato de se trabalhar com deflexões muito elevadas, conduz à uma uniformização dos resultados reduzindo a variabilidade.

Assim como nos ensaios de flexão em vigas, o ensaio de placas quadradas mostrou ganho de tenacidade com o aumento do volume de fibra, sendo semelhante a todos os resultados apresentados pela bibliografia citada ao longo deste trabalho. Também, como pôde ser observado na figura 5.17, esse aumento do teor de fibra proporcionou um aumento na carga de pico, isso para um mesmo tipo de fibra. Nas figuras 5.18 e 5.20 que seguem, pode ser observado o aumento da tenacidade de acordo com o aumento da quantidade de fibra, através da curva carga x deflexão, sendo as fibras coladas ou não. Essas figuras são acompanhadas por outras duas, figuras 5.19 e 5.21, que mostram os gráficos de energia x deflexão exigidos pela EFNARC (1996), para os resultados encontrados.

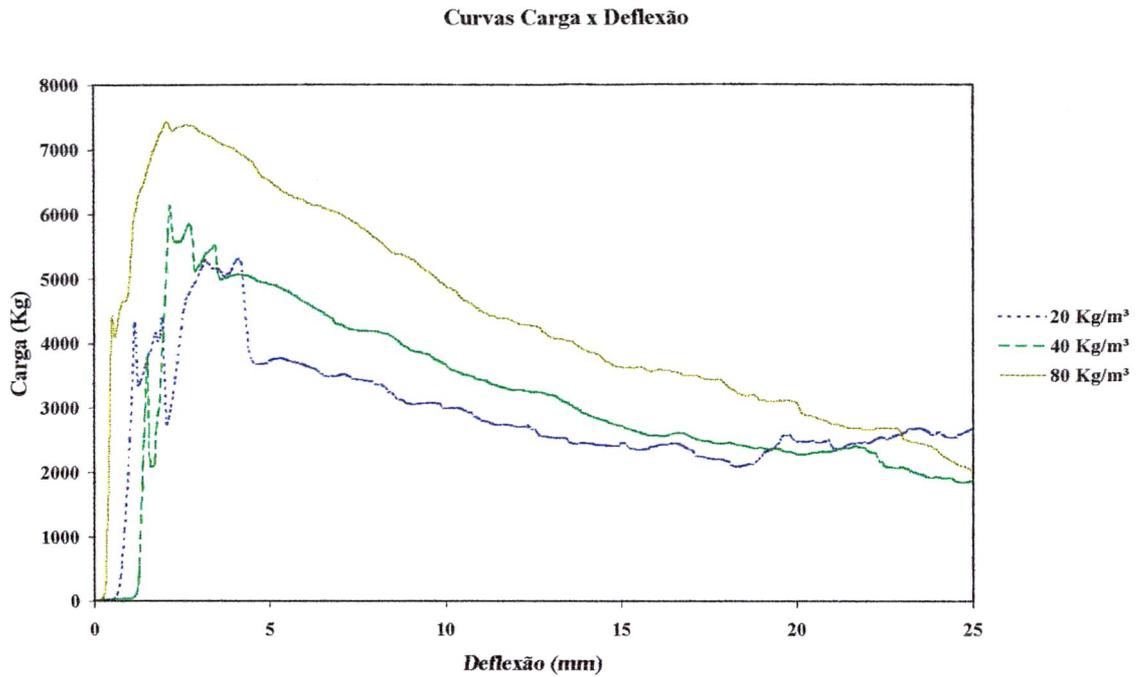


Fig. 5.18.: Curvas de carga x deflexão para os três teores utilizados nos concretos reforçados com a fibra de aço colada, na resistência de 35 MPa.

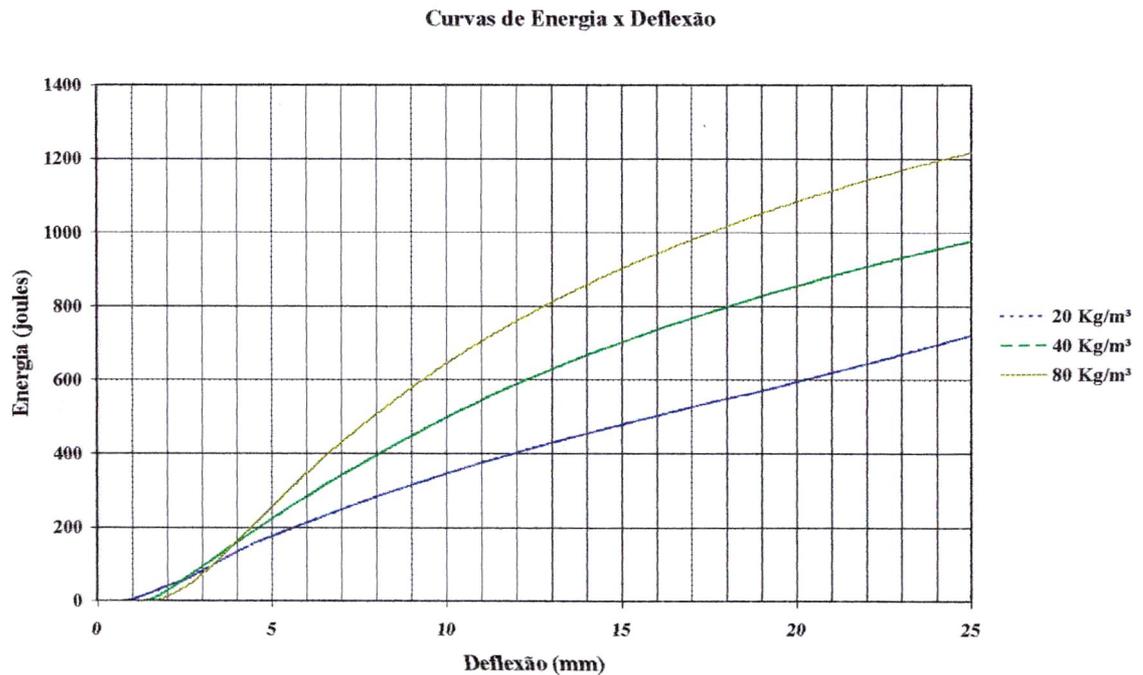


Fig. 5.19.: Curvas de energia x deflexão para os três teores utilizados nos concretos reforçados com a fibra de aço colada, na resistência de 35 MPa.

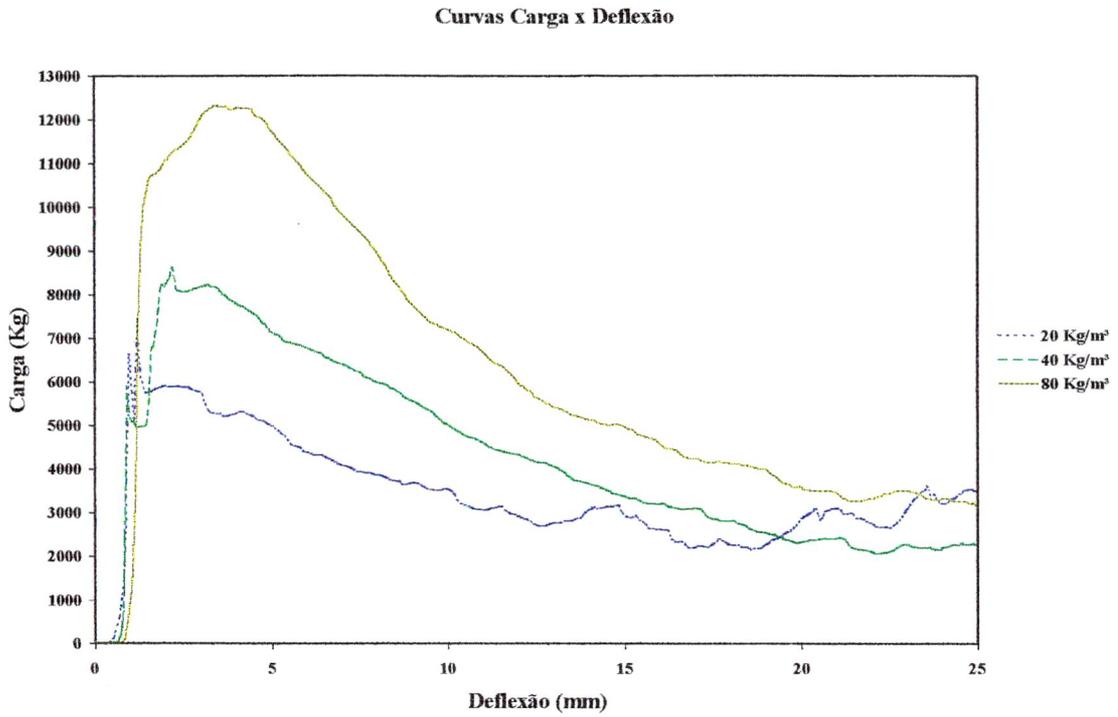


Fig. 5.20.: Curvas de carga x deflexão para os três teores utilizados nos concretos reforçados com a fibra de aço solta, na resistência de 45 MPa.

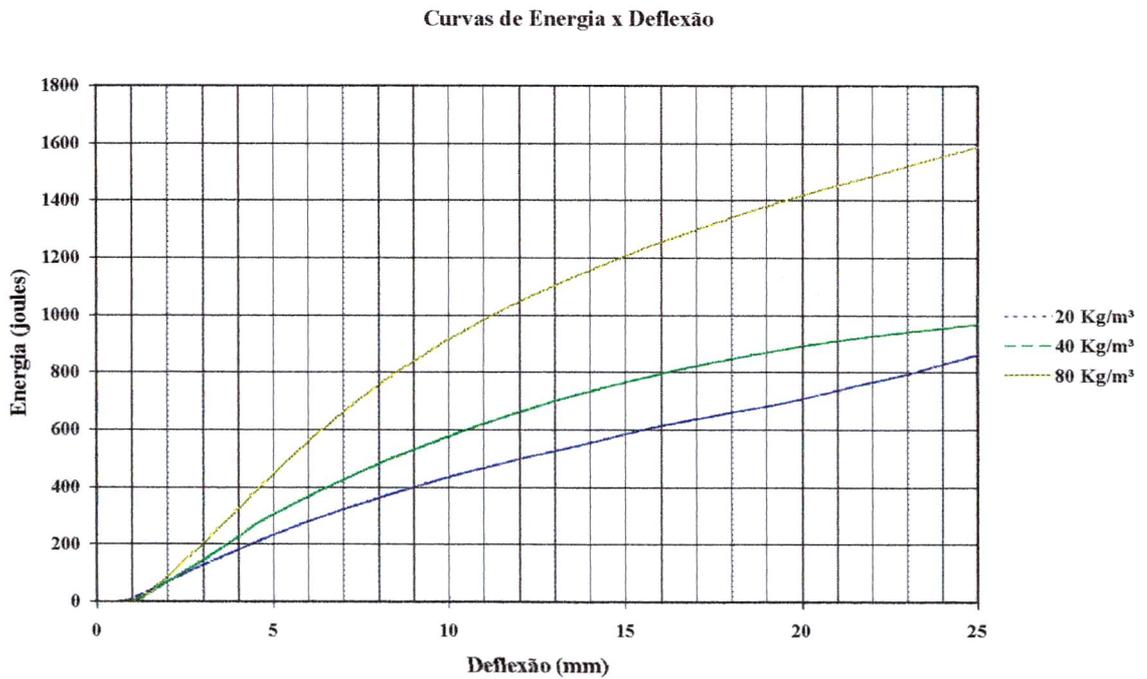


Fig. 5.21.: Curvas de energia x deflexão para os três teores utilizados nos concretos reforçados com a fibra de aço solta, na resistência de 45 MPa.

Os gráficos apresentados nas figuras 5.18 e 5.20, não são valores médios e sim valores individuais, mostrados com o intuito de representar o comportamento encontrado nos concretos reforçados com fibras. Os gráficos de energia, representados nas figuras 5.19 e 5.21, são referentes aos resultados obtidos nas curvas carga x deflexão das outras duas figuras. Nota-se também, que a adição de maiores teores de fibras, proporciona um aumento considerável da carga de pico para uma mesma resistência, principalmente para o teor de 80 kg/m^3 , mostrando a eficiência desses filamentos de aço em controlar o aparecimento e a abertura das fissuras principais.

Apesar de serem apresentados apenas seis dos doze tipos de concretos confeccionados neste trabalho, o comportamento dos demais se assemelha aos apresentados, ou seja, para todos os concretos, quanto maior o volume de fibra utilizado, maior a quantidade de energia absorvida no processo, mostrando a eficiência dos dois tipos de fibra na diminuição do comportamento de fragilidade dos concretos convencionais.

As medidas de deflexão foram realizadas pela parte superior do corpo de prova, por se acreditar que, com esta forma de medição, estaria-se eliminando os problemas de acomodação existente durante o início do ensaio, que provocam deformações extras. Mas como podemos observar nas figuras 5.18 e 5.20, essas deformações não foram completamente eliminadas, uma vez que além das deformações dos apoios, existe ainda, a deformação proporcionada pela cravação da área de $10 \times 10 \text{ cm}$, utilizada para a aplicação de carga.

5.4.3) TIPO DE MATRIZ

Ainda podemos observar, nas figuras 5.18 e 5.20 que, na região de aberturas das fissuras principais, que se situa na zona da carga de pico, o processo de formação dessas fissuras nos concretos de 35 MPa é mais instável, mostrando várias oscilações nos gráficos, principalmente para os teores de 20 e 40 kg/m^3 , onde a quantidade de fibra não é alta o suficiente para controlar esse processo. Já para os concretos de 45 MPa, observamos um maior controle deste fenômeno, inclusive nos dois teores mais baixos, mostrando que a melhora da compacidade da matriz, é importante e proporciona um ganho no processo de formação das fissuras, devido a boa aderência das fibras na matriz.

Na figura 5.22, pode ser observado a diferença de energia de acordo com o aumento da resistência da matriz.

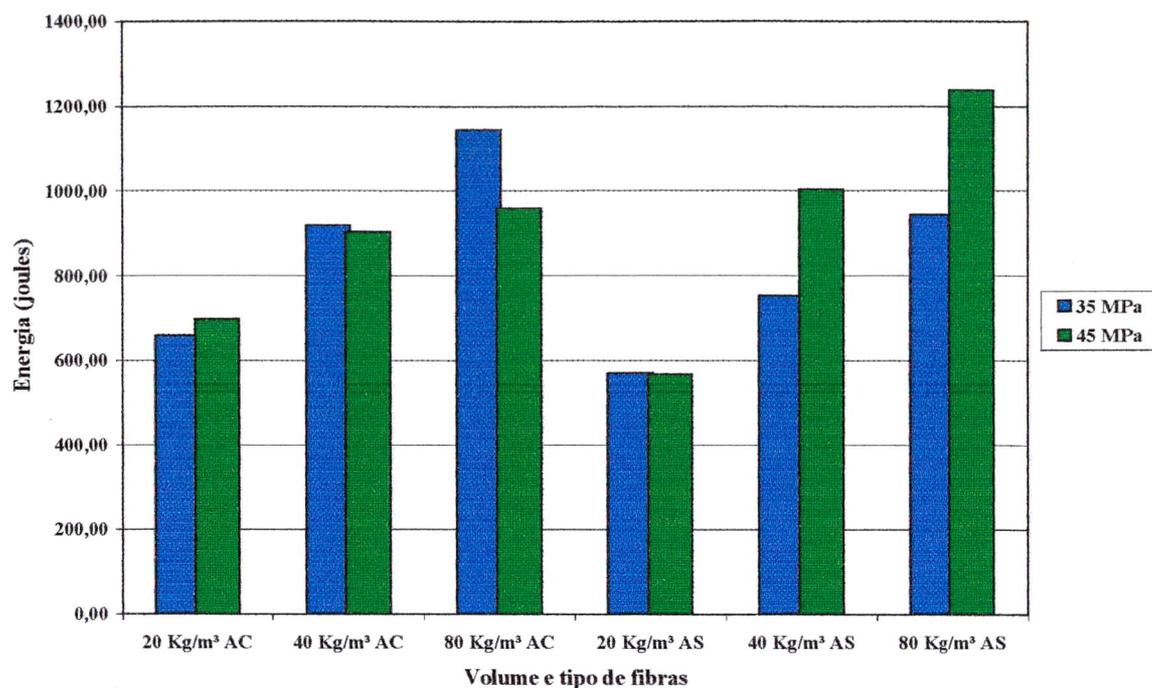


Fig. 5.22.: Valores de energia média para cada teor e tipo de fibra, mostrando a diferença para as duas matrizes utilizadas (placa quadrada).

Observa-se que para os concretos com fibras de aço solta, os valores de tenacidade obtidas com o aumento da resistência da matriz, tendem a ser mais elevados pois, como explicado anteriormente, uma matriz de compacidade mais elevada fornece uma maior aderência entre fibra/matriz, melhorando assim o desempenho do processo de absorção de energia. Para as placas que foram ensaiadas com a fibra de aço colada, essa tendência apareceu apenas para o teor de 20 kg/m³, sendo que o valor de 40 permaneceu praticamente igual, havendo a superação nos concretos com matriz de 35 sobre os de 45 MPa com volume de fibra de 80 kg/m³.

Tentou-se ainda, estabelecer uma correlação entre a energia absorvida nas placas quadradas, com a energia (T_{jci}) encontradas nos ensaios de flexão em corpos prismáticos (vigas). As equações encontradas, com os respectivos valores de índice de correlações, são apresentados a seguir na figura 5.23.

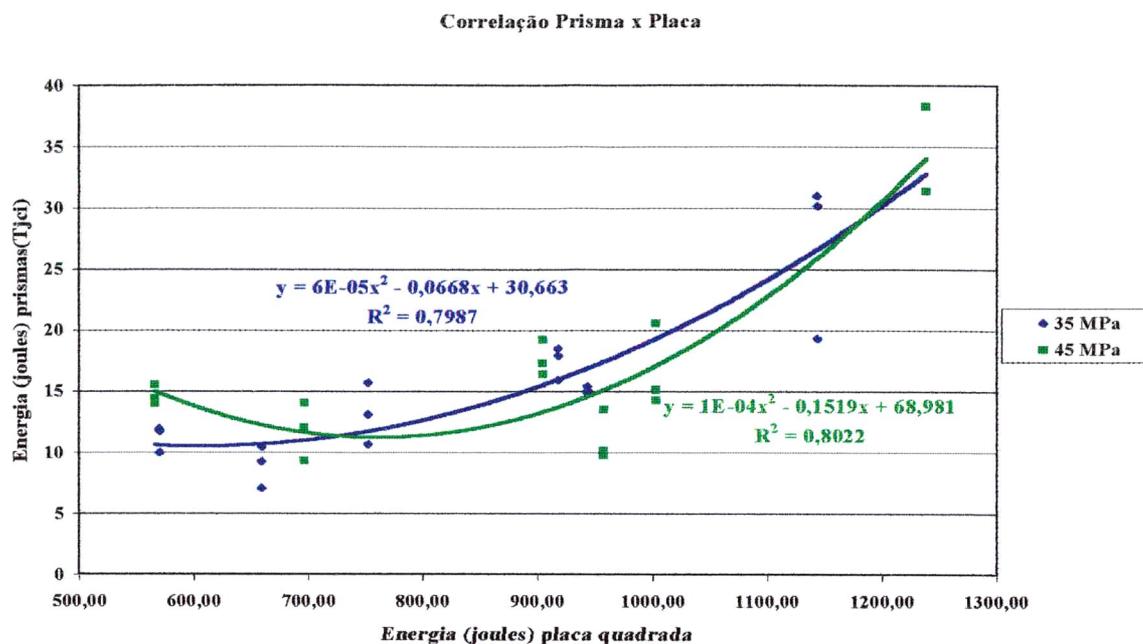


Fig. 5.23.: Correlação entre as energias absorvidas no ensaio de flexão em placa quadrada e no de flexão em prismas.

O resultado apresentado, não mostra excelentes índices de correlação, mas indicam a possível existência, uma vez que se trata da mesma propriedade, em escalas diferenciadas. Essa correlação pode ter sido prejudicada, pelo elevado coeficiente de variação encontrado nos ensaios de flexão de vigas, que ficou em torno de 21 %.

Todos os resultados apresentados para o ensaio de absorção de energia em placas quadradas, sujeitas a flexão, estão de acordo com a maioria dos números apresentados ao longo deste estudo, mostrando que os objetivos para a realização deste ensaio, na obtenção da tenacidade, foram alcançados com êxito. Estes aumentos na tenacidade, refletidos na resposta pós-pico, são devidos às contribuições das fibras em controlar a fissuração e manter o material coeso, mesmo após grandes deformações, como explicado por GOPALAKRISHNAN, *et. al.*(1998). No citado trabalho, são apresentados ganhos de tenacidade devido à adição das fibras, mesmo no caso de deformações tão elevadas, que de forma alguma representam a condição de serviço ideal para os concretos reforçados, podendo ser esses valores, desnecessários para a análise dos dados.

5.5) ENSAIO DE FLEXÃO EM PLACAS TRIANGULARES

O estudo de flexão, realizado em placas triangulares, tem com principal objetivo, proporcionar mais uma ferramenta para testes na propriedade tenacidade dos concretos reforçados com fibras. Será comentado a seguir, que este ensaio possui potencial para a obtenção da tenacidade, através das curvas carga x deflexão, assim como as curvas de energia x deflexão, como as que são exigidas pela EFNARC (1996). Além disso, esse tipo de ensaio propicia uma diminuição do peso dos corpos de prova em relação às placas quadradas, que facilmente chegam ao valor de 100 kg, tornando assim o seu manuseio completamente desfavorável. Enquanto a placa quadrada possui um volume de cerca de 43,37 l, desde que se respeite todas as medidas, a placa triangular possui um volume de 21,36 l, tendo quase a metade da outra placa, fazendo com que o seu peso também seja reduzido pela metade.

Como foi observado ao longo dos ensaios de flexão em placa quadrada, existe a cravação do dispositivo aplicador de carga (10 x 10cm), que proporciona o aumento das deformações. Isso por sua vez, no ensaio de flexão em placa triangular, é corrigido com a leitura desta deformação por cravação, que é posteriormente retirada. Como podemos observar nas figura 5.24 e 5.25, o valor desta deformação é expressivo.

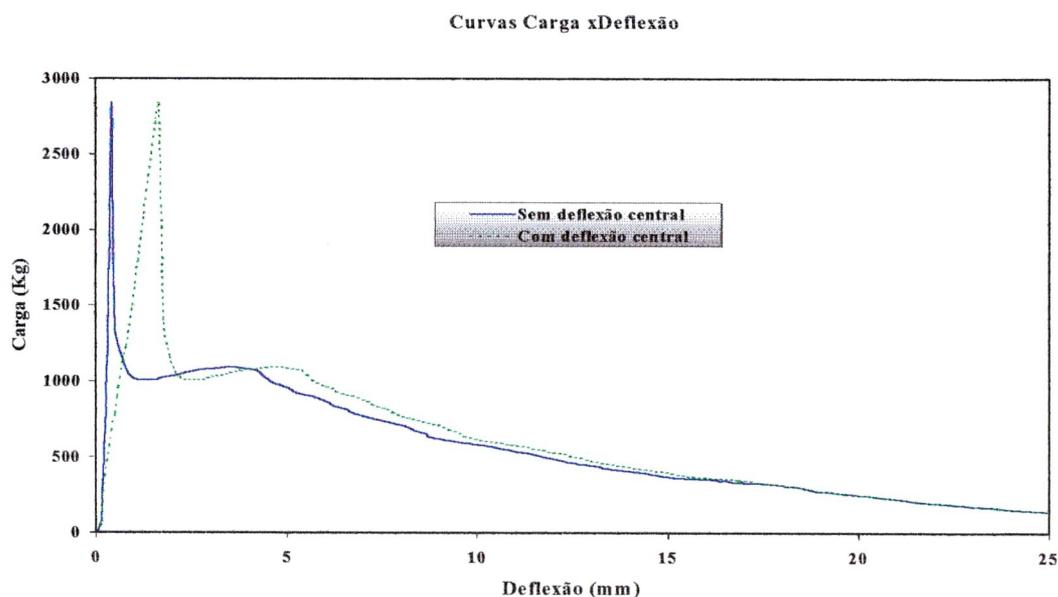


Fig. 3.24.: Curva carga x deflexão obtida no ensaio de flexão em placa triangular, com e sem a inclusão da deformação ocorrida no centro da placa, devido a cravação do dispositivo aplicador de carga.

Curvas de Energia x Deflexão

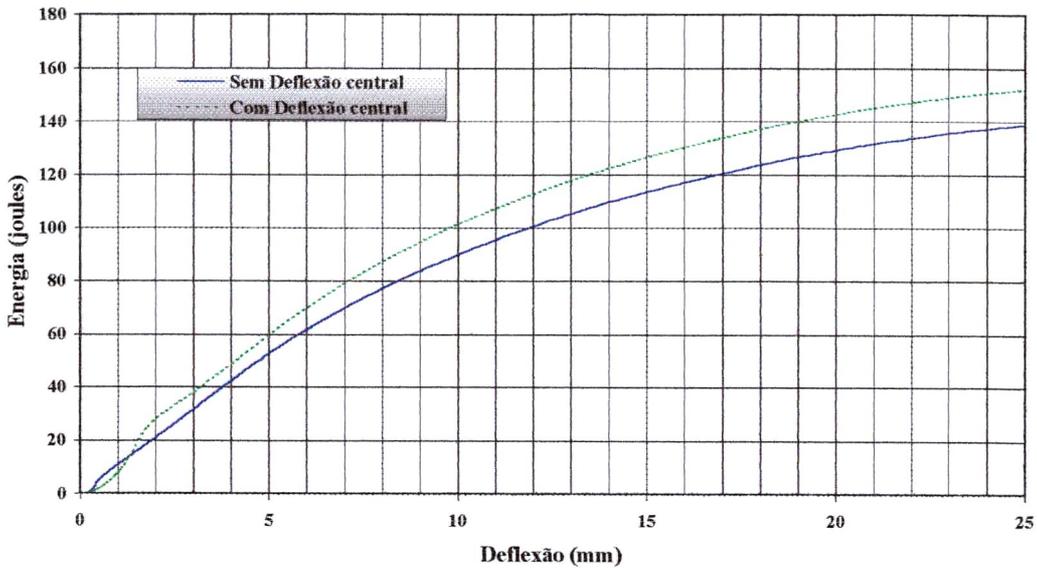


Fig. 5.25.: Curva energia x deflexão obtida no ensaio de flexão em placa triangular, com e sem a inclusão da deformação ocorrida no centro da placa.

Como pode-se observar, o aumento da tenacidade (área sob a curva), pela retirada ou não da leitura realizada na parte central, não deve ser desprezado, pois altera completamente o comportamento pós-pico, superestimando o valor de energia absorvida. O aumento de energia devido a deformação extra, chega a quase 10 % do valor final, não devendo ser ignorada no estudo da propriedade tenacidade. Entre tanto para um nível de deflexão menor (5mm) esse erro tende a ser menor. O caso aqui analisado, é para um concreto de 35 MPa utilizando 20 kg/m³ de fibra de aço solta, sendo o aumento de 10% da energia absorvida, exclusivo para o estudo realizado, não sendo assim, um valor fixo para todas as placas.

No gráfico da figura 5.24, observa-se que a deformação extra, fica restrita aos primeiros 15mm, estabilizando-se após este valor, pois a carga suportada passa a ser tão pequena, que o processo de encunhamento deixa de existir. Esta mesma observação, foi feita por GOPALARATNAM, *et. al.* (1991), para o ensaio de flexão em prismas com e sem as deformações externas, cuja maior influência ocorre na região pós-pico, onde são feitas as principais medidas de tenacidade da norma americana.

Assim como nos demais estudos aqui realizados, tentou-se mostrar as diferenças entre os dois tipos de fibras de aço utilizadas, para o aumento da propriedade tenacidade, além, é claro, do teor de fibra e do tipo de matriz. Os resultados obtidos através do ensaio de flexão em placas triangulares, podem ser vistos e analisados pela tabela 5.9 e pela figura 5.26.

Tab. 5.9.: Resultados dos testes do ensaio de flexão em placas triangulares.

Misturas	Carga de pico	Energia absorvida até a deflexão de 25mm (joules)
3520AC	26,44 (6,93)*	40,12 (16,45)*
3540AC	29,05(5,25)*	135,62 (15,29)*
3580AC	37,99(5,36)*	286,08 (4,29)*
3520AS	31,57(7,12)*	122,10 (12,24)*
3540AS	28,39(9,49)*	193,71 (1,48)*
3580AS	31,51(7,20)*	265,52 (10,23)*
4520AC	36,28(10,69)*	102,89 (36,15)*
4540AC	34,61(11,17)*	119,72 (5,08)*
4580AC	39,92(10,75)*	240,01 (6,10)*
4520AS	35,01(10,40)*	87,26 (7,12)*
4540AS	39,19(8,30)*	188,97 (7,73)*
4580AS	40,24(3,54)*	342,27 (1,96)*
CV (%) total	8,06	9,68

Obs.: CV *(coeficiente de variação em porcentagem).

Resultados dos ensaios em placas triangulares

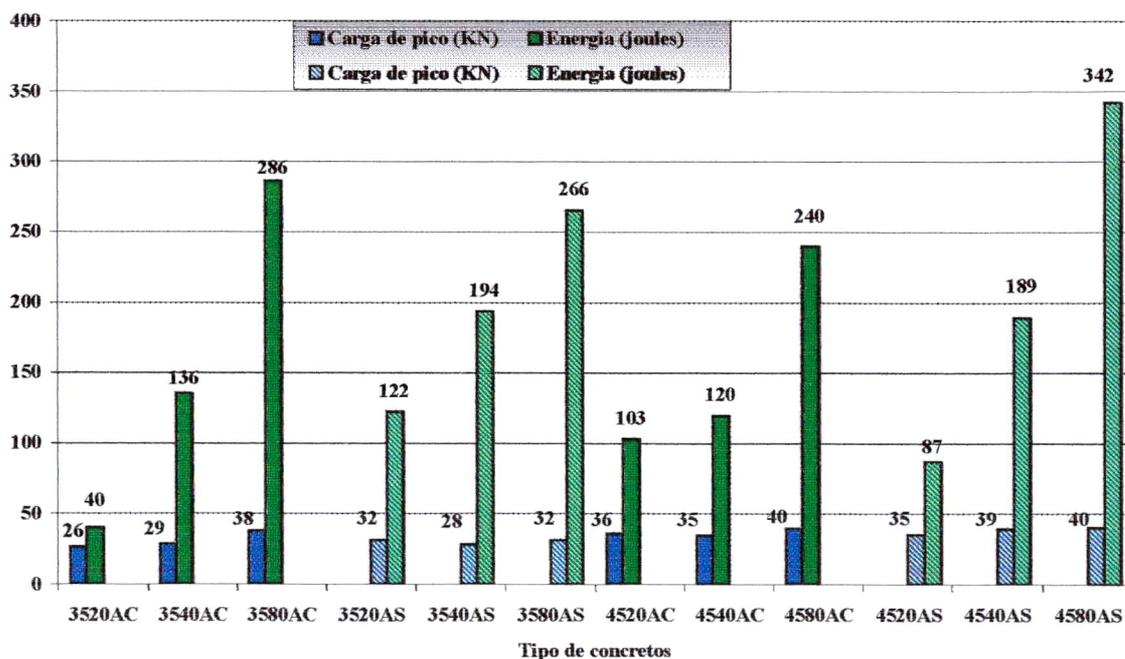


Fig. 5.26.: Resultados de carga de pico e energia (25mm) para o ensaio de flexão em placas triangulares.

5.5.1) TIPOS DE FIBRA

Para os tipos de fibras, podemos observar na figura 5.26, que as de aço colada apresentam uma superioridade quanto à quantidade de energia absorvida, apenas no volume 80 kg/m^3 , isso para a matriz de 35 MPa, sendo superada pelas fibras soltas nos outros dois teores. Já para a matriz de 45 MPa, somente no teor de 20 kg/m^3 , é que a tenacidade foi superior. Esses resultados, contradizem as outras análises realizadas nos ensaios de flexão em placas quadradas e no de flexão em vigas, que mostraram uma superioridade dos concretos reforçados com fibras de aço colada. Para a carga de pico, onde se esperava um maior desempenho das fibras de aço coladas, pelo exposto no item 5.4.1, observou-se apenas nas matrizes de 35 MPa com 80 kg/m^3 e na 45 MPa com um teor de fibra de 20 kg/m^3 .

Entretanto, como visto na metodologia aplicada neste trabalho, a última betonada de cada dia, foi para a confecção de todas as placas triangulares, de placas para a extração dos prismas e de corpos cilíndricos com e sem fibra. Como o volume necessário para completar todos os corpos de prova foi elevado, tendo que se utilizar a betoneira completamente cheia e com pouca inclinação para evitar a queda de material, as fibras coladas sofreram mais com o problema de dispersão.

Esse problema, foi apresentado como justificativa para praticamente todos os ensaios, uma vez que este fato foi constatado através dos resultados obtidos. Para as placas triangulares, essa correta dispersão se torna essencial, pois neste ensaio, temos um configuração do processo de fissuração preestabelecida, através da formação de três aberturas. Sendo assim, se as fibras utilizadas não se encontrarem corretamente espalhadas ao longo da fissura, o processo de arrancamento, responsável pelo aumento da absorção de energia, fica comprometido diminuindo o possível potencial das fibras.

Por ser um ensaio novo e não possuir norma, baseou-se na EFNARC (1996) como recomendação para a execução dos testes. Dentre as exigências para a realização dos ensaios, uma delas seria a aplicação de uma velocidade de carga de $1,5 \text{ mm/min}$. Como pode ser visto na figura 5.26, os valores de carga de pico são praticamente constantes, o que não ocorreu no caso das placas quadradas (fig. 5.17), acreditando-se que a velocidade de carregamento empregada foi elevada, sendo assim, inadequada para estes

ensaios. No ensaio de flexão em prismas, que possui um resistência de pico ainda menor, o valor da velocidade de carregamento deve ser no máximo 0,10mm/min, segundo a norma americana (ASTM C1018), sendo portanto 15 vezes menor.

5.5.2) VOLUME DE FIBRA

Para as placas quadradas, o valor do coeficiente de variação foi considerado como dentro do aceitável. Porém, este bom resultado foi atribuído ao fato das placas não terem sido confeccionadas pelo processo de projeção. Contudo, apesar dos testes terem sido realizados em concretos moldados, este novo ensaio tem como objetivo, minimizar os problemas associados ao empenamento das placas, uma vez que o apoio se encontra em três pontos, evitando assim a má acomodação das placas, pois três pontos são suficientes para definir um plano. A falta de uma acomodação adequada, pode proporcionar problemas de concentração de cargas, o que pode causar uma abertura de fissura diferenciada. Podemos observar as curvas obtidas nestes ensaios, através das figuras 5.27 e 5.29, assim como as respectivas curvas de energia, nas figuras 5.28 e 5.30.

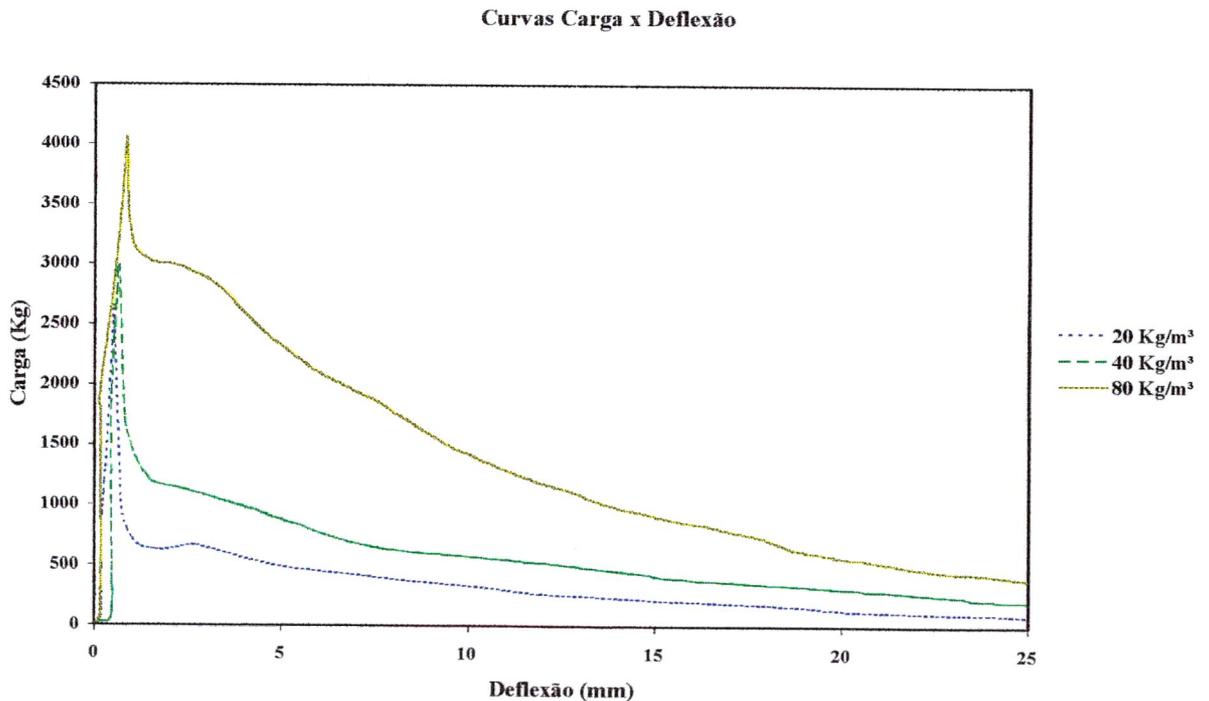


Fig. 5.27.: Curvas de carga x deflexão para os três teores utilizados nos concretos reforçados com a fibra de aço colada, na resistência de 35 MPa.

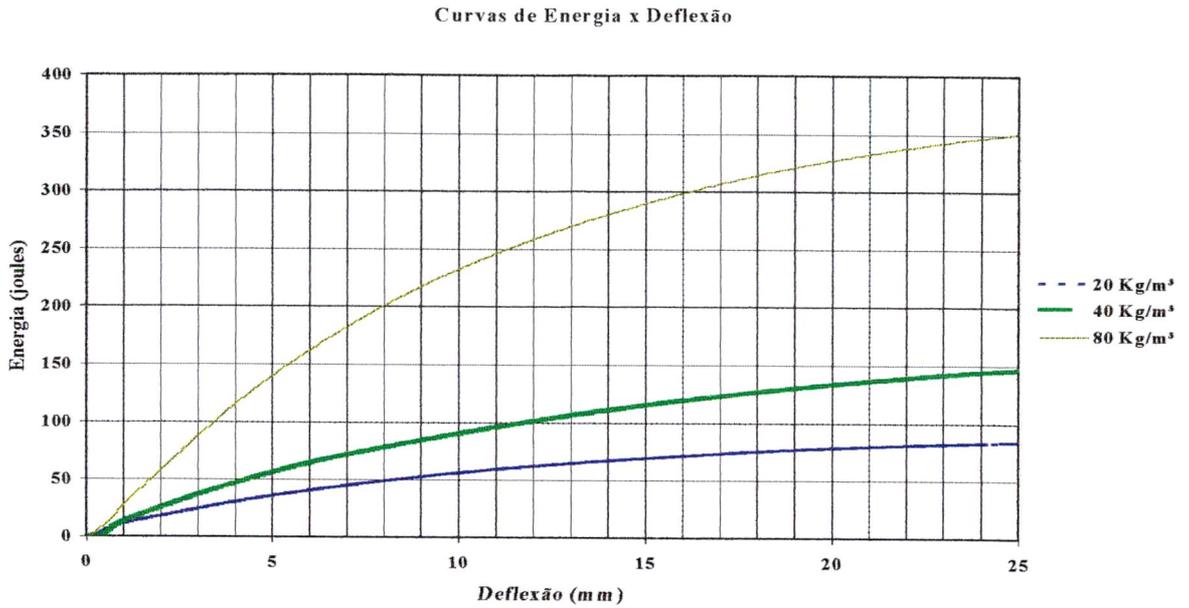


Fig. 5.28.: Curvas de energia x deflexão para os três teores utilizados nos concretos reforçados com a fibra de aço colada, na resistência de 35 MPa.

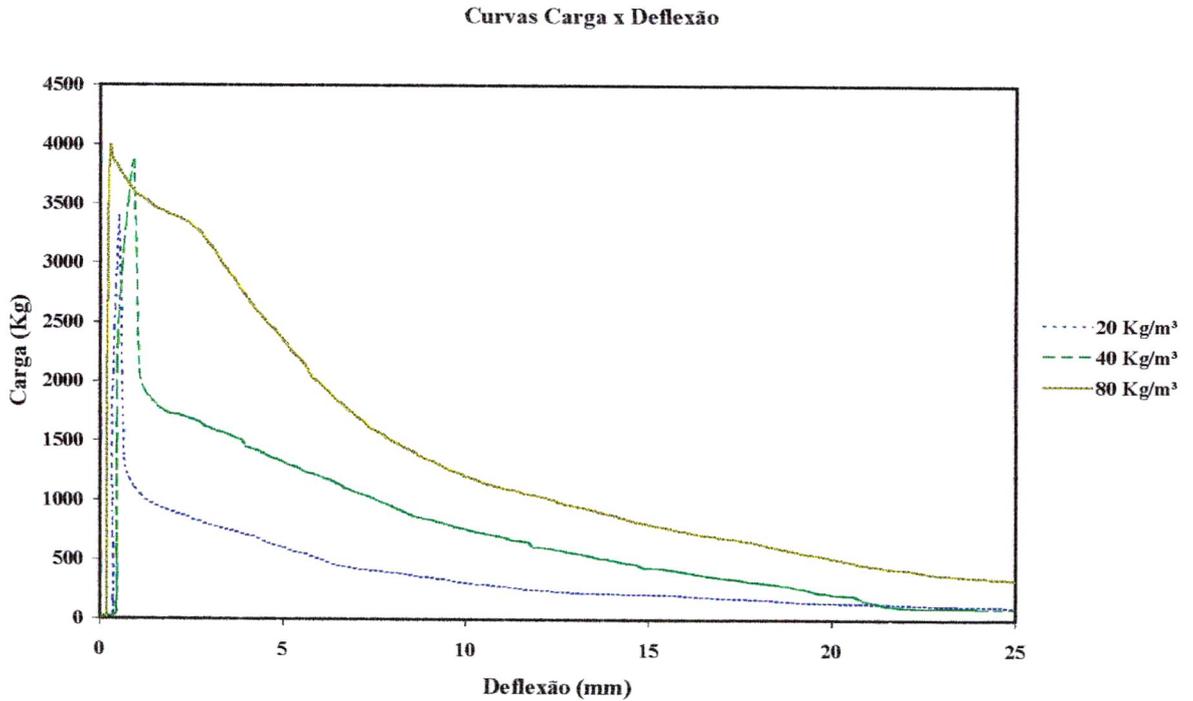


Fig. 5.29.: Curvas de carga x deflexão para os três teores utilizados nos concretos reforçados com a fibra de aço solta, na resistência de 45 MPa.

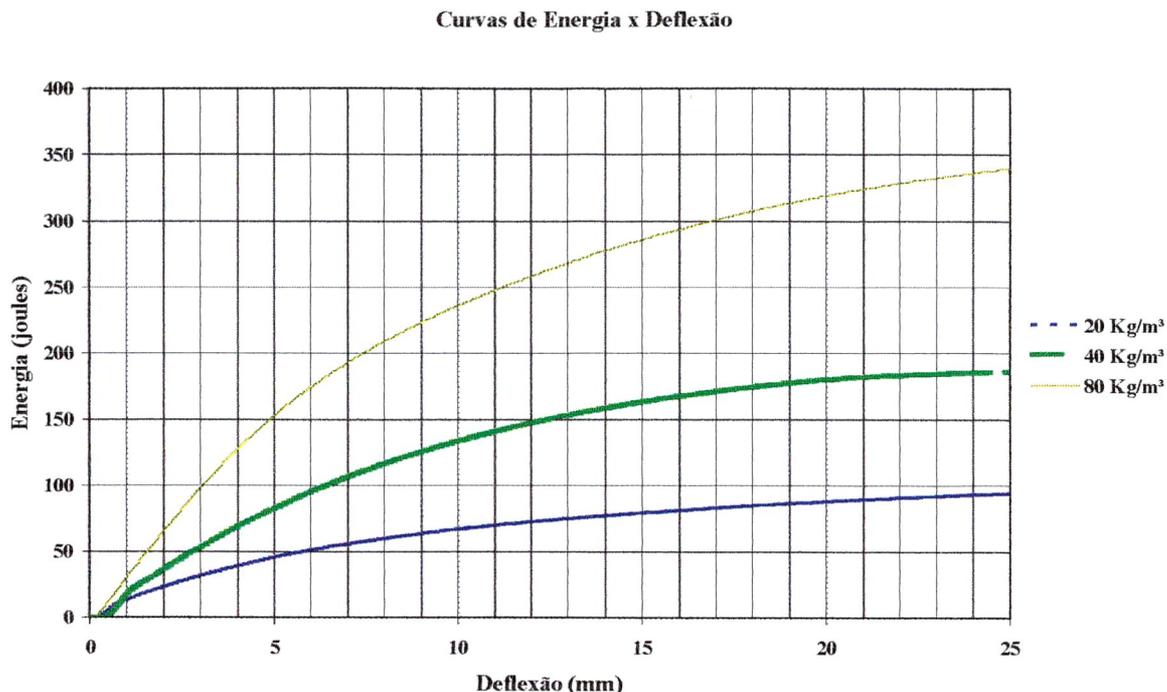


Fig. 5.30.: Curvas de energia x deflexão para os três teores utilizados nos concretos reforçados com a fibra de aço solta, na resistência de 45 MPa.

Como podemos observar nas figuras de 5.27 a 5.30, as placas triangulares são perfeitamente capazes de fazer distinção entre concretos que utilizam volumes de fibras diferenciados, mostrando que quanto maior os teores de fibra empregados, maior será a tenacidade do material. O ganho de energia, com o aumento do teor de fibra, pode ser melhor observado, através das curvas de energia x deflexão, das figuras 5.28 e 5.30. Além desse ganho de energia, o aumento no teor de fibra proporcionou também um aumento na carga de pico, com exceção do concreto 35AS e 45AC, como pôde ser visto na figura 5.26.

Como nas placas quadradas, a deflexão máxima foi até o valor de 25mm, mas observa-se nas placas triangulares, que para níveis de deflexão a partir de 10 mm o processo de arrancamento está tão adiantado, que a capacidade portante é reduzida drasticamente. Com isso, assim como nas placas quadradas, o nível de deflexão das placas triangulares deveria ser fixado em valores mais reduzidos. Entretanto, o motivo do uso de uma deflexão tão elevada, talvez esteja no fato de que, quanto menor o valor de deflexão, maior será a variabilidade do ensaio, dificultando assim, a obtenção de resultados

confiáveis. Estes valores podem ser vistos na tabela 5.10, onde são apresentados os valores de coeficiente de variação total, para três níveis de deflexão.

Tab. 5.10.: Coeficientes de variação total para três níveis de deflexão.

Níveis de deflexão	Coeficiente de variação total (%)	
	Placa Quadrada	Placa Triangular
25mm	9,23	9,68
15mm	10,97	9,64
05mm	16,37	12,17

Na tabela 5.10, pode-se observar que os valores de coeficientes de variação da placa triangular, sofrem menor variação com a diminuição do nível máximo de deflexão, mostrando uma certa constância da variabilidade dos resultados, independente do nível de deflexão escolhido. Esta vantagem, pode ser atribuída a um processo mais estável da curva, após a região pós-pico, através de um comportamento chamado pelos pesquisadores de *softening*, ou seja, após a ruptura existe a suavização gradual e controlada da curva carga x deflexão.

Ainda pode-se dizer que a região da curva onde ocorre a ampliação da abertura das fissuras e arrancamento das fibras (entre 15 e 25mm), acontece de forma muito mais estável sem altos e baixos, como pode ser visto nas figuras 5.18 e 5.20, referentes aos ensaios de flexão em placas quadradas. Além disso, a placa triangular possui outra vantagem: Não ocorrem oscilações na região do gráfico relativa à abertura de fissuras principais, localizada próxima à carga de pico, pois a quantidade de fissuras já está determinada e surgem no mesmo momento evitando essas oscilações. Na placa quadrada, essas oscilações, como mostrado na figura 5.18 e 5.20, ocorrem devido a abertura de um número de fissuras inesperado.

5.5.3) TIPO DE MATRIZ

Na análise da influência da matriz, na melhora da aderência entre fibra/matriz, os resultados não apresentaram a mesma tendência, encontrada no ensaio de placa quadrada, como pode ser visto na figura 5.31. Nesta figura são apresentados os valores de energia absorvida, até a deflexão de 25mm, comparando matrizes de resistências diferentes, com um mesmo tipo de fibra. Contudo, para os concretos utilizando fibras de aço colada, apenas no teor de 20 kg/m³, é que se pode notar o aumento de tenacidade

devida a melhora da compacidade da matriz, sendo que nos outros dois teores, o processo foi inverso.

Já para os concretos confeccionados com as fibras de aço solta, onde se esperava que os problemas de dispersão não causassem tanto efeito, somente no teor de 80 kg/m^3 , é que se obteve um ganho de tenacidade, em função da melhora da matriz. Para o teor de 40 kg/m^3 , os valores foram praticamente os mesmos, sendo que no teor de 20 kg/m^3 , a matriz de 35 MPa foi superior.

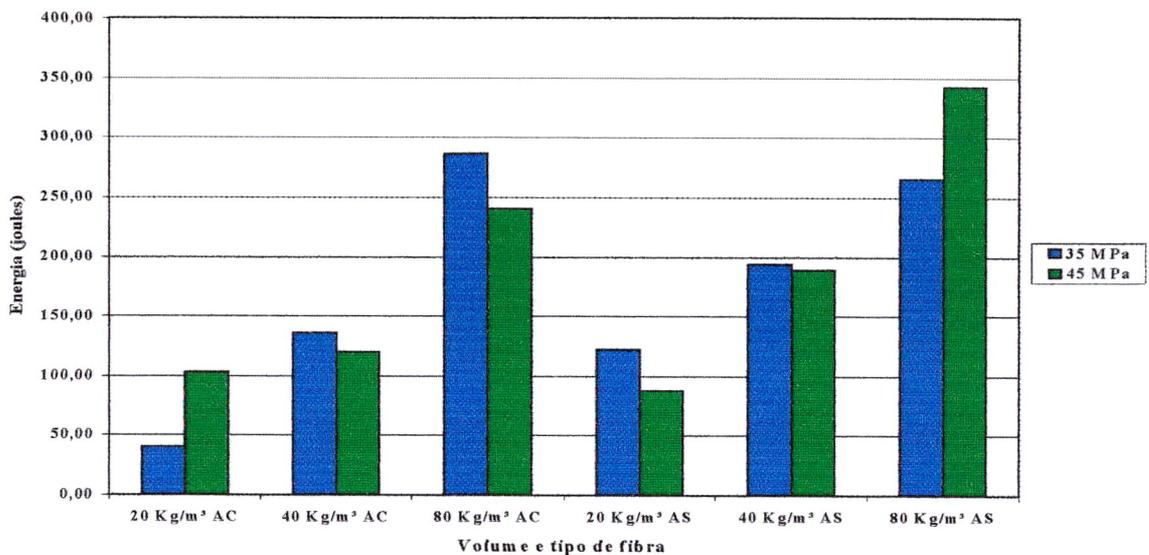


Fig. 5.31.: Valores de energia média para cada teor e tipo de fibra, mostrando a diferença para as duas matrizes utilizadas (placa triangular).

5.5.4) TENACIDADE

Um dos objetivos deste trabalho, foi tentar estabelecer correlações entre as medidas de tenacidade mais usuais, mas os problemas de mistura, já explicados anteriormente, dificultaram a obtenção de bons índices de correlações. A correlação entre o T_{jci} , da norma japonesa (JSCE-SF4,1984), e a energia absorvida no ensaio de tenacidade em placas triangulares, pode ter sido dificultada pela grande variabilidade dos resultados de flexão em vigas, assim como nas placas quadradas. Acredita-se neste fato, uma vez que a variabilidade do ensaio de flexão em placas, tanto quadrada como triangular, ficou bem abaixo dos 21,64%, encontrados nos testes executados em vigas. A tentativa de correlação, com os índices da ASTM C1018 também fracassou, apresentado valores de R^2 muito baixos. Com isso, é apresentado na figura 5.31, apenas a tentativa de

correlação entre os valores de tenacidade encontrados nos dois ensaios de flexão em placas realizadas.

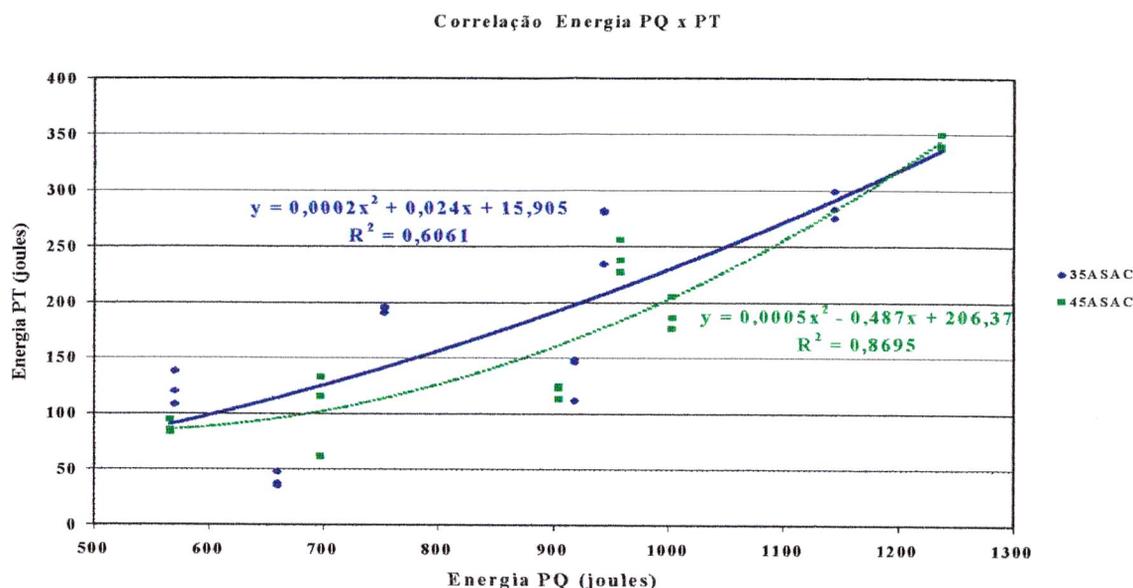


Fig. 5.32.: Correlação entre as energias absorvidas (joules) nos ensaios de flexão em placas quadradas e placas triangulares.

Os valores de correlação não apresentam índices elevados, principalmente para os concretos de 35 MPa, sendo que para os concretos de 45 MPa chega-se em um nível de correlação mais aceitável. Entretanto, ao trabalhar-se com valores mais individuais, separando também os tipo de fibra e utilizando uma curva do tipo potencial, os resultados mostram excelentes índices de correlação, mostrados na tabela 5.11.

Tab. 5.11.: Equações e coeficientes de correlação obtidos entre os níveis de energia encontrado no ensaio de flexão em placas.

Matriz e tipo de fibra	Energias obtidas nos ensaios de flexão
	Equação e coeficiente de correlação
35AC	$Y = 3 \cdot 10^{-9} X^{3,5905}$ $R^2 = 0,9821$
35AS	$Y = 0,0066 X^{1,5487}$ $R^2 = 0,9433$
45AC	$Y = 5 \cdot 10^{-5} X^{2,1943}$ $R^2 = 0,4936$
45AS	$Y = 0,0022 X^{1,6645}$ $R^2 = 0,9582$

Obs.: Y refere-se a tenacidade das placas triangulares e X diz respeito a tenacidade das placas quadradas.

Nota-se, que os índices de correlações são bem melhores do que os encontrados na figura 5.32, com a exceção do concreto de 45 MPa com fibras de aço colada, que obteve-se um baixo índice de correlação.

Como podemos ver ao longo deste capítulo, os estudos de tenacidade, através dos ensaios mais utilizados pelo meio científicos, foram executados com grande êxito apesar dos problemas de mistura, além de ser a primeira série executada na Universidade Federal de Santa Catarina. As placas triangulares, apresentaram um coeficiente de variação praticamente igual ao valor encontrado para as placas quadradas, na deflexão de 25mm, dando a este novo ensaio, o mesmo potencial para informar o aumento de tenacidade, devido a inclusão de fibras de aço ao concreto. É importante salientar, que estes foram os primeiros ensaios com esta nova técnica, estando sujeitos também a erros de execução dos testes.

6) CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões extraídas a partir dos dados obtidos, pela realização de ensaios nos concretos reforçados com fibras. O término deste estudo possibilitou, além de tudo, um maior conhecimento a respeito do comportamento deste material, de característica diferenciada dos concretos sem o reforço das fibras, principalmente no que diz respeito à tenacidade. A análise dos resultados obtidos, permitiu algumas conclusões a respeito da influência da quantidade e do tipo de fibra de aço a ser utilizada, além da influência da resistência da matriz na tenacidade dos compósitos.

Ao final deste capítulo serão apresentadas sugestões para o desenvolvimento de outras pesquisas, utilizando os concretos reforçados com fibras, com o objetivo de se aprimorar, cada vez mais, a correta interpretação da propriedade tenacidade, além de contribuir para a maior utilização deste material de características diferenciadas dos concretos convencionais (sem a utilização de fibras).

6.1) TRABALHABILIDADE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Com relação à trabalhabilidade, verificou-se que a utilização de fibras de aço, alterou consideravelmente a consistência dos concretos, diminuindo os valores de abatimento. Para uma mesma matriz, independente do tipo de fibra, observou-se que quanto maior o teor de fibra utilizado, maior foi a perda de abatimento, em consequência da maior quantidade de fibras que funcionam como um agregado de forma totalmente desfavorável. Esse ganho de consistência, com o aumento do teor de fibras, só não pode ser observado na matriz de 45 MPa, utilizando as fibras de aço coladas, possivelmente pela dificuldade de separação de todos os feixes por motivos já expostos no item 5.1.

Além disso, devido ao longo tempo de mistura, principalmente para estes concretos, parte desta perda de abatimento pode ser atribuído à perda de eficiência tanto do plastificante com do superplastificante. Concluí-se também que, para trabalhar-se com as relações água/cimento empregadas nesse estudo e com os teores de fibra de 20, 40, e

80 kg/m³, o uso de aditivos plastificante e superplastificante se faz indispensável, uma vez que os abatimentos dessas misturas são reduzidos, tornando o manuseio desses concretos praticamente impossível, principalmente para as misturas com 80 kg/m³.

Para as resistências à compressão, concluí-se que a utilização de fibras no concreto, não influenciou a resistência da matriz com 99% de confiabilidade. Isso é importante, pois uma das críticas que se faz aos concretos com fibra, é que esses possuem uma perda com relação a esta propriedade. Nos resultados obtidos, observou-se que para dois teores, um de 40 kg/m³ de fibra na matriz de 35 MPa e para o teor de 80 kg/m³ de fibra na matriz de 45 MPa, a resistência dos compósitos foram superiores a do concreto de referência (sem fibra). Esses resultados não são atípicos, uma vez que uma das vantagens dos concretos com fibra, está no aumento da capacidade de resistência ao cisalhamento (ACI 544.4R-88), sendo esse esforço predominante no ensaio à compressão em corpos de prova cilíndricos.

Muitos problemas associados à perda ou a ausência de um aumento da resistência, podem ser atribuídos à problemas de mistura, como constatados nesta pesquisa. Assim como na resistência, a trabalhabilidade também foi afetada por problemas associados à mistura, na confecção dos concretos reforçados com fibras. Esses problemas foram principalmente observados nos concretos que utilizaram as fibras de aço colada, que apesar de possuir uma cola solúvel em água, não foi possível soltá-las na sua totalidade durante a mistura.

6.2) ENSAIO DE FLEXÃO EM VIGAS

No ensaio de flexão em vigas, constatou-se a maior eficiência das fibras de aço colada. O comportamento deste tipo de fibra, neste trabalho, era esperada pois as fibras coladas, além de possuírem um maior fator de forma, possuem também um diâmetro reduzido em relação à fibra de aço solta, o que representa um maior número de fibras quando se comparando uma mesma quantidade de por m³. Além disso, as fibras de aço colada possuem uma maior resistência à tração, o que auxilia e aumenta o desempenho da matriz mesmo após a fissura, devido a um processo de arrancamento mais eficiente.

A comparação entre esses dois tipos de fibra de aço foi realizada com o auxílio da norma americana, através dos índices de tenacidade e fatores de resistência residual, e

da norma japonesa, através do fator de tenacidade. A resistência à tração foi determinada através da ASTM C78 (1996). De posse dos resultados, observou-se que na matriz de 35 MPa, as fibras de aço colada superaram as fibras de aço solta em todas as determinações de tenacidade, para todos os três teores utilizados. Já na matriz de 45 MPa, apenas no teor de 20 kg/m³ de fibra colada, os índices de tenacidade I_5 e I_{10} se mostraram superiores. No teor de 40 kg/m³ apenas no valor de I_5 do compósito com fibras de aço colada foi superior.

O desempenho inferior das fibras coladas na matriz de 45 MPa, pode ser justificado por problemas na energia de mistura. A má dispersão das fibras, devido à falta de uma correta energia de mistura, pôde ser observada na matriz de 45 MPa para o teor de 80 kg/m³ de fibra de aço colada, onde todas as quatro amostras testadas apresentaram um comportamento bem inferior ao esperado para um volume de fibra tão elevado.

Observou-se também, que o número de corpos de prova recomendado pelas normas parece ser insuficiente para a caracterização da tenacidade dos concretos reforçados com fibra, devido a alta variabilidade que este ensaio proporciona. Esta alta variabilidade foi observada principalmente nas medidas de tenacidade, que são realizadas em pontos afastados na curva carga x deflexão, onde o processo de arrancamento se encontra bem adiantado.

Quanto ao volume de fibra utilizado, conclui-se que para os três teores empregados neste estudo, quanto maior o volume de fibra utilizado houve um aumento na capacidade de absorção de energia (tenacidade). Isso aconteceu pois, quanto maior o volume de fibra utilizado, maior era a quantidade de fibras unindo as fissuras e funcionando como ponte de transferência de tensões. Observou-se ainda, que a matriz de 35 MPa, tanto utilizando-se a fibra colada como a solta, mostrou que quanto maior o volume de fibra, mais elevados eram os valores dos índices de tenacidade. Essa mesma observação só pode ser feita na matriz de 45 MPa utilizando as fibras de aço solta, para os índices I_{20} e I_{30} .

Com relação a resistência à tração na flexão, constatou-se neste trabalho que, para uma mesma matriz, aumentando-se o volume de fibra utilizado, poderá haver um aumento nesta propriedade. No fator de tenacidade e na resistência à tração na flexão, observou-se que, para uma mesma matriz somente aumentando-se o teor de fibra, quanto maior

for o aumento na resistência à tração à flexão, maior será o valor do fator de tenacidade obtido. Além disso, o aumento do teor de fibra em uma mesma matriz, proporcionou um ganho no valor do fator de tenacidade. Esse comportamento só não foi observado na matriz de 45 MPa com fibras de aço colada, devido ao problema com a série que utilizou 80 kg/m^3 de fibra.

Na tentativa de observar-se a influência da matriz nos compósitos, constatou-se, através dos resultados obtidos, que o aumento da resistência proporcionou um acréscimo na tenacidade do material, observado através dos índices de tenacidade da ASTM C1018 (1994), I_5 e I_{10} . Mais uma vez, a exceção a este comportamento ficou no concreto de 45 MPa com 80 kg/m^3 de fibra de aço colada.

Apesar de mostrar, com uma certa eficiência, a diferença entre os vários fatores estudados neste trabalho, notou-se que os índices de tenacidade preconizados pela ASTM C1018 (1994), estão completamente sujeitos à subjetividade da pessoa que interpreta os resultados. Para a determinação desses índices, é necessária a obtenção do ponto de primeira fissura. Como a primeira fissura é determinada pelo ponto na curva onde o trecho elástico deixa de ser retilíneo, o local exato fica sujeito a uma interpretação pessoal.

Além disso, outro inconveniente deste método, é que ele não considera que, em praticamente todos os casos, pode haver uma plastificação do trecho retilíneo, que define a área até o ponto de primeira fissura, como foi constatado neste trabalho. Para um compósito com um comportamento superior ao de um material elasto-plástico, essa plastificação antecipada pode fornecer valores de tenacidade abaixo do valor esperado para um concreto com esta característica.

Outro aspecto importante é que estes índices estão sujeitos aos problemas de instabilidade pós-pico, que podem distorcer o comportamento do material, fornecendo assim valores mais elevados de tenacidade, principalmente para os compósitos com baixos teores de fibra. Ainda dentro de uma mesma análise, os índices não apresentaram sensibilidade para mostrar o aumento de tenacidade da matriz de 45 MPa com 20 kg/m^3 de fibra para o teor de 40 kg/m^3 .

6.3) ENSAIO DE TENACIDADE EM PLACAS QUADRADAS

Como foi explicado na metodologia, a realização das medidas de deflexão foram realizadas através da média da leitura de dois extensômetros posicionados na parte superior do corpo de prova. Constatou-se, através dos resultados apresentados, que esta forma de medição foi adequada para fornecer o comportamento dos concretos reforçados com fibras. Este tipo de medição foi utilizado a fim de se eliminar as deformações dos apoios, mas além dessas deformações extras, aquela proporcionada pela cravação da área utilizada para a aplicação da carga, não pode ser retirada.

Na tentativa de se observar a diferença entre os dois tipos de fibra, o ensaio de tenacidade em placas quadradas mostrou que, para a matriz de 35 MPa, o desempenho das fibras de aço coladas superou o das fibras soltas, quanto à absorção de energia até a deflexão de 25mm. Na matriz de 45 MPa, apenas para o teor de 20 kg/m³ de fibra, a tenacidade das placas com fibras de aço colada foi superior. Apesar das fibras coladas terem apresentado valores de tenacidade superiores, essa diferença não foi considerada significativa, com exceção do concreto de 45MPa com 80 kg/m³ de fibra solta que superou em 29 % o mesmo concreto utilizando fibras coladas.

Mesmo acreditando que deveria haver mais unidades de fibra de aço colada, para um mesmo teor de fibra/m³, a carga de pico só acompanhou o melhor desempenho destas fibras no teor de 20 kg/m³ em ambas as matrizes. Com isso, conclui-se que, apesar de possuir cargas de pico inferior em dois teores, na matriz de 35 MPa, a tenacidade do concreto com fibra colada foi superior, indicando que o processo de arrancamento das fibras é de suma importância para o bom desempenho do compósito.

Assim como nas demais propriedades, o problema de má dispersão, principalmente para as fibras coladas, comprometeu parte do seu desempenho (matriz de 45 MPa), devido, possivelmente, a uma maior coesão das misturas com uma quantidade de cimento mais elevada.

Como mostrado na tenacidade das vigas, nas placas pôde-se observar que, quanto maior o teor de fibra utilizado, mais elevados foram os valores de tenacidade (energia absorvida). Além disso, notou-se também que, para um mesmo tipo de concreto, quanto maior o teor de fibra empregado, maiores foram os valores de carga de pico.

Com relação à matriz, o aumento da sua compacidade, mostrou a tendência de proporcionar um aumento da capacidade de absorção de energia, uma vez que a união fibra/matriz foi melhorada. Nos concretos que utilizaram as fibras de aço solta, este ganho de tenacidade com o aumento da resistência, pode ser visto de forma clara, principalmente, nos teores de 40 e 80 kg/m³.

Tentou-se estabelecer uma correlação entre a energia absorvida no ensaio em vigas com o ensaio realizado em placas quadradas. Observou-se que os coeficientes de correlação não apresentaram níveis excelentes, mas mostraram uma tendência que pode ter sido prejudicada pela alta variabilidade do ensaio de flexão em vigas.

Os bons resultados encontrados neste trabalho, podem ser atribuídos também a uma aceitável variabilidade no ensaio em placas quadradas (10%), mostrando que a dispersão dos resultados permaneceu constante. Além disso, o fato de se trabalhar com deformações elevadas, conduz a uma uniformização dos resultados. Para uma primeira série de ensaio realizados na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), concluiu-se que a tentativa de executar o ensaio de tenacidade em placas quadradas foi feita com êxito, uma vez que os resultados apresentados se encontram dentro dos valores encontrados na bibliografia.

6.4) ENSAIO DE TENACIDADE EM PLACAS TRIANGULARES

Assim como no ensaio de tenacidade em placas quadradas, as medidas de deflexão, para este teste, foram realizadas pela parte superior através da média da leitura de dois extensômetros. Esta forma de medição, além do exposto anteriormente, proporcionou um livre acesso aos medidores de deflexão, facilitando em muito o ajuste e o posicionamento. Um dos objetivos principais de trabalho, que era a obtenção de uma nova forma de medição da tenacidade, foi alcançado com êxito uma vez que os resultados mostraram a capacidade de obter-se as curvas de carga x deflexão bem comportadas, necessárias para o estudo da tenacidade.

Como vantagens alcançadas neste ensaio, com relação aos demais, principalmente ao de flexão em placas quadradas, podemos citar:

- ✓ Melhora sensível no transporte e manuseio dos corpos de prova, que possuem metade do peso (21,36 l) em relação às placas quadradas (43,37 l);
- ✓ Eliminação da deformação causada pelo dispositivo aplicador de carga, através da retirada deste valor da deflexão total. Esta deformação extra aumenta a quantidade de energia absorvida, sendo que em um dos casos este acréscimo foi de 55,6% e na maioria dos casos entre 10 e 25%. Este comportamento, estabilizou-se após a medida de 15mm de deflexão, mostrando que o processo de cravação já não afetava tanto como nos 4mm iniciais;
- ✓ Obtenção de um processo de fissuração muito bem definido, com o surgimento de três fissuras, o que poderá proporcionar a avaliação do desempenho de diferentes tipos de fibra ou de matrizes, frente a um mesmo comportamento de fissura;
- ✓ Este ensaio proporcionou uma abertura de fissuras principais completamente estável, sem as oscilações encontradas nas placas quadradas, devido a abertura desordenada dessas fissuras. Também as placas triangulares mostraram um comportamento de dissipação de energia constante (*softening*), após a carga de pico, além de um processo estável de arrancamento e abertura de fissuras principais;
- ✓ Outra vantagem reside no fato de que, para a interpretação dos gráficos realizada em níveis de deflexão mais baixos (15mm ou 5mm), o coeficiente de variação aumenta. Entretanto, esse aumento da variabilidade mostrou-se bem menor nas placas triangulares do que nas quadradas, devido ao processo padrão de abertura de fissuras;
- ✓ O sistema de apoio utilizado na placa triangular possibilitou a completa acomodação do corpo de prova, evitando problemas de falta de apoio. Isto, por sua vez, é dificilmente alcançado com as placas quadradas, pela dificuldade de conseguir-se um apoio perfeito ao longo de toda borda.

Mostradas as vantagens deste novo método de ensaio de tenacidade, o estudo com relação ao tipo de fibra mostrou que, em relação a quantidade de energia absorvida, as fibras de aço coladas só foram superiores na matriz de 35 MPa para o teor de 80 kg/m³ e na matriz de 45 MPa para o teor de 20kg/m³. Na carga de pico, as fibras coladas foram superiores às fibras soltas nos mesmos concretos onde o desempenho da tenacidade foi

mais elevado. Para os outros concretos, observou-se que a carga de pico foi quase a mesma, em se comparando os dois tipos de fibra.

Apesar de não ter sido capaz de detectar com clareza a diferença entre o desempenho dos dois tipos de fibra, como nos outros ensaios de tenacidade, é importante salientar que para as placas triangulares, os problemas de mistura que causaram uma má dispersão das fibra, principalmente das coladas, foram determinantes devido a uma maior quantidade de concreto misturada.

Com relação à variação do teor de fibra a ser utilizado, o ensaio de tenacidade em placas triangulares foi perfeitamente capaz de mostrar a evolução da quantidade de energia absorvida com o aumento do volume de fibra. Como nos demais ensaios de tenacidade, o aumento do teor de fibra em uma mesma matriz proporcionou o aumento na carga de pico.

Quanto ao aumento da tenacidade com a melhora da compacidade da matriz, observou-se que, devido aos problemas de mistura já citados, não se constatou o efeito da melhora da matriz em todos os concretos. O aumento da energia pela melhora da compacidade pôde ser observado na comparação entre as tenacidades dos concretos com 20 kg/m^3 de fibra colada e nos de 80 kg/m^3 de fibra solta. Além dos problemas de mistura, acredita-se que o fato de se trabalhar com uma deflexão tão grande e com uma velocidade de carregamento elevada, pode ter afetado os resultados dos testes com as placas triangulares.

Neste trabalho, tentou-se correlacionar as formas de tenacidade mais usuais com o ensaio de flexão em placas triangulares. Esta tentativa teve sucesso apenas com a energia absorvida entre os dois tipos de placas, pois com relação ao T_{jci} da norma japonesa, acredita-se que a elevada variabilidade do ensaio dificultou essa correlação, assim como nas placas quadradas. Em uma primeira tentativa para uma mesma matriz, independente do tipo de fibra, o resultado não foi muito satisfatório. Mas com a distinção da matriz e do tipo de fibra, notou-se que apenas a correlação entre os concreto de 45 AC (45 MPa com fibras de aço colada), não apresentou uma boa correlação. Os demais concretos mostraram a possibilidade da existência de uma correlação entre as tenacidades obtidas a partir dos dois tipos de ensaios de flexão em placas.

Observou-se, ao longo deste estudo, que nos últimos trinta (30) anos, a comunidade científica vem se esforçando para apresentar medidas de tenacidade mais confiáveis e que possam ser utilizadas para fazer a correta distinção dos concretos com e sem fibra, além de possibilitar a utilização desta propriedade nos cálculos de estruturas. Em uma primeira série de placas triangulares, estas se mostraram perfeitamente capazes de mostrar a eficiência do concreto reforçado com fibra em aumentar a tenacidade dos concreto convencionais, mesmo com os problemas de mistura que dificultaram resultados mais expressivos. Entretanto, cabe aos pesquisadores envolvidos com o tema, dar continuidade a este método, melhorando cada vez mais o potencial do ensaio de flexão em placas triangulares, no intuito de fazer a distinção entre os vários tipos de fibras com diferentes matizes, trabalhando em conjunto com os demais tipos de avaliação da tenacidade.

6.5) SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para a continuidade do estudo dos concretos reforçados com fibras podem ser recomendados os seguintes tópicos:

- ✓ Continuar o estudo de tenacidade em placas triangulares, utilizando um processo de mistura que forneça a correta distribuição das fibras;
- ✓ Fazer um estudo para se determinar as resistências médias características dos compósitos através do ensaio em placas triangulares ao invés de se trabalhar com resistências médias.
- ✓ Utilizar as placas triangulares com outros tipos de fibras para a determinação do melhor desempenho.
- ✓ Fazer um estudo visando quantificar a quantidade de aumento na resistência à flexão dos concretos com fibra em uma mesma matriz somente variando o teor de fibra a ser utilizado.
- ✓ Variar a velocidade de carregamento no ensaio de flexão em placas triangulares, a fim de se determinar o valor mais coerente para este teste, e além disso, definir um nível de deflexão mais adequado.

7)-REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIAS

ALBUQUERQUE, A. J.; FILHO, N. B. E BARRETO, N. R., **Concreto de agregado leve reforçado com fibra de poliéster**. In: 38ª Reunião do IBRACON- Instituto Brasileiro do Concreto, Ribeirão Preto, 19 a 23 de agosto de 1996, Vol. II. Anais pp. 481-497.

ALHOZAIMY, A. M.; SOROUSHIAN, P. E MIRZA, F., **Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials**. Cement & Concrete Composites , volume 18, Nº 2, 1996, pp. 85-92.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Manual of concrete practice: part 5, ACI, **Measurement of properties of fiber reinforced concrete** (ACI 544.2r-89), ACI Committee 544, Detroit, USA, 1989, 11p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Manual of concrete practice: part 5, ACI, **Guide for specifying, proportioning, mixing, placing and finishing steel fiber reinforced concrete** (ACI 544.3r-93), ACI Committee 544, Detroit, USA, 1993, 10p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Manual of concrete practice: part 5, ACI, **Desing considerations for Steel fiber Reinforced Concrete** (ACI 544.4r-88), ACI Committee 544, Detroit, USA, 1988 (reapproved 1994), 17p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **Standard specification for fibers reinforced concrete**. ASTM A820. Book of ASTM Standards, parte 04.02.ASTM, Philadelphia. 1990.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **Standard test method for flexural toughness and first crack strength of fiber reinforced concrete.**

ASTM C1116. Book of ASTM Standards, parte 04.02.ASTM, Philadelphia. 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard test method for flexural strength of concrete. ASTM C78. Book of ASTM Standards, parte 04.02.ASTM, Philadelphia. 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **Standard test method for flexural toughness and first crack strength of fiber reinforced concrete.**

ASTM C1018. Book of ASTM Standards, parte 04.02.ASTM, Philadelphia. 1994.

ARMELIN, H. S. E BANTHIA, N., **Predicting the flexural postcracking performance of steel fiber reinforced concrete from the pullout of single fibers.**

ACI Materials Journal, vol. 94, N° 1, january-february de 1997, pp.18-30.

ARMELIN, H. S., **Contribuição ao estudo do concreto projetado por via seca com fibras de aço destinado ao revestimento de túneis NATM.** São Paulo, 1992. 145p.

Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, NBR 5739.** Rio de Janeiro, julho de 1994.

_____. **Moldagem e cura de corpos de prova de concreto- cilíndricos e prismáticos, NBR 5738.** Rio de Janeiro, janeiro de 1994.

_____. **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, NBR 7223.** Rio de Janeiro, outubro de 1992.

- _____. **Agregados - Determinação da composição granulométrica**, NBR 7217. Rio de Janeiro, agosto de 1987.
- _____. **Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos**, NBR 7219. Rio de Janeiro, agosto de 1987.
- _____. **Agregados – Determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo**, NBR 7220. Rio de Janeiro, agosto de 1987.
- _____. **Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman- Método de ensaio**, NBR 9776. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **Agregados – Determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo**, NBR 9777. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **Agregados para concreto**, NBR 7211. Rio de Janeiro, maio de 1983.
- _____. **Agregados em estado solto – Determinação da massa unitária**, NBR 7251. Rio de Janeiro, abril de 1982.
- BALAGURU, P.; NARAHARI, R. E PATEL, M., **Flexural toughness of steel fiber reinforced concrete**. ACI Materials Journal, vol. 89, Nº 6, July-August, 1992, pp. 541-546.
- BALAGURU, P. N. E SHAH, S. P., **Fiber reinforced cement Composites**, Copyright by McGraw-Hill, Inc., 1992.
- BANTHIA, N. E TROTTIER, J. F, **Test methods for flexural toughness characterization of fiber reinforced concrete: Some Concerns and a Proposition**, ACI Materials Journal, vol. 92, nº 1, January-February, 1995a, p48-56.

- BANTHIA, N. E TROTTIER, J. F, **Concrete reinforced with deformed steel fibers part ii: toughness characterization**, ACI Materials Journal, vol. 92, n° 2, march-april, 1995b, p146-154.
- BANTHIA, N. E YAN, C., **Bond-slip characteristics of steel fibres in high reactivity metakaolin (hrm) modified cement-based matrices**, Cement and Concrete Research, vol. 26, N° 5, pp. 657-662, 1996.
- BANTHIA, N.; YAN, C. E SAKAI, K., **Impact resistance of fiber reinforced concrete at subnormal temperatures**. Cement & Concrete Composites (Special issue on fiber reinforced concrete: toughness under special conditions), volume 20, N° 5, 1998, pp. 393-404.
- BANTHIA, N. E SHENG, J., **Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites**. Cement & Concrete Composites, volume 18, 1996, pp. 251-269.
- BARR, B.; GETTU, R.; AL-ORAIMI, S. .K. E BRYARS, L. S., **Toughness measurement- the need to think again**. Cement & Concrete Composites, volume 18, 1996, pp. 281-297.
- BEAUDOIN, J. J., PING GU E LIN, W., **Flexural behavior of cement system reinforced with high aspect ratio argonite micro-fibres**, Cement and Concrete Research, vol. 26, N° 12, pp. 1775-1777, 1996.
- BENTUR, A., **Materials science of concrete I**, Edited by Jan P. Skalny, Copyright by American Ceramic Society, Inc, Westerville, OH., 1989.
- BENTUR, A. E MINDESS, S., **Fibre reinforced cementitious composites**. Chapter 5- Mechanics of fibre reinforced cementitious composites, Elsevier applied science London and New York , 1990, pp. 89-131.

BIOLZI, L.; GUERRINI, G. L. E ROSATI, G., **Overall structural behavior of high strength concrete specimens**. Construction and Building Materials, vol. 11, Nº 1, 1997, pp.57-63.

CÁNOVAS, M. F., **Panorama actual de los hormigones reforzados com fibras de acero**. COM PAT 97, Anais....IV Congresso Ibero-americano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade, volume 1. - Porto Alegre: UFRGS. CPGEC, 1997, pp. 31-45.

CANTIN, R. E PIGEON, M., **Deicer salt scaling resistance of steel-fiber-reinforced concrete**, Cement and Concrete Research, vol. 26, Nº 11, pp. 1639-1648, 1996.

CARNEIRO, A. P. *et al.*, **CAD reforçado por fibras metálicas visando aplicações em pavimentações**. 39ª REIBRAC, IBRACON, 5 a 8 de agosto de 1997, São Paulo, pp. 407-420.

CECCATO, M. R.; NUNES, N. L. E FIGUEIREDO, A. D., **Estudo do controle da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço**. COM PAT 97, Anais....IV Congresso Ibero-americano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade, volume 2. - Porto Alegre: UFRGS. CPGEC, 1997, pp. 539547.

CHEN, L.; MINDESS, S. E MORGAN, R., **Specimen geometry and toughness of steel-fiber reinforced concrete**. Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 6, Nº 4, 1994, p529-541.

CHENKUI, H. E GUOFAN, Z., **Properties of steel fibre reinforced concrete containing larger coarse aggregate**. Cement & Concrete Composites, volume 17, Nº 3 , 1995, pp. 199-206.

DANIELLETO, C. C., **Concreto com fibras - Estado da arte**. Seminário submetido ao corpo docente da coordenação do programa de pós-graduação de engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro para candidatura de doutorado em Engenharia Civil. Setembro de 1993, RJ.

DANTAS, F. A. S., **A adição de fibras em concreto de baixo consumo de cimento e análise da fissuração devido à retração**, Boletim Técnico 19 do Departamento de Engenharia Civil da Politécnica, 1987.

DISCUSSION BY JOHNSTON, C. D. and AUTHORS OF FRACTURE TOUGHNESS OF FIBER REINFORCED CONCRETE BY GOPALARATNAM, V. S *et. al.*, ACI Materials Journal, vol. 89, N° 3, may-june 1992, pp.304-309.

EFNARC. **European specification for sprayed concrete**. European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures (EFNARC), Hampshire, UK, 1996, 30p.

FIGUEIREDO, A. D., **Parâmetro de controle e dosagem do concreto projetado com fibras de aço**. São Paulo 1997, 342p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

FIGUEIREDO, A. D., CECCATO, M. R. E TORNERI, P., **Influência do comprimento da fibra no desempenho do concreto reforçado com fibras de aço**. In: 39ª Reunião do IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, São Paulo, 5 a 8 de agosto de 1997, Vol. 1. Anais pp. 347-356.

FIGUEIREDO, A. D. E HELENE, P. R. L., **Controle da tenacidade do concreto com fibras de aço**. In: 39ª Reunião do IBRACON- Instituto Brasileiro do Concreto, São Paulo, 5 a 8 de agosto de 1997a, Vol. 1. Anais pp. 357-372.

- FIGUEIREDO, A. D. E HELENE, P. R.L, **O ensaio de punção de placa para o controle da tenacidade no concreto com fibras de aço.** COM PAT 97, Anais....IV Congresso Ibero-americano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade, volume 1. - Porto Alegre: UFRGS. CPGEC, 1997b, pp. 469-476.
- GAVA, G. P., **Estudo comparativo de diferentes metodologias para avaliação da atividade pozolânica.** Dissertação (mestrado). Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil – UFSC. Florianópolis, 1999, 118p.
- GETTU, R.; MOBASHER, B.; CARMONA, S. E JANSEN, D. C., **Testing of concrete under closed-loop control.** Advanced Cement Based Materials, vol. 3, 1996, pp. 54-71.
- GLINICKI, M. A., Toughness of fiber reinforced mortar high tensile loading rates. ACI Materials Journal, vol. 91, N° 2, march-april, 1994, pp. 161-166.
- GOPALAKRISHNAN, S.; BALASUBRAMANIAN, K.; KRISHNAMOORTHY, T. S. E BHARATKUMAR, B. H., **Performance evaluation of steel fiber reinforced shotcrete.** The Indian Concrete Journal, vol. 72, N° 4, april 1998, pp. 181-187.
- GOPALARATNAM, S.; SHAH, S. P.; BATSON, G.; CRISWELL, M. E.; RAMAKRISHNAN, V. E WECHARATANA, M., **Fracture toughness of fiber reinforced concrete.** ACI Materials Journal, vol. 88, N° 4, july-august, 1991,pp. 339-353.
- GOPALARATNAM, V. E GETTU, R., **On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concretes.** Cement & Concrete Composites, vol. 17, N° 3, 1995, p 239-254.

- IGARASHI, S.; BENTUR, A. E MINDESS, S., **The effect of processing on the bond and interfaces in steel fiber reinforced cement composites**. Cement and Concrete Composites, vol. 18, 1996, pp. 313-322.
- JAMET, D., GETTU, R., GOPALARATNAM, V. S. E AGUADO, A., **Toughness of fiber-reinforced high-strength concrete from notched beam tests**. Testing of Fiber Reinforced Concrete, Editors D. J. Stevens, *et. al.* 1995, sp-155-2, pp. 23-39.
- JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Method of making steel fiber reinforced concrete in laboratory**. JSCE-SF1. Concrete Liberty of JSCE. Part III-2 Method of Tests for Steel Fiber Reinforced Concrete. N° 3 June 1984a, p.45-47.
- JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Method of making specimens for strength and toughness tests of steel fiber reinforced concrete**. JSCE-SF2. Concrete Liberty of JSCE. Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete. N° 3 June 1984 b, p.49-55.
- JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Method of making specimens for strength and toughness tests of shotcreted steel fiber reinforced concrete**. JSCE-SF3. Concrete Liberty of JSCE. Part III-2 Method of Tests for Steel Fiber Reinforced Concrete. N° 3 June 1984 c, p.56-57.
- JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete**. JSCE-SF4. Concrete Liberty of JSCE. Part III-2 Method of Tests for Steel Fiber Reinforced Concrete. N° 3 June 1984 d, p.58-61.
- JOHNSTON, C. D., **Testing fibre-reinforced concretes**. First Canadian University-Industry workshop on fibre reinforced concrete. Editor Nemkumar Banthia. Quebec, 28 – 29 October, 1991, pp. 31-43.

- JOHNSTON, C. D., **Advances in concrete technology 1^a edition**, editor by Malhotra, V., M., Ottawa, Canada, january,1992.
- JOHNSTON, C. D., **Effects of testing rate and age on ASTM C1018 toughness parameters and their precision for steel fiber-reinforced concrete.** cement, concrete and aggregates, CCAGDP, vol. 15, N^o 1, summer 1993, p 50-58.
- JU, Z. E STANG, H., **Fatigue performance in flexure of fiber reinforced concrete.** ACI Materials Journal, vol. 95, N^o 1, january-february, 1998, pp. 58-66.
- JÚNIOR, N. O. E MORAES, A. A., **Concreto reforçado com fibras de aço - CRFA.** In: 38^a Reunião do IBRACON- Instituto Brasileiro do Concreto, Ribeirão Preto, 19 a 23 de agosto de 1996, Vol. II. Anais pp. 471-479.
- KATZ, A. E BENTUR, A., **Effect of matrix composition on the aging of CFRC.** **Cement & Concrete Composites** , volume 17, N^o 2 , 1995, pp. 87-97.
- KATZ, A.; LI, V. C. E KAZMER, A., **Bond properties of carbon fibers in cementitious matrix.** Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 7, N^o 2, may 1995, pp.125-1128.
- LI, V. C. E MATSUMOTO, T., **Fatigue crack growth analysis of fiber reinforced concrete with effect of interfacial bond degradation.** **Cement & Concrete Composites** (Special issue on fiber reinforced concrete: toughness under special conditions), volume 20, N^o 5, 1998, pp. 339-351.
- LI, V. C E MAALEJ, M., **Toughening in cement based composites. Part I: cement, mortar and concrete.** **Cement & Concrete Composites** , volume 18 ,N^o 4 , 1996a, pp. 223-237 (Special issue on toughness of FRC composites).

- LI, V. C E MAALEJ, M., **Toughening in cement based composites. Part II: fiber reinforced cementitious composites.** Cement & Concrete Composites , volume 18 ,Nº 4 , 1996b, pp. 239-249 (Special issue on toughness of FRC composites).
- MAALEJ, M. E LI, V. C., **Flexural/Tensile-strength ratio in engineered cementitious composites.** Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 6, Nº 4, 1994, pp. 513-527.
- MAGGIO, R. Di ; FRANCHINI, M. ; GUERRINI, G. ; POLI, S. E MIGLIARESI, C. , **Fibre-matrix adhesion in fiber reinforced CAC-MDF composites.** Cement & Concrete Composites , volume 19, 1997, pp. 139-147.
- MALONIS, G. D.; GAREIS, P. J.; TSONOS, A. D. E NEAL, J. A., **Dynamic properties of polypropylene fiber-reinforced concrete slabs.** Cement & Concrete Composites , volume 19, 1997, pp. 341-349.
- MARIKUNTE, S. E SHAH, S. P.; **Concrete tecnologia, new trends, industrial applications, Engineering of cement-based composites,** Proceedings of the Internacional RILEM Workshop on Tecnology Transfer of the New Trends in Concrete, Barcelona, 1994, 20p.
- MASS, G. R., **SFRC Lining for an embankment dam.** Concrete Internacional, june 1997, pp. 24-27.
- METHA, P. K E MONTEIRO, P. J. .M., **Concreto: estruturas, propriedades e materiais,** Editora PINI, São Paulo, 1994, pág. 434 a 446.
- MINDESS, S., **Fiber reinforced concrete: challenges and prospects.** Fiber Reinforced Concrete, Modern Developments. Vancouver, Canada. March, 1995, p.1-11.

- MINDESS, S.; WANG, N.; RICH, L. D. E MORGAN, D. R., **Impact resistance of polyolefin fibre reinforced precast units**. Cement & Concrete Composites (Special issue on fiber reinforced concrete: toughness under special conditions), volume 20, Nº 5, 1998, pp. 387-392.
- MINDESS, S., **Why fibre reinforced concrete?** First Canadian University-Industry workshop on fibre reinforced concrete. Editor Nemkumar Banthia. Quebec, 28 – 29 Octubre, 1991, pp. 1-9.
- MINDESS, S. E BANTHIA, **Fiber reinforced cementitious composites : current practice and future prospects**. Concrete technology. Past, present and future. Detroit, Michigan, 1994, p.417-446.
- MORGAN, D. R., **Special sprayed concretes in.: sprayed concrete: properties, design and application**, Edited by Austin, S.A. & Robins, P. J. Scotland. Mc Graw-Hill. Inc, 1995, págs. 229 a 265.
- MORGAN, R; MINDESS, S. E CHEN, L., **Test and specifying toughness for fiber reinforced concrete and shotcrete** Fiber Reinforced Concrete, Modern Developments. Vancouver, Canada. March, 1995, p.29-50.
- NAAMAN, A. E. E HAMMOUD, H., **Fatigue characteristics of high performance fiber-reinforced concrete**. Cement & Concrete Composites (Special issue on fiber reinforced concrete: toughness under special conditions), volume 20, Nº 5, 1998, pp. 353-363.
- NBP.Nº7- NORSK BETONFORENINGS PUBLIKASJON. **Sprayed Concrete for Rock Support- Technical Specification and Guidelines**. Norwegian Concrete Association – Committee Sprayed Concrete, 1993.

- NUNES, N. L., **Estudo da influência da geometria da fibra de aço na tenacidade à flexão dos compósitos de matriz de concreto**. Exame de qualificação de mestrado apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, março de 1998.
- PIGEON, M., AZZABI, M. E PLEAU, **Can microfibers prevent frost damage?**, Cement and Concrete Research, vol. 26, N° 8, pp. 1163-1170, 1996.
- PIGEON, M., PLEAU, R., AZZABI, M. E BANTHIA, **Durability of microfiber-reinforced mortars**, Cement and Concrete Research, vol. 26, N° 4, pp. 601-609, 1996.
- PIGEON, M. E CANTIN, R., **Flexural properties of steel fiber-reinforced concretes at low temperatures**. Cement & Concrete Composites (Special issue on fiber reinforced concrete: toughness under special conditions), volume 20, N° 5, 1998, pp. 365-375.
- PRUDÊNCIO Jr., L. R., **Contribuição à Dosagem do Concreto Projetado**. São Paulo 1993, 224p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- RAMACHANDRAN, V. S.; FELDMAN, R. F. E BEAUDOIN, J. J., **Fiber reinforced cement systems**, Concrete Science, Treatise on current research, 1981, pp.169-223.
- REGATTIERI, C. E. X.; SILVA, M. G; HELENE, P. R.; AGOPYAN, V. E ABREU, J. V., **Estudos de algumas propriedades do concreto reforçado com fibras de aço e polipropileno destinado a pavimentos**. In: 38ª Reunião do IBRACON- Instituto Brasileiro do Concreto, Ribeirão Preto, 19 a 23 de agosto de 1996, Vol. I. Anais pp. 1-14.

- ROSSI, P.; SEDRAN, T.; RENWEZ, S. E BELLOC, A., **Ultra high strength steel fibre reinforced concretes: mix, desing and mechanical characterization**. Fiber Reinforced Concrete, Modern Developments. Vancouver, Canada. March, 1995, p.181-186.
- ROSSI, P., **High performance multimodal fiber reinforced cement composites (HPMFRCC): the LCPC experience**. ACI Materials Journal, vol. 94, N° 6, november-december, 1997, pp. 478-482.
- SANCHES, J. G. B. E BINA, P., **Novos materiais para a construção civil: A necessidade do controle nas obras**. In: 38ª Reunião do IBRACON- Instituto Brasileiro do Concreto, Ribeirão Preto, 19 a 23 de agosto de 1996, Vol. II. Anais pp. 453-470.
- SAVASTANO, H.; DANTAS, F. A. S. E VAHAN AGOPYAN, **Materiais reforçados com fibras - Correlação entre a zona de transição fibra-matriz e as propriedades mecânicas**, Editora PINI, São Paulo, Boletim 67 Instituto de Pesquisa Tecnológica, IPT, 1994.
- SHAH, S. P., **Do fibers improve the tensile strength of concrete?** First Canadian Universety-Industry workshop on fibre reinforced concrete. Editor Nemkumar Banthia. Quebec, 28 – 29 Octubre, 1991, pp. 10-30.
- SHAO, Y. E SHAH, S. P., **Mechanical properties of PVA fiber reinforced cement composites fabricated by extrusion processing**. ACI Materials Journal, vol. 94, N° 6, november-december, 1997, pp. 555-563.
- SILVA, F. P.; MENTONE, F. J. E PITTA, A. C., **Controle de qualidade de pavimentos de concreto contendo fibras: Um caso real**. In: 38ª Reunião do IBRACON- Instituto Brasileiro do Concreto, Ribeirão Preto, 19 a 23 de agosto de 1996, Vol. I. Anais pp. 15-22.

- SOROUSHIAN, P.; ELYAMANY, H.; TLIFI, A. E OSTOWARI, K., **Mixed-mode fracture properties of concrete reinforced with low volume fractions of steel and polypropylene fibers**. Cement & Concrete Composites, volume 20, 1998, pp. 67-78.
- SPONHOLZ, I., **Avaliação do desempenho de aditivos redutores de água em concreto de alto desempenho**. Dissertação (mestrado). Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil – UFSC. Florianópolis, 1998, 180p.
- TANESI, J.; TORNERI, P. E FIGUEIREDO, D., **A influência das fibras de polipropileno na fissuração por retração**. COM PAT 97, Anais....IV Congresso Ibero-americano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade, volume 1. - Porto Alegre: UFRGS. CPGEC, 1997, pp. 273- 280.
- TAYLOR, M.; LYDON, F. D. E BARR, B. I., **Toughness measurements on steel fibre-reinforced high strength concrete**. Cement & Concrete Composites , volume 19, 1997, pp. 329-340.
- TESUKA, Y., **Concreto armado com fibras**, Editora ABCP, Associação Brasileira do Cimento Portland, São Paulo, agosto 1989, T356.
- TROTTIER, J. F.; MORGAN, D. R E FORGERON, D., **Fiber reinforced concrete for exterior slabs-on grade, part I**. The influence of fiber type. Concrete Internacional, june 1997, pp. 35-39.
- VANDERWALLE, M., **Tunnelling the world**. Dramix Fourth Edition, 1996, pp.68-97.
- WANG, N., MINDESS, S. E KEITH KO, **Fibre reinforced concrete beams under impact loading**, Cement and Concrete Research, vol. 26, N° 3, pp. 363-376, 1996.

XULI FU, WEIMING LU E CHUNG, **Improving the tensile properties of carbon fiber reinforced cement by ozone treatment of the fiber**, Cement and Concrete Research, vol. 26, N° 10, pp. 1485-1488, 1996.

ZOLLO, F. R., **Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development**. Cement & Concrete Composites, volume 19 , 1997, pp. 107-122.

Anexos

ANEXOS

RESULTADOS DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS COM OS CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Nos anexos que seguem, são apresentados todos os resultados de trabalhabilidade e de resistência à compressão para todos os concretos confeccionados. Na determinação das resistências à compressão empregadas nas análises apresentadas no corpo do trabalho, utilizou-se o seguinte critério: Da resistência à compressão para cada par testado, retirava-se o de menor resistência. Feito isso, fazia-se a média das resistências, apenas dos concretos sem fibra, pelo fato de haver três exemplares para esses concretos. Os números 1, 2 e 3 mostrados nas tabelas, tanto na trabalhabilidade como na resistência à compressão, são respectivamente referentes às 1^a, 2^a e 3^a misturas confeccionadas por dia.

Além disso, são apresentados também todos os gráficos referentes aos ensaios de flexão em placas quadradas, placas triangulares e em vigas. Cada um dos gráficos contém quatro curvas referentes às quatro amostras ensaiadas. Nos gráficos de flexão em vigas, a deflexão até 2mm é apresentada para permitir o cálculo de todos os parâmetros calculados neste trabalho. É importante salientar que os aparentes pontos de primeira fissura que podem ser vistos nos gráficos, não foram os mesmos utilizados neste trabalho, uma vez que se trabalhou com o gráfico ampliado, o que possibilitou a determinação de um valor mais coerente deste ponto. Portanto, os valores dos índices de tenacidade preconizados pela ASTM C1018, calculados a partir destes gráficos, podem diferenciar dos efetivamente utilizados na apresentação dos resultados.

ANEXO I

RESULTADOS DOS TESTES COM A TRABALHABILIDADE

Slump com e sem fibra (cm)	Concreto 35 MPa Aço Solta								
	20Kg/m ³			40Kg/m ³			80Kg/m ³		
	Resultado	Diferença entre os abatimentos	Média	Resultado	Diferenças entre os abatimentos	Média	Resultado	Diferenças entre os abatimentos	Média
Slump c/ 1	12,5	1,00	1,25	7,0	2,50	2,83	8,5	3,50	3,00
Slump s/ 1	13,5			9,5			12		
Slump c/ 2	13	1,50		9,5	3,00		12,5	2,00	
Slump s/ 2	14,5			12,5			14,5		
Slump c/ 3	0	-		10	3,00		8,5	3,50	
Slump s/ 3	0			13			12		

Slump com e sem fibra (cm)	Concreto 35 MPa Aço Colada								
	20Kg/m ³			40Kg/m ³			80Kg/m ³		
	Resultado	Diferença entre os abatimentos	Média	resultado	diferenças entre os abatimentos	média	Resultado	Diferenças entre os abatimentos	Média
Slump c/ 1	8,00	1,50	1,50	7,50	2,50	2,00	6,00	3,50	3,00
Slump s/ 1	9,50			10,00			9,50		
Slump c/ 2	8,50	1,50		10,00	1,50		8,50	3,50	
Slump s/ 2	10,00			11,50			12,00		
Slump c/ 3	10,00	1,50		9,00	2,00		7,00	2,00	
Slump s/ 3	11,50			11,00			9,00		

Slump com e sem fibra (cm)	Concreto 45 MPa Aço Solta								
	20Kg/m ³			40Kg/m ³			80Kg/m ³		
	Resultado	Diferença entre os abatimentos	Média	resultado	diferenças entre os abatimentos	média	Resultado	Diferenças entre os abatimentos	Média
Slump c/ 1	14,00	5,00	4,50	14,00	6,00	5,00	11,00	10,50	8,50
Slump s/ 1	19,00			20,00			21,50		
Slump c/ 2	16,50	5,50		18,00	5,00		12,00	9,50	
Slump s/ 2	22,00			23,00			21,50		
Slump c/ 3	19,00	3,00		19,00	4,00		17,00	5,50	
Slump s/ 3	22,00			23,00			22,50		

Slump com e sem fibra (cm)	Concreto 45 MPa Aço Colada								
	20Kg/m ³			40Kg/m ³			80Kg/m ³		
	Resultado	Diferença entre os abatimentos	Média	resultado	diferenças entre os abatimentos	média	Resultado	Diferenças entre os abatimentos	Média
Slump c/ 1	14,50	6,50	5,33	13,50	7,00	5,17	16,50	6,00	5,00
Slump s/ 1	21,00			20,50			22,50		
Slump c/ 2	14,00	5,50		14,00	5,50		17,00	5,00	
Slump s/ 2	19,50			19,50			22,00		
Slump c/ 3	17,00	4,00		20,00	3,00		17,00	4,00	
Slump s/ 3	21,00			23,00			21,00		

ANEXO II

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS

Concretos	Carga (T)*	Cargas médias (T)	Resistência médias (MPa)
R3520AS	26,94	26,94	34,30
R3520	25,76	25,76	32,80
R3540AS(1)	30,64	30,64	39,01
R3540(1)	27,96	28,62	36,44
R3540(2)	30,00		
R3540(3)	27,90		
R3580AS(2)	26,28	26,28	33,46
R3580(1)	28,72	26,73	34,03
R3580(2)	23,28		
R3580(3)	28,18		
R3520AC(3)	24,66	24,66	31,40
R3520(1)	25,70	27,35	34,82
R3520(2)	28,98		
R3520(3)	27,36		
R3540AC(3)	23,88	23,88	30,40
R3540(1)	28,36	26,94	34,30
R3540(2)	27,16		
R3540(3)	25,30		
R3580AC(3)	25,94	25,94	33,03
R3580(1)	31,30	28,57	36,37
R3580(2)	25,32		
R3580(3)	29,08		

Obs.: A letra R é de resistência e as letras AS ou AC é referente aos concretos com fibra (aço solta ou aço colada).

* Valor mais alto do par

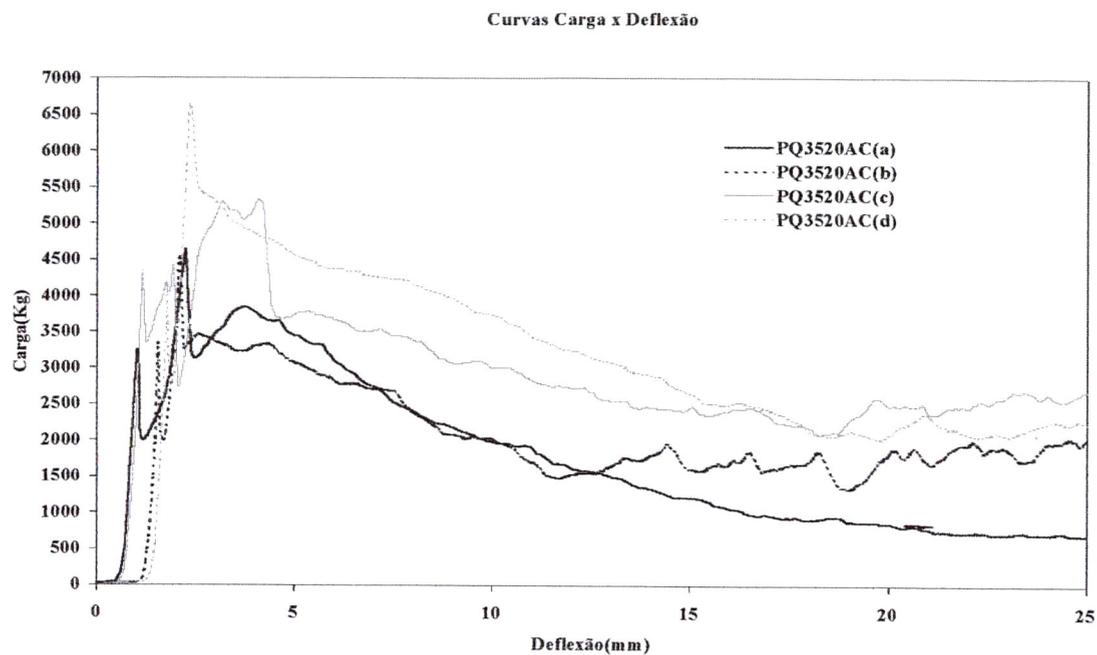
Concretos	Carga (T)*	Cargas médias (T)	Resistência médias (MPa)
R4520AS(3)	31,60	31,60	40,23
R4520(1)	31,45	32,38	41,23
R4520(2)	35,80		
R4520(3)	29,90		
R4540AS(3)	30,88	30,88	39,32
R4540(1)	33,70	32,93	41,93
R4540(2)	33,65		
R4540(3)	31,45		
R4580AS(3)	35,70	35,70	45,45
R4580(1)	39,00	38,15	48,57
R4580(2)	38,00		
R4580(3)	37,45		
R4520AC(3)	35,25	35,25	44,88
R4520(1)	38,35	38,20	48,64
R4520(2)	39,95		
R4520(3)	36,30		
R4540AC(3)	30,00	30,00	38,20
R4540(1)	38,95	35,53	45,24
R4540(2)	32,80		
R4540(3)	34,85		
R4580AC(3)	31,20	31,20	39,73
R4580(1)	35,80	34,52	43,95
R4580(2)	33,10		
R4580(3)	34,65		

Obs.: A letra R é de resistência e as letras AS ou AC é referente aos concretos com fibra (aço solta ou aço colada).

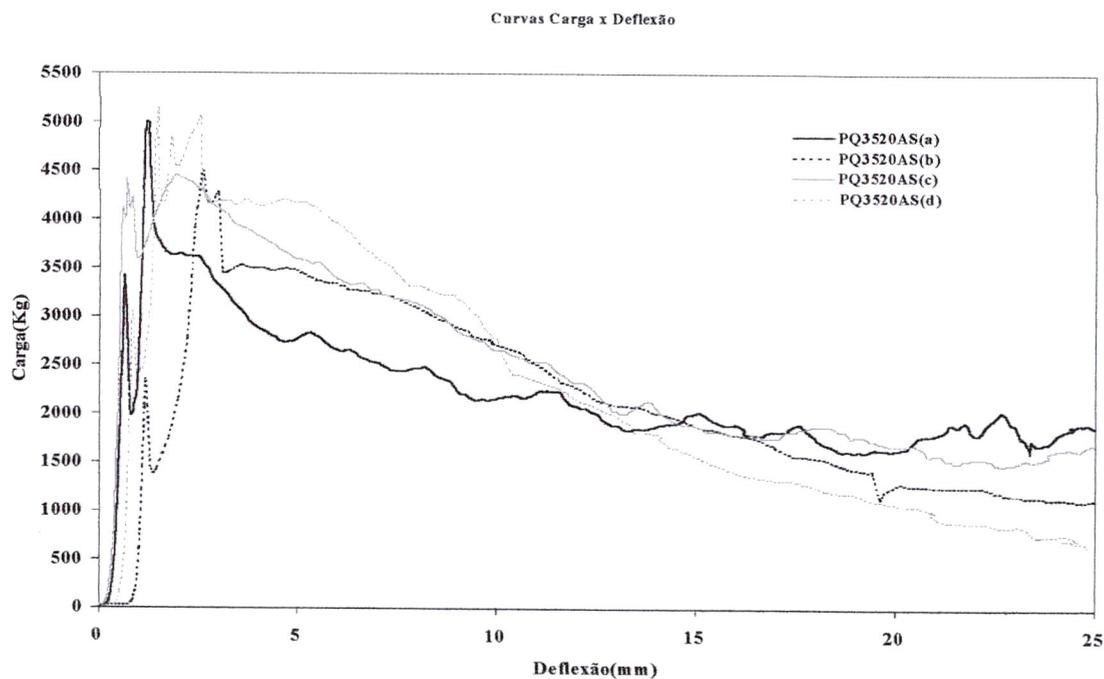
* Valor mais alto do par

ANEXO III

RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO EM PLACAS QUADRADAS

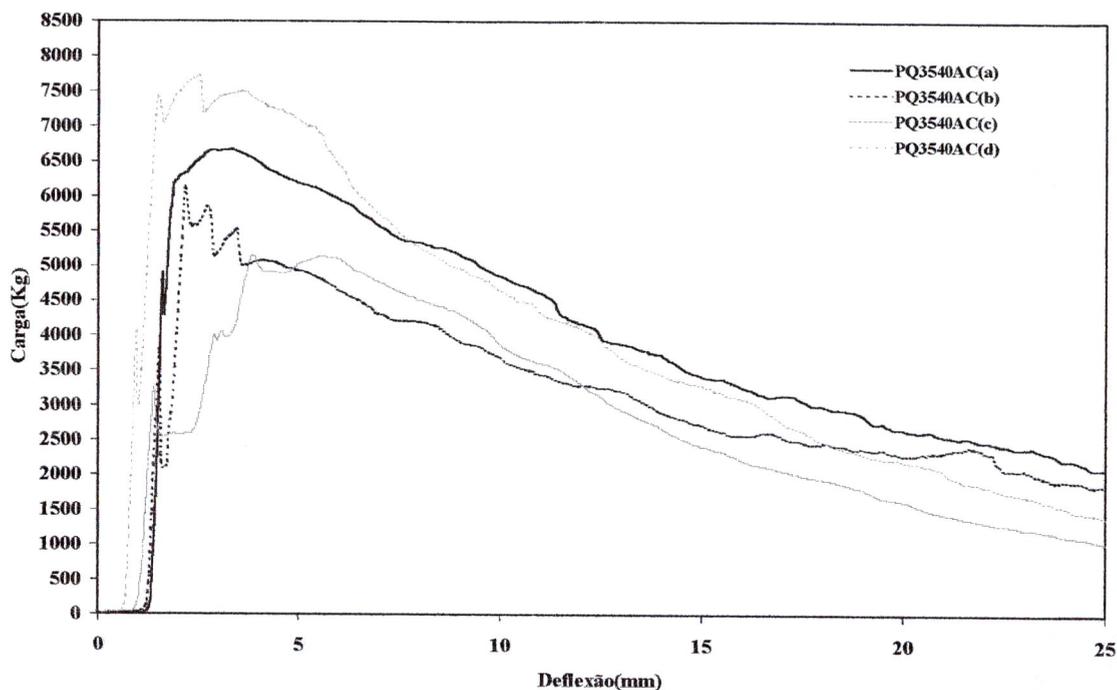


1) Curvas carga x deflexão para o concreto de 35 MPa, utilizando as fibras de aço colada no teor de 20 Kg/m³.



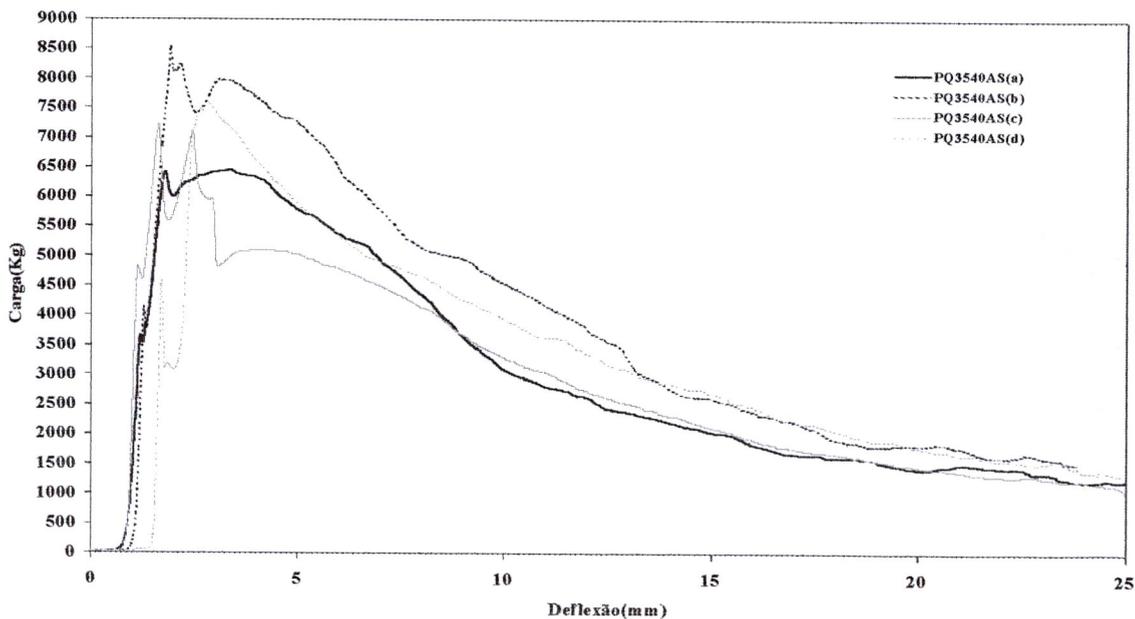
2) Curvas carga x deflexão para o concreto de 35 MPa, utilizando as fibras de aço solta no teor de 20 Kg/m³.

Curvas Carga x Deflexão



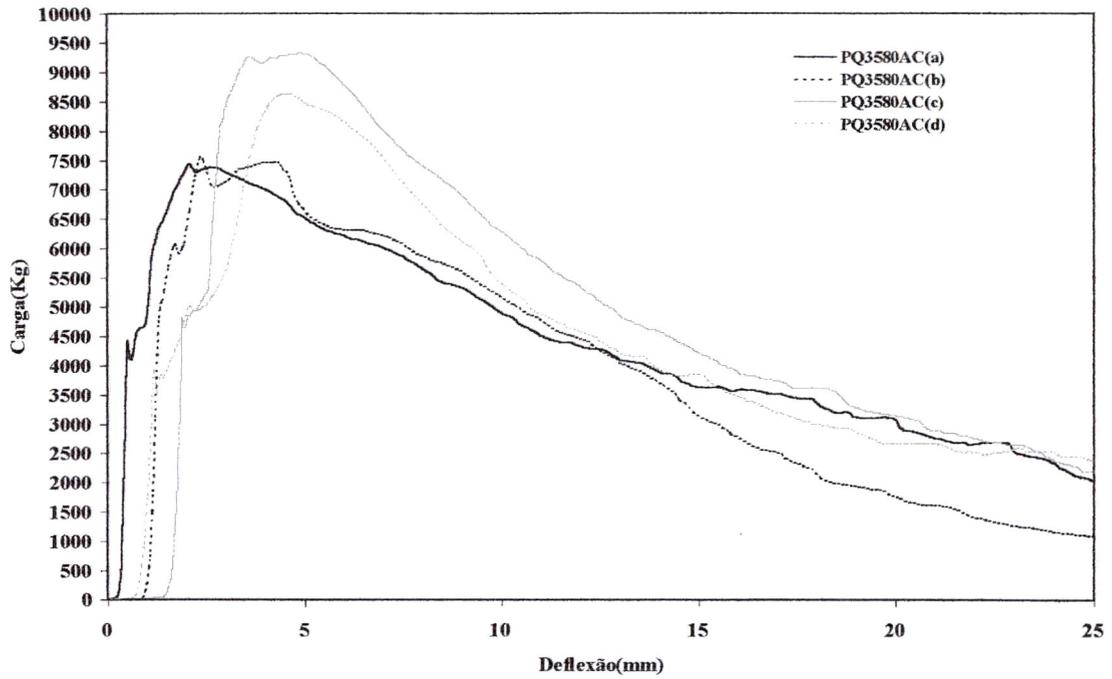
3) Curvas carga x deflexão para o concreto de 35 MPa, utilizando as fibras de aço colada no teor de 40 Kg/m³.

Curvas Carga x Deflexão



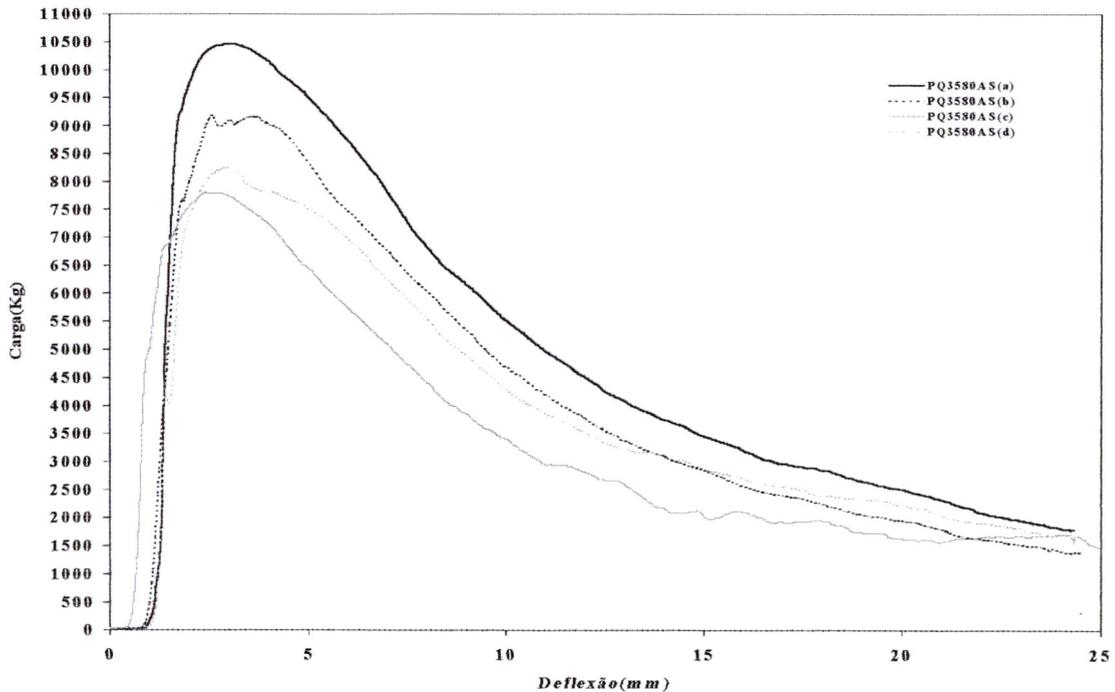
4) Curvas carga x deflexão para o concreto de 35 MPa, utilizando as fibras de aço solta no teor de 40 Kg/m³.

Curvas Carga x Deflexão



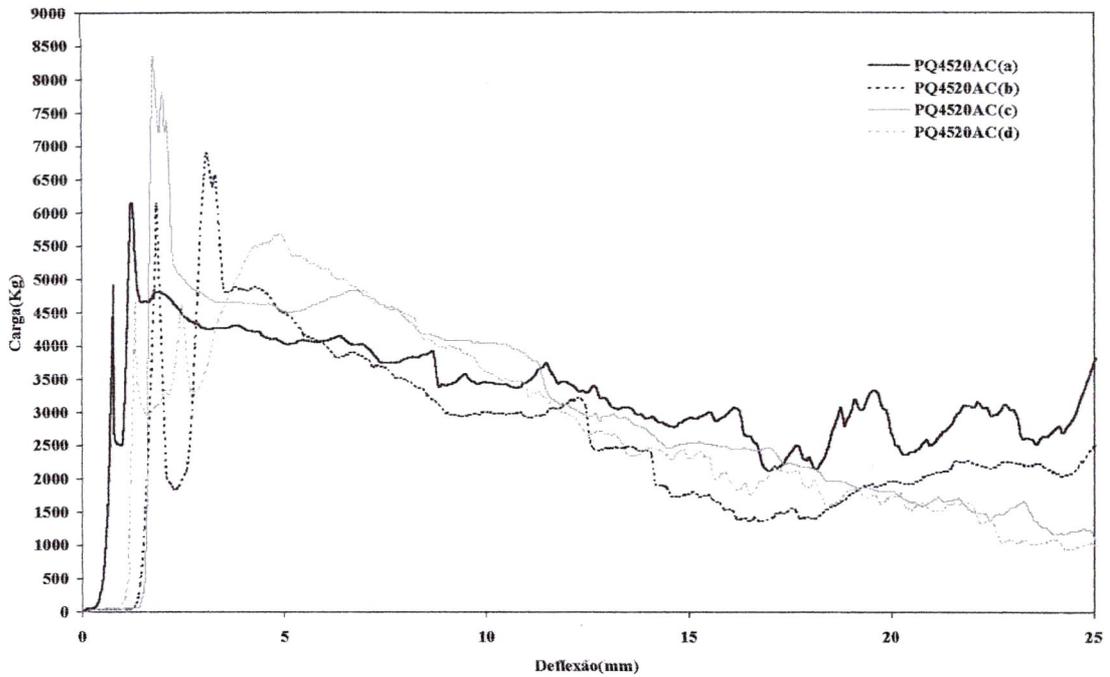
5) Curvas carga x deflexão para o concreto de 35 MPa, utilizando as fibras de aço colada no teor de 80 Kg/m^3 .

Curvas Carga x Deflexão



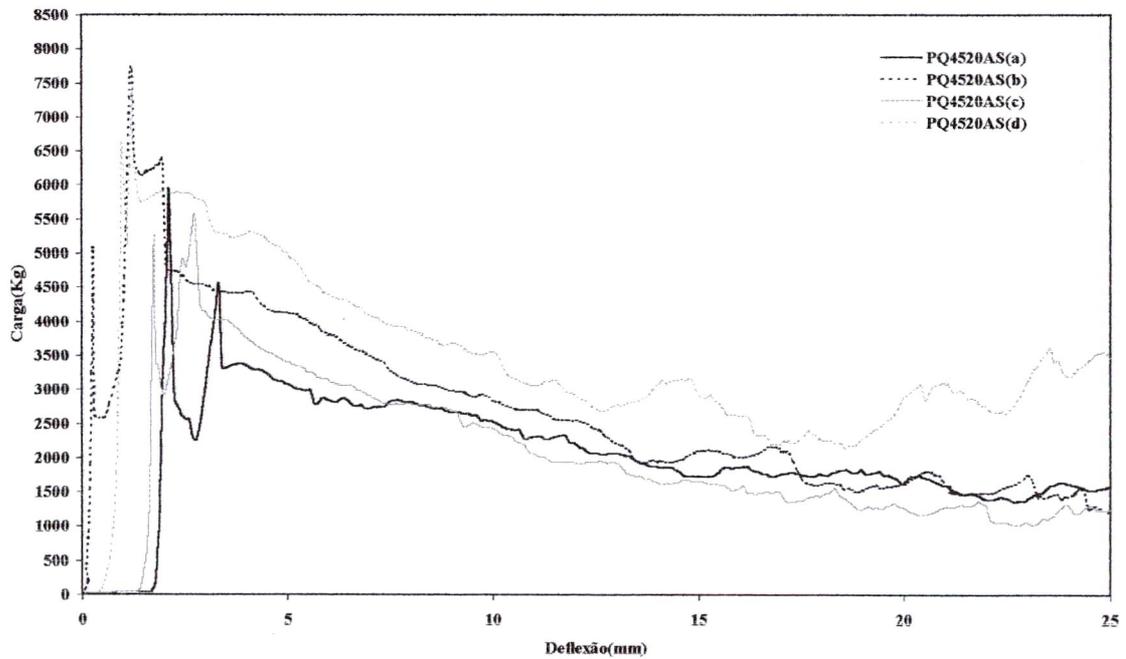
6) Curvas carga x deflexão para o concreto de 35 MPa, utilizando as fibras de aço solta no teor de 80 Kg/m^3 .

Curvas Carga x Deflexão



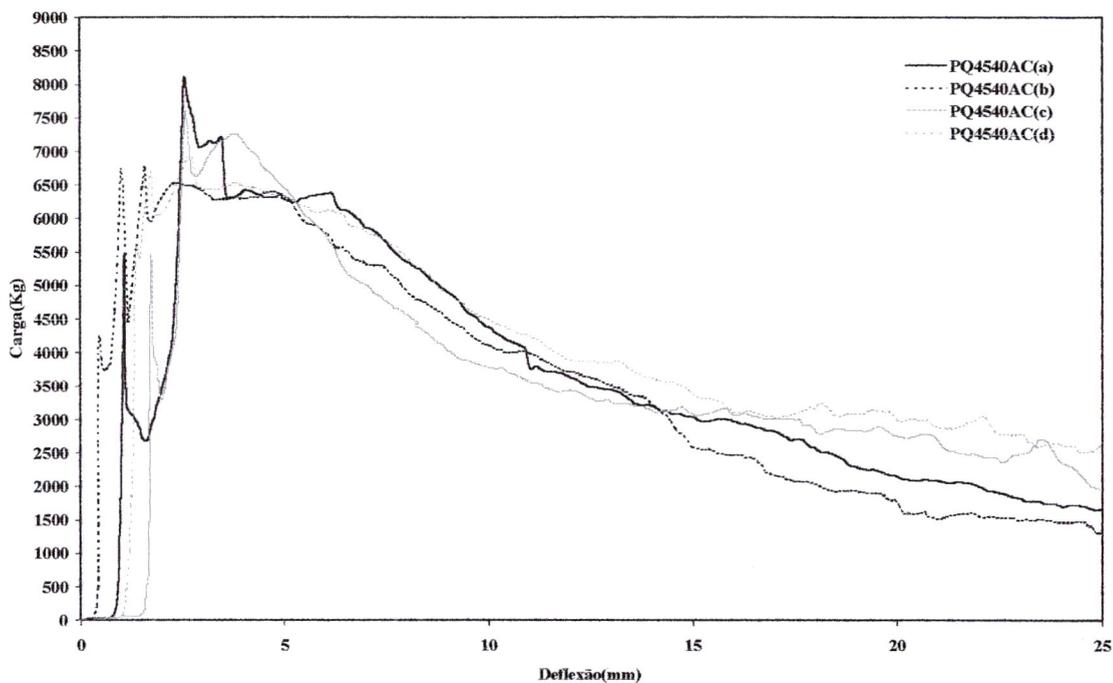
7) Curvas carga x deflexão para o concreto de 45 MPa, utilizando as fibras de aço colada no teor de 20 Kg/m^3 .

Curvas Carga x Deflexão



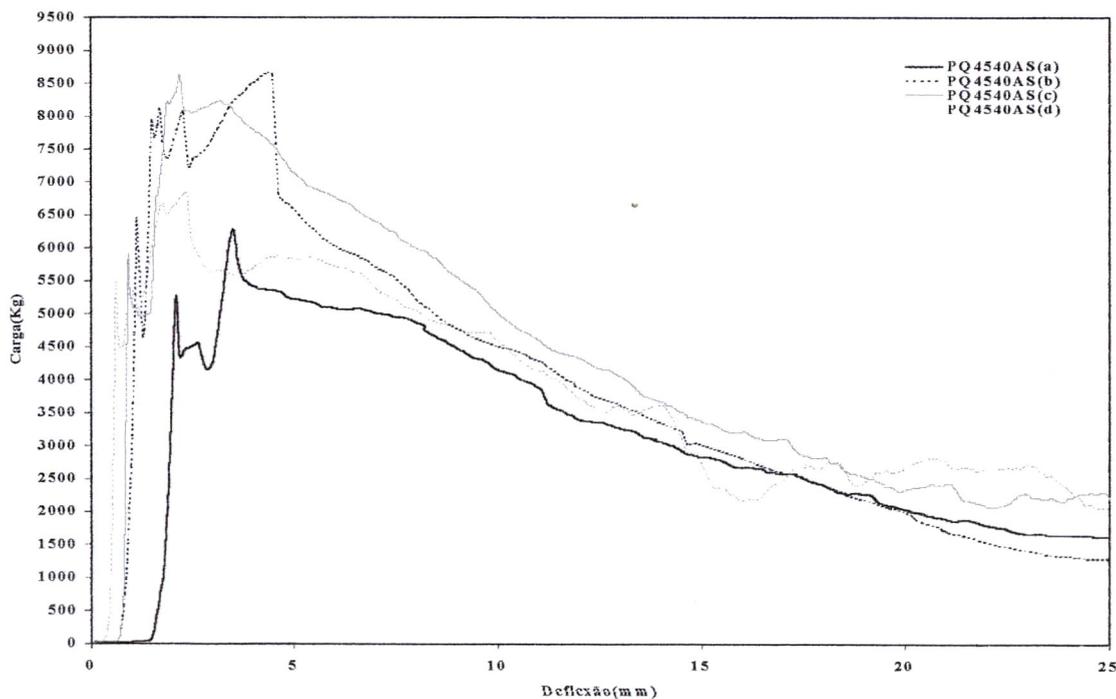
8) Curvas carga x deflexão para o concreto de 45 MPa, utilizando as fibras de aço solta no teor de 20 Kg/m^3 .

Curvas Carga x Deflexão



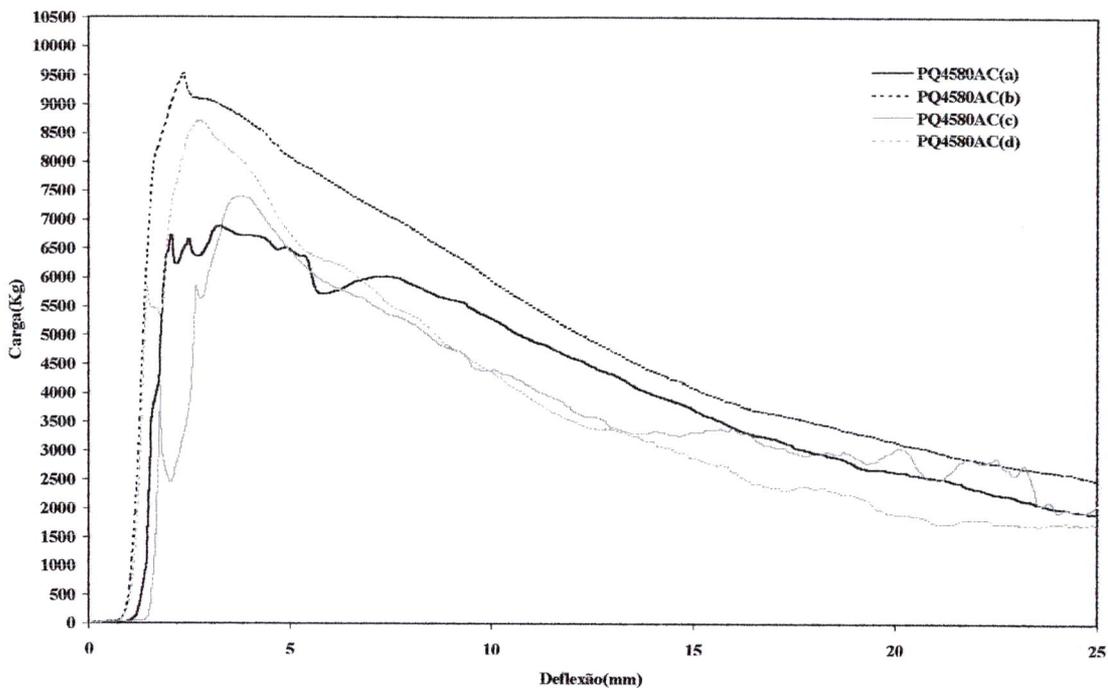
9) Curvas carga x deflexão para o concreto de 45 MPa, utilizando as fibras de aço colada no teor de 40 Kg/m³.

Curvas Carga x Deflexão



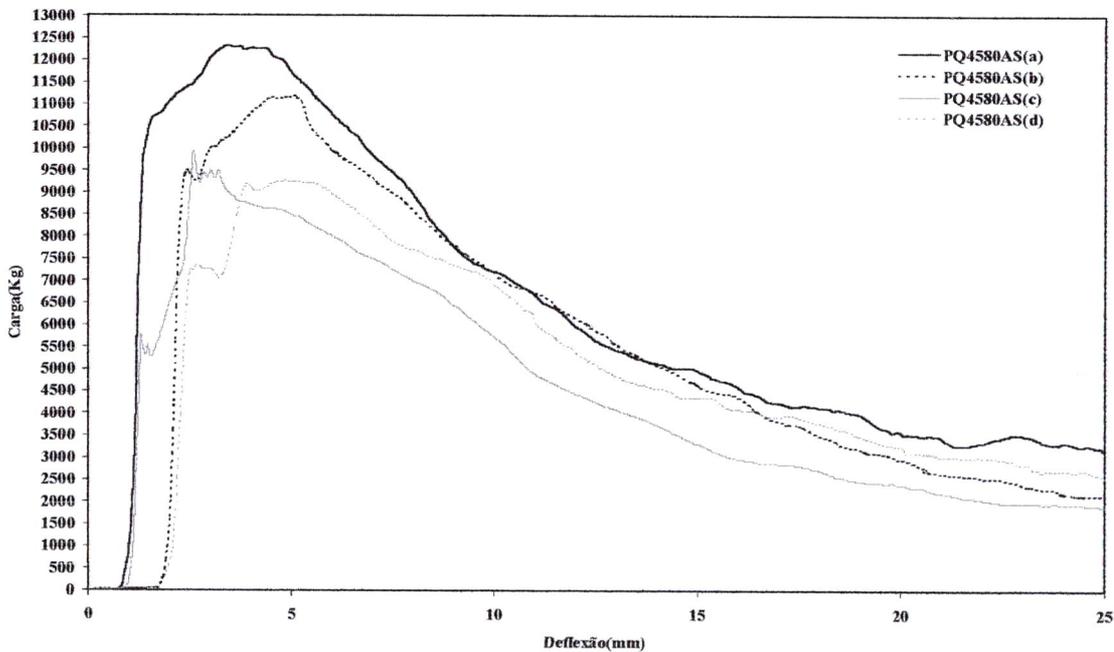
10) Curvas carga x deflexão para o concreto de 45 MPa, utilizando as fibras de aço solta no teor de 40 Kg/m³.

Curvas Carga x Deflexão



11) Curvas carga x deflexão para o concreto de 45 MPa, utilizando as fibras de aço colada no teor de 80 Kg/m³.

Curvas Carga x Deflexão

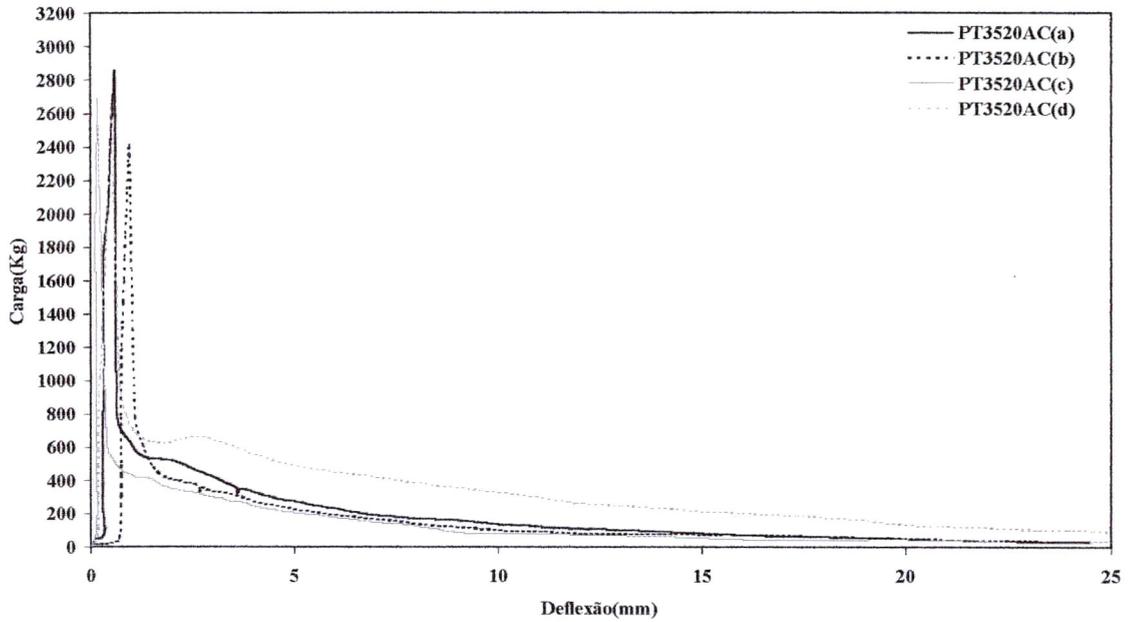


12) Curvas carga x deflexão para o concreto de 45 MPa, utilizando as fibras de aço solta no teor de 80 Kg/m³.

ANEXO IV

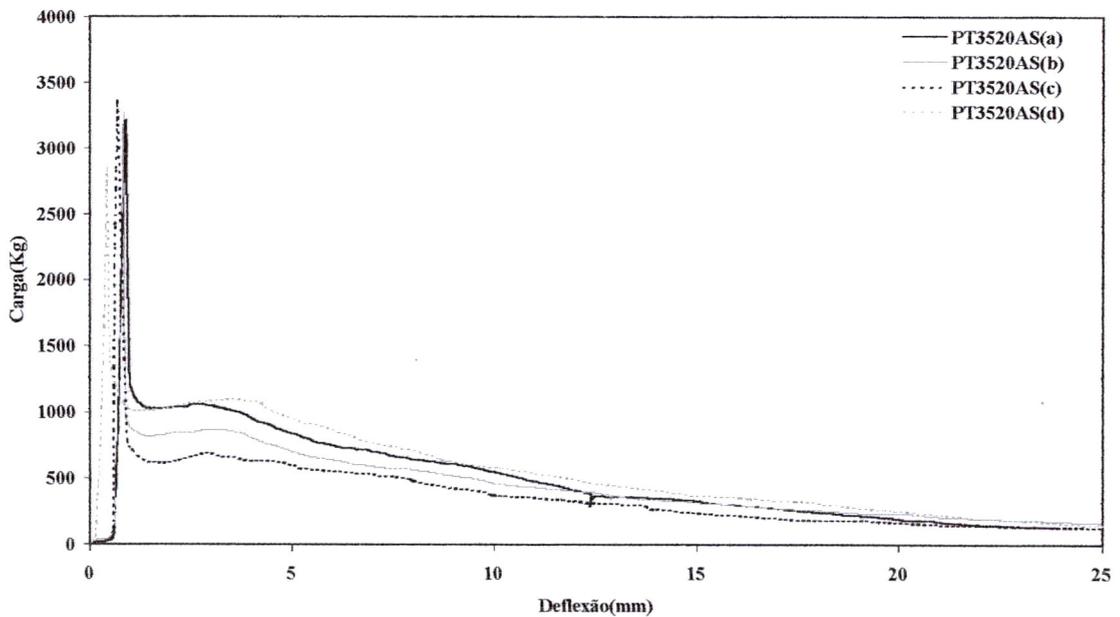
RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO EM PLACAS TRIANGULARES

Curvas Carga x Deflexão



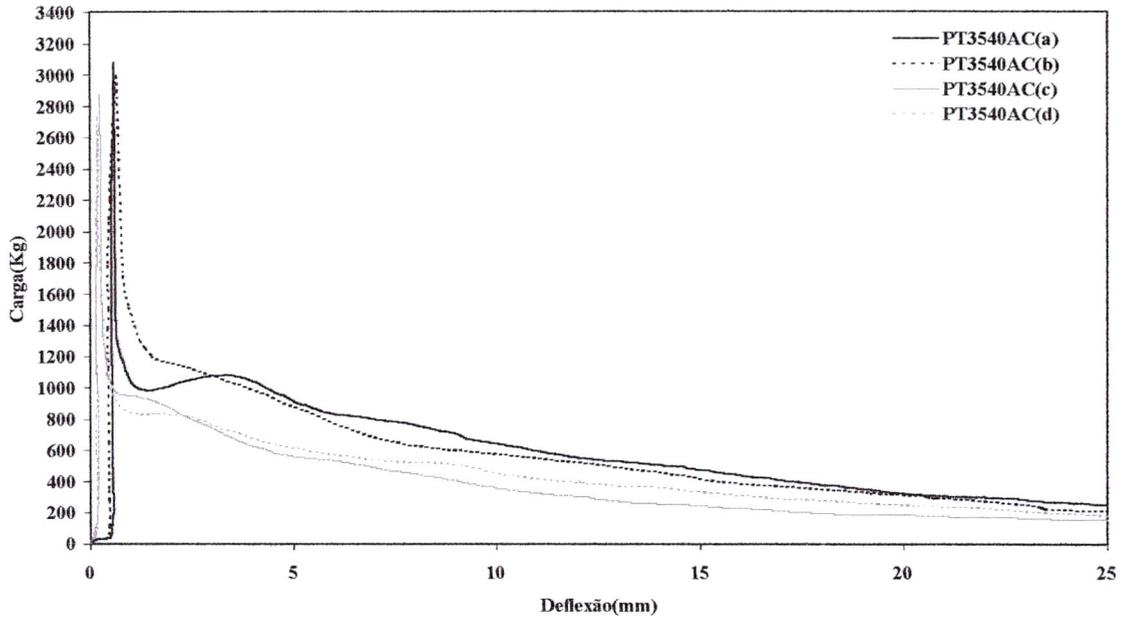
1) Curvas carga x deflexão para o concreto de 35 MPa, utilizando as fibras de aço colada no teor de 20 Kg/m³.

Curvas Carga x Deflexão



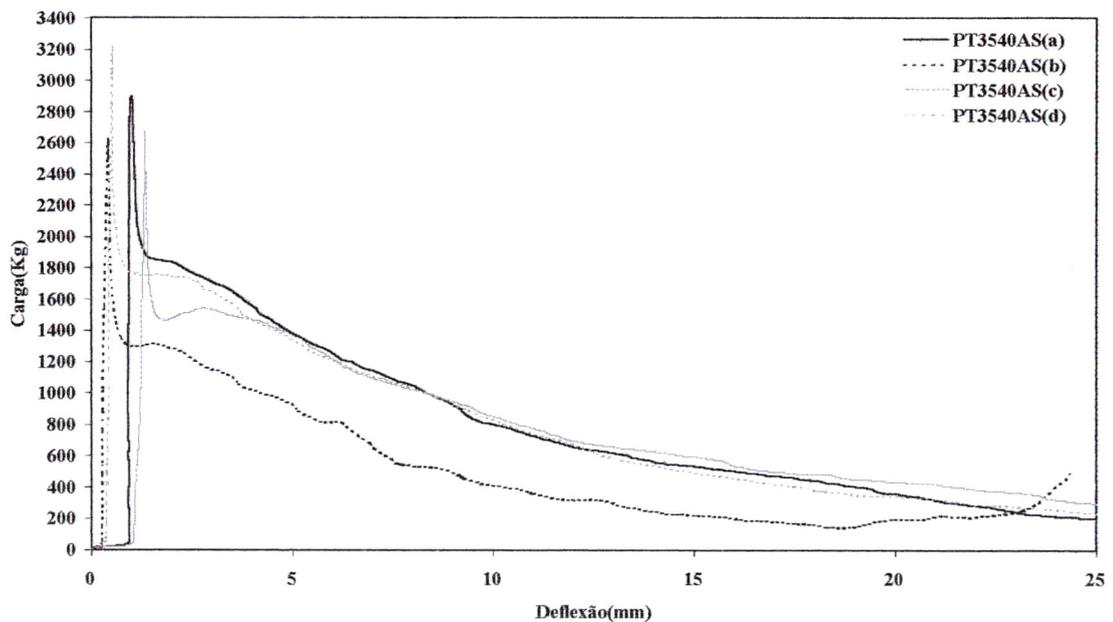
2) Curvas carga x deflexão para o concreto de 35 MPa, utilizando as fibras de aço solta no teor de 20 Kg/m³.

Curvas Carga x Deflexão



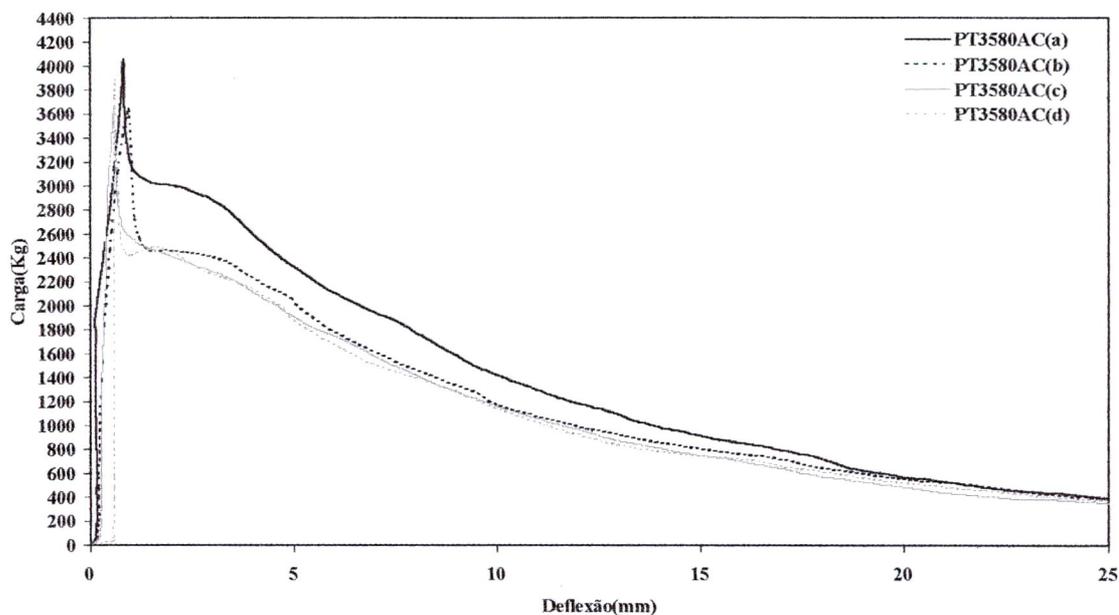
3) Curvas carga x deflexão para o concreto de 35 MPa, utilizando as fibras de aço colada no teor de 40 Kg/m^3 .

Curvas Carga x Deflexão



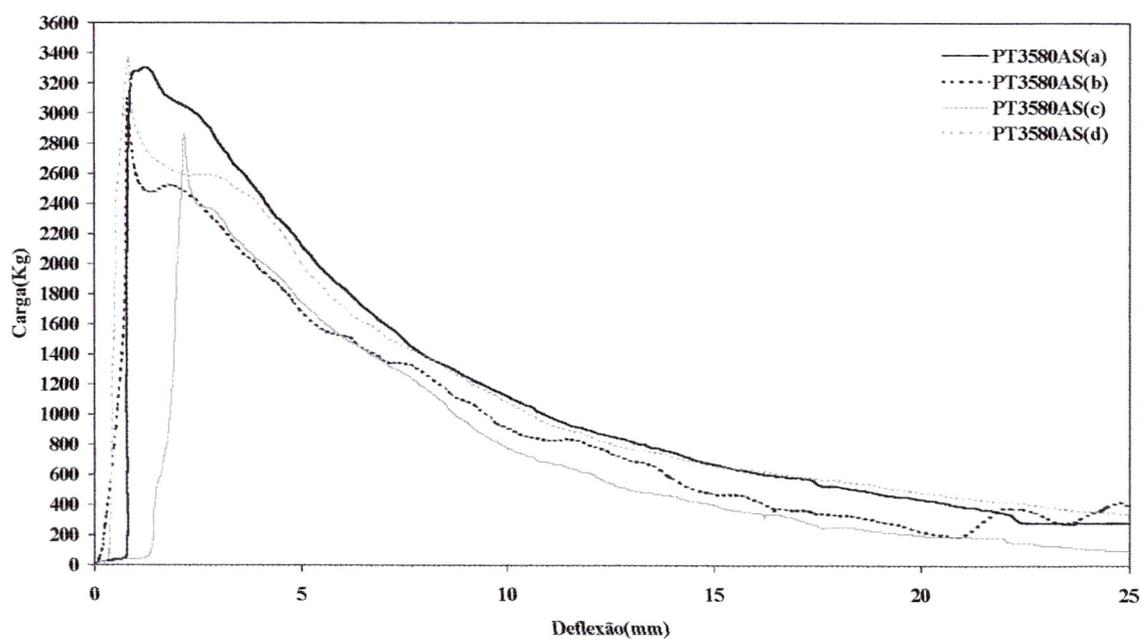
4) Curvas carga x deflexão para o concreto de 35 MPa, utilizando as fibras de aço solta no teor de 40 Kg/m^3 .

Curvas Carga x Deflexão



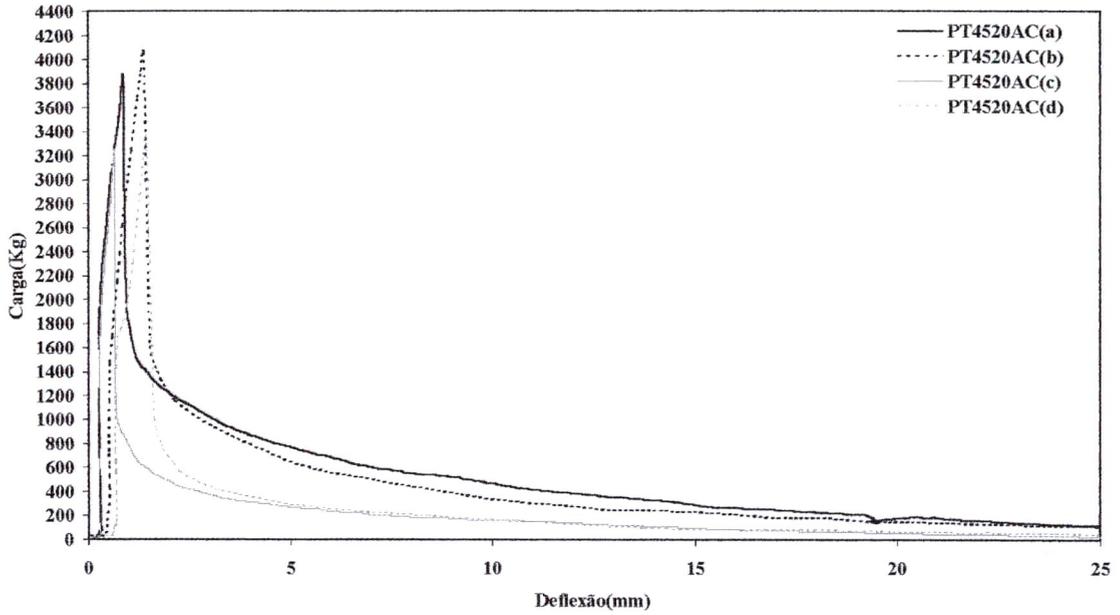
5) Curvas carga x deflexão para o concreto de 35 MPa, utilizando as fibras de aço colada no teor de 80 Kg/m^3 .

Curvas Carga x Deflexão



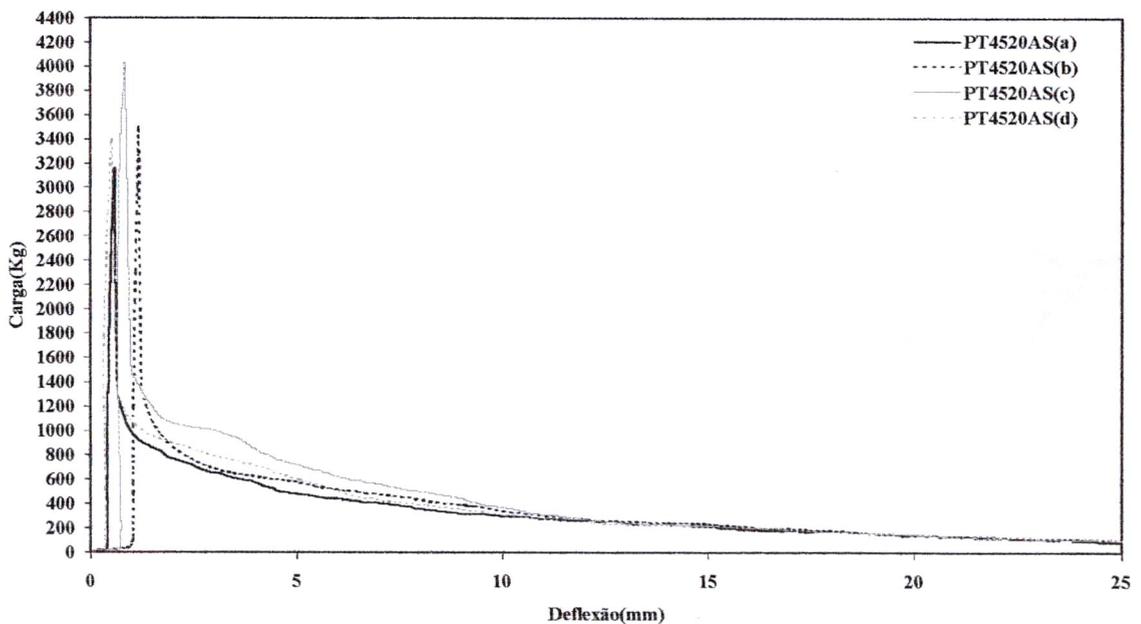
6) Curvas carga x deflexão para o concreto de 35 MPa, utilizando as fibras de aço solta no teor de 80 Kg/m^3 .

Curvas Carga x Deflexão



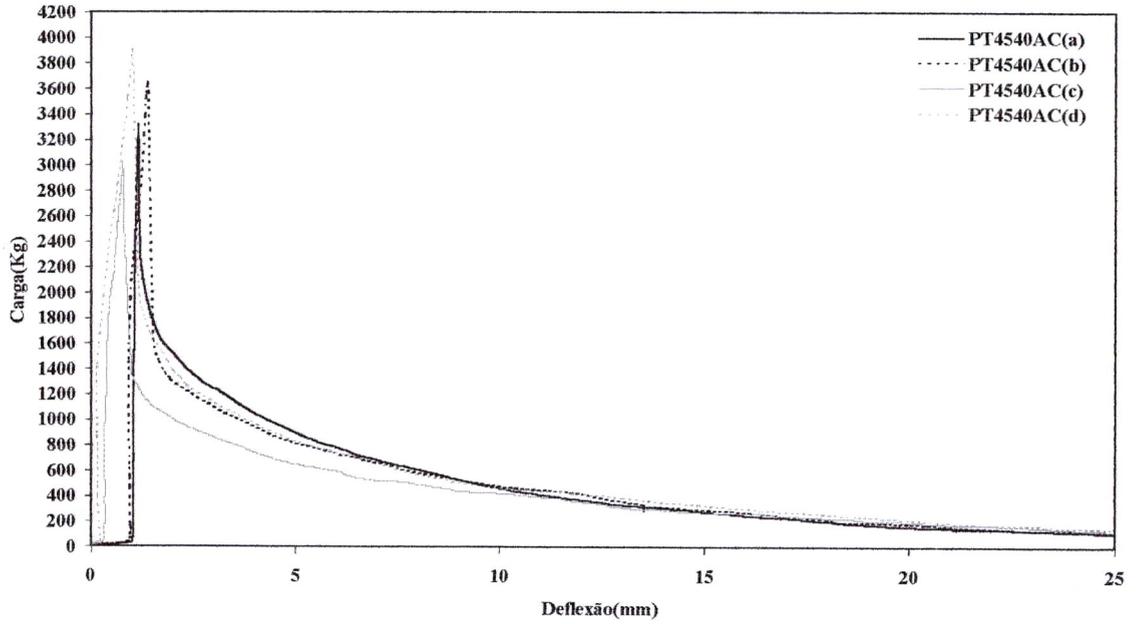
7) Curvas carga x deflexão para o concreto de 45 MPa, utilizando as fibras de aço colada no teor de 20 Kg/m^3 .

Curvas Carga x Deflexão



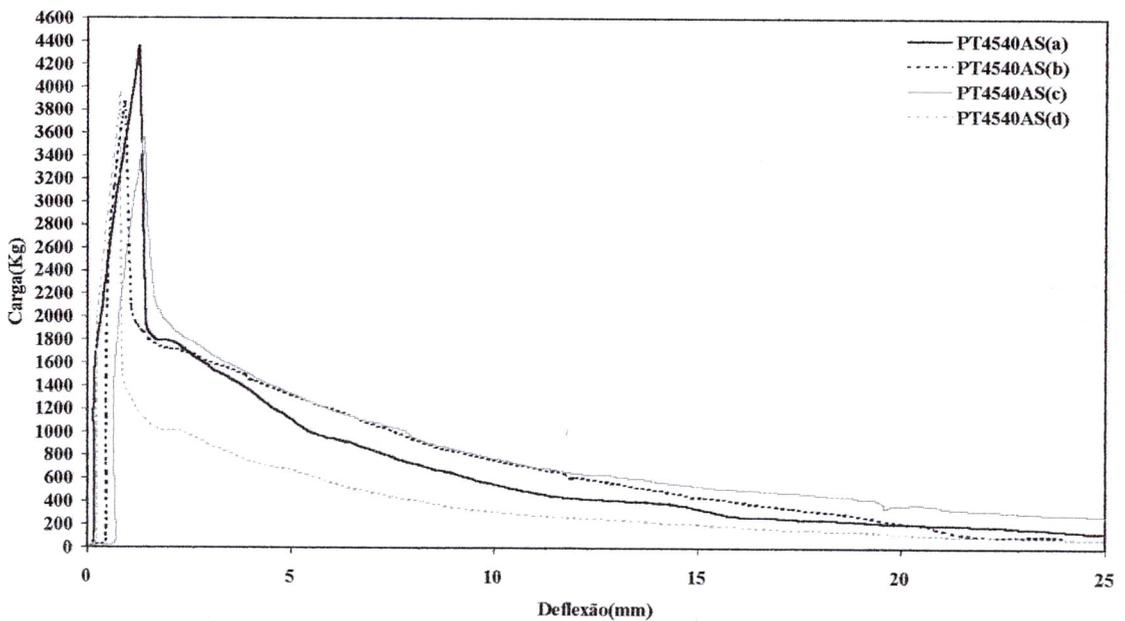
8) Curvas carga x deflexão para o concreto de 45 MPa, utilizando as fibras de aço solta no teor de 20 Kg/m^3 .

Curvas Carga x Deflexão



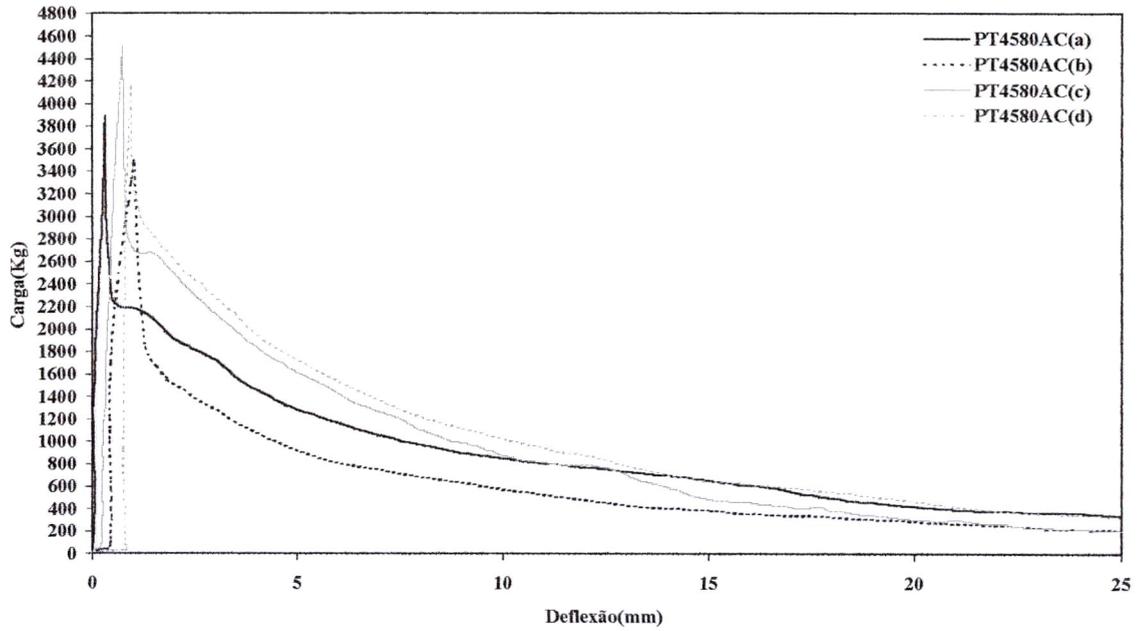
9) Curvas carga x deflexão para o concreto de 45 MPa, utilizando as fibras de aço colada no teor de 40 Kg/m³.

Curvas Carga x Deflexão



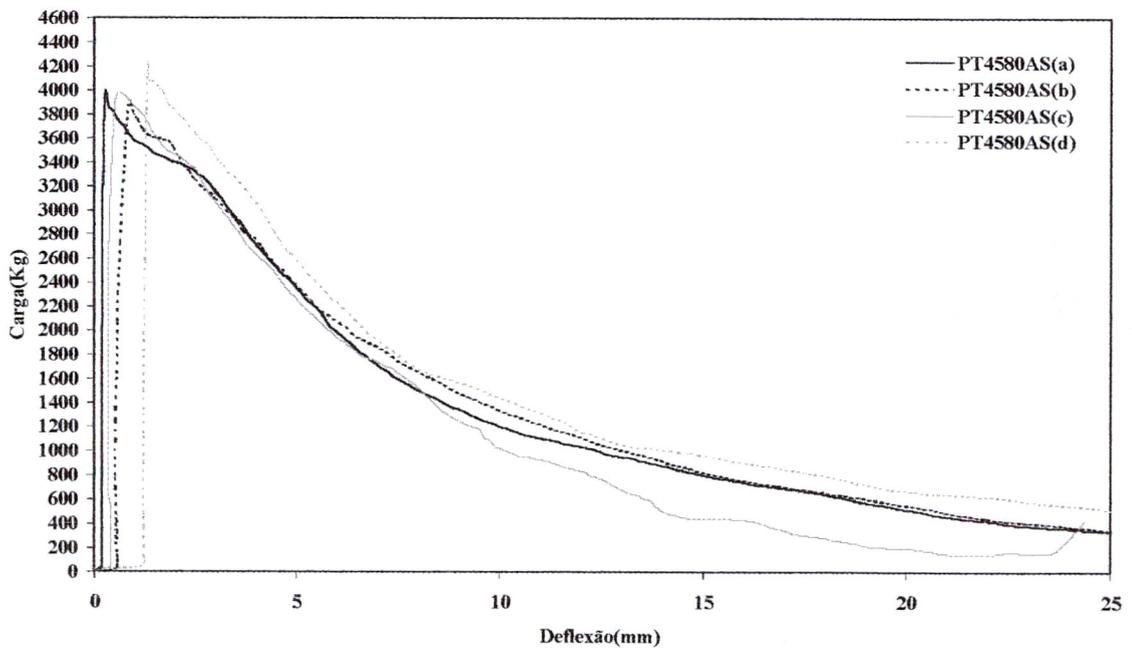
10) Curvas carga x deflexão para o concreto de 45 MPa, utilizando as fibras de aço solta no teor de 40 Kg/m³.

Curvas Carga x Deflexão



11) Curvas carga x deflexão para o concreto de 45 MPa, utilizando as fibras de aço colada no teor de 80 Kg/m^3 .

Curvas Carga x Deflexão

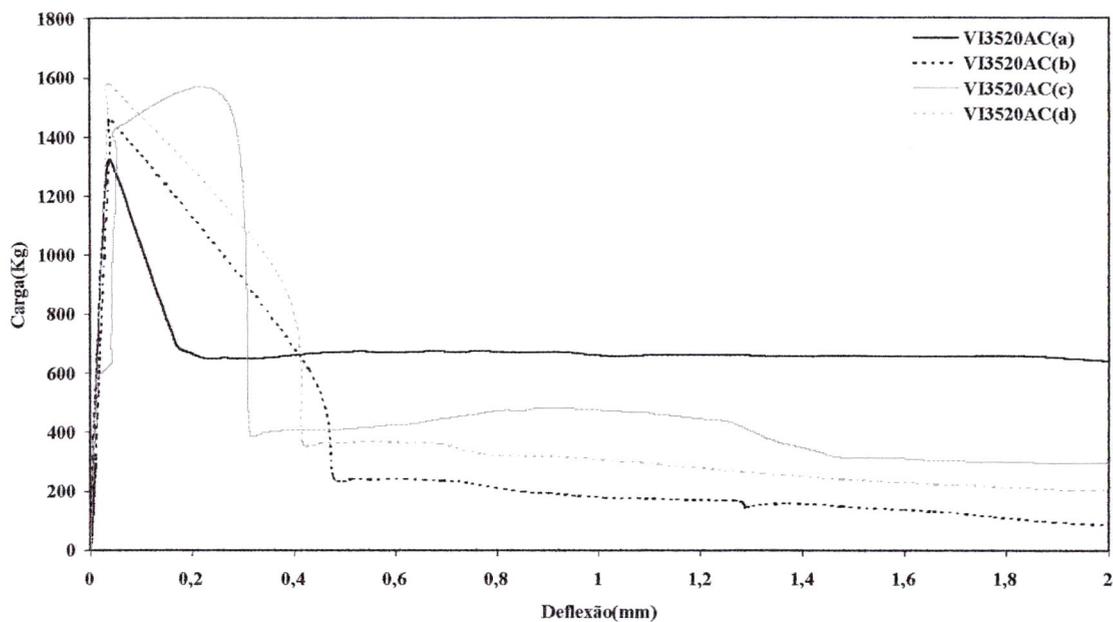


12) Curvas carga x deflexão para o concreto de 45 MPa, utilizando as fibras de aço solta no teor de 80 Kg/m^3 .

ANEXO V

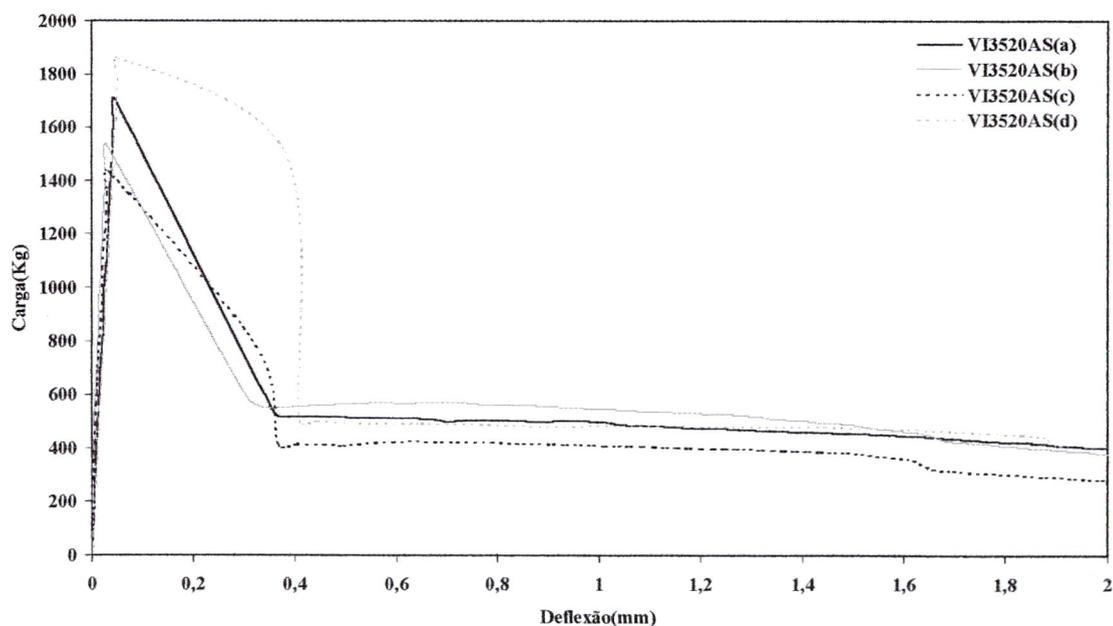
RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO EM VIGAS

Curvas Carga x Deflexão



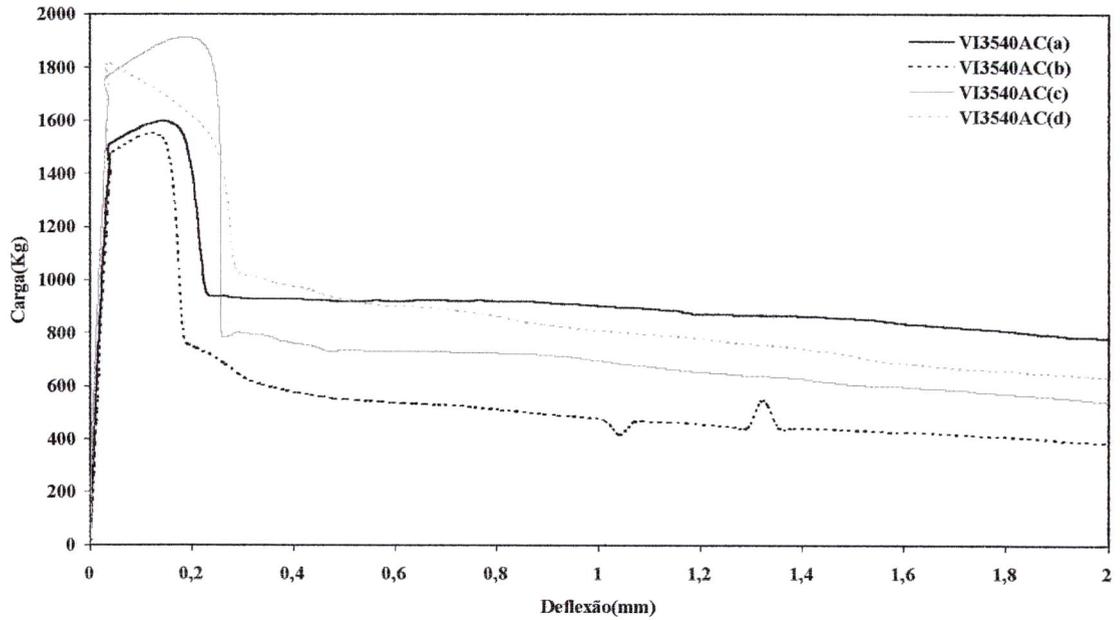
1) Curvas carga x deflexão para o concreto de 35 MPa, utilizando as fibras de aço colada no teor de 20 Kg/m³.

Curvas Carga x Deflexão



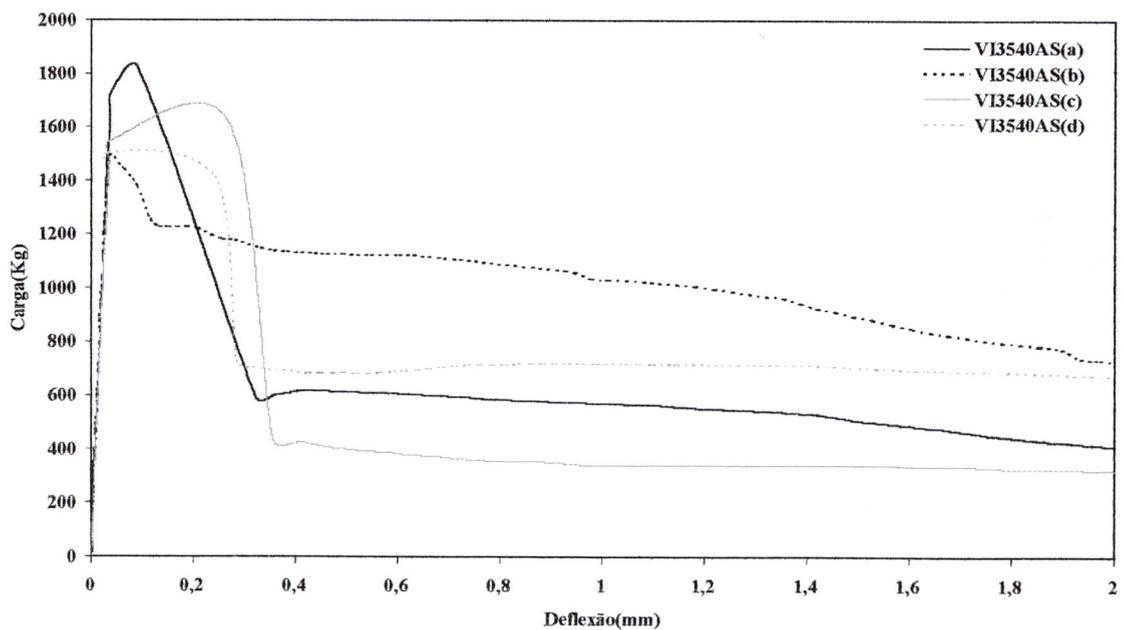
2) Curvas carga x deflexão para o concreto de 35 MPa, utilizando as fibras de aço solta no teor de 20 Kg/m³.

Curvas Carga x Deflexão



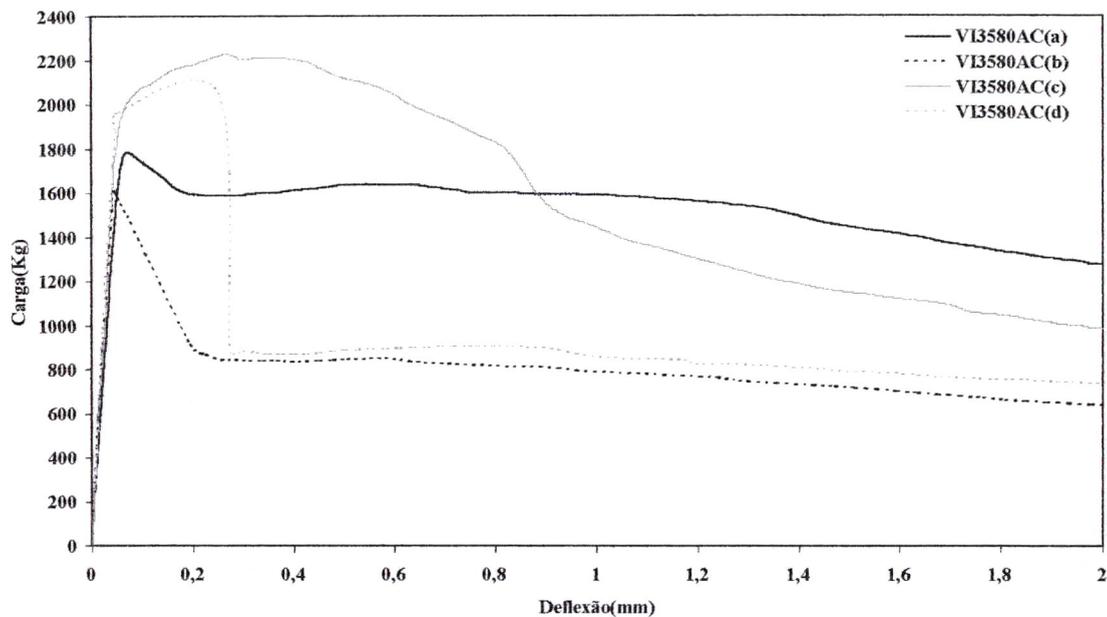
3) Curvas carga x deflexão para o concreto de 35 MPa, utilizando as fibras de aço colada no teor de 40 Kg/m³.

Curvas Carga x Deflexão



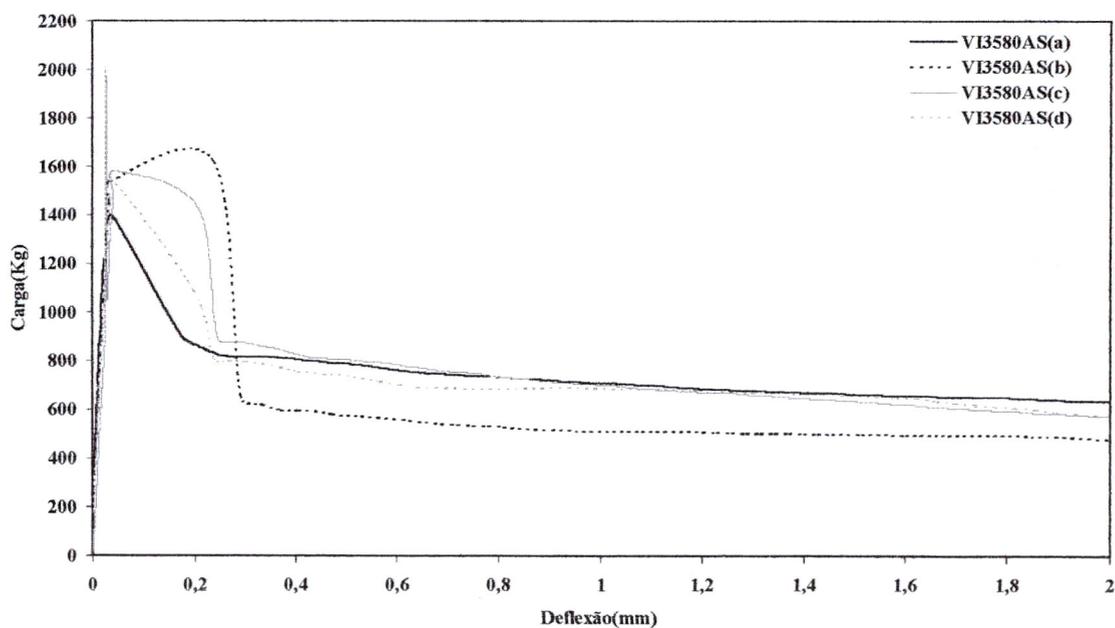
4) Curvas carga x deflexão para o concreto de 35 MPa, utilizando as fibras de aço solta no teor de 40 Kg/m³.

Curvas Carga x Deflexão



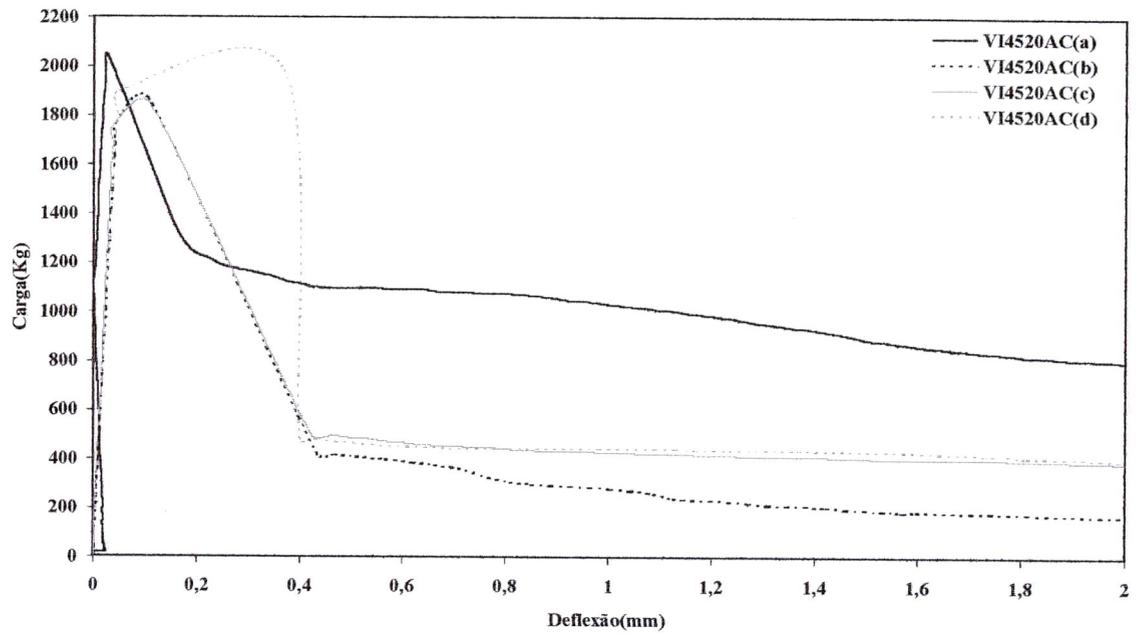
5) Curvas carga x deflexão para o concreto de 35 MPa, utilizando as fibras de aço colada no teor de 80 Kg/m^3 .

Curvas Carga x Deflexão



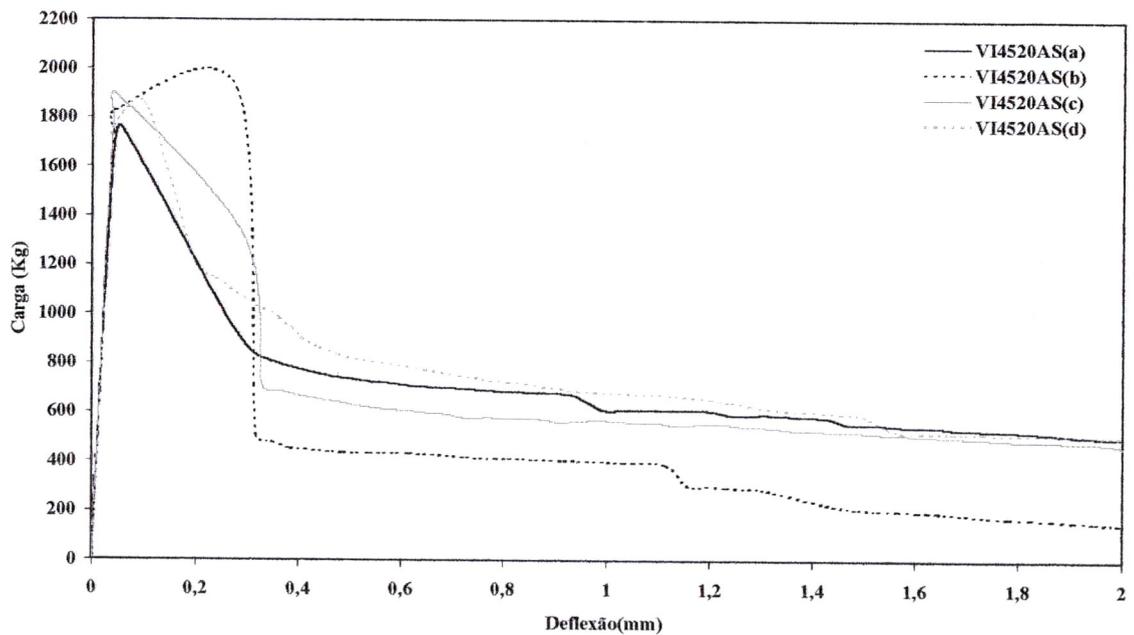
6) Curvas carga x deflexão para o concreto de 35 MPa, utilizando as fibras de aço solta no teor de 80 Kg/m^3 .

Curvas Carga x Deflexão



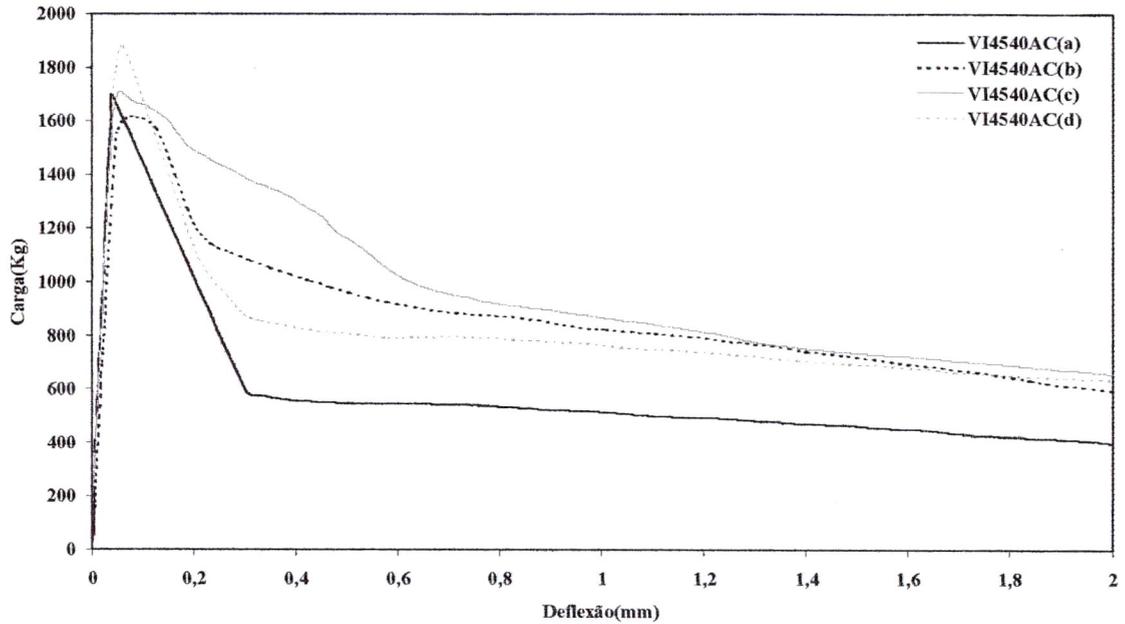
7) Curvas carga x deflexão para o concreto de 45 MPa, utilizando as fibras de aço colada no teor de 20 Kg/m^3 .

Curvas Carga x Deflexão



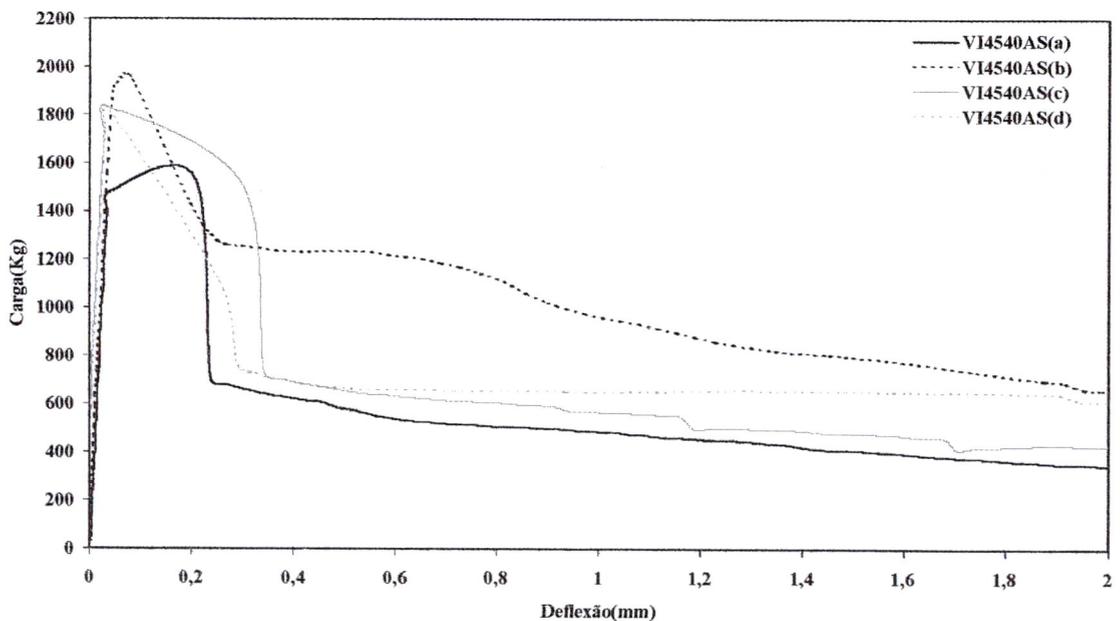
8) Curvas carga x deflexão para o concreto de 45 MPa, utilizando as fibras de aço solta no teor de 20 Kg/m^3 .

Curvas Carga x Deflexão



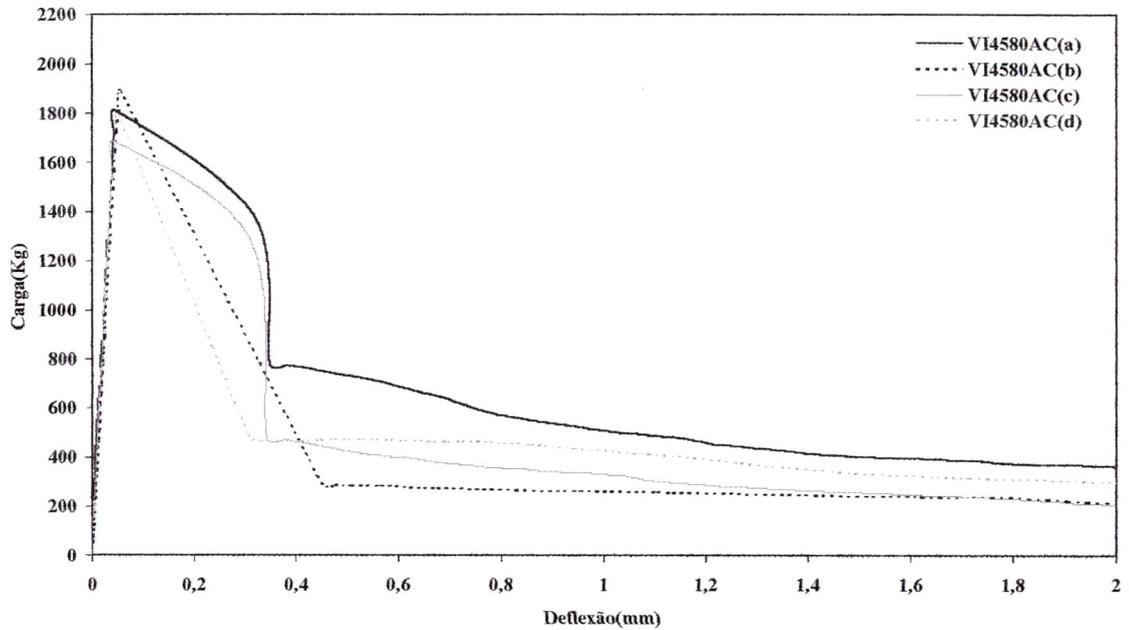
9) Curvas carga x deflexão para o concreto de 45 MPa, utilizando as fibras de aço colada no teor de 40 Kg/m^3 .

Curvas Carga x Deflexão



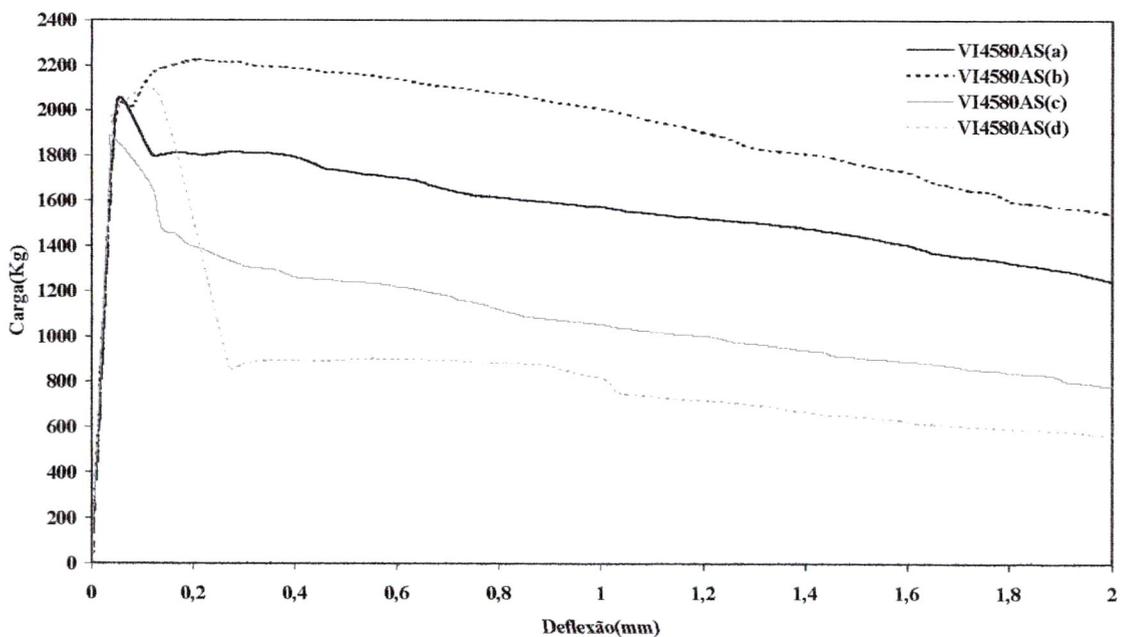
10) Curvas carga x deflexão para o concreto de 45 MPa, utilizando as fibras de aço solta no teor de 40 Kg/m^3 .

Curvas Carga x Deflexão



11) Curvas carga x deflexão para o concreto de 45 MPa, utilizando as fibras de aço colada no teor de 80 Kg/m^3 .

Curvas Carga x Deflexão



12) Curvas carga x deflexão para o concreto de 45 MPa, utilizando as fibras de aço solta no teor de 80 Kg/m^3 .