

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE  
MINAS

Tese de doutorado

“Concreto com fibras curtas de aço submetido à alta temperatura”

Autor: Augusto Cesar da Silva Bezerra

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Cetlin

Abril/2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Augusto Cesar da Silva Bezerra

“Concreto com fibras curtas de aço submetido à alta temperatura”

Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em  
Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de  
Minas Gerais

Área de concentração: Metalurgia de transformação

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Cetlin

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2012

## FOLHA DE APROVAÇÃO

“Concreto com fibras curtas de aço submetido à alta temperatura”

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2012

---

Prof. Dr. Herman Sander Mansur

Coordenador do Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Banca Examinadora

---

ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Roberto Cetlin (DEMEC/UFMG)

---

Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguilár (DEMC/UFMG)

---

Prof. Dr. Roberto Braga Figueiredo (DEMC/UFMG)

---

Profa. Dra. Elaine Carvalho Siqueira Corrêa (DEMAT/CEFET-MG)

---

Prof. Dr. Cláudio José Martins (DEC/CEFET-MG)

Aos meus pais com muito carinho  
dedico este trabalho, que são e  
sempre serão tudo na minha vida.

## AGRADECIMENTOS

O autor agradece a todos que, diretamente e indiretamente, colaboraram no desenvolvimento deste trabalho, em especial:

Ao Prof. Paulo Roberto Cetlin pela orientação precisa e principalmente pela paciência e confiança nas minhas realizações, porque em momentos que nem eu acreditava que conseguiria, ele confiou;

À Profa. Maria Teresa Paulino de Aguiar pelo direcionamento para vida acadêmica, pelo exemplo e por ser meu modelo. Quero um dia ser a metade do pesquisador que ela é;

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, em especial aos funcionários Maria Aparecida Pacheco e Nelson Antônio de Azevedo;

Aos meus pais, Antonio Teixeira Bezerra e Julia Maria da Silva Bezerra, e meu irmão Antônio Vinicius da Silva Bezerra por compreenderem a minha ausência;

Ao meu irmão João Trajano da Silva Neto pela paciência e por ter agüentado o meu mau humor;

Aos meus amigos Albert Willian Faria, Andreyra Nogueira, Aretuza Borges, Bruna Jardim Matta Machado, Bruno Mendes Campolina, Celina Vilela, Elaine Costa Keles, Felipe Dutervil Calvette, Helenice Araújo, Idelfonso Binatti, Joline Costa Keles, Julio Cesar Madureira, Junia Benfica, Karen Costa Keles, Katiúscia Carvalho, Kenya Gomes de Oliveira Lopes, Larissa Costa Keles, Leticia Flores, Lucinete Santos, Marcela Maira Nascimento de Souza, Rodrigo Antunes, Suelen Erica Costa da Silva pelo incentivo e apoio;

Ao meu querido amigo Matheus Rodrigues deixo esse agradecimento por todos os momentos de descontração, todas as festas de Reis e todo incentivo. Que Deus o tenha e você está fazendo muita falta;

Aos meus amigos, colegas de pesquisa e orientados de mestrado Áureo de Alencar Silva, Domingos Sávio Resende, Herbert Raspidiel, José Genário Keles, José Afonso de Matos Neto e Márcio Antônio Rosa pelo incentivo e apoio;

Aos meus amigos e colegas de trabalho Alexandre Linhares, Antonio de Pádua, Joelma Moreira e Miriam Coelho pelo incentivo e apoio;

Ao meu amigo, colega de pesquisa e de trabalho Mateus da Silva Justino e sua esposa Janaina pelo incentivo, apoio e ajuda na realização dos ensaios;

Aos professores Dra. Elaine Carbalho (DEMAT/CEFET-MG), Dr. Conrado de Souza Rodrigues (DEC/CEFET-MG), Dr. Cláudio José Martins (DEC/CEFET-MG), Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto (DECIV/UFOP) e Dr. Antonio Maria Claret de Gouveia (DECIV/UFOP) pelo apoio e acesso aos equipamentos dos respectivos departamentos e instituições;

À Magnesita, na pessoa do Engenheiro Rubens Alves Freire, pelo empréstimo dos fornos;

À Maccaferri América Latina, na pessoa do Engenheiro Roberto Deslandes Figueiredo, pela doação das fibras;

Aos mestres queridos pelos ensinamentos que foram além das salas de aula Fernando Cordeiro, Flávio Antonio dos Santos, João Mauricio de Andrade Goulart, Maria Cristina Ramos de Carvalho e Wellington Luiz Borges;

Aos meus alunos de iniciação científica Ana Carolina Lanne Melo, Ana Clara Jeronimo Ventura, Belchiolina Flávia Ferreira, Caroline Cunha Silva, Cinara

Souza Lopes, Daniel Silva Souza, Elaine Rodrigues Ribeiro, Emiliany Leão Castro, Iara de Souza Castro, João Paulo Aparecido Arruda, Kamilla Mayer Rosa Peres, Layane Lórem Pimenta, Leonardo José Martins Dirickson, Ludmila Garcia Ribeiro, Maria Gabriela Valeriano, Matheus Borges de Resende, Mayara Angélica Fernandes Fiúza, Rafaella Bartz Pena, Robson Martins Veda, Rubens Souza Macedo do Amaral e Thayanny Oliveira Damasceno que nesse período de realização do doutorado souberam compreender meus momentos de ausência e indisponibilidade na orientação;

Aos meus alunos de trabalho de conclusão de curso de graduação e amigos Amine Maria Ferreira Silva, Carlos Frederico de Andrade Horta, Carolina Angélica Paixão Silva Alkmin, Charles dos Reis Machado, Fábio Bastos Mendes, Fabrício Martins Silva, Helenice Gomes de Araújo Lopes da Costa, Jovencio Melo de Oliveira, Juderlei Souza de Aguiar, Lin Rodrigues Ta Wei, Lucinete do Rosário Santos, Luísa Angélica do Nascimento, Priscilla Marta Dias e Sávio Marcelino Chagas de Araújo que nesse período de realização do doutorado souberam compreender meus momentos de ausência e indisponibilidade na orientação;

Aos meus alunos de orientação de estágio supervisionado que nesse período de realização do doutorado souberam compreender meus momentos de ausência e indisponibilidade na orientação; E me desculpem por não citarem todos;

## RESUMO

O presente trabalho estudou concreto convencional com adição de fibras curtas de aço em condição normal e após ser submetido a temperatura elevada. As fibras foram caracterizadas por meio de técnicas de microscopia e ensaios mecânicos de tração. Os compósitos cimentícios tiveram seus constituintes caracterizados. Para avaliação da interação das fibras e matriz cimentícia foram confeccionados corpos-de-prova prismáticos de 40x40x160mm particionados, sendo as metades ligadas por três fibras na direção longitudinal e os mesmos foram ensaiados a flexão. Para a avaliação do compósito cimentício reforçado foram moldados 4 corpos-de-prova prismáticos de 150X150X500mm e 20 cilíndricos de 100mm de diâmetro e 200mm de altura para cada modelo de fibra e sem fibra. A metade dos corpos-de-prova foi levada ao forno para aquecimento. Após o aquecimento, os corpos-de-prova crus e submetidos à altas temperaturas foram caracterizados mecanicamente através dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração na compressão diametral, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade dinâmico. Os resultados demonstram que ocorre redução nas propriedades mecânicas após a submissão a temperaturas elevadas, sendo menores as perdas nos concretos reforçados com fibras.



## **ABSTRACT**

This study investigated conventional concrete with the addition of short fibers of steel in normal condition and after have been subjected to high temperature. The fibers were characterized by microscopy and mechanical tensile tests. The constituents of the cementitious composites were characterized. To evaluate the interaction between fibers and the cement matrix, were fabricated prismatic specimen partitioned with 40x40x160mm, the halves were connected by three fibers in the direction longitudinal and they were tested at flexion. To evaluate the cementitious composites reinforced, was molded 4 prismatic specimens with 150X150X500mm and 20 cylindrical with 100mm in diameter and 200mm in height for each type of model with fiber and without fiber. Half of the specimens was taken to the oven for heating. After heating, the raw samples and submitted high temperatures were mechanically characterized by compressive strength testing, tensile strength in diametral compression testing, tensile strength testing in bending and dynamic modulus of elasticity. The results show that there is a reduction in the mechanical properties after subjection to high temperatures, and smaller losses in fiber reinforced concrete.

## SÚMARIO

Lista de Figuras.....	xii
Lista de Tabelas.....	xx
Lista de Símbolos.....	xxii
1 Introdução.....	1
2 Objetivos.....	5
2.1 Objetivo geral.....	5
2.2 Objetivos específicos .....	5
3 Revisão Bibliográfica.....	6
3.1 Considerações Gerais .....	6
3.2 Fibras de Aço.....	8
3.3 Desempenho de concretos reforçados com fibras curtas de aço .....	12
3.3.1 Resistência à compressão.....	12
3.3.2 Resistência à tração .....	13
3.3.3 Resistência à flexão.....	14
3.3.4 Módulo de elasticidade .....	17

3.3.5	Resistência ao impacto e a fadiga .....	20
3.3.6	Durabilidade .....	20
3.3.7	Trabalhabilidade .....	21
3.3.8	Retração e fluência.....	22
3.4	Interação Matriz-fibra .....	23
3.5	Concretos em temperaturas elevadas .....	38
4	Materiais e Métodos .....	40
4.1	Materiais .....	41
4.2	Métodos .....	47
4.2.1	Caracterização das fibras .....	47
4.2.2	Caracterização do compósito cimentício .....	51
4.2.3	Interação fibra e compósito cimentício.....	56
4.2.4	Caracterização do concreto com fibras .....	59
5	Resultados e Discussão .....	65
5.1	Caracterização das fibras .....	65
5.2	Interação matriz-fibra .....	74
5.2.1	Caracterização do compósito cimentício .....	74
5.2.2	Carga versus deslocamento dos compósitos com fibras.....	77

5.2.3	Análise microestrutural das fibras após ensaio de flexão.....	81
5.2.4	Análise dimensional das fibras após ensaio de flexão.....	85
5.3	Comportamento do concreto com fibras.....	88
5.3.1	Trabalhabilidade dos concretos.....	88
5.3.2	Concreto cru com fibras.....	88
5.3.3	Concreto submetido à alta temperatura com fibras .....	100
5.3.4	Comparação entre os concretos.....	107
6	Conclusões.....	114
7	Contribuições originais ao conhecimento .....	115
8	Relevância dos resultados.....	116
9	Sugestões para trabalhos futuros.....	117
10	Referências Bibliográficas.....	118

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Exemplos de diferentes formas de fibras metálicas (SARZALEJO <i>et al.</i> , 2009) .....	9
Figura 3.2 - Exemplos de diferentes formas de fibras metálicas (SARZALEJO <i>et al.</i> , 2009) .....	10
Figura 3.3 - Diferentes tipos de fibras curtas de aço (HOLSCHEMACHER <i>et al.</i> , 2010) .....	10
Figura 3.4 - Influência no teor de fibras na curva tensão x deformação na compressão (ACI 544.4R-88, 2004).....	13
Figura 3.5 - Curvas tensão x deformação de compósitos cimentícios com fibras (ACI 544.4R-86, 2004).....	14
Figura 3.6 - Características da curva carga x deslocamento (ASTM C 1018; ACI544.4R-88, 2004).....	15
Figura 3.7 - Curvas de carga versus flecha para concretos com diferentes percentuais de fibras.....	16
Figura 3.8- Média das cargas e flechas para concretos com diferentes tipos de fibras (HOLSCHEMACHER <i>et al.</i> , 2010) .....	17
Figura 3.9 - Relação entre o volume de fibras de aço e o abatimento em concretos leves (SHAFIGH <i>et al.</i> , 2011) .....	22

Figura 3.10 - Mecanismo de controle da propagação das fissuras (NUNES, TANESI e FIGUEIREDO, 1997).....	24
Figura 3.11 - Representação do arrancamento da fibra da matriz (BENTUR e MINDESS, 1990).....	25
Figura 3.12 - Representação das tensões de cisalhamento na interface (BENTUR e MINDESS, 1990).....	26
Figura 3.13 - Representação da fibra e da matriz na vizinhança da fissura (BENTUR e MINDESS, 1990).....	27
Figura 3.14 - Exemplo da variação da eficiência entre a interface fibra e o concreto com a forma da fibra (SARZALEJO <i>et al.</i> , 2009).....	29
Figura 3.15 - A importância da resistência à tração da fibra (SARZALEJO <i>et al.</i> , 2009).....	30
Figura 3.16 - Ductibilidade x Dosagem (SARZALEJO <i>et al.</i> , 2009) .....	31
Figura 3.17 - Dosagem X Fator de forma (L/D) (SARZALEJO <i>et al.</i> , 2009).....	32
Figura 3.18 - Esquema de um ensaio de flexão (SARZALEJO <i>et al.</i> , 2009)....	34
Figura 3.19 - Fator de forma da fibra (NUNES e AGOPYAN, 1998) .....	35
Figura 3.20 - Energia absorvida (%) versus fator de forma (L/D) (SARZALEJO <i>et al.</i> , 2009) .....	36
Figura 3.21 - Concreto reforçado com fibras onde há compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo (FIGUEIREDO, 2000).....	37
Figura 3.22 - Concreto reforçado com fibras onde não há compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo (FIGUEIREDO, 2000).....	37

Figura 4.1 - Fluxograma dos experimentos realizados .....	41
Figura 4.2 - Fibras curtas de aço utilizados .....	42
Figura 4.3 - Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado.....	45
Figura 4.4 - Curva granulométrica do agregado graúdo utilizado .....	46
Figura 4.5 - Curvas granulométricas dos agregados miúdo e graúdo.....	46
Figura 4.6 - Amostras preparadas para a microscopia .....	48
Figura 4.7 - Equipamento para metalização .....	49
Figura 4.8 - Microscópio eletrônico de varredura.....	49
Figura 4.9 - Equipamento universal de ensaios .....	50
Figura 4.10 - Ensaio de tração com a fibra curta de aço.....	51
Figura 4.11 - Prensa hidráulica durante o experimento .....	53
Figura 4.12 - Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico longitudinal.....	54
Figura 4.13 - Freqüência ressonante longitudinal aproximada (CNS, 1995)....	55
Figura 4.14 - Moldes prismáticos 40x40x160mm.....	57
Figura 4.15 - Desenho do corpo-de-prova e apoios.....	57
Figura 4.16 - Molde preparado para moldagem.....	58
Figura 4.17 - Equipamento de ensaio universal durante o experimento .....	59
Figura 4.18 - Moldes cilíndricos e prismáticos .....	60

Figura 4.19 - Forno elétrico industrial.....	61
Figura 4.20 - Forno elétrico industrial.....	62
Figura 4.21 - Ensaio de resistência à compressão .....	63
Figura 4.22 - Ensaio de resistência à tração na compressão diametral.....	63
Figura 4.23 - Ensaio de resistência à tração na flexão .....	64
Figura 5.1 - Diâmetro médio das fibras .....	66
Figura 5.2 - Comprimento das fibras.....	66
Figura 5.3 - Imagens de microscopia ótica .....	67
Figura 5.4 - Imagens da fibra FS3N por microscopia eletrônica de varredura .	68
Figura 5.5 - Imagens da fibra FF3 por microscopia eletrônica de varredura....	69
Figura 5.6 - Imagens da fibra FF4 por microscopia eletrônica de varredura....	70
Figura 5.7 - Gráfico tensão versus deformação da fibra FS3N.....	71
Figura 5.8 - Gráfico tensão versus deformação da fibra FF3.....	71
Figura 5.9 - Gráfico tensão versus deformação da fibra FF4.....	72
Figura 5.10 - Gráfico tensão versus deformação das fibras.....	73
Figura 5.11 - Resistência à tração das fibras FS3N, FF3 e FF4 .....	73
Figura 5.12 - Resultados de resistência à compressão e modulo de elasticidade .....	74



Figura 5.13 - Curvas de carga versus deslocamento na flexão de compósito cimentício sem fibras .....	77
Figura 5.14 - Curvas de carga versus deslocamento na flexão dos corpos-de-prova particionados de compósito cimentício com fibras do tipo FS3N (Forma 44).....	78
Figura 5.15 - Curvas de carga versus deslocamento na flexão dos corpos-de-prova particionados de compósito cimentício com fibras do tipo FF3 (Forma 67) .....	79
Figura 5.16 - Curvas de carga versus deslocamento na flexão dos corpos-de-prova particionados de compósito cimentício com fibras do tipo FF4 (Forma 80) .....	79
Figura 5.17 - Fibras durante o ensaio com os corpos-de-prova particionados.	80
Figura 5.18 - Energia absorvida pelos corpos-de-prova .....	80
Figura 5.19 - Imagens de microscopia óptica.....	82
Figura 5.20 - Imagens da fibra FS3N por microscopia eletrônica de varredura	83
Figura 5.22 - Imagens da fibra FF4 por microscopia eletrônica de varredura..	85
Figura 5.23 - Diâmetro médio das fibras .....	86
Figura 5.24 - Comprimento das fibras.....	86
Figura 5.25 - Extremidades das fibras antes e após aos ensaios .....	87
Figura 5.26 - Abatimento em tronco de cone .....	88
Figura 5.27 - Resistência à compressão dos concretos.....	89

Figura 5.28 - Resistência à tração na compressão diametral dos concretos ...	90
Figura 5.29 - Resistência à tração na flexão dos concretos.....	91
Figura 5.30 - Gráfico carga versus flecha do ensaio de flexão do concreto sem fibras .....	92
Figura 5.31 - Fissuração do concreto de referência após o ensaio de flexão ..	93
Figura 5.32 - Gráfico carga versus flecha do ensaio de flexão dos concretos reforçados com fibras FS3N (Forma 40).....	93
Figura 5.33 - Fissuração do concreto reforçado com a fibra FS3N após o ensaio de flexão .....	94
Figura 5.34 - Gráfico carga versus flecha do ensaio de flexão dos concretos reforçados com fibras FF3 (Forma 67).....	95
Figura 5.35 - Fissuração do concreto reforçado com a fibra FF3 após o ensaio de flexão .....	96
Figura 5.36 - Gráfico carga versus flecha do ensaio de flexão dos concretos reforçados com fibras FF4 (Forma 80).....	97
Figura 5.37 - Fissuração do concreto reforçado com a fibra FF4 após o ensaio de flexão .....	97
Figura 5.38 - Curvas de carregamento versus flecha do ensaio de flexão dos concretos reforçados.....	98
Figura 5.39 - Módulo de elasticidade dinâmico dos concretos.....	99
Figura 5.40 - Módulo de elasticidade estático dos concretos crus.....	99

Figura 5.41 - Resistência à compressão dos concretos submetidos à alta temperatura.....	100
Figura 5.42 - Resistência à tração na compressão diametral dos concretos submetidos à alta temperatura.....	101
Figura 5.43 - Resistência à tração na flexão dos concretos submetidos à alta temperatura.....	101
Figura 5.44 - Gráfico carga versus flecha do ensaio de flexão do concreto submetido à alta temperatura sem fibras .....	102
Figura 5.45 - Gráfico carga versus flecha do ensaio de flexão dos concretos reforçados com fibras FS3N (Forma 40) submetidos à alta temperatura.....	102
Figura 5.46 - Gráfico carga versus flecha do ensaio de flexão dos concretos reforçados com fibras FF3 (Forma 67) submetidos a alta temperatura .....	103
Figura 5.47 - Gráfico carga versus flecha do ensaio de flexão dos concretos reforçados com fibras FF4 (Forma 80) submetidos à alta temperatura .....	104
Figura 5.48 - Curvas de carregamento versus flecha do ensaio de flexão dos concretos reforçados submetidos à alta temperatura .....	104
Figura 5.49 - Fissuração do concreto reforçado com a fibra FF4 aquecido após o ensaio de flexão .....	105
Figura 5.50 - Módulo de elasticidade dinâmico dos concretos submetidos à alta temperatura.....	106
Figura 5.51 - Módulo de elasticidade estático dos concretos submetidos à alta temperatura.....	106

Figura 5.52 - Resistência à compressão dos concretos crus e submetidos à alta temperatura.....	107
Figura 5.53 - Percentual da resistência à compressão residual após o processo de aquecimento.....	108
Figura 5.54 - Resistência à tração na compressão diametral dos concretos crus e submetidos à alta temperatura.....	108
Figura 5.55 - Percentual da resistência à tração na compressão diametral residual após o processo de aquecimento .....	109
Figura 5.56 - Resistência à tração na flexão dos concretos crus e submetidos à alta temperatura .....	109
Figura 5.57 - Percentual da resistência à tração na flexão residual após o processo de aquecimento .....	110
Figura 5.58 - Gráfico carga versus flecha dos concretos crus e submetidos à alta temperatura com e sem reforço .....	110
Figura 5.59 - Módulo de elasticidade dinâmico dos concretos crus e submetidos à alta temperatura .....	111
Figura 5.60 - Percentual do módulo de elasticidade dinâmico residual após o processo de aquecimento .....	111
Figura 5.61 - Módulo de elasticidade estático dos concretos crus e submetidos à alta temperatura .....	112
Figura 5.62 - Percentual do módulo de elasticidade estático residual após o processo de aquecimento .....	113

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Tipos de fibras (BENTUR, 1995).....	8
Tabela 3.2 - Visão geral dos vários tipos de fibras curtas de aço investigadas (HOLSCHEMACHER <i>et al.</i> , 2010) .....	11
Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas para concretos com diferentes percentuais de fibras (SOULIOTI <i>et al.</i> , 2009) .....	32
Tabela 4.1 - Fibras curtas de aço utilizadas.....	42
Tabela 4.2 - Composição química das fibras .....	42
Tabela 4.2 - Caracterização do cimento portland ARI (CPV) utilizado.....	43
Tabela 4.3 - Materiais utilizados na produção de concreto .....	44
Tabela 4.4 - Composição granulométrica do agregado miúdo utilizado.....	44
Tabela 4.5 - Composição granulométrica do agregado graúdo utilizado .....	45
Tabela 4.6 - Proporção de materiais utilizados para confecção do compósito cimentício.....	52
Tabela 4.7 - Proporção de materiais utilizados .....	60
Tabela 5.1 - Correlações entre a resistência à compressão e aos módulos de elasticidade ensaiados.....	76

Tabela 5.2 - Relações do comprimento das fibras, dimensão máxima do agregado e dimensão mínima do elemento estrutural ..... 90

Tabela 5.3 - Relações do comprimento das fibras, dimensão máxima do agregado e dimensão mínima do elemento estrutural ..... 92

## LISTA DE SIMBOLOS

% – por cento

$d_f$  – diâmetro

$f_s$  – incremento na resistência à tração

$f_t$  – resistência à tração

$f_t^1$  – resistência média à tração

GPa – gigapascal

J – joule

kg – quilograma

kHz – quilohertz

kN – quilonewton

$l_c$  – comprimento crítico

$l_f$  – comprimento

m – metro

$m^2$  – metro quadrado

$m^3$  – metro cúbico

mm – milímetro

$mm^2$  – milímetro quadrado

MPa – Megapascal

N – Newton

$\rho$  – massa específica

$\sigma_{fu}$  – resistência última a tração

$\mu m$  – micrometro

s - segundo

$\tau_{au}$  – resistência de aderência

$\tau_{fu}$  – resistência da interface ao atrito



# 1 INTRODUÇÃO

Materiais sólidos têm sido convenientemente agrupados em 3 classificações básicas: (a) metais; (b) cerâmicas, e (c) polímeros. Este esquema é baseado principalmente na constituição química e estrutura atômica, e muitos materiais caem num distinto grupamento ou num outro, embora existam alguns intermediários. Em adição, existem 2 outros grupos de importantes materiais de engenharia: (d) compósitos e (e) semicondutores. Compósitos consistem de combinações de 2 ou mais diferentes materiais, enquanto que semicondutores são utilizados por causa de suas não usuais características elétricas (CALLISTER Jr., 1991). Segundo ASKELAND (2008), os materiais compósitos são formados a partir de dois ou mais materiais, resultando em propriedades não encontradas usualmente em qualquer dos materiais de maneira individual.

Uma das formas de produção de materiais compósitos é a inserção de fibras em matrizes rígidas ou flexíveis. A utilização de fibras para reforçar materiais frágeis de cimento era conhecida desde as civilizações egípcia e babilônica (NAWY, 1996). Diversos pesquisadores atualmente têm estudado compósitos obtidos a partir da inserção de fibras. CHATTOPADHYAY *et al.* (2011) estudaram a biodegradação de vários compósitos de polipropileno (PP) produzidos usando fibras naturais, como fibra de folhas de abacaxi, fibra de bananeira e fibra de bambu. SIMITZIS *et al.* (2011) estudaram a resistência mecânica e condutividade elétrica de compósitos desenvolvidos a partir de resina fenólica, fibras de carbono e partículas de metal. GHORAISHI *et al.* (2011) estudaram a influência da forma e da orientação das fibras de aço nas propriedades de compósitos à base de epóxi. KHORAMI e GANJIAN (2011) estudaram compósitos cimentícios com fibras de resíduos agroindustriais, como bagaço de cana-de-açúcar, palha de trigo e fibras de eucalipto. WON *et al.* (2011) estudaram a adição de fibras de polietileno tereftalato (PET)

recicladas em compositos de cimento portland. SHAFIGH *et al.* (2011) estudaram as propriedades de concretos leves produzidos com agregados leves artificiais, fibras vegetais e fibras de aço. SHOKRIEH *et al.* (2011) produziram e avaliaram um concreto polimérico fabricado com areia, resina epóxi e fibra de vidro.

Na tentativa de produzir um material com características das rochas naturais que pudesse ser moldado, a civilização tem procurado há mais de 2000 anos fabricar um material que é usualmente conhecido como concreto. Composto por aglomerantes, agregados e água, os concretos adquiriram uma importância tão grande para a sociedade que são atualmente os materiais de construção mais empregados no mundo (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Com o concreto é possível produzir estruturas com infinitas variações de forma, que apresentam resistência à compressão de até 200MPa. No entanto, o concreto apresenta ruptura frágil e pequena capacidade de deformação, quando comparado com outros materiais estruturais como o aço (MEHTA e MONTEIRO, 1994; FIGUEIREDO, 2000). O concreto apresenta resistência à tração em torno de 7 a 11% da resistência à compressão. Este comportamento está associado às fissuras que se formam devido à força aplicada ou que se propagam sob tração (FIGUEIREDO, 2000; COUTINHO e GONÇALVES, 1994). Em função da sua baixa resistência à tração e ruptura frágil, comumente para seu uso em estrutura é feita a incorporação de barras de aço (concreto armado).

Recentemente, um número crescente de estudos vem sendo realizados em laboratórios de todo o mundo visando melhorar o desempenho do material concreto, ou seja, produzir concreto com propriedades especiais. Os pesquisadores se deparam com variadas possibilidades de melhoramentos desse desempenho: aumento da durabilidade, redução do peso específico, minimização de aberturas de fissuras internas, restrição à penetração de substâncias agressivas, aprimoramentos no processo de fabricação, aumento da capacidade de absorção de energia ou tenacidade, aumento da resistência à compressão e aumento da resistência à tração. Tais estudos envolvem tanto a concepção do material em função da sua estrutura, como a determinação da

sua vida útil, numa tentativa de se minimizar o seu desgaste, a presença de fraturas e problemas diversos, ocasionados pelo envelhecimento do composto.

Estudos iniciados em 1960, visando a melhoria de algumas propriedades do concreto, utilizam a incorporação de variados tipos de fibras curtas como um dos constituintes do material (KINNUNEM and NYLANDER, 1960; ROMUALDI and MANDEL, 1964; NIELSEN and CHEN, 1968; HALPIN and TSAI, 1969; MCKEE, 1969; SHAH and RANGAN, 1971). Dentre as fibras pesquisadas destacam-se as fibras de aço, de carbono, sintéticas (poliméricas) e de materiais naturais. Em especial, o estudo de fibras de aço adicionadas ao concreto tem merecido uma grande atenção por parte dos pesquisadores em função da busca das características, propriedades e aplicações deste novo composto (BALAGURU e SHAH, 1992; BENTUR, 1995; BENTUR e MINDESS, 1990; GRANDHAIE, GRANJU e RINGOT, 1996; GRANJU, 1996; CRUZ, 1998; LI e MOBASHERT, 1998; HARTMANN, 1999; VIDAL FILHO, 1999; FIGUEIREDO, 2000; TANESI e FIGUEIREDO, 2000; BARROS e FIGUEIRAS, 2001; HOLANDA, 2002; ZHU, GUAN e SHEN, 2002; BARRAGAN *et al.*, 2003; BARROS, ROSSI e MASSICOTTE, 2003; MOREIRA, 2003; RIBEIRO, 2004; LOBÃO, 2005; LOPES, 2005; TURATSINZE *et al.*, 2005; PASA, 2007; SINGH *et al.*, 2007; BITENCOURT JR, 2009; FU *et al.*, 2009; OZCAN *et al.*, 2009; SARZALEJO *et al.*, 2009, KANG *et al.*, 2010).

Em função de suas propriedades, o concreto reforçado com fibras apresenta vantagens tecnológicas e econômicas em relação ao convencional em diversas aplicações: pavimentação, revestimento de túneis, tubulações, vertedouros de barragens, represas e pré-moldados.

A adição de fibras de aço ao concreto faz com que a ruptura do material deixe de ser brusca, o material passa a apresentar o comportamento pseudo-dúctil, ou seja, continua apresentando uma resistência residual a esforços nele aplicados mesmo após sua fissuração. As fibras aumentam a capacidade de absorção de energia (tenacidade), pois promovem a transferência de tensão através das fissuras, atuando como pontes, ou seja, proporcionam

continuidade até que ocorra o deslizamento e/ou o arrancamento das fibras (GRANJU, 1996; HOLANDA, 2002; GRANDHAIE, GRANJU, RINGOT, 2003; TURATSINZE *et al*, 2005). A alteração do comportamento se dá em função das características das fibras, da matriz de concreto e da interação fibra-matriz (FIGUEIREDO, 2000). Existem muitos outros estudos envolvendo propriedades mecânicas dos concretos reforçados com fibras de aço (BALAGURU e SHAH, 1992; BENTUR, 1995; BENTUR e MINDESS, 1990; GRANDHAIE, GRANJU e RINGOT, 1996; GRANJU, 1996; HARTMANN, 1999; VIDAL FILHO, 1999; FIGUEIREDO, 2000; TANESI e FIGUEIREDO, 2000; HOLANDA, 2002; BARRAGAN *et al.*, 2003; BARROS, ROSSI e MASSICOTTE, 2003; LOBÃO, 2005; LOPES, 2005; TURATSINZE *et al.*, 2005; SARZALEJO *et al.*, 2009, SHAFIGH *et al.*, 2011).

Com este trabalho pretende-se contribuir para o avanço do conhecimento sobre o concreto, explorando aspectos referentes aos mecanismos de reforço do concreto com fibras curtas de aço, principalmente no que diz respeito a resistência mecânica de concretos reforçados com fibras curtas de aço após submissão a altas temperaturas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é analisar o comportamento mecânico de concretos reforçados com fibras curtas de aço submetidos à altas temperaturas.

### **2.2 Objetivos específicos**

Entre os objetivos específicos deste trabalho estão:

- avaliar o comportamento mecânico de concretos reforçados com fibras curtas de aço;
- avaliar a influência da relação de forma das fibras curtas de aço no comportamento mecânico de concretos reforçados;
- avaliar o comportamento mecânico de concretos reforçados com fibras curtas de aço submetidos a alta temperatura.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A revisão bibliográfica baseou-se em concretos reforçados com fibras curtas de aço. A seguir são apresentados os pontos mais relevantes desse estudo.

#### **3.1 Considerações Gerais**

O concreto está entre os materiais mais utilizados no mundo e pode ser considerado como um material compósito. Comumente, o concreto é avaliado pela sua resistência à compressão, mas ele possui outras propriedades importantes a serem avaliadas para sua aplicação, como módulo de Young e resistência à tração que, como já dito anteriormente, é bem inferior à resistência à compressão.

Uma das formas de garantir um bom desempenho do concreto em situação de esforço de tração, como acontece na superfície inferior de uma viga bi-apoiada, é o reforço com fibras de aço longas e ou curtas.

É sabido que o principal papel das fibras é colmatar as rachaduras que se desenvolvem em concreto e aumentar a ductilidade de elementos de concreto (MOHAMMADI *et al.*, 2008). Geralmente a ductilidade de concretos pode ser melhorada através da introdução de vários tipos de fibras, em especial fibras de aço (LU and HSU, 2006; NILI and AFROUGHSABET, 2010).

Fibras aumentam a tensão na carga de pico, fornecem capacidade de absorção adicional de energia, melhoram consideravelmente a resistência à

flexão do concreto, bem como a sua resistência ao impacto, resistência à tração e ductilidade (MOHAMMADI *et al.*, 2008).

O recurso ao uso de fibras com o objetivo de reforçar materiais é uma prática que se realiza já há muitos anos. Provavelmente, o manuscrito mais antigo que relata a utilização de fibras (naturais) encontra-se no Exodus 5:6-7,

“Nesse mesmo dia, o Faraó deu a seguinte ordem aos inspectores do povo e aos capatazes: ‘Não mais fornecereis ao povo palha para fazer tijolos como antigamente; que eles próprios a vão buscar’.”.

Segundo CRUZ (1998), só a partir da metade do século XX é que a aplicação começou a intensificar-se e, em especial, em materiais de matriz cimentícia, nomeadamente no concreto. Entende-se por concreto reforçado com fibras o compósito constituído por ligante hidráulico, inertes de diferentes dimensões e fibras curtas.

O reforço de fibra é normalmente distribuído aleatoriamente em todo o elemento, mas pode ser também usado em uma parte da seção do elemento, por exemplo, em elementos compostos como duas camadas de feixes ou em pilares de concreto de alta resistência recoberta por concreto reforçado com fibra (MOHAMMADI *et al.*, 2008; ISKHAKOV e RIBAKOV, 2007).

Existem diversos tipos de fibras destinadas especialmente ao reforço de concreto, classificadas em função da matéria prima com a qual são produzidas:

- Metálicas: aços carbono, aços ligados e alumínio;
- Naturais: amianto (asbesto), celulose e carbono;
- Sintéticas: nylon, polipropileno e outras.

A Tabela 3.1 apresenta algumas propriedades de alguns tipos de fibras. Dentre elas pode-se destacar a resistência à tração e o alongamento percentual. A primeira é definida pela carga máxima suportada pela fibra durante o ensaio dividida pela área inicial da seção da fibra. O alongamento percentual é a diferença entre o comprimento útil até a fratura e o comprimento útil inicial dividida pelo comprimento útil inicial multiplicada por 100. Acredita-se que quanto maior o alongamento percentual da fibra maior seria a pseudo-ductibilidade apresentada pelo concreto.

Tabela 3.1 - Tipos de fibras (BENTUR, 1995)

Fibra	Diâmetro (µm)	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência a tração (GPa)	Alongamento percentual (%)
Aço	5 a 500	7840	200	0,5 a 2,5	0,5 a 3,5
Vidro	9 a 15	2600	70 a 80	2,0 a 4,0	2,0 a 3,5
Crosidolite (amianto)	0,02 a 0,40	3400	196	3,5	2,0 a 3,0
Crisólito (Amianto)	0,02 a 0,40	2600	164	3,1	2,0 a 3,0
Polipropileno	20 a 200	900	5 a 77	0,5 a 0,75	8,0
Carbono	9	1900	200 a 600	2,0 a 4,0	1,0
Nylon	-	1100	4	0,9	13,0 a 15,0
Celulose	-	1200	10	0,3 a 0,5	-
Acrílico	18	1180	14 a 19,5	0,4 a 1,0	3,0
Madeira	-	1500	71	0,9	-
Sisal	10 a 50	1500	-	0,8	3,0

### 3.2 Fibras de Aço

A fibra de aço é um produto caracterizado geometricamente por uma das dimensões (comprimento) que prevalece sobre as outras (diâmetro), podendo apresentar superfície lisa ou corrugada, formas retilíneas ou com ancoragem nas extremidades. Seu uso como reforço no concreto considera a dispersão homogênea das fibras na massa do concreto, sem alterar as características geométricas da mesma (UNI 11037).



As fibras de aço possuem elevada resistência mecânica à tração; a distribuição homogênea de fibras curtas dentro do concreto é eficaz para combater o fenômeno da fissuração, além de conferir considerável ductilidade à medida em que se elevam a quantidade e resistência das mesmas. Em tais circunstâncias, proporciona-se grande tenacidade ao concreto (SARZALEJO *et al.*, 2009).

Fibras de aço estão disponíveis em comprimentos entre 6 e 80 mm e com uma área de seção transversal entre 0,1 e 1,5 mm<sup>2</sup>, correspondendo a um diâmetro equivalente entre 0,15 e 1,2 mm. A resistência à tração é normalmente em uma faixa entre 300 e 2400 MPa e com um peso específico de aproximadamente 7800 kg/m<sup>3</sup>. As fibras são geralmente frisadas ou deformadas com um gancho em cada ponta ou com uma cabeça pequena, a fim de melhorar a ligação entre fibra e matriz de concreto (MAIDL, 1995; SARZALEJO *et al.*, 2009; BAKAERT, 2011). Axialmente, a forma pode ser retilínea ou corrugada e, transversalmente, a fibra pode apresentar seção circular, retangular ou variada. Nas figuras 2.11 e 2.12 são apresentada fibras de diferentes formas.

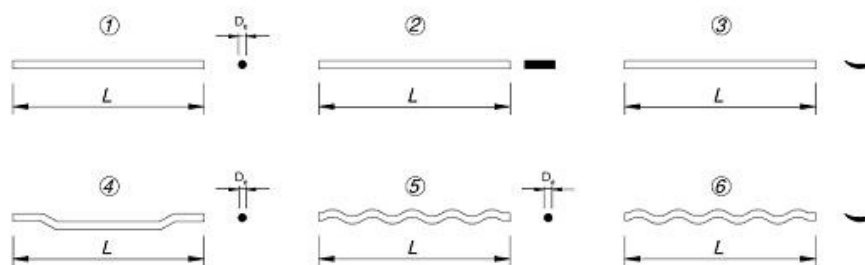
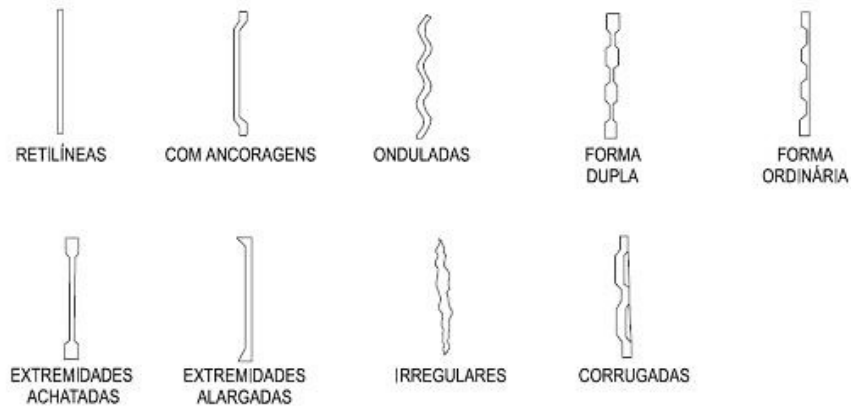
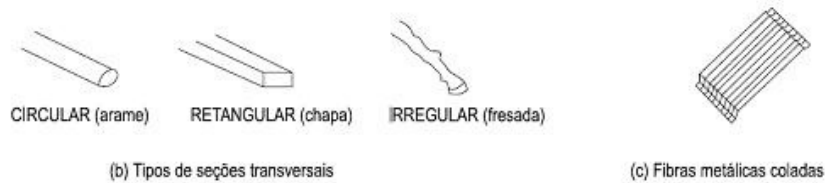


Figura 3.1 - Exemplos de diferentes formas de fibras metálicas (SARZALEJO *et al.*, 2009)



(a) Várias formas de fibras metálicas



(b) Tipos de seções transversais

(c) Fibras metálicas coladas

Figura 3.2 - Exemplos de diferentes formas de fibras metálicas (SARZALEJO *et al.*, 2009)

HOLSCHEMACHER *et al.* (2010) apresentaram diferentes tipos de fibras curtas de aço, conforme Figura 3.3.



Figura 3.3 - Diferentes tipos de fibras curtas de aço (HOLSCHEMACHER *et al.*, 2010)



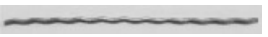
No que refere-se à geometria das fibras (ou seja a forma, dimensões longitudinais e transversais), a relação comprimento ( $L$ ) / diâmetro equivalente ( $D$ ) (denominado fator de forma ou relação de esbeltez ou relação de aspecto),

é considerada o elemento mais importante, pois do seu valor, dependem a ductilidade e a tenacidade do concreto reforçado com fibras (SARZALEJO *et al.*, 2009)

Para facilitar seu manuseio e mistura, as fibras de aço podem ser coladas uma nas outras com colas solúveis em água, formando feixes de 10 a 30 fibras (LOBÃO, 2005).

HOLSCHEMACHER *et al.* (2010) apresentaram na Tabela 3.2 uma visão geral dos vários tipos de fibras curtas de aço que os mesmos investigaram.

Tabela 3.2 - Visão geral dos vários tipos de fibras curtas de aço investigadas (HOLSCHEMACHER *et al.*, 2010)

Descrição	Fibra Tipo F1	Fibra Tipo F2	Fibra Tipo F3
Imagem			
Geometria			
Forma	Reta	Reta	Ondulada
Superfície	Plana	Plana	Plana
Seção transversal	Circular	Circular	Circular
Ancoragem	Extremidades em forma de gancho	Extremidades em forma de gancho	Continua
Parâmetros			
Comprimento $l_f$ (mm)	50	50	50
Diâmetro $d_f$ (mm)	1	1	1
Resistência à tração $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	1100	1900	1100
Resistência média à tração $f_t^1$ (N/mm <sup>2</sup> )	1222	1762	925

<sup>1</sup> Resistência à tração da fibra determinada experimentalmente (média de 10 fibras)

### **3.3 Desempenho de concretos reforçados com fibras curtas de aço**

Em função das aplicações usuais dos concretos reforçados com fibras curtas de aço, o desempenho desses compostos no estado endurecido são comumente avaliados pelos ensaios de resistência à compressão, à tração, à flexão, de fadiga e de impacto. As propriedades no estado fresco são avaliadas por ensaios de retração. A durabilidade é avaliada de forma indireta através de ensaios mecânicos.

#### **3.3.1 Resistência à compressão**

Segundo LOBÃO (2005), o objetivo da adição de fibras ao concreto não é alterar a resistência à compressão do mesmo, na maioria das vezes a resistência à compressão não é muito alterada com a adição de fibras, podendo haver casos em que há um decréscimo no valor da resistência. Na Figura 3.4 pode-se observar a influência do teor de fibras nas curvas tensão x deformação de compósito cimentício com fibras de aço. Nestas curvas, nota-se um aumento significativo na deformação no pico da tensão de compressão, e menor declive da parte descendente da curva que nos corpos-de-prova sem fibras, ou seja, uma maior capacidade de absorver energia.

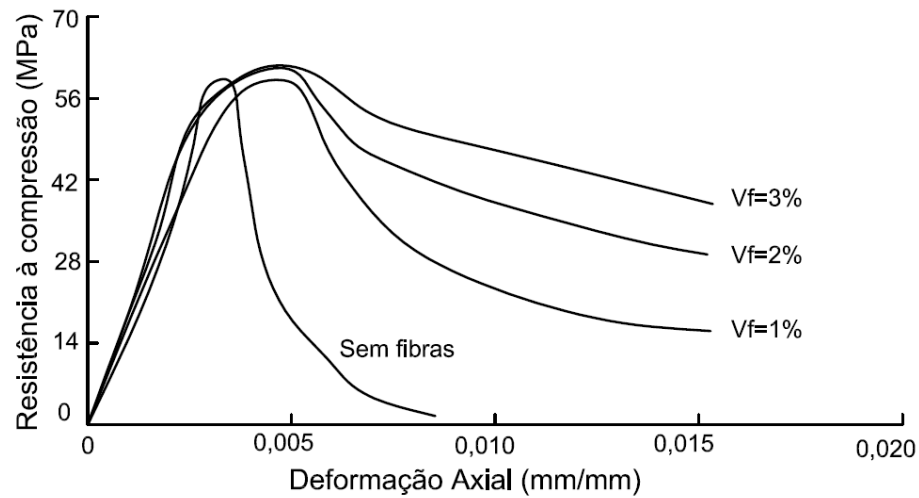


Figura 3.4 - Influência no teor de fibras na curva tensão x deformação na compressão (ACI 544.4R-88, 2004).

### 3.3.2 Resistência à tração

A adição de fibras em matrizes à base de cimento produz uma melhora significativa de sua resistência à tração, que depende principalmente do volume de fibras utilizado (LOBÃO, 2005). A curva de resistência à tração direta depende do tamanho do corpo-de-prova, método de ensaio, rigidez da máquina de ensaio, comprimento do corpo-de-prova, e se uma única ou múltiplas fissuras ocorrem no corpo-de-prova (ACI 544.4R-88, 2004). Na Figura 3.5, podem-se observar curvas tensão x deformação de compósitos cimentícios com fibras de aço com diferentes formas.

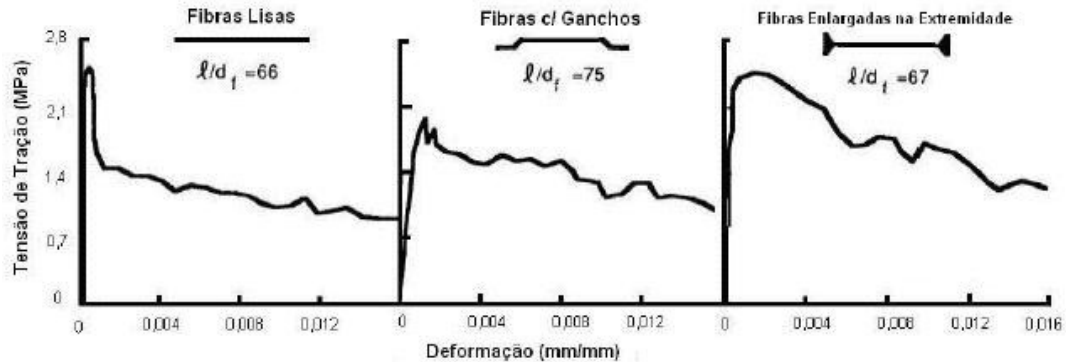


Figura 3.5 - Curvas tensão x deformação de compósitos cimentícios com fibras (ACI 544.4R-86, 2004).

Além do tipo e teor das fibras, existem outros parâmetros que influem na resistência à tração do compósito, como o arranjo das fibras e o processo de mistura adotado. Fibras alinhadas na direção das tensões de tração produzem maiores incrementos na resistência à tração direta. Um volume de 5% de fibras lisas e retas de aço orientadas na direção da tração pode acarretar um aumento nessa resistência de até 133%. Quando as fibras são colocadas aleatoriamente, este aumento chega ao máximo a 60% (BENTUR e MINDESS, 1990).

### 3.3.3 Resistência à flexão

De acordo com BENTUR e MINDESS (1990), a influência da adição de fibras de aço em concretos e argamassas na resistência à flexão é muito maior que nas resistências à tração direta e à compressão. Geralmente são considerados dois valores de resistência à tração na flexão, a relativa à carga de fissuração (ponto A na Figura 3.6) e a relativa à carga máxima alcançada (ponto C na Figura 3.6) (ACI 544.4R-88, 2004).

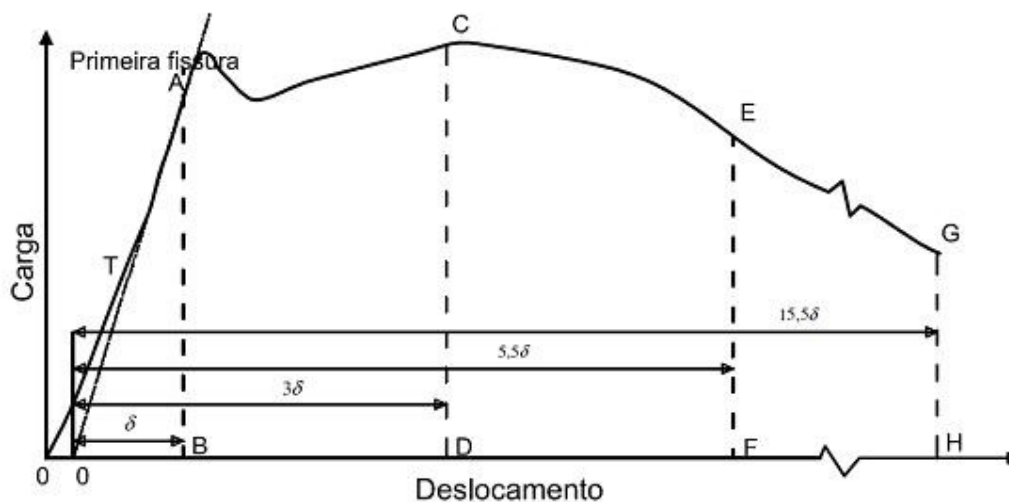


Figura 3.6 - Características da curva carga x deslocamento (ASTM C 1018; ACI544.4R-88, 2004).

A tenacidade é a medida da energia requerida para provocar a completa ruptura de um material (MOGUEL, 1999). A diferença entre tenacidade e resistência é de grande importância, pois dois materiais podem ter resistências idênticas, porém diferentes valores de tenacidade. Entretanto, normalmente, quando a resistência de um material cresce, a ductilidade (quantidade de deformação permanente que pode ocorrer antes do rompimento) e a tenacidade diminuem. Normalmente, materiais com alta resistência rompem de forma brusca, na maioria das vezes, sem que ocorra uma deformação não elástica ou permanente significativa (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Normalmente a tenacidade à flexão é definida como a área abaixo da curva carga de flexão medida no ensaio de flexão. Estas curvas podem variar muito de acordo com o volume e as características das fibras. Aquelas com melhores características de ancoragem, como por exemplo as fibras com ancoragem mecânica ou com fatores de forma altos, fornecem maiores valores de tenacidade do que fibras lisas e retas, com a mesma concentração de volume. Melhorar a tenacidade à flexão de uma peça também significa melhorar o desempenho do material à fadiga e impacto (BENTUR e MINDESS, 1990).

SOULIOTI *et al* (2009) apresentou na Figura 3.7 resultados de carga versus flecha obtidos no ensaio de flexão de concretos reforçados com fibras curtas de aço. A fibra utilizada apresentava-se nas dimensões de 0,75mm de diâmetro e 25mm de comprimento e foram utilizados os percentuais 0,5%, 1,0% e 1,5%. Os resultados de carga apresentados foram maiores para os percentuais maiores.

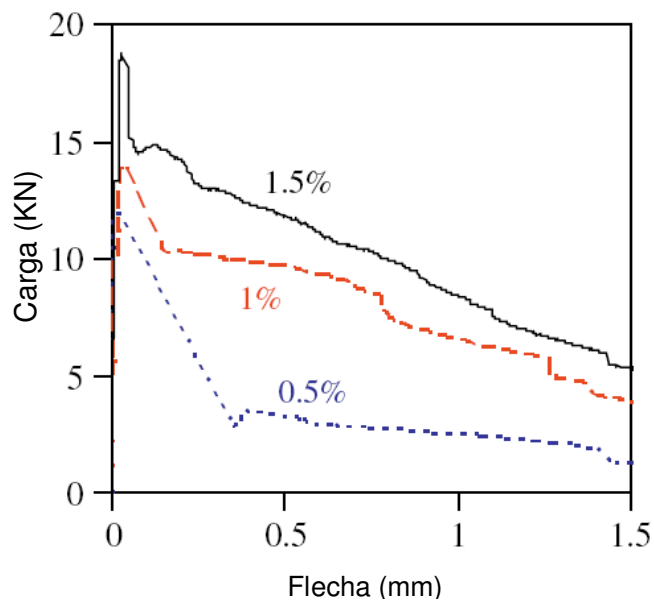


Figura 3.7 - Curvas de carga versus flecha para concretos com diferentes percentuais de fibras

Na Figura 3.8 são apresentados resultados de carga versus flecha para três tipos de fibras curtas de aço e quatro quantidades de fibras por metro cúbico de concretos (0, 20, 40 e 60 kg/m<sup>3</sup>) (HOLSCHMACHER *et al.*, 2010).



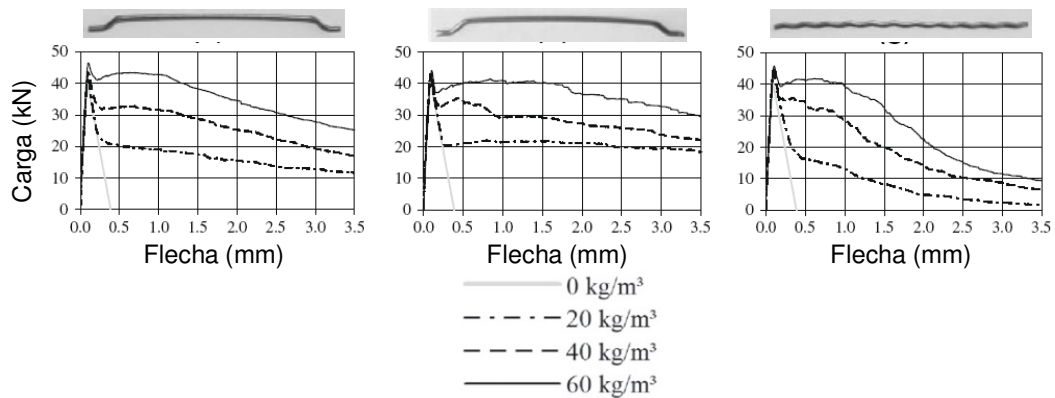


Figura 3.8- Média das cargas e flechas para concretos com diferentes tipos de fibras (HOLSCHMACHER *et al.*, 2010)

### 3.3.4 Módulo de elasticidade

Quanto ao módulo de elasticidade não foram encontrados trabalhos sobre concretos reforçados com fibras curtas de aço, mas referente ao material concreto existe uma vasta bibliografia.

Para NEVILLE (1997) não há dúvida de que o módulo de elasticidade aumenta com a resistência do concreto, mas não existe um acordo sobre a forma exata desta dependência. Segundo ele, isto não surpreende, pois o módulo de elasticidade do concreto depende do módulo de elasticidade do agregado do concreto. E que, o crescimento do módulo de elasticidade do concreto é progressivamente menor do que o crescimento da resistência à compressão.

A ABNT (2004) diz que quando não forem feitos ensaios e não existirem dados mais precisos sobre o concreto usado na idade de 28 dias, pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade usando a equação 4.1.

$$E_{ci} = 5600 f_{ck}^{1/2} \quad (3.1)$$

onde,  $E_{ci}$  é o módulo de deformação tangente inicial e  $f_{ck}$  é a resistência característica à compressão do concreto e ambos são dados em megapascal

(MPa). Sendo que  $f_{ck}$  pode ser substituído pelo  $f_{ckj}$ , que é a resistência à compressão do concreto em uma dada idade.

A ABNT (2004) prevê que nas análises elásticas de projeto deve ser utilizado o módulo de elasticidade secante, este pode ser calculado pela equação 4.2.

$$E_{cs} = 0,85E_{ci} \quad (3.2)$$

Segundo o American Concrete Institute - ACI (2005), para uma densidade do concreto entre 1500 e 2500 kg/m<sup>3</sup>, o módulo de elasticidade pode ser previsto por:

$$E_c = w_c^{1,5} \cdot 0,043 f_c^{1/2} \quad (3.3)$$

onde,  $E_c$  é o módulo de elasticidade estático (MPa),  $w_c$  é a densidade (kg/m<sup>3</sup>) e  $f_c$  é a resistência à compressão aos 28 dias (MPa). Para concretos de densidade normal a ACI (2005) considera a previsão do módulo de elasticidade pela equação 4.4.

$$E_{ci} = 4700 f_{ck}^{1/2} \quad (3.4)$$

onde  $f_{ck}$  é a resistência à compressão e  $E_c$  é o módulo de elasticidade, ambos em MPa. O CEB-FIP (1993) estima o módulo de elasticidade de concretos de densidade normal pela equação 4.5.

$$E_c = 2,15 \cdot 10^4 (f_{cm} / 10)^{1/3} \quad (3.5)$$

onde  $E_c$  é o módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias (MPa), e  $f_{cm}$  é a resistência à compressão média aos 28 dias (MPa). Para concretos com resistência até 83 MPa, o ACI (1992) estabelece:

$$E_c = 3320(f_c)^{1/2} + 6900 \quad (3.6)$$

onde  $f_c$  é expresso em MPa e  $E_c$  em MPa.

Entre 80 MPa e 140MPa, KAKIZAKI [13] encontrou a expressão aproximada seguinte relacionando o módulo de elasticidade  $E_c$  e a resistência à compressão  $f_c$ :

$$E_c = 3650(f_c)^{1/2} \quad (3.7)$$

Se tratando da comparação do módulo de elasticidade estático e dinâmico, METHA e MONTEIRO (2001) afirmam que o “módulo dinâmico de deformação”, correspondente a uma deformação instantânea muito pequena, é dado, aproximadamente, pelo módulo tangente inicial, geralmente 20, 30 e 40% maior que o módulo estático de deformação para concretos de alta, média e baixa resistência, respectivamente.

SWAMY e RIGHY (1971), citam que, para valores baixos e médios, o módulo dinâmico é cerca de 7GPa maior que o estático, enquanto que, para valores mais altos, os dois módulos tendem a um mesmo valor. Isso para ensaios de ressonância, e não por de velocidade de propagação.

Para o BSI (1972), concretos com teor de cimento menor que 500kg/m<sup>3</sup> ou concretos com agregados de peso normal o módulo estático  $E_c$  é:

$$E_c = 1,25E_d - 19 \text{ (em GPa)} \quad (3.8)$$

Para concretos com teor de cimento maior que 500kg/m<sup>3</sup> ou concretos com agregados leves:

$$E_c = 1,04E_d - 4,1 \text{ (em GPa)} \quad (3.9)$$

Para LYNDON e BALENDRAN [17]:

$$E_c = 0,83E_d \quad (3.10)$$

Outros pesquisadores tentaram estabelecer uma correlação entre o módulo dinâmico e a resistência do concreto, porém ainda não existe uma relação generalizada, e sim, expressões que dependem do tipo de concreto empregado (ALMEIDA, 2005). Pelo BSI (1972), a relação entre o módulo dinâmico ( $E_d$ ) e a resistência à compressão ( $f_{ck}$ ) é dada por:

$$E_d = 7600f_{ck}^{0,33} + 14000 \quad (3.11)$$

Onde  $E_d$  em MPa e  $f_{ck}$  em MPa.

### 3.3.5 Resistência ao impacto e a fadiga

A adição de fibras aumenta o número de ciclos até ocorrer a fissuração e a fratura, com significativa tensão pós-fissuração, principalmente nos concretos com fibras deformadas (FIGUEIREDO, 2000)

Concretos reforçados com fibras de aço se comportam melhor do que os concretos comuns quando submetidos a carregamentos de impacto, tanto em termos de resistência, quanto em energia de fratura, sendo as fibras com ganchos nas pontas mais efetivas que as fibras lisas. O papel das fibras é essencialmente o controle de fissuras através da ponte de ligação que faz entre as partes não fissuradas da matriz (LOPES, 2005).

### 3.3.6 Durabilidade

De acordo com TANESI e FIGUEIREDO (2000), a durabilidade dos concretos com fibras depende da durabilidade das fibras no meio onde foram dispersas,

da durabilidade do próprio compósito e dos agentes agressivos externos. Se bem compactados e curados, concretos com fibras de aço apresentam excelente durabilidade, enquanto as fibras permanecerem protegidas pela pasta. Na maioria das condições ambientais, especialmente aquelas com cloretos, é inevitável alguma corrosão nas fibras mais superficiais; contudo, as fibras no interior do concreto normalmente permanecem sem corrosão, que pode ser evitada se forem utilizadas fibras de aço inoxidável ou fibras resistentes à corrosão.

### **3.3.7 Trabalhabilidade**

Segundo o manual ACI (ACI, 2010), trabalhabilidade é a capacidade de uma mistura de concreto fresco preencher a forma ou molde com o trabalho desejado (vibração) corretamente e sem reduzir a qualidade do concreto. A muitos anos é sabido que para regular trabalhabilidade do concreto é necessário controlar o teor de água, a forma, tamanho e distribuição do agregado, quantidade e nível de hidratação do cimento, assim como adição de aditivos químicos, como superplastificantes (ANGLES, 1974).

SHAFIGH *et al.* (2011) avaliou a trabalhabilidade de concretos leves no estado fresco com adição de fibras vegetais e de aço e verificou que a trabalhabilidade diminuiu com o aumento na fração de volume da fibra de aço. A quantidade de água e de superplastificante foram mantidos constantes em todas as misturas, portanto, maior teor de fibra de volume gerou uma maior área de superfície. Conseqüentemente, o abatimento (Slump) do concreto fresco reduziu. A adição de fibras nos percentuais de 0% a 0,25%, 0,5%, 0,75% e 1% gerou reduções de 19,5%, 41%, 60% e 82,5% no abatimento, respectivamente. A Figura 3.9 mostra que existe uma relação linear entre o volume de fibra e queda para concreto leves.

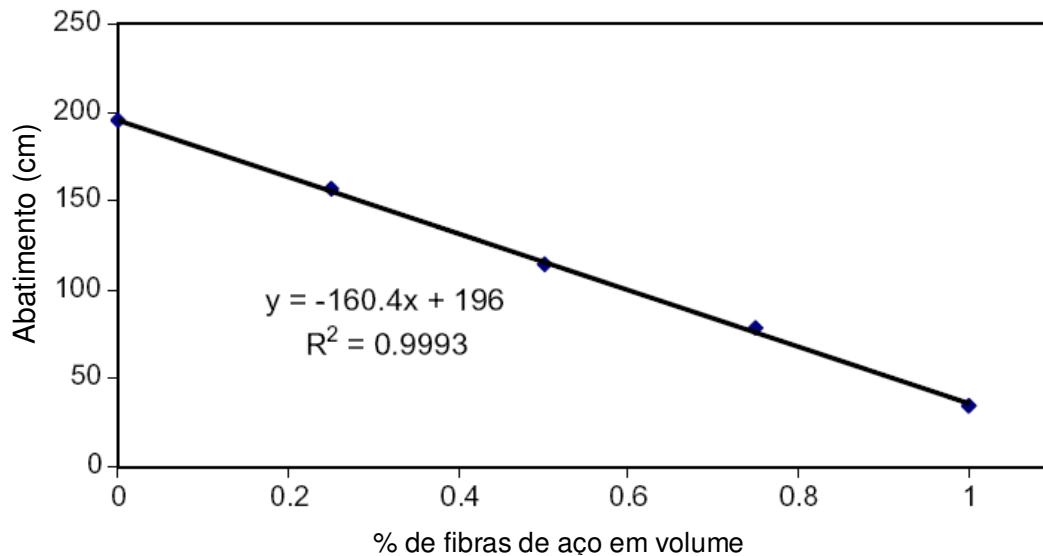


Figura 3.9 - Relação entre o volume de fibras de aço e o abatimento em concretos leves (SHAFIGH *et al.*, 2011)

### 3.3.8 Retração e fluência

A retração é pouco afetada pela adição de fibras e os fatores que a influenciam são os mesmos que afetam o concreto convencional, ou seja, temperatura, umidade relativa, propriedades do material, duração da cura e dimensão da estrutura (LOBÃO, 2005). Porém, um estudo realizado por MANGAT e AZARI (1988) verificou que a retração por secagem pode ser reduzida em até 40% se forem utilizadas fibras de aço deformadas, mas não é suficiente para indicar a eficiência na redução dos problemas de retração. A retração e a fluência, por serem fenômenos associados ao movimento de fluidos dentro do concreto, são pouco influenciadas pelas fibras quando o concreto permanece não fissurado. A principal vantagem da adição de fibras é o retardamento da fissuração, a distribuição e a redução da abertura das fissuras causadas pela retração (LOBÃO, 2005).

### **3.4 Interação Matriz-fibra**

O comportamento diferenciado do concreto com fibras curtas de aço se deve à interação da matriz cimentícia com as fibras. A compreensão dos mecanismos que regem essa interação poderia servir de base para o desenvolvimento de compósitos mais eficientes, através de alterações no formato da fibra ou no tratamento de sua superfície (HOLANDA, 2002).

No caso do concreto simples, uma fissura irá representar uma barreira à propagação de tensões, como mostrado na Figura 3.10. Isso implica numa concentração de tensões na extremidade da fissura e, no caso desta tensão superar a resistência da matriz, teremos a ruptura do material. Quando se adicionam fibras ao concreto, este deixa de ter o caráter frágil. Isto ocorre pelo fato da fibra servir como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, minimizando a concentração de tensões nas extremidades das mesmas. Há assim uma redução da velocidade de propagação das fissuras no concreto, que passa a ter um comportamento pseudo-dúctil (FIGUEIREDO, 2000).

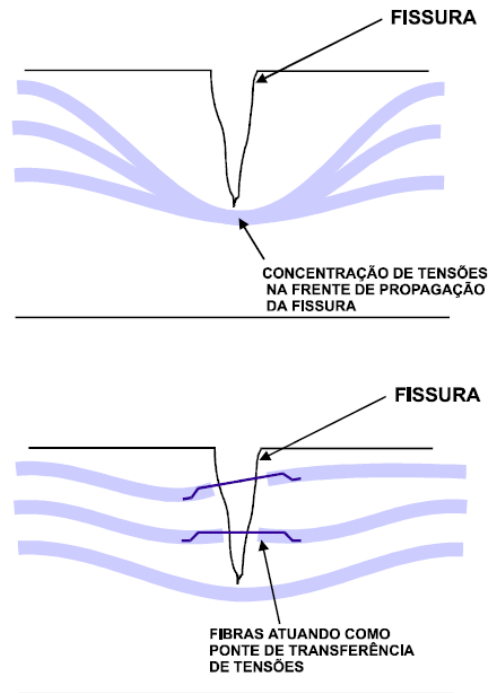


Figura 3.10 - Mecanismo de controle da propagação das fissuras (NUNES, TANESI e FIGUEIREDO, 1997).

A transferência de tensão ocorre antes e após a fissuração do compósito. Antes da fissuração, a transferência de tensão por aderência é o mecanismo dominante. Os deslocamentos longitudinais da fibra e da matriz na interface são geometricamente compatíveis. A tensão de aderência desenvolvida na interface é necessária para distribuir o carregamento externo entre as fibras e a matriz, já que possuem diferentes módulos de elasticidade. Desta forma, os dois componentes apresentarão a mesma deformação na interface, conforme representado na Figura 3.11 (HOLANDA, 2002).



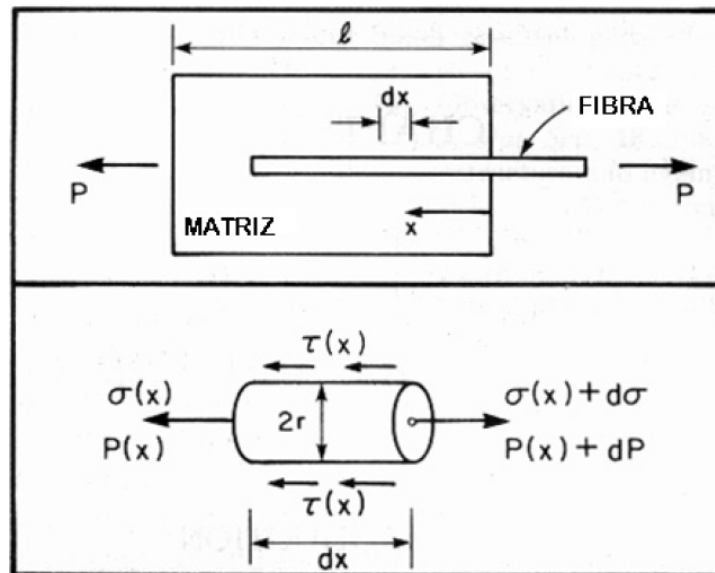


Figura 3.11 - Representação do arrancamento da fibra da matriz (BENTUR e MINDESS, 1990)

Segundo BALAGURU e SHAH (1992), quando uma força de tração é aplicada à matriz, parte dela é transferida para as superfícies das fibras. Devido à diferença de rigidez entre as fibras e a matriz, aparecem tensões tangenciais ao longo da superfície da fibra, as quais auxiliam nas transferências ao longo da interface fibra-matriz não uniforme.

A transição da transferência de tensão por aderência para transferência de tensão por atrito ocorre quando as tensões tangenciais na interface, devidas ao carregamento, excedem a resistência de aderência entre a fibra e a matriz ( $\tau_{au}$ ). Quando esta tensão é superada, inicia-se o desligamento da fibra da matriz e o aparecimento de tensões de atrito na interface da zona de desligamento. A resistência da interface ao atrito denomina-se  $\tau_{fu}$ , representada na Figura 3.12 (HOLANDA, 2002).

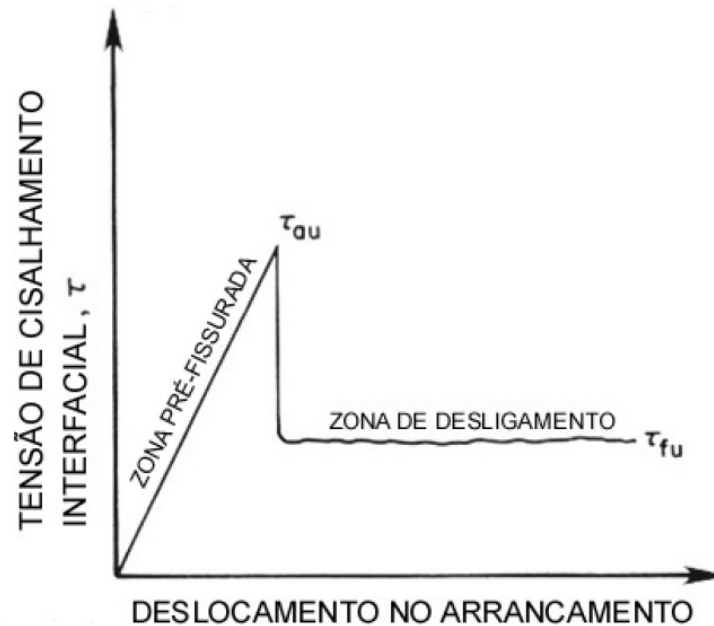


Figura 3.12 - Representação das tensões de cisalhamento na interface (BENTUR e MINDESS, 1990)

Após a fissuração, o mecanismo dominante de transferência de tensão da matriz para as fibras é o atrito. Neste caso, ocorrem deslocamentos relativos entre a fibra e a matriz. A tensão de atrito desenvolvida é uma tensão tangencial, considerada como sendo uniforme distribuída ao longo da fibra-matriz (HOLANDA, 2002).

Além das tensões tangenciais que ocorrem paralelas à interface fibra-matriz, também devem ser consideradas as tensões normais que surgem na interface, resultantes de alterações de volume, de carregamentos biaxiais e triaxiais, e do efeito de Poisson. A deformação da fibra à tração, na região onde ela entra na matriz, na vizinhança da fissura, é muito maior que a deformação da matriz. Isto resulta em uma contração lateral na fibra, devida ao coeficiente de Poisson, que é maior que a da matriz, gerando tensões normais de tração na interface, conforme Figura 3.13 (HOLANDA, 2002).

As tensões normais podem causar um enfraquecimento da interface e um desligamento prematuro das fibras, podendo reduzir ou eliminar a resistência ao atrito.

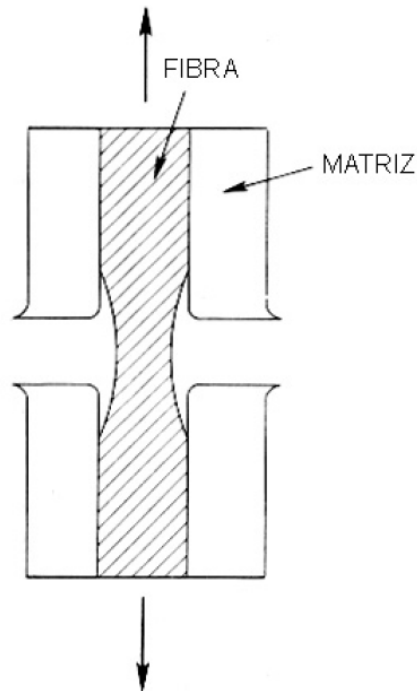


Figura 3.13 - Representação da fibra e da matriz na vizinhança da fissura (BENTUR e MINDESS, 1990)

Na consideração de efeito de Poisson é importante observar a natureza da fibra: se ela sofre deformação plástica e escoamento antes da ruptura. Quando o comprimento da fibra embutido na matriz excede o comprimento ( $l_c$ ), ocorre a ruptura da fibra. Se, no entanto, a fibra é dúctil o suficiente, ela irá suportar o arrancamento da matriz, mesmo sendo grande o comprimento embutido.

O comprimento crítico é definido por BENTUR e MINDESS (1990), como sendo o menor comprimento necessário para o desenvolvimento de tensões de tração iguais à sua resistência. Quando o comprimento da fibra embutido na matriz ( $l$ ) é menor do que o crítico ( $l_c$ ), ele não é suficiente para gerar tensão de escoamento ou de ruptura nas fibras, e elas não são utilizadas de forma

eficiente. Para fibras retas e lisas, ele pode ser definido conforme a Equação 2.1.

$$\ell_c = \frac{\sigma_{fu} D}{2\tau_{fu}} \quad (3.12)$$

onde:

$\sigma_{fu}$  → resistência última da fibra à tração;

$\tau_{fu}$  → resistência média de aderência na interface fibra-matriz;

$D$  → diâmetro da seção transversal da fibra.

De acordo com BALAGURU e SHAH (1992), o comprimento crítico é o comprimento embutido que fornece a maior resistência ao arrancamento, sem ocasionar a ruptura da fibra. Quando  $\ell \ll \ell_c$ , as fibras são tão curtas que são arrancadas antes que seja desenvolvida uma tensão suficiente para rompê-las. Quando  $\ell \gg \ell_c$ , o comprimento da fibra embutido na matriz é suficiente para desenvolver uma tensão de tração na fibra igual à sua resistência, e a ruptura do compósito será predominante por ruptura da fibra. A alteração do modo de ruptura de arrancamento para ruptura da fibra resulta na redução da energia envolvida na ruptura do compósito, uma vez que a energia consumida na ruptura da fibra é bem menor que a consumida no seu arrancamento (HOLANDA, 2002).

A máxima tenacidade do compósito é obtida quando  $\ell = \ell_c$ . Quando o comprimento aumenta, mais fibras se rompem antes de serem arrancadas, e a energia consumida na ruptura do compósito é reduzida. No entanto, o aumento do comprimento é acompanhado por aumento da resistência das fibras e, conseqüentemente, da resistência do compósito. Portanto, para  $\ell > \ell_c$ , há uma contradição entre os requisitos de resistência e de tenacidade do elemento.

Um modelo analítico para a transferência de tensão deveria levar em consideração todos os fatores: transferência elástica de tensões, atrito, desligamento fibra-matriz e tensões normais. Além de ser complexo, não poderia ser generalizado para todas as fibras. Embora tenham sido desenvolvidos modelos analíticos para fibras lisas, na prática são usadas fibras com outros formatos (HOLANDA, 2002).

A forma das fibras irá influenciar significativamente na resistência a tração das mesmas, as fibras de forma irregular irão proporcionar condições de ancoragem e atrito entre o concreto e fibra melhor que as fibras lisas.

Obviamente, as características mecânicas das fibras, especialmente sua resistência à tração, possuem um papel fundamental no comportamento do concreto reforçado com fibras de aço, pois, ao não ocorrer o arrancamento da fibra (pull out) (Figura 3.14), impedido pela aderência imposta entre a interface fibra e o concreto, pode ocorrer a ruptura da fibra devido a sua insuficiente resistência à tração (Figura 3.15).

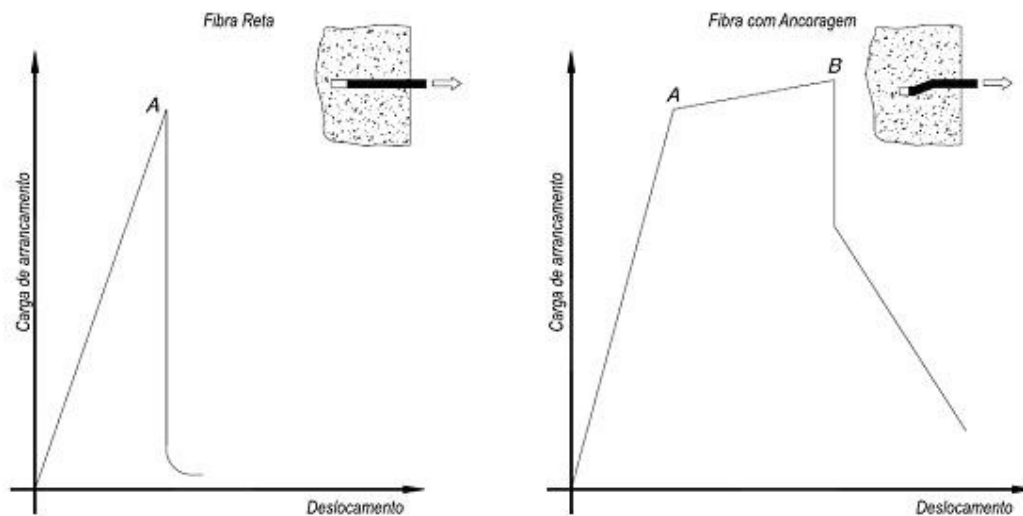


Figura 3.14 - Exemplo da variação da eficiência entre a interface fibra e o concreto com a forma da fibra (SARZALEJO *et al.*, 2009).

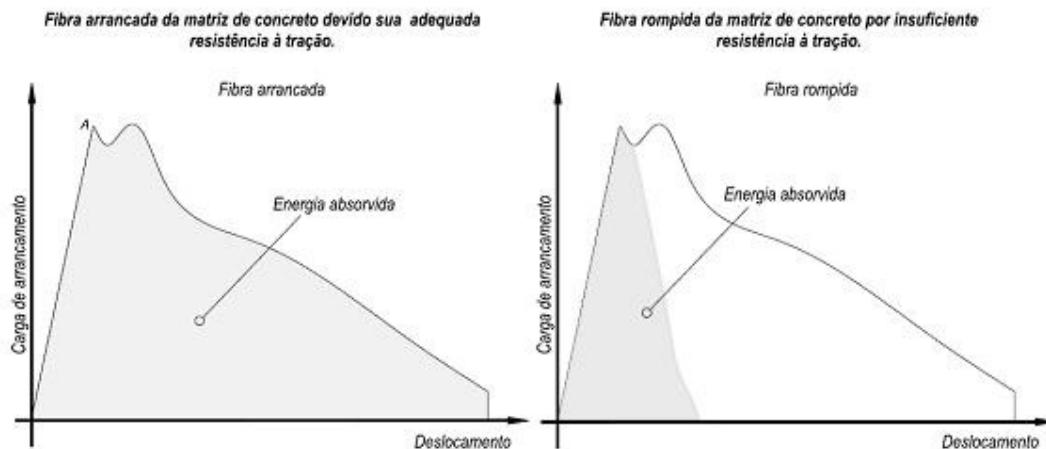


Figura 3.15 - A importância da resistência à tração da fibra (SARZALEJO *et al.*, 2009).

Segundo SARZALEJO *et al.* (2009), a dosagem, ou seja, a quantidade de fibras presentes no concreto ( $\text{kg/m}^3$ , ou  $\%V_f$ ), certamente incide de forma notável juntamente com as já comentadas características geométricas e mecânicas, sobre o grau de ductilidade e tenacidade que adquire o concreto reforçado com fibras. Na Figura 3.16 é apresentado um gráfico do incremento da ductilidade do concreto em função da dosagem de fibras e é possível perceber que há um aumento da ductilidade com o aumento das fibras por metro cúbico de concreto.

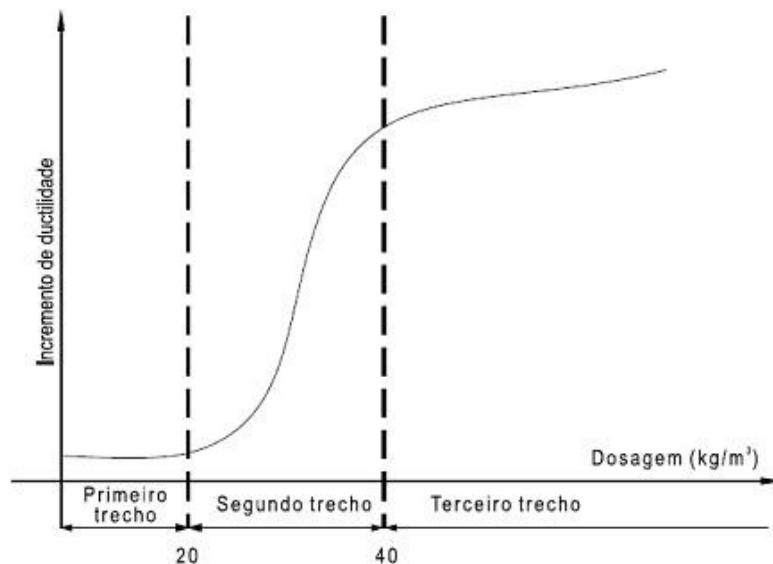


Figura 3.16 - Ductibilidade x Dosagem (SARZALEJO *et al.*, 2009)

É interessante observar que com o incremento do fator de forma ( $L/D$ ) diminui-se, dentro de certos limites, a quantidade de fibras (dosagem) necessária para alcançar um determinado resultado. Tal fato ocorre devido ao incremento na resistência à tração ( $f_s$ ), observado estatisticamente quando são ensaiadas fibras de maior comprimento, conforme pode ser visto na Figura 3.17 (SARZALEJO *et al.*, 2009).

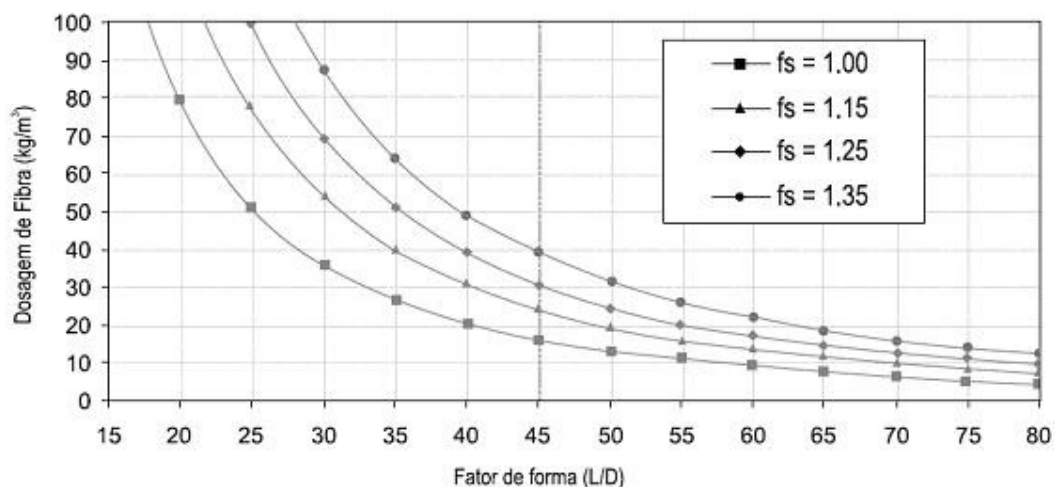


Figura 3.17 - Dosagem X Fator de forma (L/D) (SARZALEJO *et al.*, 2009)

SOULIOTI *et al* (2009) apresentou resultados de carga máxima e resistência à tração obtidos no ensaio de flexão de concretos reforçados com fibras curtas de aço. Os resultados de carga apresentados não foram tão sensíveis ao aumento da adição percentual de fibras e a resistência à tração se apresentou bem sensível ao aumento do percentual de adição de fibras.

Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas para concretos com diferentes percentuais de fibras (SOULIOTI *et al*, 2009)

Adição de fibras (%)	Carga máxima (kN)	Resistência à flexão, $T_{100,2}^a$ (J)
0	14,9	-
0,5	13,2	7,0
1,0	15,8	15,3
1,5	19,9	17,3

Segundo SARZALEJO *et al.* (2009) o comportamento do concreto sob cargas moderadas, inferiores à de ruptura, é sempre elástico e não se produz nenhuma fissuração no corpo-de-prova durante o ensaio de flexão, independentemente da presença ou da qualidade e quantidade de fibras. Porém, comportamentos distintos podem ser verificados continuando o ensaio,



ou seja, aumentando a carga à partir do ponto de carga máxima, denominado “ponto de primeira fissuração”.

Na Figura 3.18, apresentada por SARZALEJO *et al.* (2009), podem ser vistas as curvas I, II, III e IV que representam esse comportamento. Segundo os autores a curva I esquematiza o comportamento de um concreto simples sem reforço: uma vez alcançada a carga de primeira fissuração, há imediato colapso do material, caracterizando o comportamento típico de um material frágil. A curva II mostra a capacidade de um concreto reforçado com fibras para absorver, após o ponto de primeira fissuração, certa carga, ainda que baixa (A-B), para depois colapsar mais lentamente (comportamento suavizado). A curva III é típica de um material dúctil e demonstra um concreto capaz de suportar, a partir do ponto de primeira fissuração, um deslocamento (A-B) sob carga constante, muito antes do colapso que é verificado de uma maneira mais lenta (comportamento plástico). A curva IV finalmente evidencia um concreto reforçado com fibras com certo incremento de carga portante, sob um amplo deslocamento (A-B), após o ponto de primeira fissuração, (comportamento enrijecido).

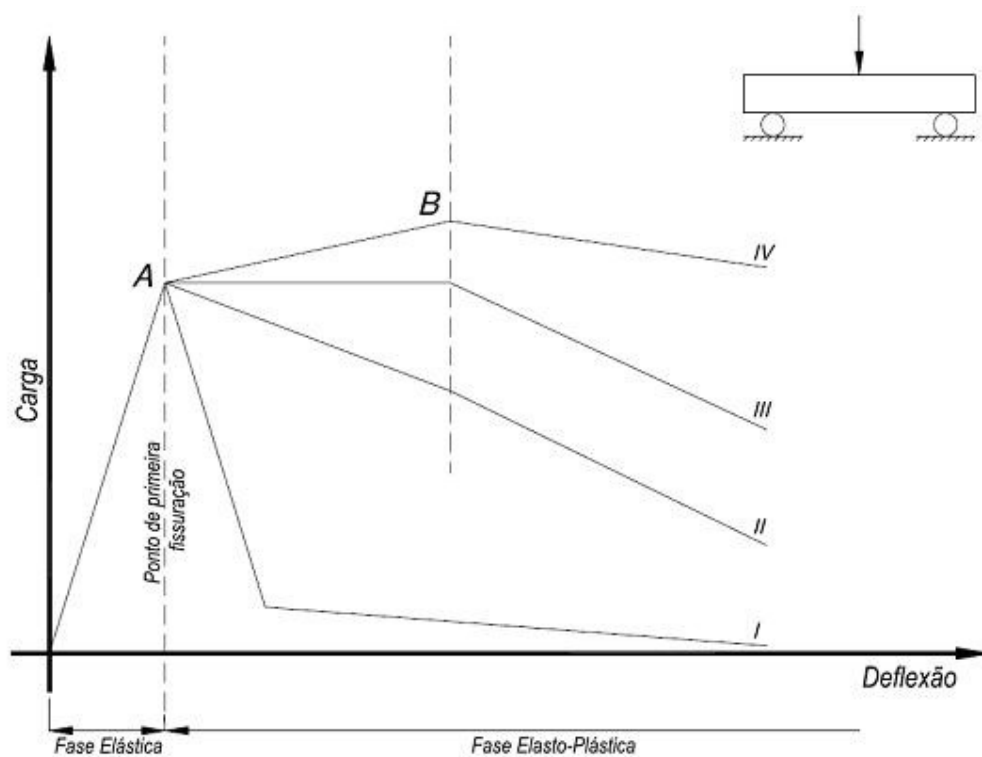


Figura 3.18 - Esquema de um ensaio de flexão (SARZALEJO *et al.*, 2009)

No que se refere à influência da geometria das fibras (ou seja, a forma, dimensões longitudinais e transversais) sobre o comportamento do concreto reforçado com elas, a relação de aspecto, conhecida também como relação de forma ou esbelteza (razão entre o comprimento e o diâmetro da fibra) (Figura 3.19) é considerada o elemento mais importante, pois do seu valor dependem a ductilidade e a tenacidade do concreto reforçado com fibras (SARZALEJO *et al.*, 2009).

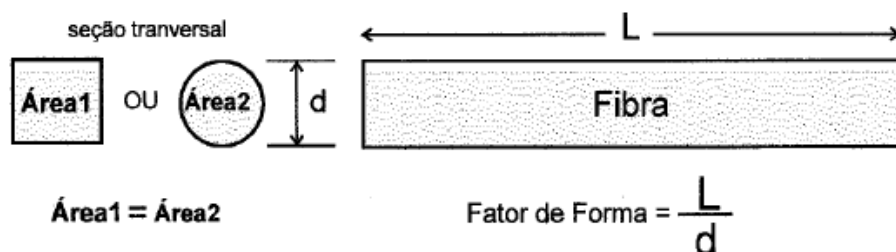


Figura 3.19 - Fator de forma da fibra (NUNES e AGOPYAN, 1998)

A relação de forma tem sido usualmente empregada como fator determinante na escolha de determinada fibra, pois esta relação tem grande influência na condição do concreto ser manuseado em seu estado fresco sem perder sua consistência (trabalhabilidade) (HARTMANN, 1999; VIDAL, 1999; FIGUEIREDO, 2000; BRANDÃO, 2005).

A Figura 3.20 mostra um esquema da energia absorvida pelo concreto em relação ao fator de forma das fibras adicionadas ao mesmo. Observa-se que a fibra com fator de forma igual a 30 absorve somente 80% da energia total absorvida da fibra com fator de forma igual a 100.

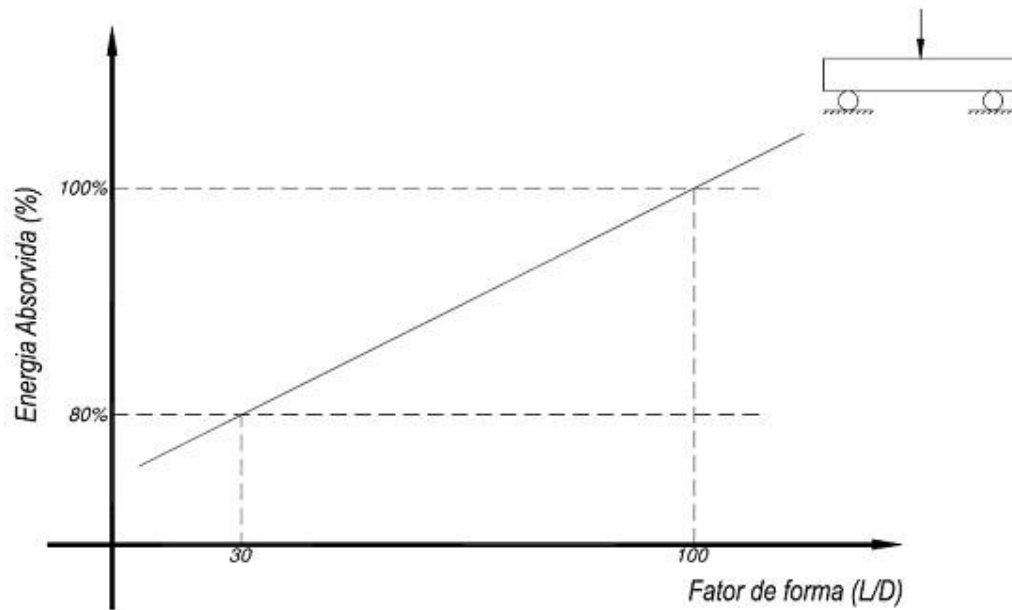


Figura 3.20 - Energia absorvida (%) versus fator de forma (L/D) (SARZALEJO *et al.*, 2009)

Um aspecto importante é o comprimento das fibras em relação a dimensão do agregado graúdo do concreto. O concreto é constituído da pasta cimentícia (cimento + água), agregado miúdo e graúdo. A ligação entre a pasta cimentícia e o agregado é chamada de zona de transição agregado e pasta (ZTA), esta região do concreto é geralmente menos resistente propiciando a propagação de trincas. No caso do comprimento da fibra, este deverá ser compatível com o agregado graúdo, conforme Figura 3.21. Nesta situação, com o tamanho da fibra compatível com a dimensão máxima do agregado graúdo, as fibras funcionam como um tipo de costura evitando a propagação da trinca.

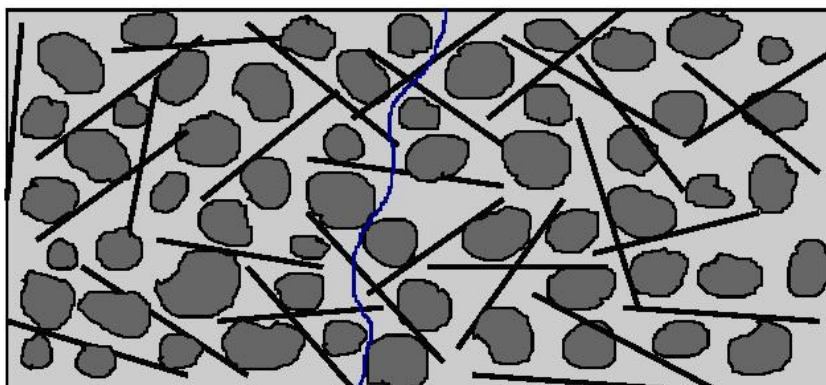


Figura 3.21 - Concreto reforçado com fibras onde há compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo (FIGUEIREDO, 2000).

As trincas crescem preferencialmente na ZTA e quando a fibra é de tamanho igual ou menor que o agregado graúdo, as ZTA's encontram-se com maior facilidade. Na Figura 3.22, as fibras estão com tamanho incompatível em relação à dimensão máxima do agregado graúdo. Pode-se perceber que uma trinca durante o crescimento encontraria menos fibras como obstáculo à propagação.

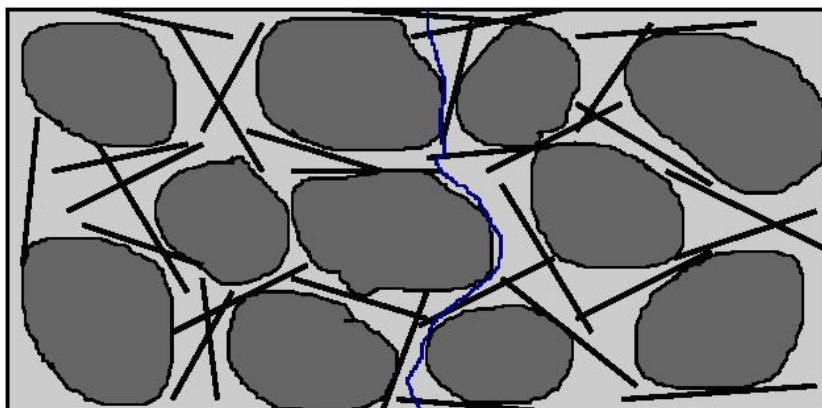


Figura 3.22 - Concreto reforçado com fibras onde não há compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo (FIGUEIREDO, 2000).

SARZALEJO *et al.* (2009) existem recomendações fundamentais para controlar a incorporação das fibras em uma mistura as quais estão diretamente ligadas à adequada seleção geométrica do elemento e que contribuirão para evitar

problemas como segregação e aglomeração, garantindo assim uma distribuição uniforme. O autor indica ainda as regras básicas válidas para qualquer tipo de concreto e aplicação:

- O comprimento da fibra selecionada deverá ser maior que dobro da dimensão máxima dos agregados com tolerância de 20%.

- O comprimento da fibra será definido em função da dimensão mínima do elemento estrutural com tolerância de 20%, sendo que a dimensão mínima do elemento estrutural precisa ser maior pelo menos uma vez e meia do comprimento da fibra.

Outro ponto a ser considerado é o aumento da resistência ao cisalhamento do concreto ocasionado pela adição de fibras de aço. LEE *et al.* (2012) apresentam através de experimentos e modelamento por elementos finitos, o aumento da resistência ao cisalhamento ocasionado pela adição de fibras curtas de aço.

### **3.5 Concretos em temperaturas elevadas**

O concreto é um material que apresenta baixa resistência à tração e a fissuração quando sujeitas a altas tensões locais. Conseqüentemente, o concreto é reforçado para que possa resistir a essas tensões. A utilização de aço, tal como um material de reforço tem uma longa tradição que é tornada possível pela sua resistência à tração e compatibilidade com o concreto (RAFI e NADJAI, 2010)

Segundo KODUR e KHALIQ (2011), concreto geralmente apresenta boas propriedades de resistência ao fogo e, assim, encontra amplas aplicações em edifícios e outras infra-estruturas, onde a segurança contra incêndios é uma

das principais considerações. Durante as últimas três décadas, têm ocorrido diversas pesquisas e desenvolvimento em tecnologia de concreto e isto levou à concretos de alto desempenho (CAD). Estas misturas de CAD, que incluem concreto de alta resistência (CAR), concreto auto-adensável (CAA), concreto reforçado com fibras (CRF) e concreto com cinzas volantes (CCV), oferecem maior resistência, durabilidade e vantagens de custo. Assim, eles encontram uma vasta gama de aplicações. Quando usado em edifícios, estes novos tipos de concretos têm que satisfazer os requisitos de resistência ao fogo. No entanto, estudos recentes tem indicado que alguns destes concretos mais recentes, tais como concreto de alta resistência, não fornecem o mesmo nível de resistência ao fogo como a do concreto convencional (Phan 1996; Kodur *et al.* 2004; Society of Fire Protection Engineers (SFPE), 2008).

Segundo POTHISIRI e PANEDPOJAMAN (2012), em temperaturas elevadas, as propriedades mecânicas do concreto e aço de reforço, bem como o vínculo entre vergalhões de aço e concreto pode deteriorar-se significativamente. As alterações no comportamento de aderência podem influenciar a flexibilidade ou a capacidade de carga das estruturas de concreto armado.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A fase experimental foi dividida em três etapas. A primeira etapa consistiu na caracterização dos materiais utilizados. Na segunda etapa foram confeccionados e ensaiados corpos-de-prova prismáticos de compósitos cimentícios com o objetivo de avaliar as fibras curtas de aço de distintas relações de forma. Na terceira etapa foram confeccionados corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos de concreto reforçados com fibras curtas de aço para realização de ensaios mecânicos antes e após submissão à altas temperaturas.

Na Figura 4.1 é possível observar o fluxograma do trabalho. Primeiramente foi realizada a seleção dos materiais a serem utilizados, em seguida foram caracterizados o cimento, agregados e fibras, os ensaios realizados podem ser vistos no fluxograma. Foi desenvolvido e caracterizado compósito cimentício, e foram moldados os corpos-de-prova prismáticos para verificação da interação da fibra e matriz. Em seguida foi desenvolvido os traços de concreto e os mesmos tiveram a metade dos corpos-de-prova submetidos à temperaturas. Após a submissão à altas temperaturas, ambos corpos-de-prova foram ensaiados.



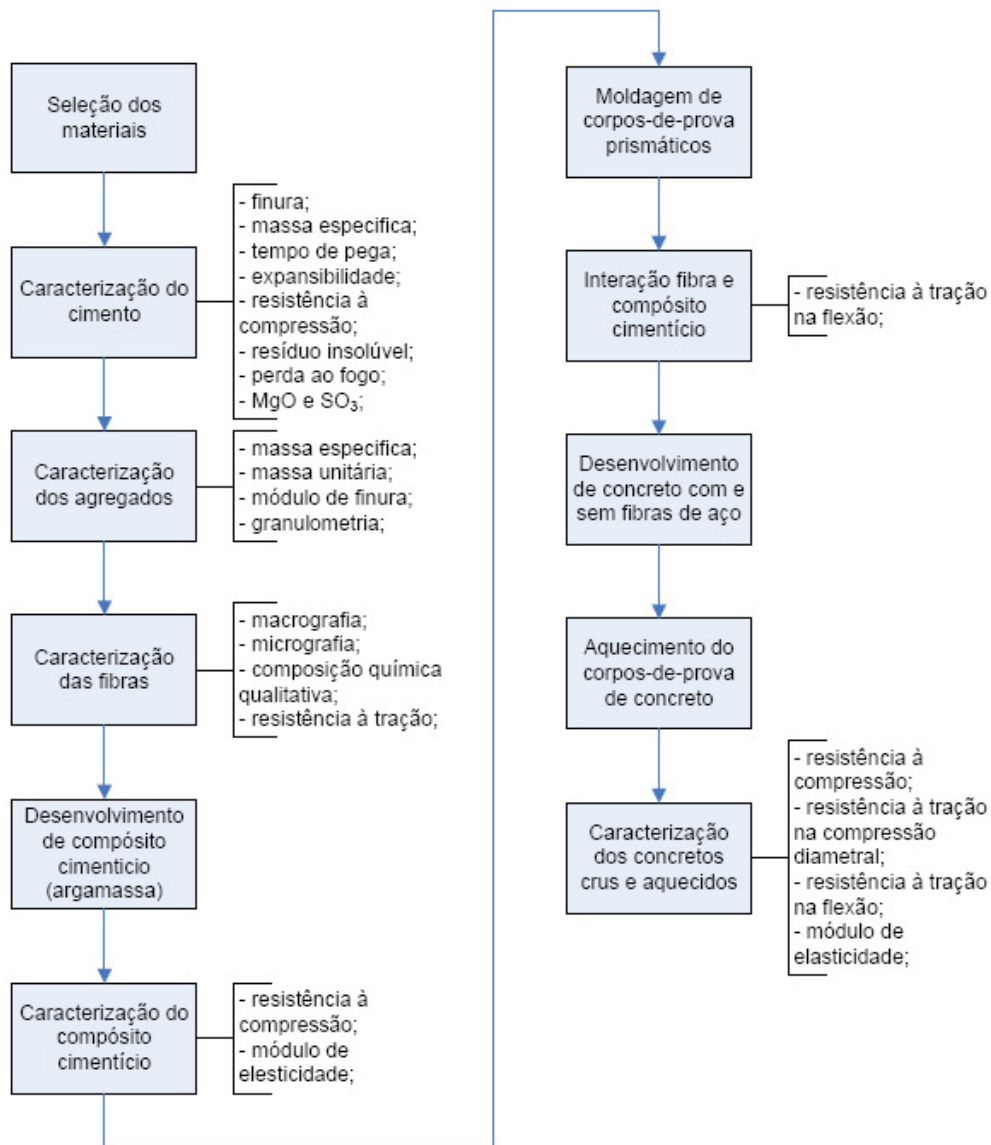


Figura 4.1 - Fluxograma dos experimentos realizados

## 4.1 Materiais

Para o desenvolvimento do trabalho foram escolhidas três fibras curtas de aço, conforme Tabela 4.1, onde são apresentadas algumas características.

Tabela 4.1 - Fibras curtas de aço utilizadas

Denominação	Diâmetro (d) (mm)	Comprimento (l) (mm)	Fator de forma (Relação l/d)	nº de fibras por kg
Wirand® FS3N	0,75	33,00	44	8.738
Wirand® FF3	0,75	50,00	67	5.767
Wirand® FF4	0,75	60,00	80	4.806

As fibras são produzidas com aço baixo teor de carbono trefilado a frio. O aço utilizado é um Fio máquina SAE 1005 (Gerdau 1405 e 1406) que tem sua composição química atendendo a especificação apresentada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Composição química das fibras

Elemento	%C	%Mn	%Si	%P	%S
Especificação	0,06% máx	0,25 a 0,40%	0,10 a 0,30%	0,025% máx	0,025% máx

Na Figura 4.2 é apresentada uma imagem com os três modelos de fibras utilizadas.

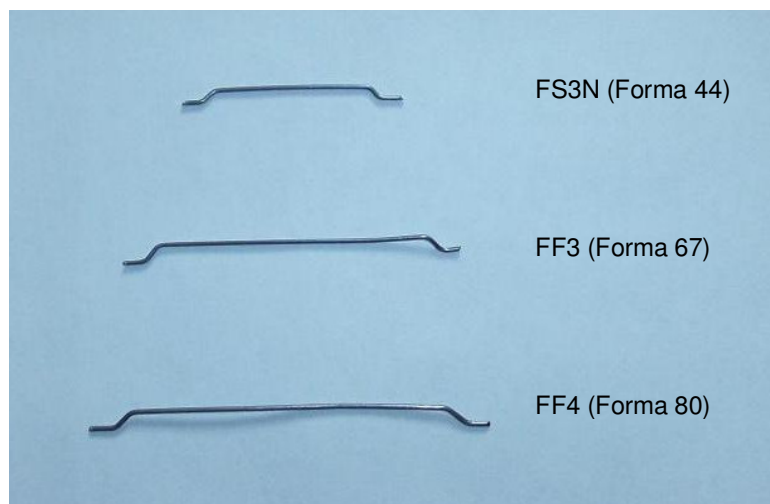


Figura 4.2 - Fibras curtas de aço utilizados

Na segunda fase foram produzidos compósitos cimentícios sem a utilização de agregados graúdos com o objetivo de uma melhor análise da interação das

fibras com distintos fatores de forma e o compósito cimentício, pois para uma melhor avaliação foram confeccionados corpos-de-prova prismáticos cuja a dimensão máxima dos agregados graúdos ultrapassam as dimensões dos moldes. Foi utilizado cimento portland de alta resistência inicial como aglomerante, areia normalizada como agregado miúdo, que é uma areia natural beneficiada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), nas granulometrias de 1,20; 0,60; 0,30; 0,15mm de acordo com a NBR 7214 (ABNT, 1982) e água potável disponibilizada pela concessionária pública de abastecimento.

Para a confecção do compósito foram usados 624g de cimento portland de alta resistência inicial (CPV - ARI), 468g para cada granulometria da areia normalizada (4x) e 300g de água.

Na Tabela 4.3 são apresentadas as características do cimento CPV – ARI utilizado.

Tabela 4.3 - Caracterização do cimento portland ARI (CPV) utilizado

Exigências Físicas e Mecânicas										Exigências Químicas					
Finura			Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Tempo de Pega (min)		Expansibilidade (mm)		Resistência à Compressão (MPa)							
#200 (75mm)	#325 (45mm)	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		Início	Fim	Frio	Quente	1 Dia	3 Dias	7 Dias	28 Dias	Resíduo Insolúvel (%)	Perda ao Fogo (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)
0,28	2,72	5.232	3,070	130	160	-	0,4	25,7	36,1	41,2	49,7	0,72	3,79	2,91	3,63

Para a produção do concreto foram utilizados os materiais apresentados na Tabela 4.4. O aglomerante utilizado foi o mesmo utilizado na produção do compósito cimentício. O agregado miúdo foi uma areia quartzosa natural de rio

comumente utilizada por concreteiras na região metropolitana de Belo Horizonte. O agregado graúdo utilizado foi uma brita calcária na numeração 1, também utilizada por concreteiras na região metropolitana de Belo Horizonte.

Tabela 4.4 - Materiais utilizados na produção de concreto

Material	Descrição	Massa específica M.E. (Kg/dm <sup>3</sup> )	Massa unitária M.U. (Kg/dm <sup>3</sup> )	Módulo de finura M.F.
Aglomerante	Cimento Portland V – ARI	3,070	-	-
Agregado miúdo	Areia Natural	2,591	1,541	2,672
Agregado graúdo	Brita calcária 1	2,692	1,503	5,966
Água	-	-	-	-

Foram ainda realizados os ensaios para a determinação da absorção e massa saturada no agregado graúdo e este apresentou 0,25% de absorção e 2,698Kg/dm<sup>3</sup> de massa específica saturada.

A areia natural apresentou composição granulométrica conforme exibida na Tabela 4.5. A Figura 4.3 apresenta a curva granulométrica da areia e o módulo de finura foi de 2,672. A dimensão máxima característica foi igual a 4,8mm.

Tabela 4.5 - Composição granulométrica do agregado miúdo utilizado

Abertura da peneira (mm)	Material retido (g)		Material retido (%)				Material Passante (%)
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Média	Acumulado	Acumulado
6,3							100,0%
4,80	13,00	12,00	2,6%	2,4%	2,5%	2,5%	97,5%
2,40	13,62	14,19	2,7%	2,8%	2,8%	5,3%	94,7%
1,20	69,09	65,34	13,8%	13,1%	13,4%	18,7%	81,3%
0,60	171,09	172,23	34,2%	34,4%	34,3%	53,1%	46,9%
0,30	171,44	174,88	34,3%	35,0%	34,6%	87,7%	12,3%
0,15	61,24	61,03	12,2%	12,2%	12,2%	99,9%	0,1%
Fundo	0,52	0,33	0,1%	0,1%	0,1%	100,0%	0,0%
Amostra Seca (g):	500,00	500,00					

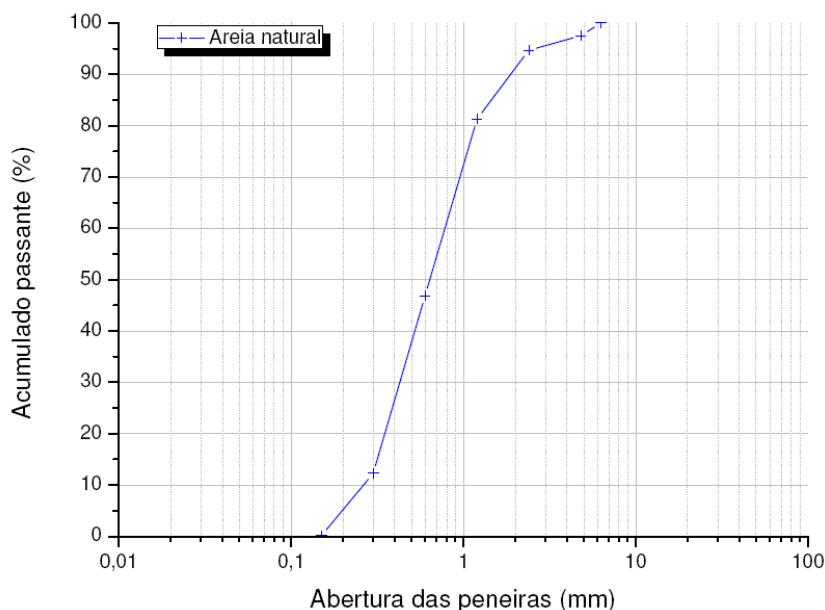


Figura 4.3 - Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado

A Brita 1 apresentou composição granulométrica conforme exibida na Tabela 4.6. A Figura 4.4 apresenta a curva granulométrica da areia e o módulo de finura foi de 5,966. A dimensão máxima característica foi igual a 25mm.

Tabela 4.6 - Composição granulométrica do agregado graúdo utilizado

Abertura da peneira (mm)	Material retido (g)		Material retido (%)				Material Passante (%)
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Média	Acumulado	Acumulado
25	0,00	0,00	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
19	290,00	371,48	9,7%	12,4%	11,0%	11,0%	89,0%
12,5	1543,00	1515,74	51,4%	50,5%	51,0%	62,0%	38,0%
9,5	795,00	793,50	26,5%	26,5%	26,5%	88,5%	11,5%
6,3	300,00	288,67	10,0%	9,6%	9,8%	98,3%	1,7%
4,80	60,00	8,83	2,0%	0,3%	1,1%	99,4%	0,6%
2,40			0,0%	0,0%	0,0%	99,4%	0,6%
1,20			0,0%	0,0%	0,0%	99,4%	0,6%
0,60			0,0%	0,0%	0,0%	99,4%	0,6%
0,30			0,0%	0,0%	0,0%	99,4%	0,6%
0,15			0,0%	0,0%	0,0%	99,4%	0,6%
Fundo	12,00	21,78	0,4%	0,7%	0,6%	100,0%	0,0%
Amostra Seca (g):	3000,00	3000,00					

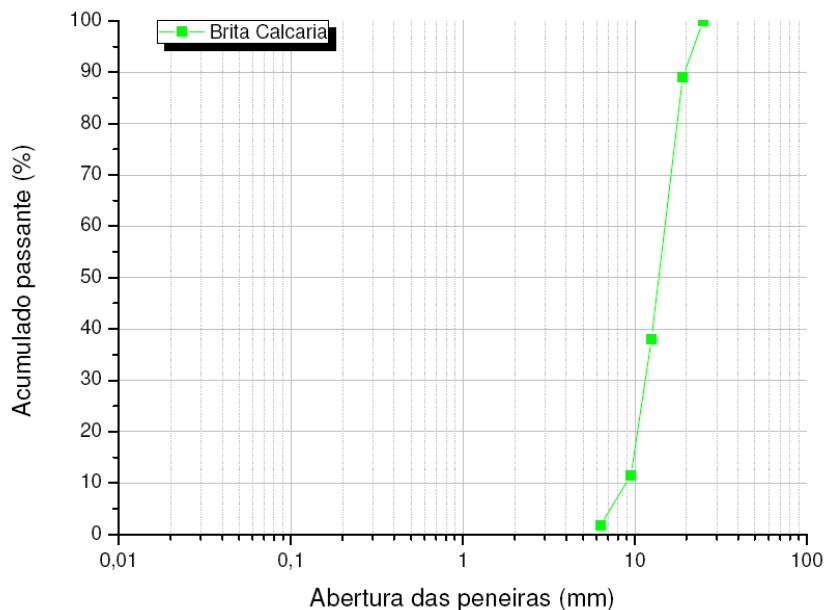


Figura 4.4 - Curva granulométrica do agregado graúdo utilizado

Na Figura 4.5 é possível observar as curvas de granulometria dos agregados miúdo e graúdo.

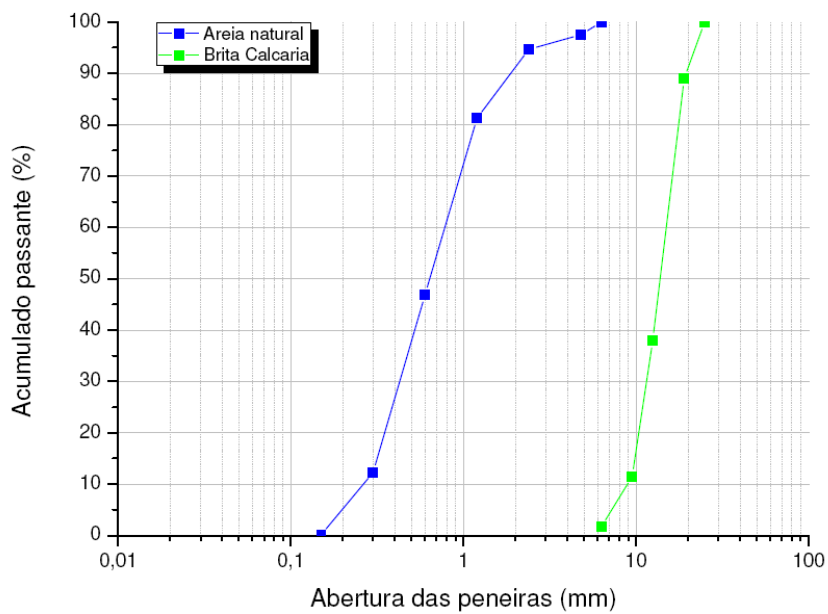


Figura 4.5 - Curvas granulométricas dos agregados miúdo e graúdo

## **4.2 Métodos**

### **4.2.1 Caracterização das fibras**

Os experimentos se iniciaram pela caracterização das fibras. Primeiramente foram selecionadas 10 fibras aleatoriamente de cada modelo e estas foram medidas com o auxílio de um paquímetro. Em seguida foram preparadas amostras para caracterização micrográfica por microscopia eletrônica de varredura e ótica. A preparação metalográfica das fibras na longitudinal foi conduzida de maneira usual, consistindo em embutimento a frio com polimetil metacrilato, lixamento e polimento com pasta de diamante. O reagente utilizado para o ataque foi o Nital 2%.

Na Figura 4.6 são apresentadas as amostras de fibras preparadas para a microscopia. A figura citada possui três colunas e duas linhas de amostras. A primeira coluna são as fibras do tipo FS3N, a segunda coluna são as fibras do tipo FF3 e a terceira coluna são as fibras do tipo FF4. A linha de amostra superior são pedaços de fibras na forma que as mesmas foram utilizadas e a linha inferior são pedaços de fibras após o ensaio de flexão dos corpos-de-prova particionados de compósito cimentício.



Figura 4.6 - Amostras preparadas para a microscopia

Após a preparação metalográfica, as amostras foram levadas ao microscópio ótico Fortel para realização de imagens com amplitudes de aumento de 400 e 800x. Em seguida foi realizada a metalização das amostras com pulverização de ouro e as mesmas foram observadas em um microscópio eletrônico de varredura Shimadzu SSX-550 Superscan nas amplitudes de 100, 500, 1000 e 2000x. Na Figura 4.7 e na Figura 4.8 são apresentados os equipamentos utilizados para a metalização e microscopia eletrônica de varredura, respectivamente.





Figura 4.7 - Equipamento para metalização



Figura 4.8 - Microscópio eletrônico de varredura

As fibras foram caracterizadas mecanicamente por meio de ensaio de tração. O ensaio de tração foi realizado em uma máquina universal de ensaios INSTRON modelo 5582 com sistema de controle e aquisição de dados e dispositivo de leitura ótica de deslocamento. Os ensaios foram realizados com velocidade de movimento do cabeçote do equipamento de 1mm/min. Na Figura 4.9 é possível

observar o equipamento universal de ensaios e na Figura 4.10 a realização do ensaio.



Figura 4.9 - Equipamento universal de ensaios

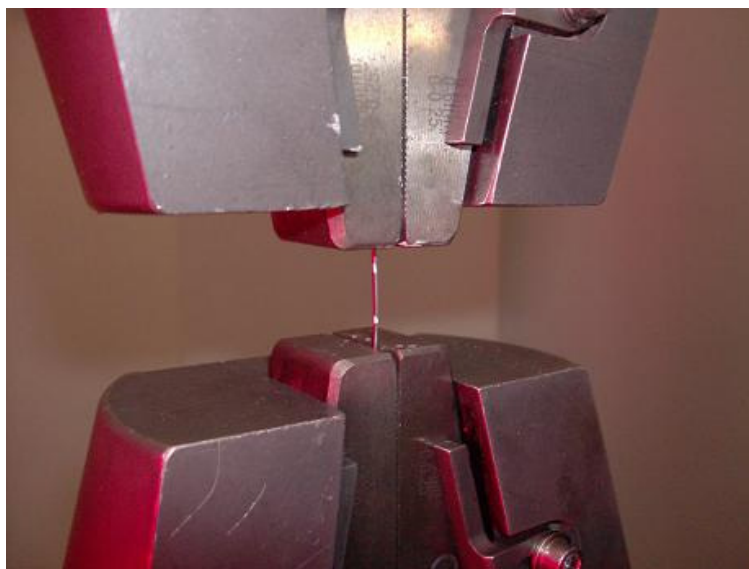


Figura 4.10 - Ensaio de tração com a fibra curta de aço

#### **4.2.2 Caracterização do compósito cimentício**

O compósito cimentício utilizado para avaliar a interação das fibras com a matriz foi uma pasta de cimento, agregado miúdo e água representando um concreto sem agregado graúdo.

A mistura dos materiais e a moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos de 50mm de diâmetro e 100mm de altura, foi conduzida de acordo com a ABNT (1996). O compósito cimentício foi preparada por meio de um misturador mecânico e compactada manualmente nos moldes. A moldagem dos corpos-de-prova foi feita imediatamente após o amassamento e com a maior rapidez possível. Para tanto, foi necessário que a cuba de amassamento estivesse junto aos moldes durante o adensamento. A colocação do compósito cimentício na forma foi feita com o auxílio da espátula, em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes uniformes com o soquete normal, homogeneamente distribuídos. Esta operação foi terminada com a rasadura do topo dos corpos-de-prova, por meio da espátula que foi

deslizada sobre as bordas, dando-lhe também um ligeiro movimento de vaivém na sua direção.

Na Tabela 4.7 são apresentadas as proporções dos materiais para a relação água cimento fixa (0,48) preconizada pela a ABNT (1996).

Tabela 4.7 - Proporção de materiais utilizados para confecção do compósito cimentício.

Materiais	Quantidade (g)
Cimento	624,0
Água	300,0
Areia IPT #16	468,0
Areia IPT #30	468,0
Areia IPT #50	468,0
Areia IPT #100	468,0

Nas primeiras 24 horas de cura, os corpos-de-prova foram mantidos nas formas, sendo desmoldados após este período e colocados em recipientes hermeticamente fechados e estanques. Aos 28 dias de idade, os corpos-de-prova foram retirados da cura e ensaiados à compressão. O equipamento utilizado para os ensaios foi uma prensa hidráulica EMIC PC150. A velocidade de deslocamento do embolo do equipamento foi controlada por meio do ajuste de uma válvula de controle de fluxo de óleo. Na Figura 4.11 é observado o equipamento durante o experimento.



Figura 4.11 - Prensa hidráulica durante o experimento

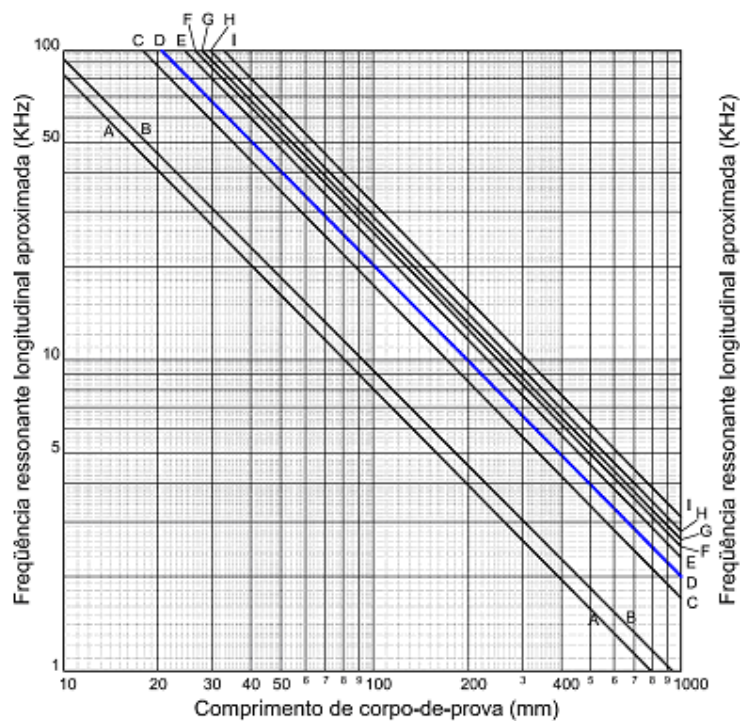
Para a determinação do módulo de elasticidade foram moldados 4 corpos-de-prova de compósito cimentício nas dimensões de 100mm de diâmetro por 200mm de altura, e ensaiados nos métodos de ressonância forçada e módulos estáticos de elasticidade, de deformação e da curva tensão-deformação (ABNT, 2003). Comumente, corpos-de-prova de compósito cimentício sem agregado graúdo apresentam dimensões de 50mm de diâmetro e 100mm de altura, mas especialmente para os ensaios de módulo, os corpos-de-prova utilizados foram de 100mm de diâmetro por 200mm de altura, pois o ensaio estático somente foi possível ser realizado nestas dimensões.

No ensaio de módulo de elasticidade dinâmico por frequência ressonante forçada foram ensaiados 2 corpos e foram realizadas as medidas de massas e dimensões dos corpos-de-provas, para o cálculo da massa específica aparente. Para este ensaio foi utilizado o equipamento Erudite MKII, que realiza um sistema de teste de frequência ressonante, no modo longitudinal (Figura 4.12)



Figura 4.12 - Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico longitudinal

Para a determinação do campo de frequência a ser utilizado, foi adotado o valor de 10KHz de frequência ressonante longitudinal aproximada para corpo-de-provas cilíndricos de 100mm de diâmetro e 200mm de altura em compósitos cimentícios extraído da Figura 4.13, sendo que para cada corpo-de-prova foram realizadas 10 leituras da frequência ressonante sendo totalizadas 20 leituras.



A = Acetal      B = Acrílico      C = Latão      D = Ouro e Concreto      E = Cristal de chumbo, Ferro fundido e Tungstênio  
 F = Aço      G = Ligas de alumínio      H = Vidro      I = Carboneto de tungstênio

Figura 4.13 - Frequência ressonante longitudinal aproximada (CNS, 1995)

Com base na frequência ressonante longitudinal aproximada, foram definidos valores de frequências para os extremos do campo de variação da frequência, frequência de início ( $F_s$ ) e frequência de término ( $F_e$ ). Determinada a frequência de vibração natural do material e com auxílio da equação 3.1, foi calculado o módulo de elasticidade dinâmico.

$$E_D = 4n^2 l^2 \rho \times 10^{-12} \quad (4.1)$$

Onde,

$l$  = comprimento do corpo-de-prova em mm;

$n$  = frequência do modo fundamental da vibração longitudinal em Hz;

$\rho$  = densidade em Kg/m<sup>3</sup>.

Em seguida, foram realizados os ensaios de resistência à compressão em 2 corpos-de-prova para determinar a resistência média ( $f_c$ ) e assim determinar as faixas de leitura para o ensaio de módulo de elasticidade estático. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com a ABNT (1994).

Para a determinação do módulo de elasticidade estático foram ensaiados 2 corpos-de-prova capeados com enxofre. Foram utilizados extensômetros removíveis de base de 10 cm. Foi feita a compatibilização das deformações lidas nos extensômetros de acordo com o que diz a ABNT (2003) na NBR 8522. Os valores de carga e deformação apresentados em cada faixa determinada para o ensaio foram anotados e em seguida os CPs foram levados à ruptura.

#### **4.2.3 Interação fibra e compósito cimentício**

Com o objetivo de avaliar a interação das fibras com a matriz do compósito cimentício e o comportamento das fibras foram confeccionados corpos-de-prova prismáticos. Para facilitar a compreensão do comportamento mecânico de fibras curtas de aço adicionadas em concretos, foi desenvolvido um modelo simplificado, uma vez que se pretende analisar o mecanismo de reforço e considerar separadamente o comportamento do aço e o concreto.

O compósito foi constituída de cimento portland, areia normalizada e água. Os corpos-de-prova prismáticos tiveram dimensões de 40x40x160mm e foram confeccionados de duas formas:

- a) corpos-de-prova maciços sem fibras;
- b) corpos-de-prova particionados simetricamente na transversal por um película polimérica, e com fibras posicionadas no centro do prisma;



Foram confeccionados nove corpos inteiros sem fibras e nove para cada tipo de fibra foram particionados simetricamente na transversal.

Para moldagem dos corpos-de-prova foram utilizados moldes de aço previamente limpos e lubrificadas com óleo mineral (Figura 4.14).

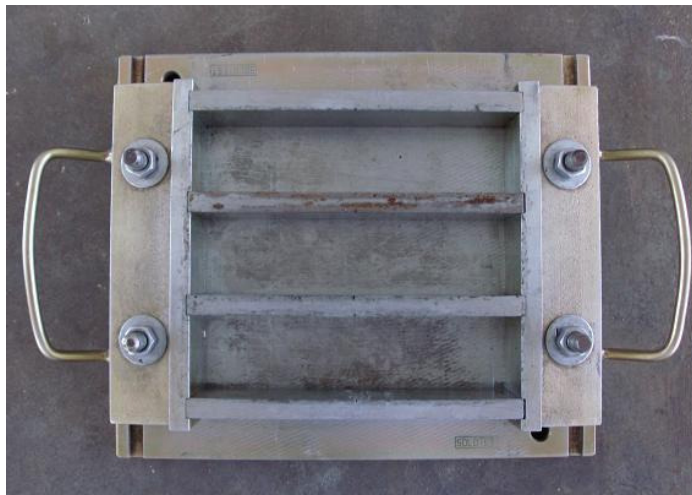


Figura 4.14 - Moldes prismáticos 40x40x160mm

Na Figura 4.15 é possível observar o modelo simplificado onde foi posicionado um conjunto de três fibras curtas de aço equidistantes, paralelas entre si e alinhadas em sentido longitudinal ao prisma.

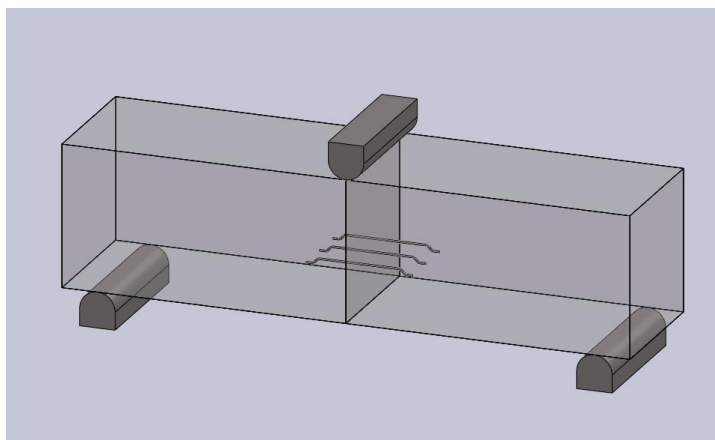


Figura 4.15 - Desenho do corpo-de-prova e apoios

Na Figura 4.16 é possível observar o molde preparado para receber o compósito cimentício. A preparação contou com a fixação de uma lamina polimérica (transparência) dividido os corpos-de-prova ao meio no sentido transversal e com a colocação de três fibras curtas de aço.

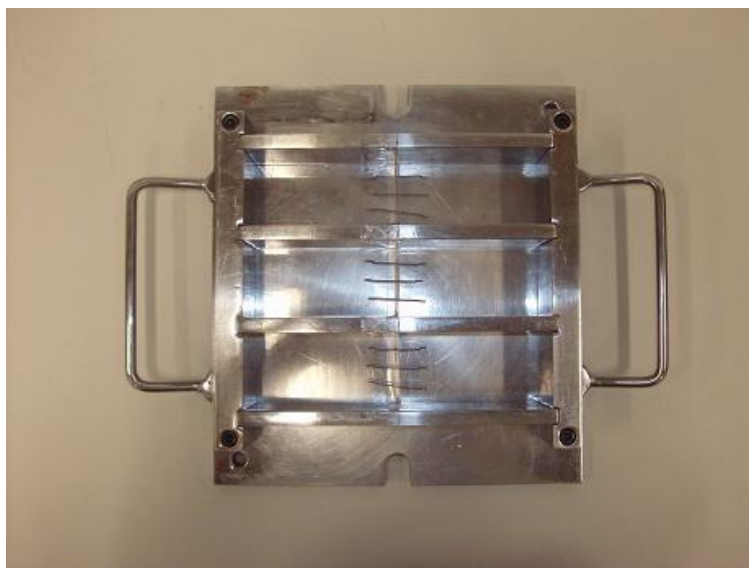


Figura 4.16 - Molde preparado para moldagem

A mistura dos materiais foi conduzida de acordo com a ABNT (1996). O compósito cimentício foi preparado por meio de um misturador mecânico e compactada manualmente em um molde. A moldagem dos corpos-de-prova prismáticos foi feita imediatamente após o amassamento e com a maior rapidez possível. A colocação do compósito cimentício na forma foi feita com o auxílio da espátula, em três camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes uniformes com o soquete normal, homogeneamente distribuídos. Esta operação foi terminada com a rasadura do topo dos corpos-de-prova, por meio da espátula que foi deslizada sobre as bordas, dando-lhe também um ligeiro movimento de vaivém na sua direção.

Nas primeiras 24 horas de cura, os corpos-de-prova foram mantidos nas formas, sendo desmoldados após este período e colocados em recipientes hermeticamente fechados e estanques. Aos 28 dias de idade, os corpos-de-

prova foram retirados da cura e ensaiados à flexão em três pontos. O equipamento utilizado para os ensaios foi uma máquina universal de ensaios INSTRON modelo 5582 com sistema de controle e aquisição de dados e dispositivo LVTD. A velocidade de deslocamento do cabeçote do equipamento foi de 5mm/min. Na Figura 4.17 é observado o equipamento de ensaio universal durante o experimento.



Figura 4.17 - Equipamento de ensaio universal durante o experimento

Após os ensaios de flexão nos corpos-de-prova particionados, as fibras que estavam nos corpos-de-prova foram extraídas e foram realizadas medidas de diâmetro e comprimento com auxílio de um paquímetro.

#### **4.2.4 Caracterização do concreto com fibras**

Foi confeccionado concreto para moldagem de 20 corpos-de-prova cilíndricos de 100mm de diâmetro e 200mm de altura e 4 prismáticos de 150mm de largura, 150mm de altura e 500mm de comprimento para o concreto de

referencia sem fibras e para os concretos com cada modelo de fibra. Na Figura 4.18 podem ser vistos os moldes cilíndricos e prismáticos.



Figura 4.18 - Moldes cilíndricos e prismáticos

Foi utilizada uma dosagem para obtenção de um concreto com resistência característica à compressão de 35MPa e uma proporção de 80kg de fibras por metro cúbico de concreto. A proporção de materiais para cada moldagem é apresentada na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Proporção de materiais utilizados

Materiais	Descrição	Quantidade (kg)
Aglomerante	Cimento Portland V - ARI	10,0
Agregado miúdo	Areia Natural	19,0
Agregado graúdo	Brita 1	24,9
Água	-	5,5
Fibras	Fibras curtas de aço	2,08

Antes da moldagem, os moldes foram previamente preparados com desmoldante. Os corpos-de-prova foram mantidos nos moldes durante 24h, e

após a desforma foram imersos em água durante 28 dias para cura e aos 7 dias após a retirada da cura, metade dos corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos foram submetidos a alta temperatura e a outra metade continuaram aguardando a realização dos ensaios.

A submissão a alta temperatura se deu em forno elétrico industrial (Figura 4.19 e Figura 4.20) e ocorreu com uma taxa de aquecimento de  $2^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$  e patamar de 3 horas a  $500^{\circ}\text{C}$ . Foi escolhida uma taxa de aquecimento baixa com o objetivo de reduzir a possibilidade de lascamento dos corpos-de-prova. O tempo de patamar e a temperatura de aquecimento foram escolhidos com o objetivo de que os corpos-de-prova de concreto passassem por níveis de degradação próximos aos ocorridos durante a exposição de concretos a situação de incêndios.



Figura 4.19 - Forno elétrico industrial



Figura 4.20 - Forno elétrico industrial

Após a submissão a alta temperatura, os corpos-de-prova que passaram pelo processo receberam a denominação de submetido à alta temperatura e os que não passaram pelo processo receberam a denominação de cru.

Para determinação da resistência à compressão foram ensaiados 5 corpos-de-prova cilíndricos crus e 5 submetidos à alta temperatura para cada concreto, ou seja, 10 corpos-de-prova para o concreto de referencia sem fibra, mais 10 para cada concreto reforçado com a fibra curta de aço FS3N (Forma 44), FF3 (Forma 67) e FF4 (Forma 80), totalizando 40 corpos-de-prova ensaiados a compressão simples.

O ensaio foi realizado em máquina universal de ensaios mecânicos eletromecânica microprocessada de duplo fuso com duas colunas guias cilíndricas paralelas, Emic DL3000N, com velocidade de aplicação de carga de 0,5MPa/s. Os corpos-de-prova tiveram suas bases regularizadas com capeador de neoprene com base metálica. Na Figura 4.21 é possível observar a realização do ensaio.



Figura 4.21 - Ensaio de resistência à compressão

Para determinação da resistência à tração por compressão diametral foram ensaiados 3 corpos-de-prova cilíndricos crus e 3 submetidos à alta temperatura para cada concreto. O equipamento utilizado foi o mesmo do ensaio de resistência à compressão e com velocidade de aplicação de carga de 0,2MPa/s. Na Figura 4.22 é possível observar a realização do ensaio.

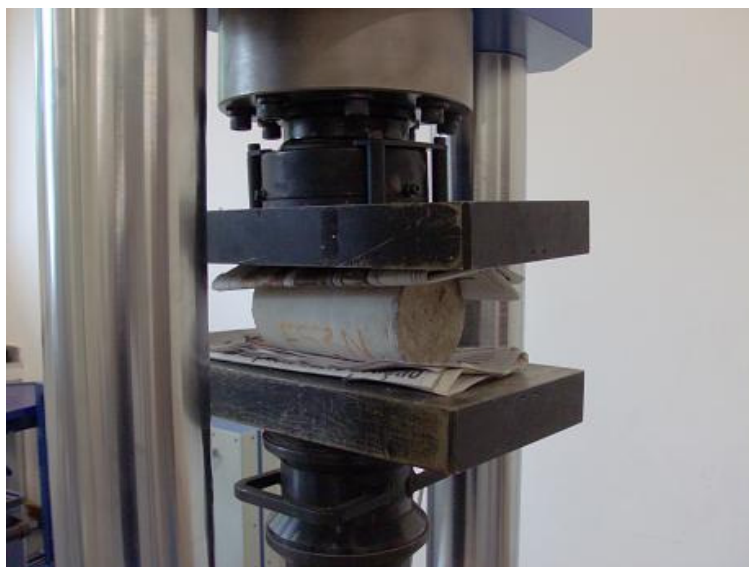


Figura 4.22 - Ensaio de resistência à tração na compressão diametral

Para determinação da resistência à tração na flexão foram ensaiados 2 corpos-de-prova prismáticos crus e 2 submetidos à alta temperatura para cada concreto. O equipamento utilizado foi o mesmo do ensaio de resistência à compressão e com velocidade de aplicação de carga de 0,1MPa/s. Na Figura 4.23 é possível observar a realização do ensaio.



Figura 4.23 - Ensaio de resistência à tração na flexão

Para a determinação do módulo dinâmico foram ensaiados 2 corpos-de-prova cilíndricos crus e 2 submetidos à alta temperatura para cada concreto. O procedimento para determinação dos módulos dinâmico e estático foram realizados de forma similar aos corpos-de-prova de compósito cimentício.



## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados serão apresentados em três blocos, no primeiro serão apresentados os dados de caracterização das fibras, no segundo bloco, a caracterização do compósito cimentício e a sua interação com as fibras, e no terceiro o comportamento do concreto produzido.

### **5.1 Caracterização das fibras**

Foi realizada uma análise dimensional dos três modelos de fibras utilizadas. Na Figura 5.1 são apresentadas as medidas realizadas do diâmetro médio das fibras. As fibras analisadas não apresentavam seção perfeitamente circular, e sim levemente achatada, por esse motivo foram realizadas medidas do diâmetro maior e do diâmetro menor e foi realizada a média apresentada na figura citada anteriormente.

Os três modelos de fibras apresentavam diâmetro comercial de 0,75mm. As fibras do tipo FS3N apresentaram diâmetro médio variando entre 0,73mm e 0,74mm. As fibras do tipo FF3 apresentaram diâmetro médio variando entre 0,73mm e 0,78mm. E as fibras do tipo FF4 apresentaram diâmetro médio variando entre 0,70mm e 0,81mm.

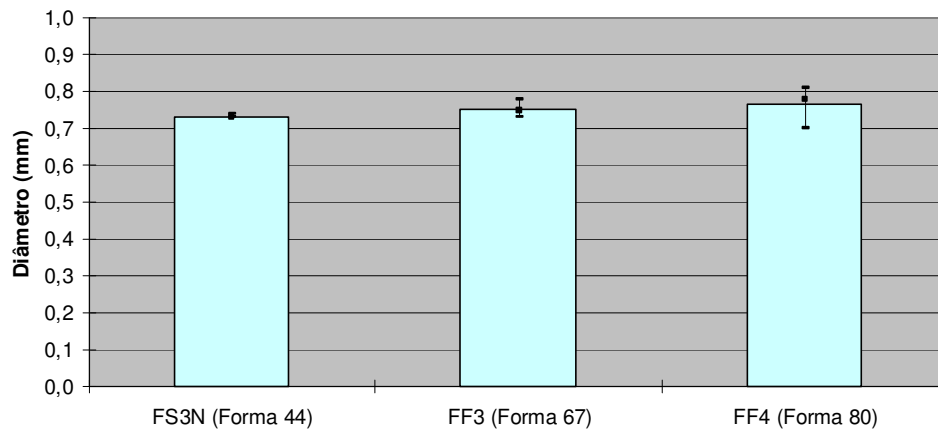


Figura 5.1 - Diâmetro médio das fibras

Na Figura 5.2 são apresentadas as medidas realizadas do comprimento das fibras. As fibras do tipo FS3N possuem comprimento comercial de 33mm e apresentaram comprimento variando entre 33,35mm e 34,20mm. As fibras do tipo FF3 possuem comprimento comercial de 50mm e apresentaram comprimento variando entre 49,70mm e 52,02mm. As fibras do tipo FF4 possuem comprimento comercial de 60mm e apresentaram comprimento variando entre 59,51mm e 60,24mm.

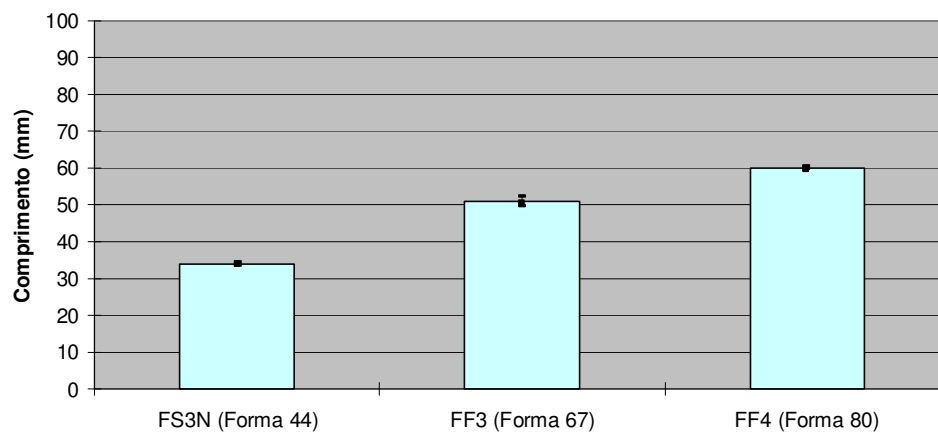


Figura 5.2 - Comprimento das fibras

Na Figura 5.3 é possível observar as imagens obtidas em microscópio óptico das fibras. Nos três tipos de fibras, as imagens de microscopia óptica apresentaram-se em tons de cinza mais escuro, o que indicaria grãos de ferrita

mais alongados que comumente são obtidos por processo de trefilação com a ocorrência de elevada deformação plástica.

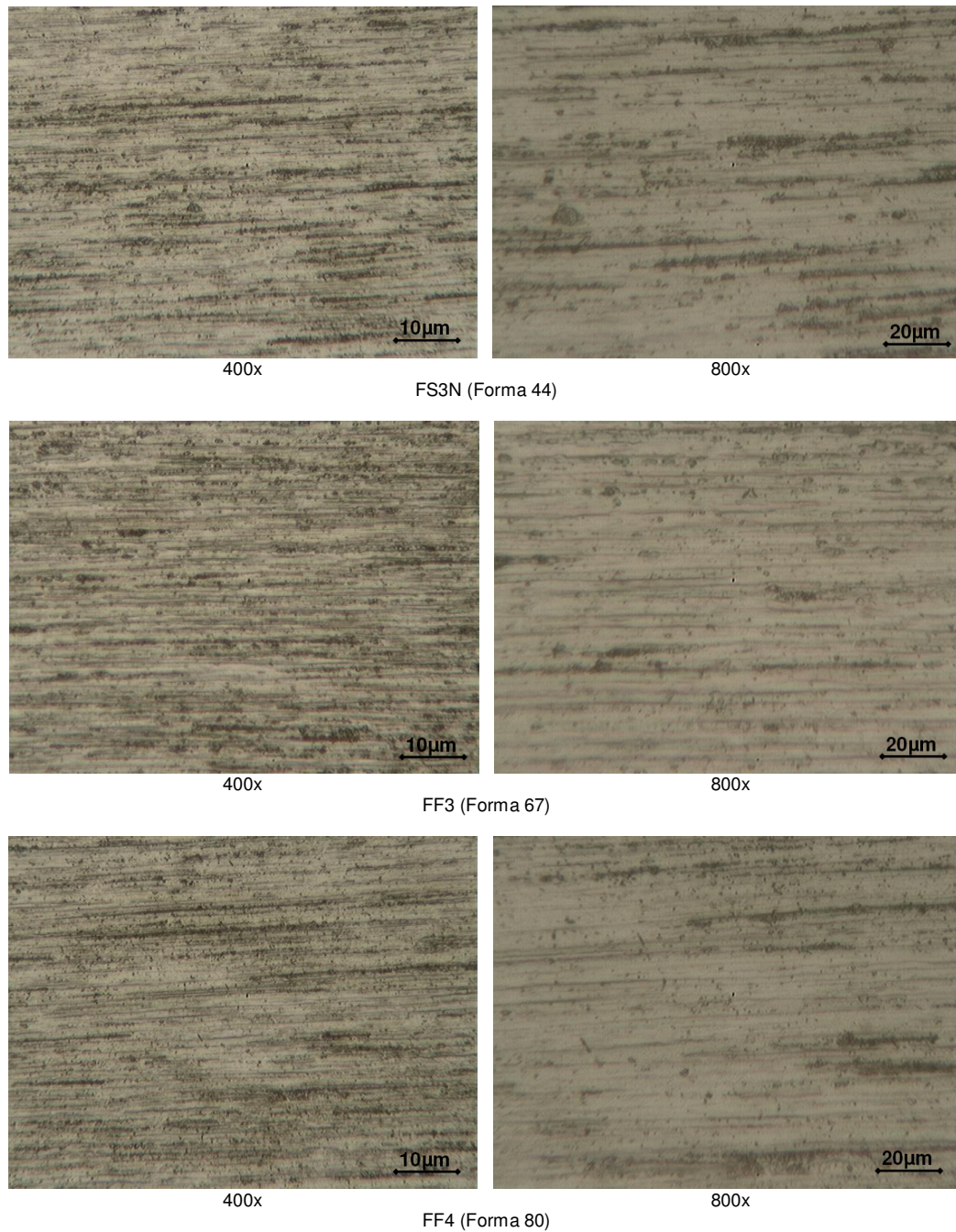


Figura 5.3 - Imagens de microscopia ótica

Na Figura 5.4 é possível observar as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da fibra FS3N (Forma 44). Corroborando com as

imagens obtidas por microscopia ótica, as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura indicam a presença de grãos alongados de ferrita.

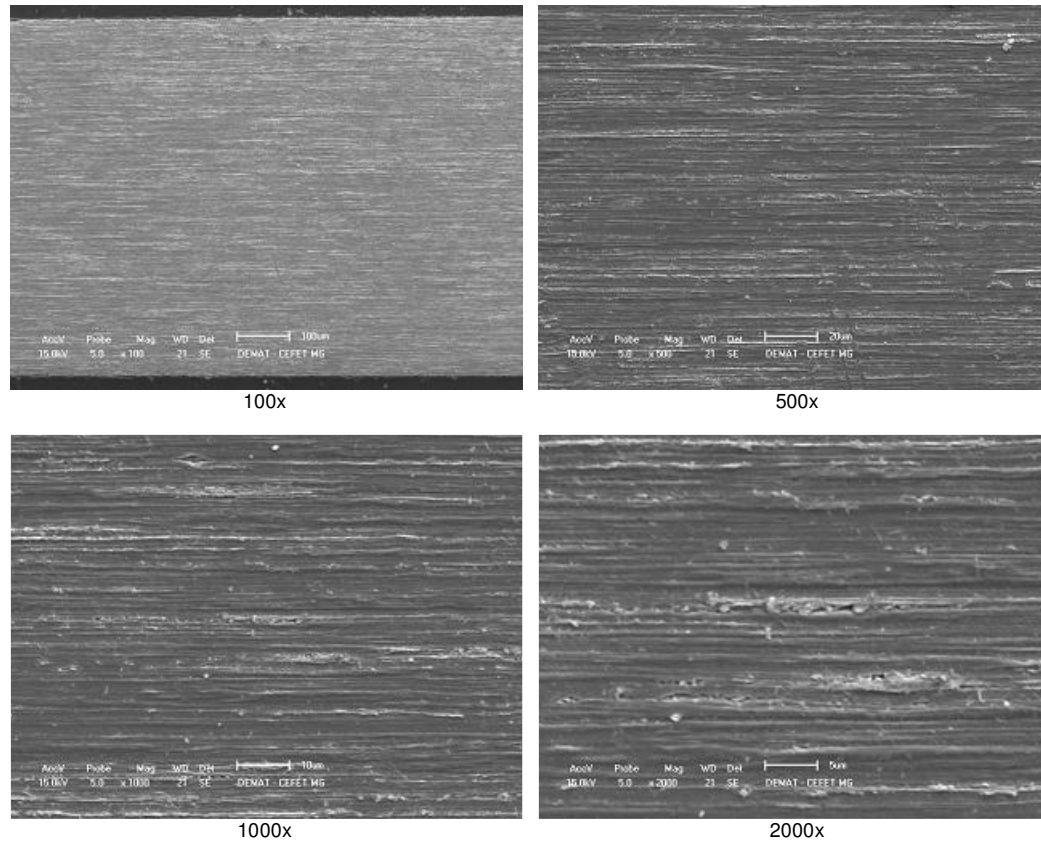


Figura 5.4 - Imagens da fibra FS3N por microscopia eletrônica de varredura

Na Figura 5.5 é possível observar as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da fibra FF3 (Forma 60). Da mesma forma que a fibra do tipo FS3N, a FF3 também apresentou formato de grãos alongados.

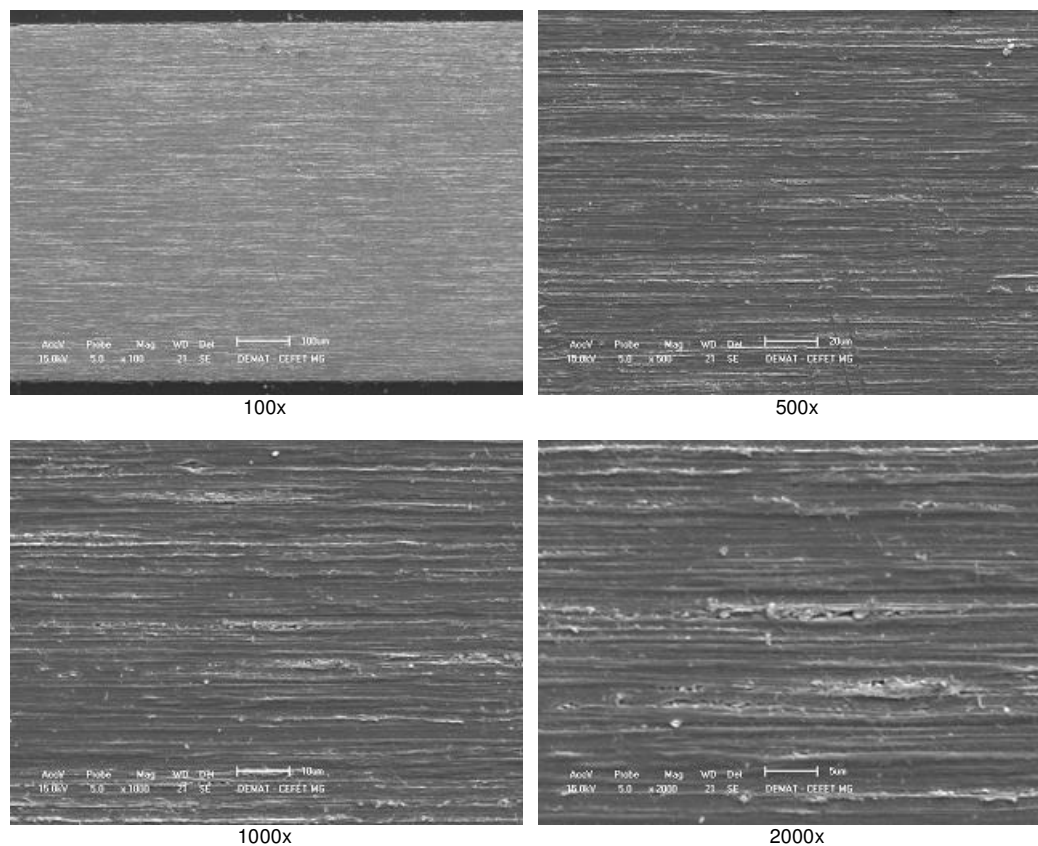


Figura 5.5 - Imagens da fibra FF3 por microscopia eletrônica de varredura

Na Figura 5.6 é possível observar as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da fibra FF4 (Forma 80). A fibra FF4, confirmando as imagens dos outros modelos de fibras indicando grãos alongados que passaram por processo de elevada deformação plástica.

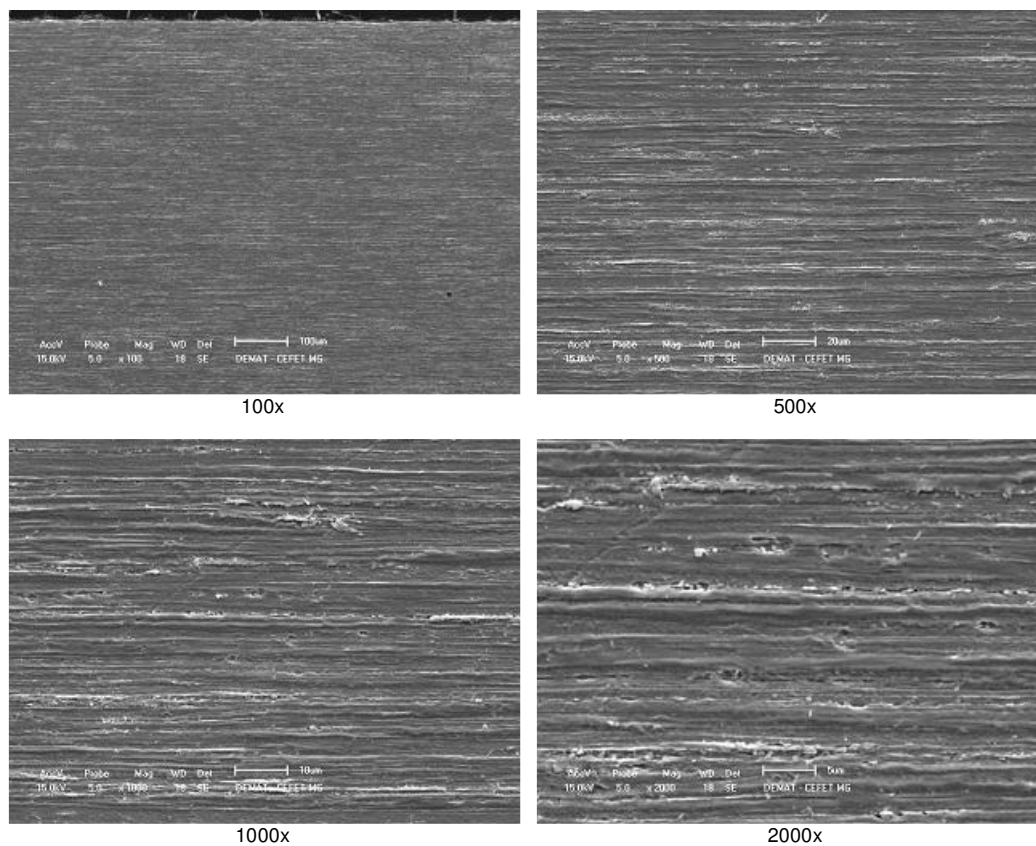


Figura 5.6 - Imagens da fibra FF4 por microscopia eletrônica de varredura

Na Figura 5.7 são apresentadas as curvas de tensão versus deformação obtidas nos ensaios de tração realizados nas fibras de aço modelo FS3N. Acredita-se que a leve queda de tensão entre 500 e 600MPa foi devido ao escorregamento das garras do equipamento. O ensaio foi realizado novamente, mas os resultados apresentaram o mesmo comportamento. Acredita-se que um dos motivos que poderia levar a esse escorregamento seria a dificuldade de fixação da fibra, devido ao seu comprimento reduzido.

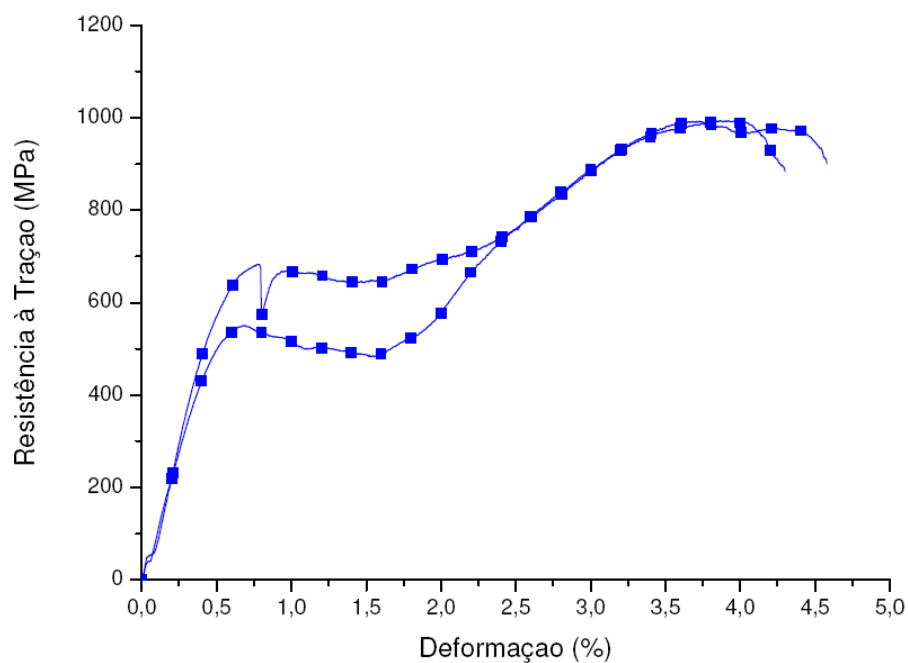


Figura 5.7 - Gráfico tensão versus deformação da fibra FS3N

Na Figura 5.8 são apresentadas as curvas de tensão versus deformação obtidas nos ensaios de tração realizados nas fibras de aço modelo FF3. As fibras ensaiadas apresentaram comportamentos similares.

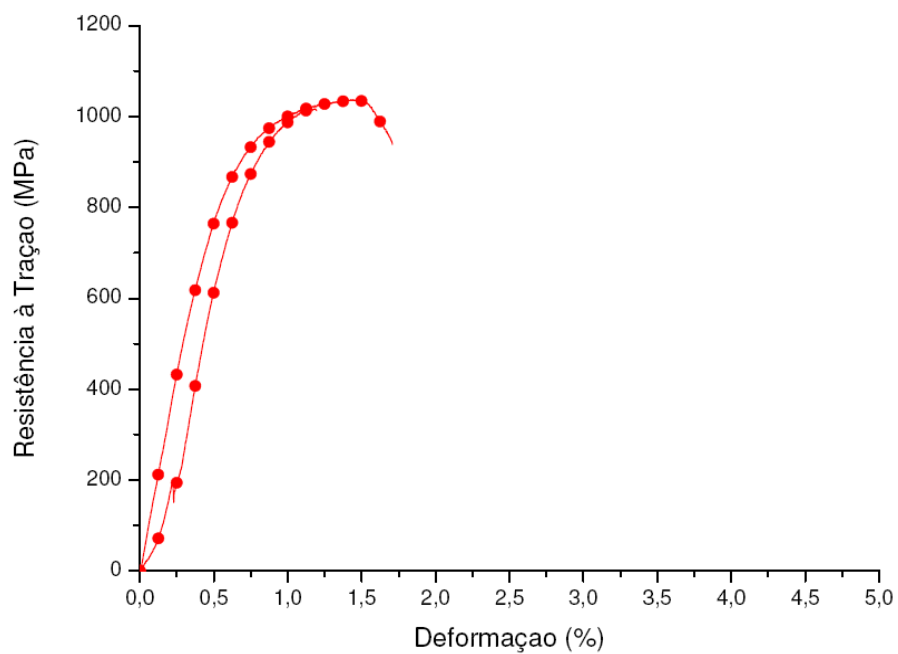


Figura 5.8 - Gráfico tensão versus deformação da fibra FF3

Na Figura 5.9 são apresentadas as curvas de tensão versus deformação obtidas nos ensaios de tração realizados nas fibras de aço modelo FF4. Avaliando o comportamento das fibras FF3 e FF4 percebe-se que o comportamento dos dois modelos citados são similares.

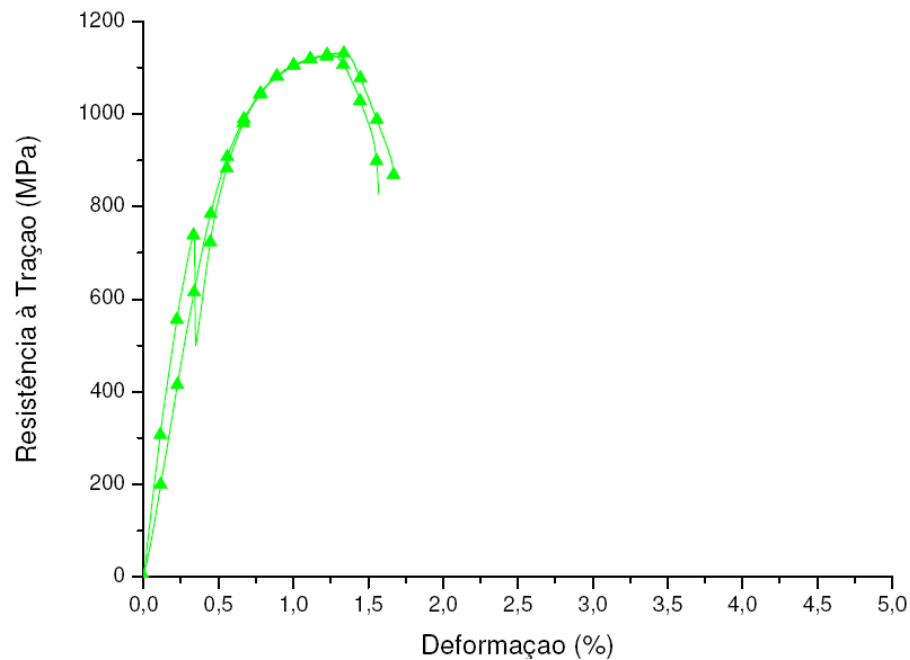


Figura 5.9 - Gráfico tensão versus deformação da fibra FF4

Na Figura 5.10 são apresentadas as curvas de tensão versus deformação obtidas nos ensaios de tração realizados nas fibras de aço. As fibras FF3 e FF4 que possuíam maiores comprimentos que as fibras FS3N, apresentam comportamento bem similares. As fibras FS3N apresentou um comportamento distinto em relação às outras duas fibras, reforçando que o comprimento das fibras possa ter influenciado o resultado do ensaio.



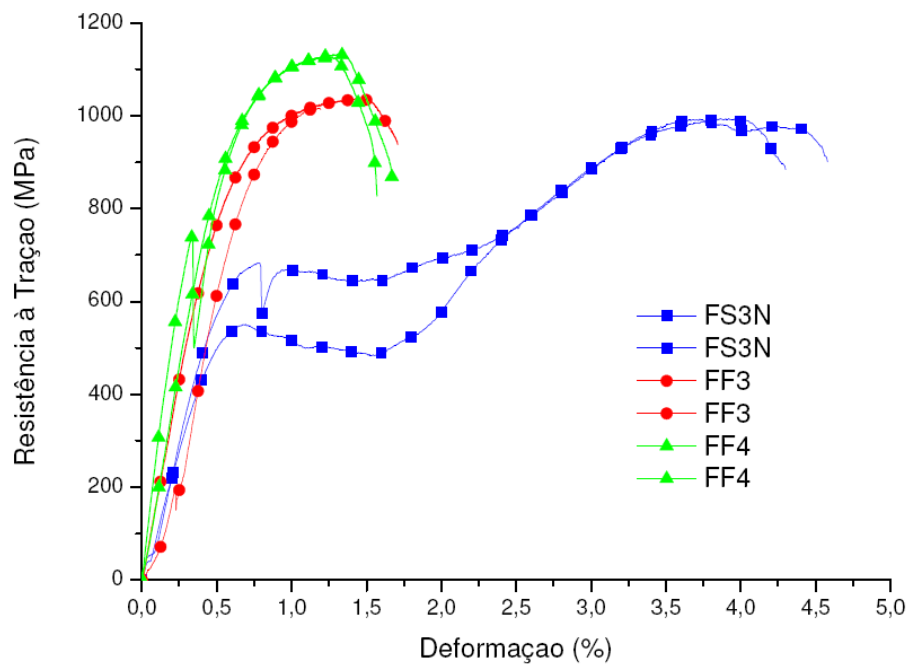


Figura 5.10 - Gráfico tensão versus deformação das fibras

Na Figura 5.11 é possível observar os valores de resistência à tração das fibras ensaiadas. Os valores médios apresentados foram de 993,21, 1026,83 e 1129,42 para as fibras FS3N, FF3 e FF4, respectivamente. Resultados experimentais apresentados por HOLSCHEMACHER *et al.* (2010) variando de 925 a 1762MPa, demonstrado coerência entres os resultados apresentados neste trabalho.

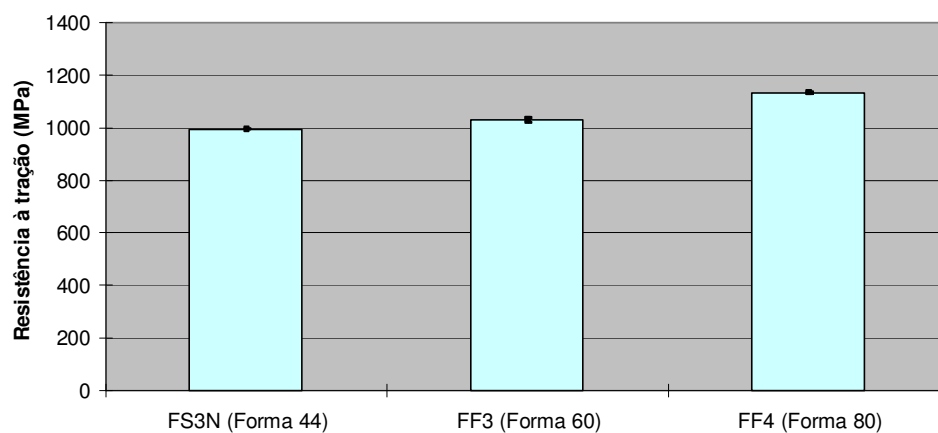


Figura 5.11 - Resistência à tração das fibras FS3N, FF3 e FF4

## 5.2 Interação matriz-fibra

### 5.2.1 Caracterização do compósito cimentício

Na Figura 5.12 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão e de módulo de elasticidade estático secante a 40% da carga de ruptura, estático tangente inicial e dinâmico por frequência ressonante forçada do compósito cimentício confeccionado. Na figura em questão pode-se observar as médias dos resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade representadas pelos retângulos azuis, os resultados dos corpos-de-prova que apresentaram os maiores e menores valores representados por traços que limitam os dados superior e inferiormente, e as medianas são representadas pelos círculos preenchidos.

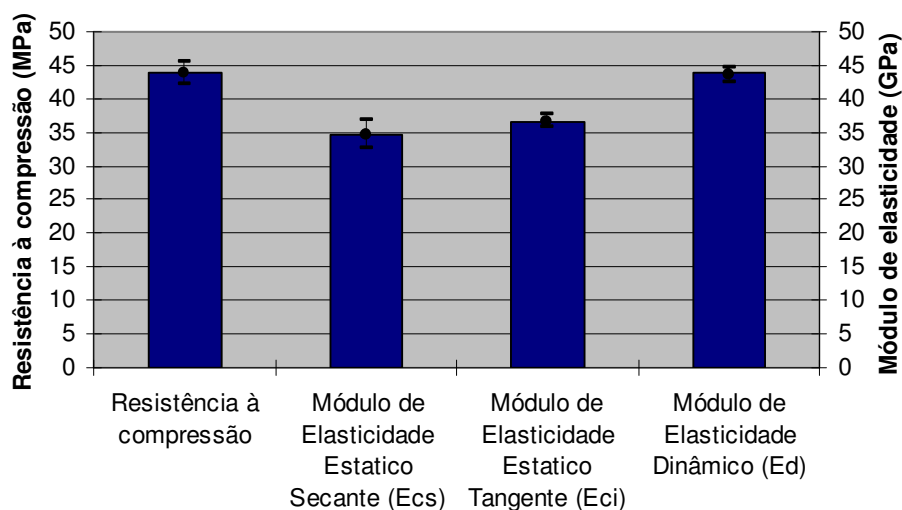


Figura 5.12 - Resultados de resistência à compressão e modulo de elasticidade

Os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram coerentes com a literatura. A proporção de materiais utilizada foi a mesma utilizada para o ensaio de caracterização da resistência à compressão do cimento. O cimento portland de alta resistência inicial (CPV) apresentou

resistência à compressão aos 28 dias de 43,97MPa e o compósito cimentício (compósito cimentício) apresentou 43,76MPa.

Para compósito cimentício sem utilização de agregados graúdos, os estudos sobre a relação entre resistência à compressão, módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico ainda são incipientes.

Na Tabela 5.1 são apresentadas as correlações entre a resistência à compressão e aos módulos de elasticidade ensaiados.

Tabela 5.1 - Correlações entre a resistência à compressão e aos módulos de elasticidade ensaiados

Relação	Autor	Equação	Resultados obtidos em ensaios e equações							Diferenças obtidas				
			F <sub>ck</sub> (MPa) (Ensaio)	E <sub>cs</sub> (GPa) (Equação)	E <sub>cs</sub> (GPa) (Ensaio)	E <sub>ci</sub> (GPa) (Equação)	E <sub>ci</sub> (GPa) (Ensaio)	E <sub>d</sub> (GPa) (Equação)	E <sub>d</sub> (GPa) (Ensaio)	Ed (Ensaio) / Ecs (Equação)	Ed (Ensaio) / Ecs (Ensaio)	Ed (Ensaio) / Eci (Equação)	Ed (Ensaio) / Eci (Ensaio)	Ed (Ensaio) / Ed (Equação)
Resistência à compressão e o módulo de elasticidade estático	ABNT (2004)	$E_{ci} = 5600 f_{ck}^{1/2}$	43,79	-	34,74	37,06	36,72	-	43,76	-	126,0%	118,1%	119,2%	-
	ABNT (2004)	$E_{cs} = 0,85 E_{ci}$	43,79	31,21	34,74	-	36,72	-	43,76	140,2%	126,0%	-	119,2%	-
	ACI (2005)	$E_c = w_c^{1,5} .0,043 f_c^{1/2}$	43,79	-	34,74	32,42	36,72	-	43,76	-	126,0%	135,0%	119,2%	-
	ACI (2005)	$E_{ci} = 4700 f_{ck}^{1/2}$	43,79	-	34,74	31,10	36,72	-	43,76	-	126,0%	140,7%	119,2%	-
	CEB-FIP (1993)	$E_c = 2,15.10^4 (f_{cm}/10)^{1/3}$	43,79	-	34,74	35,17	36,72	-	43,76	-	126,0%	124,4%	119,2%	-
	ACI (1992)	$E_c = 3320(f_c)^{1/2} + 6900$	43,79	-	34,74	28,87	36,72	-	43,76	-	126,0%	151,6%	119,2%	-
	Kakizaki (1992)	$E_c = 3650 (f_c)^{1/2}$	43,79	-	34,74	24,15	36,72	-	43,76	-	126,0%	181,2%	119,2%	-
Módulo de elasticidade estático e o dinâmico	Metha e Monteiro (2001)	$E_d = 1,20 E_{ci}$	43,79	-	34,74	-	36,72	44,06	43,76	-	126,0%	-	119,2%	99,3%
	Metha e Monteiro (2001)	$E_d = 1,30 E_{ci}$	43,79	-	34,74	-	36,72	47,74	43,76	-	126,0%	-	119,2%	91,7%
	Metha e Monteiro (2001)	$E_d = 1,40 E_{ci}$	43,79	-	34,74	-	36,72	51,41	43,76	-	126,0%	-	119,2%	85,1%
	Swamy e Righy (1971)	$E_d = E_c + 7$	43,79	-	34,74	-	36,72	43,72	43,76	-	126,0%	-	119,2%	100,1%
	BSI (1972)	$E_c = 1,25 E_d - 19$	43,79	-	34,74	-	36,72	44,58	43,76	-	126,0%	-	119,2%	98,2%
	Lyndon e Balendran (1986)	$E_c = 0,83 E_d$	43,79	-	34,74	-	36,72	44,24	43,76	-	126,0%	-	119,2%	98,9%
$E_d$ e o $E_d$	BSI (1972)	$E_d = 7600 f_{ck}^{0,33} + 14000$	43,79	-	34,74	-	36,72	40,45	43,76	-	126,0%	-	119,2%	108,2%

## 5.2.2 Carga versus deslocamento dos compósitos com fibras

Na Figura 5.13 são apresentadas as curvas de carga versus deslocamento na flexão em pontos de nove corpos-de-prova prismáticos do compósito cimentício sem fibras. É possível observar que os nove corpos-de-prova apresentaram comportamento similares e com aspecto tipicamente frágil.

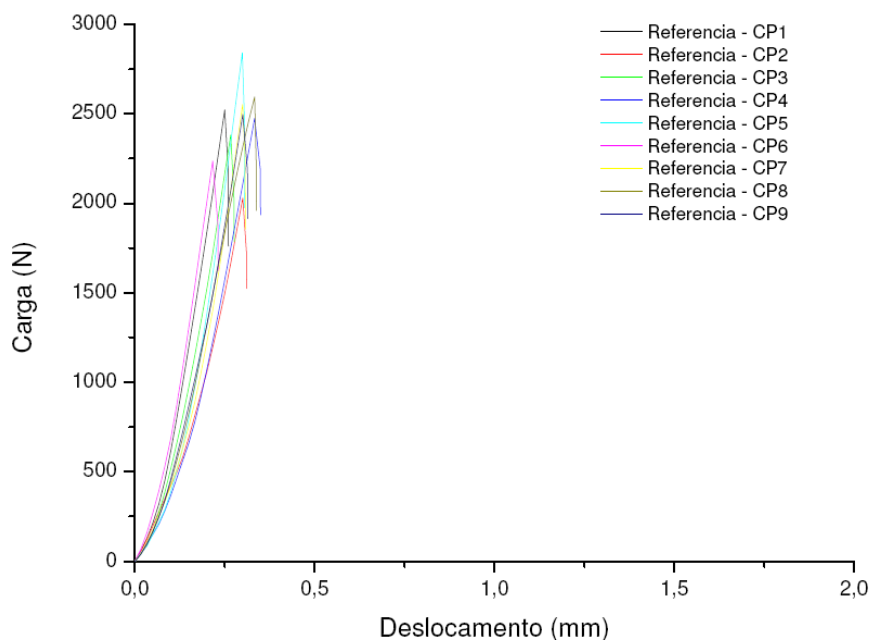


Figura 5.13 - Curvas de carga versus deslocamento na flexão de compósito cimentício sem fibras

Na Figura 5.14 são apresentados os resultados do ensaio de flexão nos corpos-de-prova particionados utilizando as fibras FS3N com fator de forma 44. São apresentados os resultados dos nove corpos-de-prova utilizando o mesmo tipo de fibra. Observa-se que mesmo os corpos-de-prova já sendo partidos, isto quer dizer que já houve a fratura, as curvas apresentadas são típicas de uma fratura dúctil. Sendo assim a adição de fibras curtas de aço pode levar o compósito a suportar cargas mesmo após a fratura, tornando o material pseudo dúctil segundo a literatura. Acredita-se que os desvios ocorridos nos resultados

do ensaio de resistência à flexão dos corpos-de-prova prismáticos particionados foram devido a pequenos desvios e alterações no posicionamento das fibras, uma vez que o processo de produção de corpos-de-prova foi artesanal.

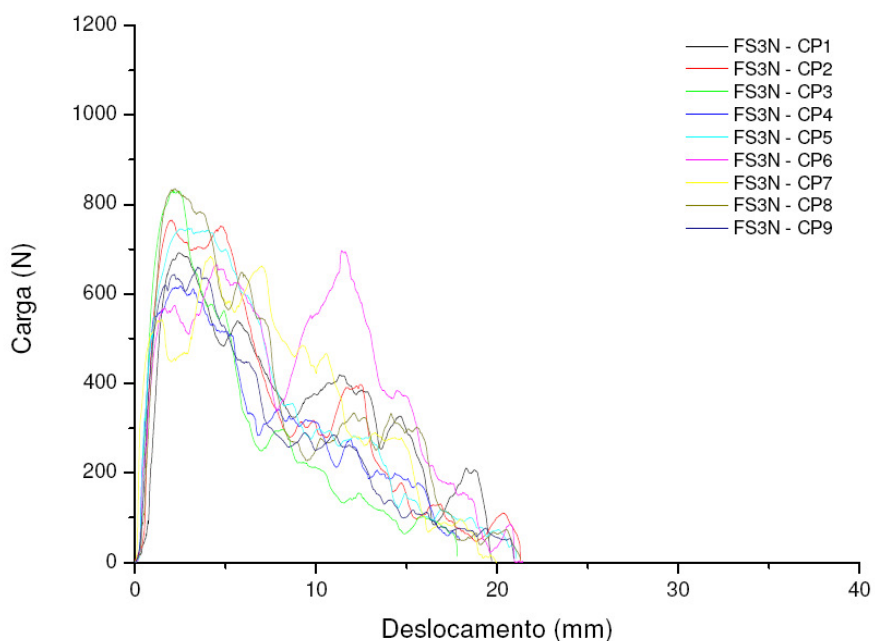


Figura 5.14 - Curvas de carga versus deslocamento na flexão dos corpos-de-prova particionados de compósito cimentício com fibras do tipo FS3N (Forma 44)

Nas figuras 5.15 e 5.16 são apresentadas de forma similar a da Figura 5.14, os resultados do ensaio de flexão utilizando as fibras FF3 com fator de forma 67 e FF4 com fator de forma 80. O fenômeno do compósito apresenta-se pseudo-dúctil também pode ser observado nas figuras 5.15 e 5.16.

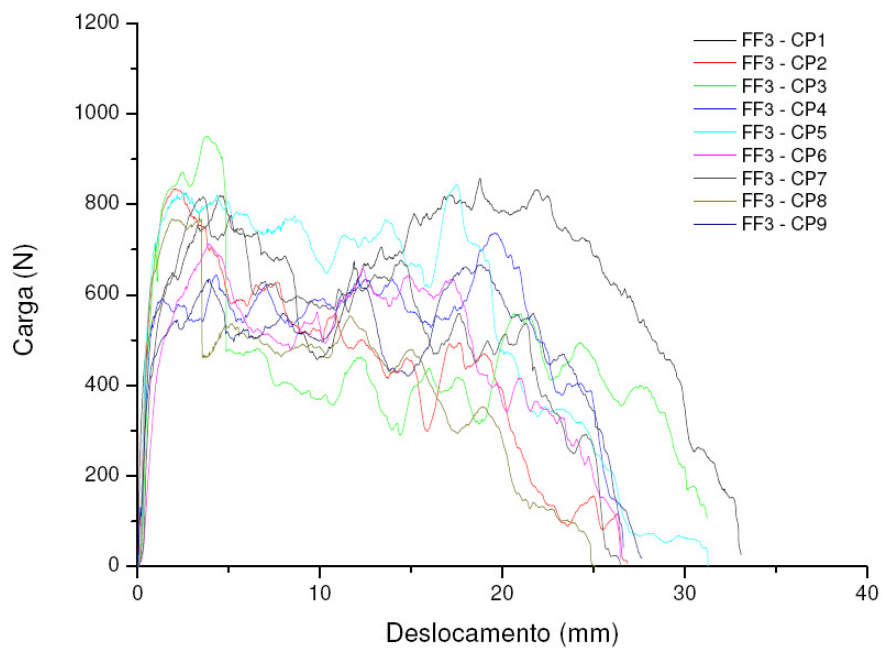


Figura 5.15 - Curvas de carga versus deslocamento na flexão dos corpos-de-prova particionados de compósito cimentício com fibras do tipo FF3 (Forma 67)

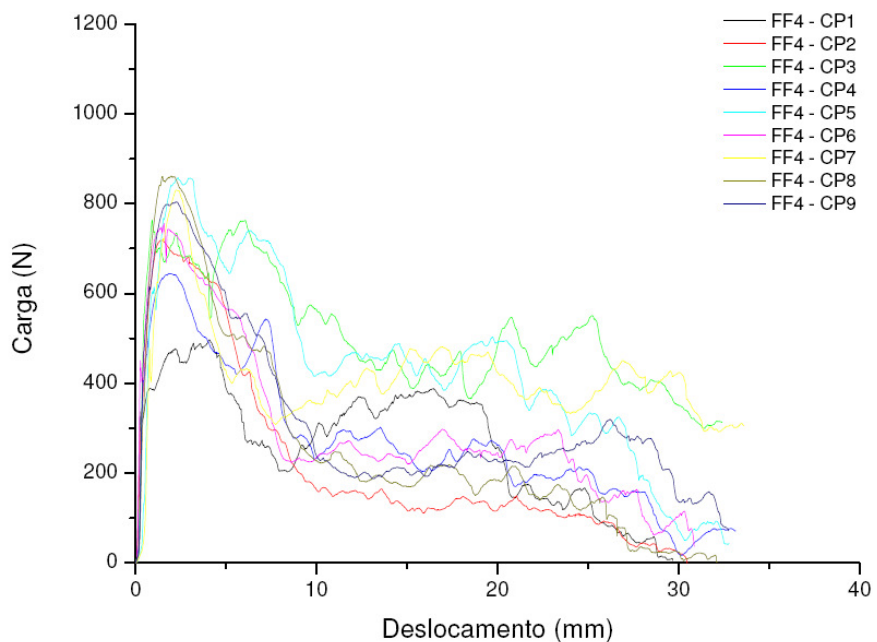


Figura 5.16 - Curvas de carga versus deslocamento na flexão dos corpos-de-prova particionados de compósito cimentício com fibras do tipo FF4 (Forma 80)

Com os dados das figuras 5.14, 5.15 e 5.16 é possível estimar a energia absorvida pelas fibras apresentadas na Figura 5.17.

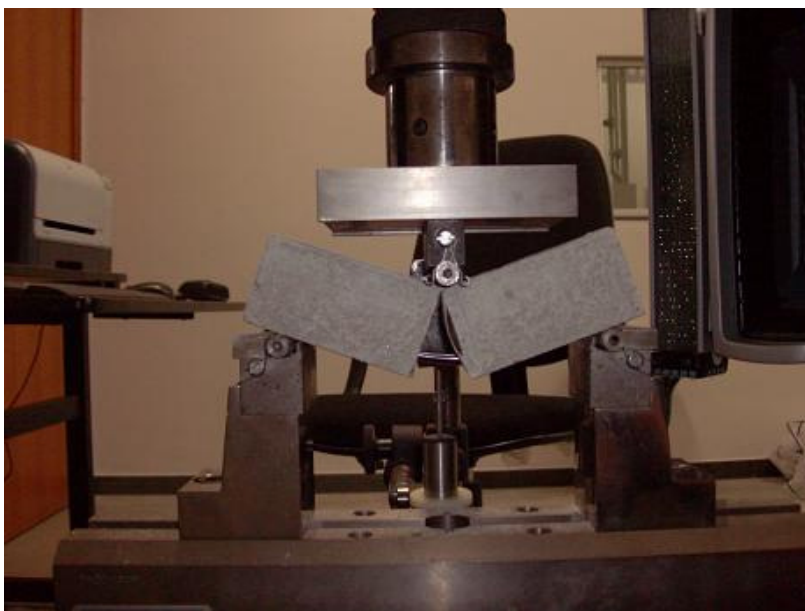


Figura 5.17 - Fibras durante o ensaio com os corpos-de-prova particionados

Na Figura 5.18 são apresentados os resultados de energia absorvida sem os dois resultados extremos, sendo que dos nove resultados, no gráfico em questão são apresentados as médias, medianas, valores máximos e mínimos apenas dos cinco valores intermediários. Percebe-se que a adição das fibras proporcionou um acréscimo significativo na energia absorvida no ensaio de flexão, mesmo os corpos-de-prova com as fibras curtas de aço são terem sido ensaiados de forma particionados, tornando assim, evidente, o aumento da tenacidade do compósito pelo acréscimo de fibras.

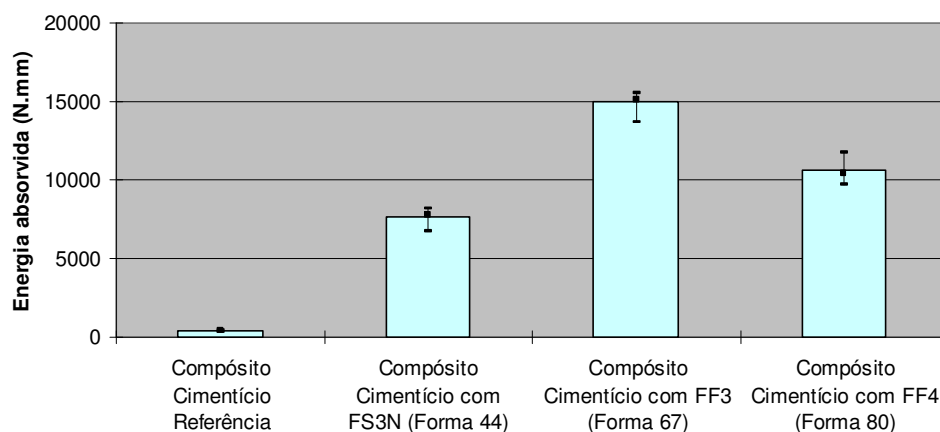


Figura 5.18 - Energia absorvida pelos corpos-de-prova



### **5.2.3 Análise microestrutural das fibras após ensaio de flexão**

Na Figura 5.19 é possível observar as imagens obtidas em microscópio óptico das fibras. Não foi possível perceber mudanças na microestrutura e na forma dos grãos de ferrita das fibras após o ensaio de flexão. Acredita-se que por as fibras já serem altamente trabalhadas a frio no processo de fabricação, o trabalho realizado durante os ensaios mecânicos tornou-se imperceptível na microscopia.

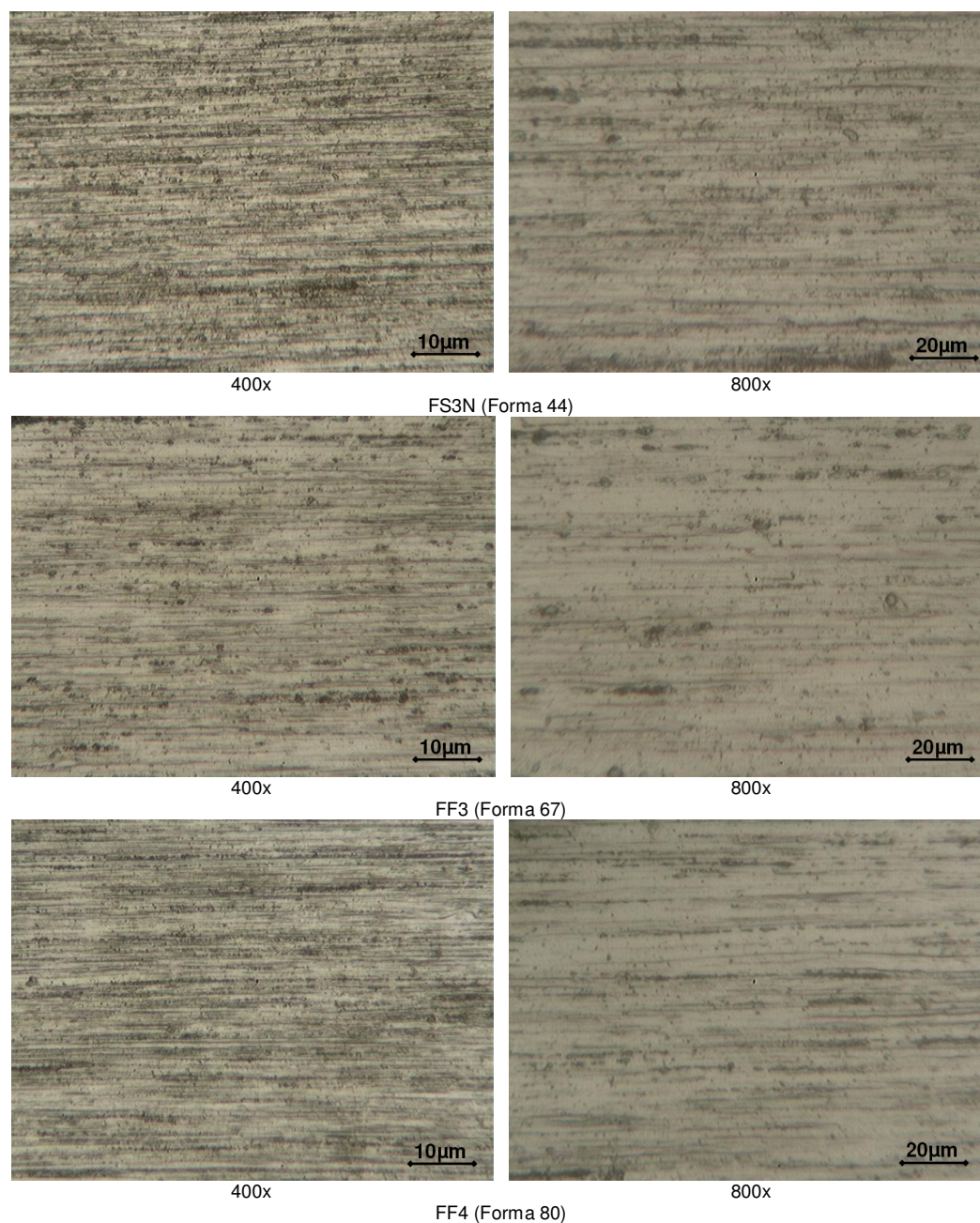


Figura 5.19 - Imagens de microscopia óptica

Na Figura 5.20 é possível observar as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da fibra FS3N (Forma 44). Não foi possível perceber mudanças na microestrutura e na forma dos grãos das fibras após o ensaio de flexão.

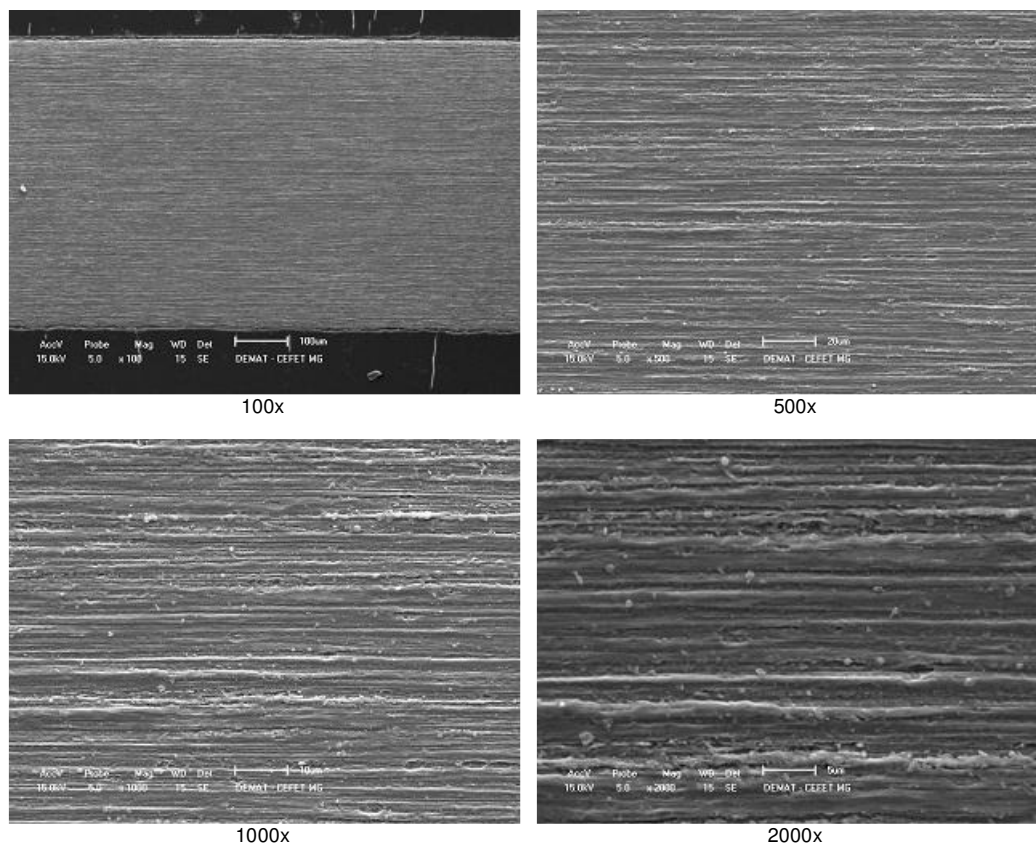


Figura 5.20 - Imagens da fibra FS3N por microscopia eletrônica de varredura

Na Figura 5.21 é possível observar as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da fibra FF3 (Forma 60).

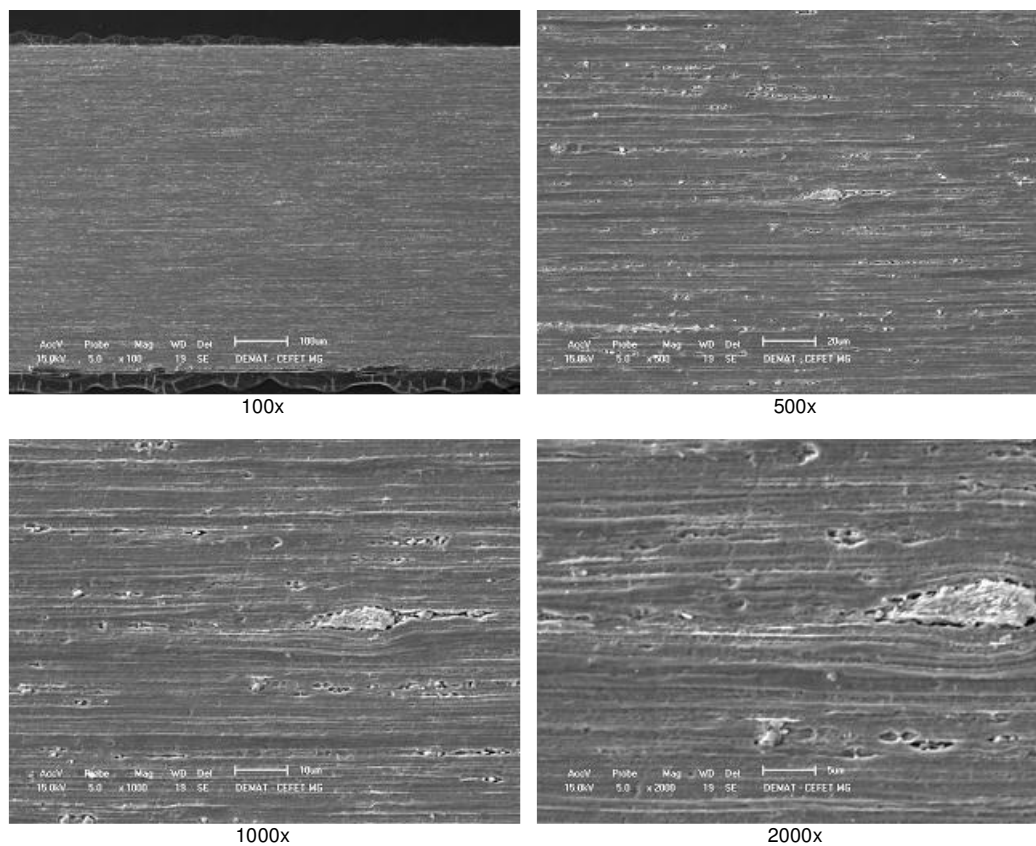


Figura 5.21 - Imagens da fibra FF3 por microscopia eletrônica de varredura

Na Figura 5.22 é possível observar as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da fibra FF4 (Forma 80).

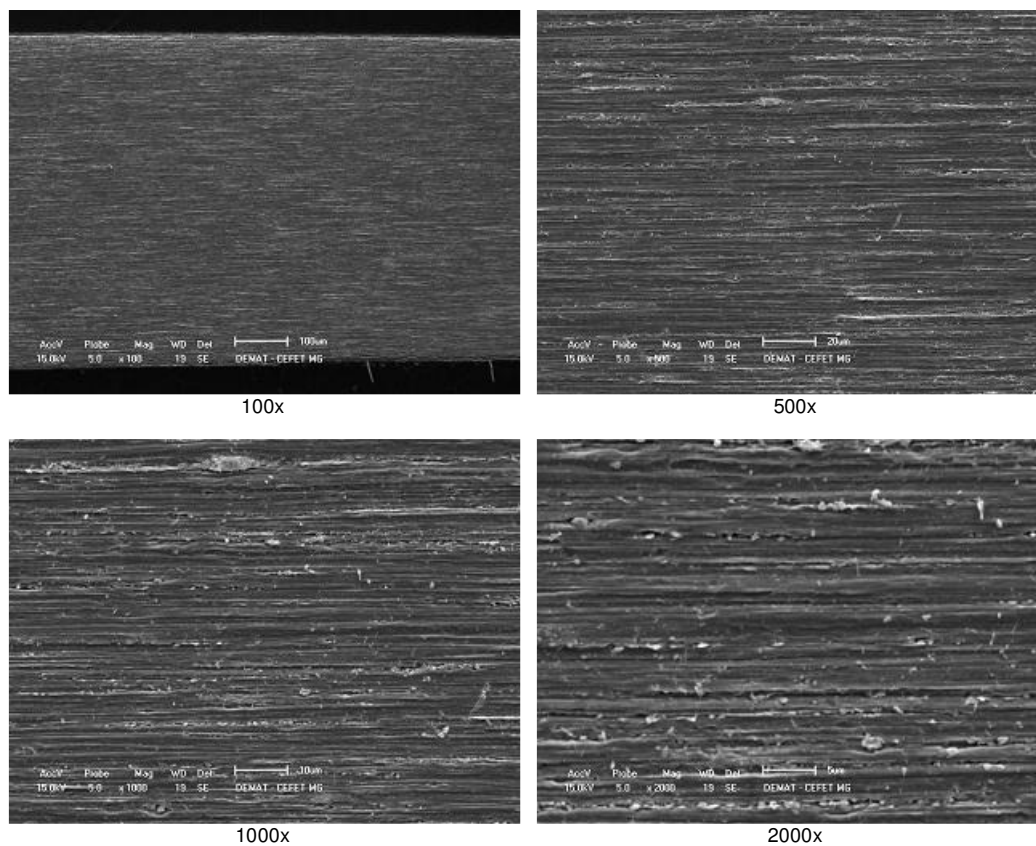


Figura 5.22 - Imagens da fibra FF4 por microscopia eletrônica de varredura

#### 5.2.4 Análise dimensional das fibras após ensaio de flexão

Foi realizada uma análise dimensional dos três modelos de fibras utilizadas após os ensaios de flexão nos corpos-de-prova particionados de compósito cimentício. Na Figura 5.23 são apresentadas as medidas realizadas do diâmetro médio das fibras antes e após os ensaios de flexão. As fibras ensaiadas apresentaram uma leve redução no diâmetro.

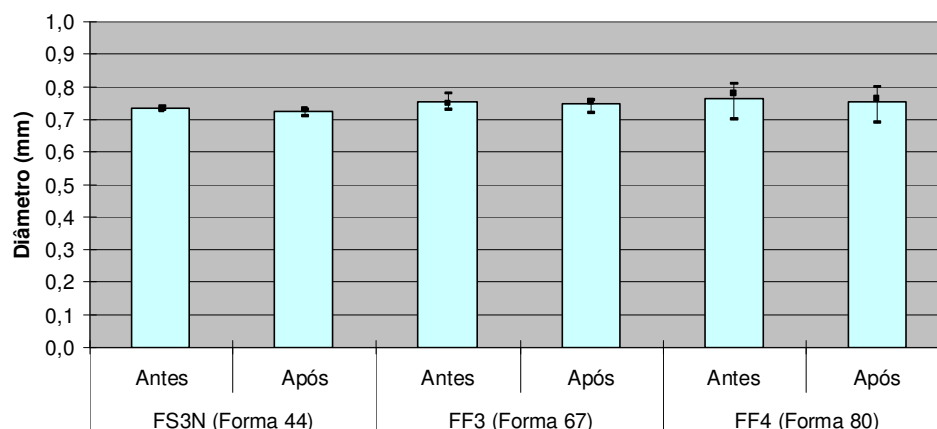


Figura 5.23 - Diâmetro médio das fibras

Na Figura 5.24 são apresentadas as medidas realizadas do comprimento das fibras antes e após os ensaios de flexão.

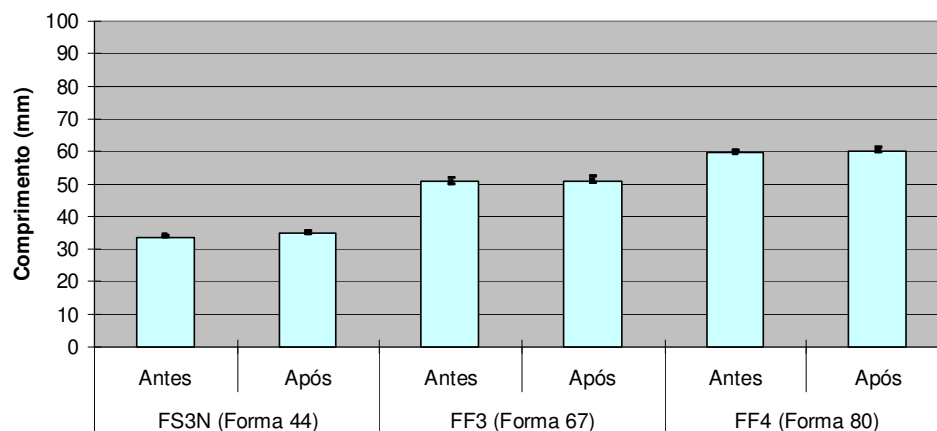


Figura 5.24 - Comprimento das fibras

É válido ressaltar que as fibras, conforme apresentado anteriormente, possuem curvaturas próximas as extremidades. Essas curvaturas auxiliam na aderência das fibras com a matriz cimentícia. Durante os ensaios de flexão nos corpos-de-prova particionados, as fibras deslizaram somente em um dos lados, ou seja, as mesmas ficaram engastadas em uma metade e deslizaram na outra metade. O lado da fibra que deslizou teve suas dobras esticadas. Na Figura 5.25 é possível observar as extremidades das fibras FS3N, FF3 e FF4 antes e após do ensaio de flexão.



Não ensaiadas

FS3N

Ensaçadas



Não ensaiadas

FF3

Ensaçadas



Não ensaiadas

FF4

Ensaçadas

Figura 5.25 - Extremidades das fibras antes e após aos ensaios

## 5.3 Comportamento do concreto com fibras

### 5.3.1 Trabalhabilidade dos concretos

Os concretos desenvolvidos, ainda no estado fresco, passaram pelo ensaio de abatimento em tronco de cone (Slump test). Na Figura 5.26 é possível observar que os concretos com adição de fibras curtas de aço tiveram seu abatimento em tronco de cone reduzido. É possível observar também que os concretos com adição de fibras apresentaram menores abatimentos para as maiores relações de forma das fibras adicionadas.

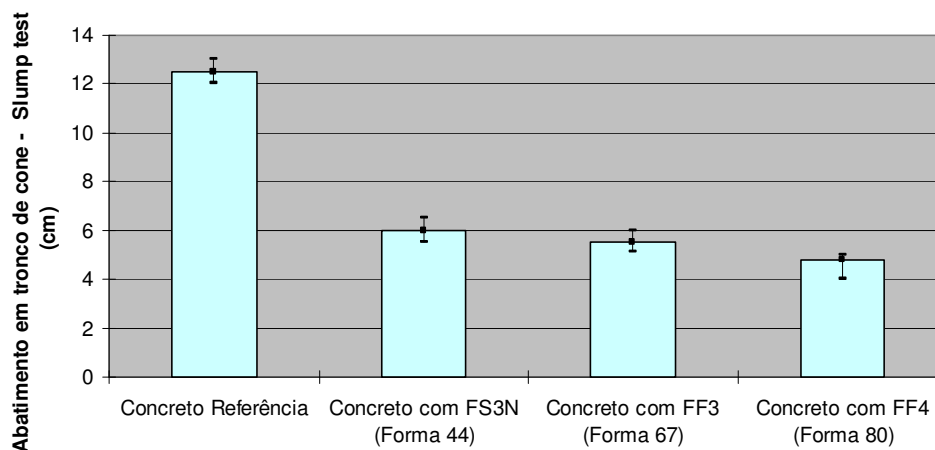


Figura 5.26 - Abatimento em tronco de cone

### 5.3.2 Concreto cru com fibras

Na Figura 5.27 é possível observar a média, a mediana, os valores máximo e o mínimo de resistência à compressão alcançados antes do aquecimento dos concretos produzidos. O concreto reforçado com as fibras FS3N apresentou resistência à compressão ligeiramente superior ao concreto de referência sem fibras, aproximadamente 3%. O concreto reforçado com as fibras FF3 e FF4



apresentaram resistência à compressão inferiores ao concreto de referência, cerca de 93 e 81% do mesmo, respectivamente. Estas diferenças nos resultados de resistência à compressão dos concretos não se apresentaram de forma relevante.

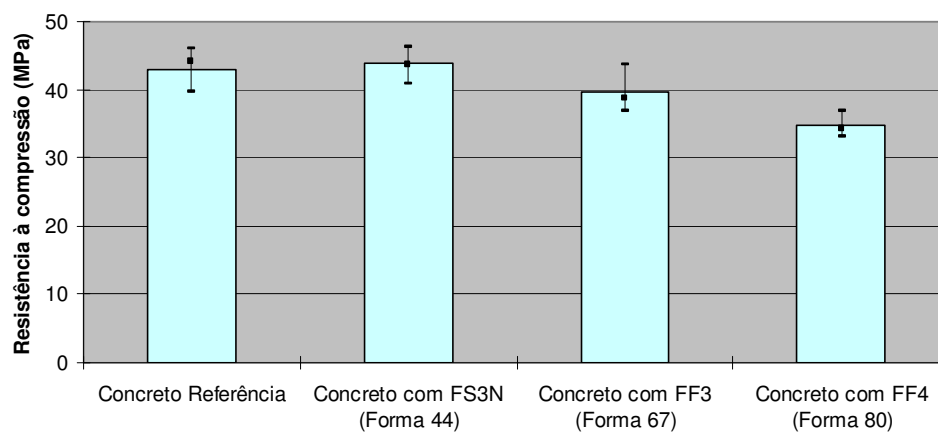


Figura 5.27 - Resistência à compressão dos concretos

Conforme citado na revisão bibliográfica, o objetivo da adição de fibras ao concreto não é alterar a resistência à compressão do mesmo, na maioria das vezes a resistência à compressão não é muito alterada com a adição de fibras, podendo haver casos em que há um decréscimo no valor da resistência (LOBÃO, 2005).

Na Figura 5.28 é possível observar os valores de resistência à tração na compressão diametral alcançados antes do aquecimento dos concretos produzidos. Os concretos reforçados com as fibras apresentaram resistência à tração na compressão diametral superior ao concreto de referência sem fibras, aproximadamente. O concreto reforçado com as fibras FS3N, FF3 e FF4 apresentaram resistência à tração superiores ao concreto de referência cerca de 77, 128 e 98% do mesmo, respectivamente.

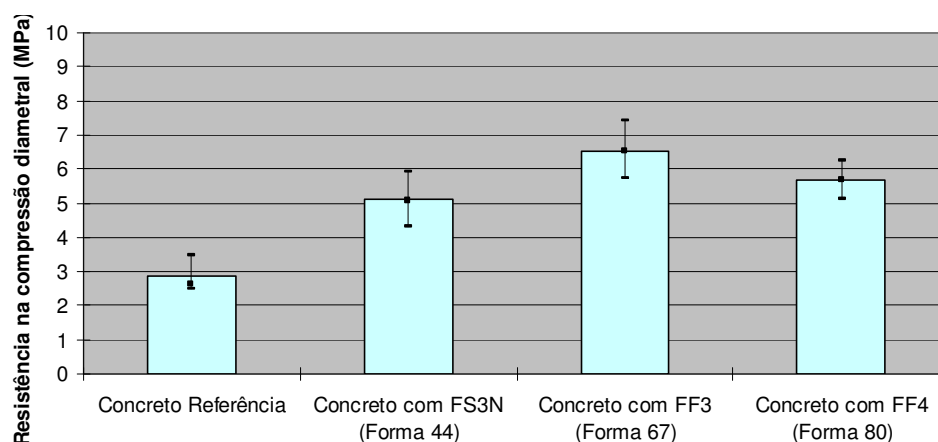


Figura 5.28 - Resistência à tração na compressão diametral dos concretos

Avaliando o comprimento das fibras e a dimensão máxima do agregado percebe-se que a fibra que apresenta relação ideal é a do modelo FF3 e no limite da relação tem a fibra do modelo FF4, segundo SARZALEJO *et al.* (2009), que sugeriu que o comprimento da fibra selecionada deverá ser maior que dobro da dimensão máxima dos agregados com tolerância de 20%. Avaliando o comprimento das fibras e a dimensão mínima do elemento estrutural, que nesse caso é o diâmetro do corpo-de-prova cilíndrico percebe-se que os três modelos de fibras estão dentro dos parâmetros de SARZALEJO *et al.* (2009), que diz que a dimensão mínima do elemento estrutural deve ser pelo menos uma vez e meia do comprimento da fibra, mas a fibra FF4 está bem perto do limite. Na Tabela 5.2 são apresentados os valores das relações e esses justificam os resultados da Figura 5.28.

Tabela 5.2 - Relações do comprimento das fibras, dimensão máxima do agregado e dimensão mínima do elemento estrutural

Denominação	Comprimento da fibra (mm)	Dimensão máxima do agregado (mm)	Dimensão mínima do elemento estrutural (mm)	(d) = (a) / (b) Condição ideal	(e) = 1,5 x (a) Condição ideal
	(a)	(b)	(c)	$1,6 < d < 2,4$	(c) > (e)
FS3N	33,0	25,0	100,0	1,32	50
FF3	50,0	25,0	100,0	2	75
FF4	60,0	25,0	100,0	2,4	90

Na Figura 5.29 é possível observar os valores de resistência à tração na flexão alcançados antes do aquecimento dos concretos produzidos. Os concretos reforçados com as fibras apresentaram resistência à tração na compressão diametral superior ao concreto de referência sem fibras. O concreto reforçado com as fibras FS3N, FF3 e FF4 apresentaram resistência à tração superiores ao concreto de referência cerca de 8, 85 e 123% do mesmo, respectivamente.

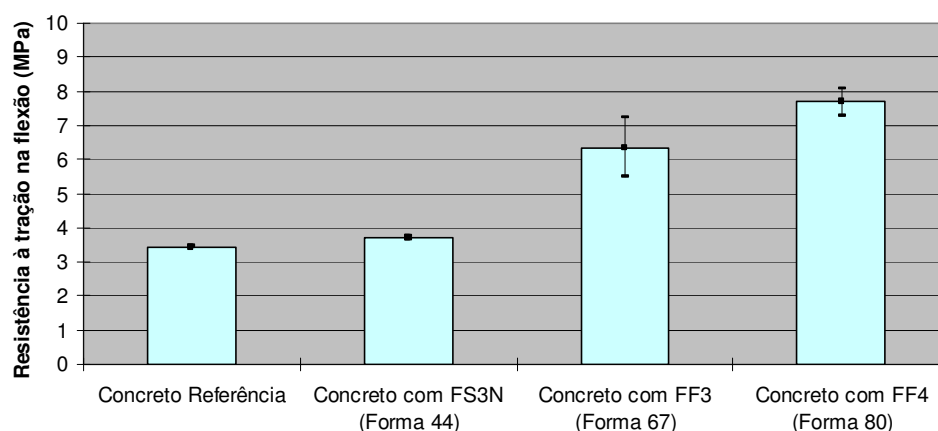


Figura 5.29 - Resistência à tração na flexão dos concretos

Fazendo a mesma avaliação dos resultados do ensaio de resistência à tração na compressão diametral percebe-se que a fibra que apresenta relação ideal é a do modelo FF3 e no limite da relação tem a fibra do modelo FF4. Avaliando o comprimento das fibras e a dimensão mínima do elemento estrutural, que nesse caso é a largura e o comprimento do corpo-de-prova prismático, percebe-se que os três modelos de fibras estão dentro dos parâmetros de SARZALEJO *et al.* (2009). Na Tabela 5.2 são apresentados os valores das relações e esses justificam os resultados da Figura 5.29.

Percebe-se que tanto para os ensaios de resistência à tração na compressão diametral, quanto para o ensaio de resistência à tração na flexão, as fibras FS3N estão fora do parâmetro proposto por SARZALEJO *et al.* (2009), que sugeriu que o comprimento da fibra selecionada deverá ser maior que dobro da dimensão máxima dos agregados com tolerância de 20%.

Tabela 5.3 - Relações do comprimento das fibras, dimensão máxima do agregado e dimensão mínima do elemento estrutural

Denominação	Comprimento da fibra (mm)	Dimensão máxima do agregado (mm)	Dimensão mínima do elemento estrutural (mm)	(d) = (a) / (b)	(e) = 1,5 x (a)
	(a)	(b)	(c)	Condição ideal $1,6 < d < 2,4$	Condição ideal $(c) > (e)$
FS3N	33,0	25,0	150,0	1,32	50
FF3	50,0	25,0	150,0	2	75
FF4	60,0	25,0	150,0	2,4	90

Na Figura 5.30 são apresentados os gráficos carga versus flecha do ensaio de flexão dos corpos-de-prova prismáticos 15x15x50cm de concretos sem fibras antes do aquecimento.

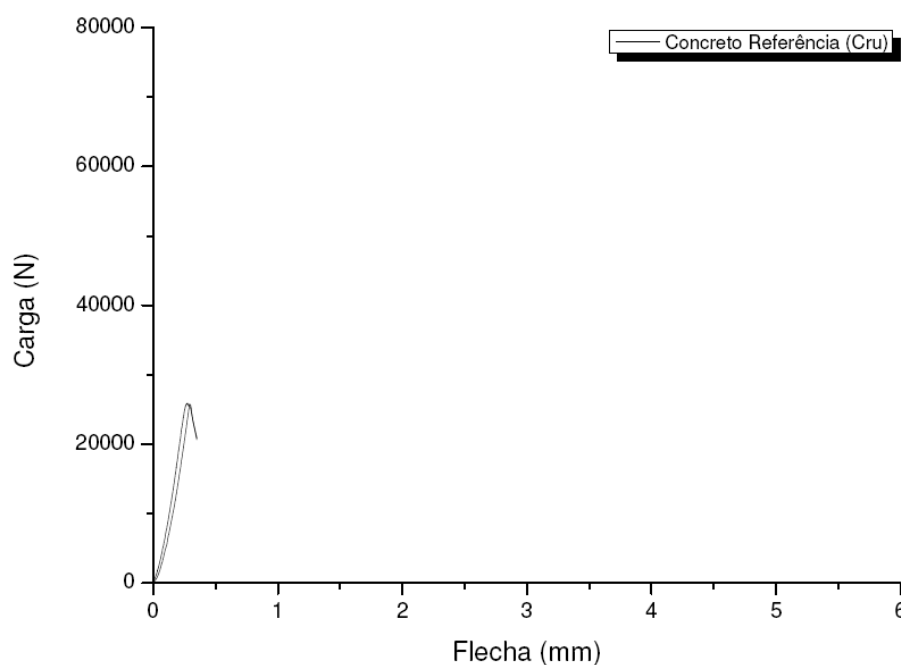


Figura 5.30 - Gráfico carga versus flecha do ensaio de flexão do concreto sem fibras

Na Figura 5.31 é possível observar que o corpo-de-prova prismático de concreto sem o reforço com fibras curtas de aço apresentou somente uma trinca significativa após o ensaio de flexão.



Figura 5.31 - Fissuração do concreto de referência após o ensaio de flexão

Na Figura 5.32 são apresentados os gráficos carga versus flecha do ensaio de flexão dos corpos-de-prova prismáticos de 15x15x50cm de concretos reforçados com fibras FS3N (Forma 40).

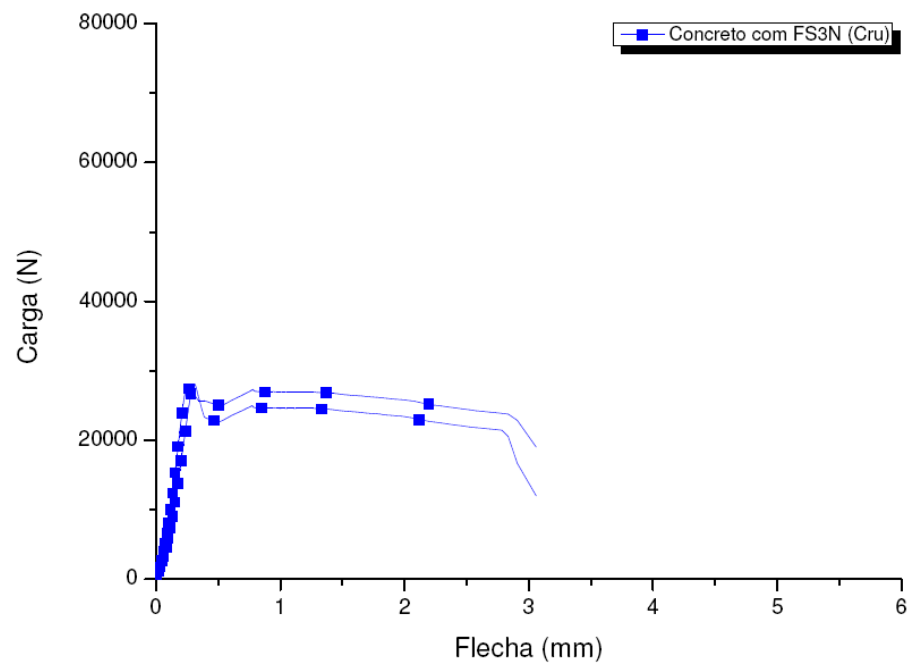


Figura 5.32 - Gráfico carga versus flecha do ensaio de flexão dos concretos reforçados com fibras FS3N (Forma 40)

Pode-se perceber analisando as figuras 5.30 e 5.32 que os corpos-de-prova reforçados com a fibra FS3N apresentaram resistências à tração na flexão bem próximas dos valores obtidos pelos corpos-de-prova do concreto de referência sem reforço. Isso pode se dar ao fato do não atendimento da relação do comprimento da fibra e a dimensão máxima do agregado, prejudicando assim a costura obtida pelas fibras que é citada na Figura 3.21 e na Figura 3.22.

Na Figura 5.33 é possível observar que o corpo-de-prova prismático de concreto reforçado com fibras curtas de aço FN3S apresentou uma trinca aparentemente com derivações, o que poderia indicar maior absorção de energia.



Figura 5.33 - Fissuração do concreto reforçado com a fibra FS3N após o ensaio de flexão

Na Figura 5.34 são apresentados os gráficos carga versus flecha do ensaio de flexão dos corpos-de-prova prismáticos de 15x15x50cm de concretos reforçados com fibras FF3 (Forma 67). Os corpos-de-prova de concreto reforçado com a fibra curta de aço FF3 apresentaram resultados de carregamento no ensaio resistência à tração na flexão superiores aos resultados obtidos pelo concreto referência e ao concreto reforçado com a fibra

curta de aço FS3N. Isto, provavelmente, se deve ao fato da fibra FF3 apresentar uma melhor relação do comprimento da fibra e a dimensão máxima do agregado graúdo.

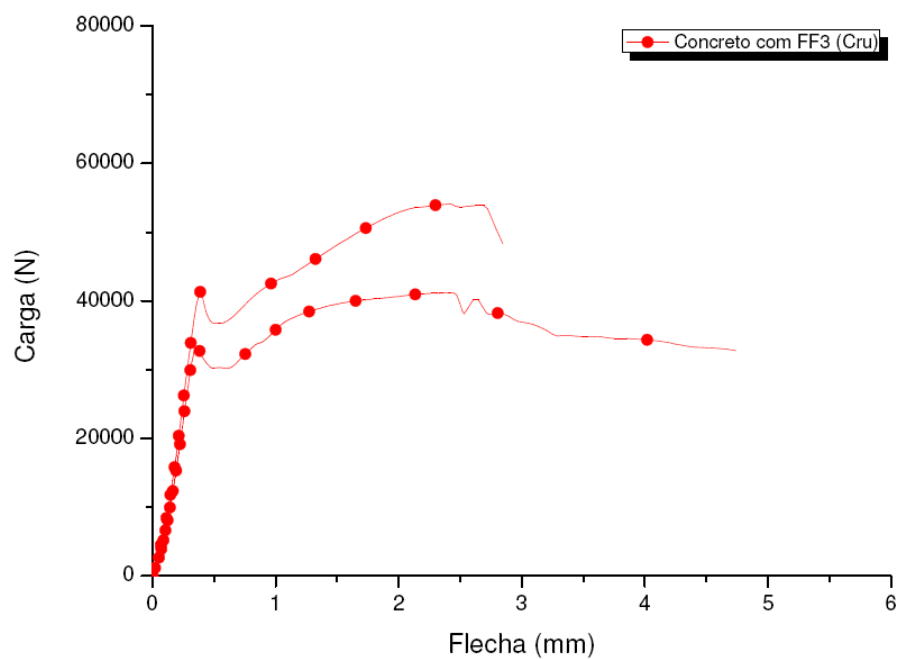


Figura 5.34 - Gráfico carga versus flecha do ensaio de flexão dos concretos reforçados com fibras FF3 (Forma 67)

Na Figura 5.35 é possível observar que o corpo-de-prova prismático de concreto reforçado com fibras curtas de aço FF3 apresentou uma trinca aparentemente com pequenas derivações.



Figura 5.35 - Fissuração do concreto reforçado com a fibra FF3 após o ensaio de flexão

Na Figura 5.36 são apresentados os gráficos carga versus flecha do ensaio de flexão dos corpos-de-prova prismáticos de 15x15x50cm de concretos reforçados com fibras FF4 (Forma 80). Os corpos-de-prova de concreto reforçado com a fibra curta de aço FF4 apresentaram resultados de carregamento no ensaio resistência à tração na flexão superiores aos resultados obtidos pelo concreto referência e ao concreto reforçado com a fibra curta de aço FS3N e FF3. Isto, provavelmente, se deve ao fato da fibra FF4 apresentar uma melhor relação do comprimento da fibra e a dimensão máxima do agregado graúdo e também uma maior relação de forma que as demais fibras.



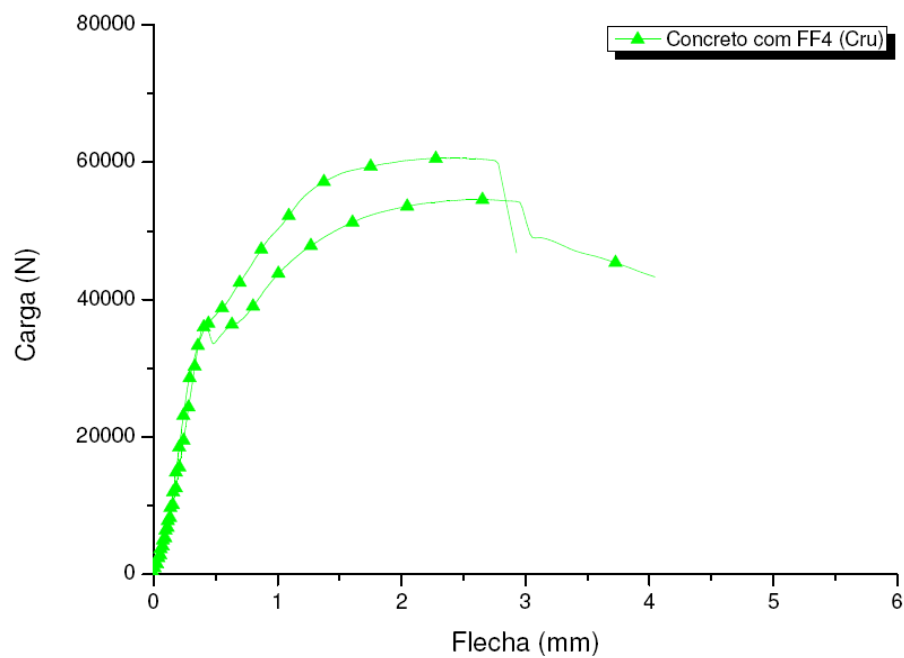


Figura 5.36 - Gráfico carga versus flecha do ensaio de flexão dos concretos reforçados com fibras FF4 (Forma 80)

Na Figura 5.37 é possível observar que o corpo-de-prova prismático de concreto reforçado com fibras curtas de aço FF4 apresentou uma trinca aparentemente com pequenas derivações.



Figura 5.37 - Fissuração do concreto reforçado com a fibra FF4 após o ensaio de flexão

Na Figura 5.38 é possível observar as curvas de carregamento versus flecha do ensaio de flexão dos concretos reforçados. Avaliando as curvas, percebe-se que os corpos-de-prova com as fibras FF4 absorveram mais energia que os demais, fenômeno que provavelmente está relacionado com o comprimento da fibra e relação de forma, uma vez que para a fibra FF4 ambos são maiores.

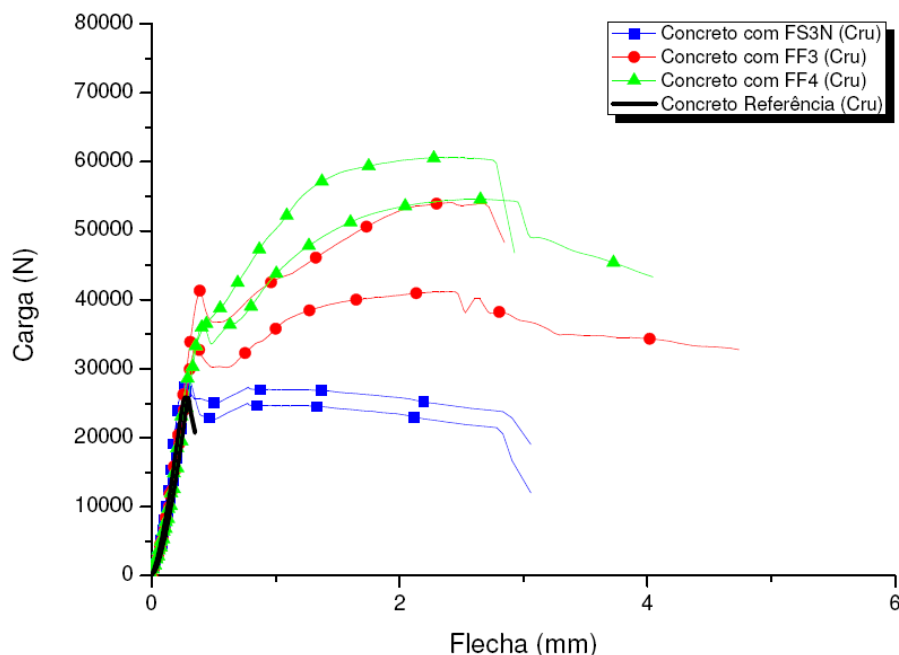


Figura 5.38 - Curvas de carregamento versus flecha do ensaio de flexão dos concretos reforçados.

Na Figura 5.39 são apresentados os resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos produzidos. Apesar de NILI and AFROUGHSABET (2012) apresentarem resultados de frequência dinâmica superiores para concretos com a adição de fibras de aço, fato justificado por eles devido restrição das fissuras dos concretos, os resultados apresentados neste trabalho não apresentam essa tendência.

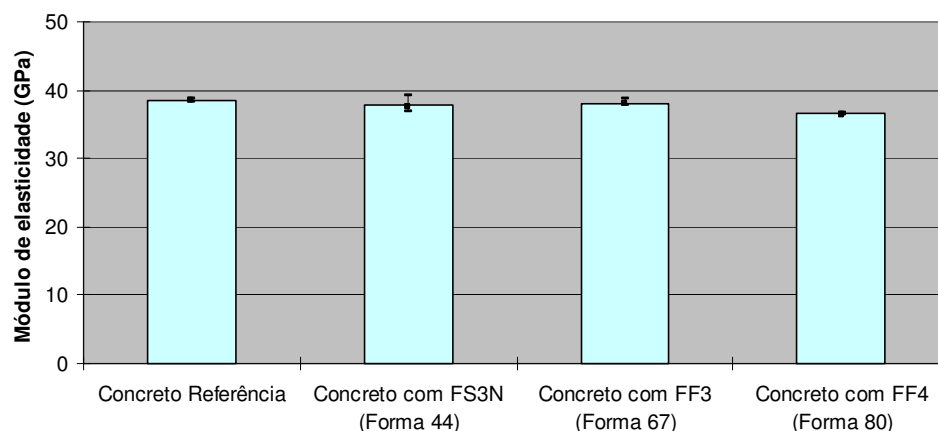


Figura 5.39 - Módulo de elasticidade dinâmico dos concretos

Na Figura 5.40 são apresentados os resultados de módulo de elasticidade estático em tangente inicial dos concretos produzidos. Percebe-se que os concretos reforçados com fibras curtas de aço apresentaram módulo de elasticidade estático levemente inferior ao concreto referência. Acredita-se que esse fenômeno ocorra devido ao aumento de interfaces ocorrido pela adição das fibras.

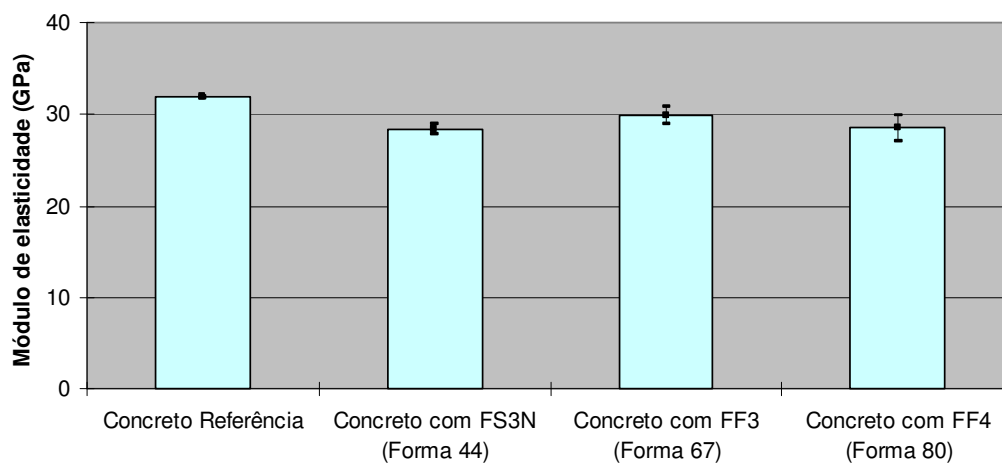


Figura 5.40 - Módulo de elasticidade estático dos concretos crus

### 5.3.3 Concreto submetido à alta temperatura com fibras

Na Figura 5.41 é possível observar os valores de resistência à compressão alcançados após o aquecimento dos concretos produzidos. Os concretos reforçados com as fibras apresentaram resistência à compressão superior ao concreto de referência sem fibras. Os concretos reforçados com as fibras FS3N, FF3 e FF4 apresentaram resistência superiores ao concreto de referência cerca de 45, 53 e 46% do mesmo, respectivamente.

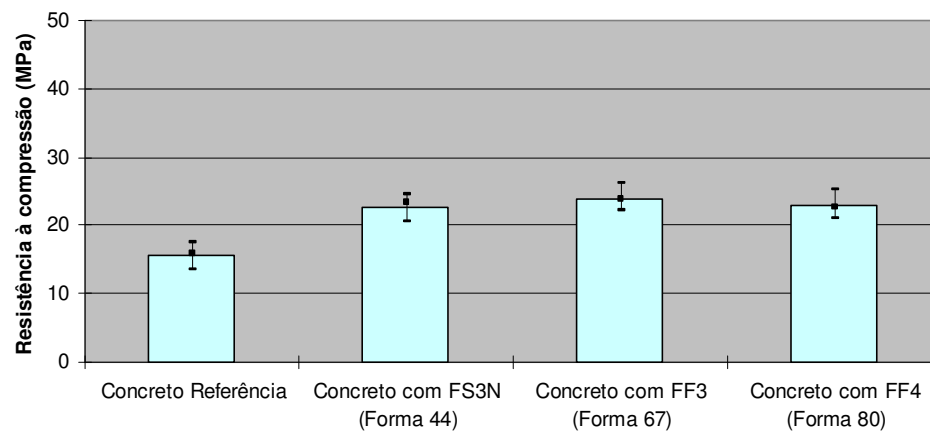


Figura 5.41 - Resistência à compressão dos concretos submetidos à alta temperatura

Na Figura 5.42 é possível observar os valores de resistência à tração na compressão diametral alcançados após o aquecimento dos concretos produzidos. Os concretos reforçados com as fibras apresentaram resistência à tração na compressão diametral superior ao concreto de referência sem fibras. O concreto reforçado com as fibras FS3N, FF3 e FF4 apresentaram resistência superiores ao concreto de referência cerca de 105, 149 e 154% do mesmo, respectivamente.

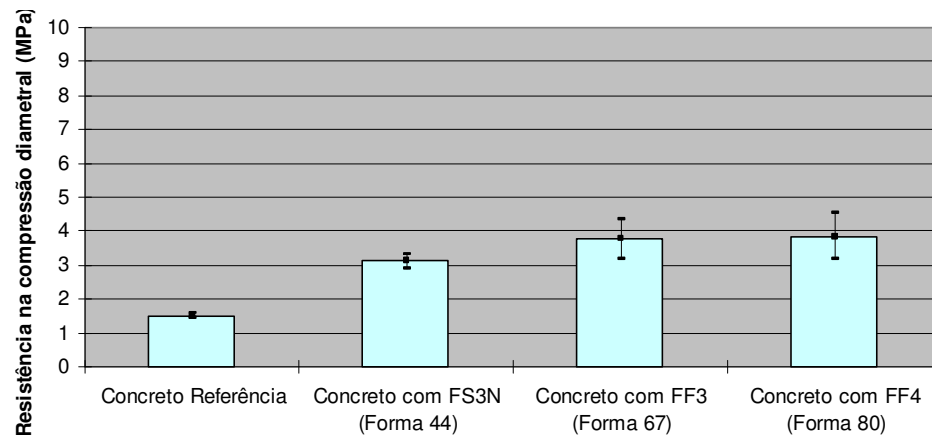


Figura 5.42 - Resistência à tração na compressão diametral dos concretos submetidos à alta temperatura

Na Figura 5.43 é possível observar os valores de resistência à tração na flexão alcançados após o aquecimento dos concretos produzidos. Os concretos reforçados com as fibras apresentaram resistência à tração na flexão superior ao concreto de referência sem fibras. O concreto reforçado com as fibras FS3N, FF3 e FF4 apresentaram resistência superiores ao concreto de referência cerca de 56, 216 e 208% do mesmo, respectivamente.

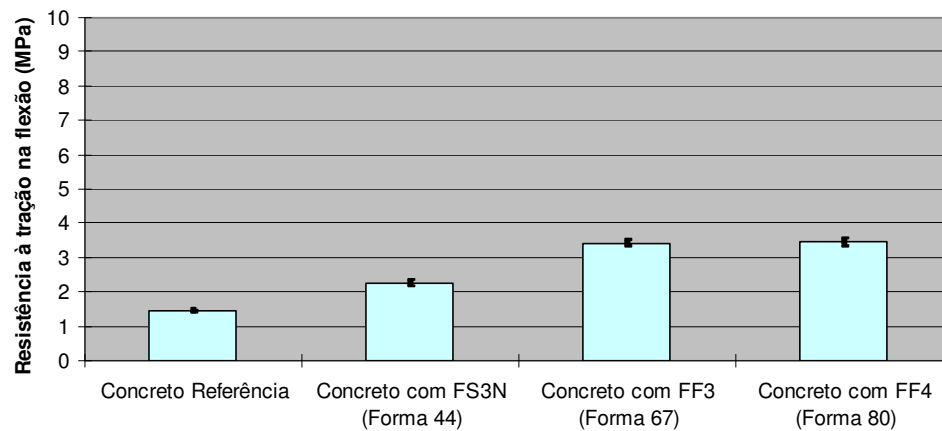


Figura 5.43 - Resistência à tração na flexão dos concretos submetidos à alta temperatura

Na Figura 5.44 são apresentados os gráficos carga versus flecha do ensaio de flexão dos corpos-de-prova prismáticos 15x15x50cm de concretos sem fibras após o aquecimento.

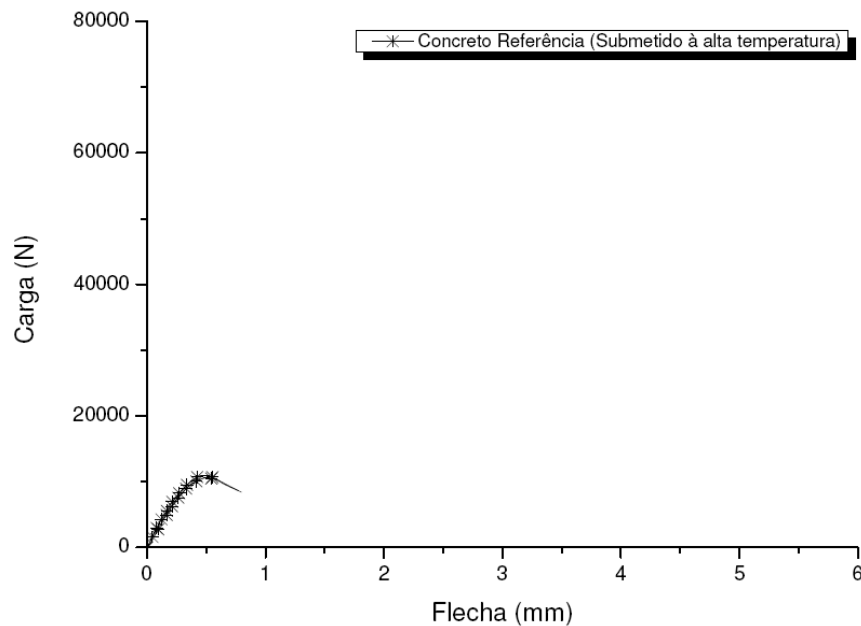


Figura 5.44 - Gráfico carga versus flecha do ensaio de flexão do concreto submetido à alta temperatura sem fibras

Na Figura 5.45 são apresentados os gráficos carga versus flecha do ensaio de flexão dos corpos-de-prova prismáticos de 15x15x50cm de concretos reforçados com fibras FS3N (Forma 40) submetidos à alta temperatura.

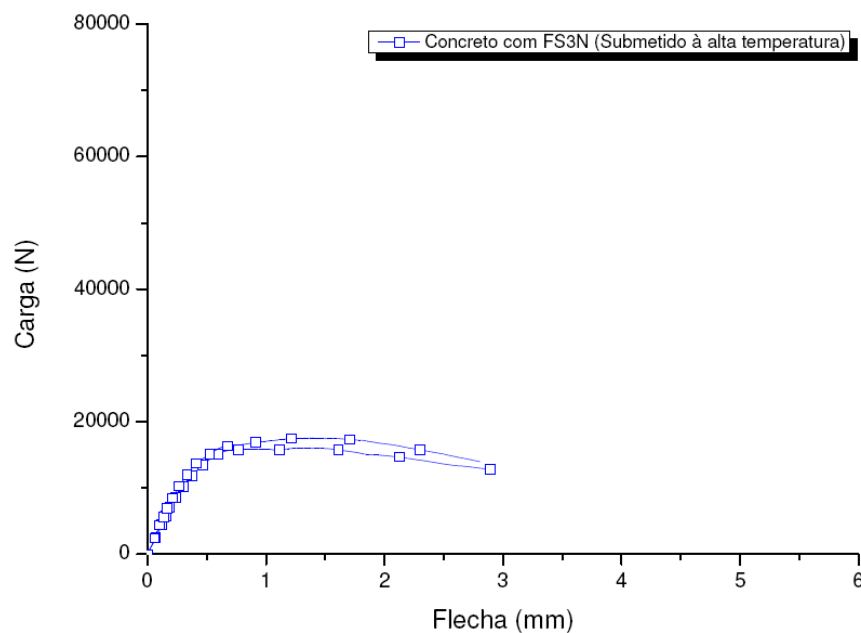


Figura 5.45 - Gráfico carga versus flecha do ensaio de flexão dos concretos reforçados com fibras FS3N (Forma 40) submetidos à alta temperatura

Na Figura 5.46 são apresentados os gráficos carga versus flecha do ensaio de flexão dos corpos-de-prova prismáticos de 15x15x50cm de concretos reforçados com fibras FF3 (Forma 67) submetidos à alta temperatura.

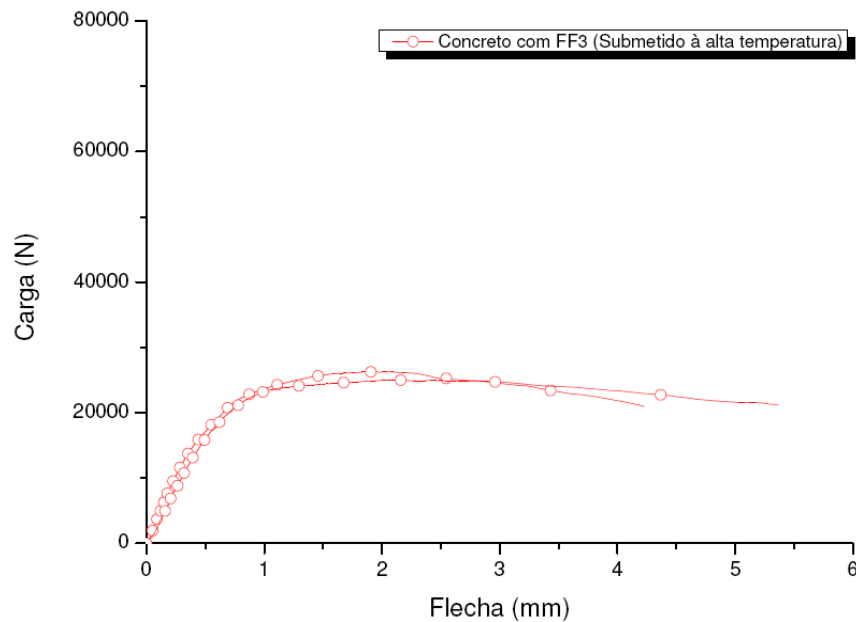


Figura 5.46 - Gráfico carga versus flecha do ensaio de flexão dos concretos reforçados com fibras FF3 (Forma 67) submetidos a alta temperatura

Na Figura 5.47 são apresentados os gráficos carga versus flecha do ensaio de flexão dos corpos-de-prova prismáticos de 15x15x50cm de concretos reforçados com fibras FF4 (Forma 80) submetidos à alta temperatura.

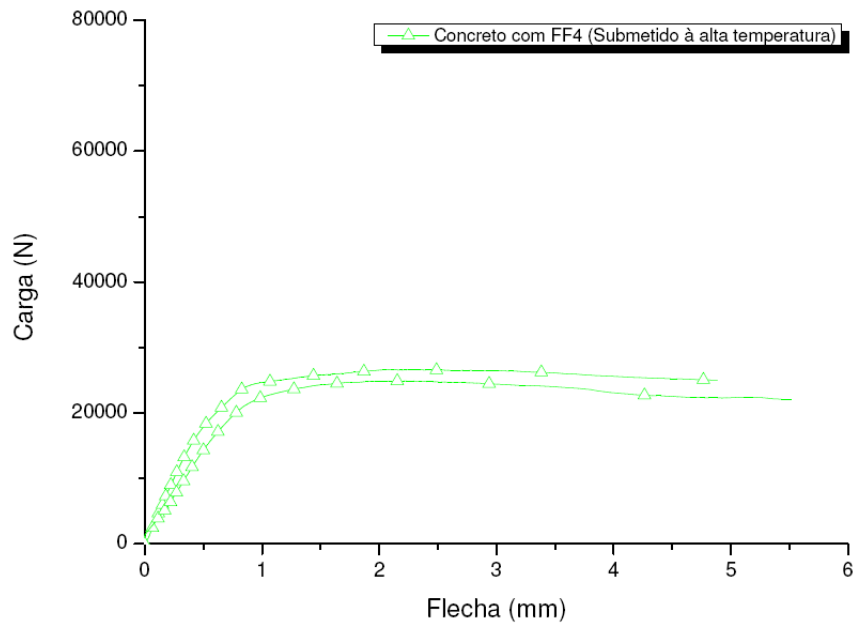


Figura 5.47 - Gráfico carga versus flecha do ensaio de flexão dos concretos reforçados com fibras FF4 (Forma 80) submetidos à alta temperatura

Na Figura 5.48 é possível observar as curvas de carregamento versus flecha do ensaio de flexão dos concretos reforçados submetidos à alta temperatura.

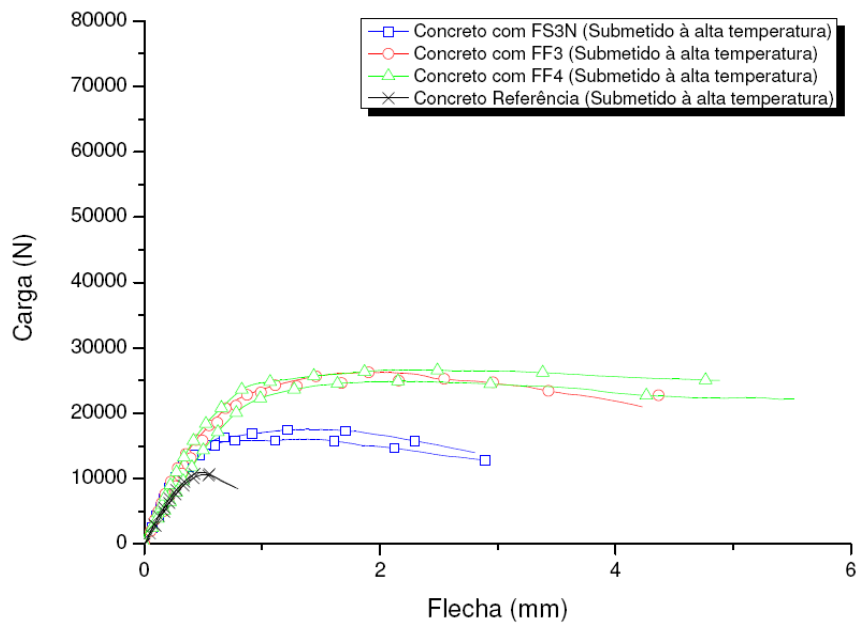


Figura 5.48 - Curvas de carregamento versus flecha do ensaio de flexão dos concretos reforçados submetidos à alta temperatura



Na Figura 5.49 é possível observar que o corpo-de-prova prismático de concreto reforçado com fibras curtas de aço FF4 submetido à alta temperatura apresentou uma trinca aparentemente com um número maior de derivações que os corpos-de-prova crus. Este fenômeno se repetiu em todos os corpos-de-prova que foram submetidos à alta temperatura.



Figura 5.49 - Fissuração do concreto reforçado com a fibra FF4 aquecido após o ensaio de flexão

É válido ressaltar que os corpos-de-prova com fibras tiveram seus ensaios interrompidos ainda resistindo ao carregamento devido ao final de curso do extensômetro. É tanto que observando a Figura 5.48 não é possível observar uma perda brusca na capacidade de suportar cargas para interrupção dos ensaios.

Na Figura 5.50 são apresentados os resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos submetidos à altas temperaturas. Os concretos apresentaram a média aproximada de módulo de elasticidade de 11, 10, 11 e 12 para o referência, FS3N, FF3 e FF4, respectivamente.

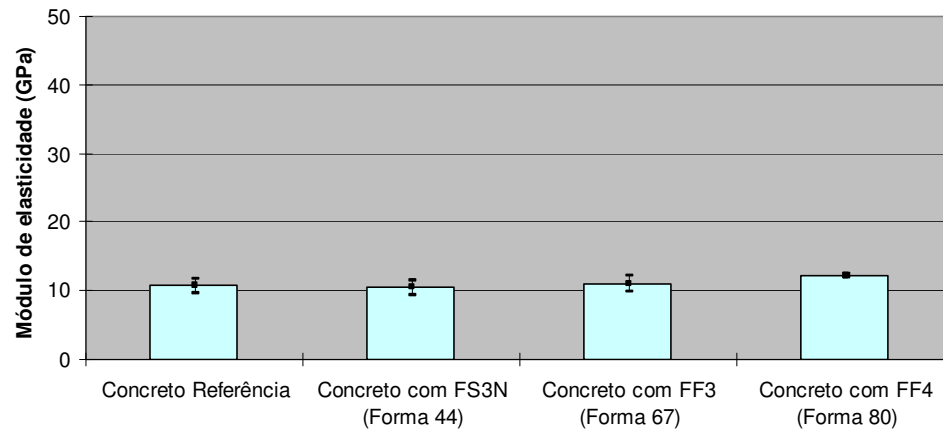


Figura 5.50 - Módulo de elasticidade dinâmico dos concretos submetidos à alta temperatura

Na Figura 5.51 são apresentados os resultados de módulo de elasticidade estático em tangente inicial dos concretos produzidos e submetidos à alta temperatura. Percebe-se que os todos os concretos tiveram seu módulo de elasticidade estático reduzido significadamente, mas os concretos reforçados com fibras curtas de aço apresentaram módulo de elasticidade estático levemente superior ao concreto referência.

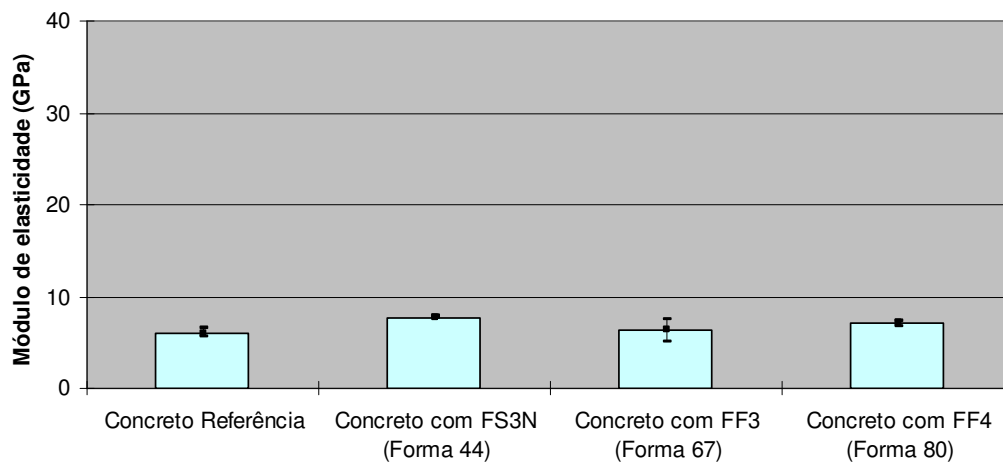


Figura 5.51 - Módulo de elasticidade estático dos concretos submetidos à alta temperatura

### 5.3.4 Comparação entre os concretos

Na Figura 5.52 é possível comparar os resultados de resistência à compressão dos concretos crus e submetidos à alta temperatura. Percebe-se que os concretos com e sem o reforço com fibras de aço tiveram substancial redução na resistência à compressão após o aquecimento.

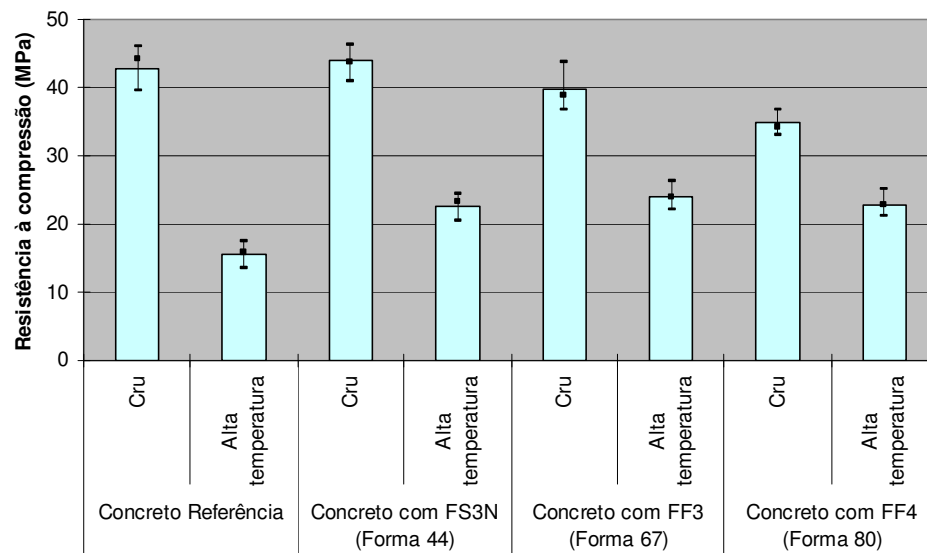


Figura 5.52 - Resistência à compressão dos concretos crus e submetidos à alta temperatura

Como todos os concretos obtiveram redução da resistência à compressão após o aquecimento, a Figura 5.53 apresenta o percentual de resistência residual. A resistência à compressão residual foi proporcional ao fator de forma.

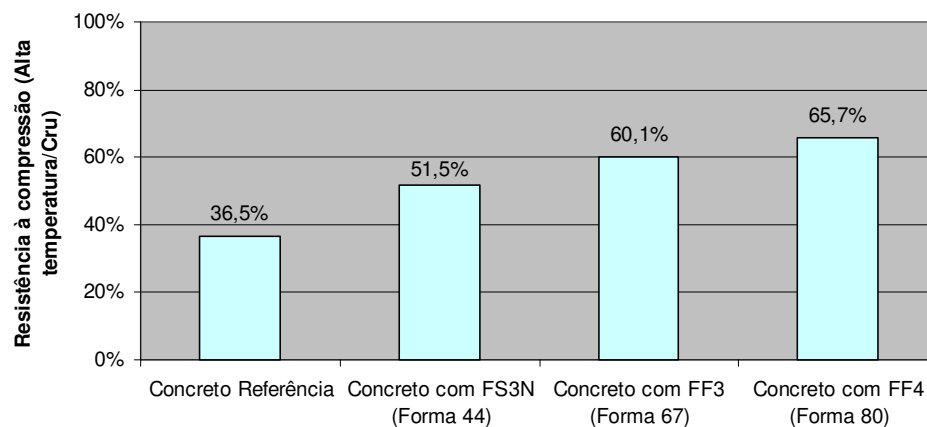


Figura 5.53 - Percentual da resistência à compressão residual após o processo de aquecimento

Na Figura 5.54 é possível comparar os resultados de resistência à tração na compressão diametral dos concretos crus e submetidos à alta temperatura. Percebe-se que os concretos com e sem o reforço com fibras de aço tiveram substancial redução na resistência à tração após o aquecimento.

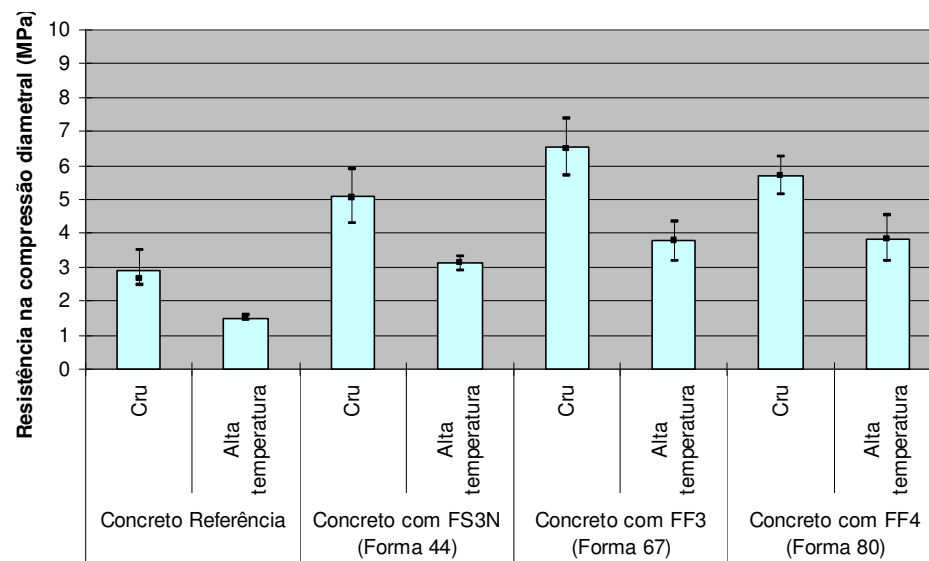


Figura 5.54 - Resistência à tração na compressão diametral dos concretos crus e submetidos à alta temperatura

Como todos os concretos obtiveram redução da resistência à tração na compressão diametral após o aquecimento, a Figura 5.55 apresenta o percentual de resistência residual. A resistência à tração na compressão diametral residual foi proporcional ao fator de forma, com um pequeno desvio no concreto com a fibra FF3.

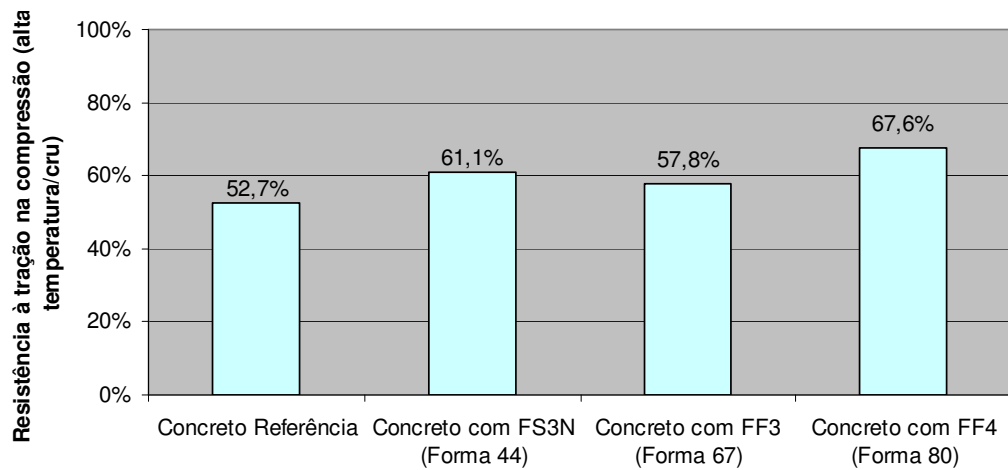


Figura 5.55 - Percentual da resistência à tração na compressão diametral residual após o processo de aquecimento

Na Figura 5.56 é possível comparar os resultados de resistência à tração na flexão dos concretos crus e submetido à alta temperatura. Percebe-se que os concretos com e sem o reforço com fibras de aço tiveram substancial redução na resistência à tração após o aquecimento.

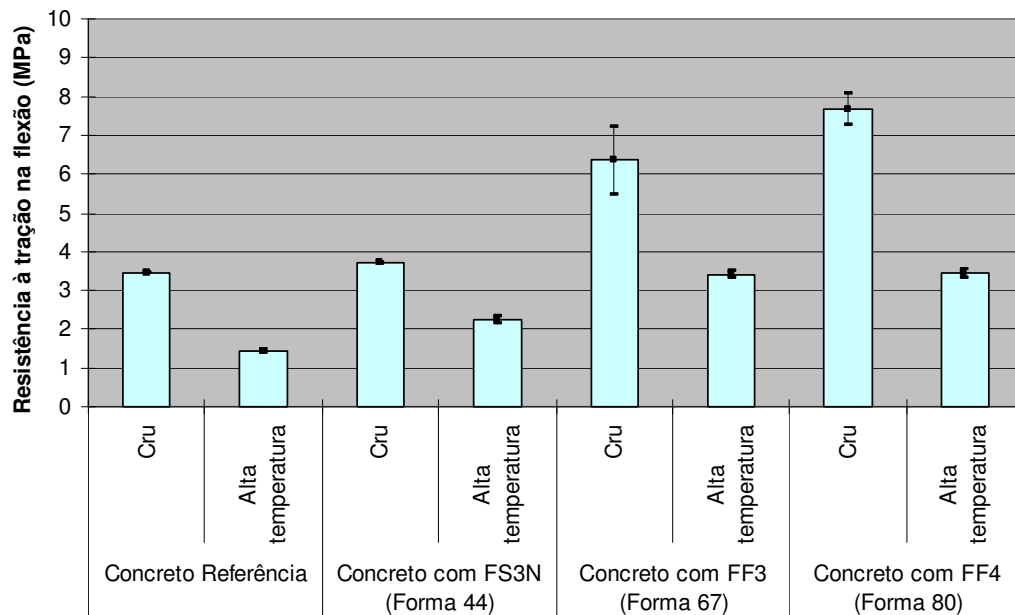


Figura 5.56 - Resistência à tração na flexão dos concretos crus e submetidos à alta temperatura

Como todos os concretos obtiveram redução da resistência à tração na flexão após o aquecimento, a Figura 5.55 apresenta o percentual de resistência

residual. A resistência à tração na flexão residual nos concretos reforçados com fibras foram maiores.

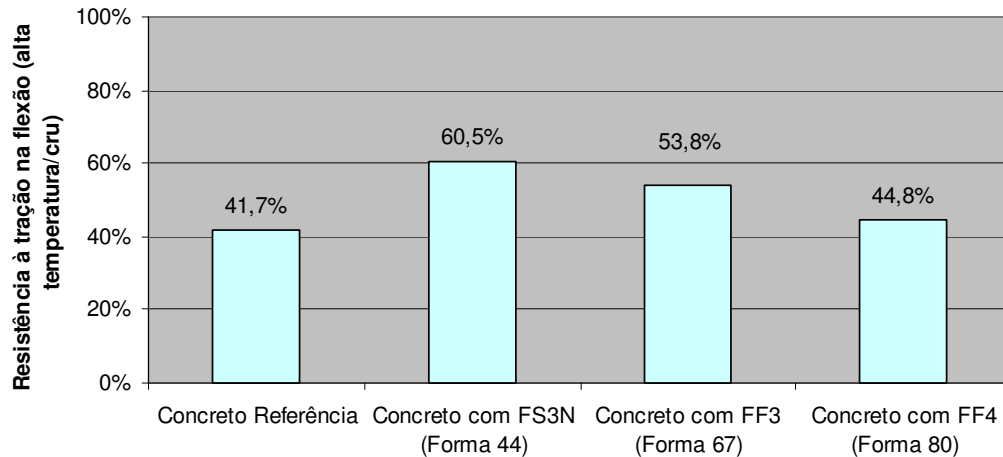


Figura 5.57 - Percentual da resistência à tração na flexão residual após o processo de aquecimento

Na Figura 5.58 são apresentadas as curvas carga versus flecha dos concretos crus e submetidos à alta temperatura com e sem reforço.

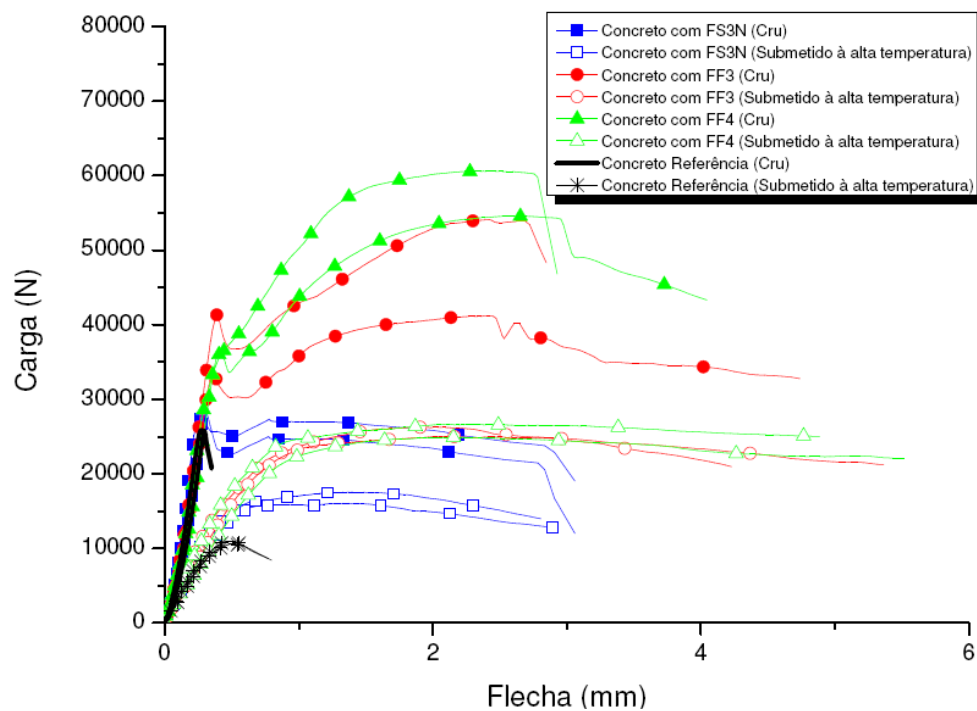


Figura 5.58 - Gráfico carga versus flecha dos concretos crus e submetidos à alta temperatura com e sem reforço

Na Figura 5.59 é possível comparar os resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos crus e submetidos à alta temperatura.

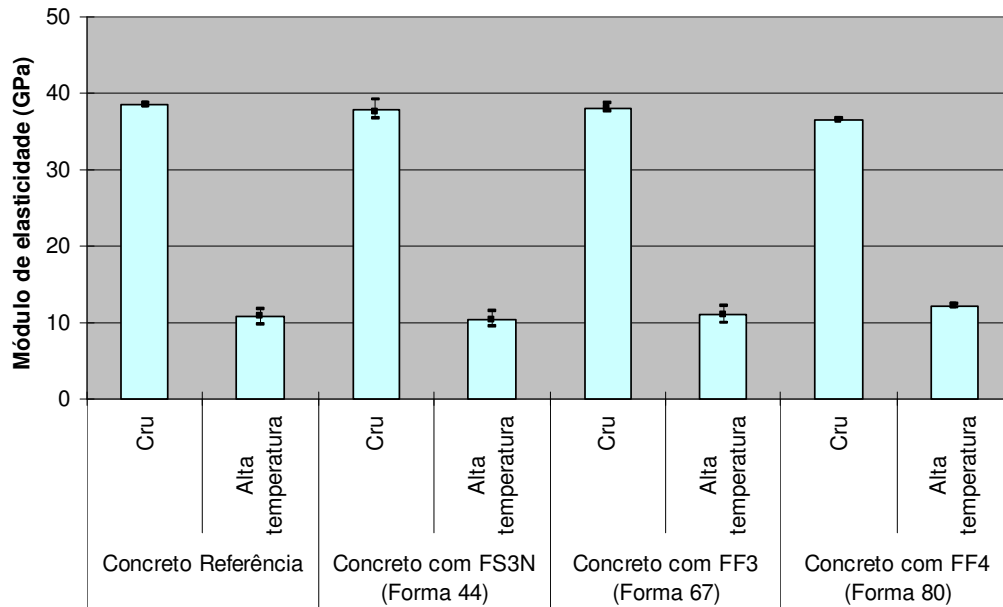


Figura 5.59 - Módulo de elasticidade dinâmico dos concretos crus e submetidos à alta temperatura

Como todos os concretos obtiveram redução do módulo de elasticidade dinâmico após o aquecimento, a Figura 5.60 apresenta o percentual do módulo. O módulo de elasticidade estático residual nos concretos reforçados com fibras foram maiores.

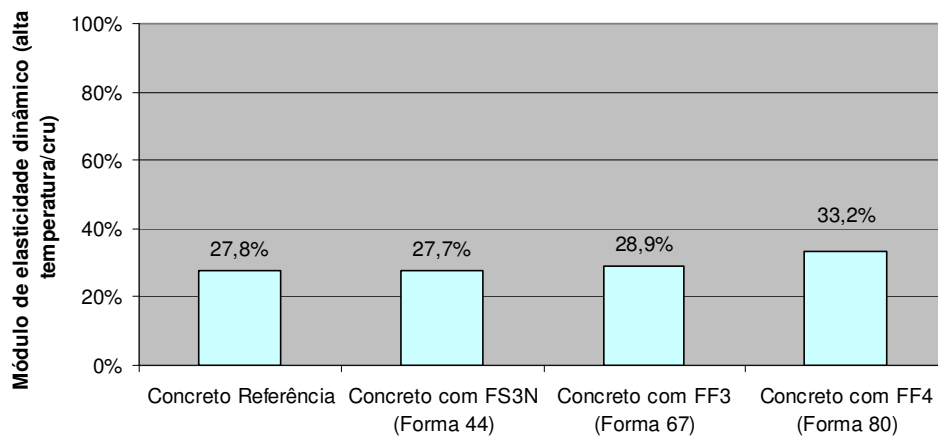


Figura 5.60 - Percentual do módulo de elasticidade dinâmico residual após o processo de aquecimento

Na Figura 5.61 é possível comparar os resultados de módulo de elasticidade estático dos concretos crus e submetidos à alta temperatura. Ocorreu a queda do módulo em todos os concretos após o aquecimento, mas os concretos reforçados apresentaram queda levemente inferior, acredita-se que isso tenha ocorrido devido ao reforço ocasionado pelas fibras.

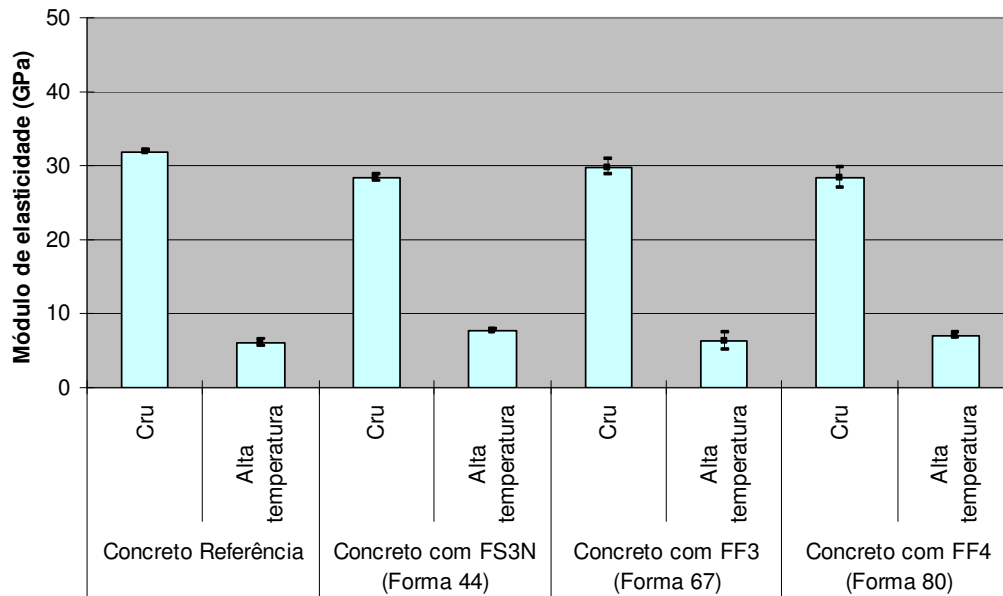


Figura 5.61 - Módulo de elasticidade estático dos concretos crus e submetidos à alta temperatura

Como todos os concretos obtiveram redução do módulo de elasticidade estático após o aquecimento, a Figura 5.62 apresenta o percentual do módulo. O módulo de elasticidade estático residual nos concretos reforçados com fibras foram maiores.



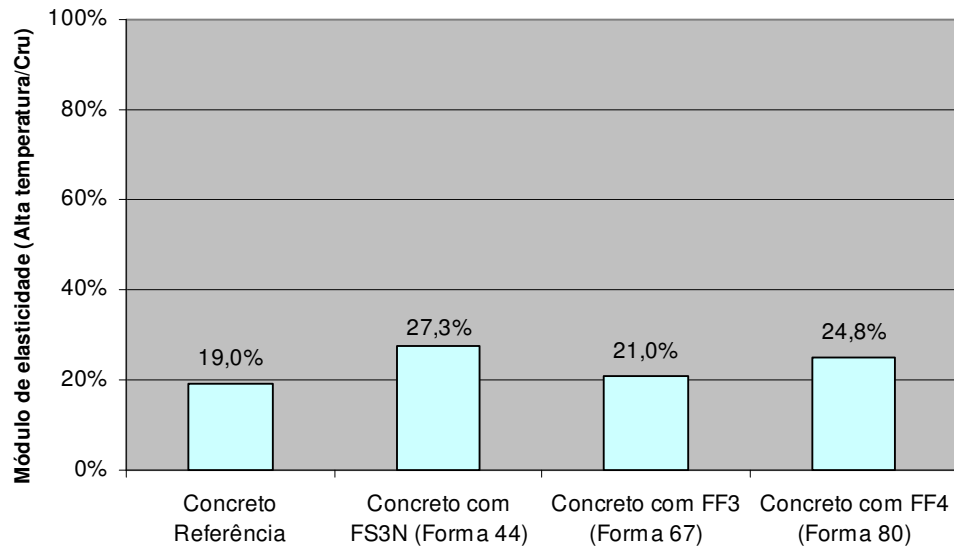


Figura 5.62 - Percentual do módulo de elasticidade estático residual após o processo de aquecimento

## 6 CONCLUSÕES

O presente trabalho conclui que:

- a adição de fibras curtas de aço não contribui para o acréscimo da resistência à compressão do compósito;
- a adição de fibras curtas de aço contribui para o acréscimo da resistência à tração na compressão diametral do compósito;
- a adição de fibras curtas de aço contribui para o acréscimo da resistência à tração na flexão do compósito;
- a adição de fibras curtas de aço muda o comportamento frágil do concreto para um comportamento pseudo-ductil;
- a compatibilização da relação de forma das fibras curtas de aço utilizadas com a dimensão máxima do agregado se faz necessária para otimização do compósito;
- a adição de fibras curtas de aço garante menores perdas das propriedades mecânicas dos concretos reforçados em relação aos concretos não reforçados com as fibras curtas de aço quando submetidos a temperaturas elevadas;
- os concretos reforçados com as fibras FF3 e FF4 apresentaram resistência à tração na flexão após a submissão à temperaturas elevadas nos mesmos valores do concreto de referência antes da submissão à temperaturas elevadas (cru).

## **7 CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS AO CONHECIMENTO**

Na bibliografia existente existem diversos estudos relacionados a adição de fibras curtas de aço em concretos para uso em pisos e lajes, mas não foram encontrados estudos sobre concretos reforçados com fibras curtas de aço em situações de incêndios. O presente trabalho contribuiu para o desenvolvimento científico da tecnologia de concretos sobre o aspecto de durabilidade em exigências após submissão à elevadas temperaturas.

## **8 RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS**

Os resultados apresentados demonstram os ganhos ocasionados pela adição de fibras curtas de aço em concretos, principalmente nas situações após a exposição a temperaturas elevadas.

## **9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

O presente trabalho sugere como pesquisas futuras os seguintes temas:

- Avaliação da inibição do lascamento de concretos em situação de incêndios por adição de fibras curtas de aço;
- Avaliação das propriedades mecânicas de concretos reforçados com fibras curtas de aço durante a simulação de incêndios;
- Simulação por elementos finitos do comportamento mecânico de fibras curtas de aço adicionadas em concretos;

## 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, S. F. Análise dinâmica da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva até a ruptura. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2005.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) - Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and commentary (ACI 318R-05). ACI Committee 318, 2005.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) - Cement and concrete terminology. ACI manual of concrete practice, Part 1 (ACI 116R-10). Farmington Hills, MI; 2010

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) - Guide to quality control and testing of High-Strength Concrete (ACI 363). ACI Committee 363, 1992.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C215 - Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens. Philadelphia, 1991.

ANGLES, J. Measuring workability, Concrete 8 (12) (1974), p. 26.

ASKELAND, D. R. Ciência e engenharia dos materiais. Editora CENGAPE LEARNING, 1ª edição, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5738 - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. ABNT/CB-18 - Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados, CE-

18:301.03 - Comissão de Estudo de Ensaios Físicos para Concreto Fresco, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8522/2003 - Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. ABNT/CB-18 - Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados. CE-18:301.02 - Comissão de Estudo de Métodos de Ensaios Mecânicos para Concreto, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739/1994 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. ABNT/CB-18 - Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados, CE-18:301.02 - Comissão de Estudo de Ensaios Mecânicos para Concreto, Rio de Janeiro, 1994

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118/2004 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522/2003 - Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. ABNT/CB-18 - Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados. CE-18:301.02 - Comissão de Estudo de Métodos de Ensaios Mecânicos para Concreto, Rio de Janeiro, 2003.

BAKAERT, Product data sheets, acessado em <http://www.bekaert.com/building/>, 25 de julho de 2011.

BALAGURU, P. N., SHAH, S. P., Fiber-Reinforced Cement Composites. McGraw-Hill International Editions, 1992.

BARRAGAN B.E., GETTU R., MARTIN M.A., ZERBINO R.L. Uniaxial tension test for steel fibre reinforced concrete - A parametric study (2003) Cement and Concrete Composites, 25 (7), pp. 767-777.

BARROS J. A. O. and FIGUEIRAS J. A. Model for the analysis of steel fibre reinforced concrete slabs on grade (2001) Computers and Structures, 79 (1), pp. 97-106.

BARROS, J. ROSSI, P. MASSICOTTE, B. Dimensionamento de estruturas de betão reforçado com fibras de aço. DEC-UM, Portugal, 2003.

BENTUR, A. Fiber reinforced cementitious composites, Elsevier Applied Science, London, 1995.

BENTUR, A., MINDESS, S., Fiber Reinforced Cementitious Composites. Elsevier Science publishers LTD, 1990.

BEZERRA, A. C. S. Influência das variáveis de ensaio nos resultados de resistência à compressão de concretos: uma análise experimental e computacional. 2007. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Belo Horizonte: Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais. 2007.

BITENCOURT JR., L. A. G. Desenvolvimento de uma Plataforma Computacional para Análise via Método dos Elementos Finitos de Estruturas de Concreto Armado Convencional e Reforçado com Fibras de Aço. Dissertação (Mestrado) - Escola Politecnica da USP, 2009.

BITENCOURT JR., L. A. G.; MACHADO, M. A. S.; BITENCOURT, T. N. Implementação Computacional de um Modelo Constitutivo para Análise de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibras de Aço. In: VII Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 2009, Curitiba. 51<sup>º</sup> Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2009 - VII EPUSP0014, 2009. v. 1. p. 1-15.

BRANDÃO, J. H. Análise experimental e numérica de cascas de concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras. (2005) Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 128 p. 2005.



BRITISH STANDARD INSTITUTION, "Code of practice for the structural use of concrete". CP-110, 1972.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION - BS 1881: Part 209 - Testing Concrete - Recommendations for the measurement of dynamic modulus of elasticity, 1990.

CALLISTER Jr., William D. - MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING An Introduction John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 1991.

CHATTOPADHYAY, S. K.; SINGH, S.; PRAMANIK, N.; NIYOGI, U. K.; KHANDAL, R. K.; UPPALURI, R.; GHOSHAL, A. K. Biodegradability studies on natural fibers reinforced polypropylene composites. Journal of Applied Polymer Science, v 121, n 4, p 2226-2232, August 15, 2011.

CNS ELECTRONICS Operating. Manual of Erudite MK II Resonant Frequency Test System, 1995. 67p.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (CEB-FIP). CEB-FIP Model Code 1990. London, Thomas Telford, 1993.

COUTINHO, A. S. e GONÇALVES, A. - Fabrico e propriedades do betão. Volume III, 2º Ed, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1994.

CRUZ, J. M. S. Comportamento cíclico de estruturas porticadas de betão armado reforçado com fibras de aço - simulação numérica e análise experimental. Dissertação (Mestrado). Universidade do Porto, Portugal, 1998.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras de aço. São Paulo. 68 p. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, EPUSP, 2000.

FU, C.Q. JIN, X.Y. JIN, N.G. Numerical Experiment on Flexural Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Beam. 2009 World Congress on Computer Science and Information Engineering, 2009.

GARAYGORDÓBIL, J.C.A. Dynamic Assessment of Structural Building Components. Tese (Doutorado) – Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Canal; Ports de Barcelona. Espanha. 2003.

GRANDHAIE P, GRANJU J-L, RINGOT E. Durability of pavement repairs, point of view about the role of fibres. In: 5th International conference on concrete pavement design and rehabilitation, Purdue University, USA, vol. 2. p. 195–202.

GRANJU J-L. Thin bonded overlays: about the role of fibre reinforcement on the limitation of their debonding. Adv Cem Based Mater 1996; 4(1):7–21.

GROSSI, B. F. CALIXTO, J. M. F. Modelagem numérica do concreto com fibras de aço. In: 50 Congresso Brasileiro do Concreto, 2008, Salvador, Bahia. Anais do 50 Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo : Instituto Brasileiro do Concreto, 2008. v. unico. p. 80-90.

GROSSI, B. F. Uma contribuição para a modelagem numérica do concreto com fibras curtas de aço. Belo Horizonte. 191 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

HALPIN, J. C. AND TSAI, S. W. Effects of Environmental Factors on Composite Materials. AFMLTR 67423, Jun, 53 pp, 1969.

HARTMANN, T. Steel fiber reinforced concrete. PhD Thesis, Royal Institute of Technology (KTH). Stockholm, 1999.

HELENE, P. R. L. Manual de Dosagem e Controle do Concreto. 1ª Edição, São Paulo, SP. Pini: 2004.

HOLANDA, K. M. A. Análise dos mecanismos resistentes e das similaridades de efeitos da adição de fibras de aço na resistência e na ductilidade à punção de lajes-cogumelo e ao cisalhamento de vigas de concreto. São Carlos. 278 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.

HOLSCHMACHER, K.; MUELLER, T. AND RIBAKOV, Y. Effect of steel fibers on mechanical properties of high strength concrete, *Mater Des* 31 (2010), pp. 2604–2615.

ISKHAKOV, I and RIBAKOV, Y. A design method for two-layer beams consisting of normal fibered high strength concrete, *Mater Des* 28 (5) (2007), pp. 1672–1677.

KAKIZAKI, M. (1992). Effect of Mixing Method on Mechanical Properties and Pore Structure of Ultra High-Strength Concret, *Katri Report* n°90, 19 pp. (Kajima Corporation, Tokio, 1992) (and also in ACI SP-132, CANMET/ACI, 1992).

KANG, S. T. LEE, Y. PARK, Y. D. KIM, J. K. Tensile fracture properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with steel fiber. *Composite Structures* 92 (2010) 61–71.

KHORAMI, M.; GANJIAN, E.. Comparing flexural behaviour of fibre-cement composites reinforced bagasse: Wheat and eucalyptus. *Construction and Building Materials*, v 25, n 9, p 3661-3667, September 2011

KINNUNEM, S. NYLANDER, H. Punching of concrete slabs without shear reinforcement. Stockholm, Transactions of the Royal Institute of Technology. Report n. 158, 1960.

KODUR, V. and KHALIQ, W. Effect of Temperature on Thermal Properties of Different Types of High-Strength Concrete. *J. Materials in Civ. Eng.* 23, 793 (2011); [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000225](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000225) (9 pages)

KODUR, V. K. R., WANG, T. C., and CHENG, F. P. (2004). "Predicting the fire resistance behaviour of high strength concrete columns." *Cem. Concr. Compos.*, 26, 141–153.

LEE, D. H.; HWANG, J.; JU, H.; KIM, K. S.; KUCHMA, D. A. Nonlinear finite element analysis of steel fiber-reinforced concrete members using direct tension force transfer model. *Finite Elements in Analysis and Design*, v 50, p 266-286, March 2012

LOBÃO, L. M. M. Taxa de armadura longitudinal mínima em vigas de concreto de resistência normal com fibras de aço. Rio de Janeiro. 109 p. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

LOPES, M. M. Substituição parcial de armaduras de flexão em vigas de concreto. Rio de Janeiro, 130 p. Dissertação (Mestrado) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

LU, X. and HSU, C. T. T. Behavior of high strength concrete with and without steel fibre reinforcement in triaxial compression. *J Cem Concr Res* 2006;36:1679–85.

LYNDON, F.D.; BALANDRAN, R.V. Some observations on elastic properties of plain concrete. *Cement and Concrete Research*, 16, n°3, p. 314-324, 1986.

MCKEE D. C. Properties of an Expansive Cement Mortar Reinforced with Random Wire Fibers. Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, 1969.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. - *Concrete: Microstructure, properties and materials*, 2001.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo. 573p. PINI, 1994.

MOHAMMADI, Y.; SINGH, S. P. and KAUSHIK, S.K. Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state, *Constr Build Mater* 22 (2008), pp. 956–965.

MOREIRA, R. S. Simulação computacional em concreto reforçado com fibra de aço. Dissertação (Mestrado), Centro de Ciência e Tecnologia, Laboratório de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro Civil. 67 f., 2003.

NAWY, E. G. Fundamentals of high strength high performance concrete, Longman group limited, Harlow, Essex, England, 1996.

NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. 2ª Edição, São Paulo: Pini, 1997.

NIELSEN L. E. AND CHEN P. E. Young's Modulus of Composites Filled with Randomly Oriented, 1968, *Fiber Journal of Materials*, Jun, Vol. 3, No. 2, pp. 352-358.

NILI, M. and AFROUGHSABET, V. Combined effects of silica fume and steel fibres on the impact resistance and mechanical properties of concrete. *Int J Impact Eng* 2010;37:879–86.

NILI, M. and AFROUGHSABET, V. Property assessment of steel–fibre reinforced concrete made with silica fume. *Construction and Building Materials*, Volume 28, Issue 1, March 2012, Pages 664–669

NÓBREGA, P.G.B. Análise dinâmica de estruturas de concreto: estudo experimental e numérico das condições de contorno de estruturas pré-moldadas. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2004.

NUNES, N. L. AGOPYAN, V. A. Influência do Fator de Forma da Fibra na Tenacidade à Flexão do Concreto Reforçado com Fibras de Aço. Boletim Técnico, EPUSP, 18 p., 1998.

NUNES, N. L.; TANESI, J.; FIGUEIREDO, A.D. Aplicação do concreto reforçado com fibras de aço na recuperação de estruturas e pavimentos. In: IV Congresso Ibero-Americano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade. CON PAT 97, Porto Alegre, RS, 21 a 24 de outubro de 1997. Anais, v.2, p. 41-48.

OZCAN D.M., BAYRAKTAR A., SAHIN A., HAKTANIR T., TURKER T. Experimental and finite element analysis on the steel fiber-reinforced concrete (SFRC) beams ultimate behavior (2009) Construction and Building Materials, 23 (2), pp. 1064-1077.

PASA, V. F. Análise do comportamento de estruturas de concreto reforçado com fibras de aço via método dos elementos finitos. Dissertação (Mestrado). 158p., PPGEC, UFRGS, 2007.

PHAN, L. T. (1996). "Fire performance of high-strength concrete. A report of the state-of-the-art." Rep. NISTIR 5934, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.

POTHISIRIA, T. and PANEDPOJAMAN, P. Modeling of bonding between steel rebar and concrete at elevated temperatures. Construction and Building Materials, Volume 27, Issue 1, February 2012, Pages 130–140

RAFI, M. M. and NADJAI, A. Behavior of hybrid (steel-CFRP) and CFRP bar-reinforced concrete beams in fire. Journal of Composite Materials 2011 45: 1573 originally published online 9 December 2010

RIBEIRO, A. F. Modelos de fenda discreta na simulação do comportamento em flexão de betão reforçado com fibras de aço. Dissertação (Mestrado). 134 p. Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2004.

ROMUALDI J. P. AND MANDEL J. A. Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement. ACI Journal, Jun, Vol. 61, No. 6, pp. 657-671, 1964.

SARZALEJO, A. G.; ROSSI, B.; PERRI, G.; WINTERBERG, R.; ARISTEGUIETA, R. E. P. Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto. (Manual Técnico). Maccaferri do Brasil Ltda., 2009.

SHAFIGH, P.; MAHMUD, H.; JUMAAT, M. Z. Effect of steel fiber on the mechanical properties of oil palm shell lightweight concrete. Materials and Design, v 32, n 7, p 3926-3932, August, 2011.

SHAH S. P. and RANGAN V. B. Fiber reinforced concrete properties. ACI Journal, Vol 68: 126-135, 1971.

SHOKRIEH, M.M.; HEIDARI-RARANI, M.; SHAKOURI, M.; KASHIZADEH, E. Effects of thermal cycles on mechanical properties of an optimized polymer concrete. Construction and Building Materials, v 25, n 8, p 3540-3549, August 2011.

SIMITZIS, J.; ZOUMPOULAKIS, L.; SOULIS, S.; TRIANTOU, D.; PINAKA, CH. Electrical conductivity and mechanical strength of composites consisting of phenolic resin, carbon fibers, and metal particles. Journal of Applied Polymer Science, v 121, n 4, p 1890-1900, August 15, 2011.

SINGH, B. SINGH, S.P. KAUSHIK, S.K. Strength and deformation characteristics of steel fibrous concrete beams. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2007 8(2):257-263.

Society of Fire Protection Engineers (SFPE). (2008). Handbook of fire protection engineering, 4th Ed., Cleveland.

SOULIOTI, D.; BARKOULA, N.M.; PAIPETIS, A.; MATIKAS, T. E.; SHIOTANI, T. AND AGGELIS, D. G. Acoustic emission behavior of steel fibre reinforced concrete under bending, *Construct Build Mater* 23 (2009), pp. 3532–3536.

SWAMY, N.; RIGBY, G. (1971). Dynamic properties of hardened paste, mortar and concrete. *Matériaux et Constructions*. Paris, 4(19): 13-40, jan./fev. 1971.

TADEPALLI, P. R. MO, Y. L. HSU, T. T. C. VOGEL, J. Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams. *Structures 2009: Don't Mess with Structural Engineers* © 2009 ASCE, 2009.

TANESI, J., FIGUEIREDO, A. D., Eficiência do Reforço de fibras de Polipropileno em Concretos. In: IV Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto. São Paulo, 2000.

TURATSINZE A, GRANJU J-L, SABATHIER V, FARHAT H. Durability of bonded cementbased overlays: effect of metal fibre reinforcement. *Mater Struct* 2005; 38:321–7.

UNI 11037. Fibre di acciaio da impiegare nel confezionamento di conglomerato cementizio rinforzato, UNICEMENTO, UNSIDER, 2003.

VIDAL FILHO, L. S. Influência da adição de fibras curtas de aço no comportamento e resistência ao esforço cortante em vigas de concreto armado. Dissertação (Mestrado). 130p. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 1999.

WANG, Y.; ZHOU, L.; WANG, Z.; HUANG, H.; YE, L. Stress distributions in single shape memory alloy fiber composites. *Materials and Design*, v 32, n 7, p 3783-3789, August, 2011



WON, JONG-PIL; PARK, CHAN-GI; LEE, SU-JIN; KANG, JOO-WON. Bonding characteristics of recycled polyethylene terephthalate (PET) fibers coated with maleic anhydride grafted polypropylene in cement-based composites. *Journal of Applied Polymer Science*, v 121, n 4, p 1908-1915, August 15, 2011.

YU, L. C. BARZIN, M. Finite element simulations of fiber pullout toughening in fiber reinforced cement based composites (1998) *Advanced Cement Based Materials*, 7 (3-4), pp. 123-132.

ZHU, E. C. GUAN, Z. W. and SHEN S. Z. Non-linear finite-element analysis of thin shell SFRC structures. *Magazine of Concrete Research*, 2002, 54, No. 4, August, 291–298.