

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO**

DIEGO SCHNEIDER

**DESENVOLVIMENTO DE FIBRAS METÁLICAS ESPACIAIS E AVALIAÇÃO
EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE COMPÓSITOS DE CONCRETOS
COM ADIÇÕES HÍBRIDAS DE FIBRAS**

SÃO LEOPOLDO

2016

S358d Schneider, Diego.

Desenvolvimento de fibras metálicas espaciais e avaliação experimental do comportamento de compósitos de concretos com adições híbridas de fibras. / Diego Schneider ; orientação do Prof. Dr. Bernardo da Fonseca Tutikian. -- São Leopoldo, 2016.

87 p.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, como requisito parcial para obtenção do título de mestre.

1. Concreto : fibra espacial. 2. Macrofibras. 3. Fibra espacial. I. Tutikian, Bernardo da Fonseca. II. Quinino, Uziel Cavalcanti de Medeiros. III. Título.

CDU: 693.54/56

Catálogo na Publicação:

Bibliotecária responsável: Morgana Marcon CRB10/1024

DIEGO SCHNEIDER

**DESENVOLVIMENTO DE FIBRAS METÁLICAS ESPACIAIS E AVALIAÇÃO
EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE COMPÓSITOS DE CONCRETOS
COM ADIÇÕES HÍBRIDAS DE FIBRAS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Bernardo da Fonseca Tutikian
Co-orientador: Prof. Dr. Uziel Cavalcanti de Medeiros Quinino

São Leopoldo
2016

TERMO DE APROVAÇÃO

DESENVOLVIMENTO DE FIBRAS METÁLICAS ESPACIAIS E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE COMPÓSITOS DE CONCRETOS COM ADIÇÕES HÍBRIDAS DE FIBRAS

DIEGO SCHNEIDER

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada e aprovada pela banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de MESTRE.

Aprovado por:

Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian
Orientador

Prof. Dr. Uziel Cavalcanti de Medeiros
Quinino
Co-orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Estevam Camargo Rodrigues

Prof. Dr. Jean Marie Desir

SÃO LEOPOLDO, RS – BRASIL
Dezembro/2016

RESUMO

SCHNEIDER, Diego, **Desenvolvimento de fibras metálicas espaciais e avaliação experimental do comportamento de compósitos de concretos com adições híbridas de fibras**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, UNISINOS, São Leopoldo, 2016.

A adição de fibras a uma matriz cimentícia proporciona vários benefícios para o desempenho do compósito, podendo-se citar o controle da fissuração, ganho de tenacidade, aumento da resistência à tração, entre outros. Diante disto, busca-se uma distribuição aleatória e mais homogênea possível das fibras ao longo da matriz. É esperado que a proposição de um elemento de reforço definido a partir da união ortogonal de filamentos – fibra espacial – venha contribuir para uma distribuição mais uniforme e homogênea do reforço da matriz, evitando imperfeições no compósito e maximizando a eficiência do reforço. Este trabalho tem por objetivo criar um modelo de fibra espacial e adicioná-la em uma matriz de concreto convencional, tanto isoladamente como combinada com macrofibras monofilamentos de aço e microfibras de polipropileno, avaliando o desempenho dos compósitos resultantes em termos de trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à tração indireta e tenacidade. Ademais, avaliou-se a distribuição das fibras no interior da matriz de concreto e sua influência no desempenho final do compósito. Para tal, foi realizado um programa experimental com 18 compósitos, cada um com uma combinação diferente de fibras espaciais, fibras de aço monofilamento e microfibras de polipropileno. Foram executados ensaios de compressão axial, segundo a ABNT NBR 5739:2007, resistência à tração na flexão, conforme a norma JSCE-SF4 (1984) e ABNT NBR 12142:2010, e tenacidade, de acordo com a JSCE-SF4 (1984). Em virtude dos resultados obtidos, concluiu-se que as fibras espaciais apresentaram desempenho satisfatório, tanto isoladamente como hibridizada pois, além de não afetar a resistência à compressão, melhorou o comportamento à tração em 37,6% e atingiu um Fator de Tenacidade de 3,4 MPa . Ainda, observou-se que a trabalhabilidade diminuiu em relação ao concreto sem fibras, mas a capacidade de compactação não foi prejudicada.

Palavras chave: Fibra espacial, CRF, Concreto reforçado com fibras, Macrofibras.

ABSTRACT

SCHNEIDER, Diego, **Development of spatial metal fibers and experimental evaluation of the behavior of concrete composites with hybrid fiber additions.**

Dissertation (Master Degree of Architecture and Urbanism) – Postgraduate of Architecture and Urbanism Program, UNISINOS, São Leopoldo, 2016.

The addition of fibers to a cementitious matrix provides several benefits to the performance of the composite, including the control of cracking, tenacity gain, increased tensile strength, among others. In view of this, a random and more homogeneous distribution of the fibers along the matrix is sought. It's expected that the proposition of a reinforcement element defined from the orthogonal union of filaments - spatial fiber - will contribute to a more uniform and homogeneous distribution of the matrix reinforcement, avoiding imperfections in the composite and maximizing the reinforcement efficiency. This dissertation aims to create a spatial fiber model and add it in a conventional concrete matrix, either alone or in combination with steel macro fibers monofilaments and polypropylene microfibers, evaluating the performance of the resulting composites in terms of workability, compressive strength, indirect tensile strength and tenacity. In addition, the distribution of the fibers inside the concrete matrix and their influence in the final performance of the composite were evaluated. For this, an experimental program was carried out with 18 composites, each with a different combination of spatial fibers, steel macro fibers monofilaments and polypropylene microfibers. It was performed the axial compression tests according to ABNT NBR 5739: 2007, the flexural tensile strength tests according JSCE-SF4 (1984) and ABNT NBR 12142:2010, and the tenacity tests according to JSCE-SF4 (1984). Based on the results obtained, it was concluded that the spatial fibers presented satisfactory performance, both alone and hybridization, because they didn't affect the compressive strength, improved the tensile behavior in 37,6% and reached a tenacity factor of 3,4 MPa. Also, it was observed that the workability decreased in relation to the concrete without fibers, but the capacity of compaction was not impaired.

Key words: Spatial fibers, FRC, Fibers reinforced concrete, Macro fibers.

LISTA DE IMAGENS

Figura 1 – Imagem de micrografia obtida por elétrons retroespalhados de argamassa de cimento de escória ativada com silicato de sódio.....	17
Figura 2 – Fibras espaciais patenteadas em 1974.....	20
Figura 3–Gráficos de ancoragem da fibra	22
Figura 4 - Representação das zonas de transferência de tensões ao longo de uma fissura.....	22
Figura 5 - Curva carga <i>versus</i> de flexão	29
Figura 6–Compósitos reforçados com fibra durante ensaio de tração	30
Figura 7–Características do comportamento sob flexão	31
Figura 8 - Distribuições possíveis de tensão ao longo de uma fibra em função do comprimento crítico	32
Figura 9 - CRF em que há compatibilidade dimensional entre fibras e o agregado graúdo (A) e onde não há (B).....	33
Figura 10 - Variação da resistência residual pós-fissuração com aumento do nível de deslocamento.....	34
Figura 11–Curvas Carga x deslocamento para diferentes tipos de fibras	35
Figura 12 – Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto.....	38
Figura 13 – Dimensões das fibras.....	41
Figura 14 – Prensa para confecção das fibras metálicas.....	41
Figura 15 – Aspecto da fibra espacial	42
Figura 16 – Imagem das fibras monofilamentos metálicas	43
Figura 17 – Ensaio de VeBe.....	47
Figura 18 – Esquema de ensaio e dimensões – compressão simples.....	48
Figura 19 – Ensaio de compressão simples.....	48
Figura 20 – Configuração de ensaio– Flexão em quatro pontos.....	50
Figura 21 – Imagem do ensaio.....	50
Figura 22 – Critério da JSCE-SF4 (1984) para a determinação da tenacidade	51
Figura 23 – Teor de fibras nas misturas	54
Figura 24 – Mistura na betoneira.....	56
Figura 25 – Mistura depois de sair da betoneira	57
Figura 26 – Ensaio de consistência.....	58

Figura 27 – Adensamento	59
Figura 28 – Desmoldagem	59
Figura 29 – Gráfico Tempo x Porcentagem de fibras (Abatimento Tronco de cone)	60
Figura 30 – Gráfico Tempo x Porcentagem de fibras (VeBe).....	61
Figura 31 – Gráfico de abatimento e Vebe x fibras isoladas	61
Figura 32 – Misturas MR (0%) e M1 (0,11%)	64
Figura 33 – Misturas M2 (0,14%) e M3 (0,25%).....	64
Figura 34 – Misturas M4 (0,29%) e M5 (0,40%).....	65
Figura 35 – Misturas M6 (0,38%) e M7 (0,64%).....	65
Figura 36 – Misturas M8 (0,67%) e M9 (0,48%).....	65
Figura 37 – Misturas M10 (0,53%) e M11 (0,78%).....	66
Figura 38 – Misturas M12 (0,64%) e M13 (0,89%).....	66
Figura 39 – Misturas M14 (0,92%) e M15 (0,75%).....	66
Figura 40 – Misturas M16 (0,78%) e M17 (1,04%).....	67
Figura 41 – Fator de Tenacidade das misturas	68
Figura 42 – Fator de Tenacidade x teor de fibras.....	68
Figura 43 – Aparência das vigas após o ensaio.....	69
Figura 44 – Contribuição de cada fibra ao Fator de Tenacidade.....	71
Figura 45 – Resistência à tração x Teor de fibras	72
Figura 46 – Resistência à tração x Teor de fibras isoladas.....	73
Figura 47 – Fibras que atravessaram a fissura	77
Figura 48 – Ancoragem da fibra retificada	77
Figura 49 – Fibra Rompida.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Classificação e geometria das fibras de aço.	19
Tabela 2 – Características das fibras de polipropileno.....	43
Tabela 3 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo	44
Tabela 4 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo	45
Tabela 5 – Misturas do concreto	53
Tabela 6 – Idade do concreto.....	55
Tabela 7 – Resultados de consistência.....	58
Tabela 8 – Perda de trabalhabilidade por tipo de fibra.....	62
Tabela 9 – Resistência à compressão axial	63
Tabela 10 – Fator de tenacidade e resistência à flexão equivalente.....	67
Tabela 11 – Resultados de resistência a tração na flexão	72
Tabela 12 – Ganho de resistência à tração de cada modelo de fibra isoladamente .	74
Tabela 13 – Quantidade de fibras que atravessaram a fissura	75
Tabela 14 – Fibras que atravessam as fissuras por teor de fibra.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS

CRF	Concreto reforçado com fibras
CRFA	Concreto reforçado com fibras de aço
CRFE	Concreto reforçado com fibras espaciais
FT	Fator de tenacidade

LISTA DE SÍMBOLOS

l_f	Comprimento da fibra
d_e	Diâmetro equivalente
λ	Fator de forma da fibra
l_c	Comprimento crítico da fibra
\bar{E}_c	Resistência à compressão nominal do concreto
$\bar{E}_t^{aço}$	Resistência à tração do aço das fibras
$\bar{E}_{ct,f}$	Resistência à tração na flexão
\bar{E}_{c28}	Resistência à compressão aos 28 dias
δT_b	Deslocamento equivalente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	OBJETIVO GERAL.....	14
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.3	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO 16	
2.1.1	MATRIZ	16
2.1.2	FIBRAS.....	18
2.1.3	INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ.....	20
2.2	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS.....	23
2.3	PROPRIEDADES DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO (CRFA) 24	
2.3.1	TRABALHABILIDADE.....	24
2.3.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	25
2.3.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	26
2.3.4	RESISTÊNCIA À FLEXÃO	27
2.3.5	TENACIDADE.....	27
2.4	PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NAS PROPRIEDADES DO CRF	29
2.4.1	TEOR DE FIBRAS	30
2.4.2	GEOMETRIA DAS FIBRAS	31
2.4.3	ORIENTAÇÃO DE FIBRAS NO CRF.....	36
2.4.4	MÓDULO DE ELASTICIDADE E RESISTÊNCIA MECÂNICA	37
2.4.5	HIBRIDIZAÇÃO	38
3	MATERIAIS E MÉTODO	40
3.1	MATERIAIS	40
3.1.1	FIBRA ESPACIAL.....	40
3.1.2	FIBRA DE AÇO MONOFILAMENTO.....	42
3.1.3	MICROFIBRA DE POLIPROPILENO	43
3.1.4	CONCRETO	44

3.2	ENSAIOS.....	45
3.2.1	CONCRETO NO ESTADO FRESCO	46
3.2.2	CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	47
3.3	FÔRMAS	52
3.4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	53
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	56
4.1	TRABALHABILIDADE E CONSISTÊNCIA	56
4.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	62
4.3	FATOR DE TENACIDADE E RESISTÊNCIA À FLEXÃO EQUIVALENTE.....	63
4.4	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	71
4.5	ANÁLISE DAS FISSURAS	75
5	CONCLUSÃO	79
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	80
6	REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Tutikian, Isaia e Helene (2011), o concreto é o material de construção mais utilizado pelo homem, sendo amplamente dominado e bem utilizado. Conforme Carmona Filho e Carmona (2013), o concreto permanecerá nesta posição por muitos anos, visto que outros materiais têm utilização restrita quando comparados com este, por vários motivos, sendo eles: custo, facilidade de transporte para a obra, durabilidade, versatilidade e adaptabilidade às mais variadas formas geométricas.

Apesar de inúmeras vantagens, é sabido que o concreto simples possui uma limitação no comportamento frágil e baixa capacidade de deformação antes da ruptura, já que o material apresenta baixos valores de resistência à tração, em torno de 10% da resistência à compressão.

Neste sentido, a incorporação de armadura de aço se justifica pela necessidade de compensar a deficiência de tração do concreto, gerando o concreto armado, viabilizando o uso desse material. Porém, barras de aço posicionadas de forma concentrada não são capazes de controlar, adequadamente, a fissuração localizada, o que pode comprometer a durabilidade do material.

Carmona Filho e Carmona (2013) alertam que uma fissura aberta é um caminho para penetração de agentes agressivos e, apesar de normas técnicas, a exemplo da ABNT NBR 6118, da ACI 318 ou do Eucocode 2, apresentarem limitações de aberturas de fissuras, os procedimentos de cálculo para estimá-las são complexos, visto a quantidade de parâmetros que precisam ser considerados.

Uma importante alternativa para controlar a fissuração nas matrizes de concreto é a adição de fibras. Porém, o benefício da inserção destes filamentos depende das características da matriz cimentícia, assim como das fibras, em termos de material, geometria ou quantidade. Estudos elaborados por Bernardi (2003) constata que as microfibras podem atuar em conjunto com a matriz, desde as primeiras etapas de carregamento. Diferente destas, as macrofibras de aço, por terem maior rigidez, contribuem mais pertinentemente ao longo do estágio de pós-fissuração do compósito.

De um modo geral, há uma série de efeitos positivos associados à adição de fibras no concreto, segundo Cánovas (1982): o ganho de tenacidade; o aumento de resistência à ruptura estática; o melhoramento do comportamento à tração; o

acréscimo de resistência à fadiga e impacto; a redução das deformações, bem como o controle de fissuração.

1.1 JUSTIFICATIVA

Figueiredo (2000) ressalta que é comum buscar uma distribuição aleatória e mais homogênea possível das fibras ao longo da matriz de concreto, formando um reticulado tridimensional. Associado a isso, o consumo de energia é relacionado ao número de fibras que a fissura da matriz intercepta, fazendo com que a distribuição homogênea das fibras no interior da matriz seja de suma importância.

Segundo Velasco (2008), a má distribuição das fibras prejudica o reforço em algumas partes do concreto, agindo como imperfeições no compósito. Já a dispersão uniforme das fibras atenua o efeito das imperfeições causadas pelas mesmas, maximizando a eficiência do reforço.

Dúvidas ainda existem em relação à eficácia da adição de fibras na melhoria do desempenho dos compósitos, devido à incerteza quanto à homogeneidade de dispersão ou distribuição das fibras (GARCEZ, 2005).

A questão de pesquisa que se constitui está correlacionada com a distribuição homogênea das fibras. Acredita-se que a fibra espacial tem como principal característica uma melhoria na homogeneidade de sua distribuição no interior da matriz de concreto, fazendo com que uma fissura, indiferentemente de sua posição, sempre seja interceptada por um número médio de fibras, o que aumenta a confiabilidade dos parâmetros relacionados com esta distribuição.

O emprego de diferentes fibras, como macrofibras metálicas e microfibras de polipropileno, pode colaborar para o controle do processo de fissuração em diversas fases (da micro à macro). No nível microscópico, as fibras tendem a inibir a iniciação das fissuras e, conseqüentemente, reduzir a velocidade de seu crescimento. A participação das fibras em nível macroscópico promove a formação de pontes de transferência de tensões e, na medida em que limitam a abertura dos planos de ruptura, atenuam a propagação destas fissuras, elevam a ductilidade do compósito (BENTUR E MINDESS, 2007).

Com este propósito, surgiu o interesse de elaborar um programa experimental que, utilizando misturas híbridas de fibras, através da combinação de elementos espaciais constituídos pela união estratégica de monofilamentos de macrofibras

metálicas e microfibras de polipropileno, em proporções variadas, visa desenvolver novos compósitos cimentícios reforçados com fibras.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa é desenvolver um modelo de fibra espacial e adicioná-la em uma matriz de concreto convencional, tanto isoladamente como combinada com macrofibras monofilamentos e microfibras de polipropileno, avaliando o desempenho dos compósitos resultantes em termos de trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à tração indireta e fator de tenacidade.

1.2.1 Objetivo geral

Investigar, experimentalmente, o comportamento dos compósitos reforçados com a fibra espacial e combinações híbridas destas, junto às macrofibras metálicas monofilamentos e microfibras de polipropileno, buscando estabelecer relações entre as proporções e combinações adotadas e variáveis de resposta como a trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e tenacidade, em uma matriz cimentícia padrão.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- desenvolver um modelo espacial de fibra metálica para uso como reforço da matriz do concreto;
- analisar os efeitos da inserção da fibra espacial e das misturas híbridas adotadas frente à trabalhabilidade do concreto;
- avaliar a tenacidade e resistência à tração indireta na flexão de compósitos reforçados com as fibras espaciais, bem como com as macrofibras metálicas monofilamentos e microfibras de polipropileno, quer sejam isoladas ou combinadas entre si;
- analisar os efeitos dos reforços na resistência à compressão dos compósitos gerados;

- verificar a distribuição da fibra espacial, e a homogeneidade na distribuição.

1.3 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

A fim de garantir a exequibilidade do trabalho, foi necessário estabelecer algumas delimitações:

- para a criação do novo modelo de fibra espacial composta, foram utilizados um comprimento e uma espessura de fibras monofilamento;
- para a combinação de fibras monofilamentos e dos elementos espaciais de reforço foi empregado um tipo de fibra comercial, variando a quantidade entre as combinações;
- para geração da matriz, foi definido um único traço de concreto simples, com resistência à compressão nominal de 25 MPa, pois matrizes com baixa resistência possuem propagação mais estável das fissuras imediatamente após o surgimento da primeira fissura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Visando atingir os objetivos desta pesquisa, considera-se necessário revisar os conceitos fundamentais sobre materiais compósitos, a interação entre matriz e reforço, bem como o funcionamento da fibra e a influência das características de cada um dos elementos constituintes junto às propriedades dos compósitos resultantes. Nesse capítulo foram abordadas as principais propriedades dos concretos reforçados com fibras (CRF) e os potenciais fatores que podem influenciar no seu comportamento final.

2.1 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO

Podem ser observadas três fases nos compósitos à base de cimento reforçado com fibras: matriz, reforço descontínuo (fibras) e interface fibra-matriz.

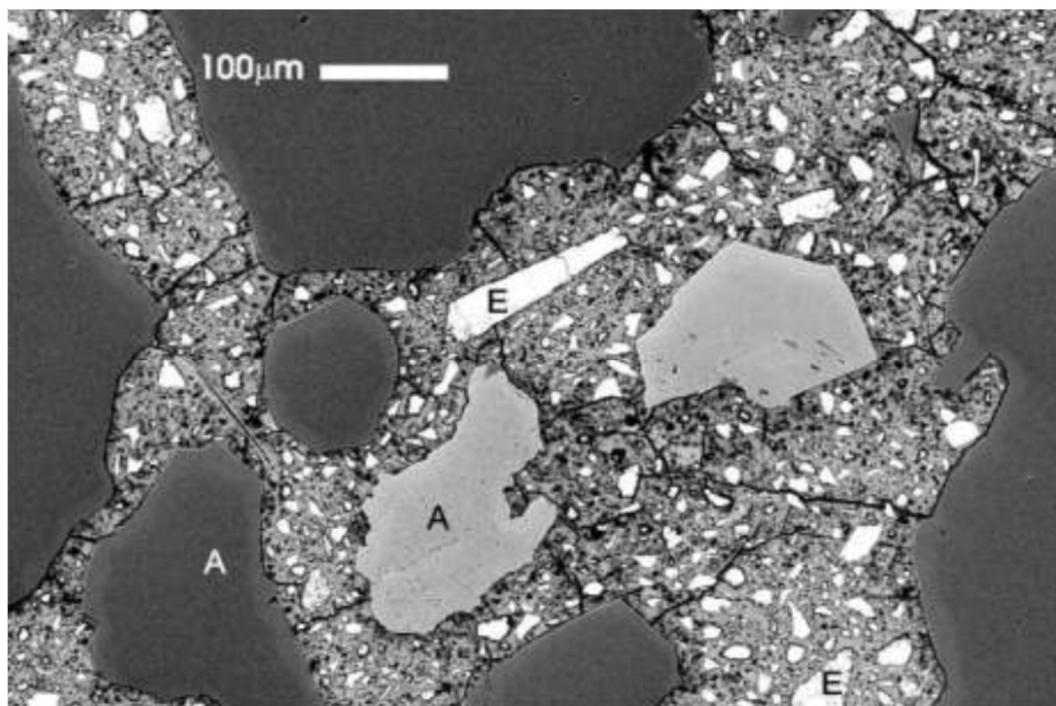
2.1.1 Matriz

A matriz do concreto é formada por diversas fases: agregados miúdos, graúdos, a pasta do cimento e os poros. Desse modo pode-se modificar os componentes principais, bem como suas proporções para obter uma grande variação de suas propriedades.

No entanto, segundo Mehta e Monteiro (2014), o concreto apresenta o comportamento de ruptura frágil e pequena capacidade de deformação, quando comparado com outros materiais estruturais, como o aço. Além disso, o concreto apresenta resistência à tração bem inferior à resistência à compressão, cuja relação é em torno de 0,07 e 0,11. Esse comportamento está associado às fissuras que se formam ou já estão presentes no concreto, que prejudicam mais o material quando solicitado à tração do que à compressão (FIGUEIREDO, 2000).

Fissuras podem surgir na matriz do concreto devido a inúmeros fatores, sendo que um dos principais é a retração da pasta de cimento, a qual é restringida pelos agregados mais rígidos, causando esforços de tração na pasta e sua possível fissuração (FIGUEIREDO, 2011). A Figura 1 apresenta uma imagem de micrografia em que é possível visualizar a pasta de cimento fissurada.

Figura 1 – Imagem de micrografia obtida por elétrons retroespalhados de argamassa de cimento de escória ativada com silicato de sódio.



Fonte: John (1995) apud Figueiredo (2011).

A reduzida capacidade de resistência à tração pode ser associada à dificuldade de o concreto interromper a propagação das fissuras quando é submetido a este esforço. Isso se deve ao fato de que a direção de propagação das fissuras é transversal à direção principal de tensão, portanto, quando se inicia o crescimento de uma fissura, a área disponível para o suporte de cargas decresce, causando o aumento das tensões. Logo, a ruptura à tração é causada por algumas fissuras que se unem e não por numerosas fissuras, como ocorre quando o concreto é comprimido (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Uma maneira de modificar as propriedades dessa matriz é com a incorporação de fibras (FIGUEIREDO, 2011). O trabalho de transferência de tensão que a fibra realiza através das fissuras no concreto é um mecanismo de aumento da energia associado à ruptura do material e à restrição à propagação de fissuras (FIGUEIREDO, 2000).

2.1.2 Fibras

Segundo Góis (2010), existem diversos tipos de fibras disponíveis para uso comercial. De acordo com ACI (2006), há quatro categorias de concreto reforçado com fibras: concreto reforçado com fibras de aço, de vidro, sintéticas e naturais.

Conforme Figueiredo (2005), a escolha de um determinado tipo de fibra a ser usada depende das características que se quer obter no compósito. O módulo de elasticidade e a resistência mecânica são as duas propriedades mais importantes na definição da capacidade de reforço que a fibra pode proporcionar ao concreto.

De acordo com Oliveira (2005), as fibras com módulo de elasticidade baixo e alongamento maior do que as matrizes de concreto, como as fibras de polipropileno, são capazes de absorver grande energia, com elevada tenacidade e grande resistência ao impacto, mas não contribuem para o aumento da resistência à tração do compósito. As fibras com alto módulo de elasticidade e de resistência, como as fibras de aço, de vidro e de carbono, produzem compósitos com elevada resistência à tração, rigidez e capacidade de resistir a cargas dinâmicas.

De acordo com o ACI 544.1R-96, uma característica importante das fibras é a relação entre seu comprimento e seu diâmetro equivalente, a qual é chamada relação de aspecto ou fator de forma. O fator de forma é a relação geométrica obtida a partir da divisão do comprimento da fibra (l_f), não alongado, pelo diâmetro do círculo com área equivalente à de sua seção transversal. Este diâmetro é definido como diâmetro equivalente (d_e). Assim, o fator de forma de uma fibra é dado pela equação 1.

$$\lambda = \frac{l_f}{d_e} \quad (1)$$

As fibras de aço são produzidas a partir de fios de aço trefilados, que são cortados e comercializados em diversos comprimentos e diâmetros. A resistência à tração destas fibras varia de 500 a 2600 MPa, enquanto que o módulo de elasticidade é próximo a 210 GPa.

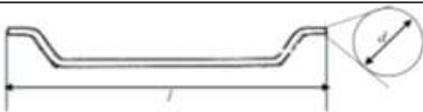
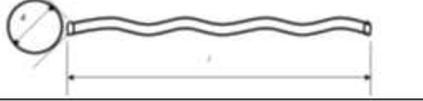
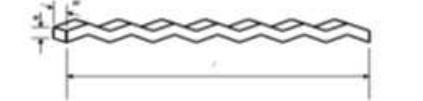
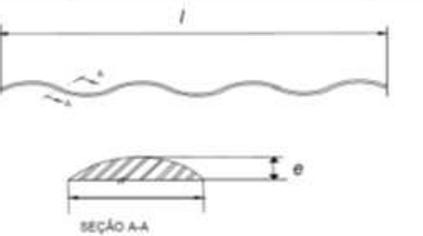
A ABNT NBR 15530:2007 apresenta três tipos de fibras em função de sua conformação geométrica:

- Tipo A: fibra de aço com ancoragens nas extremidades;
- Tipo C: fibra de aço corrugada;
- Tipo R: fibra de aço reta.

Além disso, existem três classes para as fibras de aço, em função do aço que deu origem às mesmas: a classe I refere-se à fibra oriunda de arame trefilado a frio; a classe II indica a fibra oriunda de chapa laminada cortada a frio; e a classe III corresponde à fibra oriunda de arame trefilado e escarificado.

A Tabela 1 apresenta a geometria de cada tipo de fibra.

Tabela 1– Classificação e geometria das fibras de aço.

TIPO	CLASSE DA FIBRA	GEOMETRIA
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

Fonte: ABNT NBR 15530:2007

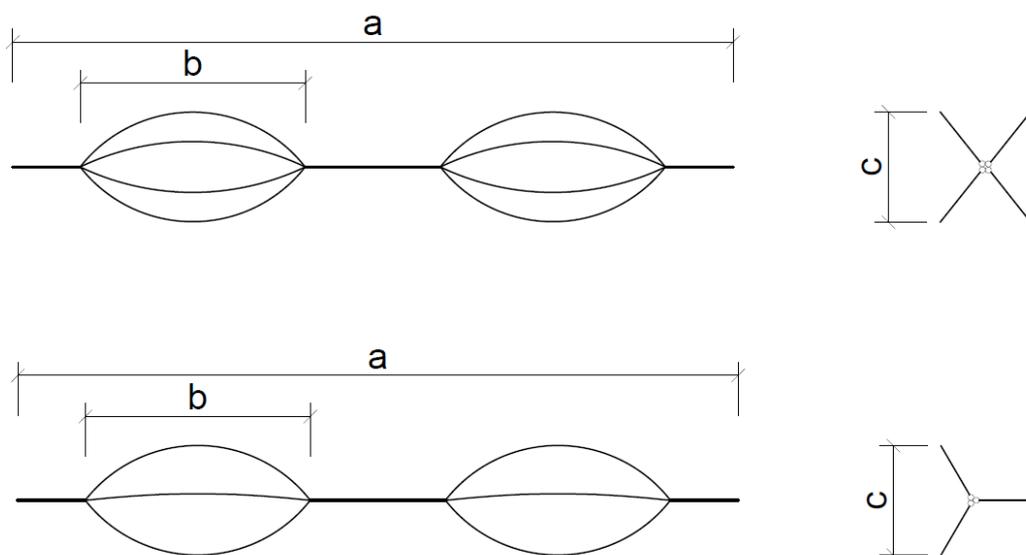
Segundo Góis (2010), as fibras metálicas se apresentam soltas ou em pentes e unidas nas extremidades por uma cola solúvel em água. Durante a mistura, essas fibras se separam e se dispersam individualmente pela massa, facilitando o processo de mistura com o concreto e evitando o agrupamento e a má distribuição.

Ao adotar esta classificação, a norma procurou cobrir a maioria das fibras disponibilizadas no mercado brasileiro à época. Isso possibilitou o estabelecimento de condições mínimas que podem ser correlacionados com o desempenho final do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) (FIGUEIREDO *et al.*, 2008).

As fibras de polipropileno apresentam tensão de ruptura entre 700 e 800 MPa, e módulo de elasticidade entre 3 e 8 GPa, muito inferior ao das fibras de aço. Elas são fornecidas de duas formas, as microfibras e as macrofibras. As microfibras são compostas por filamentos extremamente finos e são produzidas a partir do processo de extrusão.

Em relação a fibras espaciais há poucos estudos disponíveis e encontrou-se somente uma breve descrição de NAAMAN (1985) sobre uma fibra tridimensional de aço, patenteada em 1974, composta por três ou quatro fios entrelaçados, formando uma dupla de esferas, como mostra a Figura 2.

Figura 2 – Fibras espaciais patenteadas em 1974



Fonte: adaptado de Naaman (1985).

2.1.3 Interação fibra-matriz

Conforme Lopes (2005), nos materiais compósitos, as tensões solicitantes são resistidas em conjunto pela matriz e pelas fibras, sendo que a força transmitida entre elas é por aderência. A aderência fibra-matriz depende de vários fatores como: atrito fibra-matriz, ancoragem mecânica da fibra na matriz e adesão físico-química entre os

materiais. Estes fatores são influenciados pelas características das fibras, como volume, módulo de elasticidade, resistência, geometria e orientação; e características da própria matriz, como composição, condição de fissuração da matriz e propriedades físicas e mecânicas.

Segundo Figueiredo (2011), a adição de fibras apropriadas num teor adequado elimina o caráter frágil do concreto. Isso se dá devido à transferência de tensões realizada pela fibra, fazendo com que ocorra uma redução na propagação das fissuras.

Conforme Quinino (2015), o uso de fibras provoca a transferência de parte da força atuante sobre o corpo, fazendo com que haja uma fissuração mais distribuída. Esse mecanismo faz com que a energia elástica retida seja dissipada por um conjunto de microtrincas ou fissurações múltiplas.

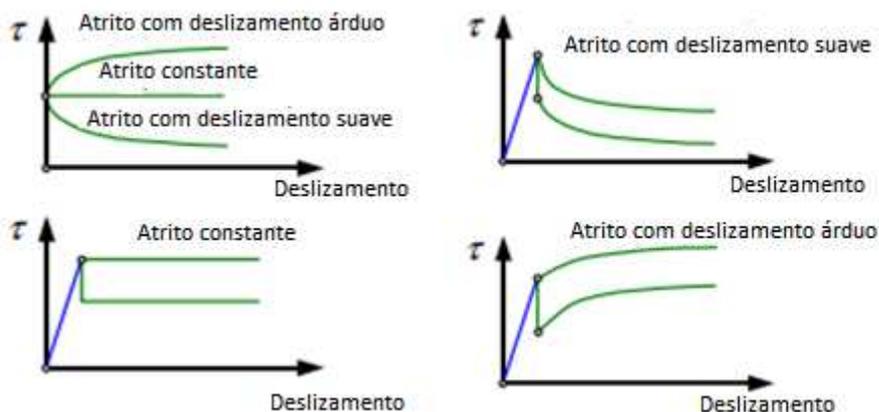
Hannant (1978) afirma que o comportamento teórico de um compósito depende das propriedades dos materiais, bem como da força de aderência entre os mesmos. A maioria das fibras tem como fator crítico a eficiência da aderência, e não a resistência das fibras.

Quando as fibras de aço são adicionadas ao concreto, elas dificultam a propagação das fissuras devido ao seu elevado módulo de elasticidade. Devido à capacidade portante pós-fissuração do compósito, as fibras permitem uma redistribuição de esforços no material, mesmo quando da utilização de baixos teores (FIGUEIREDO, 1997).

A condição da matriz, sendo ela fissurada ou não, é essencial para a determinação das tensões de aderência desenvolvidas. A aderência de cisalhamento controla a transferência de tensões paralelas ao eixo longitudinal da fibra. Em matrizes fissuradas, as tensões de cisalhamento desenvolvidas resistem ao arrancamento da fibra, transferindo a carga para a matriz. Dessa forma, o tipo de tensão de aderência influencia o mecanismo de ruptura dos compósitos, uma vez que permite que a tensão seja transferida de um lado a outro das fissuras (LOPES, 2005).

Conforme Löefgren (2005), para a ligação por atrito, diferentes relações podem ser utilizadas para descrevê-la, incluindo atrito constante, atrito com deslizamento suave e atrito com deslizamento árduo, como podem ser visto na Figura 3.

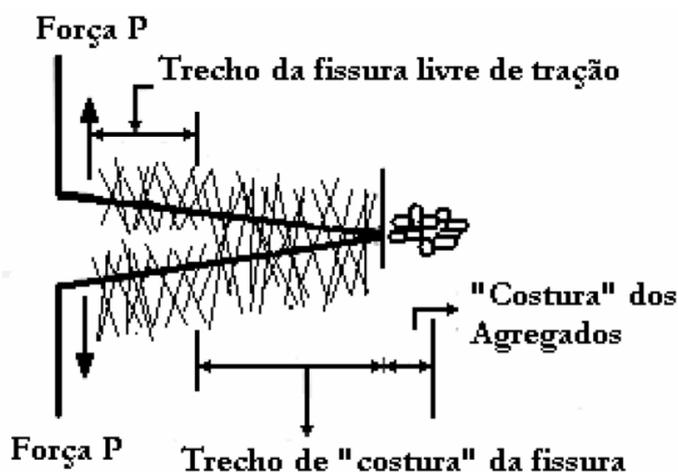
Figura 3–Gráficos de ancoragem da fibra



Fonte: Adaptado de Löefgren (2005).

De acordo com Bentur e Mindess (2007), são identificados três trechos distintos na fissura: trecho livre de tração, onde a matriz encontra-se fissurada e as fibras rompidas ou arrancadas da matriz; trecho de costura das fissuras pela fibra, onde a tensão é transferida da matriz para as fibras por atrito; e trecho de microfissuração da matriz, mas com suficiente continuidade e ancoragem dos agregados, para que ocorra a transferência de tensão pela própria matriz, conforme Figura 4.

Figura 4 - Representação das zonas de transferência de tensões ao longo de uma fissura.



Fonte: Bentur e Mindess (2007).

De acordo com este mecanismo, pode-se concluir que, quanto maiores as fibras, maior a possibilidade de que as mesmas tenham comprimentos de ancoragem suficientes de cada lado da fissura (GÓIS, 2010).

2.2 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

A interação entre a fibra e a matriz é de grande importância na avaliação da eficácia dos compósitos. A eficiência das propriedades do compósito com a adição de fibras deriva da transferência de tensão da matriz para a fibra.

Para Zollo (1997), o desempenho e as características do CRF estão diretamente ligados ao tipo de material, à sua geometria, à forma de distribuição, à orientação, ao nível de concentração da fibra e às propriedades oriundas da matriz cimentícia. Carvalho (2005) afirma que a combinação entre as propriedades da matriz, das fibras e das interfaces fibra-matriz é a causa das modificações nas propriedades dos compósitos. Ainda, segundo o ACI (2006) e Carvalho (2005), essas propriedades se devem aos seguintes parâmetros: características da matriz e das fibras, geometria das fibras, seção transversal e comprimento, arranjo estrutural das fibras, proporção entre os materiais, características das interfaces dos materiais e a interação entre os componentes.

No que diz respeito ao comportamento de fissuração de CRF, Bentur e Mindess (2007) referem-se aos estágios de pré-fissuração e pós-fissuração. No estágio de pré-fissuração a aderência desenvolvida entre a fibra e a matriz se encarrega da transferência de esforços até que as tensões tangenciais, que surgem devido às rigidezes diferenciais, atingem a tensão máxima de aderência. Depois de excedida essa tensão, inicia-se o processo de deslizamento, que dá origem às tensões de atrito distribuídas ao longo da interface fibra-matriz, caracterizando o estágio de pós-fissuração.

Segundo Quinino (2015), com o aumento da carga solicitante, ocorre a abertura de fissuras. As fibras passam a ter a função de inibir as suas propagações. Desta forma, as fibras passam a sofrer um processo de arrancamento, dependendo da sua geometria.

2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO (CRFA)

O CRFA é um material compósito formado por uma matriz cimentícia e por fibras metálicas dispersas, que visam à melhoria das propriedades do conjunto.

Conforme Jo, Shon e Kim (2001), o CRFA vem sendo amplamente empregado em aplicações estruturais nos últimos 30 anos, sendo em argamassas ou em concretos simples.

2.3.1 Trabalhabilidade

Conforme Velasco (2008), concretos reforçados com fibras, em seu estado plástico, mesmo sendo trabalháveis, apresentam uma estrutura mais enrijecida em relação ao concreto sem reforço fibroso. Esta característica conduz a um problema associado com a utilização de fibras em concreto, que é a redução da sua trabalhabilidade, principalmente para altas frações volumétricas.

Os efeitos da dispersão das fibras de aço imediatamente após a pega, dependendo do tipo de concreto e do tempo de vibração, foram mostrados por Ozyurt et al. (2007). Constataram os autores que a maior segregação de fibras ocorre com o aumento no tempo de vibração e que concretos com agentes modificadores de viscosidade mostraram ser mais resistentes à segregação, sendo esta praticamente nula mesmo após 8 minutos de vibração. Para concretos autoadensáveis, estes apresentaram uma pequena segregação de fibras.

Para impedir ou minimizar a redução da trabalhabilidade provocada pelo uso de fibras é aconselhável o uso de hibridização do reforço fibroso. Conforme Nehdi e Ladanchuk (2004), a combinação de dois ou mais tipos de fibras pode produzir um compósito com melhores propriedades mecânicas do que aquele alcançado usando apenas um tipo de fibra.

Lopes (2005) cita outros fatores que afetam a trabalhabilidade da mistura:

- a. A relação água/cimento, que pode ser aumentada para que a trabalhabilidade seja incrementada, porém sempre com cuidado para que não haja água em demasia, o que pode causar segregação e refletir em um concreto poroso e de baixa resistência e durabilidade no estado endurecido;

- b. O tipo e a quantidade de aditivo superplastificante empregado, que deve ser compatível com os materiais cimentícios;
- c. O tipo de misturador empregado para realização da mistura, sendo mais adequada a utilização de misturadores planetários, cujos movimentos das pás ocorrem nas duas direções, pois uma das maiores dificuldades de obter-se uma distribuição uniforme das fibras é a tendência de aglutinação. Com este tipo de misturador este problema pode ser minimizado, ou até mesmo evitado.

2.3.2 Resistência à compressão

De acordo com Neville (1997), a resistência à compressão é considerada a propriedade mais importante do concreto, embora em muitos casos a durabilidade e a impermeabilidade possam ser mais importantes. Contudo, a adição de fibras ao concreto não visa o aumento da resistência à compressão.

No que diz respeito ao concreto reforçado com fibras, a resistência à compressão não é uma propriedade relevante. Conforme Löfgren (2005), as fibras metálicas em baixos teores (<1% em volume) têm um efeito insignificante sobre a resistência à compressão do CRF. Experimentos realizados por Özcan et al. (2009), revelaram que as fibras têm um impacto negativo sobre a resistência à compressão do CRF, e ela diminuiu com o aumento das dosagens de fibras.

Alguns autores acreditam que este decréscimo pode não ser devido à adição de fibras ao concreto e sim à adição de mais água para aumentar a trabalhabilidade do mesmo (BENTUR e MINDESS, 2007). Além disso, esta diminuição pode ser uma consequência da má compactação obtida com o material. No entanto, segundo Löfgren (2005), as microfibras de carbono em altos teores (>1%) podem elevar a resistência à compressão do compósito.

Nos experimentos realizados por Quinino (2015), a adição de fibras ao concreto não proporcionam ganhos significativos de resistência à compressão, mas algumas misturas híbridas de fibras proporcionaram ganhos de até 19% nos compósitos.

Vários estudos já foram elaborados avaliando a resistência à compressão do CRF, e, conforme Armelin (1992), não há um consenso entre eles.

Para a execução do ensaio à compressão são usadas normas do concreto convencional, como a ABNT NBR 5738:2015, sendo que os corpos de prova

cilíndricos devem ser moldados com vibração externa a fim de não influenciar a distribuição das fibras.

2.3.3 Resistência à tração

A inserção de fibras em matrizes de base cimentícia pode aprimorar a resistência à tração, dependendo do volume de fibras empregado, do alinhamento destas na direção das principais tensões e do módulo de elasticidade da fibra.

Segundo Li e Stang (2004), ensaios experimentais de tração direta proporcionam uma noção da real distribuição de fissuras do compósito ao longo do carregamento.

Quinino (2015) afirma que durante o ensaio de tração nota-se a existência de fases distintas no histórico de carregamento do CRF. Na primeira fase, percebe-se o comportamento elástico do compósito, respeitando a Lei de Hooke, não havendo deformações residuais significativas com o cessar da carga (LI e STANG, 2004).

A segunda fase é marcada pela não linearidade nas relações entre tensões e deformações, quando ocorre a microfissuração da matriz. Nessa fase, as fibras são mais solicitadas e atuam de maneira mais eficiente na união das superfícies de ruptura (QUININO, 2015).

Segundo Góis (2010), o comportamento à tração do concreto é fortemente influenciado pela presença de fibras, especialmente na fase de pós-fissuração, porém, para serem obtidos incrementos relevantes, devem ser utilizando elevadas dosagens (de 1,5% a 2% ou superiores em volume).

Contudo, não existe ensaio padrão para determinar a curva tensão x deformação de concretos com fibras na tração direta. As dificuldades práticas para realizar o ensaio de tração direta levaram ao desenvolvimento de procedimentos alternativos, como o ensaio de compressão diametral, também chamado de Ensaio Brasileiro (GÓIS, 2010).

Conforme Góis (2010), nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, a tensão de compressão produz uma tensão de tração transversal, que é uniforme ao longo do diâmetro vertical. A ruptura ocorre quando é ultrapassada a máxima resistência à tração na direção ortogonal à força aplicada.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), comparado à tração direta, o ensaio de tração por compressão diametral é conhecido por superestimar a resistência à tração do concreto de 10 a 15%.

2.3.4 Resistência à flexão

Os compósitos reforçados com fibras de aço geralmente apresentam um melhor comportamento com relação à resistência à flexão do que a resistência à compressão ou até mesmo à tração. Isso ocorre porque na flexão o momento resistente é incrementado pelo deslocamento da linha neutra na direção da zona comprimida. Isso ocorre devido ao incremento na deformação de tração pela presença das fibras (LOPES, 2005).

Segundo Lima (2004), muitos estudos têm sido apresentados sobre o comportamento à flexão dos compósitos. Geralmente, estão baseados na análise das tensões que se desenvolvem ao longo da seção transversal de um elemento fletido, a partir do qual é possível estabelecer o momento de fissuração, o momento resistente e a relação momento-curvatura para o elemento estrutural.

Um estudo realizado por Formagini (2005) confirma que os incrementos de resistência à flexão, direcionados para as tensões de tração indiretamente atingidas, mostram-se nitidamente maiores perante às tensões derivadas de esforços de tração axial.

Conforme Mehta e Monteiro (2014), o CRF resiste a cargas consideráveis, mesmo apresentando deformações muito superiores à deformação de fratura do concreto convencional.

A resistência última de primeira fissura, segundo Quinino (2015), depende de parâmetros da matriz e da influência das características das fibras, o que pode ser visto por meio de análises de testes de flexão com diversas dosagens de fibras.

2.3.5 Tenacidade

A tenacidade pode ser definida como a propriedade que delimita a medida de capacidade de absorção de energia. Devido à difícil realização de ensaios de tração direta, normalmente recomenda-se ensaios de flexão para determinar a tenacidade

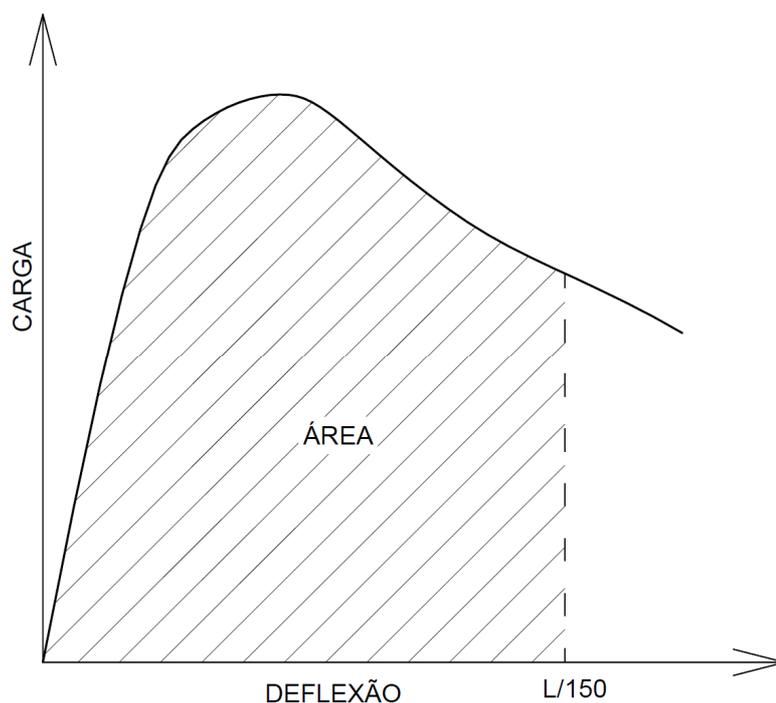
do material, por ser mais simples e conseguir reproduzir situações ocorridas na prática. (QUININO, 2015).

Existem alguns métodos para a avaliação da tenacidade que podem ser encontrados na literatura, entre eles: ACI Committee 544 (1982), ASTM C1399 (2010), Norma Japonesa JCSE-SF4 (1983) e Norma Belga NBN B15-238 (1992). Segundo Figueiredo (2000), os critérios propostos pela ASTM C1018 (1994) e JSCE-SF4 (1984) são aqueles de maior aceitação por apresentarem a facilidade de serem determinados em curvas de carga *versus* deflexão originadas de um mesmo ensaio.

Uma das vantagens da utilização deste método é que os parâmetros de tenacidade são pouco influenciados pelos diferentes sistemas de aplicação de carga ou por deflexões externas (SALVADOR, 2013). Porém existem algumas limitações, como a instabilidade pós-pico, que consiste em uma superestimação da carga suportada pelo corpo de prova imediatamente após a incidência da primeira fissura, ocorrendo neste momento a transferência abrupta de carga da matriz para a fibra com uma consequente elevação do deslocamento (FIGUEIREDO, 2011).

A representação da energia absorvida pela peça é dada pela área abaixo da curva carga *versus* deflexão (Figura 5), cujo valor tem se mostrado útil na avaliação de compósitos, apesar de ter sua determinação dependente das dimensões do corpo de prova, da configuração do carregamento, do tipo de controle de carga e da taxa de carregamento.

Figura 5 - Curva carga versus de flexão



Fonte: JSCE-SF4 (1984).

Contudo, é possível minimizar ao menos parte desses efeitos, através da normalização da capacidade de absorção de energia, expressa pela razão entre a energia necessária para romper uma viga produzida com CRF pela energia necessária para romper uma viga sem reforço. Para tanto, é imprescindível que se preserve, para ambos os casos, as mesmas condições de geometria e carga, como também a composição da matriz. Ainda assim, é preciso atentar para a influência decorrente das características das fibras utilizadas na razão encontrada. (QUININO, 2015).

A influência do fator de forma de fibras ancoradas na tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibras de aço foi estudada por Nunes e Agopyan (1998), e concluiu-se que, para as fibras de mesmo comprimento, ocorre o aumento da tenacidade à flexão do CRFA com o aumento do fator de forma do material. Isso se deve ao fato de existir um maior número de fibras por unidade de volume.

2.4 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NAS PROPRIEDADES DO CRF

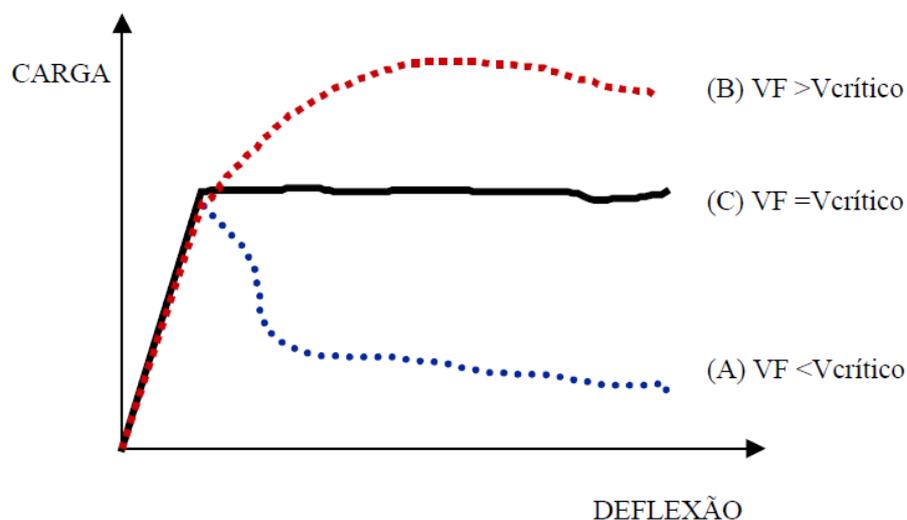
Neste item serão apresentados os principais fatores que influenciam as propriedades do concreto reforçado com fibras.

2.4.1 Teor de Fibras

Conforme Quinino (2015), quanto maior o teor, maior será a quantidade de fibras que atuam diretamente na fissura como ponte de transferência de tensão. Em contrapartida, baixos teores de fibras oferecem pouca ou nenhuma resistência à tração, flexão ou compressão. Sendo assim, o reforço feito com fibras depende do teor de fibra empregado.

Existe, ainda, o volume crítico de fibras que, segundo Figueiredo (2000), é o teor de fibras que mantém a mesma capacidade portante do compósito a partir da ruptura da matriz, ou seja, abaixo do volume crítico se obtém uma diminuição da capacidade de carga pós-fissuração, e acima do volume crítico obtém-se um acréscimo de capacidade resistente pós-fissuração. Este conceito pode ser visto na Figura 6.

Figura 6—Compósitos reforçados com fibra durante ensaio de tração



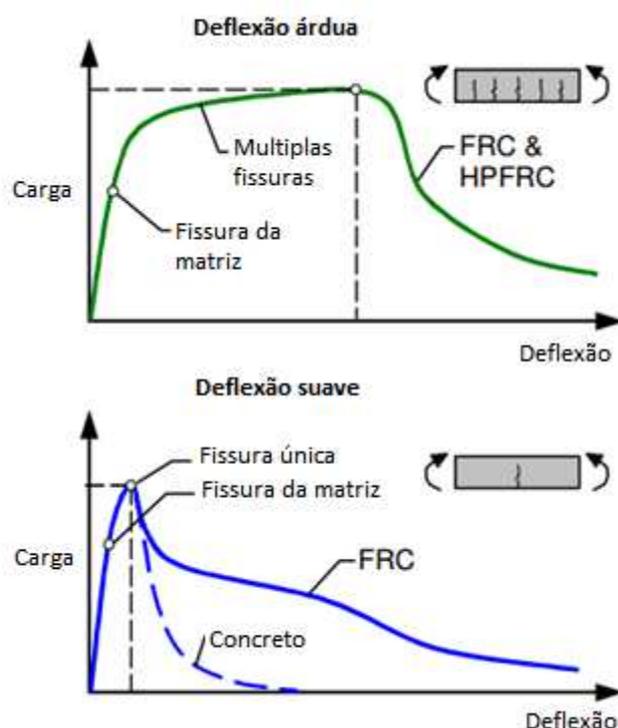
Fonte: Figueiredo (2000).

Conforme Garcez (2005), após a primeira fissura, o carregamento que era suportado pela matriz é transferido para as fibras. Caso o volume de fibras seja maior que o volume crítico, o compósito conserva-se íntegro, caso contrário, ocorre o esgotamento da fibra e a ruptura, de modo instável ao longo da matriz.

Figueiredo (2011) comenta que com o aumento do teor de fibras, a tensão em cada uma delas no momento de ruptura da matriz é menor, diminuindo-se o escorregamento ou a ruptura das fibras.

Löefgren (2005) explica que concretos reforçados com fibras com teor de fibras abaixo do crítico (*strain softening*) apresentam uma única fissura e decréscimo de tensão como comportamento pós-pico. Já com o volume de fibras maior que o crítico (*hard softening*) apresentam várias fissuras e uma resistência pós-pico maior do que a resistência de fissuração da matriz. As características desses comportamentos são apresentadas na Figura 7.

Figura 7–Características do comportamento sob flexão



Fonte: Adaptado de Löefgren (2005).

2.4.2 Geometria das fibras

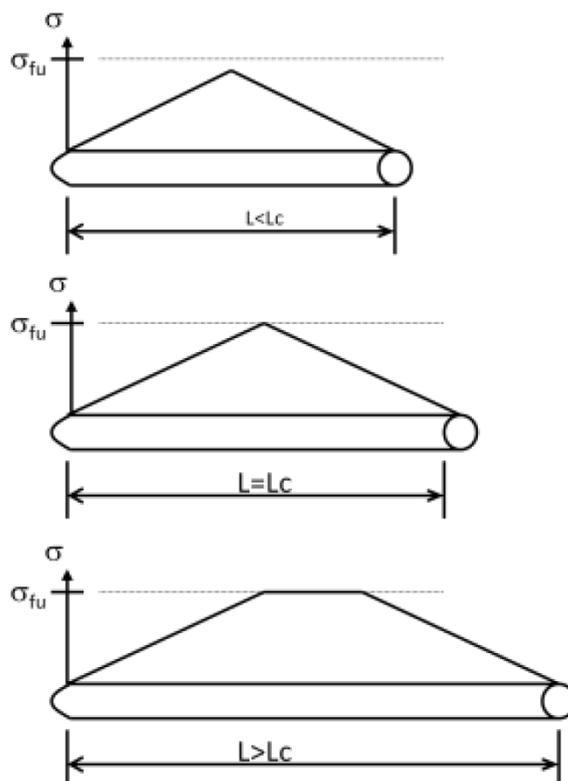
Segundo Zollo (1997), uma seção transversal não circular pode ser representada por um círculo de mesma área. Fibras com menor área transversal possuem menor resistência à flexão, mas se acomodam mais facilmente na pasta de cimento. Ainda, concretos reforçados com fibras com maior área transversal possuem maior resistência à flexão, porém, apresentam dificuldade para os processos de mistura e adensamento.

Accetti (2000) e Gava (2006) acreditam que modificando a superfície ou deformando a fibra ao longo do seu comprimento obtêm-se melhoras na aderência entre a fibra e a matriz.

Levando em consideração o comprimento da fibra, Figueiredo, Nunes e Tanesi (2000) afirmam que, com o aumento do comprimento, obtêm-se o aumento da aderência entre a fibra e a matriz. Desta forma, a variação desse comprimento pode acarretar em mudanças no modo de ruptura do compósito, ou seja, com um aumento considerável da aderência, em vez do arrancamento ocorrerá o rompimento da fibra (HARRIES e YOUNG, 2003).

Segundo Bentur e Mindess (2007), é possível avaliar o mecanismo de transferência de tensões através do comprimento crítico (l_c). Basicamente, se o comprimento da fibra é $l_f < l_c$, a tensão não atinge o valor da resistência da fibra. Se $l_f > l_c$, a tensão atinge esse valor, atuando sobre o potencial do reforço, como é ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Distribuições possíveis de tensão ao longo de uma fibra em função do comprimento crítico



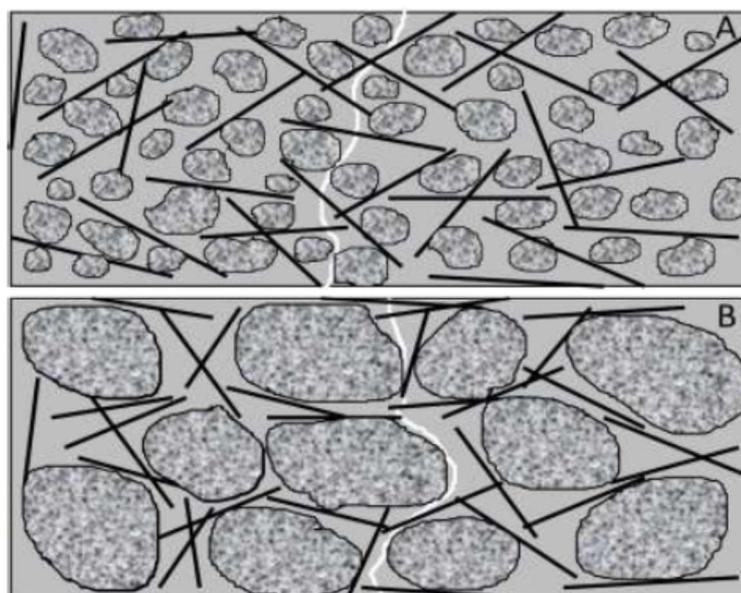
Fonte: (adaptado de Bentur e Mindess, 1990 apud Figueiredo, 2011).

Conforme Figueiredo (2011), quando a fibra tem um comprimento menor do que o crítico, a carga de arrancamento proporcionada pelo comprimento embutido na matriz não é suficiente para produzir uma tensão que supere a resistência da fibra. Nesta situação, com o aumento da deformação e conseqüentemente da abertura da fissura, a fibra que está atuando como ponte de transferência de tensões será arrancada do lado que possui menor comprimento embutido. Este é o caso encontrado para as fibras de aço no concreto de baixa e moderada resistência mecânica.

Li e Maalej (1996) afirmam que a trinca contorna o agregado por meio da interface argamassa-agregado, devido à elevada resistência do agregado, que não é ultrapassada pela trinca. O entrelaçamento das fibras protege as regiões próximas aos agregados, dificultando a propagação das aberturas.

Conforme Maidl (1991) é recomendável a utilização de fibras metálicas com comprimento igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado empregado no concreto, pois é necessária uma compatibilidade dimensional entre agregados e fibras, a fim de interceptar com maior frequência as fissuras. Figueiredo (2011) complementa que isso é importante porque a fratura se propaga preferencialmente na região de interface entre o agregado graúdo e a pasta para concretos de baixa e moderada resistência mecânica, conforme Figura 9.

Figura 9 - CRF em que há compatibilidade dimensional entre fibras e o agregado graúdo (A) e onde não há (B).

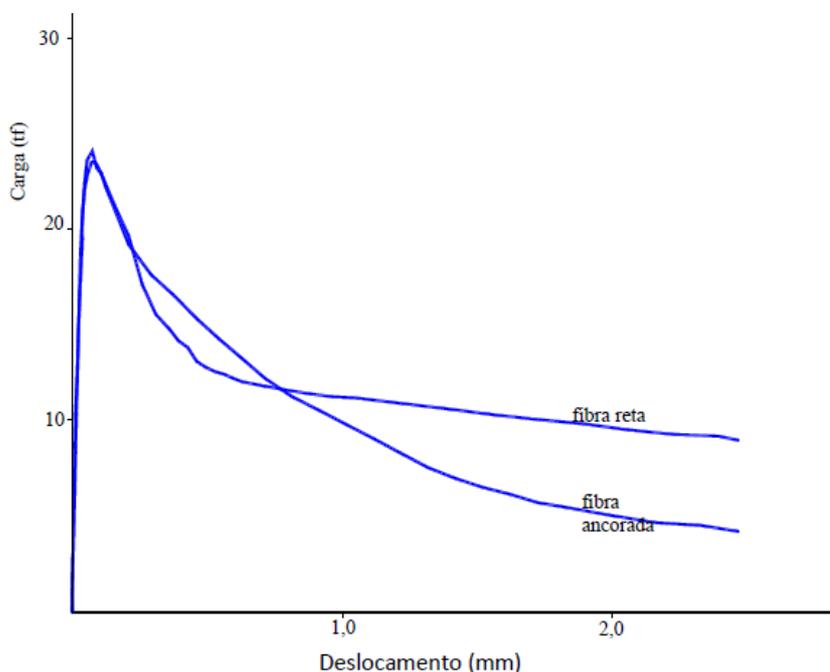


Fonte: Figueiredo (2000).

Chenkui e Guofan (1995) ressaltam que, caso o comprimento das fibras seja duas vezes menor que o diâmetro máximo dos agregados, a transferência de tensões da fibra no compósito pode ser reduzida, uma vez que a disposição das fibras tende a coincidir com a direção de propagação das fissuras, provocando a diminuição da transferência de esforços.

Outro parâmetro que define o comportamento pós-fissuração do compósito é o tipo de ancoragem. No estudo realizado por Figueiredo e Torneri (2006), foram avaliadas fibras com o mesmo fator de forma, porém uma com e outra sem ancoragem em gancho nas extremidades (tipo AII e RII). Observou-se que a fibra com ancoragem apresenta uma resistência residual maior para os menores níveis de deslocamento, ou seja, para deslocamentos até 1 mm, enquanto a fibra reta apresenta uma maior resistência residual para as maiores deflexões, isto é, maiores que 1 mm. Pode-se notar isso na Figura 10.

Figura 10 - Variação da resistência residual pós-fissuração com aumento do nível de deslocamento

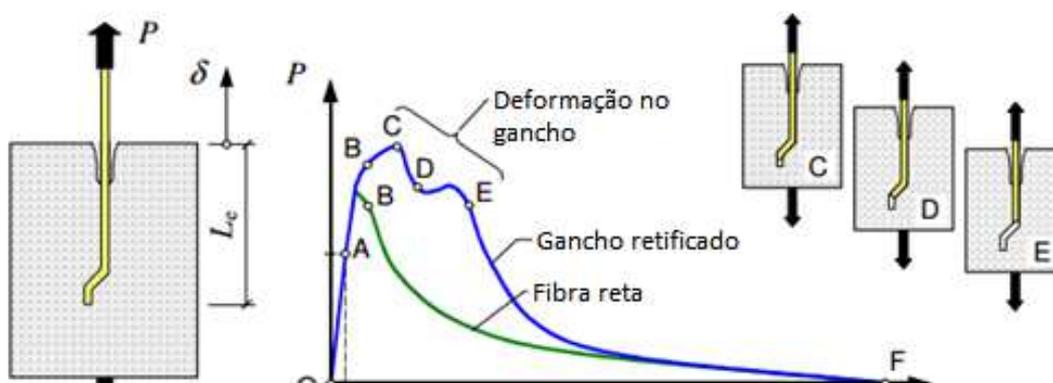


Fonte: Figueiredo e Torneri (2006).

Löefgren (2005) apresenta uma comparação entre a curva de *pull-out* para as fibras retas e com ancoragem como pode ser visto na Figura 11. A parte ascendente (OA) está associada à ligação elástica. Na próxima porção da curva (AB), o descolamento é iniciado e progride até que se descole por completo (B). Depois, o

atrito decrescente provoca uma diminuição da carga com o aumento do deslizamento e como resultado tem-se a diminuição do comprimento de ancoragem da fibra. Para a fibra reta, esta parte é representada por (BF). Para uma fibra com ancoragem a carga pode ser aumentada (BC), devido ao ponto de ancoragem mecânica até que este começa a deslizar (CD) e se deforma progressivamente durante o aumento de carga (DE). Quando a extremidade de ancoragem tenha sido completamente puxada para fora, e esticada no processo, uma fase de decomposição de atrito termina o processo (EF), o que corresponde ao caso de uma fibra linear.

Figura 11–Curvas Carga x deslocamento para diferentes tipos de fibras



Fonte: Löefgren (2005).

Em função da análise da diferença de desempenho observada nos compósitos, pode-se deduzir que isso é função da interação fibra-matriz, que determina o processo de arrancamento da fibra e a resistência residual pós-fissuração do material (Figueiredo, 2011).

Conforme di Prisco (2010) e Concrete Society (2007), a ancoragem mecânica na matriz é controlada principalmente pela aderência entre a fibra e a matriz e pelas deformações que existem em suas extremidades. Quando as fibras são utilizadas em teores abaixo do volume crítico, sofrem um deslizamento assim que a carga é transferida para elas, dessa forma apresentam capacidade resistente inferior à carga resistida pela matriz no momento de sua fissuração, o que explica o comportamento de amolecimento de deslocamento (*deflection-softening*). A capacidade de absorção de energia é recuperada quando a ancoragem é mobilizada e este ganho de resistência residual é mais intenso para os menores níveis de deformação.

2.4.3 Orientação de fibras no CRF

Conforme Shah (1991), o aumento substancial da resistência à tração do concreto e da tenacidade são as características mais reconhecidas no concreto reforçado com fibras. Tais propriedades são melhoradas a partir da eficácia no controle da largura das fissuras, que depende do desempenho individual de todas as fibras que atravessam uma fissura. A força global de ponte da fibra depende da quantidade real de fibras sob cada ângulo de inclinação e as suas respectivas respostas de arrancamento (OLIVEIRA, 2010).

Segundo Wichmann (2013), a resistência à tração do concreto depende, em grande parte, da relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra, a força de adesão entre a fibra e a matriz e a orientação das fibras no concreto. As possíveis distribuições das fibras no concreto são:

- a) Espacialmente distribuídos (3D);
- b) Distribuídos em um plano (2D), por exemplo, concreto projetado;
- c) Alinhados uniaxialmente (1D), por exemplo, em peças de concreto extrudado.

De acordo com Oliveira (2010), a resposta à tração do CRF através da sobreposição das respostas individuais de fibra ao arrancamento (*pullout*) foi investigada por Van Gysel (2000) e Markovic et al. (2004), no entanto, a maioria das abordagens existentes são prejudicadas pelo conceito de orientação das fibras. Considerando que uma orientação média pode ser obtida através de várias combinações de valores individuais e que as respostas de arrancamento de fibras sob diferentes ângulos de inclinação são distintas, uma dispersão significativa nas propriedades mecânicas da CRF é frequentemente observada.

Segundo Laranjeira (2011), alinhamentos preferenciais das fibras tendem a ocorrer por diversos motivos: o processo de fabricação, o lançamento do concreto, a vibração, a geometria das fôrmas, entre outros. Na maioria dos casos, a anisotropia na orientação das fibras pode ser ainda considerada uma característica intrínseca do material, como no caso dos concretos fluidos.

A direção das fibras não influencia apenas na distribuição destas na matriz. Bentur (2000) afirma que, ao se considerar a inclinação das fibras relativa à sua direção de arrancamento, deve-se levar em conta o efeito da flexão da fibra na

interface fissura-matriz, o qual muda a interação fibra matriz. A flexão das fibras leva a duas influências contraditórias.

Conforme Nunes (2006), a melhora é esperada no caso de fibras dúcteis, as quais apresentam deformação plástica, à medida que estas flexionam através das fissuras, causando um gasto energético adicional. Por outro lado, um aumento da carga de arrancamento proporcionada pela flexão das fibras pode provocar tensões superiores à resistência da fibra, quebrando-a.

Robins, Austin e Jones (2002) estudaram o arrancamento de fibras de aço com gancho em diferentes inclinações e em matrizes de diversas resistências, e puderam concluir que, na medida em que a orientação da fibra aumenta, a resposta ao arrancamento torna-se menos influenciada pela resistência da matriz e mais influenciada pelas propriedades mecânicas da fibra.

Os valores de resistência à tração direta, deformação e tenacidade, segundo Velasco (2008), são alterados de forma expressiva quando as fibras são orientadas na direção das tensões principais, apresentando incrementos máximos de 27%, 32% e 321% respectivamente.

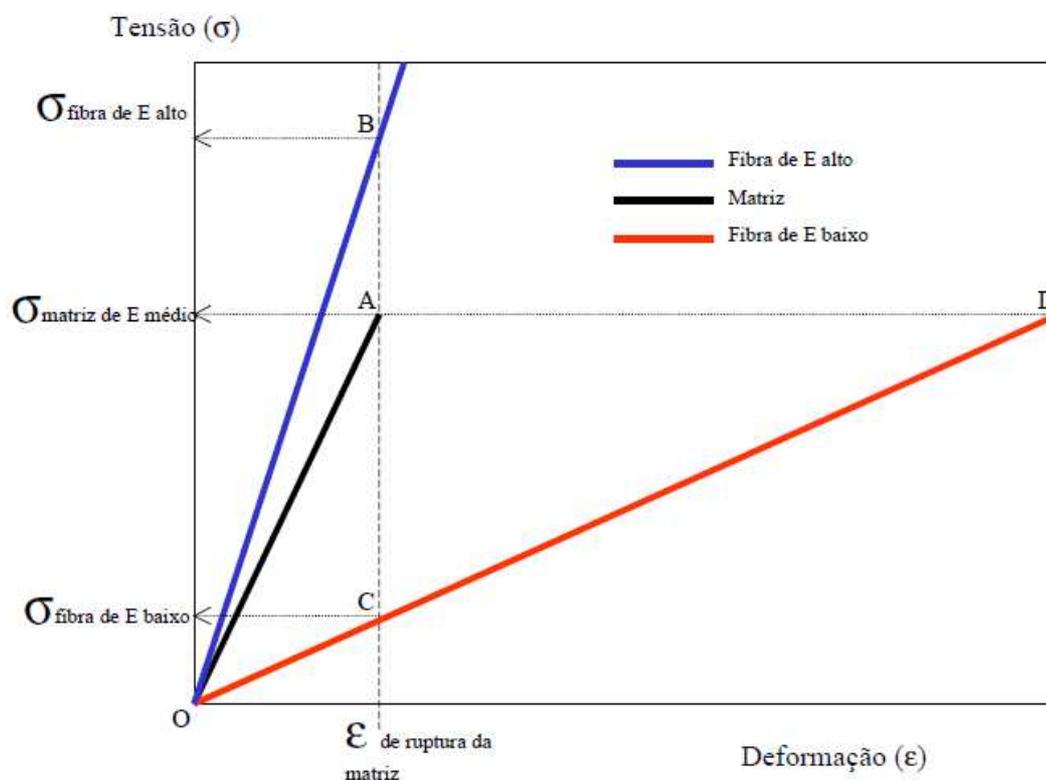
2.4.4 Módulo de Elasticidade e Resistência Mecânica

O módulo de elasticidade e a resistência mecânica são as principais propriedades na determinação da capacidade do reforço que a fibra confere ao concreto (TANESI e AGOPYAN, 1997).

Quanto ao módulo de elasticidade, segundo Batson (1974), pode-se dividir as fibras em duas classes: com módulo inferior à matriz cimentícia ou com módulo superior à matriz cimentícia.

Figueiredo (2000) explica que, conforme o gráfico da Figura 12, a curva de tensão por deformação da matriz está representada pela linha O-A, enquanto as linhas O-B e O-C representam o trabalho elástico das fibras de alto e baixo módulo, respectivamente. Logo, a fibra de baixo módulo não poderá oferecer uma capacidade de reforço após a fissuração da matriz para um dado carregamento ou permitirá uma grande deformação do compósito com um elevado nível de fissuração (ponto D).

Figura 12 – Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto.



Fonte: Figueiredo (2000).

O uso de fibras com baixo módulo de elasticidade exige um teor elevado de fibras na matriz, podendo inclusive inviabilizar a utilização destas. Já o uso de fibras com elevado módulo de elasticidade normalmente apresenta um alto nível de tensão no momento de ruptura da matriz. Mesmo com um elevado módulo de elasticidade não se pode garantir que a fibra é viável para atuar como reforço, levando em consideração que uma baixa resistência à tração ou ao cisalhamento pode comprometer sua utilização (QUININO, 2015).

2.4.5 Hibridização

Segundo Velasco (2008), o princípio na hibridização do reforço fibroso consiste na utilização de fibras curtas e finas no controle da microfissuração e fibras longas e mais espessas sendo usadas para possibilitar o efeito de “ponte”. Os estudos de Nehdi e Ladanchuk (2004) mostram os benefícios nas propriedades mecânicas do concreto com a utilização de diferentes tipos de fibra, porém é importante lembrar que nem sempre a hibridização do reforço conduz a incrementos nas propriedades dos

compósitos, sendo de extrema importância que o compósito seja estudado para alcançar o resultado desejado.

Quinino (2015) comenta que as combinações híbridas de microfibras e macrofibras são uma boa alternativa para atingir um melhor desempenho do compósito, principalmente de resistência à compressão e tenacidade. Ainda explica que as microfibras de polipropileno retardam a formação de microfissuras, podendo restringir possíveis deslocamentos diferenciais no interior da matriz durante a formação e propagação de fissuras. Por outro lado, as macrofibras metálicas têm a função de “costurar” as fissuras, retardando sua abertura e extensão. Estas fibras, trabalhando em conjunto e com proporções adequadas, resultam em uma melhora de desempenho do compósito.

Conforme Banthia e Sappakittipakorn (2007), existe uma interação entre as fibras, podendo-se assim considerar o desempenho híbrido como a soma do desempenho de cada fibra individual. Tal fenômeno é conhecido como sinergia. Os autores destacam que se deve atentar para as seguintes questões:

- *Resposta constitutiva das fibras:* uma das fibras deve ser mais forte e rígida, contribuindo para o retardo da primeira fissura e para o aumento da resistência última do compósito. Já o segundo tipo de fibras deve ser mais flexível e dúctil, conduzindo o compósito a uma maior rigidez, bem como uma maior capacidade de deformação pós-fissuração;
- *Dimensões das fibras:* a utilização de fibras com menores dimensões e com capacidade de transpor microfissuras ajuda a retardar o crescimento e retarda a coalescência das fissuras, o que conduz ao aumento da resistência à tração do compósito. A fibra maior destina-se a minimizar a propagação das macrofissuras e, portanto, resulta numa melhoria substancial na resistência à fratura do compósito;
- *Função das fibras:* um tipo de fibras destina-se a aprimorar as propriedades do concreto no estado fresco e nas primeiras idades, enquanto a outra fibra leva a melhores propriedades mecânicas.

3 MATERIAIS E MÉTODO

Este capítulo trata dos materiais empregados e do método adotado para avaliação do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras espaciais e combinações híbridas destas fibras com fibras metálicas (monofilamentos) e poliméricas.

3.1 MATERIAIS

A seguir, serão apresentadas as características dos materiais utilizados nesta pesquisa.

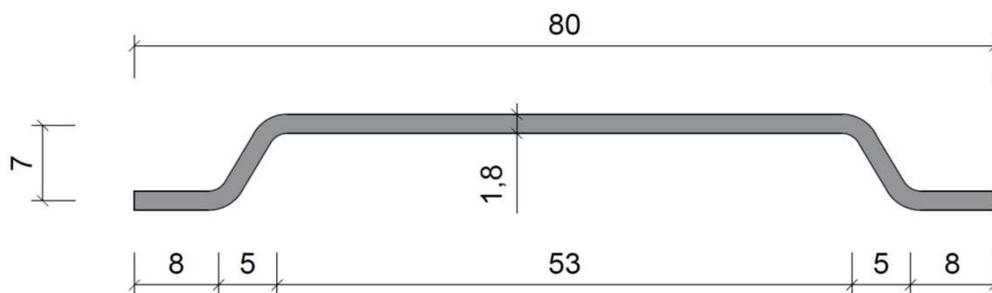
3.1.1 Fibra espacial

Para o desenvolvimento da fibra espacial, partiu-se de um arame de aço com baixo teor de carbono. Inicialmente, o arame foi cortado e os trechos unidos entre si com solda, assim sendo, era imprescindível que o aço possuísse uma boa soldabilidade. No que se refere às dimensões do arame, este possuía um diâmetro de 1,8 mm, devido à facilidade de soldagem, pois diâmetros menores demandam a utilização de processos de soldagem mais elaborados e difíceis.

É importante destacar que, devido à inexistência de fibras em monofilamentos com diâmetros maiores que 1,2 mm disponíveis no mercado, optou-se por produzir a fibra em monofilamento, a qual servirá de matéria prima para a montagem das fibras espaciais.

A fibra foi confeccionada de tal modo que pode ser classificada, conforme ABNT NBR 15530:2007, como tipo A, de aço com ancoragens nas extremidades, e Classe I, oriunda de arame trefilado a frio, cujo fator de forma é igual a 44. Suas dimensões são apresentadas na Figura 13. Decidiu-se por este tipo de fibra devido à facilidade de fabricação e o fator de forma igual a 44, pois com um fator de forma maior, a fibra teria um comprimento muito elevado, podendo comprometer a trabalhabilidade do concreto.

Figura 13 – Dimensões das fibras



Fonte: Autor.

Para a conformação da fibra foi fabricada uma prensa que corta o arame e o molda com as dimensões apresentadas na Figura 13. Uma imagem da prensa é mostrada na Figura 14.

Figura 14 – Prensa para confecção das fibras metálicas



Fonte: Autor.

Para a confecção da fibra espacial foram utilizadas três fibras monofilamentos posicionadas de forma ortogonal entre si e, após isso, as fibras foram soldadas no cruzamento. A Figura 15 apresenta o aspecto final da fibra espacial.

Figura 15 – Aspecto da fibra espacial



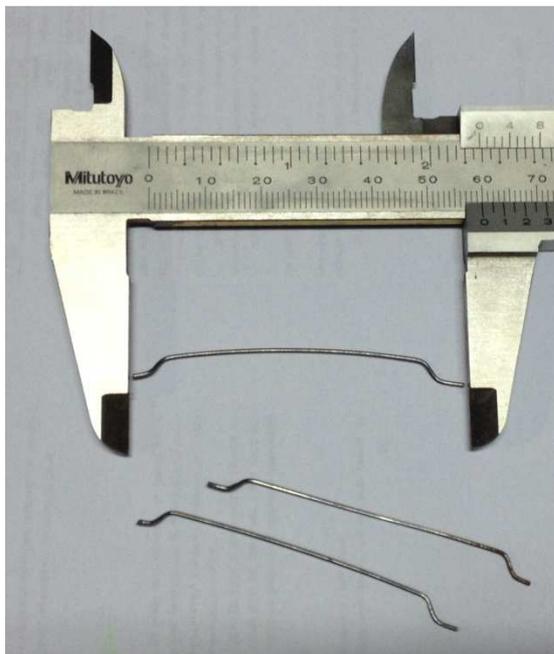
Fonte: Autor.

O aço foi ensaiado no Laboratório de Ensaio Mecânicos da Unisinos. Foram ensaiadas 4 amostras, porém uma foi descartada por discrepância no resultado. A tensão de escoamento média foi de 646,8 MPa e o limite de resistência médio foi de 763,8 MPa.

3.1.2 Fibra de aço monofilamento

As fibras metálicas na forma de monofilamentos empregadas nesse estudo foram produzidas a partir de fios de aço trefilados com espessura de 0,75 mm, comprimento de 60 mm e fator de forma igual a 80. Optou-se por este fator de forma, pois um fator de forma maior melhora a ancoragem da fibra e, conseqüentemente, propriedades do compósito, como resistência à tração e tenacidade. Como o fator de forma da fibra espacial não é tão elevado, decidiu-se em elevar o fator de forma da fibra monofilamento. A Figura 16 apresenta uma imagem das fibras.

Figura 16 – Imagem das fibras monofilamentos metálicas



Fonte: autor.

Não foi possível realizar o ensaio de tração neste aço devido à limitação do equipamento de ensaio. Segundo o fabricante, a resistência à ruptura deste aço é superior a 1000 MPa.

3.1.3 Microfibra de polipropileno

As microfibras de polipropileno utilizadas nesta pesquisa foram produzidas pelo processo de extrusão. As características da microfibra são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características das fibras de polipropileno

Diâmetro	18 micrometros
Comprimento	20mm
Área Específica	>244m ² /kg
Frequência	180 milhões fios/kg

Fonte: <https://www.maccaferri.com.br/>.

A utilização da microfibra de polipropileno se justifica devido a estudos elaborados por Quinino (2015) que, em conjunto com as macrofibras metálicas, apresentou melhora nas propriedades dos compósitos em relação a compósitos não híbridos.

Além disso, as microfibras de polipropileno retardam a formação de microfissuras, podendo restringir prováveis deslocamentos diferenciais no interior da matriz, fazendo com que a primeira fissura não se forme de maneira abrupta.

3.1.4 Concreto

O concreto para a confecção das matrizes foi desenvolvido para atingir a resistência à compressão (f_c) de 25 MPa utilizando a metodologia de dosagem proposta pela ABCP. O traço para atingir esta resistência à compressão foi 1:2,51:3,43 e a relação água/cimento de 0,66. A consistência foi de S160 ($160 \leq a < 220$). Todos os materiais foram dosados em massa e a mistura se deu com auxílio de betoneira de eixo inclinado.

Não se desejou uma resistência à compressão elevada pois, matrizes com baixa resistência à compressão apresentam uma propagação mais estável imediatamente após a primeira fissura, não afetando assim os resultados dos ensaios. A consistência almejada era alta, pois sabe-se que a adição de fibras a afetam negativamente, diminuindo-a na maioria dos casos.

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland CP V – ARI, cujas características físicas e químicas atendem a ABNT NBR 5733:1991 – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Não foram utilizados aditivos no traço.

Os materiais foram caracterizados em laboratório, seguindo as recomendações da ABNT NBR NM 248:2003 – Agregados – Determinação da composição granulométrica. A distribuição granulométrica do agregado miúdo pode ser vista na Tabela 3.

Tabela 3 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo

Abertura	% retida	% retida acumulada
4,75	0,71%	0,71%
2,4	2,42%	3,13%

1,2	8,03%	11,16%
0,6	17,15%	28,31%
0,3	51,53%	79,84%
0,15	18,67%	98,51%
Fundo	1,49%	100,00%
Diâmetro máximo = 4,8mm		
Módulo de finura = 2,22		
Massa específica = 2,63 g/cm ³		

Fonte: autor.

Já o agregado graúdo foi de origem basáltica e tem a distribuição granulométrica apresentada na Tabela 4 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo.

Tabela 4 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo

Abertura	% retida acumulada	
19,1	3,57%	3,57%
12,5	50,51%	54,08%
9,5	28,26%	82,34%
6,3	15,44%	97,78%
4,8	1,76%	99,54%
2,4	0,28%	99,82%
1,2	0,00%	99,82%
0,6	0,00%	99,82%
0,3	0,00%	99,82%
0,15	0,00%	99,82%
Fundo	0,18%	100,00%
Diâmetro máximo = 19mm		
Módulo de finura = 6,86		
Massa específica = 2,69 g/cm ³		

Fonte: autor.

3.2 ENSAIOS

Para execução dos ensaios foram selecionados procedimentos experimentais recomendados por normas técnicas nacionais e internacionais.

3.2.1 Concreto no estado fresco

Para a avaliação das propriedades do concreto no estado fresco utilizou-se os procedimentos descritos a seguir.

3.2.1.1 Trabalhabilidade

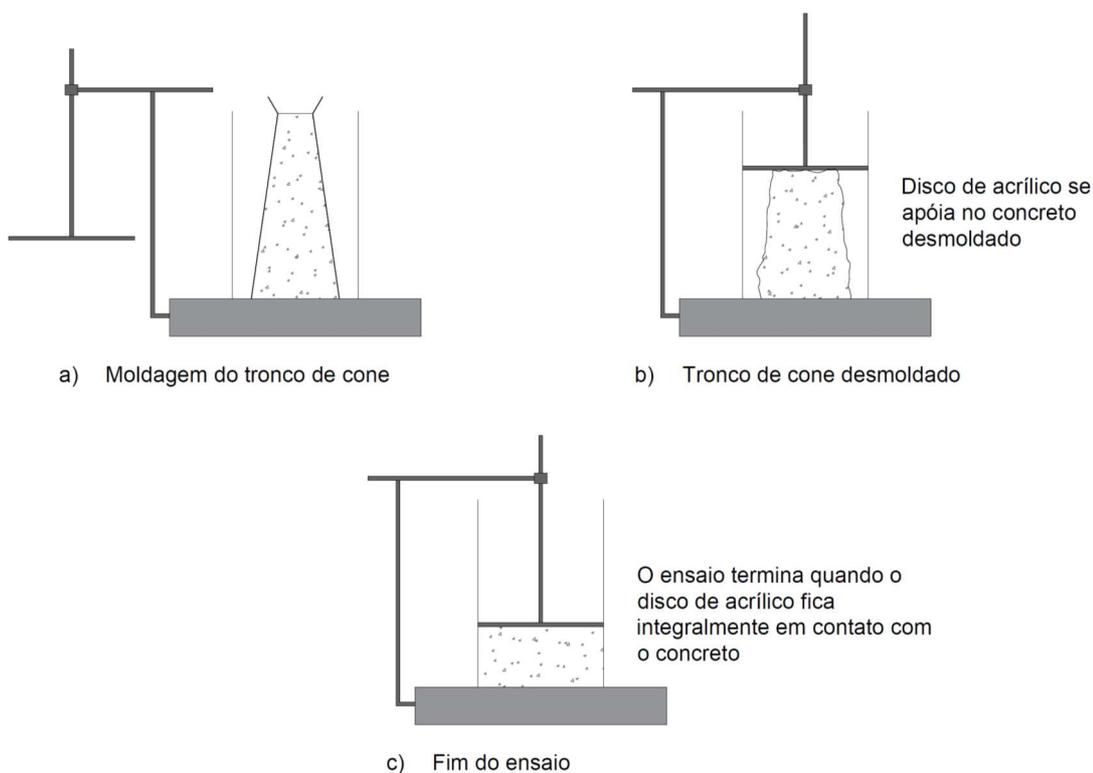
Em compósitos com adições de fibras pode existir a perda da trabalhabilidade, e esta perda é diretamente proporcional ao volume e tamanho das fibras adicionadas. Devido a este fato, para concentrações maiores de fibras, o ensaio estático pode não apresentar resultados satisfatórios, sendo necessário recorrer a ensaios dinâmicos.

A ACI 554.3R-93 (2006) recomenda a utilização de três métodos para avaliar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, que são:

- abatimento de tronco de cone;
- abatimento de tronco de cone invertido;
- ensaio de “VeBe”;

Neste estudo foram utilizados dois métodos para avaliação da trabalhabilidade do concreto no estado fresco, o ensaio de abatimento do tronco de cone e o ensaio VeBe. O primeiro é especificado pela ABNT NBR NM 67 - Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, aplicável a concretos plásticos e coesivos que apresentem assentamento igual ou superior a 10 mm. Já o segundo é especificado pela ACI 211.3R-02 e DNIT 064/2004 e é utilizado para análise de consistência de concretos muito secos ou com fibras. Neste ensaio a medida de consistência do material é definida como sendo o tempo necessário para remoldar o concreto contido no equipamento da forma tronco-cônica para a forma cilíndrica, conforme mostra a Figura 17.

Figura 17 – Ensaio de VeBe



Fonte: ACI 211.3R-02 e DNIT 064/2004.

3.2.2 Concreto no estado endurecido

Nesse item foram descritos os procedimentos adotados para a caracterização do concreto. Avaliou-se quantitativamente a resistência à compressão axial, a resistência à tração na flexão e a tenacidade dos compósitos.

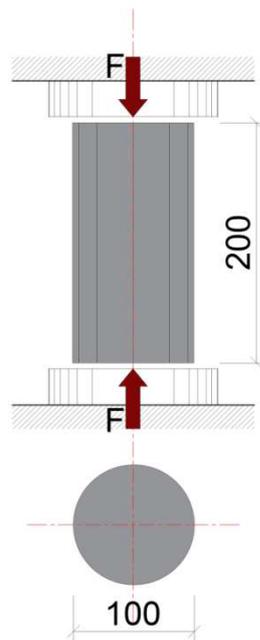
3.2.2.1 Resistência à Compressão Axial

O ensaio de resistência à compressão (f_c) tem como objetivo principal a obtenção do valor potencialmente característico do compósito, cujo resultado servirá de referência para verificação de sua eficiência.

A resistência à compressão simples foi avaliada seguindo as recomendações da ABNT NBR 5739:2007 - Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.

Os corpos de prova utilizados nesse ensaio tinham 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro, conforme Figura 18 e Figura 19.

Figura 18 – Esquema de ensaio e dimensões – compressão simples



Fonte: Autor.

Figura 19 – Ensaio de compressão simples



A resistência à compressão é calculada a partir da equação 2.

$$f_c = \frac{4.F}{\pi.D^2} \quad (2)$$

onde:

f_c : resistência à compressão do corpo de prova (MPa);

F: força máxima aplicada durante o ensaio (N);

D: diâmetro do corpo de prova (mm).

3.2.2.2 Tenacidade

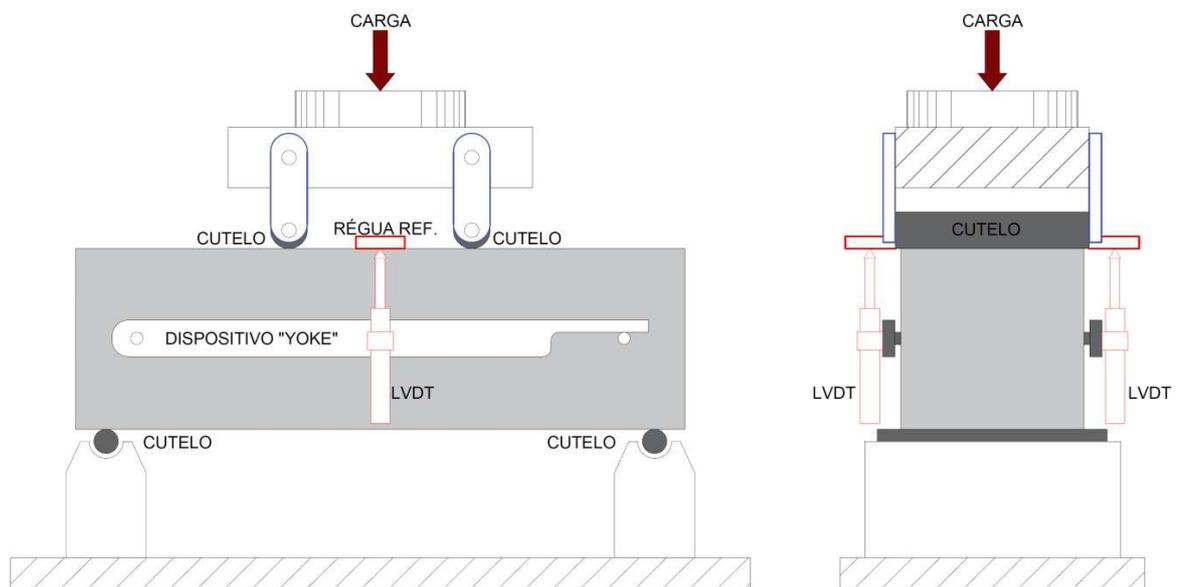
Vários pesquisadores apontam o ensaio de flexão como um dos mais difundidos devido à sua facilidade de execução e pelo fato de representar a maioria das situações práticas.

Os ensaios de flexão foram executados com corpos de prova prismáticos (vigas) e teve como finalidade a determinação da tenacidade do compósito, identificando a influência das fibras no interior do concreto.

Não existe norma brasileira que regulamenta este tipo de ensaio, e isso foi um dos motivos a buscar normas internacionais que regimentam este ensaio. Existem diversas normas internacionais que regulamentam este ensaio, porém decidiu-se por empregar a norma japonesa JSCE-SF4 (1984). Esta é uma das primeiras a prescrever ensaios de flexão de corpos de prova prismáticos para avaliação da tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibras. Além disso, segundo Figueiredo (2011), é o método mais utilizado para dimensionamento de elementos de concreto reforçado com fibras e o que apresenta a concepção mais simples. Foi utilizada em várias outras pesquisas, como Quinino (2015), Banthia (2007), Salvador (2013), entre outros.

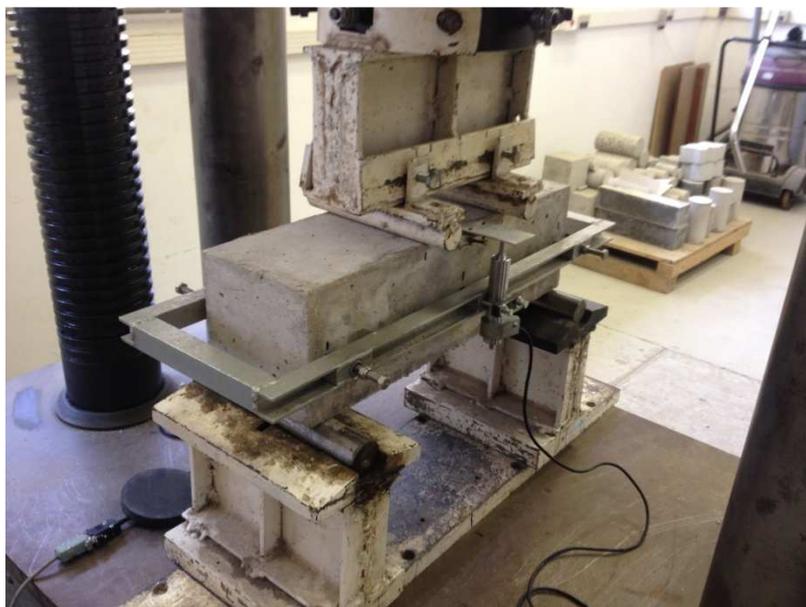
Esta norma é baseada na flexão de prismas sem entalhe, carregados em terços médios, isto é, o vão de ensaio deve ter três vezes a altura do corpo de prova. A configuração do ensaio consiste em apoiar a viga em dois cutelos e aplicar o carregamento através de outros dois cutelos, posicionados na parte superior da viga, no terço médio do vão, como apresentado na Figura 20 e Figura 21. As dimensões dos corpos de prova serão de 150 mm de altura, 150 mm de largura e 500 mm de comprimento, ensaiados com 450 mm de vão. O vão deve ser equivalente a três vezes a altura do corpo de prova.

Figura 20 – Configuração de ensaio– Flexão em quatro pontos



Fonte: JSCE-SF4 (1984).

Figura 21 – Imagem do ensaio



Fonte: Autor

O deslocamento foi medido através de dois transdutores de deslocamento (LVDT), posicionados na parte superior central de cada um dos lados da viga, sendo

que o deslocamento que adotado correspondeu à média de deslocamento dos dois transdutores. Os transdutores foram fixados com parafusos ao sistema “yoke”, fixados por meio de pinos nas laterais da viga.

A prensa utilizada foi uma Shimadzu de 2000 KN. A aplicação da carga foi efetuada por deslocamento prescrito, com velocidade de 0,5 mm/min. A velocidade de aplicação da carga recomendada pela JSCE-SF4 (1984) é entre 0,15 e 0,30 mm/min, menor que a velocidade utilizada no ensaio, porém esta velocidade era a mínima permitida pela prensa.

De posse do gráfico força x deslocamento (Figura 22), pode-se determinar o fator de tenacidade que, segundo a JSCE-SF4 (1984), é obtido através da área total (T_b) abaixo da curva, até o deslocamento equivalente a $L/150$. O cálculo do fator de tenacidade (FT), ou também denominado de resistência à flexão equivalente, é apresentado na equação 3:

$$FT = \frac{T_b}{\delta_{Tb}} \cdot \frac{L_v}{b_v \cdot h_v^2} \quad (3)$$

onde:

FT = fator de tenacidade, ou resistência à flexão equivalente;

T_b = área sob a curva até o deslocamento equivalente de $L/150$;

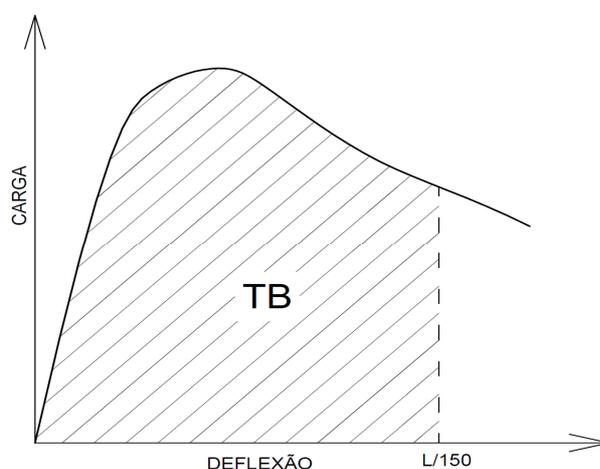
δ_{Tb} = deslocamento equivalente a $L/150$;

b_v = largura da viga;

h_v = altura da viga;

L_v = vão da viga durante o ensaio.

Figura 22 – Critério da JSCE-SF4 (1984) para a determinação da tenacidade



Fonte: JSCE-SF4 (1984).

O rompimento do corpo de prova deve ocorrer em seu terço central. Se ocorrer fora dessa região, seu resultado deve ser descartado.

3.2.2.3 Resistência à tração na flexão

Para o ensaio de resistência à tração na flexão, foi utilizada a metodologia descrita pela norma japonesa JSCE-SF4 (1984) e pela norma brasileira ABNT NBR 12142:2010. Este método consiste em ensaios de flexão com corpos de prova prismáticos (vigas).

O ensaio é realizado da mesma forma que o ensaio de tenacidade. A resistência à tração na flexão é calculada de acordo com a equação (4):

$$f_{ctf} = \frac{F.l}{b.d^2} \quad (4)$$

onde:

f_{ctf} = é a resistência à tração na flexão, expressa em Megapascal (MPa);

F = é a força máxima registrada na máquina de ensaio, expressa em Newton (N);

l = é a dimensão do vão entre apoios, expressa em milímetros (mm);

b = é a largura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

d = é a altura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

3.3 FÔRMAS

As formas utilizadas para moldagem das vigas foram de aço com dimensões de 500x150x150mm. As formas foram vedadas para evitar a fuga de nata de cimento e receberam a aplicação de desmoldante do tipo óleo mineral.

Para os ensaios de compressão do concreto foram utilizados fôrmas cilíndricas metálicas com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

Os procedimentos para o adensamento e a cura dos corpos de prova seguiram as especificações da ABNT NBR 5738:2015 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.

3.4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para se alcançar os objetivos descritos no Capítulo 01, desenvolveu-se o programa experimental.

Foram produzidos concretos com diferentes frações volumétricas de fibras, a fim de compará-las entre si e com um concreto de referência, sem fibras. As misturas foram denominadas da seguinte forma: MR (mistura de referência), M1 a M17 (misturas com adição de fibras). A Tabela 5 apresenta a quantidade de cada fibra adicionada nas misturas. Em todos os casos utilizou-se uma matriz de concreto com resistência à compressão de 25 MPa. Esses teores foram baseados em testes efetuados anteriormente.

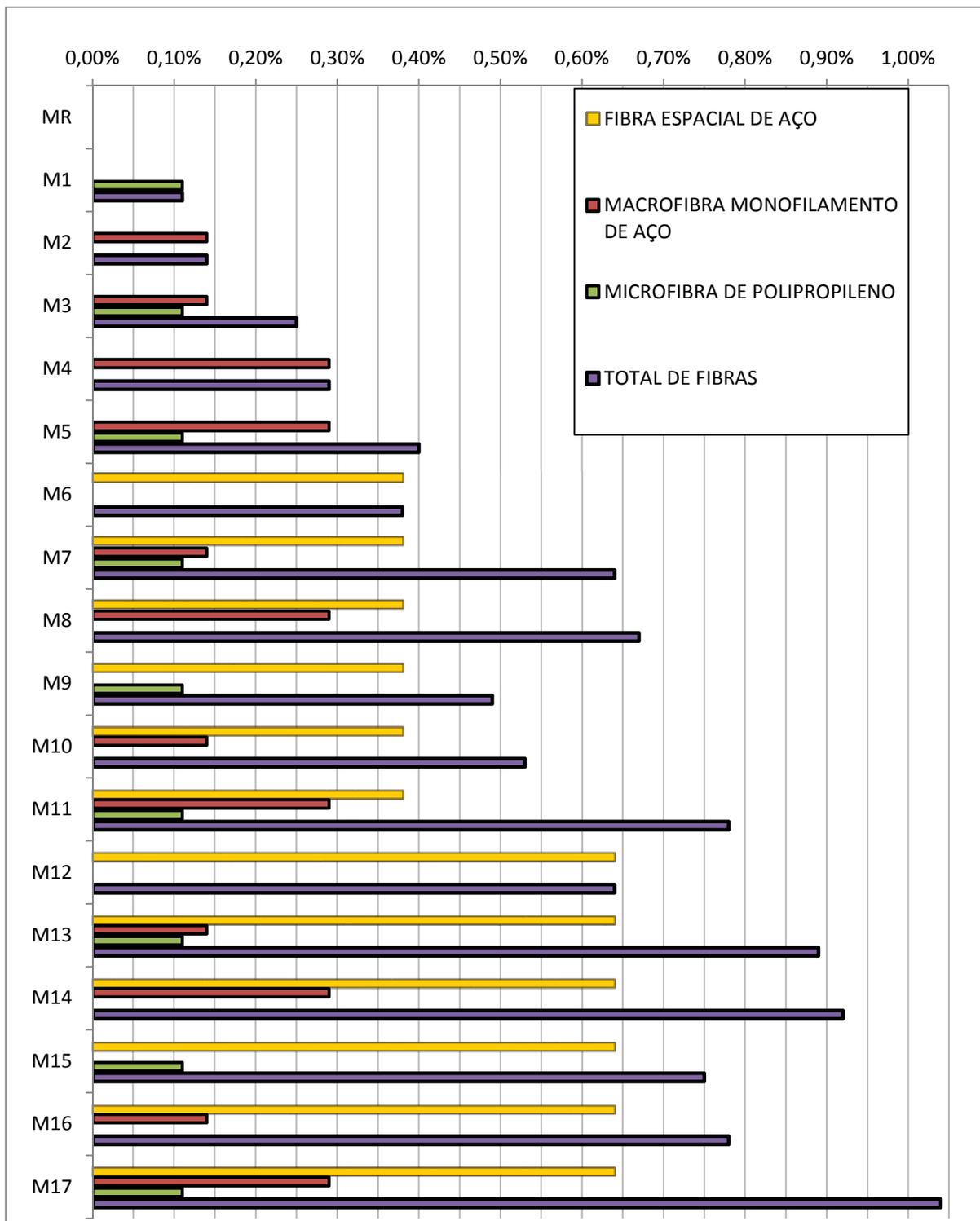
Tabela 5 – Misturas do concreto

MISTURAS	FIBRA ESPACIAL DE AÇO		MACROFIBRA MONOFILAMENTO DE AÇO		MICROFIBRA DE POLIPROPILENO		TOTAL DE FIBRAS	
	kg/m ³	% em volume	kg/m ³	% em volume	kg/m ³	% em volume	kg/m ³	% em volume
MR	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,00	0,00%
M1	0,00	0,00%	0,00	0,00%	1,00	0,11%	1,00	0,11%
M2	0,00	0,00%	10,00	0,14%	0,00	0,00%	10,00	0,14%
M3	0,00	0,00%	10,00	0,14%	1,00	0,11%	11,00	0,25%
M4	0,00	0,00%	20,00	0,29%	0,00	0,00%	20,00	0,29%
M5	0,00	0,00%	20,00	0,29%	1,00	0,11%	21,00	0,40%
M6	30,00	0,38%	0,00	0,00%	0,00	0,00%	30,00	0,38%
M7	30,00	0,38%	10,00	0,14%	1,00	0,11%	41,00	0,64%
M8	30,00	0,38%	20,00	0,29%	0,00	0,00%	50,00	0,67%
M9	30,00	0,38%	0,00	0,00%	1,00	0,11%	31,00	0,49%
M10	30,00	0,38%	10,00	0,14%	0,00	0,00%	40,00	0,53%
M11	30,00	0,38%	20,00	0,29%	1,00	0,11%	51,00	0,78%
M12	50,00	0,64%	0,00	0,00%	0,00	0,00%	50,00	0,64%
M13	50,00	0,64%	10,00	0,14%	1,00	0,11%	61,00	0,89%
M14	50,00	0,64%	20,00	0,29%	0,00	0,00%	70,00	0,92%
M15	50,00	0,64%	0,00	0,00%	1,00	0,11%	51,00	0,75%
M16	50,00	0,64%	10,00	0,14%	0,00	0,00%	60,00	0,78%
M17	50,00	0,64%	20,00	0,29%	1,00	0,11%	71,00	1,04%

Fonte: Autor.

A Figura 23 ilustra graficamente a quantidade de fibras adicionadas em cada uma das misturas.

Figura 23 – Teor de fibras nas misturas



Fonte: Autor.

As fibras de polipropileno e as macrofibras metálicas foram adicionadas às misturas medindo-se a quantidade necessária pela sua massa. Já as fibras espaciais, devido à variação de massa que pode ocorrer no momento da solda, foram adicionadas às misturas contando-se as unidades. Portanto, foram necessárias 2.880 fibras espaciais para executar todas as misturas.

Foram moldados para cada mistura 2 corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 10 cm e 20 cm de altura para o ensaio de resistência à compressão axial e 2 corpos de prova prismáticos com dimensões de 15x15x50 cm para o ensaio de tenacidade e tração na flexão . Em função ao demorado processo de soldagem da fibra espacial e pela grande quantidade necessária é que se optou em utilizar este número de corpos de prova, e com isso conseguir obedecer o cronograma estipulado para este trabalho.

Todos os ensaios foram efetuados após 28 dias da concretagem. A Tabela 6 mostra a idade dos compósitos na data do ensaio.

Tabela 6 – Idade do concreto

Misturas	Idade (dias)
MR	31
M1	31
M2	28
M3	28
M4	28
M5	28
M6	42
M7	42
M8	34
M9	34
M10	34
M11	34
M12	27
M13	27
M14	41
M15	41
M16	34
M17	34

Fonte: Autor.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo foram apresentados os resultados oriundos do programa experimental descrito no capítulo 3. Primeiramente foram apresentados os resultados da influência da adição e do tipo de fibras sobre a trabalhabilidade das misturas, a resistência à compressão do CRF, resistência à flexão e tenacidade e, por fim, a resistência à tração na flexão.

Os dados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e tração foram submetidos à análise de regressão polinomial, e os ensaios de flexão foram analisados por regressão linear múltipla.

4.1 TRABALHABILIDADE E CONSISTÊNCIA

Quando se adiciona fibras ao concreto surge a expectativa de redução da sua trabalhabilidade, conforme apresentado no item 2.3.1, e, com a adição de fibras espaciais, esta expectativa é ainda maior, por isso se deu bastante atenção a esta avaliação.

Na Figura 24 pode-se observar que as fibras espaciais ficaram razoavelmente bem espalhadas na mistura dentro da betoneira, ficando algumas fibras mais isoladas nas laterais, porém, na Figura 25, é possível visualizar que a mistura não foi tão homogênea quando retirada da betoneira.

Figura 24 – Mistura na betoneira



Fonte: Autor.

Figura 25 – Mistura depois de sair da betoneira



Fonte: Autor.

Quando a mistura era retirada da betoneira algumas fibras se aglomeravam formando “ouriços”, deixando uma parte da mistura sem fibras espaciais. Nas misturas em que eram adicionadas fibras de polipropileno, este fenômeno parecia diminuir um pouco, porém não era eliminado.

Para a determinação das propriedades do concreto no estado fresco, conforme descrito no capítulo 3, utilizou-se o abatimento de tronco de cone e o ensaio de VeBe, onde os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 7. Mediu-se o abatimento de tronco de cone depois da introdução das fibras, pois era previsto um abatimento de 160 mm sem fibras.

Tabela 7 – Resultados de consistência

Mistura	Abatimento (mm)	VeBe (s)	Fibras	Mistura	Abatimento (mm)	VeBe (s)	Fibras
MR	170	1,5	0,00%	M9	20	7	0,49%
M1	80	2	0,11%	M10	20	5,31	0,53%
M2	170	1,4	0,14%	M11	20	4,69	0,78%
M3	50	2,78	0,25%	M12	20	4,34	0,64%
M4	130	1,6	0,29%	M13	20	5,19	0,89%
M5	80	1,75	0,40%	M14	20	4,63	0,92%
M6	50	4,32	0,38%	M15	30	4,5	0,75%
M7	25	4,28	0,64%	M16	20	4,56	0,78%
M8	40	3,19	0,67%	M17	10	5,16	1,04%

Fonte: Autor.

A Figura 26 apresenta o ensaio elaborado pelo consistômetro de VeBe.

Figura 26 – Ensaio de consistência



Fonte: Autor.

O preenchimento da forma foi realizado em duas camadas e o concreto foi despejado da betoneira para uma caixa plástica e desta para as fôrmas. Não foi possível utilizar ferramentas para retirá-lo da caixa e colocá-lo nas fôrmas, pois as fibras espaciais não permitiam a introdução da pá ou colher no concreto. O adensamento foi efetuado com uma marreta de borracha, aplicando-se entre 30 e 35

golpes em cada etapa de moldagem, até que o concreto se apresentasse totalmente nivelado. O aspecto do concreto no ato do adensamento pode ser visto na Figura 27.

Figura 27 – Adensamento



Fonte: Autor.

O concreto não apresentou ninhos de concretagem ou falhas, e isso pode ser visualizado na Figura 28, após a remoção das fôrmas.

Figura 28 – Desmoldagem

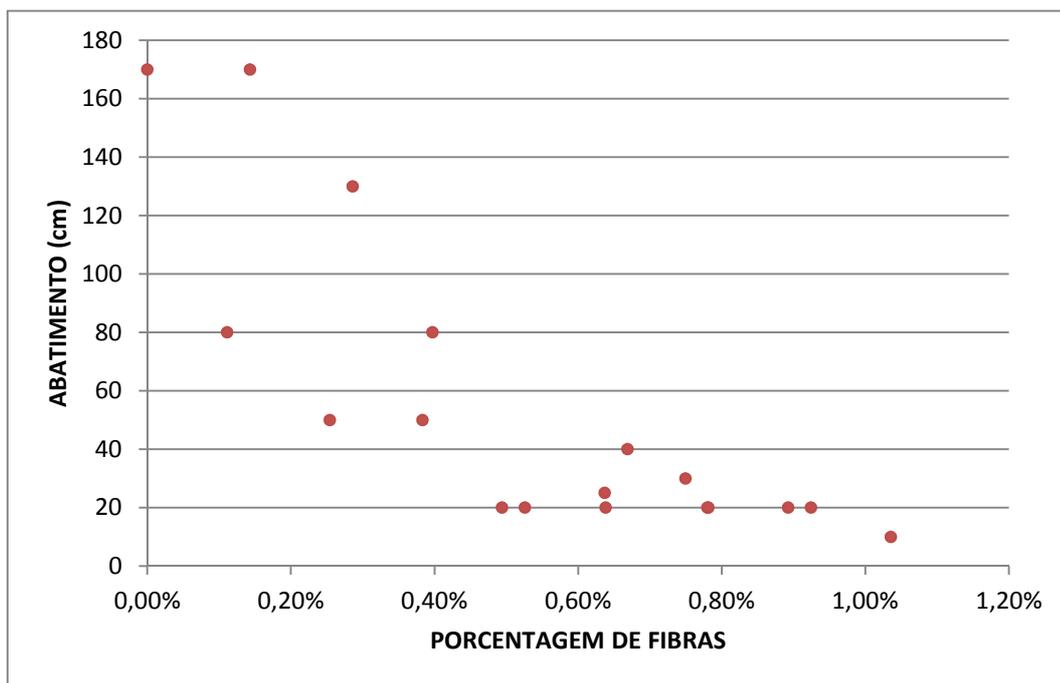


Fonte: Autor.

Os corpos de prova foram desformados 24 horas após a concretagem e deixados em câmara úmida por 28 dias.

Baseado nos resultados elaborou-se dois gráficos para melhor visualização do comportamento do concreto no estado fresco. No primeiro gráfico (Figura 29) pode-se ver o resultado do abatimento de tronco de cone que, como esperado, apresenta uma redução significativa à medida que o teor de fibra é aumentado.

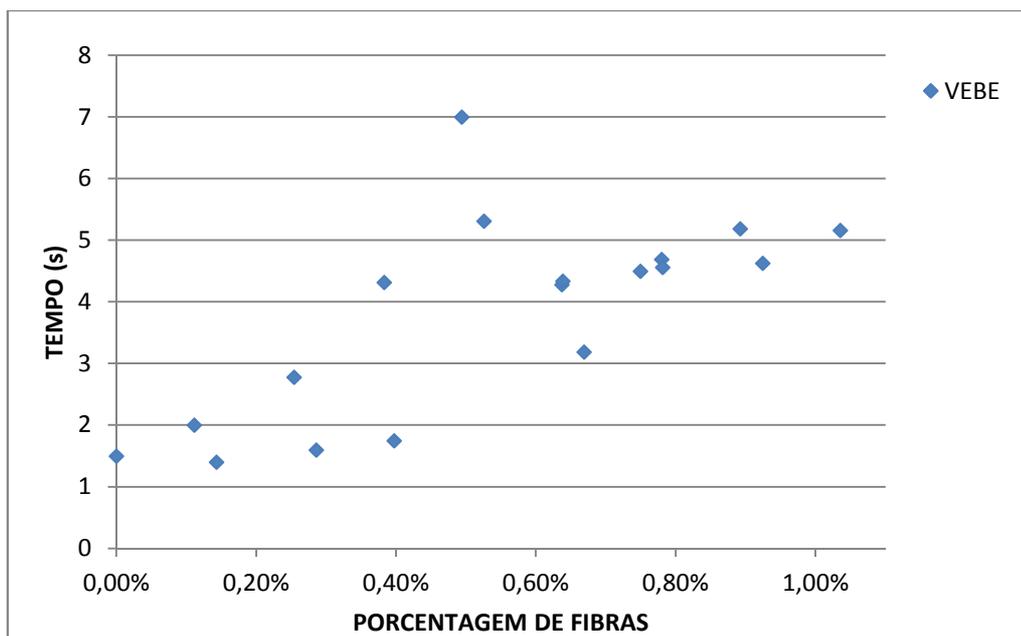
Figura 29 – Gráfico Tempo x Porcentagem de fibras (Abatimento Tronco de cone)



Fonte: Autor.

O segundo gráfico (Figura 30) apresenta o resultado do ensaio de VeBe, onde é possível visualizar que quanto maior o teor de fibras, maior o tempo necessário para remoldar o concreto de forma tronco-cônica para cilíndrica.

Figura 30 – Gráfico Tempo x Porcentagem de fibras (VeBe)

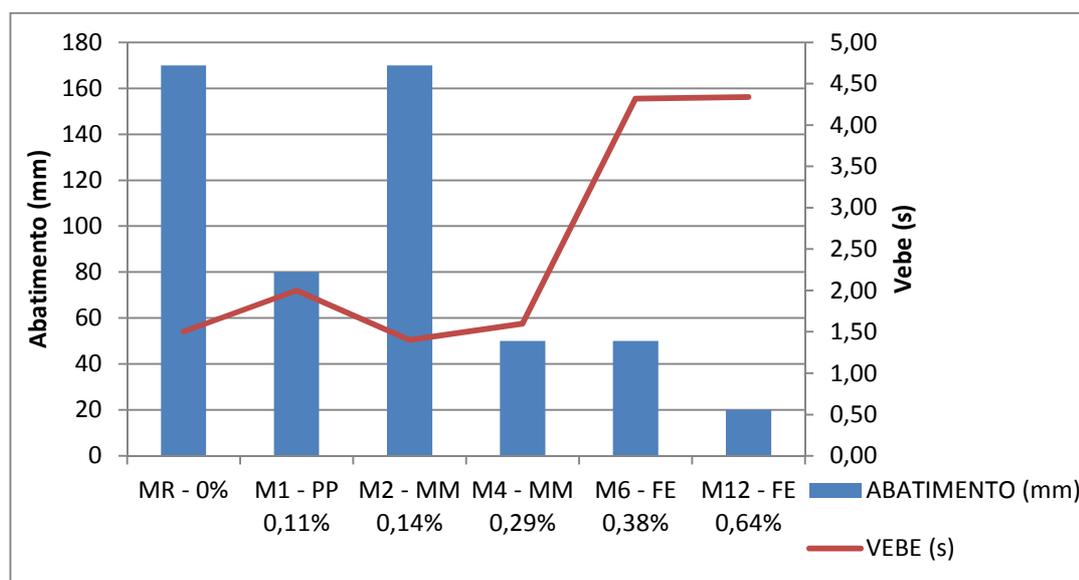


Fonte: Autor.

Como era esperado, o abatimento foi prejudicado com o aumento do teor de fibras, mas o adensamento não foi comprometido, visto que os corpos de prova não apresentaram falha de concretagem.

A Figura 31 apresenta o resultado de abatimento e do ensaio Vebe para as misturas com as fibras isoladas, mostrando a influência de cada uma.

Figura 31 – Gráfico de abatimento e Vebe x fibras isoladas



Fonte: Autor.

A Tabela 8 apresenta o percentual de diminuição da trabalhabilidade para cada tipo de fibra assim como o teor de cada uma delas.

Tabela 8 – Perda de trabalhabilidade por tipo de fibra

TIPO DE FIBRA	TEOR	DECRÉCIMO DO ABATIMENTO	ACRESCIMO DO TEMPO Vebe
Microfibra De Polipropileno	0,11%	53%	33%
Macrofibra Metálica Monofilamento	0,14%	0%	-7%
Macrofibra Metálica Monofilamento	0,29%	71%	7%
Fibra Espacial	0,38%	71%	188%
Fibra Espacial	0,64%	88%	189%

Fonte: Autor.

É possível verificar que a fibra de polipropileno, mesmo com um teor baixo, afeta consideravelmente a consistência do concreto, já a fibra metálica monofilamento com teor de 0,14% não afeta em nada a consistência, ao contrário do teor de 0,29%, que afeta bastante o abatimento (71%), mas no ensaio dinâmico (Vebe) ela não afetou tanto assim (7%). A fibra espacial, nos dois teores, afeta substancialmente a consistência, tanto no abatimento como no ensaio dinâmico.

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os resultados de resistência à compressão axial de cada mistura de concreto podem ser vistos na Tabela 9.

Todos os ensaios foram executados após os 28 dias, sendo que os ensaios de compressão ocorreram no mesmo dia em que se ensaiaram os corpos de prova prismáticos à tração.

Tabela 9 – Resistência à compressão axial

CP	fc (MPa)	FIBRAS	CP	fc (MPa)	FIBRAS
MR-1	36,4	0,00%	M9-1	38,0	0,49%
MR-2	35,5	0,00%	M9-2	36,1	0,49%
M1-1	33,7	0,11%	M10-1	33,2	0,53%
M1-2	31,8	0,11%	M10-2	32,9	0,53%
M2-1	30,7	0,14%	M11-1	31,2	0,78%
M2-2	32,3	0,14%	M11-2	36,3	0,78%
M3-1	34,8	0,25%	M12-1	26,9	0,64%
M3-2	35,3	0,25%	M12-2	25,8	0,64%
M4-1	30,2	0,29%	M13-1	34,7	0,89%
M4-2	29,0	0,29%	M13-2	29,3	0,89%
M5-1	31,8	0,40%	M14-1	29,7	0,92%
M5-2	31,8	0,40%	M14-2	29,1	0,92%
M6-1	30,6	0,38%	M15-1	25,5	0,75%
M6-2	27,9	0,38%	M15-2	29,4	0,75%
M7-1	36,2	0,64%	M16-1	28,8	0,78%
M7-2	36,5	0,64%	M16-2	31,4	0,78%
M8-1	35,2	0,67%	M17-1	29,9	1,04%
M8-2	35,4	0,67%	M17-2	30,6	1,04%

Fonte: Autor.

Foram concretados dois corpos de prova de cada mistura, e para a análise dos resultados de resistência à compressão dos compósitos utilizou-se os resultados potenciais.

Nota-se que a resistência à compressão é praticamente independente do teor de fibra. Isso já era esperado e corrobora com dados de outros autores (ARMELIN, 1992; di PRISCO, PLIZZARI e VANDEWALLE, 2010).

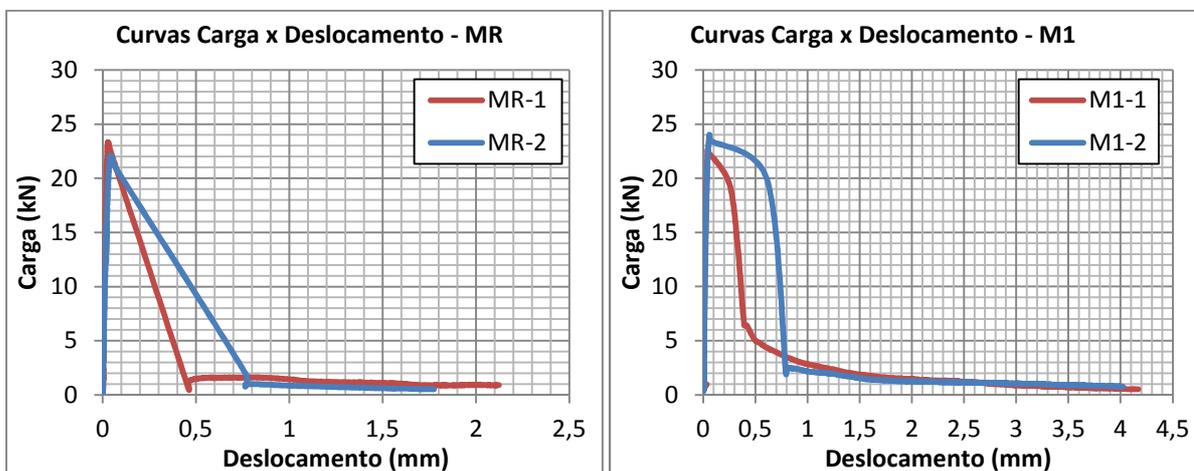
Um dado importante a ser destacado é que somente uma mistura apresentou resistência à compressão maior do que a mistura de referência, indicando que a adição de fibras não contribui para o aumento da resistência à compressão.

4.3 FATOR DE TENACIDADE E RESISTÊNCIA À FLEXÃO EQUIVALENTE

O fator de tenacidade foi obtido conforme descrito no capítulo 3, seguindo as orientações da norma Japonesa *JSCE – SF4*, 1984.

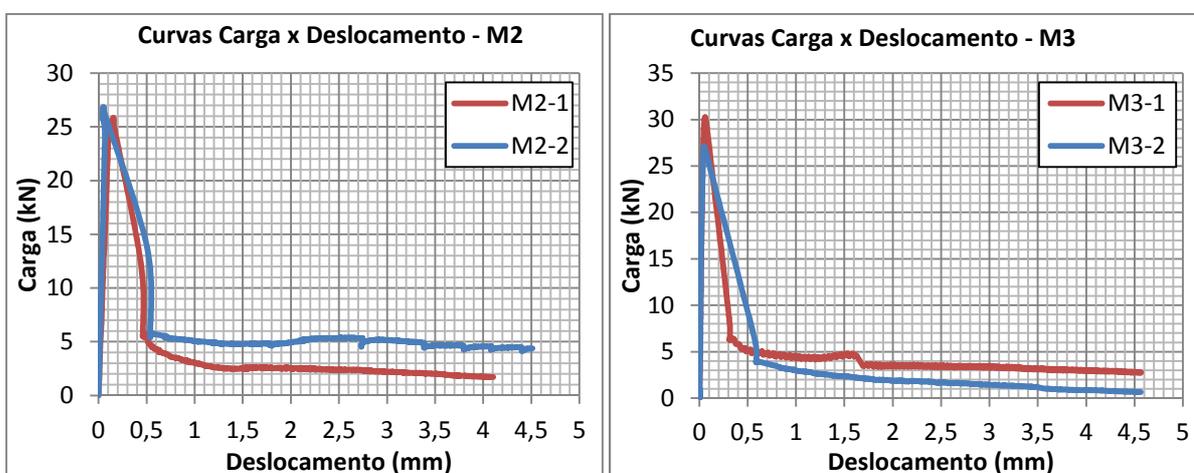
O comportamento dos compósitos é apresentado nas Figura 32 até a Figura 40, quando submetidos ao ensaio de flexão para determinação da resistência à flexão equivalente.

Figura 32 – Misturas MR (0%) e M1 (0,11%)



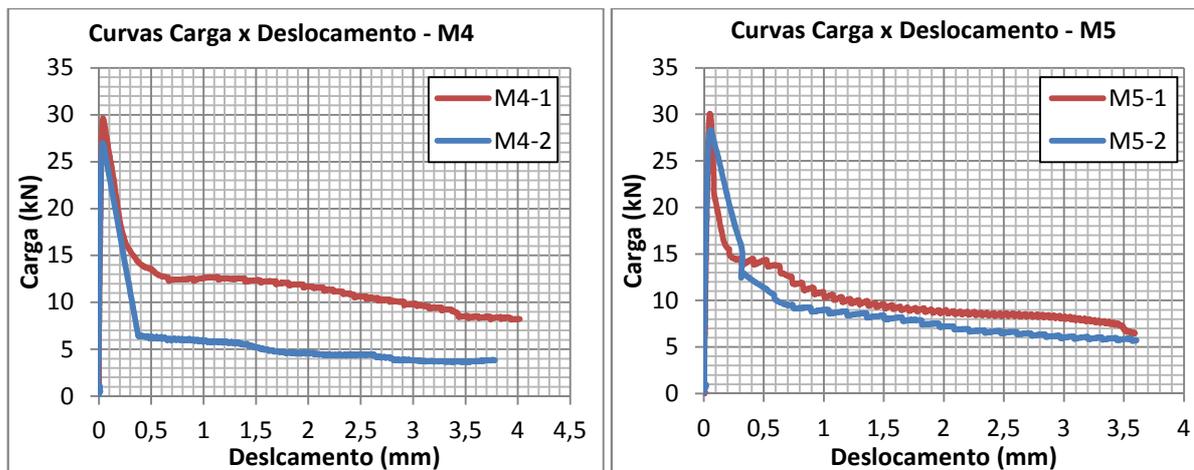
Fonte: Autor.

Figura 33 – Misturas M2 (0,14%) e M3 (0,25%)



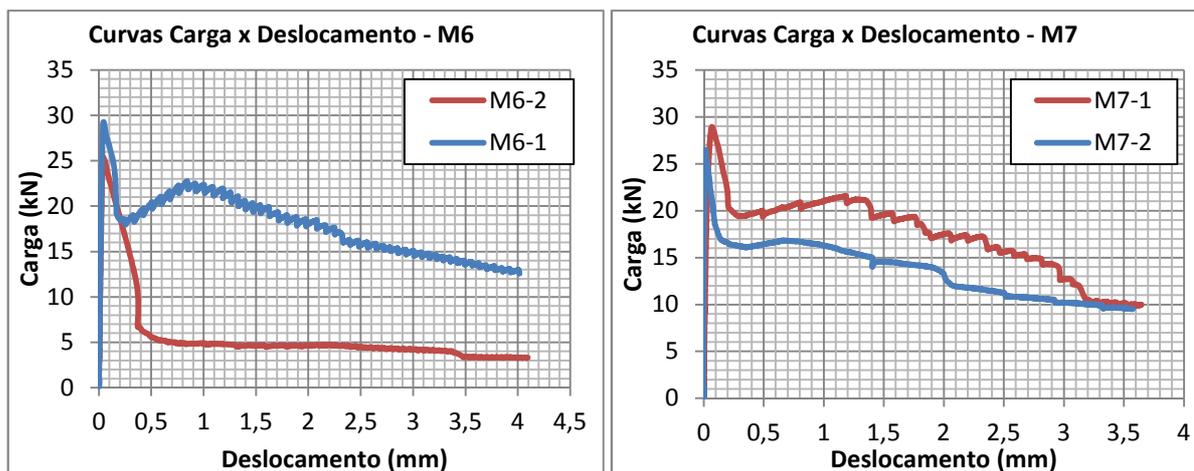
Fonte: Autor.

Figura 34 – Misturas M4 (0,29%) e M5 (0,40%)



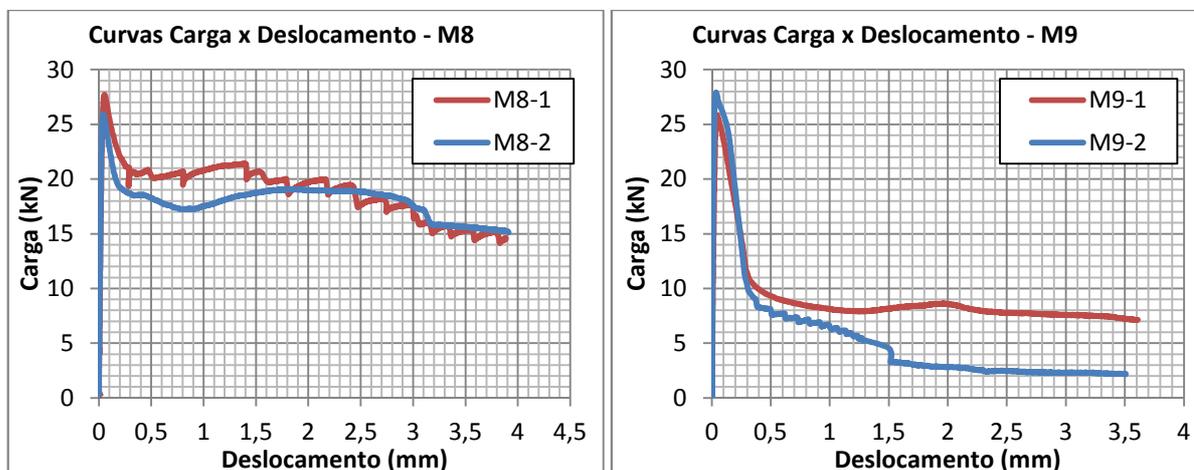
Fonte: Autor.

Figura 35 – Misturas M6 (0,38%) e M7 (0,64%)



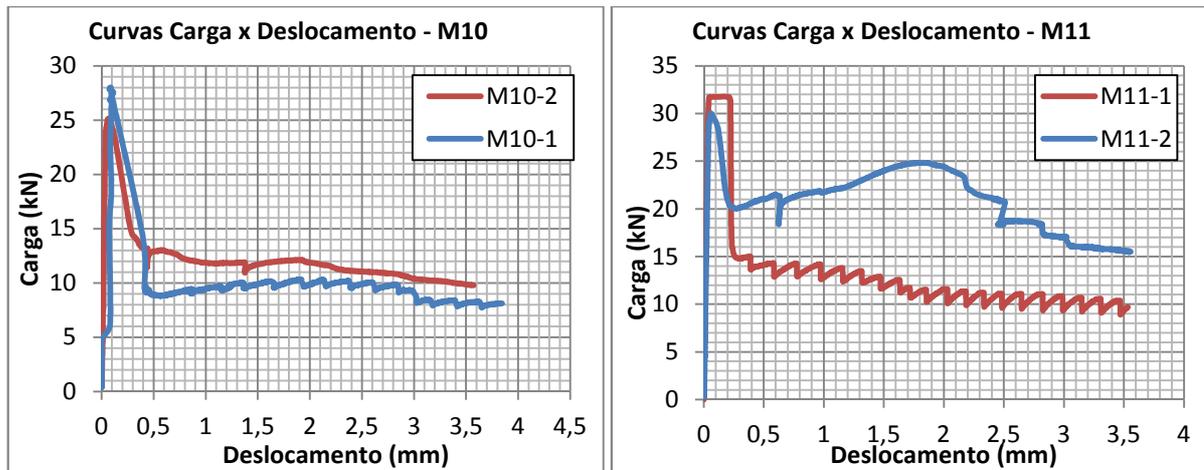
Fonte: Autor.

Figura 36 – Misturas M8 (0,67%) e M9 (0,48%)



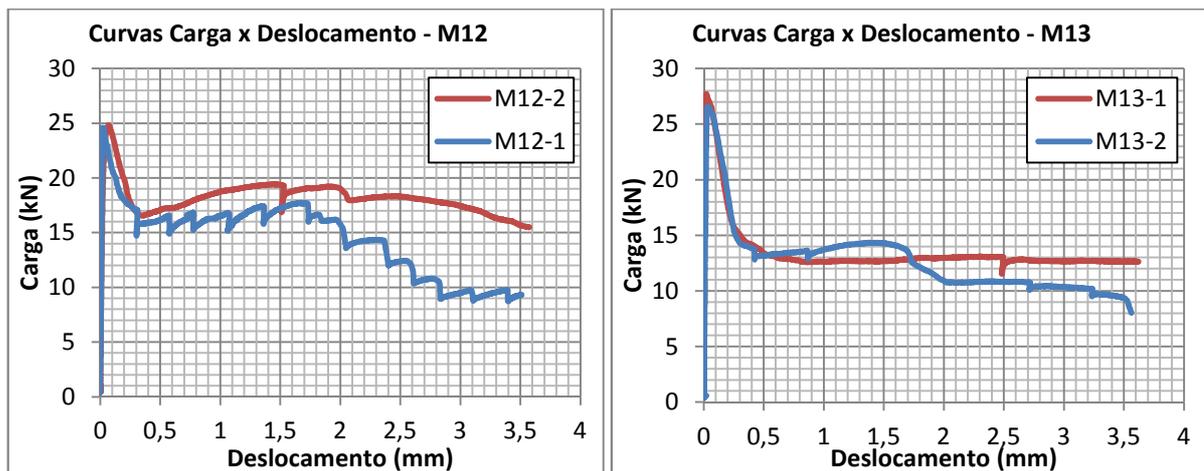
Fonte: Autor.

Figura 37 – Misturas M10 (0,53%) e M11 (0,78%)



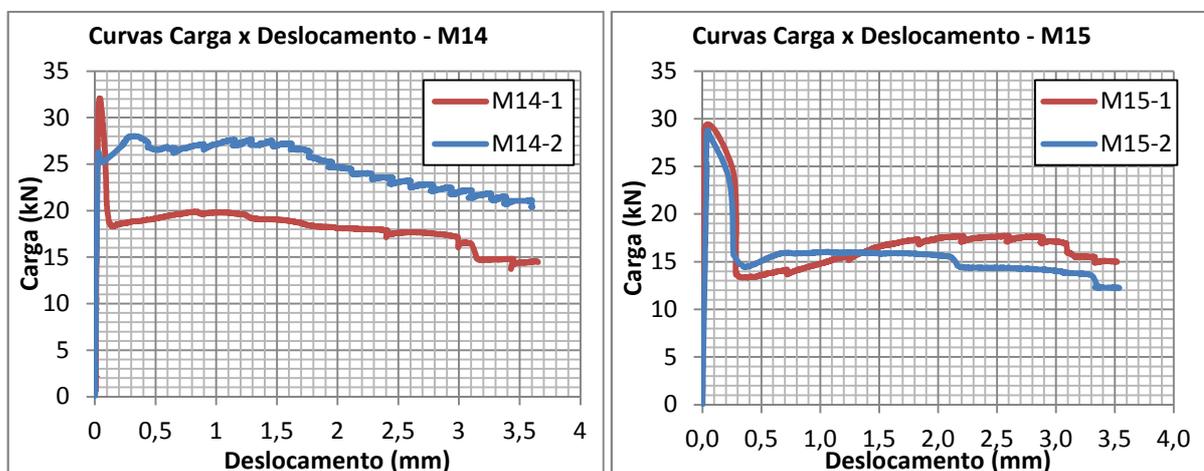
Fonte: Autor.

Figura 38 – Misturas M12 (0,64%) e M13 (0,89%)



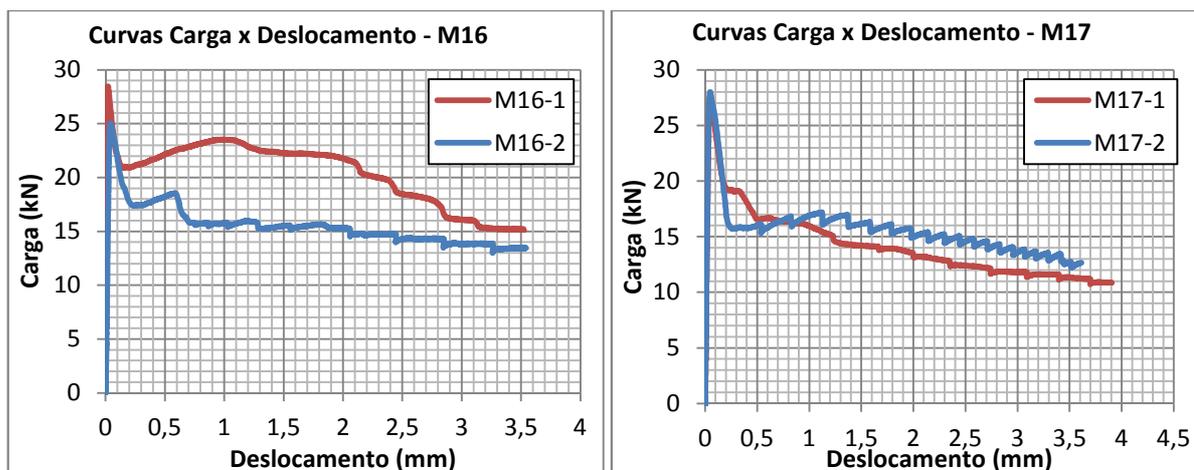
Fonte: Autor.

Figura 39 – Misturas M14 (0,92%) e M15 (0,75%)



Fonte: Autor.

Figura 40 – Misturas M16 (0,78%) e M17 (1,04%)



Fonte: Autor.

Com base nas curvas *F versus d* é possível extrair a área sob elas, e assim calcular o valor da resistência à flexão equivalente, aplicando a formulação da norma citada. A Tabela 10 mostra os resultados do fator de tenacidade e resistência à flexão equivalente.

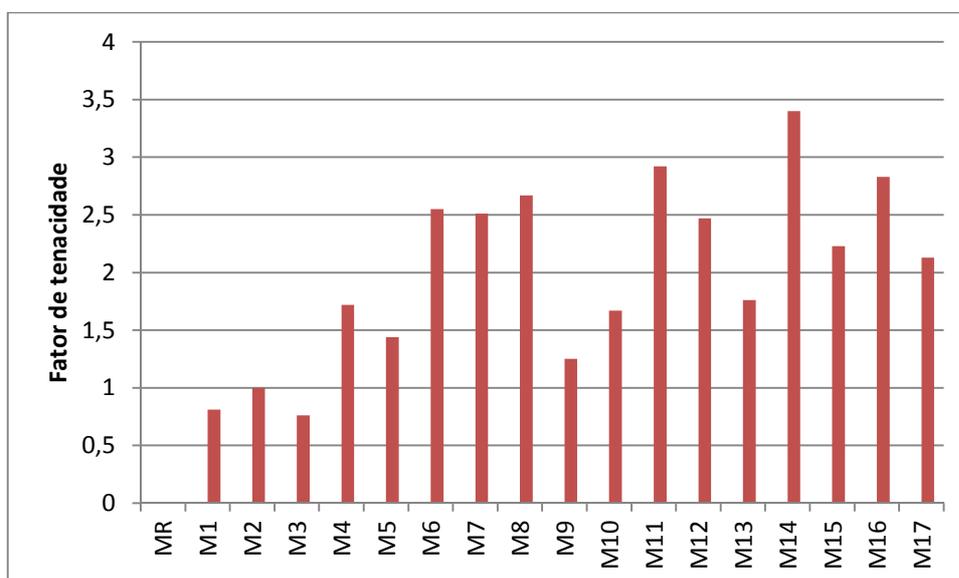
Tabela 10 – Fator de tenacidade e resistência à flexão equivalente

MISTURA	f_{\max} (kN)	Tb (kN.mm)	FT (MPa)	MISTURA	f_{\max} (kN)	Tb (kN.mm)	FT (MPa)
MR	1 23,31	-	-	M9	1 25,85	28,06	1,25
	2 22,075	-	-		2 27,89	18,17	0,81
M1	1 22,73	12,50	0,56	M10	1 28,00	32,45	1,44
	2 24,02	18,16	0,81		2 25,15	37,64	1,67
M2	1 25,84	15,21	0,68	M11	1 31,73	38,95	1,73
	2 26,86	22,49	1,00		2 30,02	65,61	2,92
M3	1 30,28	17,12	0,76	M12	1 24,58	45,98	2,04
	2 27,13	15,19	0,68		2 24,80	55,52	2,47
M4	1 29,64	38,60	1,72	M13	1 27,69	41,16	1,83
	2 27,00	19,89	0,88		2 26,56	39,63	1,76
M5	1 30,07	32,36	1,44	M14	1 32,07	56,54	2,51
	2 28,32	28,62	1,27		2 28,10	76,43	3,40
M6	1 29,27	57,31	2,55	M15	1 28,73	50,15	2,23
	2 25,38	19,10	0,85		2 28,75	47,97	2,13
M7	1 28,93	56,45	2,51	M16	1 28,47	63,78	2,83
	2 26,51	43,17	1,92		2 25,03	47,48	2,11
M8	1 27,72	60,05	2,67	M17	1 27,68	44,89	2,00
	2 25,93	55,98	2,49		2 28,01	48,01	2,13

Fonte: Autor.

A Figura 41 mostra o fator de tenacidade potencial de cada mistura.

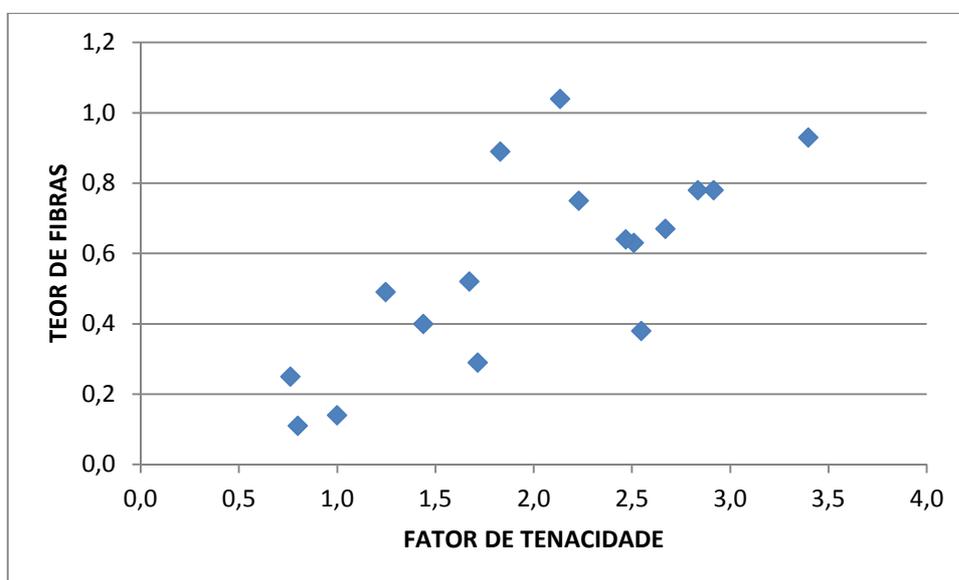
Figura 41 – Fator de Tenacidade das misturas



Fonte: Autor.

A Figura 42 exibe um gráfico que apresenta o Fator de Tenacidade em relação ao teor de fibras introduzido no compósito.

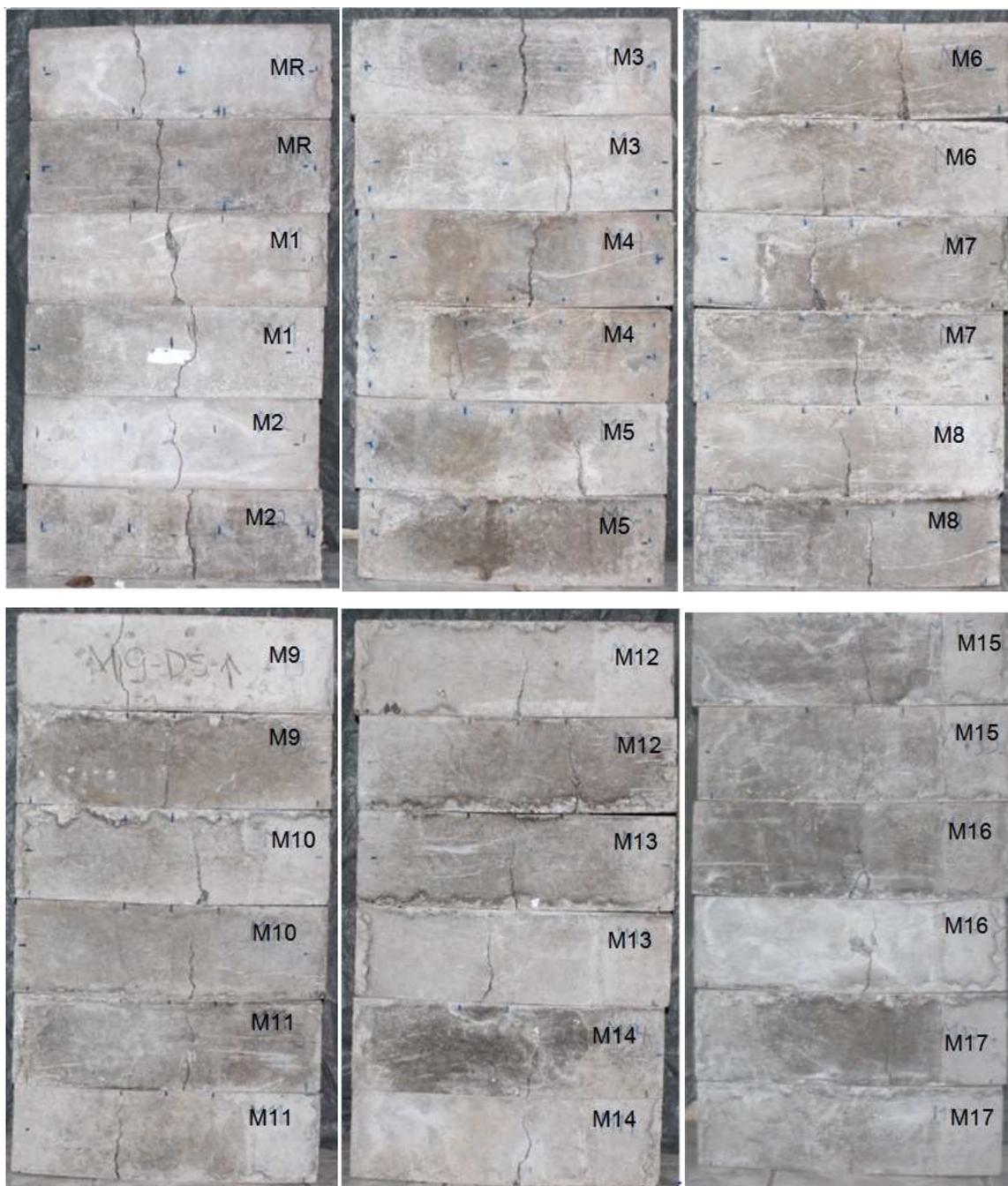
Figura 42 – Fator de Tenacidade x teor de fibras



Fonte: Autor.

A Figura 43 apresenta a aparência das vigas após o ensaio de flexão e é possível verificar que todas romperam no terço médio da viga, apesar de algumas terem rompido no limite do terço médio.

Figura 43 – Aparência das vigas após o ensaio



Fonte: Autor.

Em todos os casos a ruptura ocorreu com apenas uma fissura discreta, isto é, não foi verificada a formação de múltiplas fissuras.

A análise estatística foi elaborada com base nos resultados potenciais, isto é, no valor mais alto entre as vigas irmãs.

Após o tratamento dos resultados, obteve-se a equação a partir de um modelo de regressão múltipla linear para explicar a relação entre o fator de tenacidade e as variáveis independentes, como segue:

$$FT = 1,097 + 2,165 \cdot FE + 2,249 \cdot FM - 3,566 \cdot FP \quad (5)$$

FT = Fator de tenacidade (MPa);

FE = Teor de fibra metálica espacial (%);

FM = Teor de fibra metálica monofilamento (%);

FP = Teor de microfibras de polipropileno (%);

Para justificar uma relação significativa entre as variáveis o valor-p deve ser menor que 0,05, com um nível de confiança de 95%. O maior valor-p da análise é 0,109, referente à microfibras de polipropileno, maior que o limite. Portanto esta variável deve ser descartada do modelo. Isso significa que as fibras de polipropileno não contribuem para o aumento do fator de tenacidade do CRF, e isso também é comprovado por Libre *et al* (2011). Porém os resultados de Quinino (2015) mostram que em quantidades menores que 0,12% as fibras de polipropileno mantêm o Fator de Tenacidade praticamente constante, mas para valores maiores, a matriz tende a ser comprometida. Neste trabalho há um prejuízo ao Fator de Tenacidade já com 0,11 % de fibras de polipropileno.

Elaborou-se uma nova análise eliminando as fibras de polipropileno, e obteve-se a seguinte equação:

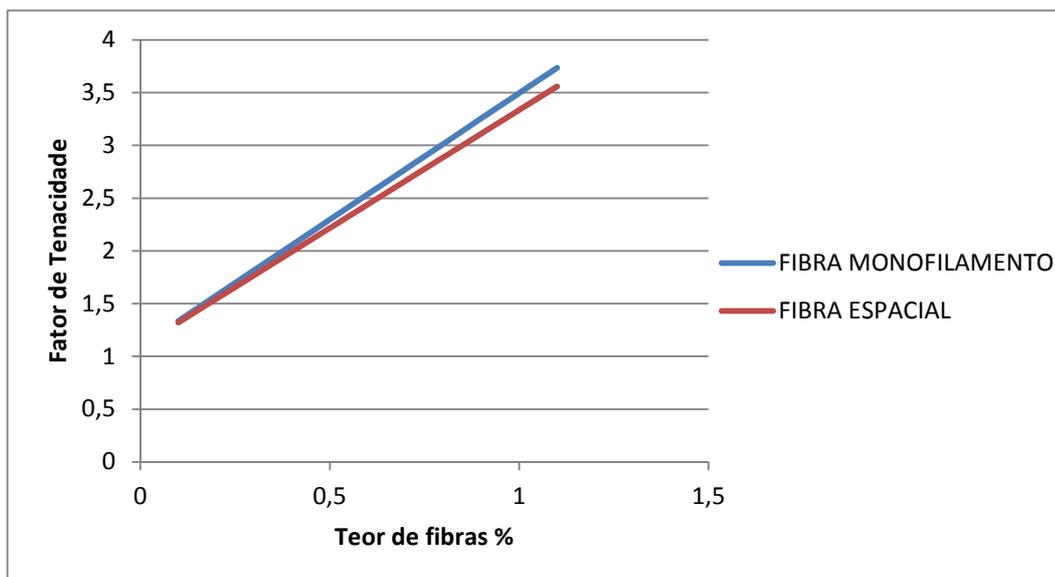
$$FT = 1,097 + 2,237 \cdot FE + 2,398 \cdot FM \quad (6)$$

O maior valor-p da análise é 0,037 referente à macrofibras de aço, menor que o limite 0,05. Portanto nenhuma variável deve ser descartada do modelo.

O modelo estatístico apresenta o quadrado do coeficiente de determinação ajustado de 59,7%, ou seja, o modelo explica cerca de 59,7% da variabilidade do fator de tenacidade dos corpos de prova.

Analisando a equação, percebe-se que o coeficiente de correlação entre a fibra metálica espacial e a fibra metálica monofilamento é muito próxima indicando que a eficiências dos dois tipos de fibra é muito parecida no que diz respeito ao ganho de tenacidade do compósito, como pode ser visto na Figura 44.

Figura 44 – Contribuição de cada fibra ao Fator de Tenacidade



Fonte: Autor.

Com relação ao comportamento da fibra após a nucleação da fissura, é possível verificar que a falha ocorreu pelo escorregamento da fibra, isto é, a ancoragem não foi suficiente para suportar os esforços de tração na fibra. Este fenômeno pode ser verificado nos gráficos, onde a curva apresenta uma pequena queda, e logo após se eleva novamente, incorrendo em uma nova queda, e assim sucessivamente. A ocorrência deste fato é explicada no item 2.4.2.

4.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

A resistência à tração na flexão foi obtida de acordo com a ABNT NBR 12142:2010, utilizando como base os gráficos apresentados no item 4.3, e os resultados podem ser visualizados na Tabela 11.

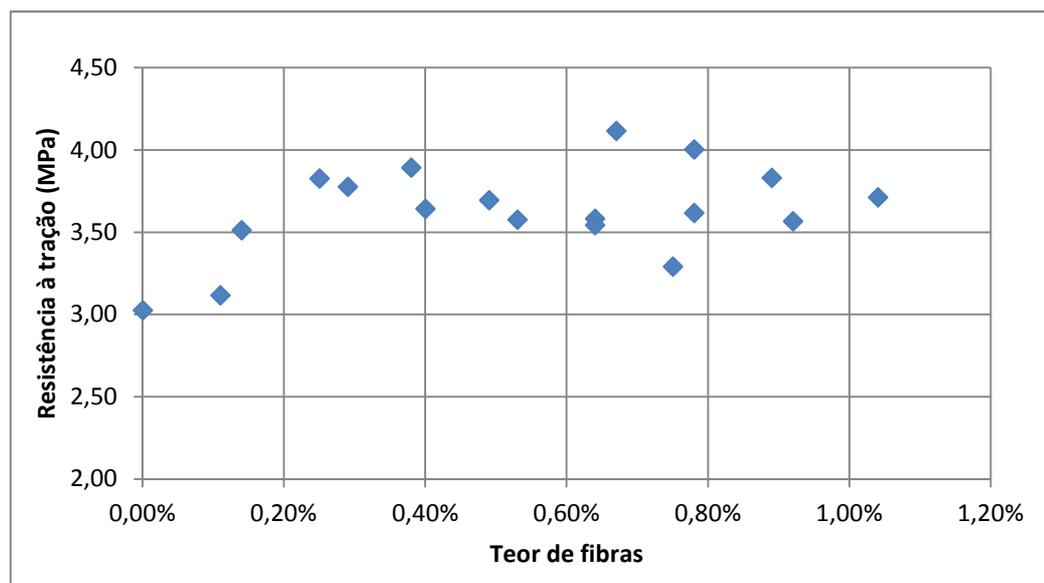
Tabela 11 – Resultados de resistência a tração na flexão

MISTURA	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	MISTURA	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)
MR-1	3,11	M9-1	3,45
MR-2	2,94	M9-2	3,72
M1-1	3,03	M10-1	3,73
M1-2	3,20	M10-2	3,35
M2-1	3,45	M11-1	4,23
M2-2	3,58	M11-2	4,00
M3-1	4,04	M12-1	3,28
M3-2	3,62	M12-2	3,31
M4-1	3,95	M13-1	3,69
M4-2	3,60	M13-2	3,54
M5-1	4,01	M14-1	4,28
M5-2	3,78	M14-2	3,73
M6-1	3,90	M15-1	3,83
M6-2	3,38	M15-2	3,83
M7-1	3,86	M16-1	3,80
M7-2	3,53	M16-2	3,34
M8-1	3,70	M17-1	3,69
M8-2	3,46	M17-2	3,73

Fonte: Autor.

A análise dos resultados, assim como nos ensaios de compressão, foi efetuada utilizando os resultados potenciais. O gráfico da Figura 45 apresenta os valores da resistência à tração em relação ao teor total de fibras.

Figura 45 – Resistência à tração x Teor de fibras



Fonte: Autor.

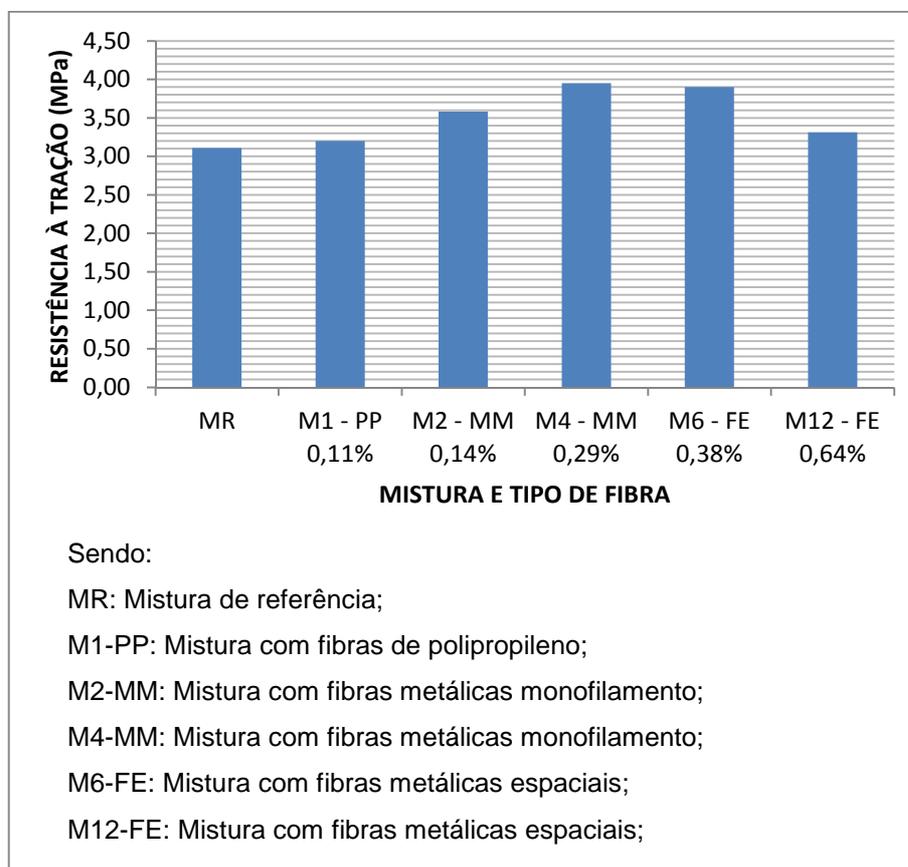
A partir do gráfico é possível verificar que o compósito apresenta uma elevação na resistência à tração à medida que o teor total de fibra aumenta, porém apresenta uma dispersão maior para um teor superior a 0,60%. O aumento máximo da resistência à tração do concreto chegou a 37,6%. Lembra-se que esta elevação ocorreu antes do surgimento da 1ª fissura, pois como os teores de fibra adicionados ao concreto estão abaixo do crítico, após a primeira fissura a tensão de tração decresce. Lopes (2005) obteve incrementos máximos de 20%, porém com teores de fibras de 2%.

A elevação da resistência à tração com o incremento do teor de fibras também é descrita por outros autores como Garcez (2005), Góis (2010), Hameed *et al.* (2010), Guimarães (2015) entre outros.

Já no estudo apresentado por Velasco (2008), as fibras metálicas não interferiram na resistência à tração no ramo ascendente da curva força x deslocamento.

No gráfico da Figura 46 é possível observar a resistência à tração das misturas com cada tipo de fibra isolada, ou seja, sem hibridização.

Figura 46 – Resistência à tração x Teor de fibras isoladas



Fonte: Autor.

Pode-se constatar que, de forma isolada, todos os tipos de fibras contribuíram para o ganho de resistência à tração antes da primeira fissura, como apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Ganho de resistência à tração de cada modelo de fibra isoladamente

TIPO DE FIBRA	TEOR	GANHO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO
MICROFIBRA DE POLIPROPILENO	0,11%	2,89%
MACROFIBRA METÁLICA MONOFILAMENTO	0,14%	15,10%
MACROFIBRA METÁLICA MONOFILAMENTO	0,29%	27,00%
FIBRA ESPACIAL	0,38%	25,40%
FIBRA ESPACIAL	0,64%	6,43%

Fonte: Autor.

Percebe-se que a microfibras contribui muito pouco para ganho da resistência à tração, já a macrofibras metálicas contribui consideravelmente, e a contribuição aumenta com o aumento do teor. No caso da fibra espacial, a contribuição também é significativa, porém ela decresce com o aumento do teor de fibra.

Já de forma hibridizada, para a análise dos resultados, obteve-se a equação a partir de um modelo de regressão múltipla linear para explicar a relação entre o fator de tenacidade e as variáveis independentes, como segue:

$$RT = 3,477 \cdot FE + 8,384 \cdot FM + 12,98 \cdot FP \quad (7)$$

RT = Resistência à tração (MPa);

FE = Teor de fibra metálica espacial (%);

FM = Teor de fibra metálica monofilamento (%);

FP = Teor de microfibras de polipropileno (%);

Para justificar uma relação significativa entre as variáveis o valor-p deve ser menor que 0,05, com um nível de confiança de 95%. O maior valor-p da análise é 0,06, referente à microfibras de polipropileno, maior que o limite. Portanto esta variável deve ser descartada do modelo.

Partiu-se para uma nova análise eliminando as fibras de polipropileno, e obteve-se a seguinte equação:

$$RT = 4,327 \cdot FE + 10,147 \cdot FM \quad (8)$$

O maior valor-p da análise é 0,0033 referente à fibra espacial, menor que o limite 0,05. Portanto nenhuma variável deve ser descartada do modelo. O modelo estatístico apresenta o quadrado do coeficiente de determinação ajustado de 71,9%, ou seja, o modelo explica cerca de 71,9% da variabilidade do fator de tenacidade dos corpos de prova.

$$\text{Analisando a Equação } RT = 4,327 \cdot FE + 10,147 \cdot FM \quad (8)$$

é possível perceber que a macrofibra metálica monofilamento apresenta, para misturas híbridas de fibras, um coeficiente de correlação 2,34 vezes maior que a fibra espacial. Já a microfibra foi descartada do modelo pois apresenta uma variabilidade grande nos resultados.

4.5 ANÁLISE DAS FISSURAS

Após os ensaios, cada viga foi dividida para visualizar o aspecto e a quantidade de fibras que atravessaram a fissura. Como foi visto no item 4.3, as vigas apresentaram somente uma fissura discreta, típico de teores abaixo do crítico. A Tabela 13 apresenta a quantidade de fibras que atravessaram a fissura em cada uma das vigas.

Tabela 13 – Quantidade de fibras que atravessaram a fissura

MISTURA	FIBRA ESPACIAL DE AÇO	FIBRA MONOFILAMENTO DE AÇO	MISTURA	FIBRA ESPACIAL DE AÇO	FIBRA MONOFILAMENTO DE AÇO
MR-1	0	0	M9-1	7	0
MR-2	0	0	M9-2	4	0
M1-1	0	0	M10-1	14	11
M1-2	0	0	M10-2	15	5
M2-1	0	6	M11-1	5	20
M2-2	0	9	M11-2	13	23
M3-1	0	8	M12-1	18	0
M3-2	0	6	M12-2	25	0
M4-1	0	23	M13-1	20	9
M4-2	0	17	M13-2	13	6
M5-1	0	25	M14-1	33	11
M5-2	0	14	M14-2	19	21
M6-1	38	0	M15-1	23	0
M6-2	11	0	M15-2	22	0
M7-1	11	10	M16-1	19	17
M7-2	9	10	M16-2	17	13
M8-1	15	17	M17-1	16	20
M8-2	10	28	M17-2	18	18

Fonte: Autor.

Como era esperado, as misturas que apresentaram maior fator de tenacidade são as que apresentam maior quantidade de fibras que atravessam a fissura, e isso é citado por Bentur e Mindess (2007), Figueiredo (2011), Guimarães (2015).

A Tabela 14 apresenta a quantidade de fibras que atravessam a fissura por teor de fibra utilizado, e abaixo é mostrado a média e o desvio padrão dos resultados.

Tabela 14 – Fibras que atravessam as fissuras por teor de fibra

TEOR DE FIBRAS	FIBRA ESPACIAL DE AÇO		FIBRA MONOFILAMENTO DE AÇO	
	0,38%	0,64%	0,14%	0,28%
QUANTIDADE DE FIBRAS QUE ATRAVESSARAM A FISSURA	38	18	6	23
	11	25	9	17
	11	20	8	25
	9	13	6	14
	15	33	10	17
	10	19	10	28
	7	23	11	20
	4	22	5	23
	14	19	9	11
	15	17	6	21
	5	16	17	20
	13	18	13	18
MÉDIA	12,7	20,3	9,2	19,8
DP (EM FIBRAS)	8,8	5,1	3,4	4,7
DP (%)	69,3	25,4	37,5	24

Fonte: Autor.

Pode-se perceber que o teor de fibras espaciais de 0,38% é o que apresenta o maior desvio padrão, e isso pode ser explicado, pois algumas fibras podem se aglomerar dentro da matriz, deixando algumas partes da viga sem o reforço, fazendo com que este ponto seja mais propenso a formação da fissura.

A Figura 47 mostra a quantidade de fibras espaciais que atravessaram a fissura na viga da mistura M6.

Figura 47 – Fibras que atravessaram a fissura



Fonte: Autor.

Em relação à ancoragem das fibras espaciais a Figura 48 apresenta uma fibra com sua extremidade retificada. Isso significa que a ancoragem não foi suficiente para suportar a carga de tração na fibra, fazendo com que ela escorregasse.

Figura 48 – Ancoragem da fibra retificada



Fonte: Autor.

Já a Figura 49 mostra uma fibra espacial que teve um filamento rompido, mostrando que neste caso a ancoragem foi suficiente para superar a tensão de escoamento do aço. Nesta mesma figura pode-se perceber que existe a estricção do aço no ponto de ruptura da fibra.

Figura 49 – Fibra Rompida



Fonte: Autor.

A quantidade de fibras rompidas em relação às fibras que escorregaram é muito menor, e não ocorreram em todas as misturas.

5 CONCLUSÃO

A realização do programa experimental proposto neste trabalho permitiu coletar subsídios para que fossem elaboradas as conclusões apresentadas neste capítulo. Além disso, propostas para contribuição dos estudos foram expostas ao final.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa foi desenvolvido um modelo de fibra tridimensional, denominada fibra espacial, e esta foi adicionada ao concreto juntamente com fibras metálicas monofilamento e microfibras de polipropileno. Foram efetuadas 17 misturas com diferentes teores de fibra e uma mistura de referência. As propriedades avaliadas neste estudo foram a consistência, trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e tenacidade. Além disso, verificou-se a distribuição da fibra espacial dentro da matriz cimentícia.

Em virtude dos resultados apresentados no decorrer da pesquisa, pode-se concluir que:

- o modelo de fibra espacial apresentou a possibilidade de ser utilizado para reforço de concreto. A fabricação da fibra manualmente é lenta, mas com o auxílio de máquinas específicas o processo pode ser bem mais eficiente;
- a consistência do concreto com fibras espaciais ou com misturas híbridas de fibras é reduzida em relação ao concreto sem fibras, e a redução é diretamente proporcional ao teor de fibra incorporado ao concreto;
- a trabalhabilidade do concreto é diminuída com a adição de fibras em comparação ao concreto sem fibras, entretanto nos teores estudados neste trabalho, não prejudicaram a capacidade de compactação do concreto;
- a resistência à compressão não apresenta uma relação significativa com o acréscimo de fibras. Mas é importante destacar que 94% das misturas apresentaram resistência à compressão menor que a mistura de referência;

- a resistência à tração na flexão é afetada diretamente com a adição de fibras, sendo que a maior variação foi de 37%. A mistura que apresentou melhor desempenho em neste ensaio foi a M14;
- a tenacidade do concreto é afetada positivamente com o aumento do teor de fibras incorporado. As fibras espaciais e as fibras monofilamento apresentaram a mesma eficiência para incremento na tenacidade, e as microfibras de polipropileno não têm efeito algum. A mistura que apresentou o maior fator de tenacidade foi a M14;
- a homogeneidade da distribuição das fibras espaciais dentro da mistura não apresentou um bom resultado para teores de 0,38%, pois apresentou um desvio padrão de 69,3%, já o teor de 0,64% apresentou uma melhora, tendo um desvio padrão de 25,4%;
- a ancoragem da fibra espacial, no geral, não suportou as cargas de tração da fibra, escorregando dentro da matriz, porém algumas fibras apresentaram uma melhor eficiência, rompendo a fibra por tração ou flexo-tração.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com os resultados obtidos nesta pesquisa, puderam-se fazer algumas considerações e servem como sugestões para trabalhos futuros. As sugestões são:

- Utilização de fibras espaciais com outros tipos de ancoragem, avaliando sua eficiência;
- Avaliação das misturas de concreto com outros teores de adições de fibras;
- Elaboração de concretos conhecidos como SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete) utilizando as fibras espaciais. Nestes concretos, inicialmente se posiciona a fibra e depois se complementa com concreto fluido sem agregados graúdos.

6 REFERÊNCIAS

ACCETTI, K. M., PINHEIRO, L. M., **Tipos de fibras e propriedades do concreto com fibras**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 42, 2000, Fortaleza. Anais. Fortaleza: IBRACON, 2000.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. “**State-of-the-art Report on fiber reinforced concrete**”. In: Manual of concrete Practice, ACI 544.1R-96, Detroit, United States of America. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 6152**: Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15530**: Fibras de Aço para concreto. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **C1018-97**: Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). ASTM International, West Conshohocken, 1997.

_____. **ASTM C78**: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). ASTM International, West Conshohocken, 2010.

ARMELIN, H.S. Contribuição ao estudo do concreto projetado por via seca com fibras de aço destinado ao revestimento de túneis NATM. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

BANTHIA N., SAPPAKITTIPAKORN M. **Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization.** Cement and Concrete Research, Volume 37, Issue 9, September 2007, Pages 1366-1372

BATSON, B. G. **State-of-art report on fiber reinforced concrete.** An International Symposium: Fiber Reinforced Concrete. Canada: 1973. Detroit, ACI, 1974. p. 535-549.

BENTUR, A. **Role of interfaces in controlling durability of fiber-reinforced cements.** Journal of Materials in Civil Engineering, p.2-7, Feb. 2000.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites.** 2nd. Edition, Modern Concrete Technology Series, Taylor&Francis, 2007.

BERNARDI, S.T. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida Kevlar.** 164f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS 1881: Part 118,** Method for determination of flexural strength, London, 1983.

CÀNOVAS, F. M., **Hormigones reforzados con fibras de acero,** Informes de la Construcción, 342, p.p. 5-17 (1982).

CARMONA FILHO, A., CARMONA, T. G. Fissuração nas estruturas de concreto. Boletín Técnico. Alconpat Internacional, 2013.

CARVALHO, R. F. **Compósitos de Fibras de Sisal para Uso em Reforço de Estruturas de Madeira.** Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

CHENKUI, H., GUOFAN, Z. **Properties of steel fibre reinforced concrete containing larger coarse aggregate.** Cement and Concrete Composites, Volume 17, Issue 3, 1995, Pages 199-206, ISSN 0958-9465.

CONCRETE SOCIETY, Technical Report n° 65, **Guidance on the use of macro-synthetic-fiber-reinforced concrete.** The Concrete Society, Camberley, 2007.

di PRISCO, M., PLIZZARI, G., VANDEWALLE, L. **Fiber reinforced concrete: new design perspectives.** Material and Structures, v. 42, p. 1261-1281, 2009.

di PRISCO, M., *et al.*, **Fiber reinforced concrete in the new FIB model code.** In: *3rd fib International Congress*, Washington, pp. 1-12, 2010.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras.** In: Isaia, Geraldo Cechella. (Org.) Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. v.2, Capítulo 39, p.1195-1225. 2005.

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

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2011.

FIGUEIREDO, A. D., TORNERI, P. **Efeitos da ancoragem em gancho de fibras na tenacidade dos concretos**. In: VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, Anais. São Paulo, 2006.

FIGUEIREDO, A. D.; CHAMA NETO, P. J.; FARIA, H. M. **A nova normalização brasileira sobre fibras de aço**. In: Concreto & Construções, 2008. IBRACON. Ano XXXVI. Nº 50. ISSN 1809-7197. p. 67-75.

FIGUEIREDO, A. D.; NUNES, N. L.; TANESI, J. **Mix design analysis on steel fiber reinforced concrete**. In: FIFTH INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON FIBRE-REINFORCED CONCRETES (FRC), 2000, Lyon. Fibre-Reinforced Concretos (FRC) – BEFIB'2000. Proceedings. RILEM Publications S. A. R. L., Lyon, 2000.

FIGUEIREDO, A.D. **Parâmetros de Controle e Dosagem do Concreto Projetado com Fibras de Aço**. São Paulo, 1997. 342p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

FORMAGINI, S., 2005, **Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho**. Tese de Doutorado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 287 páginas.

GARCEZ, E. O. **Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impacto**. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, PPGE, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

GAVA, G. P. **Análise teórica-experimental do comportamento à flexão de vigas de concreto reforçado com fibras de aço**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006. 282 p.

GÓIS, F. A. P. **Avaliação experimental do comportamento de concreto fluido reforçado com fibras de aço**: Influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, UFAL, Maceió, 2010.

GUIMARÃES, D. **Avaliação das propriedades de concretos reforçados com fibras de aço para utilização em pisos industriais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2015.

HANNANT, D. J. **Fiber Cements and Fiber Concretos**. Guilford, United Kingdom: John Wiley & Sons, 1978.

HARRIES, K. A.; YOUNG, S. C. **Sprayed-fiber-reinforced composites materials for infrastructure rehabilitation**. Concrete International. United States of America, v. 25, n.1, p 47-51, 2003.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete**. JSCE-SF4. Concrete Library of JSCE. Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete. Nº 3 June 1984. p.58-61.

JO, B-W., SHON, Y-H., KIM, Y. J. **The evaluation of elastic modulus for steel fiber reinforced concrete**. Russian Journal of Nondestructive Testing, v. 37, n. 2, 2001, p. 152-161.

JOHNSTON, C. D. **'Measures of the workability of steel reinforced concrete and their precision'**. Cement, Concrete and Aggregates. 6, 1984.

LARANJEIRA, F., GRÜNEWALD, S., WALRAVEN, J., BLOM, C., MOLINS, C., AGUADO, A. **Characterization of the orientation profile of steel fiber reinforced concrete**. MATERIALS AND STRUCTURES, 44, 1093-1111. 2011.

LI, V. C. & STANG, H. **"Classification of fibre reinforced cementitious material for structural applications"**. In: 6th Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), pp 197-217, Verenna, Italy, 2004.

LI, V. C.; MAALEJ, M. **Toughening in cement based composites**. Part I: Cement, mortar and concrete. Cement and Concrete Composites, v. 18, p. 223-237, 1996.

LIBRE, A. N., SHEKARCHI, M., MAHOUTIAN, M., SOROUSHIAN, P. **Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice**. Concrete and Building Materials, v. 25, 2011.

LIMA, P. R. L. **Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal**. Tese de Doutorado em Engenharia, COPPE – UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

LOPES, M. M. **Substituição parcial de armadura de flexão por fibras de aço em vigas de concreto**. (Tese de doutorado). Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), 2005.

LÖFGREN, I. **Fibre- reinforced concrete for industrial construction- a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis**. Ph.D. Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2005.

MAIDL, B. **Stahlfaserbeton**. Berlin. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 1991.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 4. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MIGLIORINI, A.V.; GUIMARÃES, A.T.C.; OZÓRIO, B.P.M. **Fibras de aço em blocos de concreto: estudo para utilização em ambiente marítimo**. Revista Matéria, V17, nº2, Rio de Janeiro, 2012.

NAAMAN, A. E. **Fiber reinforcement for concrete**. Concrete International, v.7, n. 3, March 1985.

NEVILLE, A. **Fiber reinforced cement & concrete**. RILEM Symposium, 1975.

NEHDI, M. e LADANCHUK, J. D. **Fiber Synergy in Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete**. ACI Materials Journal, v. 101, n.6, pp. 508-517. 2004.

NUNES, L. N.; AGOPYAN, V. **A influência do fator de forma da fibra na tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibras de aço**. Boletim Técnico, Série BT/PCC/225 – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

NUNES, N. L. **Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos**. (Tese de doutorado). São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

OLIVEIRA, S. L. **Taxa de Armadura Longitudinal Mínima em Vigas de Concreto de Alta Resistência com Fibras de Aço**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

OLIVEIRA, F.L. **Design-oriented constructive model for steel fiber reinforced concrete**. (Tese de doutorado). Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.

Özcan, DM et al. **Experimental and finite element analysis on the steel fiber-reinforced concrete (SFRC) beams ultimate behavior**. Construction and building materials 23, pp. 1064-1077. 2009.

OZYURT, N., MASON, T. O., SHAH, S. P. **Correlation of fiber dispersion, rheology and mechanical performance of FRCs**. Cement and Concrete Composites, v.29, Issue 2, pp. 70-79.2007.

QUININO, U. C. de M. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. (Tese de doutorado). Porto Alegre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2015.

ROBINS, P.; AUSTIN, S.; JONES, P. **Pull-out behaviour of hooked steel fibres**. Materials and Structures, v. 35, p. 434-442, 2002.

SALVADOR, R. P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – EPUSP, São Paulo, 2013.

SAVASTANO JR, H. **Materiais a base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo**. Tese de livre docência. EPUSP. São Paulo, 2000.

SHAH, S.P. **Do fibers increase the tensile strength of cement-based matrixes?** ACI Materials Journal, 88, 6, 595-602. 1991.

TANESI, J. & AGOPYAN, V. **Compósitos reforçados com fibras plásticas para a construção civil.** II Encontro Tecnologia de Sistemas Plásticos na Construção Civil. EPUSP. São Paulo, 1997.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto de alto e ultra-alto desempenho.** Concreto: Ciência e Tecnologia, IBRACON, 2011.

VELASCO, R.V. **Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas.** (Tese de doutorado). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

WICHMANN, H., HOLST, A., BUDELMANN, H. **Ein praxisgerechtes Messverfahren zur Bestimmung der Fasermenge und orientierung im Stahlfaserbeton.** Beton- und Stahlbetonbau, 108, 12, 822-834. 2013.

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