

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ**  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – MESTRADO

ANDERSON GOBBI DRUN

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONCRETO REFORÇADO COM  
FIBRAS (CRF) COM CONTÉUDO HÍBRIDO EM FIBRAS DE AÇO  
E POLIPROPILENO (PP)**

MARINGÁ

2019

ANDERSON GOBBI DRUN

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONCRETO REFORÇADO COM  
FIBRAS (CRF) COM CONTÉUDO HÍBRIDO EM FIBRAS DE AÇO  
E POLIPROPILENO (PP)**

Dissertação de mestrado apresentado como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador: Prof.<sup>o</sup> Dr. Vladimir José Ferrari.

MARINGÁ

2019

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

D795d

Drun, Anderson Gobbi

Desenvolvimento de um concreto reforçado com fibras (CRF) com conteúdo híbrido em fibras de aço e polipropileno (PP) / Anderson Gobbi Drun. -- Maringá, PR, 2019.  
112 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir José Ferrari.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.

1. Concreto reforçado com fibra (CRF). 2. Fibras de aço. 3. Fibras de polipropileno. I. Ferrari, Vladimir José, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 23.ed. 624.1834

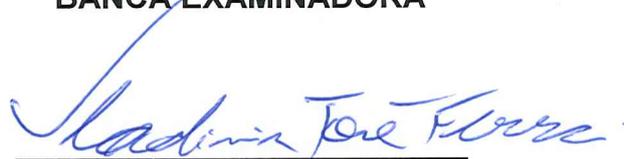
ANDERSON GOBBI DRUN

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS (CRF)  
COM CONTEÚDO HÍBRIDO EM FIBRAS DE AÇO E POLIPROPILENO**

Dissertação apresentada à Universidade  
Estadual de Maringá, como requisito parcial para  
a obtenção do título de mestre.

Aprovado em: 23/08/2019

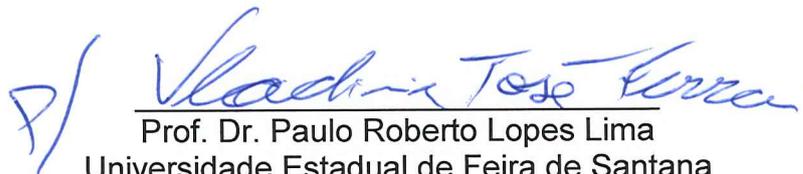
**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Dr. Vladimir José Ferrari  
Universidade Estadual de Maringá



Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei  
Universidade Estadual de Maringá



Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima  
Universidade Estadual de Feira de Santana

Dedico esse trabalho à minha família e amigos.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente devo agradecer aos meus pais e minha irmã por ter acreditado no meu sonho e sempre apoiado os meus caminhos.

Segundo, agradecer ao meu orientador Prof. Dr. Vladimir José Ferrari pelos conselhos, por compartilhar do seu conhecimento e no empenho em me ajudar a finalizar esse trabalho.

Ao professor Dr. Romeo Dias Vanderlei pela ajuda no desenvolvimento dos ensaios e principalmente ao professor Dr. José Wilson Assunção que foi fundamental para o desenvolvimento da fase laboratorial dessa pesquisa, auxiliando em todos os processos de moldagem, cura e realização dos ensaios com sua experiência.

Ao meu colega de laboratório e pesquisa, Henrique Gimenes pela ajuda em todas as etapas na realização da pesquisa, onde sem a sua colaboração o trabalho teria sido muito mais difícil.

A Universidade Estadual de Maringá (UEM) por fornecer a estrutura física através dos equipamentos do laboratório e todo o apoio financeiro na compra dos materiais. A Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil por sempre estar solícita a qualquer pedido.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão no período de um ano da bolsa de estudos fundamental para a dedicação exclusiva as atividades do mestrado.

A todos aos meus amigos, principalmente Lucas, Maicon, Alexandre e Gustavo por estarem sempre presentes nos momentos em que era preciso dar uma pausa nos estudos e desfrutar de umas horas de companheirismo e risada.

Por fim, todas as pessoas que colaboraram diretamente ou indiretamente para realização desse trabalho o meu muito obrigado!

## RESUMO

No Brasil o momento é de avanço na aplicação do concreto reforçado com fibras (CRF), uma vez que ações no sentido de normalização estão sendo implementadas, como por exemplo, as ações do Comitê Ibracon/Abece 303. Qualidade e segurança nas estruturas projetadas, caracterização do material, estabelecimento de critérios de projeto e controle da qualidade do CRF são assuntos que têm avançado quanto a temática do CRF. Com isso, é importante avançar nas práticas de seu desenvolvimento e controle para as suas muitas aplicações. Nessa pesquisa foram desenvolvidas e analisadas as propriedades, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido de um CRF. O conceito de hibridização foi aplicado para a associação de microfibras (12 mm) e macrofibras (54 mm) de polipropileno com fibras de aço de 25 mm de comprimento. Uma das premissas foi desenvolver um concreto com boa capacidade de absorção de energia na fase pós-pico e com uma elevada deformação configurando um comportamento pseudo-dúctil, para isso foram avaliados 7 grupos distintos de CRF com diferentes teores das fibras utilizadas. Para o estado fresco foi realizado o ensaio do abatimento do tronco de cone para avaliar as condições de trabalhabilidade da mistura ao adicionar-se as fibras. Notou-se uma considerável diminuição da consistência do CRF com o sucessivo aumento do teor de fibras. Com isso optou-se por utilizar um aditivo superplastificante para reestabelecer às condições mínimas de trabalhabilidade da mistura onde se mostrou eficaz para a maioria dos grupos. Os ensaios no estado endurecido para determinar a resistência à compressão e módulo de elasticidade foram realizados com corpos de prova de dimensão 100 x 200 (mm) e constatou-se uma diminuição considerável nos valores dessas propriedades com a inserção das fibras à mistura, na grande maioria dos grupos essa diminuição ficou diretamente ligada ao aumento do teor das fibras. Foi desenvolvido ensaio de flexão conforme recomendações da JSCE SF4 (1984) em corpos de prova prismáticos com dimensão 150 x 150 x 500 mm. Com isso constatou-se que os CRF conseguiram manter um bom comportamento na fase pós-fissuração onde a fibra de aço se mostrou mais eficaz para baixos deslocamentos e as fibras de PP para deslocamentos maiores configurando assim uma maior tenacidade ao material. Ao avaliar a resistência residual verificou-se, no geral, um comportamento *slip-softening* que caracteriza uma diminuição da resistência para maiores deslocamentos, fortemente ligado à baixa capacidade de resistência da fibra de aço devido ao seu deslizamento.

*Palavras-chave: Concreto reforçado com fibras (CRF), fibra de aço, fibra de polipropileno.*

## ABSTRACT

In Brazil, the moment is ahead in the application of fiber-reinforced concrete (FRC), as actions towards standardization are being implemented, such as the actions of the Ibracon/Abece 303 Committee. Quality and safety in the projected structures, Material characterization, and establishment of design criteria and quality control of the FRC are issues that have advanced on the theme of FRC. With this, it is important to advance the practices of its development and control for its many applications. In this research, the properties of both the fresh and hardened state of a FRC were developed and analyzed. The hybridization concept was applied to the combination of microfibre (12 mm) and macrofiber (54 mm) polypropylene with 25 mm long steel fibers. One of the premises was to develop a concrete with good energy absorption capacity in the post-peak phase and with a high deformation configuring a pseudo-ductile behavior. For this, 7 distinct FRC groups with different fiber content were evaluated. For the fresh state, the cone trunk abatement test was performed to evaluate the working conditions of the mixture by adding the fibers. A considerable decrease in FRC consistency was noted with the successive increase in fiber content. Thus, it was decided to use a superplasticizer additive to reestablish the minimum working conditions of the mixture where it was effective for most groups. The hardened state tests to determine the compressive strength and modulus of elasticity were performed with specimens of size 100 x 200 (mm) and a considerable decrease in the values of these properties was observed with the insertion of the fibers in the mixture. In most groups this decrease was directly linked to the increase in fiber content. Flexural test was developed according to JSCE SF4 (1984) recommendations on prismatic specimens with size 150 x 150 x 500 mm. Thus it was found that the FRC were able to maintain a good behavior in the post-cracking phase where the steel fiber was more effective for low displacements and the PP fibers for larger displacements thus configuring a higher toughness to the material. In evaluating the residual strength, a slip-softening behavior was found, which generally characterizes a decrease in the resistance for greater displacements, strongly linked to the low resistance capacity of the steel fiber due to its slip.

*Keywords: Fiber-reinforced concrete (FRC), steel fiber, polypropylene fiber.*

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2

Figura 2.1: Diagrama de tensão por deformação elástica do concreto e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade.....	7
Figura 2.2: Geometria das fibras de aço.....	9
Figura 2.3: Mecanismo de distribuição de tensão no concreto.....	13
Figura 2.4: Matriz onde observa-se compatibilidade dimensional entre agregado e fibra.....	14
Figura 2.5: Matriz onde não observa-se a compatibilidade dimensional entre agregado e fibra.....	14
Figura 2.6: CRF em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão.....	15
Figura 2.7: Representação do comprimento (l) e o diâmetro (d) utilizados no cálculo do fator de forma (l/d).....	16

### CAPÍTULO 3

Figura 3.1: Formação de ouriços em CRF.....	20
Figura 3.2: Aumento da resistência à compressão com o aumento no teor de fibras..	21
Figura 3.3: Comportamento do concreto submetido à flexão com diferentes adições de fibras.....	23
Figura 3.4: Desenvolvimento de tensões em uma curva carga x deflexão para uma viga reforçada com fibras.....	24
Figura 3.5: Esquema de uma viga prismática de concreto reforçado com fibras submetido à flexão.....	25
Figura 3.6: Esquema de ensaio conforme o recomendado pela JSCE SF4 (1984).....	28
Figura 3.7: Esquema de ensaio conforme o recomendado pela EN 14651 (2007).....	30

### CAPÍTULO 4

Figura 4.1: Curva Granulométrica do Agregado Miúdo.....	33
Figura 4.2: Curva Granulométrica do Agregado Graúdo.....	35
Figura 4.3: a) Fibra de aço. b) Microfibra de PP. c) Macrofibra de PP.....	36
Figura 4.4: a) Volume de materiais separados para um traço. b) Aspecto do concreto na betoneira.....	40

Figura 4.5: a) <i>Slump test</i> do concreto referência. b) <i>Slump test</i> do CRF. c) Determinação da massa específica. ....	40
Figura 4.6: a) Corpos-de-prova moldados. b) Cura dos cp's em câmara úmida. ....	41
Figura 4.7: a) Prensa hidráulica utilizada para o ensaio. b) Detalhe da ruptura de um cilíndrico. ....	42
Figura 4.8: Representação do ensaio de módulo de elasticidade. ....	44
Figura 4.9: a) Ensaio módulo de elasticidade estático. b) Detalhe da fixação do extensômetro ao corpo de prova.....	45
Figura 4.10: Detalhe da fixação do corpo de prova e ensaio através do Sonelastic®.	46
Figura 4.11: Ensaio sendo executado através da EMIC 23-600.....	48
Figura 4.12: Marcação dos corpos de prova. ....	49
Figura 4.13: a) Detalhe do LVDT acoplado no dispositivo YOKE. b) Corpo de prova posicionado para realização do ensaio. ....	50
Figura 4.14: Esquema da curva carga-deslocamento vertical utilizada para determinação da tenacidade à flexão segundo a JSCE-SF4 (1984). ....	50
Figura 4.15: Generalização da integração numérica para determinação da área abaixo da curva.....	51

## CAPÍTULO 5

Figura 5.1: Informações contidas no gráfico do tipo <i>boxplot</i> .....	52
Figura 5.2: Influência da adição de aditivo nos CRF's.....	54
Figura 5.3: Segregação e exsudação do CRF. ....	56
Figura 5.4: Resistência à compressão aos 28 dias. ....	58
Figura 5.5: Influência das micro e macrofibras na resistência a compressão do CRF.	59
Figura 5.6: Influência da hibridização entre fibra de aço, micro e macrofibra de PP na resistência à compressão do CRF. ....	60
Figura 5.7: Módulo de Elasticidade Estático. ....	63
Figura 5.8: Módulo de Elasticidade Dinâmico. ....	63
Figura 5.9: Influência no módulo de elasticidade estático e dinâmico com a incorporação de a) microfibras de PP. b) macrofibras de PP.....	64
Figura 5.10: Influência no módulo de elasticidade estático e dinâmico para hibridização entre fibras de aço, micro e macrofibra de PP (a) Grupo 5. (b) Grupo 6. (c) Grupo 7..	65
Figura 5.11: Curva carga <i>versus</i> deslocamento vertical para CRF com fibras de aço (grupo 2). ....	68
Figura 5.12: Curva carga <i>versus</i> deslocamento vertical para CRF com fibras de aço e microfibras de PP (grupo 3). ....	68

Figura 5.13: Curva carga <i>versus</i> deslocamento vertical para CRF com fibras de aço e macrofibras de PP (grupo 4). .....	69
Figura 5.14: Curva carga <i>versus</i> deslocamento vertical para CRF com fibras de aço, micro e macrofibras de PP (grupo 5). .....	69
Figura 5.15: Curva carga <i>versus</i> deslocamento vertical para CRF com fibras de aço, micro e macrofibras de PP (grupo 6). .....	70
Figura 5.16: Curva carga <i>versus</i> deslocamento vertical para CRF com fibras de aço, micro e macrofibras de PP (grupo 7). .....	70
Figura 5.17: Ruptura dos corpos de prova submetidos ao ensaio de flexão. ....	71
Figura 5.18: Identificação da Resistência à fissuração e à Tração através da curva carga-deslocamento. ....	73
Figura 5.19: Resistência à fissuração dos CRF's. ....	75
Figura 5.20: Resistência à tração dos CRF's. ....	75
Figura 5.21: Influência do teor de fibras na resistência a) fissuração. b) tração na flexão (grupo 3 e 4). ....	76
Figura 5.22: Influência do teor de fibras na resistência à a) fissuração. b) tração na flexão (grupo 5,6 e 7). ....	78
Figura 5.23: Definição do primeiro pico de carga e tenacidade a partir de uma curva típica de carga por deslocamento. ....	80
Figura 5.24: Fator de tenacidade à flexão dos CRF's. ....	82
Figura 5.25: Resistência equivalente à flexão dos CRF's. ....	82
Figura 5.26: Influência do teor de fibras no fator de tenacidade. a) grupo 3 e 4. b) grupo 5,6 e 7. ....	83
Figura 5.27: Influência do teor de fibras na resistência equivalente à tração. a) grupo 3 e 4. b) grupo 5,6 e 7. ....	85
Figura 5.28: Definição de resistência residual conforme recomendado pela ASTM C1609 (2010). ....	87
Figura 5.29: Resistência residual para deslocamento L/600. ....	89
Figura 5.30: Resistência residual para deslocamento L/150. ....	89
.Figura 5.31: Influência do teor de fibras na resistência residual para L/600. a) grupo 3 e 4. b) grupo 5,6 e 7. ....	90
Figura 5.32: Influência do teor de fibras na resistência residual para L/150. a) grupo 3 e 4. b) grupo 5,6 e 7. ....	92

## APÊNDICE A

Apêndice A.1: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento vertical para CRF com fibras de aço (grupo 2).....	107
Apêndice A.2: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento vertical para CRF com fibras de aço e 0,2% de microfibras de PP (grupo 3.1). .....	107
Apêndice A.3: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento vertical para CRF com fibras de aço e 0,3% de microfibras de PP (grupo 3.2). .....	108
Apêndice A.4: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento vertical para CRF com fibras de aço e 0,4% de microfibras de PP (grupo 3.3). .....	108
Apêndice A.5: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento vertical para CRF com fibras de aço e 0,3% de macrofibras de PP (grupo 4.1). .....	109
Apêndice A.6: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento vertical para CRF com fibras de aço e 0,4% de macrofibras de PP (grupo 4.2). .....	109
Apêndice A.7: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento vertical para CRF com fibras de aço e 0,5% de macrofibras de PP (grupo 4.3). .....	110
Apêndice A.8: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento vertical para CRF com fibras de aço, 0,2% de microfibras e 0,3% de macrofibra de PP (grupo 5.1). .....	110
Apêndice A.9: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento vertical para CRF com fibras de aço, 0,2% de microfibras e 0,4% de macrofibra de PP (grupo 5.2). .....	111
Apêndice A.10: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento vertical para CRF com fibras de aço, 0,2% de microfibras e 0,5% de macrofibra de PP (grupo 5.3). .....	111
Apêndice A.11: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento vertical para CRF com fibras de aço, 0,3% de microfibras e 0,3% de macrofibra de PP (grupo 6.1). .....	112
Apêndice A.12: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento vertical para CRF com fibras de aço, 0,3% de microfibras e 0,4% de macrofibra de PP (grupo 6.2). .....	112
Apêndice A.13: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento vertical para CRF com fibras de aço, 0,3% de microfibras e 0,5% de macrofibra de PP (grupo 6.3). .....	113
Apêndice A.14: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento vertical para CRF com fibras de aço, 0,4% de microfibras e 0,3% de macrofibra de PP (grupo 7.1). .....	113

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 4

Tabela 4.1: Característica do cimento.....	32
Tabela 4.2: Caracterização Granulométrica do Agregado Miúdo.....	33
Tabela 4.3: Caracterização do Agregado Graúdo.....	34
Tabela 4.4: Informações Técnicas do Superplastificante.....	35
Tabela 4.5: Caracterização das fibras utilizadas.....	36
Tabela 4.6: Traço de referência e consumo dos materiais.....	37
Tabela 4.7: Tipo e teor de fibras dos CRF's.....	38

### CAPÍTULO 5

Tabela 5.1: Propriedades do CRF no estado fresco.....	53
Tabela 5.2: Resistência à compressão aos 28 dias dos CRF.....	57
Tabela 5.3: Módulo de Elasticidade Estático e Dinâmico dos CRF aos 28 dias.....	62
Tabela 5.4: Relação entre módulo de elasticidade experimental e analítico.....	66
Tabela 5.5: Resistência à fissuração e a tração na flexão para os CRF's estudados..	74
Tabela 5.6: Fator de tenacidade e resistência à flexão equivalente para os CRF's estudados.....	81
Tabela 5.7: Resultados para resistência residual para deslocamento L/600 e L/150. .	88

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	3
1.1.1	Objetivos Específicos. ....	3
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	3
<b>2</b>	<b>CONCRETO REFORÇADO COM FIBRA (CRF).....</b>	<b>5</b>
2.1	CONCRETO .....	5
2.2	FIBRAS .....	5
2.2.1	Fibras de Polipropileno .....	7
2.2.2	Fibras de Aço .....	9
2.3	HIBRIDIZAÇÃO COM FIBRAS DE ALTO E BAIXO MÓDULO.....	10
2.4	CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS.....	12
2.4.1	Compatibilidade Dimensional .....	13
2.4.2	Volume Crítico de Fibras .....	15
2.4.3	Fator de Forma.....	16
2.4.4	Interação entre fibra e concreto .....	16
<b>3</b>	<b>PROPRIEDADES DO CRF.....</b>	<b>19</b>
3.1	TRABALHABILIDADE .....	19
3.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	21
3.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	22
3.4	TENACIDADE À FLEXÃO .....	26
3.5	ENSAIOS NORMALIZADOS PARA FLEXÃO.....	26
3.5.1	JSCE SF4 (1984) - Método de ensaio de resistência e tenacidade à flexão de concreto reforçado com fibras de aço.....	27
3.5.2	ASTM C1609 (2010) – Método padrão para avaliar o desempenho à flexão do concreto reforçado com fibra. ....	29
3.5.3	EN 14651 (2007) - Método de ensaio para o concreto reforçado com fibras metálicas - Determinação da resistência à tração por flexão (limite de proporcionalidade e resistência residual) .....	30
<b>4</b>	<b>MATERIAIS UTILIZADOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>32</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	32

4.1.1	Cimento Portland.....	32
4.1.2	Agregado Miúdo .....	33
4.1.3	Agregado Graúdo .....	34
4.1.4	Aditivo Superplastificante.....	35
4.1.5	Fibras .....	35
4.1.6	Dosagem do concreto.....	37
4.2	MOLDAGEM DO CRF .....	39
4.3	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO .....	41
4.3.1	Ensaio de Compressão Axial .....	41
4.3.2	Ensaio de Módulo de Elasticidade .....	42
4.3.3	Ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico .....	45
4.3.4	Ensaio de Flexão.....	48
<b>5</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>52</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO .....	53
5.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	56
5.3	MÓDULO DE ELASTICIDADE .....	61
5.4	ENSAIO DE FLEXÃO .....	67
5.4.1	Resistência à Fissuração e Tração na Flexão .....	73
5.4.2	Fator de Tenacidade e Resistência Equivalente à Flexão.....	79
5.4.3	Resistência Residual .....	86
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>94</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>97</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>107</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos representam uma classe de materiais nos quais são empegados tipos diferentes de constituintes, que juntos conferem propriedades superiores àqueles usados separadamente (CALLISTER, 2014).

Os compósitos formados por matrizes cimentícias através da utilização do cimento Portland como aglomerante hidráulico podem ser reforçados com barras de aço, dando origem ao tradicional concreto armado. Mehta e Monteiro (2014) comentam que em outros casos, podem-se empregar como reforço diferentes tipos de fibras (metálicas, poliméricas ou naturais) para uma infinidade de possibilidade de aplicações.

Conforme Soe et al. (2013), fibras de aço, polipropileno, polietileno e PCV têm sido utilizadas nas misturas de concretos de alto desempenho. Fibras de elevado módulo, como as de aço, vidro e carbono aumentam a resistência e a tenacidade do material, contudo não possibilitam ductilidade ou encruamento. Já as fibras de baixo módulo, como PVC, polipropileno, polietileno melhoram significativamente a ductilidade da matriz de concreto como também a redução da fissuração.

Ahmed e Mihashi (2011) e Silva e Coelho (2013), entre outros autores já demonstraram que a hibridização de dois ou mais diferentes tipos de fibras podem resultar em concretos com melhor comportamento em termos de encruamento, resistência e capacidade de deformação em relação ao compósito mono-híbrido.

Kawamata (2003) também compartilha da ideia de que as propriedades mecânicas de concretos de alto desempenho podem ser melhoradas com o uso híbrido de fibras de alto módulo e de baixo módulo em certas taxas de adição à matriz. Zhang et al. (2007), comentam que se espera de um concreto de alto desempenho híbrido com fibras de alto e baixo módulo, um comportamento melhorado em termos de resistência à tração e de capacidade de deformação.

Soe et al. (2013) observam que, as fibras de elevado módulo (aço, vidro e carbono) aumentam a resistência de pico e a tenacidade do concreto, contudo não possibilitam ganho significativo na ductilidade ou encruamento. Já as fibras de baixo módulo (PVA e PP) melhoram significativamente a ductilidade da matriz de concreto como também a redução da fissuração.

Segundo Figueiredo (2011), as fibras poliméricas e as de aço possuem módulo de elasticidade inferior e superior ao do concreto endurecido, respectivamente. Taerwe & Gysel (1996) afirmam que as fibras de aço têm elevado módulo de elasticidade de forma a poder melhorar a tenacidade do concreto. Bayasi & McIntyre (2002) dizem que as fibras de PP têm boa ductilidade e boa capacidade de dispersão de forma a ser possível restringir a fissuração plástica do concreto.

Carnio (2017) comenta que a adição de fibras de PP interfere pouco na resistência do concreto à tração. A resistência da fibra é maior que a da matriz, mas seu módulo de elasticidade é menor, portanto, alonga-se mais que a matriz.

Em vários estudos as macrofibras poliméricas vêm sendo empregadas juntamente com as fibras de aço na produção de concreto com reforço híbrido de fibras; isto com o propósito de incrementar as propriedades físicas e mecânicas do compósito a partir da ação de cada uma das fibras (CÁCERES; FIGUEIREDO; MONTE, 2013; DAWOOD; RAMLI, 2012).

A partir do conceito de hibridização, em que diferentes fibras podem atuar de maneira conjunta em fases distintas de sollicitação de um material cimentício, a pesquisa aqui proposta tem a intenção de desenvolver um concreto reforçado com fibras de elevada capacidade de deformação na fase pós-pico do histórico de carregamento (*strain hardening*) e caracterizado por fissuração múltipla visando-se um comportamento bastante dúctil. Para tanto, busca-se aplicar materiais facilmente encontrados na região da pesquisa de forma que o concreto possa ser reproduzido sem maiores dificuldades quanto a obtenção de seus elementos constituintes.

A intenção da pesquisa foi de utilizar simultaneamente dois tipos de fibras, aço e PP imersas numa matriz cimentícia formada por um concreto convencional com resistência média de 30 MPa. Com isso pode-se obter uma elevada capacidade de deformação na tração a partir da combinação híbrida entre a fibra de aço e fibras de PP.

O uso simultaneamente das fibras de aço e poliméricas foi no intuito de melhorar o desempenho do CRF em termos de aumento da resistência à fissuração, tenacidade e resistência residual na fase pós-fissuração.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

A pesquisa tem como objetivo geral o desenvolvimento de um concreto reforçado com fibras (CRF) de elevada capacidade de deformação na tração a partir do uso de materiais facilmente encontrados na região em que a pesquisa é desenvolvida de forma a facilitar a sua reprodução em casos práticos da engenharia.

### 1.1.1 Objetivos Específicos.

Sendo assim, os objetivos específicos associados são:

Avaliar o comportamento do concreto reforçado com fibras no estado fresco utilizando-se para tanto os resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone;

Avaliar o comportamento do concreto para o estado endurecido realizando os seguintes ensaios: Tração na flexão em quatro pontos em corpos de prova prismáticos segundo a JSCE SF-4 (1984), compressão axial, módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico;

Desenvolver um concreto com melhor resistência à tração/flexão e maior capacidade de deformação (ductilidade);

Investigar a influência do efeito da ação conjunta das fibras de aço e de PP, bem como o efeito do tipo de fibra de PP sobre o comportamento pós-fissuração do CRF em termos das resistências residuais preconizadas pela ASTM C1609 (2010) e em termos do fator de tenacidade conforme a JSCE SF-4 (1984).

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em sete capítulos conforme descritos abaixo:

- **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO:** consiste em apresentar o assunto a ser discutido bem como a motivação que levou para o desenvolvimento da pesquisa e quais são os objetivos principais que devem ser alcançados.

- **CAPÍTULO 2 – CONCRETO REFORÇADO COM FIBRA (CRF):** este capítulo aborda os conceitos iniciais de concreto e fibras de baixo e alto módulo de elasticidade. De maneira contínua se discute as principais vantagens em utilizar a hibridização entre os dois tipos de fibras em concretos.
- **CAPÍTULO 3 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CRF:** aqui discute-se os principais benefícios na inserção de fibras no concreto em termos das propriedades no estado fresco e as principais melhorias conferidas ao estado endurecido referente as propriedades mecânicas.
- **CAPÍTULO 4 – MATERIAIS UTILIZADOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL:** agrupam-se todos os materiais que foram utilizados e a metodologia utilizada para a realização de cada um dos ensaios propostos.
- **CAPÍTULO 5 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS:** nesse tópico é apresentado todos os resultados quantitativos dos ensaios e realizada uma discussão acerca desses valores.
- **CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO:** são apresentadas as principais conclusões que foram verificadas com o andamento da pesquisa, nesse tópico também é inserida a sugestão para trabalhos futuros, baseada na mesma metodologia adotada nessa pesquisa.
- **CAPÍTULO 7 – REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO:** é apresentado todo o referencial teórico utilizado como base para o desenvolvimento do trabalho.

## 2 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRA (CRF)

### 2.1 CONCRETO

O concreto de cimento Portland (CP) é um material comumente utilizado em obras do mundo todo, principalmente em elementos estruturais. O concreto por si é um material compósito formado por: pasta de cimento, agregados graúdos e miúdos. É capaz de apresentar uma grande variação das suas propriedades em função dos seus componentes e das proporções utilizadas.

No entanto o concreto apresenta algumas limitações, entre elas: o comportamento frágil na ruptura com uma pequena capacidade de deformação, quando comparada, por exemplo, ao aço. Além disso, o concreto apresenta uma capacidade de resistência à tração muito inferior a resistência à compressão, onde a relação entre as duas propriedades é em torno de 0,7 a 0,11.

Segundo Figueiredo (2000) este comportamento está associado às fissuras que se formam ou já presentes no concreto que acabam prejudicando muito mais o material quando solicitado à tração do que a compressão. Com isso, pode-se associar a reduzida capacidade de resistência à tração a dificuldade do concreto em interromper a propagação de fissuras quando submetido a este tipo de tensão.

Isso ocorre, pois a direção de propagação das fissuras é transversal à direção principal de tensão. Sendo assim, com o início de uma nova fissura a área disponível para suportar a carga é reduzida aumentando assim as tensões nas extremidades das fissuras. Portanto a ruptura na tração é causada por algumas fissuras que se unem e não por numerosas fissuras como ocorre na compressão do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Portanto, a adição de fibras no concreto possui como objetivo a criação de uma ponte de transferência de tensões. Logo esse mecanismo de transferência através das fissuras cria-se um mecanismo interessante de aumento de energia associada à ruptura do material, restringindo assim a propagação das fissuras.

### 2.2 FIBRAS

Os materiais compósitos, como o próprio nome sugere, são materiais compostos basicamente por dois diferentes materiais, nesse caso: a matriz e as fibras.

A adoção das fibras tem como objetivo fornecer uma espécie de reforço da matriz em função das suas propriedades físicas e mecânicas.

No caso das matrizes cimentícias, principalmente o concreto, a principal contribuição das fibras é transformar a ruptura do tipo frágil para uma ruptura dita “quase dúctil”, resultando assim em um ganho no desempenho mecânico e redução da fissuração do material.

As fibras para utilização em concretos podem ser fabricadas de diferentes tipos de materiais entre eles: aço, metal, vidro, fibras sintéticas, carbono entre outras. Comumente são classificadas segundo o valor de seu módulo de elasticidade.

A variação de seus materiais e a consequente variação de suas propriedades geram concretos com características distintas, dependendo o objetivo de cada estudo. Podem-se citar as fibras de baixo módulo de elasticidade, como as fibras de polipropileno que possuem como característica uma alta absorção de energia, um alongamento maior que as matrizes cimentícias e elevada tenacidade. Porém, não contribuem significativamente para aumento da resistência do CRF.

Já as fibras com alto módulo de elasticidade, como as fibras de aço e vidro possuem como característica principal uma elevada resistência mecânica, entre elas resistência à tração, rigidez e capacidade de resistir a cargas dinâmicas.

Para entender melhor o comportamento das fibras de alto e baixo módulo de elasticidade analise a Figura 2.1. A curva de tensão por deformação do concreto está representada pela linha AO, enquanto as linhas OB e OC representam o trabalho na fase elástica das fibras de alto e baixo módulo respectivamente.

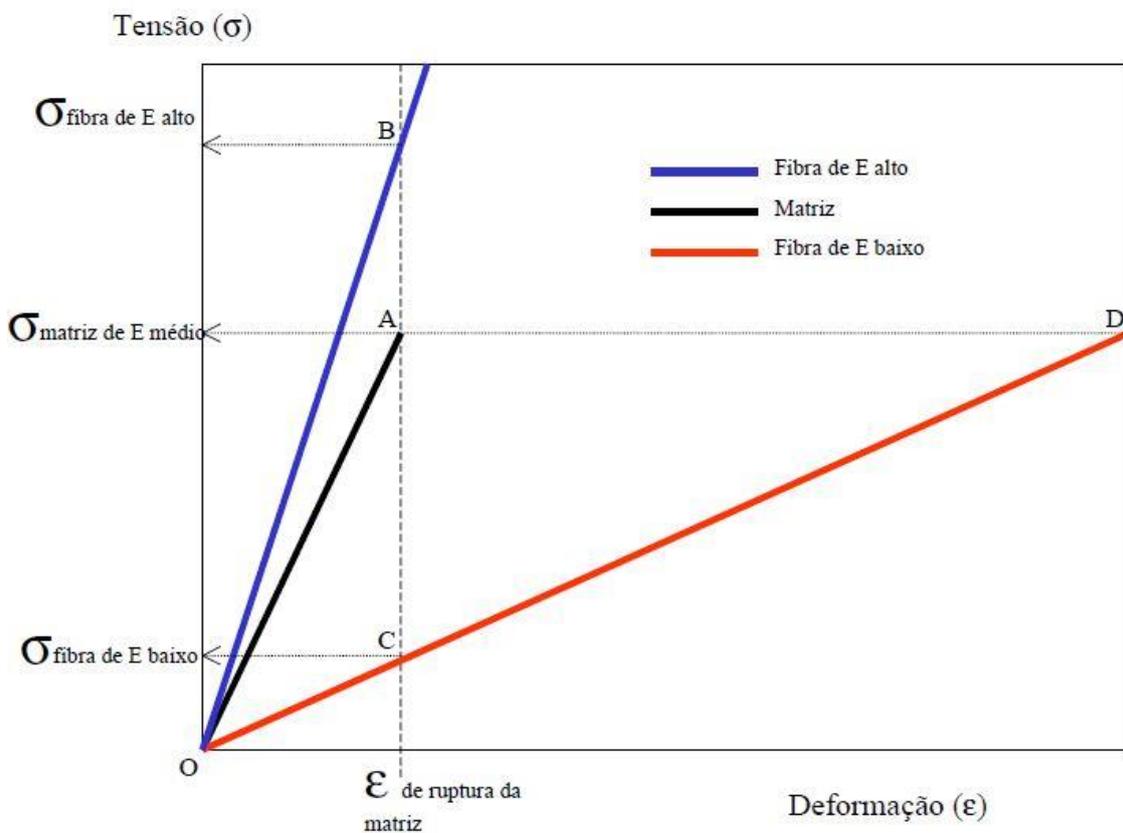
No momento em que o concreto atinge seu pico de tensão e se rompe (ponto A) acaba transferindo a tensão para a fibra de baixo módulo (ponto C) que representa uma tensão muito baixa para este nível de deformação, onde deve ser deformada muito, mas intensamente até o ponto D para que assim garanta o mesmo nível de tensão do concreto.

Portanto, a fibra de baixo módulo de elasticidade não poderá oferecer uma capacidade de reforço logo após a fissuração do concreto para um dado carregamento ou permitirá uma grande deformação do compósito com uma consequente alta no nível de fissuração (ponto D).

Por outro lado, a fibra de alto módulo de elasticidade já apresenta um elevado nível de tensão no momento de ruptura do concreto, o que lhe permite atuar como um reforço já a partir do ponto B, desde que sua resistência não seja superada.

Resumidamente as fibras de alto módulo conferem ao concreto um aumento na sua resistência mecânica e as fibras de baixo módulo permitem um aumento na deformação.

Figura 2.1: Diagrama de tensão por deformação elástica do concreto e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade



Fonte: Figueiredo (2000, p.5).

### 2.2.1 Fibras de Polipropileno

As fibras de polipropileno são classificadas como fibras de baixo módulo de elasticidade, são interessantes em aplicações onde o reforço do concreto não é o principal objetivo. É indicado principalmente para controle da fissuração e proteção contra danos físicos.

Devido ao seu baixo módulo de elasticidade, as fibras de polipropileno só atuam com ganho significativo nas primeiras idades. Isto ocorre, pois nas primeiras idades o módulo de elasticidade do concreto também é baixo e as deformações associadas estão a um baixo nível de tensão gerando assim uma compatibilidade com aquela absorvida pelas fibras de polipropileno.

Com isso, as fibras de polipropileno estão destinadas principalmente ao controle de fissuração por retração, que comumente ocorre durante a hidratação inicial do cimento. Esse ganho de desempenho está diretamente ligado ao fator de forma da fibra, que é dado pela relação entre o comprimento pelo diâmetro da mesma. No entanto, quanto maior for o fator de forma da fibra maior será a influencia na perda de fluidez do material, alterando assim a trabalhabilidade no estado fresco.

Tal fato ocorre, pois existe uma elevada área superficial que demanda uma grande quantidade de água de molhagem aumentando-se assim o atrito interno do concreto e reduzindo a sua mobilidade. Por outro lado, para algumas aplicações, esse fato pode ser positivo como, por exemplo, em situações onde exige-se elevada coesão do concreto.

Entre outras vantagens possui alta resistência a álcalis, alta durabilidade ao ambiente alcalino do concreto, alto ponto de fusão e o preço baixo do material. Porém, possui como desvantagens sua baixa resistência ao fogo, sensibilidade à luz solar, baixo módulo de elasticidade e baixa aderência ao concreto (BENTUR e MINDESS, 2007).

Porém Resende (2003) comenta que essas desvantagens podem ser contornadas, como a fibra trabalha no interior do concreto, problemas como exposição ao sol e resistência ao fogo podem ser atenuados. Já para sua aderência ao concreto um tratamento superficial e adições minerais podem contornar esse problema.

Quanto às melhoras obtidas pelo uso da fibra de polipropileno adicionadas ao concreto destaca-se sua alta capacidade de deformação última, com valores entre 15% a 25%, muito superiores ao concreto simples, alta absorção de energia (tenacidade), resistência ao impacto e controle de fissuração (BENTUR e MINDESS, 2004; ACI 544.1R-96, 2000).

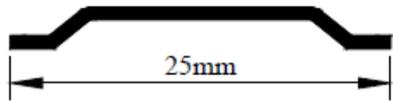
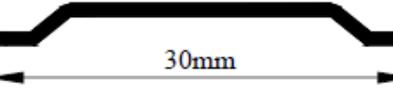
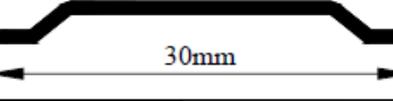
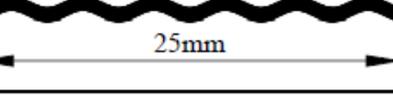
## 2.2.2 Fibras de Aço

As fibras de aço normalmente são classificadas como fibras de alto módulo de elasticidade. Ou seja, propiciam ao concreto um reforço inicial aumentando assim a sua resistência mecânica logo após a fase pós-fissuração.

Quando adicionadas ao concreto, as fibras de aço dificultam a propagação das fissuras devido ao seu elevado módulo de elasticidade. Pela sua alta capacidade portanto na fase pós-fissuração as fibras permitem uma redistribuição de esforços no material mesmo quando são adicionadas em baixos teores. Tal característica é interessante em estruturas contínuas, como pavimentos e revestimentos de túneis.

Comercialmente possuem geometrias variadas, onde diversas formas surgiram durante o passar dos anos visando sempre uma melhor ancoragem do material ao concreto. Atualmente as mais utilizadas são as fibras com seção circular com suas extremidades fletidas, formando um gancho promovendo assim uma maior aderência entre fibra e concreto. A Figura 2.2 mostra as diferentes geometrias das fibras de aço existentes no mercado.

Figura 2.2: Geometria das fibras de aço

Formato longitudinal	Seção
	 0,45x0,50mm
	 diâmetro: 0,50mm
	 diâmetro: 0,65mm
	 1,35x0,50mm

Fonte: Figueiredo (2000)

O uso de fibras de aço no concreto tem como objetivo o aumento da tenacidade, da resistência à flexão, ao impacto e a fadiga. As fibras de aço produzidas no Brasil para adição no concreto possuem normalmente comprimento na ordem de

25 a 62,5mm. Sua resistência a tração varia entre 345 a 2100 MPa e o módulo de elasticidade entre 200 a 210 GPa (FERRARI, 2007).

### 2.3 HIBRIDIZAÇÃO COM FIBRAS DE ALTO E BAIXO MÓDULO

O uso da hibridização de dois ou mais tipos de fibras racionalmente combinados possui como objetivo produzir um concreto onde o benefício oriundo de cada uma das fibras individuais resulte em uma resposta sinergia (Banthia, 2001).

Bentur e Mindess (1990; 2007) comentam que Walton e Majumdar (1975) foram os pioneiros nos estudos acerca da combinação de diferentes tipos de fibras para benefício da resistência à tração na flexão. Os autores estudaram a hibridização utilizando fibras de abesto e carbono em uma matriz cimentícia e também a inserção de fibras de polipropileno e vidro para avaliar a resistência ao impacto de corpos de prova de concreto.

Outros exemplos de pioneirismo neste campo pode-se citar trabalhos como de Kobayashi e Cho (1982) que avaliaram as vantagens na combinação de fibras de polietileno e aço, Hasaba et. al. (1984) onde avaliaram os dados experimentais de compósitos cimentícios híbridos compostos por fibras de polipropileno e aço. Feldman e Zheng (1993) comentam que a combinação de diferentes tipos de fibras com diferentes valores de módulo de elasticidade contribui para que ocorra um ganho na resistência última e na capacidade de deformações no estágio pós-fissuração.

Diversas pesquisas realizadas nesse sentido apontam que as propriedades mecânicas do concreto reforçado com conteúdo híbrido de fibras são muito superiores em comparação com as mesmas propriedades de concreto reforçado com apenas um tipo de fibra, principalmente se tratando de resistência à flexão (MARKOVIC et. al., 2003; YEW et. al., 2011; TAMIL SELVI, THANDAVAMOORTHY, 2013; KONAPURE, KANGIRI, 2014; VAIRAGADE, KENE, 2012).

A hibridização se mostra uma técnica cada vez mais difundida e avaliada por pesquisadores do mundo todo, entre eles Ahmed e Maalej (2009) onde os autores realizaram experimentos com o objetivo de avaliar a deformação por tração de compósitos cimentícios reforçados com fibras de aço e fibras de polipropileno. O programa experimental dos autores consistiu em avaliar duas misturas: a primeira onde às duas fibras possuíam comprimento de 12 mm e uma segunda mistura onde as fibras tinham um comprimento de 18 mm, ou seja, criou-se uma compatibilidade

dimensional entre as fibras. Como resultado avaliaram que as fibras de polipropileno aumentaram a capacidade de deformação na tração, já as fibras de aço contribuíram para a melhora da resistência à tração final dos compósitos. Outro fato observado foi que o aumento no comprimento das fibras resultou em uma melhora na capacidade de deformação, endurecimento (*slip-hardening*) e no comportamento da micro fissuração do compósito.

Stahli e Van Mier (2004) ao avaliar o efeito de três diferentes tipos de fibra para reforço do concreto, levando em conta nesse caso a influência no estado fresco e nas propriedades mecânicas à flexão, constataram que o concreto contendo dois ou mais tipos de fibras são mais eficientes que concretos reforçados apenas com um tipo de fibra.

Sun et. al (2001) ao avaliar os benefícios na utilização das fibras de aço, polipropileno e PVA nas propriedades dos compósitos híbridos, como a permeabilidade e retração da matriz comentam que a combinação entre fibra de aço e fibra de PVA, com uma menor geometria e módulo de elasticidade, reduz as deformações provenientes da retração do concreto ao comparar o efeito resultante apenas com a adição das fibras de aço. Consequentemente, o mesmo efeito foi observado ao adicionar uma terceira fibra (polipropileno) reduzindo ainda mais as propriedades de retração da matriz cimentícia. Os autores ainda comentam, que a combinação de diferentes formas e tamanhos de fibras incorporadas contribuem para diminuição na quantidade de fissuras no concreto, inibindo assim a sua propagação em diferentes escalas, bem como a diminuição dos poros presentes entre as fases do compósito.

Banthia e Soleimani (2003) ao realizar ensaios de compressão com vários tipos de compósitos produzidos com diferentes combinações de fibras, concluíram que os compósitos híbridos com fibras de polipropileno e fibras de carbono produzem um maior nível de sinergia em termos de tenacidade em relação aos compósitos apenas com fibras de polipropileno. Nesse mesmo trabalho foi observado o ganho no desempenho mecânico com a mistura entre dois diferentes tipos de fibra de carbono, uma com baixo módulo e outra com alto módulo de elasticidade.

Banthia e Gupta (2004) avaliaram a combinação híbrida entre micro e macrofibras de aço, polipropileno e carbono. Os autores observaram através dos ensaios de resistência à flexão que os valores mais positivos ocorreram quando misturou-se macrofibras de aço com microfibras de polipropileno, sendo observado

valores muito positivos com a combinação entre macrofibras de polipropileno e microfibras de carbono.

Chen e Liu (2005) observaram que uma combinação racionalizada entre fibra de carbono, aço e polipropileno tendem a melhorar as propriedades do concreto à compressão, porém avaliaram uma redução significativa na trabalhabilidade da mistura.

Soe et. al (2013) avaliaram a mistura entre fibras de aço e fibras de PVA (poliálcool vinílico). Nesse caso o programa experimental avaliou diferentes teores das respectivas fibras para melhorar do concreto as propriedades mecânicas. O primeiro grupo foi adicionado 1,5% PVA + 0,5% aço e o segundo 1,75% PVA + 0,58% aço. Os autores verificaram que um maior teor de fibras resultou em melhoras em todas as propriedades avaliadas, entre elas, resistência à compressão, módulo de elasticidade e tração direta.

Ou seja, a hibridização utilizando fibras com características distintas, principalmente o módulo de elasticidade, pode resultar em compósitos com uma alta capacidade de resistência mecânica, normalmente propiciada pelas fibras de alto módulo, e também uma boa resposta ao controle de fissuração da matriz, propiciada pelas fibras de baixo módulo.

## 2.4 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

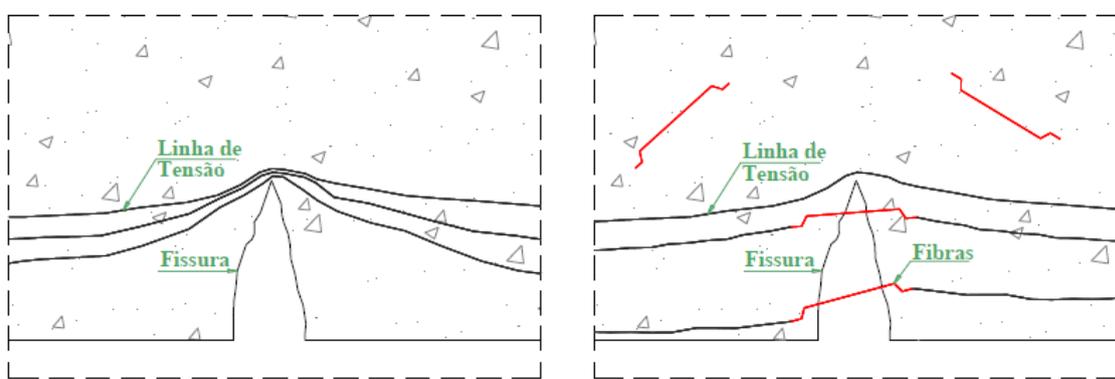
Segundo Gencil et. al. (2011) as propriedades mecânicas do concreto podem ser melhoradas substancialmente com a adição de fibras de forma aleatória a matriz cimentícia, entre elas o controle e prevenção na propagação de fissuras. Já Ferrari (2007) cita como principais benefícios o aumento da resistência à tração e a ductilidade do concreto aumentando assim sua capacidade de carga e deformação. O mesmo autor ainda acrescenta que a incorporação de fibras não melhora a resistência a tração do concreto na fase pré-fissuração, porém propicia uma capacidade portante pós-fissuração e valores de deformação muito superiores do que o concreto simples.

A melhora retratada no estado pós-fissuração está relacionada diretamente na capacidade das fibras em absorver e redistribuir os esforços da tensão concentrada na ponta da fissura retardando a sua propagação (Figura 2.3). Ou seja, no caso do concreto simples o surgimento de uma fissura irá representar uma barreira para a propagação de tensões. Com isso irá gerar uma concentração de tensões na

extremidade da fissura e, no caso desta tensão superar a resistência do concreto temos a ruptura imediata, caracterizada como ruptura do tipo frágil. Ou seja, não se pode esperar nenhuma capacidade resistente do concreto na fase pós-fissuração.

Quando se adicionam as fibras ao concreto o mesmo deixa de possuir esse caráter marcadamente frágil. Isso ocorre, pois as fibras agem como uma ponte de ligação na fissura diminuindo assim a concentração de tensão no local e fazendo com que seja requerida maior energia para abertura da mesma. Com isso o comportamento do concreto passa a ser pseudo-dúctil com uma capacidade portante no estágio pós-fissuração (FIGUEIREDO, 2005).

Figura 2.3: Mecanismo de distribuição de tensão no concreto.



Fonte: Arquez (2010).

#### 2.4.1 Compatibilidade Dimensional

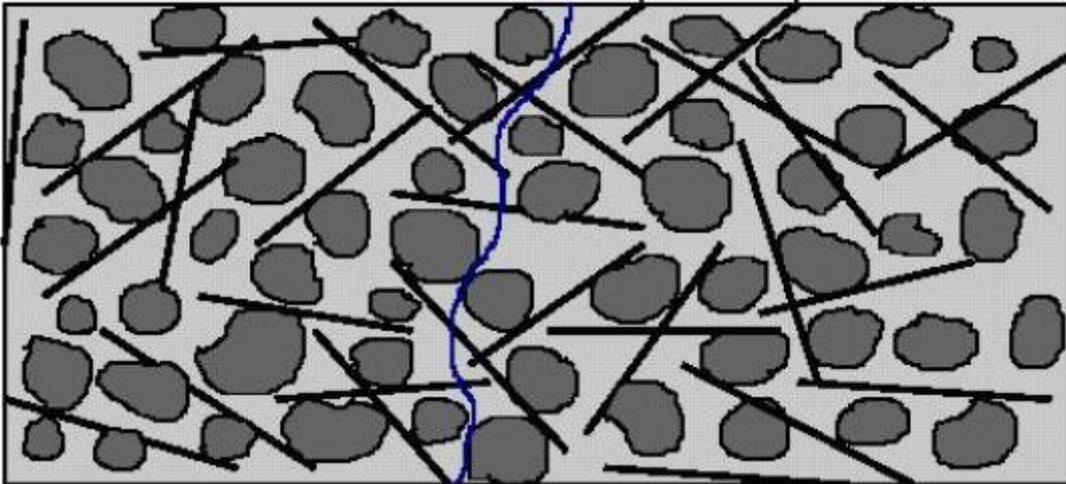
Oliveira (2005) comenta que a dimensão máxima do agregado graúdo tem uma grande influência para os CRF. Recomendam-se valores não maiores que 20 mm, sendo de preferência agregados não maiores que 10 mm, para não dificultar a distribuição uniforme das fibras. Em outras palavras, deve haver uma compatibilidade dimensional entre agregado e fibra de modo que essas possam interceptar com maior frequência as fissuras que se formam no concreto.

Figueiredo (2000) comenta que essa compatibilidade dimensional possibilita a atuação da fibra como um reforço no concreto e não apenas como um reforço da argamassa do concreto. Isso é importante pois a fratura se propaga preferencialmente na região de interface entre o agregado graúdo e a pasta de cimento, isso normalmente para concreto de baixa e média resistência mecânica.

A Figura 2.4 mostra um concreto que pode-se observar uma compatibilidade dimensional entre agregado e fibra, já Figura 2.5 essa relação não é verificada.

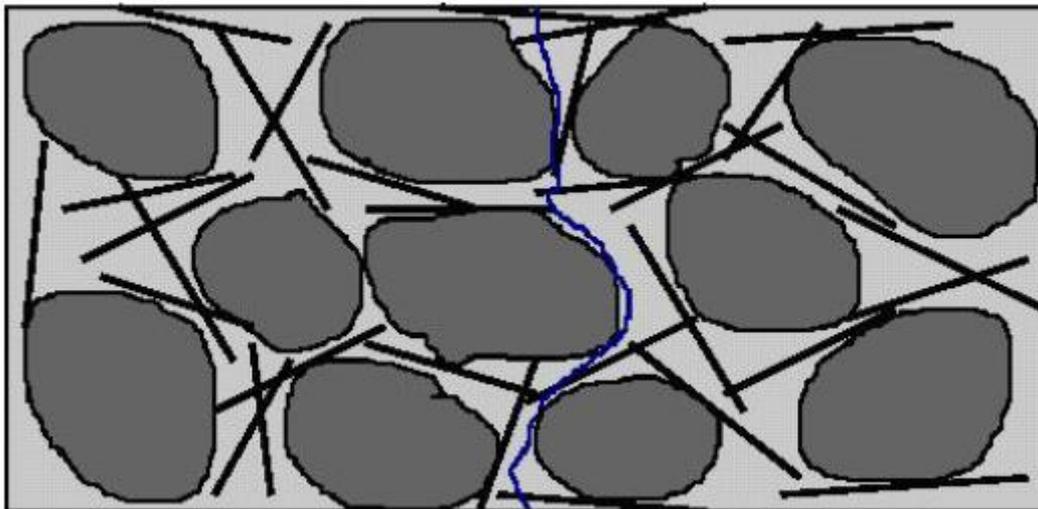
Percebe-se que quando não há compatibilidade, poucas fibras atuam como ponte de transferência de tensões. Normalmente como solução são empregadas duas maneiras para otimizar a mistura do concreto com as fibras: ou reduz a dimensão máxima do agregado ou se aumenta o comprimento da fibra.

Figura 2.4: Matriz onde observa-se compatibilidade dimensional entre agregado e fibra.



Fonte: Figueiredo (2000).

Figura 2.5: Matriz onde não observa-se a compatibilidade dimensional entre agregado e fibra.



Fonte: Figueiredo (2000).

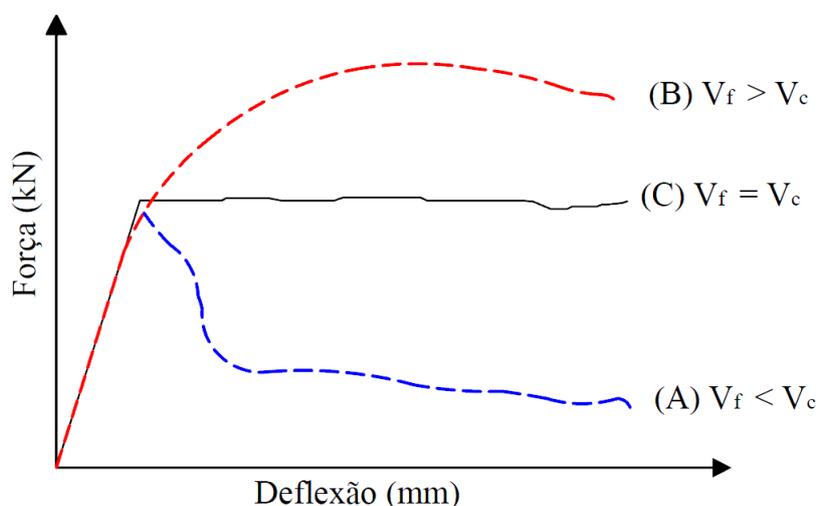
## 2.4.2 Volume Crítico de Fibras

A capacidade de reforço que as fibras podem proporcionar está diretamente ligada ao teor utilizado. Quanto maior o teor de fibras maior será o número de filamentos que pode transferir tensões através das fissuras e conferir uma maior capacidade portante pós-fissuração do concreto (FIGUEIREDO, 2011,b).

A definição do volume crítico de fibras é de corresponde ao teor que mantém a mesma capacidade portante para o compósito a partir da ruptura do concreto. Ou seja, abaixo do volume crítico no momento em que o concreto se rompe ocorre necessariamente uma queda na carga suportada pelo compósito. Acima do volume crítico, o compósito continua aceitando um nível de carregamento mesmo após a ruptura do concreto.

Tal fato pode ser entendido através da Figura 2.6 onde estão demonstradas as curvas de carga por deslocamento de corpos de prova prismáticos rompidos em ensaios de flexão. Repara-se que existe um trecho inicial reto, correspondente a fase elástica do concreto no seu estágio pré-fissuração. Na fase pós-fissuração as curvas se diferem para retratar o comportamento do CRF com teores abaixo, acima e igual ao volume crítico de fibras.

Figura 2.6: CRF em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão.

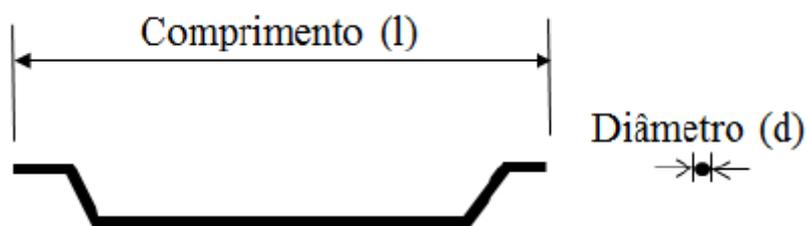


Fonte: Figueiredo (2000, p.14).

### 2.4.3 Fator de Forma

O fator de forma ( $l/d$ ) é a relação entre o comprimento ( $l$ ) e o diâmetro ( $d$ ) das fibras (Figura 2.7). Caso a fibra não possua uma seção transversal circular pode-se adotar um diâmetro equivalente. O fator de forma é um índice que retrata a eficiência da fibra na capacidade de melhorar a tenacidade do CRF e está ligando diretamente com a ancoragem da fibra ao concreto.

Figura 2.7: Representação do comprimento ( $l$ ) e o diâmetro ( $d$ ) utilizados no cálculo do fator de forma ( $l/d$ ).



Fonte: Vasconcelos (2012, p.15).

Em CRF recomenda-se um fator de forma com valores entre 80 a 120, dentro desses valores estipulados requisitos como: homogeneidade, trabalhabilidade e resistência do concreto são satisfatórias.

### 2.4.4 Interação entre fibra e concreto

Em CRF as tensões solicitadas ao material são resistidas em conjunto pelo concreto e pelas fibras, onde as forças existentes são transmitidas através de aderência entre os dois materiais. Segundo Oliveira (2005) um bom entendimento da interação entre as fibras e o concreto é necessário com o objetivo de estimar a contribuição da fibra e prever o comportamento do CRF.

Para avaliar melhor as tensões de aderência é fundamental conhecer a condição do concreto, neste caso considera-se o concreto na fase pré-fissuração e pós-fissuração, pois os efeitos são bem distintos (BENTUR e MINDESS, 1990).

Em um estado de pré-fissuração a transferência das tensões é de natureza elástica e as deformações nas suas interfaces são iguais, tanto para o concreto quanto

para a fibra. Em um estado pós-fissuração, ou seja, com maiores carregamentos ocorre a ruptura da aderência entre a fibra e o concreto, onde o processo de transferência passa a ser controlado por tensões de atrito. Nessa fase começa-se a observar deslocamentos longitudinais entre a fibra e o concreto.

Basicamente existem três diferentes tipos de aderência desenvolvida em CRF's: tensões de aderência por cisalhamento, tensões de aderência por tração e tensões de aderência mecânica (LOPES, 2005).

A aderência por cisalhamento em um estado pré-fissuração é dotado de uma componente físico-química de aderência e como já dito as tensões são de natureza elástica com deformação entre fibra e concreto compatíveis. Com o aumento da tensão de cisalhamento a aderência físico-química vai se esgotando, gerando uma decoesão entre fibra e concreto. A partir dessa tensão limite onde a ligação físico-química deixa de existir a componente principal de aderência por cisalhamento passa a ser à força de atrito. Em um estado pós-fissuração as tensões de cisalhamento desenvolvidas resistem ao arrancamento da fibra transferindo esse esforço para o concreto. Dessa forma, a tensão de aderência por cisalhamento acaba influenciando o mecanismo de ruptura do CRF, uma vez que permite que a tensão seja transferida de um lado a outra da fissura.

A aderência por tração resiste aos deslocamentos causados por forças que atuam perpendicularmente em relação à interface fibra-concreto. Esse efeito geralmente se dá pelas variações volumétricas e de carregamento bi ou tri-axiais e resultantes do efeito de Poisson. A determinação exata da aderência por tração em compósitos fibrosos é muito difícil e devido a isso sabe-se muito pouco sobre o tema (LOPES, 2005).

A aderência mecânica é resultado da ancoragem mecânica da fibra. Essa aderência pode ser melhorada utilizando fibras com ganchos nas extremidades, variação da seção transversal ou geometria das fibras, fazendo assim um incremento ao arrancamento das mesmas.

Bentur e Mindess (2007) comentam que a ligação fibra-concreto por aderência ou por atrito é relativamente fraca e somente é significativa em CRF's cujas fibras tenham uma alta área superficial ou em concretos com porosidade muito baixa (fator a/c menor que 0,30). Para concretos convencionais (fator de a/c na ordem 0,40 ou maior) a aderência mecânica é necessária.

Resumidamente, os fatores que mais influenciam nas propriedades do CRF são:

- a) Característica geométrica das fibras;
- b) Relação (L/d);
- c) Teor de fibras adicionadas ao concreto;
- d) Resistência mecânica das fibras;
- e) Tensão de aderência entre matriz e fibra;
- f) Dimensão máxima do agregado graúdo a ser utilizado na matriz
- g) Compatibilidade dimensional entre agregado graúdo e fibra

E os benefícios da adição de fibra ao concreto segundo Ferrari (2007) são os seguintes:

- a) Redução e atraso no aparecimento e crescimento das fissuras;
- b) Resistência à força de tração após a fissuração da matriz;
- c) Aumento da resistência à flexão;
- d) Aumento da resistência ao cisalhamento;
- e) Aumento resistência à fadiga sob ações cíclicas;
- f) Maior absorção de energia na fase pós-fissuração (tenacidade).

### 3 PROPRIEDADES DO CRF

#### 3.1 TRABALHABILIDADE

A principal propriedade do concreto no estado fresco é a sua trabalhabilidade, pois é onde se determina a facilidade no qual o mesmo pode ser manipulado com uma perda mínima na sua homogeneidade. Quando adiciona-se fibras ao concreto a tendência é alterar as condições de consistência, reduzindo assim a sua trabalhabilidade. Mehta e Monteiro (2008) comentam que independentemente do tipo de matriz cimentícia (concreto, argamassa, pasta de cimento), o volume de fibras e um fator de forma elevado influenciam diretamente essa propriedade.

Segundo Figueiredo (2005) o fato é explicado, pois ao se adicionar as fibras adiciona-se também uma grande área superficial demandando assim mais água de molhagem, resultando em um concreto mais coeso. O ACI 544.1R-96 (2000) sugere um limite máximo de 2% de adição de fibras em massa de concreto para que não se comprometa a trabalhabilidade da mistura.

Ceccato, Nunes e Figueiredo (1997) constataram em seus estudos que a adição até mesmo de baixos volumes de fibra altera as condições de trabalhabilidade da mistura. No entanto os mesmos autores comentam que essa redução não compromete necessariamente a compactação do material, após a realização do adensamento mecânico.

Existem alguns procedimentos que visam contornar a perda de trabalhabilidade do CRF, entre eles destaca-se o uso de aditivos superplastificantes e pozolanas (FURLAN JÚNIOR, 1995), o aumento da relação a/c com cuidados para que não haja segregação e resulte em um material poroso e com baixa resistência mecânica (LOPES, 2005), aumento no teor de argamassa da mistura e a adição de finos ao concreto.

Pereira, Ramos e Gomes (2005) ao avaliar o comportamento de um concreto auto adensável quanto a sua trabalhabilidade e capacidade de adensamento através dos ensaios de espalhamento, caixa L e funil V, comentam que a adição de fibras muda substancialmente a fluidez da mistura. No entanto os autores relatam que esse fato pode ser corrigido com o aumento no teor de argamassa da mistura à medida que são adicionadas mais fibras.

Oliveira (2018) ao realizar o estudo de um concreto reforçado com micro e macrofibra de polipropileno (PP) notou uma grande perda de trabalhabilidade da mistura, comprometendo a moldagem de corpos de prova que possuíam teores mais altos de fibras. Normalmente as fibras com um diâmetro menores resultando em um fator de forma mais elevado, como o caso da microfibra de PP, acabam prejudicando ainda mais a consistência da mistura.

Outra situação indesejada no manuseio do CRF no estado fresco é o aparecimento dos chamados “ouriços”. Os ouriços são aglomerados de fibras que tendem a embolar, conforme mostra a Figura 3.1. Caso se incorpore esses ouriços ao concreto vai gerar uma redução no teor de fibra homogeneamente distribuído, bem como uma região enfraquecida, com uma porosidade alta comprometendo assim as propriedades mecânicas no estado endurecido.

Figura 3.1: Formação de ouriços em CRF.



Fonte: PINI (2011).

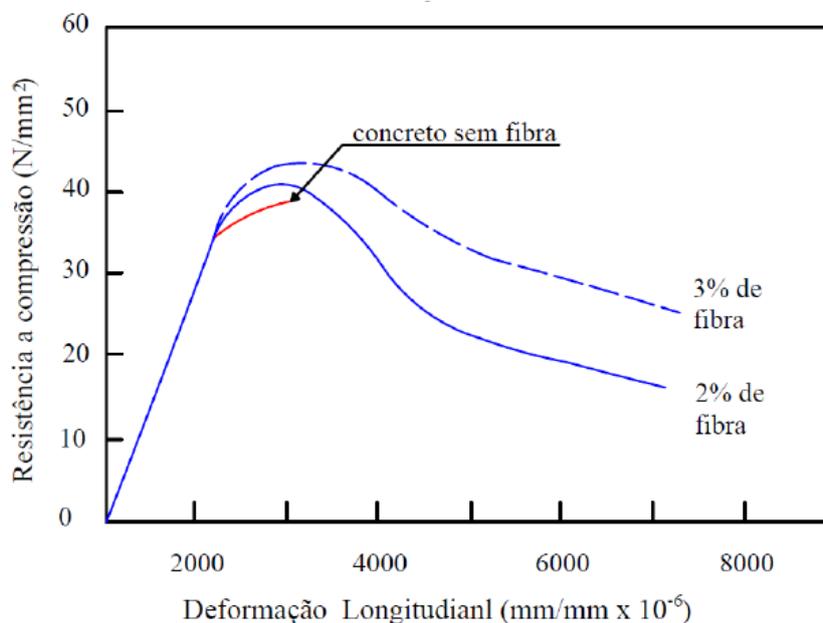
A principal causa na formação dos ouriços está associada à mistura inadequada do material. O lançamento das fibras de forma descuidada à betoneira promove um risco muito maior no aparecimento desse problema. Devido a isso recomenda-se que sejam lançadas taxas de fibras de forma gradual juntamente com os agregados, homogeneizando assim a mistura antes de seu lançamento.

### 3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O comportamento do concreto à compressão ao se adicionar fibras ainda não é um consenso. Em alguns casos não se obtém ganhos consideráveis de resistências e em outros se observa até uma diminuição desses valores, justificado por uma má compactação do material (FIGUEIREDO, 2000). No entanto sabe-se que a adição de fibras ao concreto não tem como objetivo alterar a resistência à compressão do mesmo, sendo uma propriedade secundária para caracterização do CRF.

Segundo recomendações do ACI 544.1R-96 (2000) para teores de fibras de até 1,5% em volume os ganhos de resistência chegam ao máximo 15%. Em alguns casos, onde se utiliza volumes superiores de fibras, até pode resultar em ganhos substanciais de resistência (Figura 3.2). Porém, podem ocorrer danos na estrutura do concreto resultando assim em decréscimos de resistência. Porém quando ocorre uma otimização entre concreto e fibra com um bom empacotamento da mistura e vibração apropriada o aumento da resistência pode ser observado, até para altos volumes de fibras.

Figura 3.2: Aumento da resistência à compressão com o aumento no teor de fibras.



Fonte: Bentur e Mindess (1990).

Soe et. al. (2013) ao avaliar a resistência à compressão de um concreto com adição de fibra de PVA e aço para mistura de 1,5 PVA + 0,5% aço e outra com 1,75% PVA + 0,58% aço concluíram que não houve ganhos significativos de resistência, onde os valores encontrados para cada mistura foram de 67 MPa e 69 MPa, respectivamente. Nesse caso observa-se que o aumento no teor de fibras gerou um pequeno aumento na resistência à compressão, possivelmente provocada pela boa compactação do material.

Pereira, Ramos e Gomes (2005) avaliaram a adição de fibras de aço em concretos auto adensáveis. Nesse caso foram utilizadas fibras com 30 e 60 mm de comprimento a volumes de 0,5%, 1,0% e 1,5%. Referente à resistência à compressão não se verificou uma alteração significativa nos valores, onde o maior foi de 29,6 MPa para a fibra de 60 mm e teor de 1,5% e o menor foi de 26 MPa para fibra de 30 mm e teor de 1,5%. Ou seja, o valor da resistência à compressão nesse caso não foi afetada pelo aumento no teor de fibras e nem pelo aumento no comprimento das mesmas.

Já Arif e Santos (2014) ao avaliar um CRF com fibras de aço para duas classes de resistência do concreto (30 e 40 MPa) com volume de 30 e 60 kg/m<sup>3</sup> de fibras relataram aumento na resistência à compressão em todos os casos avaliados. Destaque para o CRF com 30 MPa que, sem adição de fibras obteve uma resistência de 31,96 MPa, ao adicionar 60 kg/m<sup>3</sup> esse valor aumentou para 40,98 MPa, um aumento de aproximadamente 22%. Nesse caso nota-se que o volume de fibras inseridos é baixo, portando os danos na estrutura do concreto são mínimos, não comprometendo a sua resistência.

Cáceres, Figueiredo e Monte (2013) adicionaram ao concreto um conteúdo híbrido de fibras entre fibra de aço e fibra de PP. Os autores alcançaram valores de resistência à compressão superior a aqueles reforçados com apenas um dos tipos de fibra, com valores ligeiramente superiores. Pakravan et. al. (2017) comenta que para as fibras de PP a diminuição da resistência à compressão se dá pela baixa capacidade de interação com o concreto, resultando assim em resultados menores.

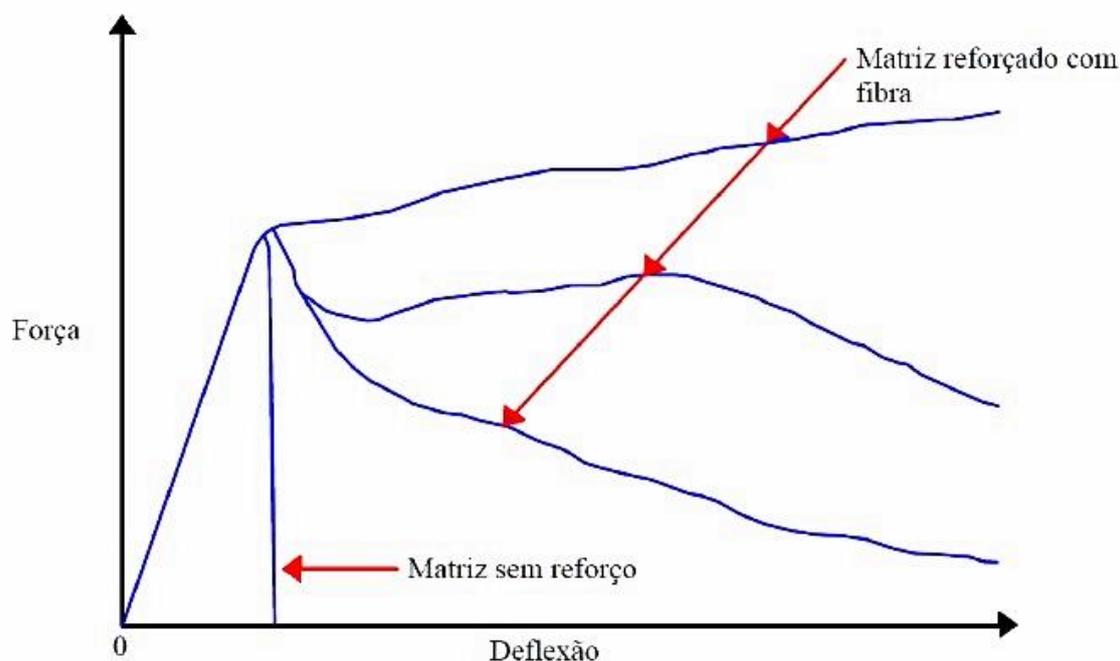
### 3.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Diferente da compressão e tração axial onde a influência das fibras no concreto não altera significativamente a sua resistência, para a tração na flexão esses ganhos

são muitos superiores, chegando a alguns casos em valores 100% superiores ao observado para os concretos simples.

Esse aumento pode ser explicado pela mudança do tipo de ruptura do material. Em concretos simples quando solicitado à tração na flexão a sua ruptura é do tipo frágil, ou seja, rompe após o aparecimento da primeira fissura. A adição de fibras contribui para que se alcance um comportamento mais dúctil, também chamado de pseudo-dúctil e tem sua ação potencializada no regime pós-fissuração conforme mostra a Figura 3.3.

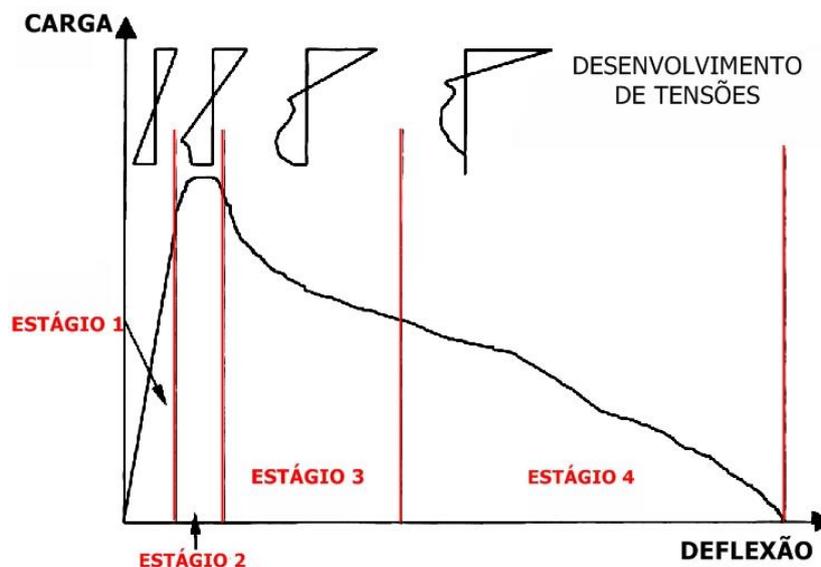
Figura 3.3: Comportamento do concreto submetido à flexão com diferentes adições de fibras



Fonte: Arif (2014, p.41).

Quatro diferentes estágios podem ser observados em CRF conforme mostra a Figura 3.4.

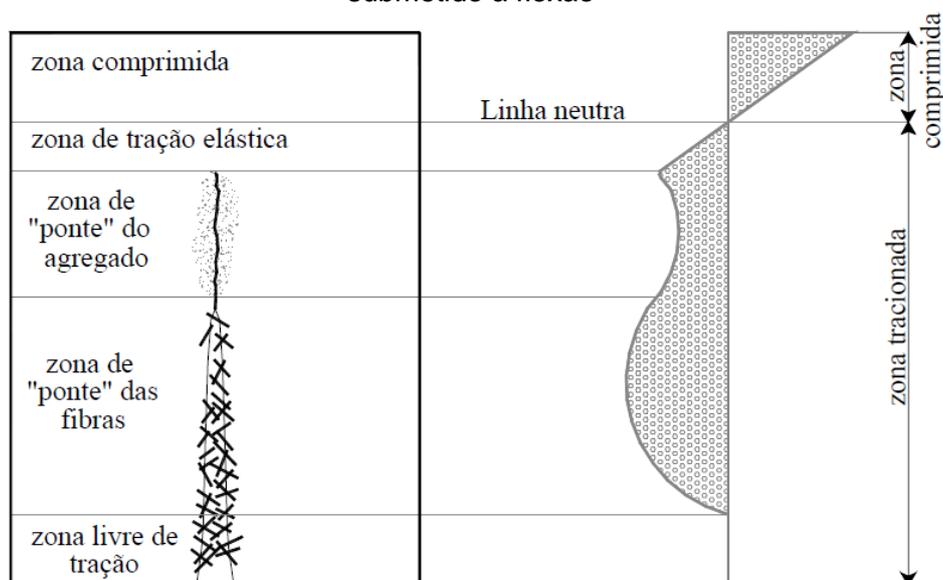
Figura 3.4: Desenvolvimento de tensões em uma curva carga x deflexão para uma viga reforçada com fibras.



Fonte: Robins et. al (1999).

- Estágio 1: corresponde ao estágio não fissurado, ou seja, o comportamento ainda é elástico linear com tensão e deformação compatíveis entre concreto e fibra;
- Estágio 2: A tensão máxima de tração é alcançada pelo concreto causando assim o aparecimento das microfissuras. Em casos de concreto simples essas microfissuras se propagam até o aparecimento de uma microfissura e ocorre a sua ruptura. Com a adição das fibras a microfissuração é restringida, conferindo assim um estado de ductilidade ao material até o aparecimento da primeira microfissura e provocando o arrancamento das fibras;
- Estágio 3: Ocorre a propagação das microfissuras até atingir grande parte do corpo de prova, causando assim o arrancamento das fibras;
- Estágio 4: As fibras são totalmente arrancadas ou rompidas, ocorrendo, finalmente a ruptura do corpo de prova em uma zona livre de tração na face tracionada (Figura 3.5).

Figura 3.5: Esquema de uma viga prismática de concreto reforçado com fibras submetido à flexão



Fonte: Ferrari (2007).

Pereira, Ramos e Gomes (2005) avaliaram o comportamento da tração à flexão em concreto auto adensável reforçados com fibras de aço utilizando o ensaio recomendado pela RILEM TC 162-TF. Os autores utilizaram fibras com 30 e 60 mm de comprimento em teores de 0,5%, 1,0% e 1,5%. Como resultado da tensão de ruptura os autores observaram, para a fibra de 30 mm, ganhos de tensão superior a 100% (passando de 3,65 MPa para 7,5 MPa). Para as fibras de 60 mm o aumento foi ainda mais expressivos, chegando a 330% (passando de 2,11 MPa para 9,23 MPa).

Já Cáceres, Figueiredo e Monte (2013) utilizaram como norma para avaliar o CRF a EM 14651 (2007). Os autores utilizaram CRF com fibras de aço, fibras de PP e um terceiro conteúdo híbrido entre as duas fibras. Os autores comentam que as duas fobras atuam em duas fases distintas na fase pó-fissuração. A fibra de aço é mais solicitada para baixos níveis de deslocamento, ao aumentar o deslocamento houve uma tendência de diminuição da tensão, também conhecido como *slip softening*. As fibras de PP resultaram em uma maior capacidade de absorção de energia para deslocamentos maiores. Ou seja, o conceito de hibridização pode ser promissor, já que as duas fibras atuam em duas fases distintas no comportamento pós-fissuração.

### 3.4 TENACIDADE À FLEXÃO

A tenacidade é definida como a capacidade de absorção de energia do concreto, sendo uma das principais razões de se utilizar fibras para o reforço do mesmo. Essa propriedade é determinada através da área sob a curva carga *versus* deslocamento medido em ensaios de flexão. Essa área diz representa ao trabalho dissipado durante a deformação do corpo de prova até um determinado nível de deslocamento vertical.

Os principais fatores que afetam a curva carga-deslocamento e consequentemente a tenacidade do CRF são: tipo e volume de fibras adotado, composição do concreto, tamanho do corpo de prova, tipo e taxa de carregamento e a precisão na medição dos deslocamentos.

Um exemplo disso pode ser verificado no trabalho de Soe et. al. (2013) onde os resultados obtidos para a tenacidade foram diretamente proporcionais ao volume de fibra inserido. Houve um aumento de 82% na tenacidade do CRF com 1,75% PVA + 0,58% em relação à mistura que continha 1,5% PVA + 0,5% aço.

Já Arif e Santos (2014) relatam que a tenacidade teve ligação direta com o aumento no teor de fibras e o aumento da classe de resistência do concreto. Os valores obtidos para a tenacidade para o CRF com 40 MPa de resistência e 60 kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço foram 107% superiores em comparação ao CRF com 30 MPa de resistência e 30 kg/m<sup>3</sup> de fibras. Vale salientar que os autores utilizaram três diferentes normas para o ensaio (JSCE – SF4, ASTM C1609 e EN 14651) conferindo assim uma maior veracidade nos resultados obtidos.

### 3.5 ENSAIOS NORMALIZADOS PARA FLEXÃO

Mindess, Young e Darwin (2003) comentam que os parâmetros de avaliação da tenacidade e da resistência residual para CRF devem satisfazer alguns critérios, entre eles destacam-se:

- a) O ensaio realizado deve conter um significado físico para que possa ser utilizado para especificação ou controle de qualidade do CRF;

- b) O deslocamento utilizado para o ensaio na determinação da tenacidade deve refletir as condições de serviço mais extremas para determinada aplicação;
- c) O grau de variabilidade nas medidas das propriedades do concreto deve ser baixa o suficiente para proporcionar níveis aceitáveis de precisão entre diferentes corpos de prova de um mesmo grupo;
- d) As características da curva carga-deslocamento devem refletir o comportamento do CRF;
- e) Os ensaios normatizados devem ser independentes do tamanho e da geometria do corpo de prova.

Diferentes ensaios foram desenvolvidos para quantificar as propriedades à flexão dos CRF, com destaque para: ASTM C1609 (2010), JSCE-SF4 (1984), EN 14651 (2007), ACI 544.1R-96 (1997) e RILEM 2000a onde os mesmos mostram diferentes formulações que acabam gerando diferentes graus de desempenho ao material (RIBEIRO et. al., 2015).

Abaixo são comentados resumidamente alguns dos ensaios mais utilizados para caracterização do CRF à flexão. Informações como procedimento de ensaio, características dos corpos de prova e resultado serão comentados.

### 3.5.1 JSCE SF4 (1984) - Método de ensaio de resistência e tenacidade à flexão de concreto reforçado com fibras de aço

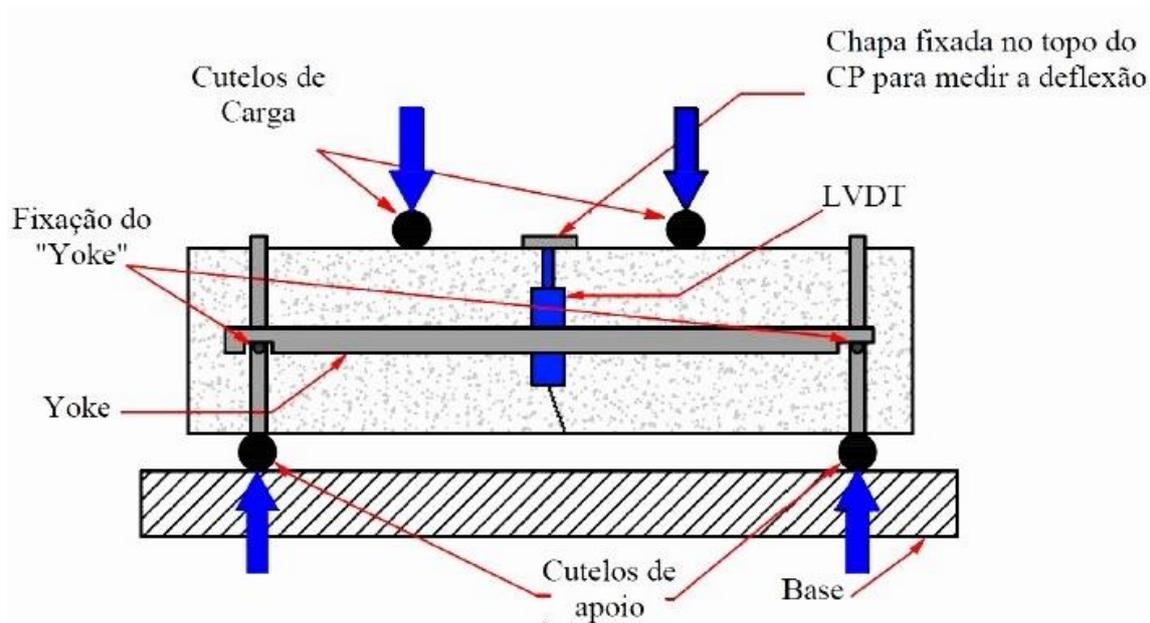
Esse foi o primeiro ensaio desenvolvido com o objetivo de descrever um ensaio para caracterizar o CRF em relação à flexão, principalmente com o objetivo de avaliar a sua tenacidade.

Para os corpos de prova recomenda-se que os mesmos sejam prismáticos, sem a presença de entalhe com dimensão de 100x100x350 (mm) ou 150x150x450 (mm), com vão de 300 e 450 mm, respectivamente. A varável de controle para realização do ensaio é o deslocamento vertical do pistão da prensa.

O suporte para o apoio dos corpos de prova e o suporte para aplicação de carga contêm dois cutelos cilíndricos, que possuem rotação livre sobre seus eixos.

São necessários dois LVDT's para leitura do deslocamento vertical do corpo de prova, centralizado em cada face lateral do prisma, utilizando um dispositivo chamado *yoke* conforme mostra a Figura 3.6.

Figura 3.6: Esquema de ensaio conforme o recomendado pela JSCE SF4 (1984).



Fonte: Arif (2014, p.49).

O carregamento é realizado até que o deslocamento vertical seja de  $L/150$  seja atingido. O rompimento deve ocorrer no terço central, se ocorrer fora dessa região o corpo de prova deve ser descartado.

A partir da curva carga-deslocamento, a norma japonesa, recomenda a determinação de duas propriedades mecânicas: tração na flexão e a tenacidade que representa a absorção de energia pelo CP.

Mesmo sendo de fácil realização e aplicável a diversos casos, esse ensaio possui algumas limitações, entre elas:

- a) A tenacidade é dependente das dimensões do corpo de prova (BENTUR; MINDESS, 2007);
- b) Os parâmetros de tenacidade não distinguem a fase pré e pós-pico, sendo assim, diferentes curvas carga-deslocamento podem gerar o mesmo resultado em relação a tenacidade (BENTUR; MINDESS, 2007);

- c) O comportamento imediatamente após a formação da primeira fissura não é indicado no fator de tenacidade (BANTHIA; MINDESS, 2004).

### 3.5.2 ASTM C1609 (2010) – Método padrão para avaliar o desempenho à flexão do concreto reforçado com fibra.

Este método é um aperfeiçoamento do método japonês. Onde são utilizadas as mesmas configurações de ensaio e as mesmas dimensões do corpo de prova. A curva obtida também relaciona a carga com o deslocamento vertical obtido através dos LVDT's fixado em um sistema *yoke*.

Entretanto sua realização requer um equipamento dotado de um sistema fechado de controle de velocidade de deslocamento. Diferente do método japonês que a variável de controle é o deslocamento do pista, nesse caso o controle é realizado através do deslocamento do corpo de prova. Tal alteração, segundo Bernard (2009), faz com que os resultados obtidos tendem a ser mais confiáveis que àqueles obtidos pelo método japonês.

A velocidade de carregamento nesse caso é dividida em duas etapas: a primeira, entre o deslocamento de 0 – L/600 utiliza-se uma velocidade de deslocamento vertical de 0,06 a 0,12 mm/min. Na segunda etapa, compreendida entre o deslocamento de L/600 até L/150 a velocidade pode variar de 0,06 a 0,24 mm/min. A primeira etapa é mais lenta pois compreende uma fase crítica na realização do ensaio, momento em que as tensões passam a ser resistidas pelas fibras, podendo gerar uma instabilidade pós-pico. Na segunda etapa o ensaio pode ser mais rápido, pois nessa fase pós-fissuração não há ocorrência de grandes instabilidades que possam comprometer o resultado e o ensaio em si.

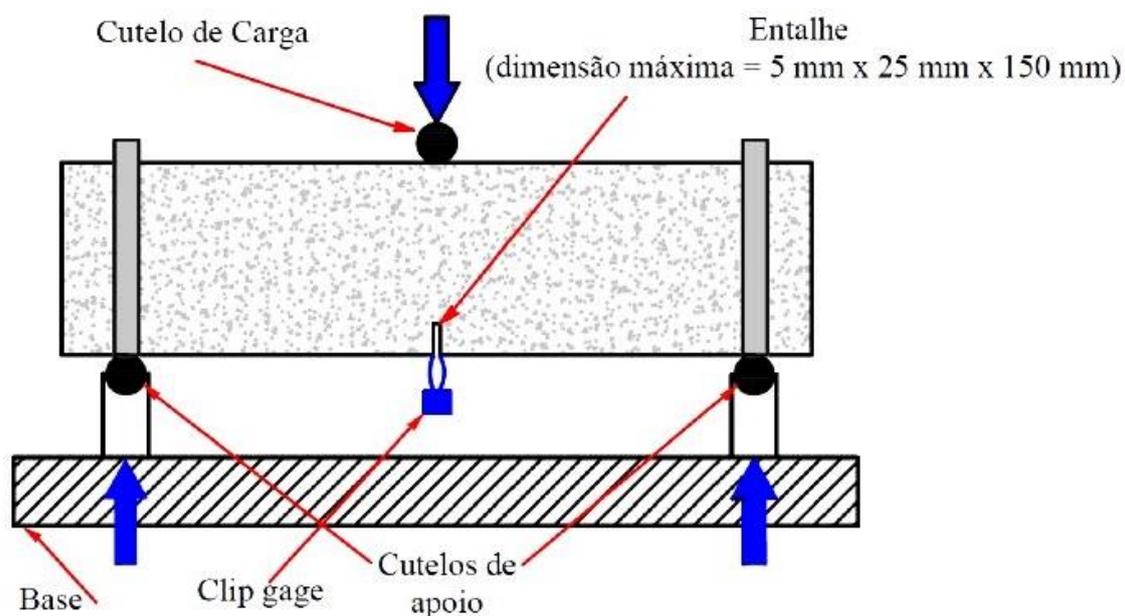
A curva carga-deslocamento é avaliada segundo a obtenção das cargas residuais ( $P_{d,L/600}$  e  $P_{d,L/150}$ ) utilizada para calcular as respectivas resistências residuais ( $f_{d,L/600}$  e  $f_{d,L/150}$ ) quando o deslocamento do corpo de prova for L/600 e L/150 respectivamente. Nesse caso, em termos de projeto, a resistência obtida para o deslocamento de L/600 está relacionada com o Estado Limite de Serviço (ELS) e para o deslocamento de L/150 com o Estado Limite Ultimo (ELU).

### 3.5.3 EN 14651 (2007) - Método de ensaio para o concreto reforçado com fibras metálicas - Determinação da resistência à tração por flexão (limite de proporcionalidade e resistência residual)

A princípio o método da EN 14651 (2007) avalia o comportamento do concreto reforçado com fibras através das áreas sob a curva carga-abertura de fissuras em um corpo de prova prismático. O ensaio é realizado com adoção de três cutelos (ensaio de três pontos) com um entalhe no sentido vertical do corpo de prova retornando o limite de proporcionalidade e mais quatro diferentes parâmetros, sendo eles as resistências equivalentes e resistências residuais à flexão medidos em pontos específicos.

O corpo de prova para ensaio trata-se de um bloco prismático com 150 x 150 x 550 (mm) dotado de um entalhe no meio do vão com uma largura de 5 mm e altura de 25 mm conforme mostra a Figura 3.7. A adoção do entalhe no meio do vão do corpo de prova visa forçar a abertura de fissura nesse ponto, onde toda a energia dissipada pode ser atribuída gerando assim uma menor dispersão de resultados.

Figura 3.7: Esquema de ensaio conforme o recomendado pela EN 14651 (2007).



Fonte: Arif (2014, p.54).

Não recomenda-se sua utilização em concretos com fibras maiores que 60 mm e agregados graúdos com seu diâmetro máximo maior que 32 mm.

Com base na curva gerada entre carga e abertura de fissura são obtidos os seguintes parâmetros: resistência residual à flexão onde os valores representam a tensão para um deslocamento de  $\delta_{R,1} = 0,50 \text{ mm}$ ,  $\delta_{R,2} = 1,5 \text{ mm}$ ,  $\delta_{R,1} = 2,5 \text{ mm}$  e  $\delta_{R,1} = 3,5 \text{ mm}$  e a tensão no limite de proporcionalidade, dada pela maior carga encontrada no intervalo de deslocamento entre 0 e 0,05 mm. Essa última retrata o comportamento da matriz pré-fissuração.

## 4 MATERIAIS UTILIZADOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo trata dos procedimentos adotados para investigar o comportamento no estado fresco e endurecido do CRF com hibridização entre aço e PP. Para o estado fresco desenvolveu-se o ensaio de abatimento do tronco de cone para avaliar as alterações na consistência das misturas contendo as fibras. No estado endurecido o estudo consistiu em avaliar as propriedades mecânicas do CRF através de ensaios de compressão axial, módulo de elasticidade estático e dinâmico, e determinação da resistência tração na flexão e da tenacidade proposto pela norma japonesa JSCE-SF4. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas do Departamento da Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para moldagem dos corpos de prova cilíndricos de concreto foi obedecido às recomendações da ABNT NBR 5738 (2015), e para os corpos de prova prismáticos, de acordo com a norma JSCE-SF4 (1984).

#### 4.1.1 Cimento Portland

Para a produção dos CRF foi utilizado o cimento CP II Z 32, fabricado pela empresa Votorantim Cimento LTDA. As propriedades físicas e mecânicas, segundo informações do fabricante, estão mostradas na Tabela 4.1.

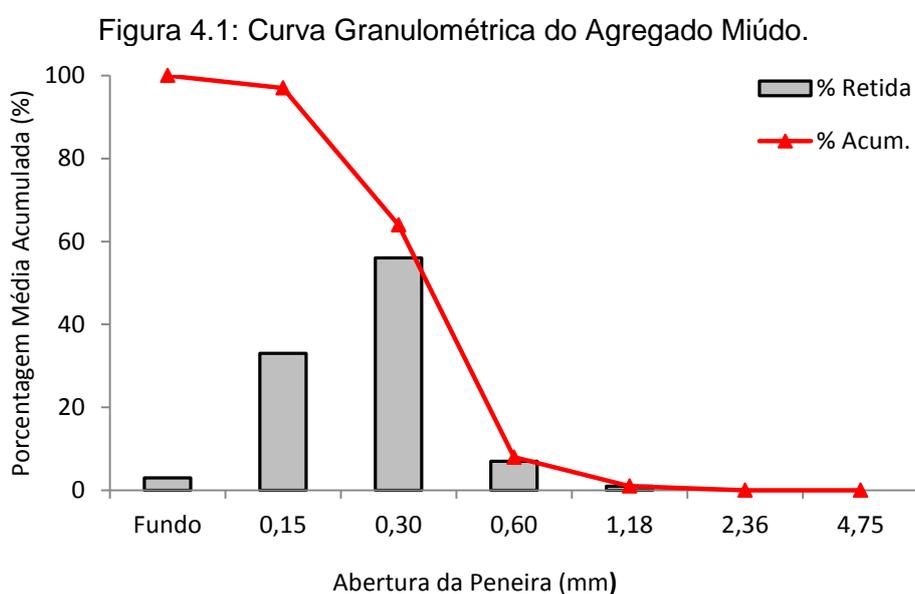
Tabela 4.1: Característica do cimento.

<b>Parâmetro</b>	<b>CP II Z 32</b>
Tempo de início de pega (h)	> 1
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	3,1
Material pozzolânico (%)	6 - 14
Resistência à compressão a 3 dias (MPa)	> 10
Resistência à compressão a 7 dias (MPa)	> 20
Resistência à compressão a 28 dias (MPa)	> 32

Fonte: Votoram (2019).

#### 4.1.2 Agregado Miúdo

Foi utilizado como agregado miúdo uma areia natural fina proveniente da região de Maringá (PR). A caracterização granulométrica, entre elas a determinação da dimensão máxima característica e módulo de finura foram realizadas conforme ABNT NBR NM 248 (2003), massa específica conforme a ABNT NBR NM 52 (2009) e massa unitária conforme ABNT NBR NM 45 (2006). A curva granulométrica é mostrada na Figura 4.1 e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.2.



Fonte: Autor (2019).

Tabela 4.2: Caracterização Granulométrica do Agregado Miúdo.

# (mm)	Amostra 1			Amostra 2			Média
	Massa (g)	% Retida	% Acum.	Massa (g)	% Retida	% Acum.	% Acum.
4,75	0	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,00
2,36	0,71	0,2	0,2	0,72	0,24	0,24	0,24
1,18	2,71	0,9	1,1	2,8	0,94	1,18	1,16
0,6	20,95	7,0	8,1	22,08	7,38	8,55	8,35
0,3	167,37	55,9	64,1	166,68	55,70	64,25	64,16
0,15	101,07	33,8	97,8	93,45	31,23	95,48	96,66
Fundo	6,44	2,2	100,0	13,53	4,52	100,00	100,00
<b>TOTAL</b>	299,25	100,0		299,26	100,00		
<b>Dimensão Máxima Característica (mm)</b>							1,18
<b>Módulo de Finura</b>							1,71
<b>Massa Específica (g/cm³)</b>							2,64

#### 4.1.3 Agregado Graúdo

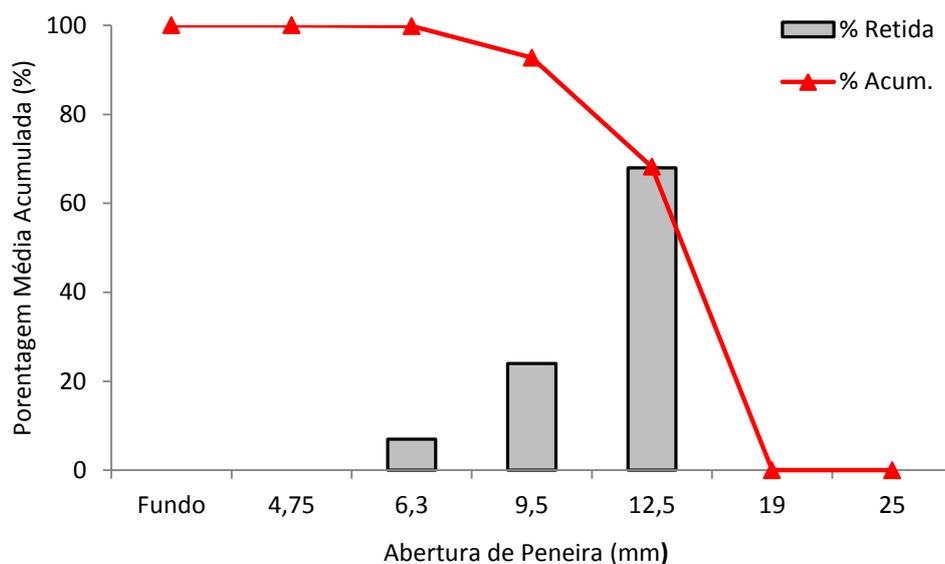
Como agregado graúdo foi utilizado brita número 1 de basalto proveniente da região de Maringá (PR). O material foi caracterizado quanto sua granulometria, com a determinação de seu diâmetro máximo característico e módulo de finura conforme ABNT NBR NM 248 (2003). Foi determinada sua massa específica conforme ABNT NBR NM 53 (2009) e a massa unitária no estado solto conforme ABNT NBR NM 45 (2006). A curva granulométrica é mostrada na Figura 4.2 e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Caracterização do Agregado Graúdo.

# (mm)	Amostra 1			Amostra 2			Média
	Massa (g)	% Retida	% Acum.	Massa (g)	% Retida	% Acum.	% Acum.
25	0	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,00
19	0	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,00
12,5	1751,78	70,2	70,2	1655,46	66,22	66,22	68,23
9,5	596,12	23,9	94,1	627,14	25,09	91,30	92,72
6,3	143,91	5,8	99,9	210,65	8,43	99,73	99,82
4,75	0,88	0,0	99,9	5,09	0,20	99,93	99,94
Fundo	1,27	0,1	100,0	1,71	0,07	100,00	100,00
TOTAL	2493,96	100,0		2500,05	100,00		
<b>Dimensão Máxima Característica (mm)</b>							19
<b>Módulo de Finura</b>							1,93
<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>							2,77
<b>Massa Unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>							1,48

Fonte: Autor (2019).

Figura 4.2: Curva Granulométrica do Agregado Graúdo.



Fonte: Autor (2019).

#### 4.1.4 Aditivo Superplastificante

Foi utilizado o aditivo superplastificante Glenium 51 com o objetivo de garantir a trabalhabilidade adequada do CRF (*slump*) no estado fresco. As informações técnicas do produto segundo o fabricante BASF estão mostradas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Informações Técnicas do Superplastificante.

Característica	GLENIUM 51
Dosagem	0,2 a 1,0% sobre peso de cimento
Aspecto	Líquido
Cor	Branco turvo
pH	Entre 5 a 7
Densidade	Entre 1,067 a 1,107 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: BASF (2016).

#### 4.1.5 Fibras

Foram utilizados três tipos distintos de fibras, uma de aço e duas de polipropileno. As fibras de aço Wirand® (Figura 4.3a) e as microfibras de PP FibroMac® (Figura 4.3b) foram disponibilizadas pela empresa Maccaferri. Já as

macrofibras de PP FF54 PRO (Figura 4.3c) foram obtidas junto a empresa Construquímica. As informações técnicas das fibras, segundo os fabricantes, estão indicadas na Tabela 4.5.

As microfibras com comprimento de 12 mm são as mesmas utilizadas por Oliveira (2018) e Qian e Stroeven (1999). As microfibras com comprimento de 54 mm foram utilizadas nas pesquisas de Salvador (2013), Cáceres (2016) Monte et. al. (2014) e Escariz (2012).

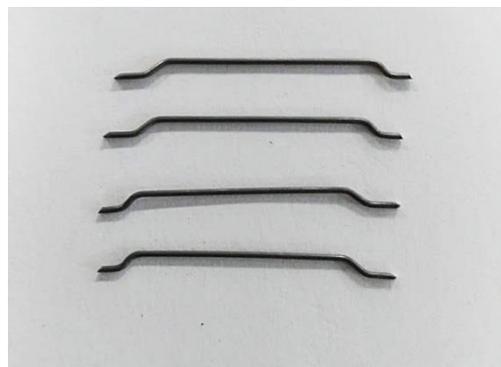
A macrofibra foi fornecida na forma de feixes para facilitar o procedimento de mistura do CRF e evitar a formação de embolamentos das fibras.

Tabela 4.5: Caracterização das fibras utilizadas

Propriedade	Fibra de Aço	Microfibra	Macrofibra
Material	Aço	Polipropileno	Polipropileno
Forma	Tipo A1	Multifilamentos	Mult. Retorcidos
Número de fibras por kg	11308	360000000	330000
Comprimento (mm)	25	12	54
Diâmetro (mm)	0,75	-	0,018
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	7,86	0,91	0,91
Resistência à tração (MPa)	>1100	300	700 - 750
Módulo de Elasticidade (GPa)	210	3	9

Fonte: Catálogo de Maccaferri (2019) e Construquímica (2019).

Figura 4.3: a) Fibra de aço. b) Microfibra de PP. c) Macrofibra de PP.



(a)



Fonte: Autor (2019).

#### 4.1.6 Dosagem do concreto

A matriz dos CRF é de um concreto de resistência normal dosado para atingir 30 MPa aos 28 dias de idade. Para isso utilizou-se um traço de referência à pesquisa de Vasconcelos (2012).

O traço adotado e o consumo de materiais estão indicados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Traço de referência e consumo dos materiais.

	<b>Cimento CP II Z</b>	<b>Areia</b>	<b>Brita</b>	<b>Água</b>
Traço em massa	1	1,85	2,77	0,55
Consumo por m <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	388,44	718,61	1075,97	213,64
Consumo total dos materiais (kg)	516,17	955,8	1431,2	284,2

Fonte: Autor (2019).

Para estudar o comportamento do CRF foram realizadas adições de fibras de aço, microfibra e macrofibra de PP à matriz de concreto conforme os teores indicados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Tipo e teor de fibras dos CRF's.

GRUPOS	CRF	Tipo e teor* de fibras		
		Aço	MIPP	MAPP
1	CRF0	0,0%	0,0%	0,0%
2	CRF2	1,0%	0,0%	0,0%
3	CRF3.1	1,0%	0,2%	0,0%
	CRF3.2	1,0%	0,3%	
	CRF3.3	1,0%	0,4%	
4	CRF4.1	1,0%	0,0%	0,3%
	CRF4.2	1,0%		0,4%
	CRF4.3	1,0%		0,5%
5	CRF5.1	1,0%	0,2%	0,3%
	CRF5.2	1,0%		0,4%
	CRF5.3	1,0%		0,5%
6	CRF6.1	1,0%	0,3%	0,3%
	CRF6.2	1,0%		0,4%
	CRF6.3	1,0%		0,5%
7	CRF7.1	1,0%	0,4%	0,3%
	CRF7.2	1,0%		0,4%
	CRF7.3	1,0%		0,5%
* Em relação ao volume do CRF.				
MIPP - microfibra de PP				
MAPP - macrofibra de PP				

Fonte: Autor (2019).

O grupo 1 (CRF0) é o de referência, sem fibras, para o estabelecimento de comparações e verificação do efeito das fibras sobre a matriz de concreto. O grupo 2 (CRF2) foi idealizado para a obtenção do desempenho do CRF contendo apenas a adição de fibras de aço. O volume de 1% de fibras de aço é convencional, não prejudica a trabalhabilidade de maneira significativa e já comprovada em pesquisas (Ferrari et. al, 2013; Carnio 2017) como sendo àquele que proporciona aumento da resistência à flexão e melhora da tenacidade de uma matriz de concreto comum.

O grupo 3 (CRF3.1, CRF3.2 e CRF3.3) foi idealizado para verificar a influência da adição de microfibras de PP quando trabalhando em conjunto com as fibras de aço.

No grupo 4 (CRF4.1, CRF4.2 e CRF4.3), tem-se a mesma intenção do grupo 3, porém agora considerando-se macrofibras de PP em conjunto com as fibras de aço.

Com o grupo 5 (CRF5.1, CRF5.2 e CRF5.3), grupo 6 (CRF6.1, CRF6.2 e CRF6.3) e grupo 7 (CRF7.1, CRF7.2 e CRF7.3) buscou-se avaliar o efeito das fibras de PP, macro e micro, em conjunto com as fibras de aço. Para tanto, nesses grupos a taxa de MIPP foi de, respectivamente, 0,2; 0,3 e 0,4% e a de MAPP foi variando-se de 0,3; 0,4 e 0,5% dentro de cada um desses grupos.

#### 4.2 MOLDAGEM DO CRF

A moldagem dos concretos de cada grupo foi realizada seguindo-se a metodologia indicada na ABNT NBR 12655 (2006). Para tanto, utilizou-se uma betoneira elétrica com capacidade de 600 litros para produção de cada grupo.

Para avaliar a consistência do CRF, foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone, também conhecido como *slump test*, segundo a ABNT NBR NM 67 (1998). Foi considerado como referência o valor de *slump* de  $140 \pm 20$  mm por representar um concreto com boa fluidez e capacidade de adensamento.

A moldagem do CRF de cada grupo foi realizada conforme as seguintes etapas:

- a) Imprimação da betoneira;
- b) Adição do cimento, agregado graúdo e metade da quantidade de água, seguida por mistura por cerca de dois minutos;
- c) Adição do agregado miúdo e o restante da quantidade de água, seguido pela mistura por mais cinco minutos;
- d) Adição gradativa das fibras com a betoneira em movimento, tendo-se o cuidado de evitar o embolamento das fibras e a formação de “ouriços” no concreto;
- e) Execução do ensaio de *slump test* para avaliar a consistência do concreto no intervalo do limite estabelecido de  $140 \pm 20$  mm;
- f) No caso do resultado do valor do slump não atender ao intervalo estabelecido o concreto era novamente misturado agora com a adição de aditivo superplastificante, em taxa equivalente a 0,1% do peso de cimento. O ensaio do *slump test* era novamente realizado até a obtenção de uma mistura com valor de abatimento dentro do intervalo especificado;
- g) Por fim a massa específica do concreto foi obtida.

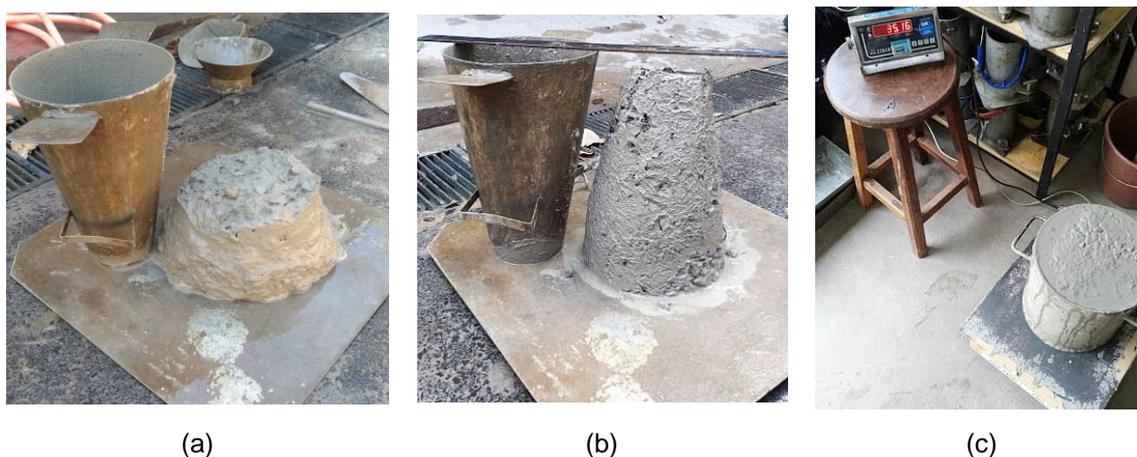
A Figura 4.4 e Figura 4.5 mostra o processo de produção e caracterização do concreto no estado fresco.

Figura 4.4: a) Volume de materiais separados para um traço. b) Aspecto do concreto na betoneira.



Fonte: Autor (2019).

Figura 4.5: a) *Slump test* do concreto referência. b) *Slump test* do CRF. c) Determinação da massa específica.



Fonte: Autor (2019).

Para cada grupo foram moldados 10 corpos de prova cilíndricos com dimensão de 100 mm x 200 mm e 4 corpos de prova prismáticos com dimensão de 150 mm x 150 mm x 500 mm seguindo-se recomendação da JSCE-SF4 (1984). Ao todo foram confeccionados 170 corpos-de-prova cilíndricos e 64 prismáticos.

O concreto foi adicionado às fôrmas em duas camadas. Em cada camada tomou-se o cuidado de distribuir o concreto de forma uniforme, dividindo assim a fôrma em três regiões de adensamento. O adensamento foi realizado utilizando um vibrador, imergindo-se o mesmo na mistura por cerca de três segundos em cada uma das três regiões.

Após a moldagem os corpos de prova foram protegidos por uma lona plástica com o objetivo de evitar a perda da água e proteger das intempéries. Após 24h os mesmos foram desformados e levados para cura em uma câmara úmida durante 28 dias a uma temperatura de 24°C com umidade superior a 95%. A Figura 4.6 mostra o processo de moldagem e armazenamento do concreto.

Figura 4.6: a) Corpos-de-prova moldados. b) Cura dos cp's em câmara úmida.



Fonte: Autor (2019).

### 4.3 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

#### 4.3.1 Ensaio de Compressão Axial

Transcorrido o período de cura de 28 dias dos corpos de prova cilíndricos, todos os exemplares foram retirados da câmara úmida. Através de uma retífica mecânica, com disco diamantado, realizou-se a retificação para aplanar as faces dos

corpos de prova. Esse procedimento foi realizado conforme prescreve a ABNT NBR 5738 (2015).

O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme as recomendações da ABNT NBR 5739 (1994) utilizando-se uma Máquina de ensaios Universal do tipo EMIC – Modelo MEU-100 com capacidade de carga de 1000 kN. Os ensaios foram conduzidos aplicando-se uma taxa de 0,45 MPa/s. Para cada grupo foram ensaiados 7 corpos de prova cilíndricos. A Figura 4.7 mostra os detalhes da prensa hidráulica e do ensaio realizado.

Figura 4.7: a) Prensa hidráulica utilizada para o ensaio. b) Detalhe da ruptura de um cilíndrico.



(a)



(b)

Fonte: Autor (2019).

#### 4.3.2 Ensaio de Módulo de Elasticidade

O programa experimental para determinação do módulo de elasticidade é composto de duas partes. A primeira parte consistiu em caracterizar os CRF através do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico, via técnica por excitação por impulso,

de caráter não destrutivo. Já a segunda parte a caracterização foi realizada com ensaio estático de caráter destrutivo.

O ensaio para determinação do módulo de elasticidade tangente inicial ( $E_{ci}$ ) seguiu as recomendações da ABNT NBR 8522 (2017). Os corpos de prova para a realização desse ensaio foram preparados nas mesmas condições especificadas para o ensaio de compressão axial. A obtenção do módulo de elasticidade só pode ser realizada após a determinação da resistência à compressão do grupo de CRF avaliado, para que se conheça o nível de carregamento que deve ser aplicado.

O ensaio foi realizado submetendo o corpo de prova a três ciclos sucessivos de carregamento e descarregamento entre a tensão inicial de 0,5 MPa e a máxima limite equivalente a 30% da resistência à compressão ( $0,3f_c$ ).

Segundo a referida norma, um dos modos de determinação do módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) é através do coeficiente angular formado pelo intervalo de tensão e deformações específicas médias, dada pela Equação 4.1.

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \cdot 10^{-3} \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde:

$E_{ci}$ : módulo de elasticidade inicial (GPa);

$\sigma_b$ : tensão maior, correspondente a  $0,3f_c$  (MPa);

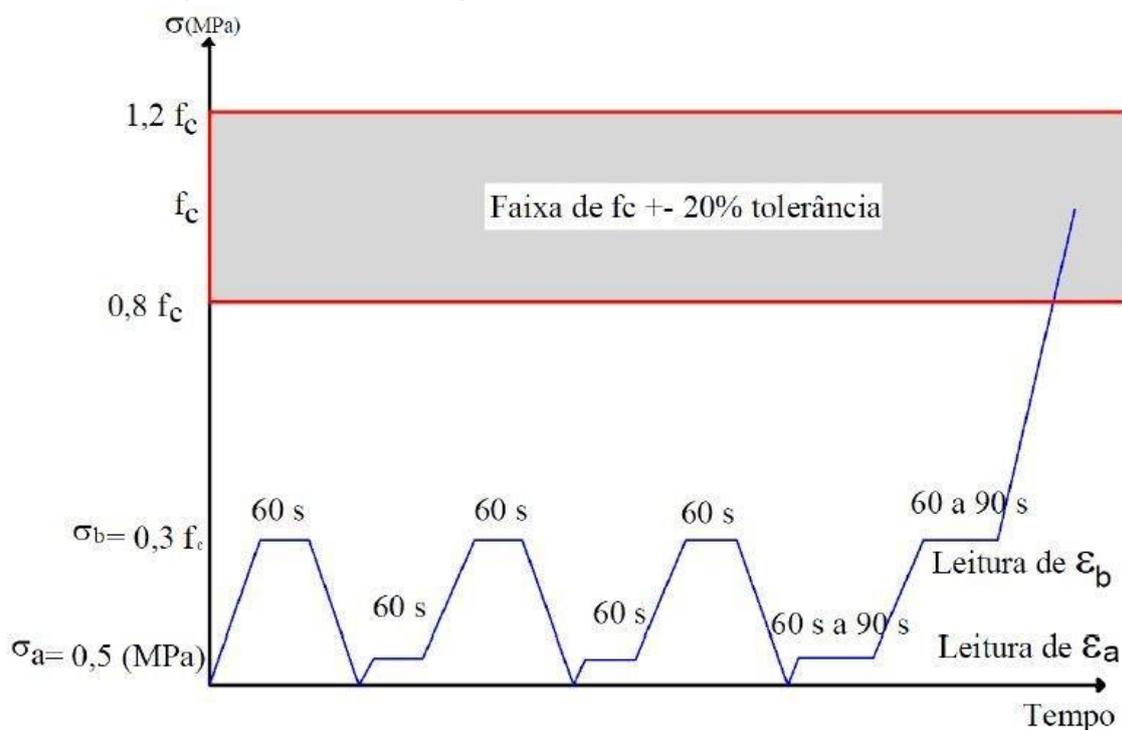
$\sigma_a$ : tensão básica correspondente a 0,5 (MPa);

$\varepsilon_b$ : deformação específica média sob a tensão maior;

$\varepsilon_a$ : deformação específica média sob a tensão básica

Os ciclos de carregamento e descarregamento em função do tempo utilizado para a determinação do módulo de elasticidade pode ser visualizado na Figura 4.8

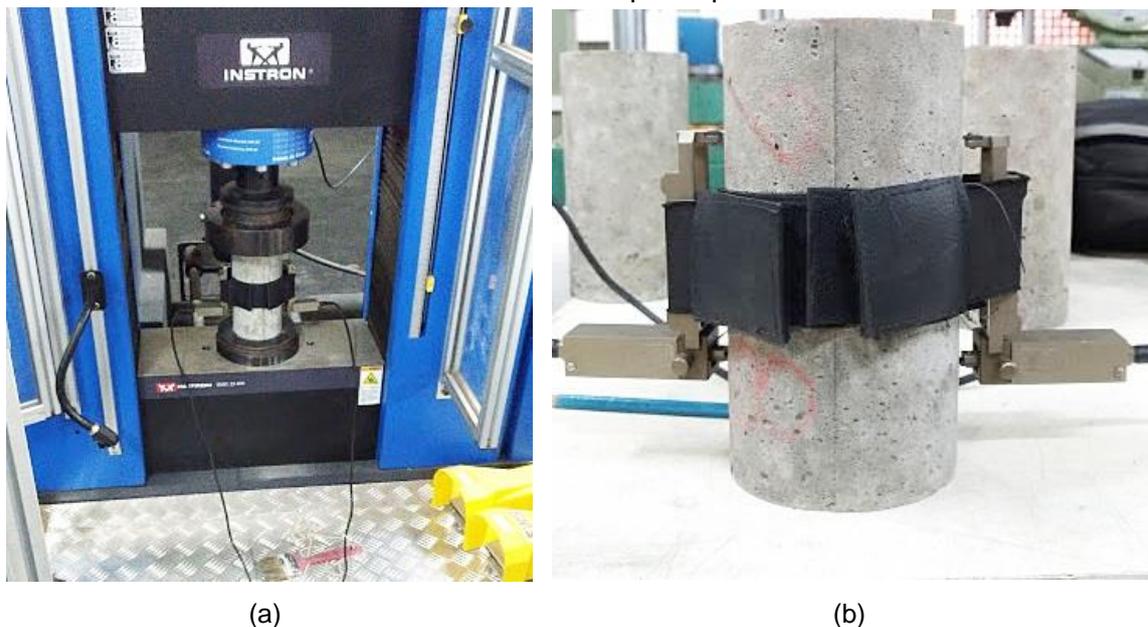
Figura 4.8: Representação do ensaio de módulo de elasticidade.



Fonte: Arif (2014, p.76).

Para o módulo de elasticidade foram ensaiados 3 corpos de prova para cada grupo de CRF utilizando-se a máquina universal de ensaios da marca Instron EMIC 23-600, com capacidade de 600 kN. O ensaio foi conduzido a uma taxa de 0,45 MPa/s. Os extensômetros removíveis utilizados para medir as deformações possuem base de 100 mm e foram fixados aos corpos de prova por elásticos em posições diametralmente opostas como mostra a Figura 4.9

Figura 4.9: a) Ensaio módulo de elasticidade estático. b) Detalhe da fixação do extensômetro ao corpo de prova.



Fonte: Autor (2019).

#### 4.3.3 Ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico

Para a determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico ( $E_{cd}$ ), pelo método da excitação por impulso, foi utilizado o equipamento Sonelastic® versão 3.0 com suporte ajustável para barras e cilindros (SA-BC), captador acústico direcional (CA-DP) e pulsador automático desenvolvido e fabricado pela ATCP Engenharia Física.

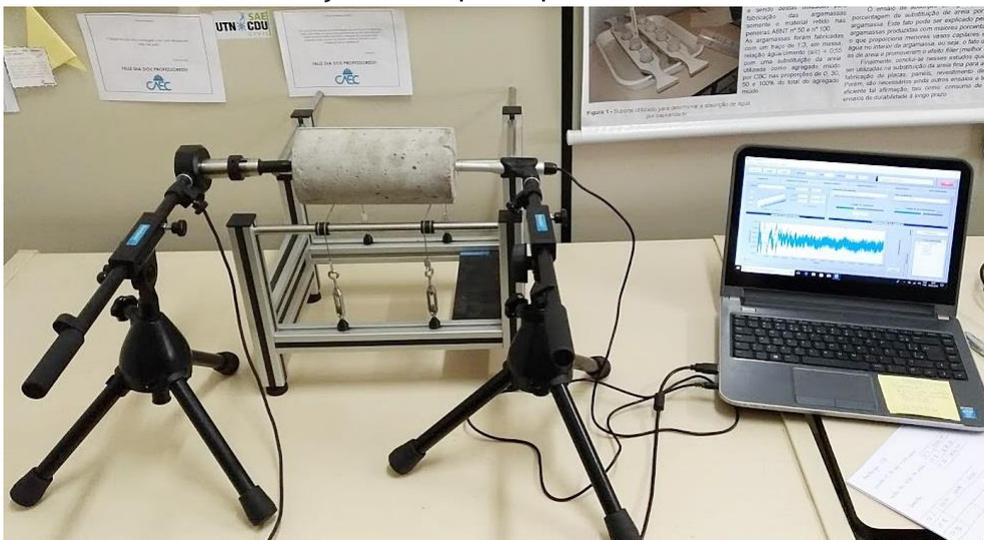
A técnica de excitação por impulso foi adotada devido à facilidade de obtenção dos resultados para corpos de prova com geometrias simples, como barras, cilindros ou placas. Isso se deve a uma resposta homogênea do ensaio ao correlacionar a frequência natural de vibração do CRF com a dimensão e massa dos corpos de prova, informações que são facilmente determinadas com paquímetro e balança de precisão. Nota-se que não existe uma normalização nacional sobre esse ensaio, sendo a ASTM E1876-15 a norma de referência para a sua realização.

Os golpes aplicados nos corpos de prova, através do pulsador, foram realizados no sentido longitudinal. Os mesmos corpos de prova, após o ensaio dinâmico foram submetidos posteriormente ao ensaio de compressão para determinação do módulo de elasticidade tangente inicial. A metodologia utilizada no ensaio é a descrita abaixo e foi realizada segundo a ASTM E1876 (2009).

- a) Determinação das dimensões do corpo de prova;
- b) Determinação da massa do corpo de prova;
- c) Demarcar o corpo de prova, segundo recomendações do fabricante em  $0,244L$  (onde  $L$  representa o a dimensão longitudinal do corpo de prova) a partir das extremidades, para servir de apoio ao suporte ajustável;
- d) Através do *software* do equipamento é aplicado de automaticamente um pequeno golpe em uma das extremidades do corpo de prova e na outra é captada a frequência de vibração natural através do microfone;
- e) De forma imediata o software retorna o módulo de elasticidade dinâmico. O resultado obtido refere-se à média obtida a partir de 3 golpes em cada corpo de prova.

A Figura 4.10 mostra o equipamento Sonelastic® e a realização do ensaio.

Figura 4.10: Detalhe da fixação do corpo de prova e ensaio através do Sonelastic®.



Fonte: Autor (2019).

#### 4.3.3.1 Comparativo entre o Módulo de Elasticidade Estático e Dinâmico

Neville (1982) comenta que nos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico normalmente os níveis de vibrações aplicados resultam em tensões muito baixas, gerando assim deformações instantâneas muito pequenas. Por essa razão, o módulo de elasticidade dinâmico representa o comportamento do concreto em sua fase

elástica, aproximando-se assim do módulo tangente inicial, determinado no ensaio estático.

Shkolnik (2008) e Lux et. al. (2013) salientam que o módulo de elasticidade dinâmico será sempre maior ou igual ao módulo obtido a partir de um ensaio estático. Mehta e Monteiro (1994) comentam que o valor do módulo dinâmico é cerca de 20%, 30% e 40% superior ao módulo estático para concretos de alta, média e baixa resistência, respectivamente.

Segundo Diógenes et. al. (2001) ainda não existe uma correlação geral entre o módulo estático e dinâmico, devido às dificuldades físicas de um material heterogêneo como o concreto. O que existe são relações empíricas limitadas a certas condições, entre elas o recomendado pelo Código Britânico de Prática de Uso Estrutural do Concreto BS 8110-2 (1985) que estabelece para concretos com consumo de cimento inferior a 500 kg/m<sup>3</sup> ou concretos com agregado de peso normal, uma correlação entre os módulos de elasticidade conforme mostra a Equação 4.2 em GPa.

$$E_c = 1,25 \cdot E_{cd} - 19 \quad \text{Equação 4.2}$$

Para Lyndon e Baladran (1986) a relação entre os dois módulos é dada conforme a Equação 4.3.

$$E_c = 0,83 \cdot E_{cd} \quad \text{Equação 4.3}$$

Onde:

$E_c$ : módulo de elasticidade estático;

$E_{cd}$ : módulo de elasticidade dinâmico.

Com isso, essa pesquisa buscou avaliar as relações entre o módulo de elasticidade estático ( $E_c$ ) e dinâmico ( $E_{cd}$ ) para os grupos de CRF avaliados. Também foi realizada a aproximação entre o  $E_c$  determinado experimentalmente com o  $E_c$  determinado analiticamente através das equações Equação 4.2 e Equação 4.3 descritas acima.

#### 4.3.4 Ensaio de Flexão

Os ensaios de flexão nos corpos de prova prismáticos foram realizados conforme as recomendações da norma japonesa JSCE-SF4 (1984). A referida norma é ainda muito utilizada no Brasil, como referência, para a caracterização do CRF à flexão.

Os corpos de prova prismáticos com dimensão 150 mm x 150 mm x 500 mm foram submetidos às mesmas condições de cura dos corpos de prova cilíndricos. Um dia antes da realização do ensaio de cada grupo os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e expostos à secagem em ambiente aberto.

O ensaio foi realizado na máquina universal de ensaios da marca Instron EMIC 23-600, com capacidade de 600 kN como mostra a Figura 4.11.

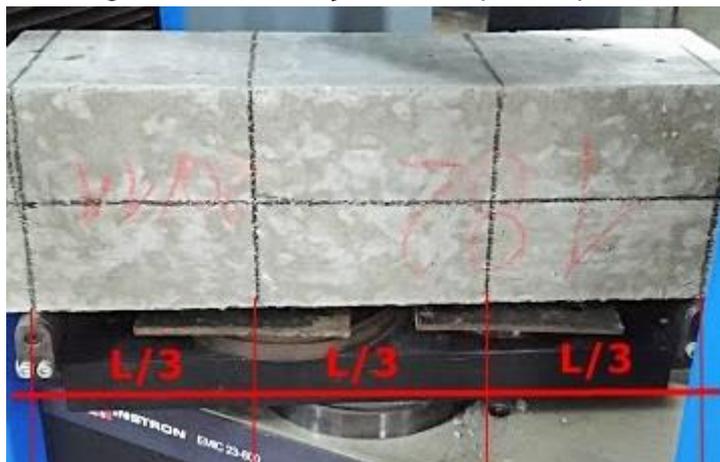
Figura 4.11: Ensaio sendo executado através da EMIC 23-600.



Fonte: Autor (2019).

Foram realizadas marcações nas laterais do corpo de prova, Figura 4.12, para auxiliar na montagem e garantir a aplicação da carga no local desejado.

Figura 4.12: Marcação dos corpos de prova.



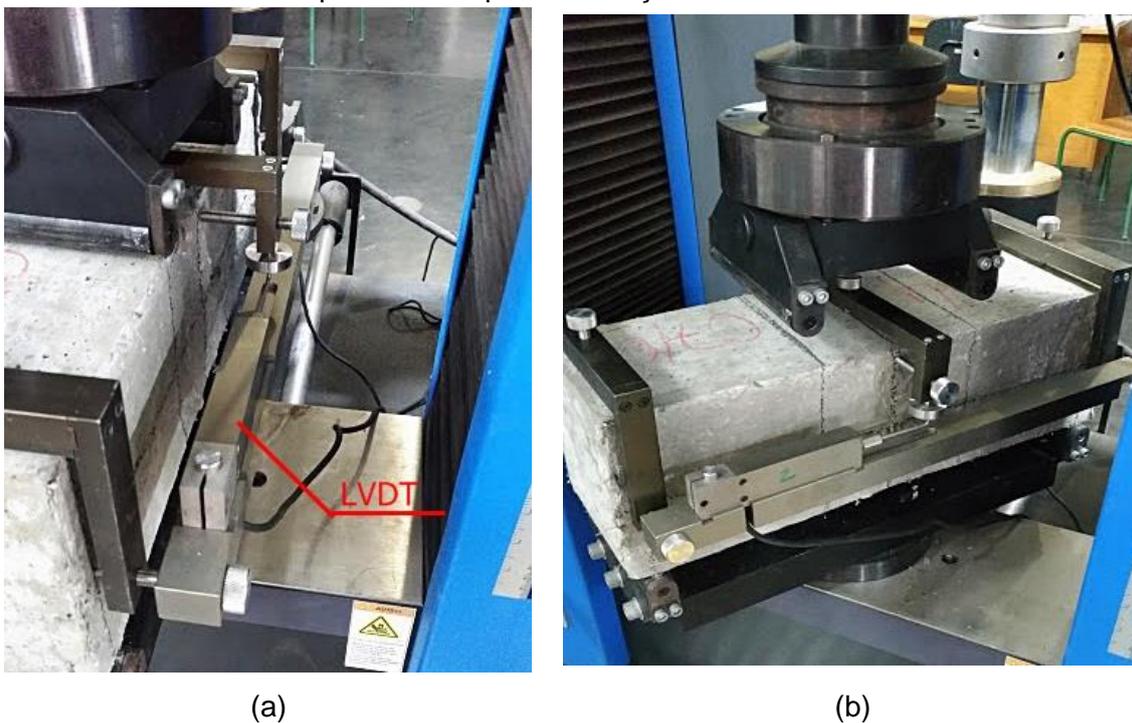
Fonte: Autor (2019)

O corpo de prova foi posicionado na máquina de ensaios e ajustado o dispositivo YOKE nas marcações pré-estabelecidas. O referido dispositivo é fixado na linha neutra da face lateral do corpo de prova como um acessório que auxilia a fixação dos transdutores de deslocamento

O ensaio foi realizado a uma taxa de 0,20 mm/min e encerrado quando a deformação alcança o valor limite de 3 mm. Foram ensaiados 4 corpos de prova prismáticos por grupo de CRF.

Com a realização do ensaio de flexão busca-se determinar a resistência à flexão e tenacidade do CRF. Segundo Ferreira (2008) a tenacidade na flexão é uma medida de avaliar a resistência à fratura do material, onde é caracterizada pela área abaixo da curva carga-deslocamento. A Figura 4.13 (a) mostra o detalhe do acoplamento do LVDT no dispositivo YOKE e a Figura 4.13 (b) mostra o corpo de prova com os dispositivos devidamente instalados e apoiados sobre dois cutelos inferiores e dois cutelos superiores, nas devidas marcações, para aplicação de carga (ensaio a quatro pontos);

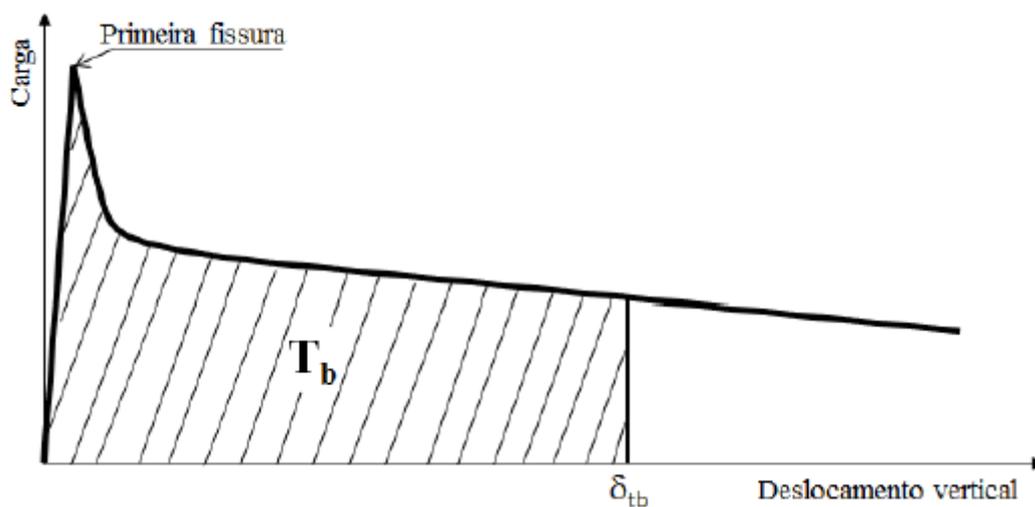
Figura 4.13: a) Detalhe do LVDT acoplado no dispositivo YOKE. b) Corpo de prova posicionado para realização do ensaio.



Fonte: Autor (2019).

A Figura 4.14 mostra uma curva típica obtida através do ensaio que relaciona a carga em função do deslocamento vertical sendo a área hachurada, até o limite de deslocamento máximo de  $L/150$  (3 mm), a tenacidade à flexão do material.

Figura 4.14: Esquema da curva carga-deslocamento vertical utilizada para determinação da tenacidade à flexão segundo a JSCE-SF4 (1984).

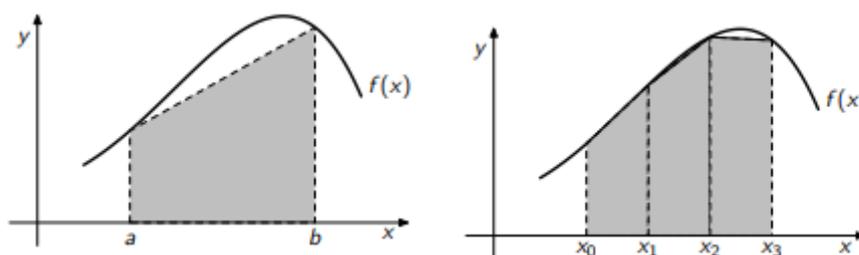


Fonte: Vasconcelos (2012, p.87).

Para o cálculo da tenacidade à flexão do CRF é necessário determinar a área abaixo da curva carga-deslocamento. Para isso foi utilizada métodos de integração numérica, entre eles a regra do trapézio, regra de 1/3 de Simpson e regra de 3/8 de Simpson.

Os três métodos adotados seguem a mesma formulação, a área abaixo da curva é subdividida em diversos segmentos menores com o objetivo de aproximar o máximo possível da curva real (Figura 4.15). Através da integração numérica dos segmentos, dentro dos limites estabelecidos, se obtém a área total abaixo da curva, onde nesse caso retrata a tenacidade à flexão do CRF. Outro ponto importante é que os valores utilizados para construção dos pequenos segmentos de área são todos os pontos lidos no ensaio, gerando assim resultados mais fidedignos.

Figura 4.15: Generalização da integração numérica para determinação da área abaixo da curva



Fonte: Biloti (2019, p.4).

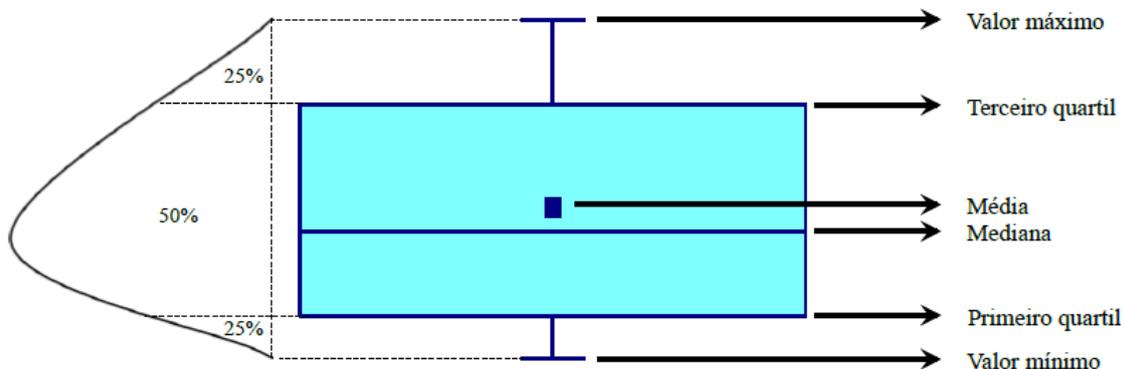
Em todos os grupos avaliados à flexão foram aplicados os três métodos de integração numérica descritos, com o objetivo de avaliar possíveis diferenças entre os mesmos. No entanto, os resultados obtidos foram muito semelhantes, garantindo assim a validade e a aplicabilidade dos métodos para determinação da área abaixo da curva. Com isso optou-se por definir a tenacidade dos CRF como a média obtida com os três diferentes métodos de integração.

## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo é direcionado para apresentação e discussão dos resultados obtidos para o que foi proposto inicialmente. Primeiramente serão apresentados os resultados para a caracterização do CRF no estado fresco com informações como abatimento e massa específica obtida. Em seguida são avaliadas as propriedades no estado endurecido, entre elas, resistência à compressão, módulo de elasticidade estático e dinâmico, resistência à tração na flexão e a tenacidade.

Para as propriedades mecânicas, devido ao grande número de grupos e dados avaliados, decidiu-se apresentá-los na forma de *boxplot* para que a dispersão, simetria e o intervalo entre os pontos máximos e mínimos fossem visualizados mais facilmente conforme mostra a Figura 5.1. Para o caso dessa pesquisa, busca-se através desse diagrama avaliar, por exemplo, a qualidade da moldagem dos corpos de prova e/ou também a correta execução dos ensaios propostos.

Figura 5.1: Informações contidas no gráfico do tipo *boxplot*.



Fonte: McGill; Tukey; Larsen (1978)

O intervalo entre valor mínimo e o primeiro quartil contém 25% dos dados amostrais que apresentam os valores mais baixos. Já o intervalo entre o terceiro quartil e o valor máximo contém 25% dos dados amostrais que apresentam os valores mais altos. Os dados contidos dentro da caixa correspondem a 50% dos dados amostrais, que ficaram compreendidos entre o primeiro e o terceiro quartil. O comprimento desses intervalos é proporcional à dispersão entre os dados, ou seja, quanto maior comprimento, maior será a dispersão (MCGILL; TUKEY; LARSEN, 1978)

## 5.1 CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO

No estado fresco a principal propriedade avaliada no concreto é a sua consistência, visto que esse fator altera significativamente o processo de moldagem e as propriedades no estado endurecido. Para isso, foi realizado, seguindo-se a metodologia indicada na ABNT NBR NM 67 (1998), o ensaio de abatimento através do tronco de cone (*slump*) para avaliar as possíveis mudanças na consistência da mistura ao se adicionar as fibras.

A Tabela 5.1 mostra os valores obtidos para o *slump* e massa específica dos diferentes grupos de CRF. Essa última propriedade foi obtida seguindo-se as recomendações da ABNT NBR 9833 (2008).

Tabela 5.1: Propriedades do CRF no estado fresco.

GRUPO	CRF	Slump (em mm)		Aditivo* (%)	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> ).
		Sem aditivo	Com aditivo		
1	CRF0	160	-	0	2,391
2	CRF2	140	-	0	2,432
3	CRF3.1	80	140	0,17	2,464
	CRF3.2	40	140	0,25	2,246
	CRF3.3	40	120	0,45	2,306
4	CRF4.1	100	140	0,20	2,332
	CRF4.2	90	140	0,15	2,387
	CRF4.3	75	**	0,20	2,305
5	CRF5.1	30	125	0,35	2,407
	CRF5.2	30	100	0,55	2,371
	CRF5.3	50	140	0,40	2,195
6	CRF6.1	40	160	0,40	2,070
	CRF6.2	25	120	0,50	2,281
	CRF6.3	20	110	0,70	2,226
7	CRF7.3	40	120	0,60	2,208
	CRF7.2	20	25	0,80	2,380
	CRF7.3	20	25	0,80	2,335

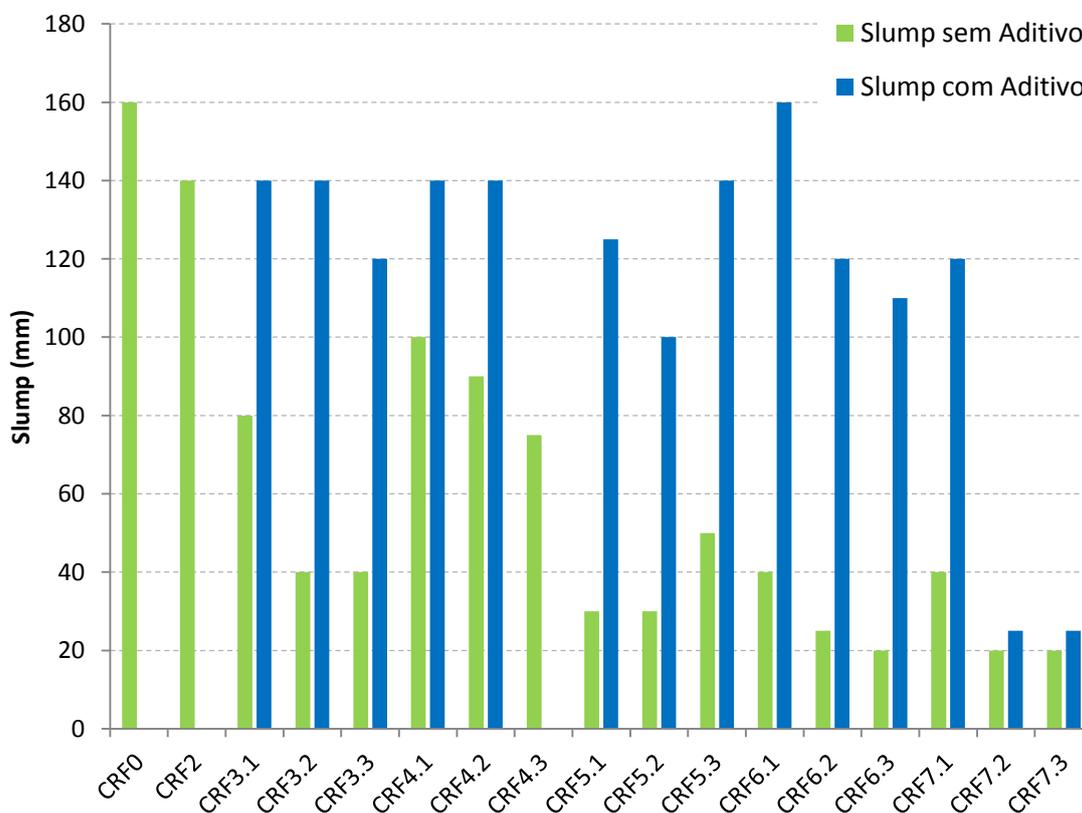
\*Em relação à massa de cimento.

\*\* Não foi possível determinar o abatimento devido à segregação da mistura.

Fonte: Autor (2019).

Foram avaliados dois valores de *slump*, o primeiro obtido sem o uso de aditivo e o segundo obtido ao adicionar aditivo superplastificante à mistura para avaliar as mudanças na sua consistência. Para melhor visualização foi plotado um gráfico mostrado na Figura 5.2 que relaciona essas duas situações avaliando assim as diferenças na trabalhabilidade tendo como variáveis a quantidade de fibras e quantidade de aditivo.

Figura 5.2: Influência da adição de aditivo nos CRF's.



Fonte: Autor (2019).

Foi notado que ao se adicionar apenas as fibras de aço (CRF2) pouco alterou-se a trabalhabilidade do concreto, sendo observada uma diminuição de apenas 20 mm no abatimento.

Quando se incorpora as fibras poliméricas, tanto a microfibras como a macrofibras, a redução nos valores de *slump* passa a ser bastante significativa. Foi notado que a microfibras (grupo 3) confere menor trabalhabilidade quando comparada a macrofibras (grupo 4). Isso se deve pelo fato de quanto menor for o diâmetro da fibra maior será a área superficial adicionada ao concreto, requerendo assim mais água e conseqüentemente diminuindo a fluidez da mistura. Quando as microfibras e macrofibras são misturadas simultaneamente a diminuição é ainda maior como observado nos grupos 5, 6 e 7.

A mesma situação foi observada por Hsie & Song (2008), ao avaliar a combinação de microfibras e macrofibras de PP. Os autores observaram que o valor do *slump* para as misturas onde haviam-se incorporado os dois tipos de fibra eram inferiores que àqueles quando adicionadas apenas uma delas. Os mesmos autores comentam que a adição de fibras híbridas poliméricas forma uma espécie de estrutura de rede no concreto, impedindo a sua fluidez. Devido ao alto volume e a área superficial das fibras, as mesmas absorvem mais pasta de cimento aumentando assim a viscosidade resultando em uma perda de *slump*.

Para garantia das condições de trabalhabilidade foi adicionado aditivo superplastificante às misturas em diferentes teores. Nos grupos com microfibras e macrofibras de PP, não foi possível atender o limite pré-estabelecido de  $140 \pm 20$  mm. Para esses casos observou-se a segregação das misturas mesmo com a incorporação de maiores teores de aditivo.

Para os grupos CRF7.2 e CRF7.3 mesmo adicionando-se 0,8% de aditivo (máximo recomendado pelo fabricante é de 1%) não se observou alterações no valor do *slump*. Isso se deve ao alto volume de fibras presentes, resultando assim em um concreto com forte segregação e exsudação com, separação da nata de cimento dos agregados e fibras (Figura 5.3). Com isso, os corpos de prova prismáticos para os esses grupos não foram moldados.

Figura 5.3: Segregação e exsudação do CRF.



Fonte: Autor (2019).

Para os demais grupos, mesmo havendo diminuição no *slump*, apresentaram uma boa homogeneidade e aparência visual satisfatória após a desforma, não sendo verificado nenhum caso de nichos de concretagem. Isso é explicado por Ceccato e Figueiredo (1999) onde os autores comentam que a vibração realizada para o adensamento do concreto recupera boa parte da mobilidade do material e promove uma boa compactação da mistura.

## 5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados obtidos para a resistência média à compressão aos 28 dias ( $f_c$ ) dos CRF estão mostrados na Tabela 5.2. Os resultados referem-se à média obtida através de 6 corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm. É mostrado também a variação percentual da resistência à compressão dos corpos de prova com inserção das fibras em comparação ao concreto de referência, sem fibras.

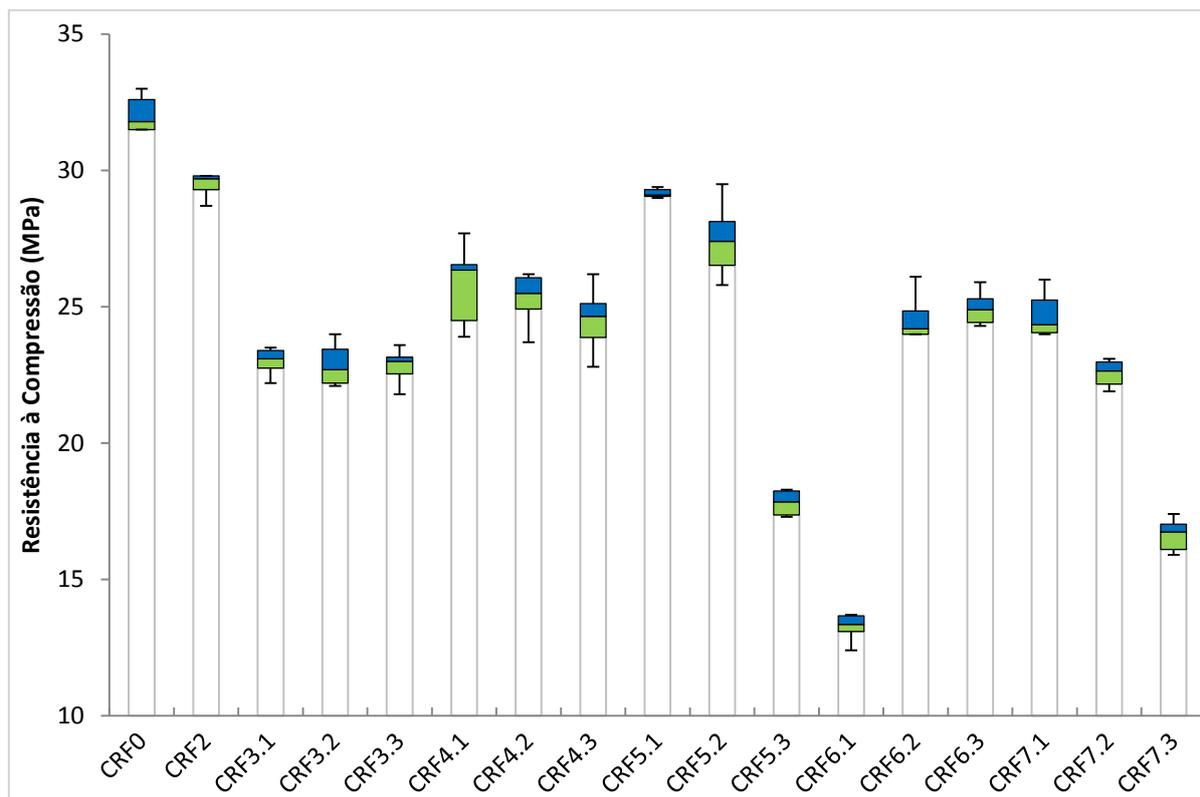
Tabela 5.2: Resistência à compressão aos 28 dias dos CRF.

GRUPO	CRF	fc (MPa)		Desvio Padrão (MPa)
		Média	%	
1	CRF0	31,26	-	2,478
2	CRF2	29,64	- 5,18	0,733
3	CRF3.1	23,21	- 25,75	0,857
	CRF3.2	22,87	- 26,84	0,765
	CRF3.3	22,83	- 26,97	0,596
4	CRF4.1	25,23	- 19,29	2,632
	CRF4.2	25,63	- 18,01	1,480
	CRF4.3	24,53	- 21,53	1,189
5	CRF5.1	29,27	- 6,37	0,867
	CRF5.2	27,45	- 12,19	1,349
	CRF5.3	18,05	- 42,26	0,907
6	CRF6.1	13,55	- 56,65	1,017
	CRF6.2	24,27	- 22,36	1,323
	CRF6.3	24,95	- 20,19	0,644
7	CRF7.1	24,35	- 22,10	1,429
	CRF7.2	22,57	- 27,80	0,505
	CRF7.3	16,37	- 47,63	1,131

Fonte: Autor (2019).

A Figura 5.4 mostra a comparação entre os resultados obtidos com os ensaios de compressão. Na mesma figura mostra-se, por meio do diagrama *boxplot*, a dispersão dos dados obtidos.

Figura 5.4: Resistência à compressão aos 28 dias.



Fonte: Autor (2019).

Através do diagrama *boxplot* pode-se afirmar que a variabilidade dos dados é pequena. Até mesmo o CRF4.1 que, dentre os grupos avaliados possui a maior dispersão, não chega a ser considerável. Com isso, pode-se considerar que a moldagem dos corpos de prova se deu de maneira uniforme resultando assim em dados com uma maior veracidade.

De maneira geral observou-se que ao adicionar as fibras ao concreto houve uma diminuição na sua resistência à compressão. Tais resultados corroboram com a literatura já existente no sentido de que a incorporação de fibras ao concreto não tem objetivo de aumentar a resistência à compressão do concreto, podendo até diminuir seus valores (FIGUEIREDO, 2000).

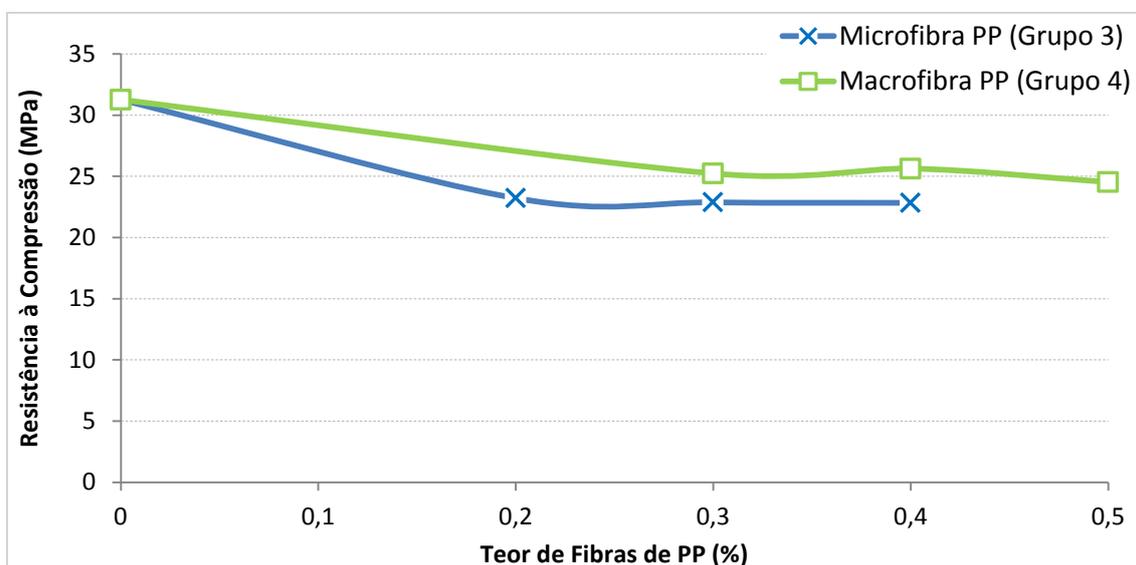
Para o CRF com adição apenas das fibras de aço houve uma pequena diminuição (5,18%) na sua resistência em relação à matriz sem fibras. De acordo com o ACI 544.2R (1999) a adição de fibras de aço em teores normalmente aplicados, de até 2% em volume, não ocasiona melhoras significativas na resistência à compressão.

No grupo 3, no qual incorporou-se microfibras de PP trabalhando juntamente com as fibras de aço, a redução na resistência à compressão foi ainda mais

significativa, cerca de 26,52% em média. No grupo 4, onde a hibridização ocorreu entre as macrofibras de PP com as fibras de aço a mesma situação foi verificada, porém em uma menor escala, resultando em uma redução de 19,61% em média.

Através da Figura 5.5 é possível perceber que as microfibras possuem maior influência na redução da resistência à compressão em relação as macrofibras. Outro aspecto observado, em ambos os casos, é que inicialmente ocorreu uma diminuição considerável da resistência, seguida por uma estabilização dos valores. Logo, o aumento no teor das fibras de PP não representou uma diminuição progressiva nos valores de resistência à compressão.

Figura 5.5: Influência das micro e macrofibras na resistência a compressão do CRF.



Fonte: Autor (2019).

Nos grupos subsequentes as fibras de PP foram incorporadas fibras de aço. Para o grupo 5, fixou-se o teor de microfibras em 0,2% e aumentando-se gradativamente o teor de macrofibras em 0,3%; 0,4% e 0,5%. Tal fato resultou em redução na resistência à compressão na ordem de 6,37%; 12,19% e 42,26% respectivamente, em comparação a matriz sem fibras. No entanto, pode-se observar que para o teor de 0,3% e 0,4% de macrofibras os valores foram superiores àqueles observados quando adicionou-se as fibras de PP isoladamente.

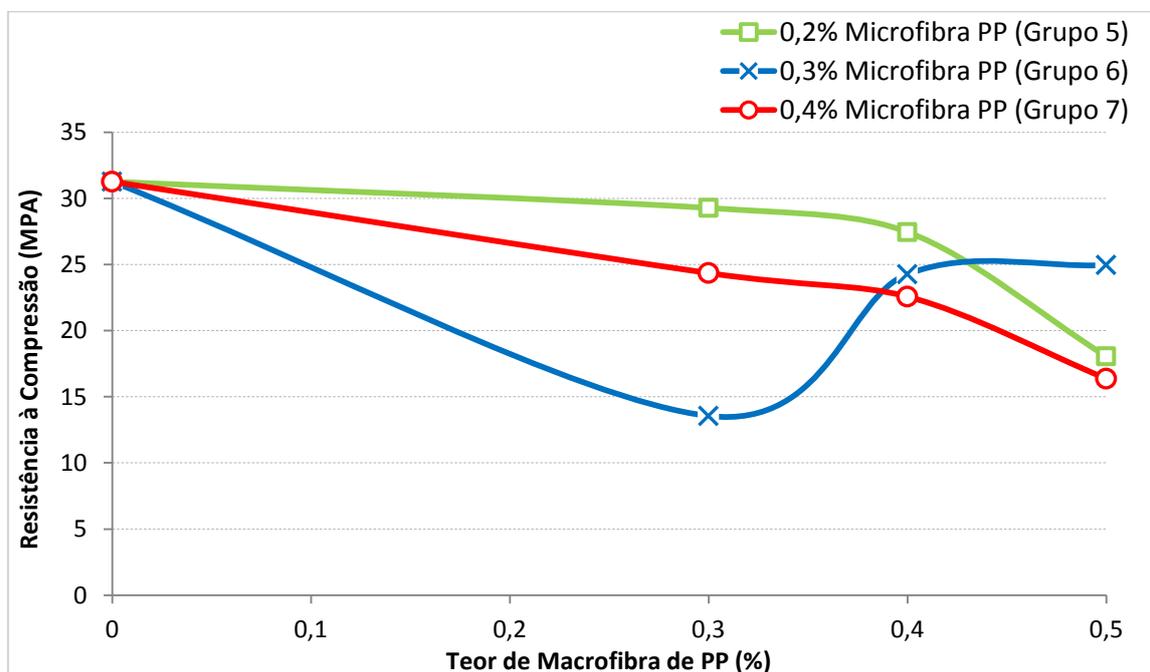
Para o grupo 6 fixou-se o teor de microfibras em 0,3% e aumentando-se gradativamente o teor de macrofibras em 0,3%, 0,4% e 0,5% o que resultou em uma redução nos valores de resistência à compressão em cerca de 56,65%; 22,36% e

20,19% respectivamente. O mesmo processo foi realizado no grupo 7, com a fixação de 0,4% de microfibra e o aumento grau de macrofibra em 0,3%; 0,4% e 0,5% onde ocasionou a diminuição nos valores de resistência à compressão de 22,10%; 27,80% e 47,63%, respectivamente.

Nos grupos onde ocorre a hibridização entre as fibras de PP e fibra de aço o maior valor de resistência foi para o CRF5.1 (29,27 MPa). No geral para o grupo 5 e o grupo 7, o aumento no teor de macrofibra corrobora com a diminuição da resistência à compressão do CRF. Em ambos os casos, quando considerou-se os maiores teores de fibra, a diminuição fica em torno de 45% (Figura 5.6).

No entanto, para o grupo 6 o comportamento é distinto, o aumento nos teores de macrofibra resultou em uma brusca diminuição seguida de um aumento na resistência à compressão. Como apenas ocorreu esse fato no CRF6.1 (0,3% micro + 0,3% macro) pode ter ocorrido algum erro de dosagem do superplastificante ou de moldagem colaborando assim para esse resultado discrepante.

Figura 5.6: Influência da hibridização entre fibra de aço, micro e macrofibra de PP na resistência à compressão do CRF.



Fonte: Autor (2019).

Hsie et. al. (2008) ao avaliar CRF com hibridização entre micro e macrofibra de PP observaram um aumento em torno de 14% a 17% respectivamente na resistência à

compressão do CRF. Já Cáceres et. al. (2016) ao avaliar a resistência à compressão de uma matriz de concreto com adição de fibras de aço e macrofibra de PP não observou mudanças significativas na resistência à compressão, com valores na mesma ordem de grandeza.

Oliveira (2018) avaliou a incorporação de micro e macrofibras de PP com mesma dimensão às utilizados nessa pesquisa. Em todos os casos analisados pelo autor houve uma diminuição da resistência à compressão, fato que vai de acordo aos valores observados nessa pesquisa.

De certa maneira verificou-se que as fibras possuem uma influência significativa na redução da resistência à compressão dos CRF. Segundo Ferrari (2007) este fato pode estar relacionado com o papel que o volume de fibra exerce na incorporação de ar pela matriz, reduzindo assim a sua resistência.

### 5.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade estático ( $E_c$ ) e módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{cd}$ ) obtidos através da frequência natural longitudinal dos CRF estão mostrados na Tabela 5.3, bem como a variação percentual dos resultado para os corpos de prova com inserção das fibras em comparação com o concreto de referência, sem fibras. A Figura 5.7 e a Figura 5.8 mostra a dispersão dos dados através do *boxplot* para o módulo de elasticidade estático e dinâmico, respectivamente.

A análise da variabilidade dos dados mostra que os valores para o módulo de elasticidade estático e dinâmico possuem diferenças significativas. Enquanto os valores de  $E_c$  possuem uma variabilidade considerável o mesmo não ocorre para  $E_{cd}$ , onde os valores tendem a um comportamento uniforme. Tal fato pode ser explicado pelo comportamento não-linear do concreto, dificultando assim a exata determinação do  $E_c$  acarretando assim um conjunto de valores com maior dispersão

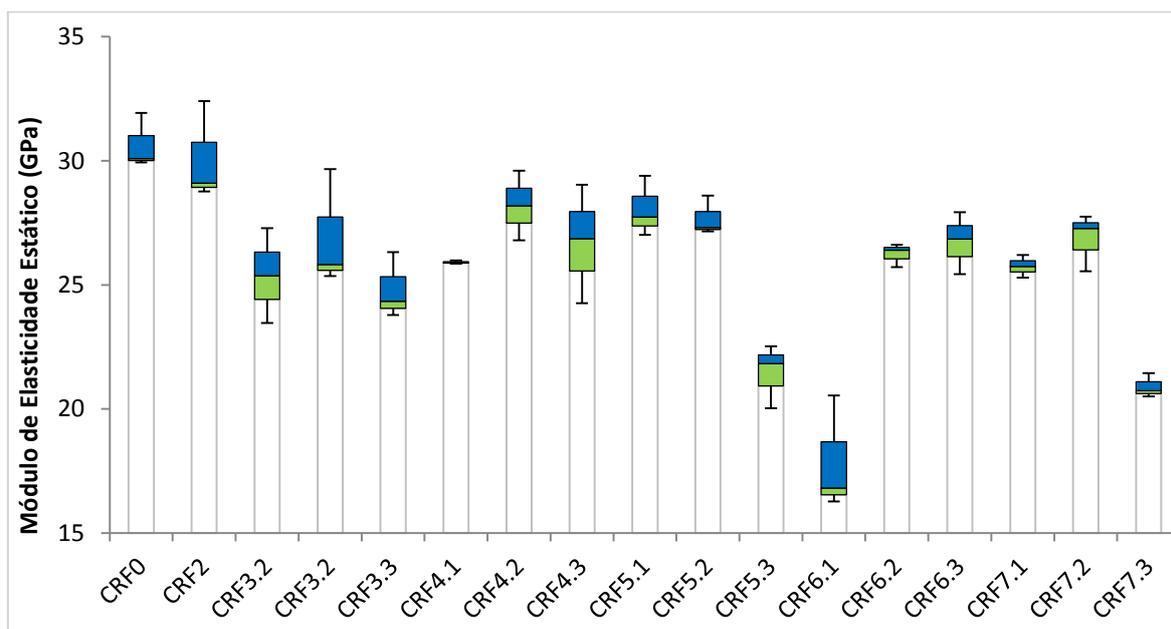
No caso de ensaios não-destrutivos, como o realizado para o  $E_{cd}$  as tensões aplicadas são muito pequenas, Neville (2011) comenta que não ocorre a indução de microtrincamento na matriz, assim como não há efeito da fluência. Devido a isso, pode-se considerar que  $E_{cd}$  está associado a fenômenos puramente elásticos fornecendo assim valores de forma mais precisa.

Tabela 5.3: Módulo de Elasticidade Estático e Dinâmico dos CRF aos 28 dias.

GRUPO	CRF	Ec (MPa)			Ecd (MPa)		
		Média	Desvio Padrão	%	Média	Desvio Padrão	%
1	CRF0	30,65	1,11		39,49	1,28	
2	CRF2	30,09	2,01	-1,83	37,30	0,64	-5,55
3	CRF3.1	25,37	2,70	-17,23	33,69	0,81	-14,69
	CRF3.2	26,95	2,36	-12,07	30,38	0,74	-23,07
	CRF3.3	24,81	1,33	-19,05	30,26	0,60	-23,37
4	CRF4.1	25,91	0,06	-15,46	33,16	1,26	-16,03
	CRF4.2	28,19	1,40	-8,03	33,70	0,11	-14,66
	CRF4.3	26,72	2,39	-12,82	32,34	1,33	-18,11
5	CRF5.1	28,05	1,22	-8,48	33,81	0,84	-14,38
	CRF5.2	27,69	0,79	-9,66	32,54	0,78	-17,60
	CRF5.3	21,46	1,29	-29,98	26,69	0,98	-32,41
6	CRF6.1	17,87	2,33	-41,70	22,09	0,69	-44,06
	CRF6.2	26,24	0,47	-14,39	30,34	0,27	-23,17
	CRF6.3	26,74	1,25	-12,76	29,84	0,77	-24,44
7	CRF7.1	25,75	0,64	-15,99	29,29	0,93	-25,83
	CRF7.2	26,86	1,16	-12,37	33,37	1,28	-15,50
	CRF7.3	20,91	0,49	-31,78	27,85	0,80	-29,48

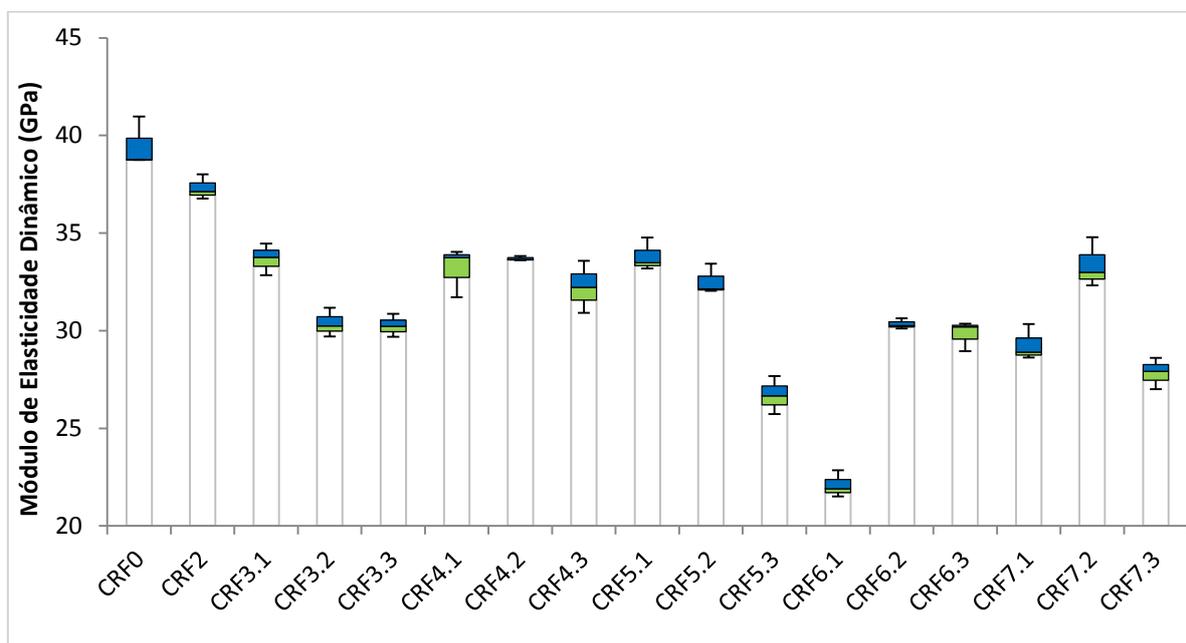
Fonte: Autor (2019).

Figura 5.7: Módulo de Elasticidade Estático.



Fonte: Autor (2019).

Figura 5.8: Módulo de Elasticidade Dinâmico.



Autor (2019).

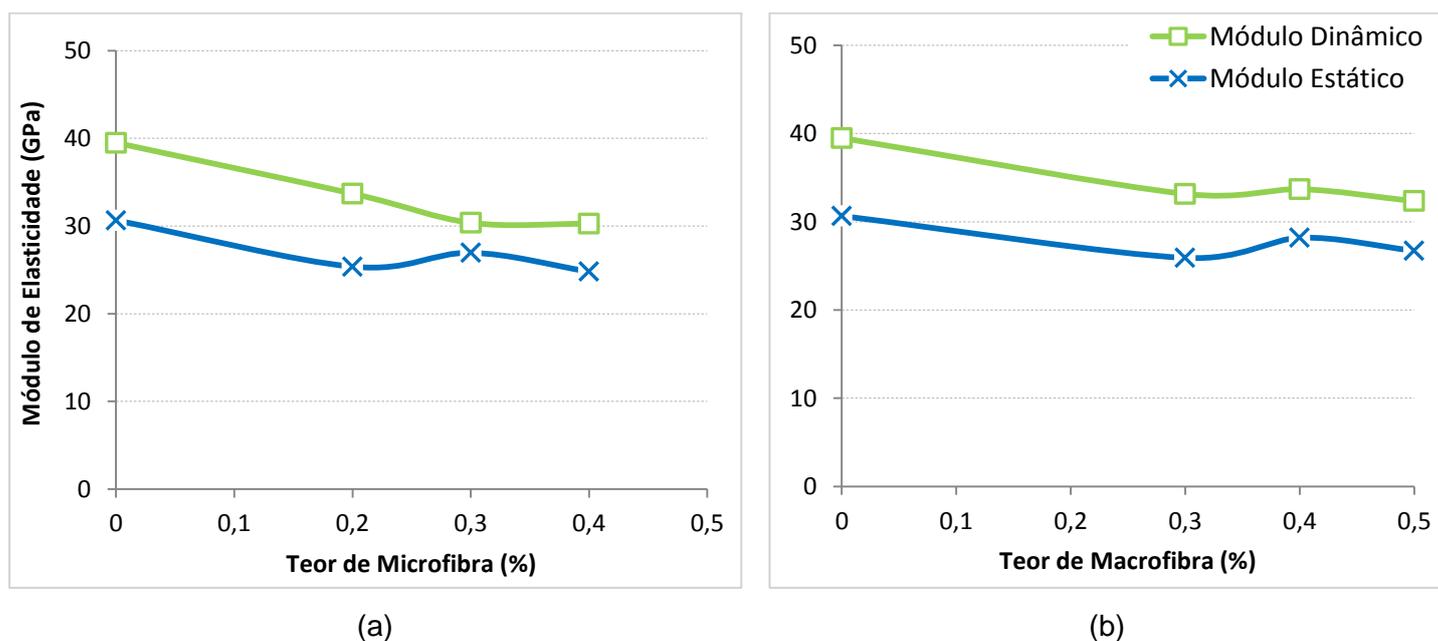
O módulo de elasticidade dos CRF no geral acompanha a mesma tendência apresentada para a resistência à compressão, de diminuição ao se comparar com o concreto de referência sem fibras.

Para a matriz reforçada apenas com as fibras de aço (CRF2), tanto para  $E_c$  como para  $E_{cd}$  as reduções observadas foram pequenas.

Para os grupos 3 e 4 a redução no módulo de elasticidade é mais significativa. A Figura 5.9 (a) mostra o comportamento do grupo 3 onde percebeu-se que o  $E_{cd}$  possui uma queda inicial seguido de uma estabilização dos valores com o aumento no teor de fibras. Considerando  $E_c$  nota-se um ligeiro aumento para o teor de 0,3%.

A Figura 5.9 (b) mostra o comportamento do grupo 4. Neste caso  $E_c$  e  $E_{cd}$  possuem um comportamento muito similar, onde a curva mostra uma tendência de queda inicialmente seguido de um leve aumento nos valores para o teor de 0,4%, sendo esse o melhor resultado obtido para o grupo.

Figura 5.9: Influência no módulo de elasticidade estático e dinâmico com a incorporação de a) microfibras de PP. b) macrofibras de PP.

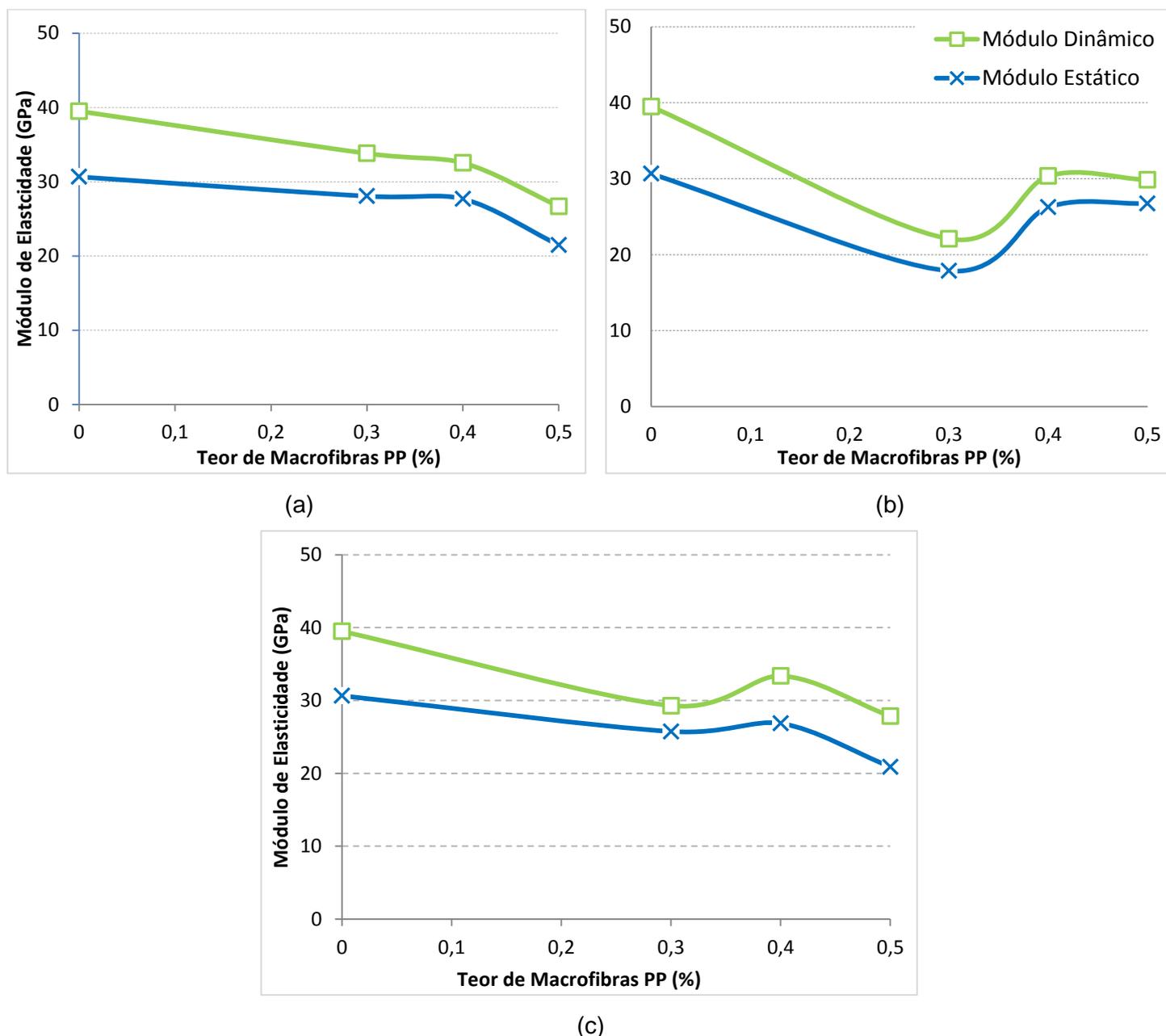


Fonte: Autor (2019).

Nos grupos onde ocorre a hibridização entre fibra de aço e as fibras de PP os resultados observados são semelhantes aos descritos para os grupos anteriores, com exceção do grupo 6. Assim como ocorreu na resistência à compressão, o grupo 6 apresentou uma queda brusca seguida de um aumento nos valores de  $E_c$  e  $E_{cd}$ , conforme observa-se na Figura 5.10 (b).

No grupo 5 (Figura 5.10a) ocorreu sempre a diminuição no valor do módulo de elasticidade. Com o maior teor de macrofibra adicionado (0,5%) a redução chegou a praticamente 30% para  $E_c$  e 26% para  $E_{cd}$ . O grupo 7 (Figura 5.10 (c)) observou-se uma diminuição inicial do módulo de elasticidade com um leve aumento para o teor de 0,4% micro + 0,4% macro, seguidos de uma nova queda dos valores.

Figura 5.10: Influência no módulo de elasticidade estático e dinâmico para hibridização entre fibras de aço, micro e macrofibra de PP (a) Grupo 5. (b) Grupo 6. (c) Grupo 7.



Fonte: Autor (2019).

No geral, considerando os CRF em que foram inseridos as fibras de aço juntamente com as fibras de PP àquele que apresentou o melhor resultado é o CRF5.1 com 28,05 GPa e 33,81 GPa para  $E_c$  e  $E_{cd}$  respectivamente.

Quanto ao comparativo entre os valores de módulo estático e dinâmico, Almeida (2008) observou que o módulo dinâmico longitudinal é cerca de 34%, 27% e 8% superior ao módulo estático para os concretos sem fibras de baixa, média e alta resistência, respectivamente. Nesse trabalho, dependendo do conteúdo de fibras adicionadas, os CRF's se enquadram entre média e baixa resistência. Sendo assim, na média, o módulo dinâmico foi cerca de 22% e 14% superior ao estático para resistências médias e baixas, respectivamente.

A Tabela 5.4 mostra a comparação entre  $E_c$  obtido experimentalmente com as sugestões do Código Britânico BS 8110-2 (1985) e Lyndon e Baladran (1986) propostas através das Equação 4.2 e Equação 4.3.

Tabela 5.4: Relação entre módulo de elasticidade experimental e analítico.

GRUPO	CRF	$E_c$ (Gpa)		$E_c$ (Gpa)		
		Experimental	Código Britânico BS 8110-2:	Dif. (%)	Lyndon e Baladran	Dif. (%)
1	CRF0	30,65	30,36	-0,94	32,78	6,94
2	CRF2	30,09	27,63	-8,19	30,96	2,89
3	CRF3.1	25,37	23,11	-8,90	27,96	10,22
	CRF3.2	26,95	18,98	-29,59	25,22	-6,44
	CRF3.3	24,81	18,83	-24,12	25,12	1,23
4	CRF4.1	25,91	22,45	-13,35	27,52	6,22
	CRF4.2	28,19	23,13	-17,97	27,97	-0,78
	CRF4.3	26,72	21,43	-19,82	26,84	0,46
5	CRF5.1	28,05	23,26	-17,07	28,06	0,04
	CRF5.2	27,69	21,68	-21,72	27,01	-2,46
	CRF5.3	21,46	14,36	-33,07	22,15	3,23
6	CRF6.1	17,87	8,61	-51,80	18,33	2,60
	CRF6.2	26,24	18,93	-27,88	25,18	-4,03
	CRF6.3	26,74	18,30	-31,56	24,77	-7,38

	CRF7.1	25,75	17,61	-31,60	24,31	5,59
7	CRF7.2	26,86	22,71	-15,44	27,70	3,12
	CRF7.3	20,91	15,81	-24,37	23,12	10,55

Fonte: Autor (2019).

Considerando a expressão recomendada pelo Código Britânico BS 8110-2 (1985) a aproximação entre o módulo experimental e analítico não é verificado, onde a diferença, em alguns casos, é superior a 50%. Já a expressão recomendada por Lyndon e Baladran (1986) os resultados tendem a convergir para um mesmo valor, onde a maior diferença observada é de 10,55%.

Diógenes et. al (2011) ao realizar a mesma análise para o concreto convencional concluiu que as duas expressões analíticas conseguem uma boa aproximação com o valor experimental. Porém, a expressão proposta por Lyndon e Baladran (1986) retornou resultados com uma diferença percentual menor, assim como verificado nesse trabalho.

#### 5.4 ENSAIO DE FLEXÃO

Para avaliar as propriedades à flexão do CRF foi utilizada as recomendações da norma japonesa JSCE-SF4 (1984). Esse método foi um dos primeiros a prescrever esse tipo de ensaio para corpos-de-prova prismáticos. A adoção da norma japonesa vem devido à facilidade de execução do ensaio, sendo um dos mais utilizados para caracterização de CRF no Brasil.

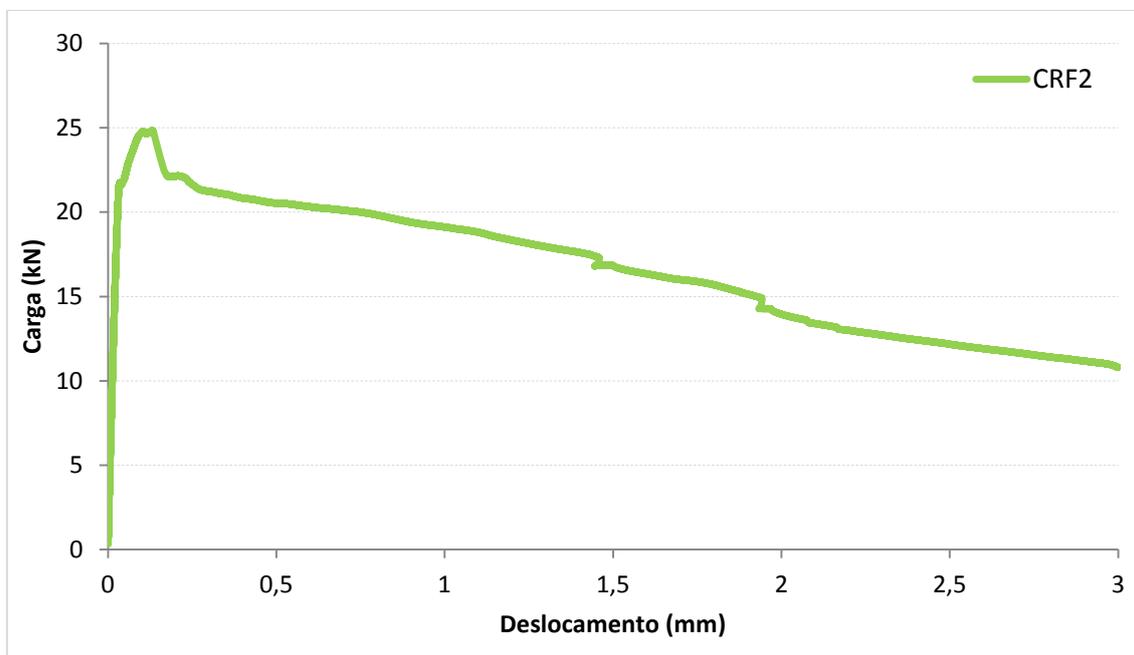
A Figura 5.11 até a Figura 5.16 mostra as curvas médias que relacionam a carga pelo deslocamento vertical obtida para cada grupo de CRF. As curvas referentes a cada CRF avaliado estão mostrados no Apêndice A.

Percebe-se no geral que o comportamento das curvas é pouco influenciado pela instabilidade pós-pico, gerando uma estabilização no momento em que as tensões são transmitidas da matriz para as fibras.

Outro fato observado é que a adição das fibras acabou por alterar o comportamento pré-fissuração da matriz, influenciando assim a carga de pico para os diferentes grupos. Tal comportamento difere do observado por Vasconcelos (2013) e

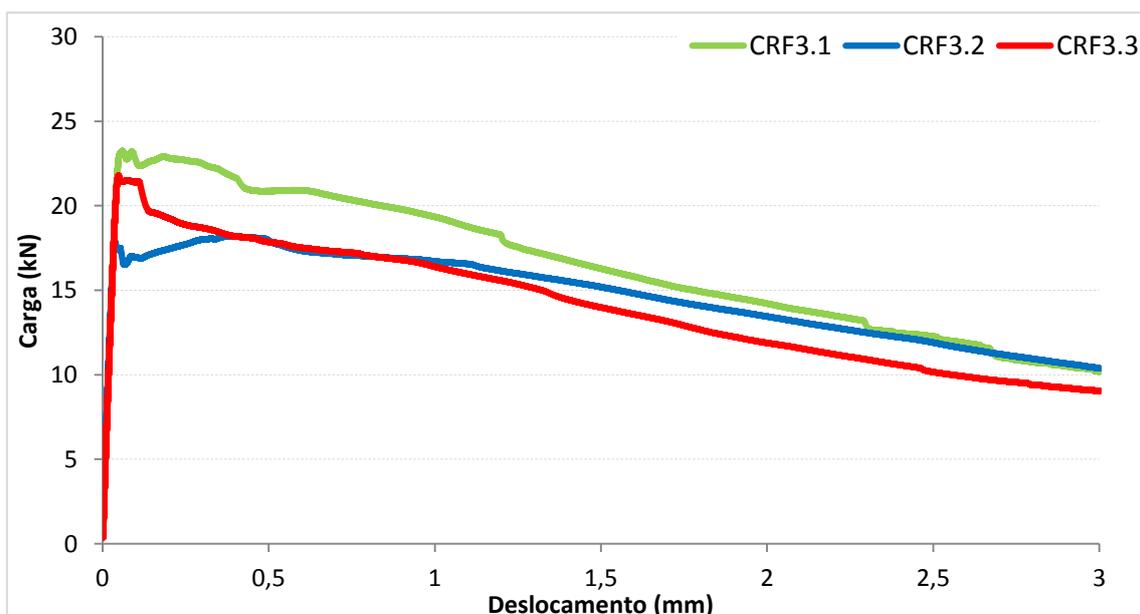
Cáceres et. al (2013) onde os autores verificaram que os valores da carga de pico na pré-fissuração foram semelhantes independente do teor de fibras adicionados.

Figura 5.11: Curva carga *versus* deslocamento vertical para CRF com fibras de aço (grupo 2).



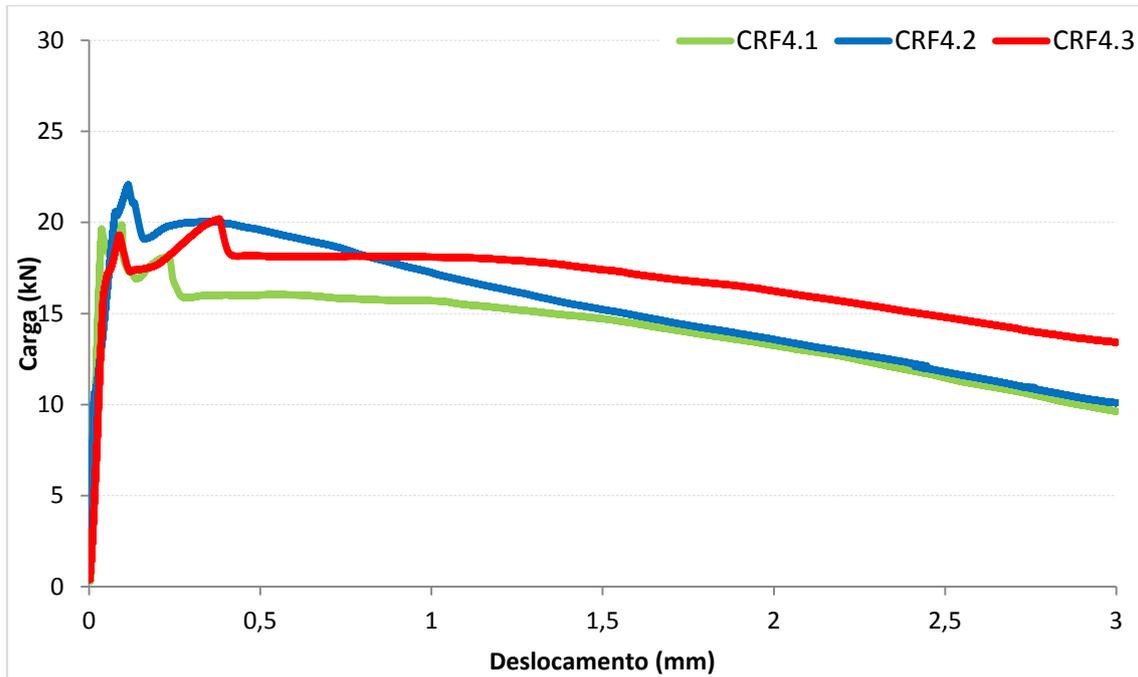
Fonte: Autor (2019).

Figura 5.12: Curva carga *versus* deslocamento vertical para CRF com fibras de aço e microfibras de PP (grupo 3).



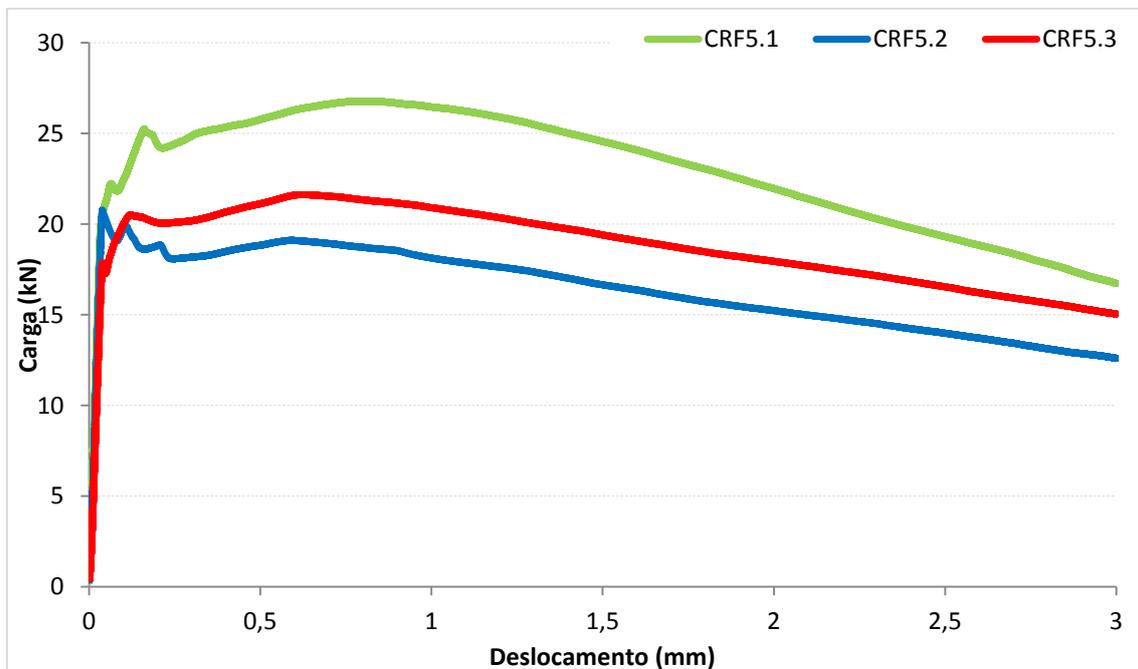
Fonte: Autor (2019).

Figura 5.13: Curva carga *versus* deslocamento vertical para CRF com fibras de aço e macrofibras de PP (grupo 4).



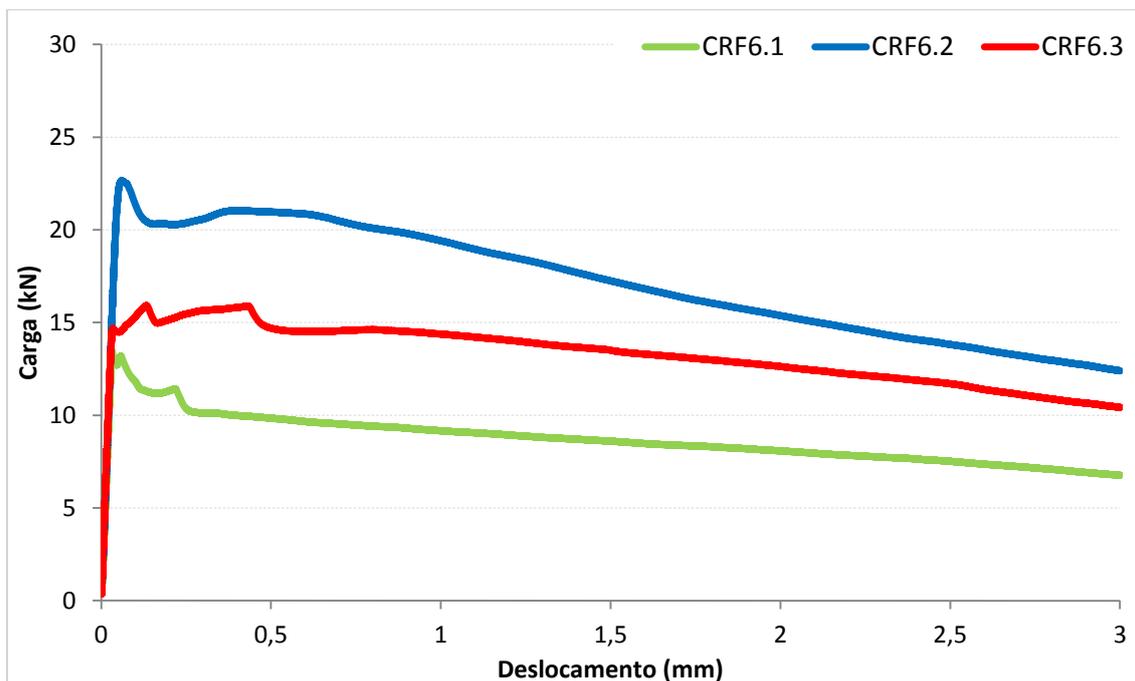
Fonte: Autor (2019).

Figura 5.14: Curva carga *versus* deslocamento vertical para CRF com fibras de aço, micro e macrofibras de PP (grupo 5).



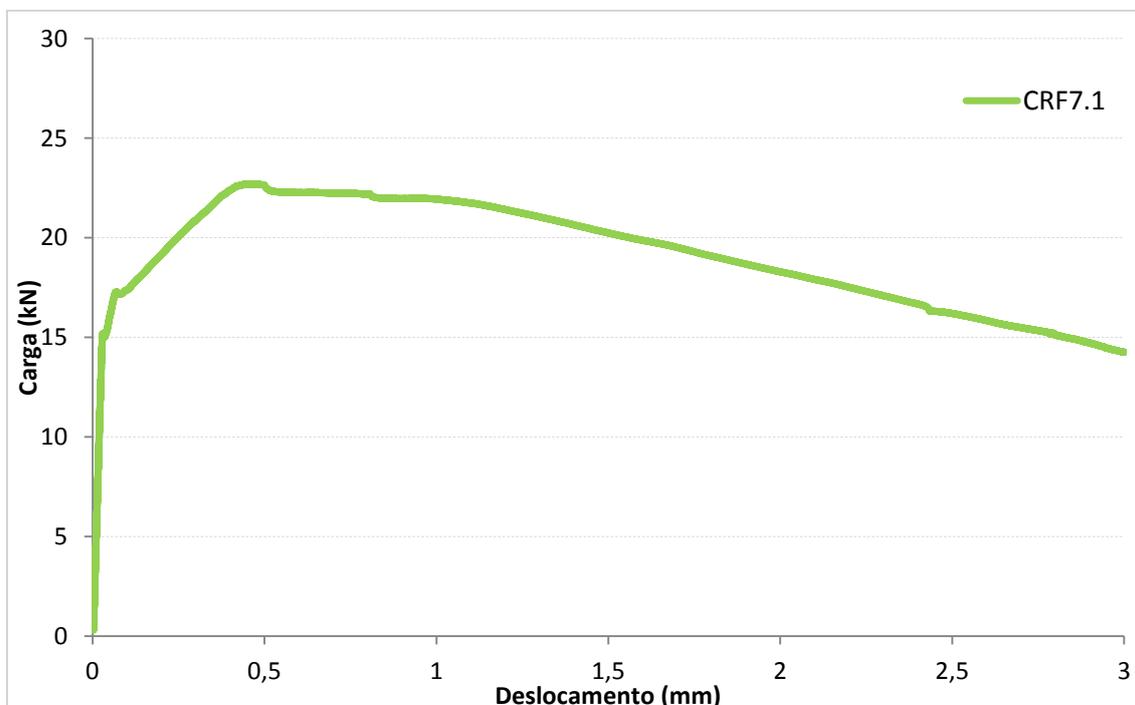
Fonte: Autor (2019).

Figura 5.15: Curva carga *versus* deslocamento vertical para CRF com fibras de aço, micro e macrofibras de PP (grupo 6).



Fonte: Autor (2019).

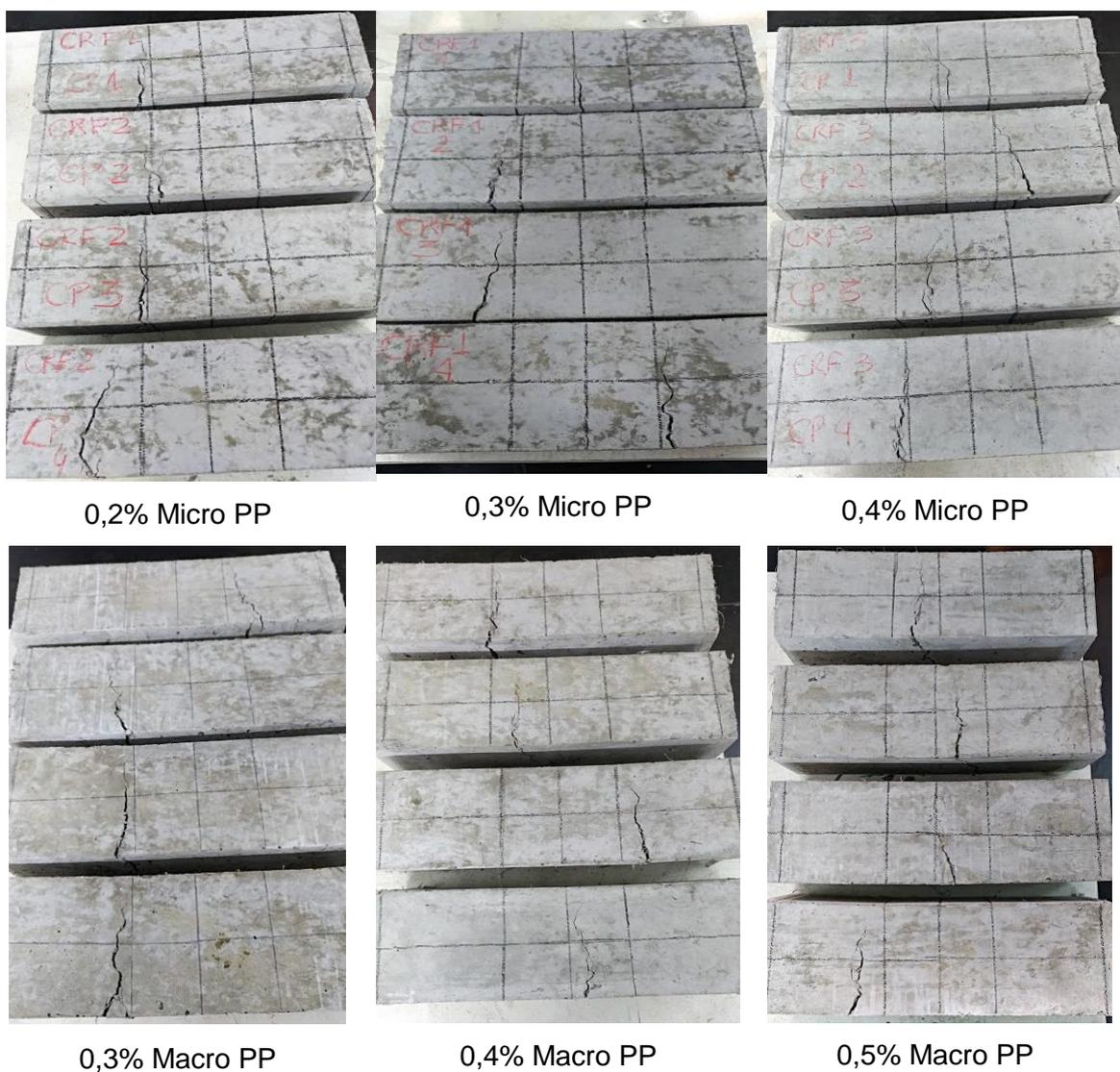
Figura 5.16: Curva carga *versus* deslocamento vertical para CRF com fibras de aço, micro e macrofibras de PP (grupo 7).



Fonte: Autor (2019).

Em todos os grupos a ruptura ocorreu devido ao aparecimento de uma única fissura, ou seja, não foi verificada a formação de múltiplas fissuras. A Figura 5.17 mostra como ocorreu à ruptura em cada um dos corpos de prova. Percebeu que o aumento gradual no teor de fibras resulta em uma fissura com abertura menor, isso pode ser explicadas que com o aumento no volume de fibras no interior da matriz as pontes de transferência se tornam mais efetivas, dissipando assim a energia das tensões de tração.

Figura 5.17: Ruptura dos corpos de prova submetidos ao ensaio de flexão.





0,2% MiPP + 0,3% MaPP



0,2% MiPP + 0,4% MaPP



0,2% MiPP + 0,5% MaPP



0,3% MiPP + 0,3% MaPP



0,3% MiPP + 0,4% MaPP



0,3% MiPP + 0,5% MaPP



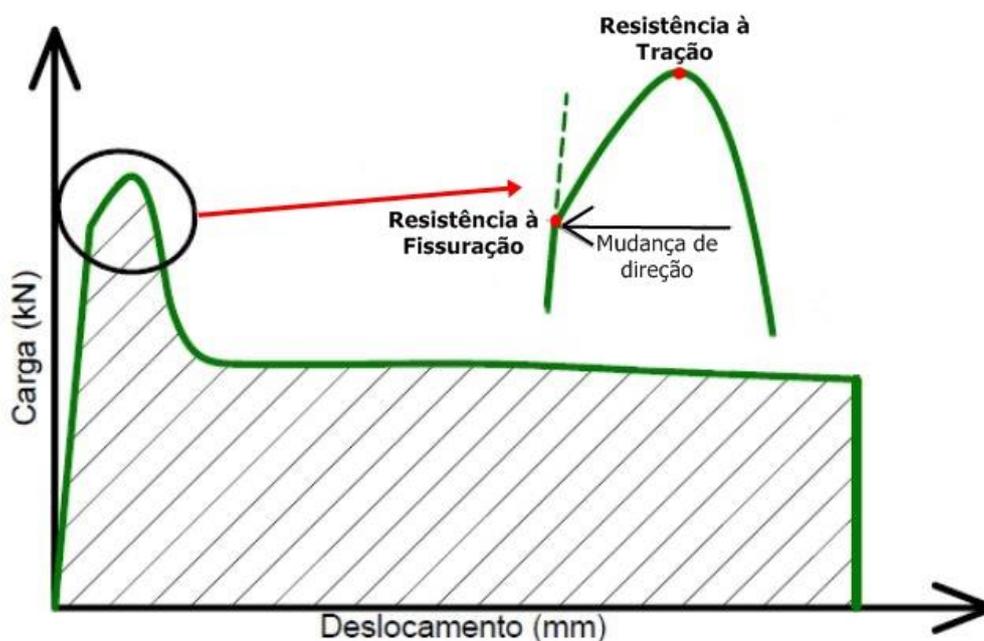
0,4% MiPP + 0,2% MaPP

#### 5.4.1 Resistência à Fissuração e Tração na Flexão

A resistência à fissuração ( $f_{cr}$ ) refere-se à carga máxima compreendida no final do trecho reto elástico da curva carga-deslocamento e relaciona-se com a capacidade mecânica do concreto em absorver as tensões desenvolvidas.

A JSCE-SF4 (1984) define a resistência à tração por flexão ( $\sigma_b$ ) àquela obtida a partir do valor da máxima carga em que o corpo de prova foi submetido. Esses dois parâmetros de resistência podem ser vistos através da Figura 5.18.

Figura 5.18: Identificação da Resistência à fissuração e à Tração através da curva carga-deslocamento.



Fonte: Autor (2019).

Segundo a JSCE SF4 (1984) a tração à flexão é determinada conforme a Equação 5.1.

$$\sigma_b = \frac{P \cdot L}{b \cdot h^2} \quad \text{Equação 5.1}$$

Onde:

$\sigma_b$ : resistência à flexão (MPa);

$P$ : carga máxima obtida durante o ensaio (N);

$L$ : vão livre do corpo de prova (mm);

$b$ : dimensão da base do corpo de prova (mm);

$h$ : dimensão da altura do corpo de prova (mm).

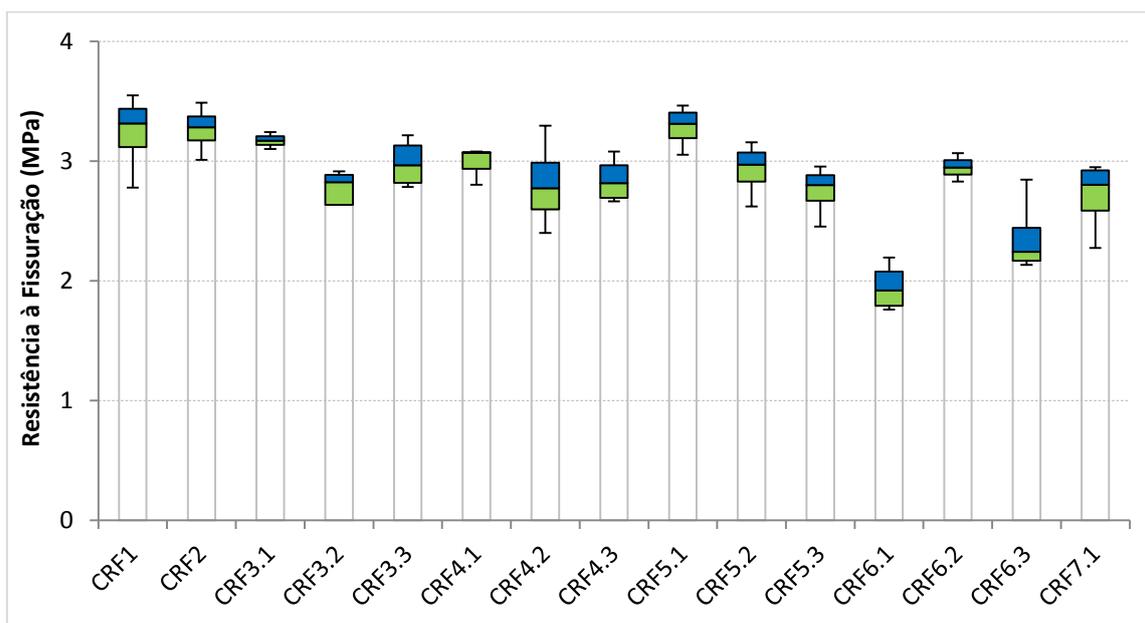
Os resultados para os dois parâmetros de avaliação à flexão dos CRF's está mostrado na Tabela 5.5. A Figura 5.19 e a Figura 5.20 mostram a dispersão dos resultados para a tensão de fissuração e tração à flexão, respectivamente.

Tabela 5.5: Resistência à fissuração e a tração na flexão para os CRF's estudados.

GRUPO	CRF	Resistência à Fissuração (MPa)		Resistência à Tração (Mpa)		Relação entre $\sigma_b$ e $f_{cr}$ (%).
		$f_{cr}$	Desv. Pad.	$\sigma_b$	Desv. Pad.	
1	CRF1	3,24	0,33	3,24	0,33	0,00
2	CRF2	3,27	0,20	3,49	0,36	6,81
3	CRF3.1	3,17	0,07	2,88	0,96	-9,32
	CRF3.2	2,69	0,32	2,92	0,56	8,25
	CRF3.3	2,98	0,21	3,17	0,41	6,20
4	CRF4.1	2,98	0,16	3,04	0,14	1,93
	CRF4.2	2,81	0,38	3,05	0,24	8,66
	CRF4.3	2,84	0,20	3,07	0,08	7,84
5	CRF5.1	3,28	0,18	3,82	0,50	16,33
	CRF5.2	2,93	0,23	3,02	0,25	3,16
	CRF5.3	2,75	0,22	2,98	0,37	8,18
6	CRF6.1	1,95	0,20	1,98	0,20	1,77
	CRF6.2	2,95	0,17	3,04	0,14	3,20
	CRF6.3	2,37	0,33	2,45	0,32	3,35
7	CRF7.1	2,71	0,31	3,22	0,70	18,99

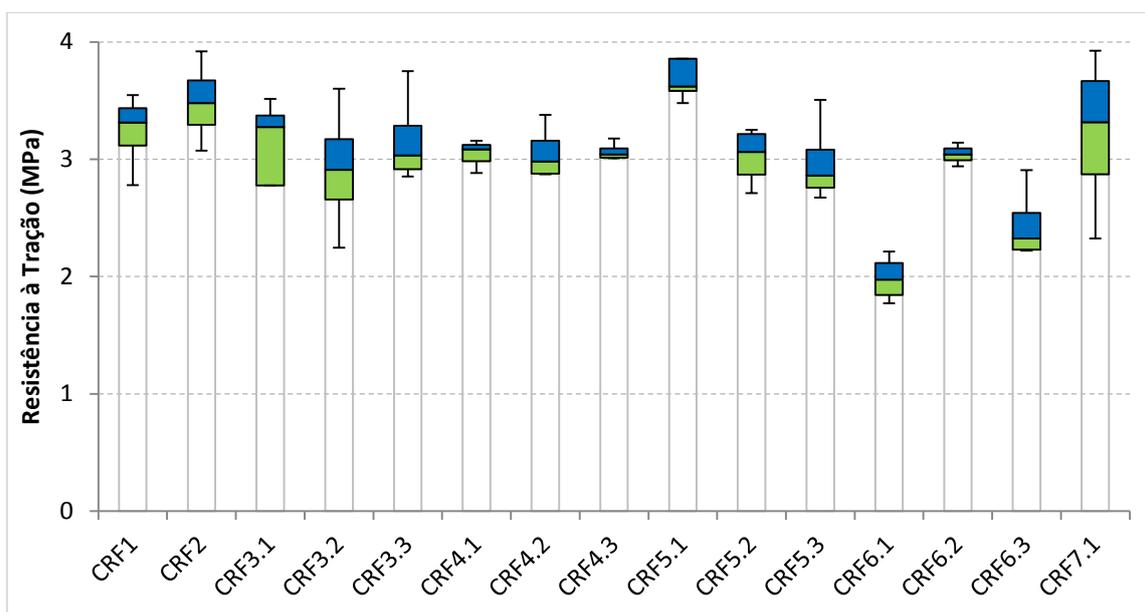
Fonte: Autor (2019).

Figura 5.19: Resistência à fissuração dos CRF's.



Fonte: Autor (2019).

Figura 5.20: Resistência à tração dos CRF's.



Fonte: Autor (2019).

Quando se comparou a relação entre resistência à tração e a resistência à fissuração ( $\sigma_b/f_{cr}$ ) dos grupos 3 e 4 notou-se que em todos os casos, exceto para o CRF3.1, houve um incremento de tensão propiciado pelas adição de fibras à matriz, porém esse incremento de tensão foi inferior a 10%. Considerando a variação nos

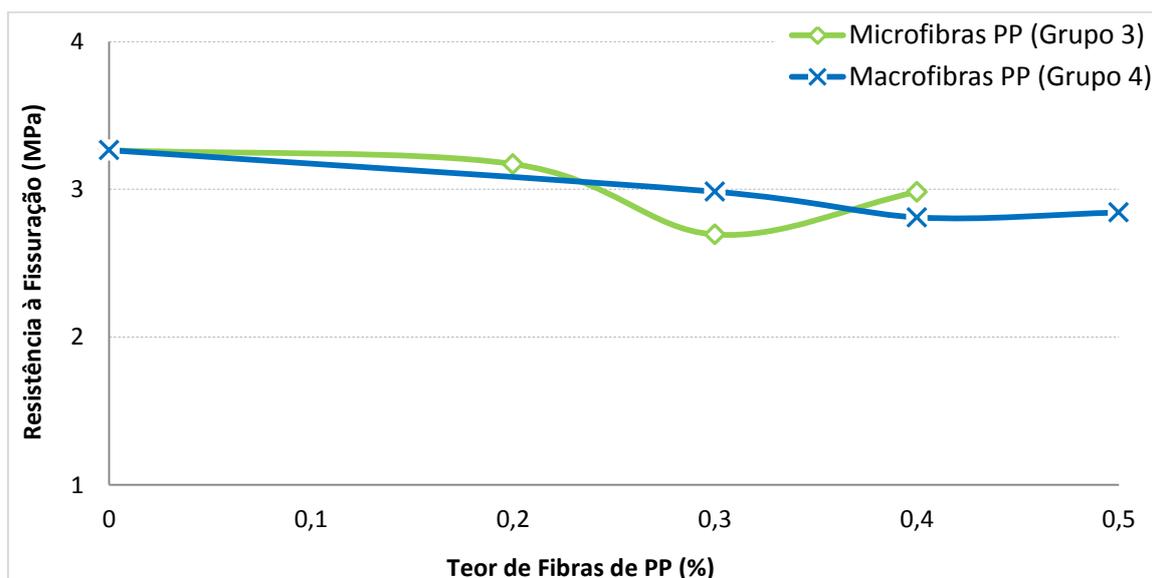
resultados, pode-se dizer que as fibras não configuraram uma melhora significativa na resistência à tração pós-fissuração dos CRF.

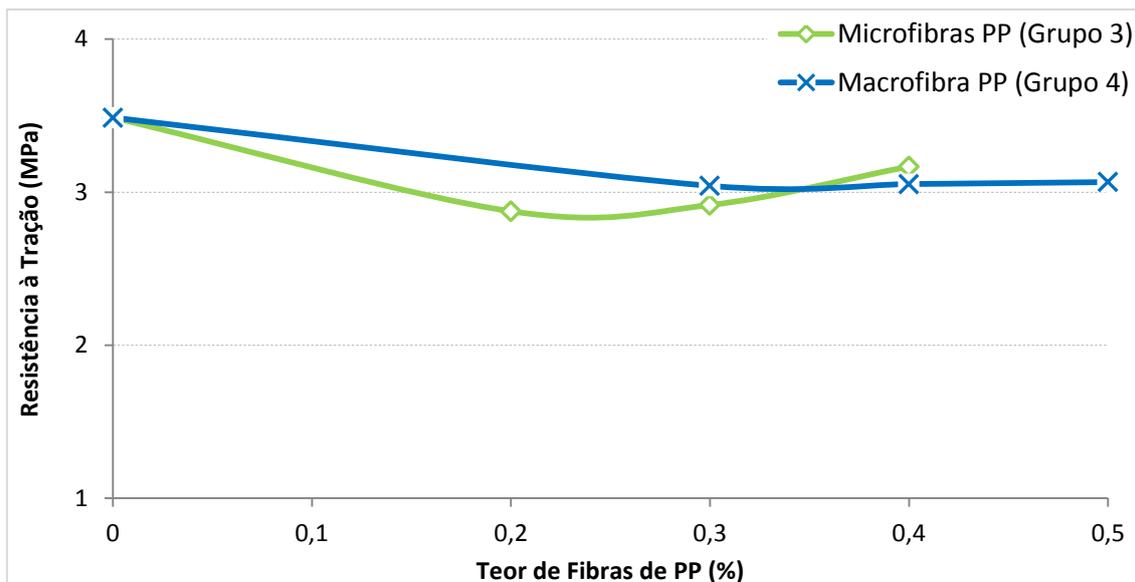
Para o CRF2 tanto a resistência à fissuração quanto à tração sofreram uma leve alta ao se comparar com o concreto de referência, de 0,98% e 7,13% respectivamente.

Em relação à resistência à fissuração para o grupo 3, observou-se no geral uma queda nos valores obtidos. A diminuição mais expressiva ocorreu para o teor de 0,3% de microfibras, sendo 20,44% inferior em comparação ao concreto de referência. O grupo 4 também ocorreu tendência de queda, no entanto, o comportamento observado é mais estável com o aumento no teor de macrofibras. Para esse grupo o pior caso observado foi para o teor de 0,4%, sendo 15,30% inferior ao concreto de referência (Figura 5.21a).

Para o grupo 3, no geral, observou-se um aumento na resistência à tração com o aumento no teor de microfibras adicionadas. Para o grupo 4 notou-se uma estabilização nos valores com o aumento no teor das macrofibras, ou seja, um maior volume de fibras nesse caso não configurou melhoras em termos de tração para os corpos de prova (Figura 5.21b).

Figura 5.21: Influência do teor de fibras na resistência a) fissuração. b) tração na flexão (grupo 3 e 4).





Fonte: Autor (2019).

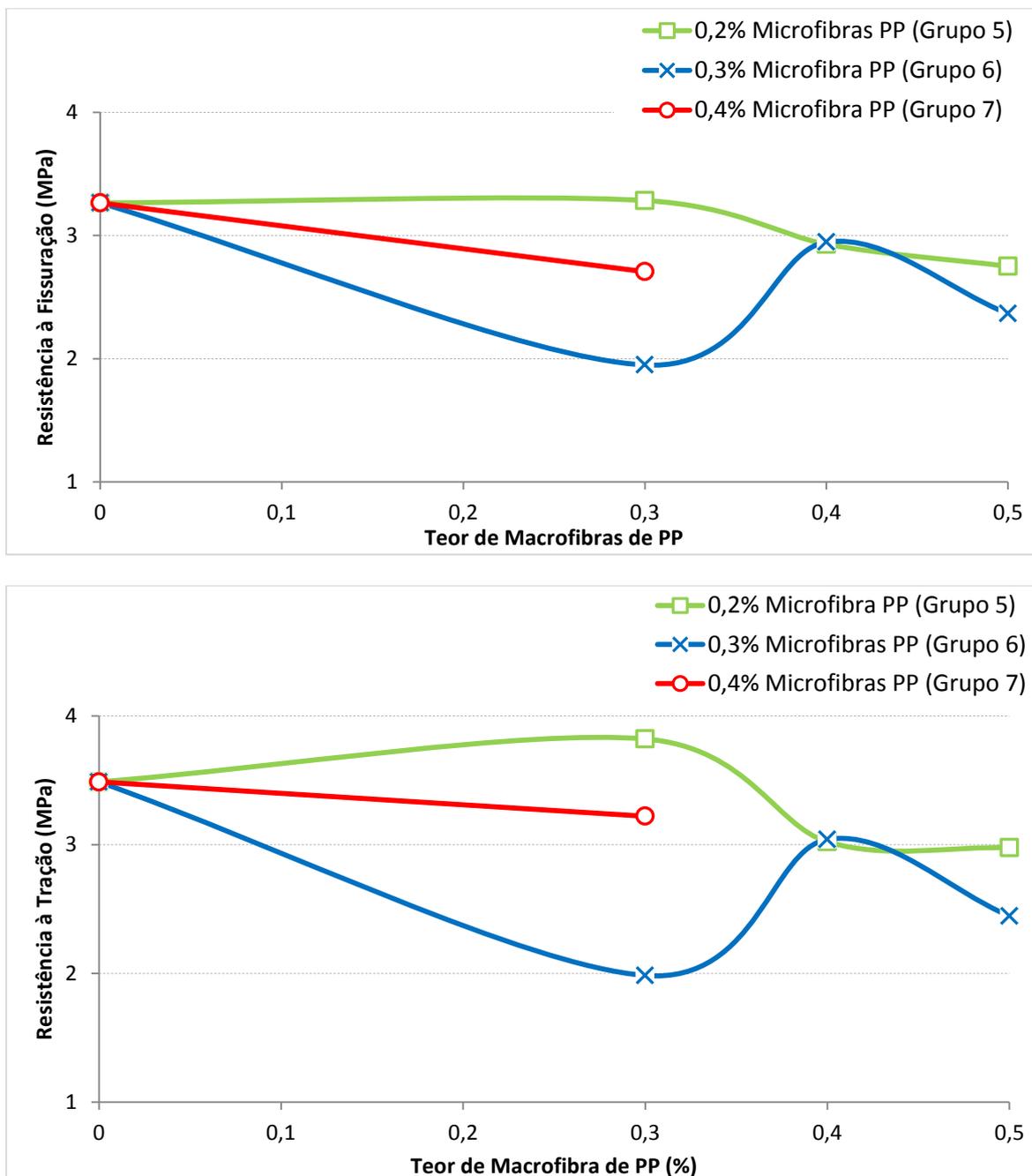
A relação entre resistência à tração e a resistência à fissuração ( $\sigma_b/f_{cr}$ ) para os grupos 5, 6 e 7 é bastante semelhante ao verificado nos grupos anteriores, com um aumento inferior a 10% no geral. No entanto, para o CRF5.1 e CRF7.1 observou-se ganhos mais expressivos, em torno de 16% e 19% respectivamente na resistência à tração.

Em relação aos grupos onde insere a fibra de aço juntamente com as fibras de PP o maior resultado observado foi para o CRF5.1. Considerando a resistência à fissuração o aumento é cerca de 1,23% e para a resistência à tração foi de 17,90% em relação a matriz sem fibras. Para os demais CRF do grupo 5 o aumento no teor de macrofibras configurou uma queda nos valores.

O menor resultado observado foi para o CRF6.1, com uma queda de 66,15% e 63,63% na resistência à fissuração e a tração respectivamente. Para o grupo 6 o aumento no teor de macrofibras configura uma melhora nos resultados, no mesmo patamar observado para o CRF5.2.

A Figura 5.22 mostra o comportamento da resistência à fissuração e a tração respectivamente dos grupos comentados.

Figura 5.22: Influência do teor de fibras na resistência à a) fissuração. b) tração na flexão (grupo 5,6 e 7).



Fonte: Autor (2019).

Como visto acima, em poucos casos houve uma melhora na resistência à fissuração e a tração dos CRF's, sendo observada uma ligeira alta ou nenhuma alteração quando comparada a matriz sem fibras. Bentur e Mindess (2005) comentam que a adição de fibras no concreto não é necessariamente para melhorar a sua

resistência, mas sim principalmente para melhorar a tenacidade, ou capacidade de absorção de energia.

#### 5.4.2 Fator de Tenacidade e Resistência Equivalente à Flexão

A principal função na adição de fibras é promover o aumento da tenacidade do concreto. Com isso através da curva carga-deslocamento é possível determinar o fator de tenacidade ( $\overline{\sigma}_b$ ) do CRF. Tal fator é obtido através da determinação da tenacidade ( $T_b$ ), compreendida como a área total abaixo da curva carga-deslocamento até a deflexão equivalente a  $L/150$  ( $\delta_{tb} = 3$  mm). Segundo a JSCE SF-4 (1984) o fator de tenacidade é obtido conforme a Equação 5.2.

$$\overline{\sigma}_b = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \cdot \frac{L}{b \cdot h^2} \quad \text{Equação 5.2}$$

Onde:

$\overline{\sigma}_b$ : fator de tenacidade à flexão (MPa);

$T_b$ : tenacidade à flexão, compreendida como área abaixo da curva até o limite de  $L/150$  (N.mm);

$\delta_{tb}$ : deslocamento vertical equivalente a  $L/150$  (mm);

$L$ : vão livre do corpo de prova (mm);

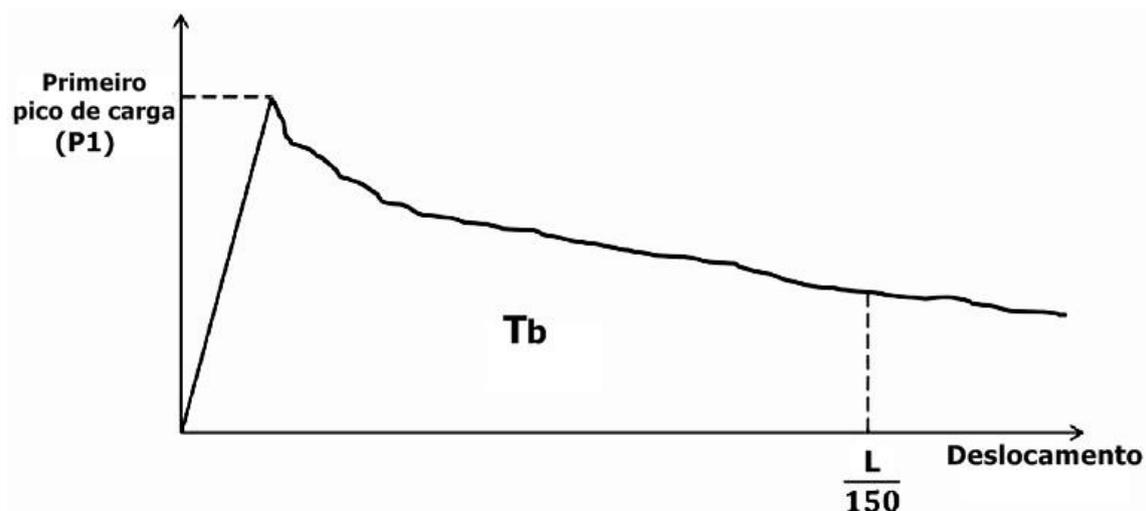
$b$ : dimensão da base do corpo de prova (mm);

$h$ : dimensão da altura do corpo de prova (mm).

Segundo Lee et. al. (2017) o desempenho da tração à flexão do CRF é comumente avaliado usando a relação de resistência equivalente à flexão ( $R_{e,3}$ ). É determinada conforme a relação entre a tenacidade ( $T_b$ ) até uma deflexão de  $L/150$  com a primeira carga de pico ( $P_1$ ) referente à carga de fissuração da matriz conforme mostra a Figura 5.23.

Com isso, a partir das curvas de carga-deslocamento obtidas, o valor de  $R_{e,3}$  pode ser calculado conforme a Equação 5.4.

Figura 5.23: Definição do primeiro pico de carga e tenacidade a partir de uma curva típica de carga por deslocamento.



Fonte: Adaptado de Lee et. al. (2017).

$$R_{e,3} = \frac{T_b}{P_1 \cdot \delta_{L/150}} \quad \text{Equação 5.3}$$

Onde:

$R_{e,3}$ : resistência equivalente à flexão;

$T_b$ : tenacidade à flexão, compreendida como área abaixo da curva até o limite de  $L/150$  (N.mm);

$P_1$ : primeiro pico de carga (N);

$\delta_{tb}$ : deslocamento vertical equivalente a  $L/150$  (mm).

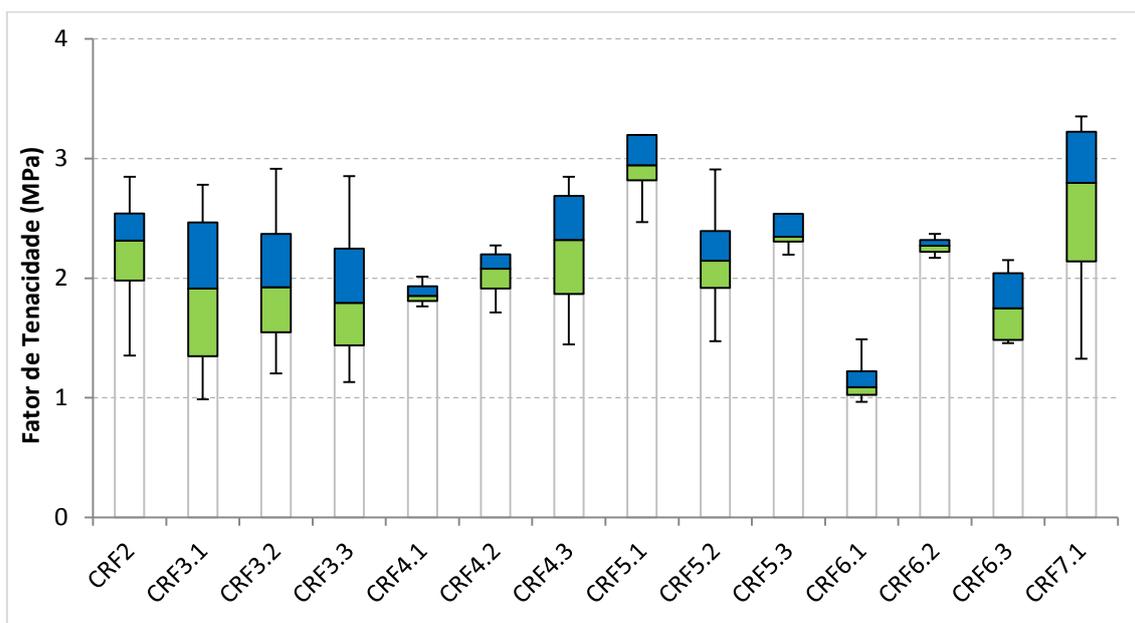
Os resultados para os dois parâmetros descritos estão mostrados na Tabela 5.6. A Figura 5.24 e a Figura 5.25 mostram a dispersão dos resultados (*boxplot*) para o fator de tenacidade e resistência equivalente à flexão, respectivamente.

Tabela 5.6: Fator de tenacidade e resistência à flexão equivalente.

GRUPO	CRF	Fator de Tenacidade (MPa)		Resistência Equivalente à Flexão	
		$\overline{\sigma_b}$	Desv. Pad.	$R_{e,3}$	Desv. Pad.
1	CRF1	-	-	-	-
2	CRF2	2,21	0,63	0,67	0,18
3	CRF3.1	1,90	0,82	0,69	0,20
	CRF3.2	1,99	0,73	0,73	0,21
	CRF3.3	1,89	0,74	0,63	0,22
4	CRF4.1	1,88	0,13	0,63	0,05
	CRF4.2	2,04	0,25	0,74	0,15
	CRF4.3	2,23	0,63	0,80	0,27
5	CRF5.1	3,07	0,61	0,94	0,21
	CRF5.2	2,17	0,59	0,73	0,16
	CRF5.3	2,50	0,41	0,91	0,12
6	CRF6.1	1,16	0,23	0,59	0,08
	CRF6.2	2,27	0,14	0,77	0,09
	CRF6.3	1,78	0,35	0,75	0,13
7	CRF7.1	2,57	0,92	0,93	0,25

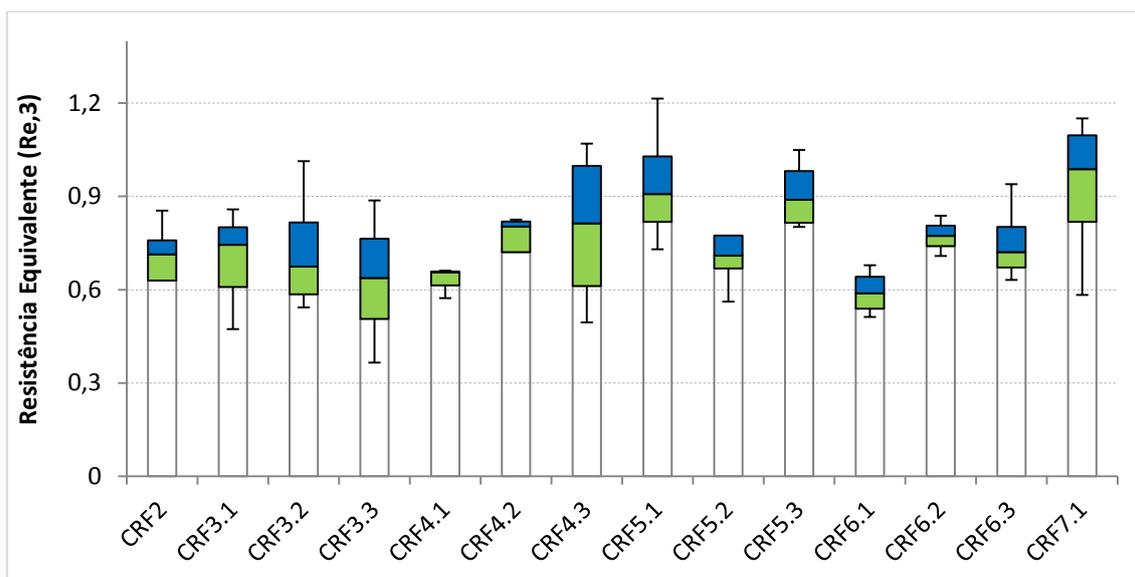
Fonte: Autor (2019).

Figura 5.24: Fator de tenacidade à flexão dos CRF's.



Fonte: Autor (2019).

Figura 5.25: Resistência equivalente à flexão dos CRF's.



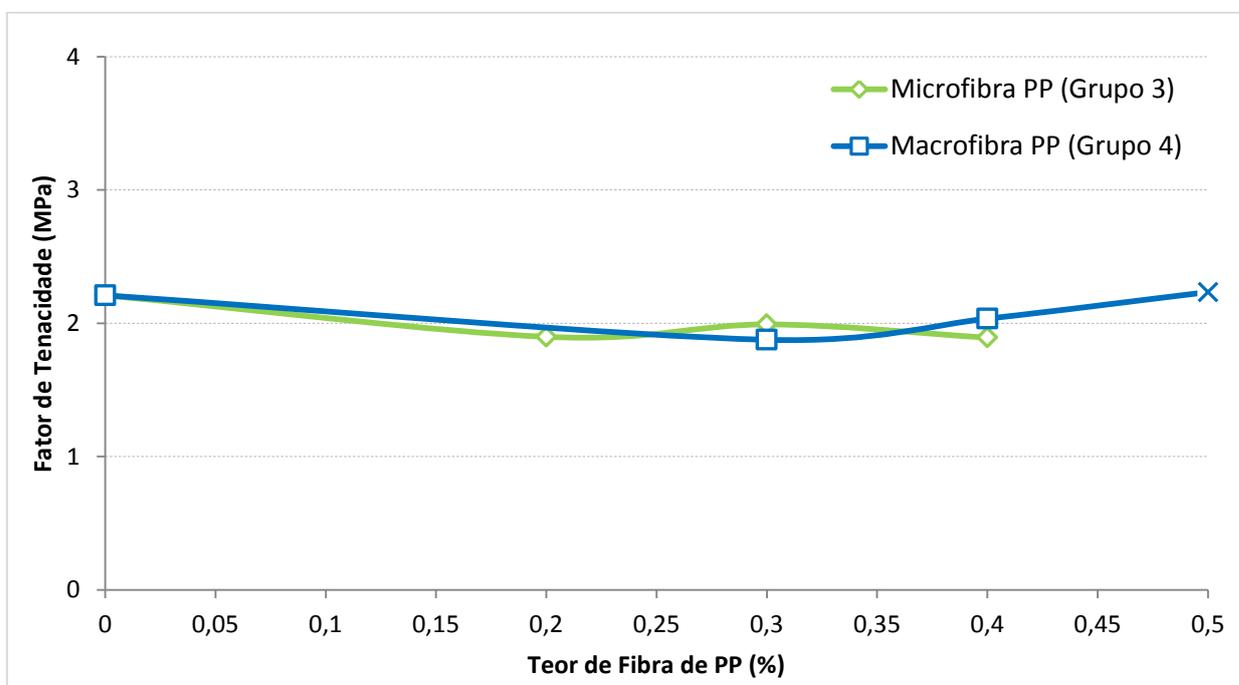
Fonte: Autor (2019).

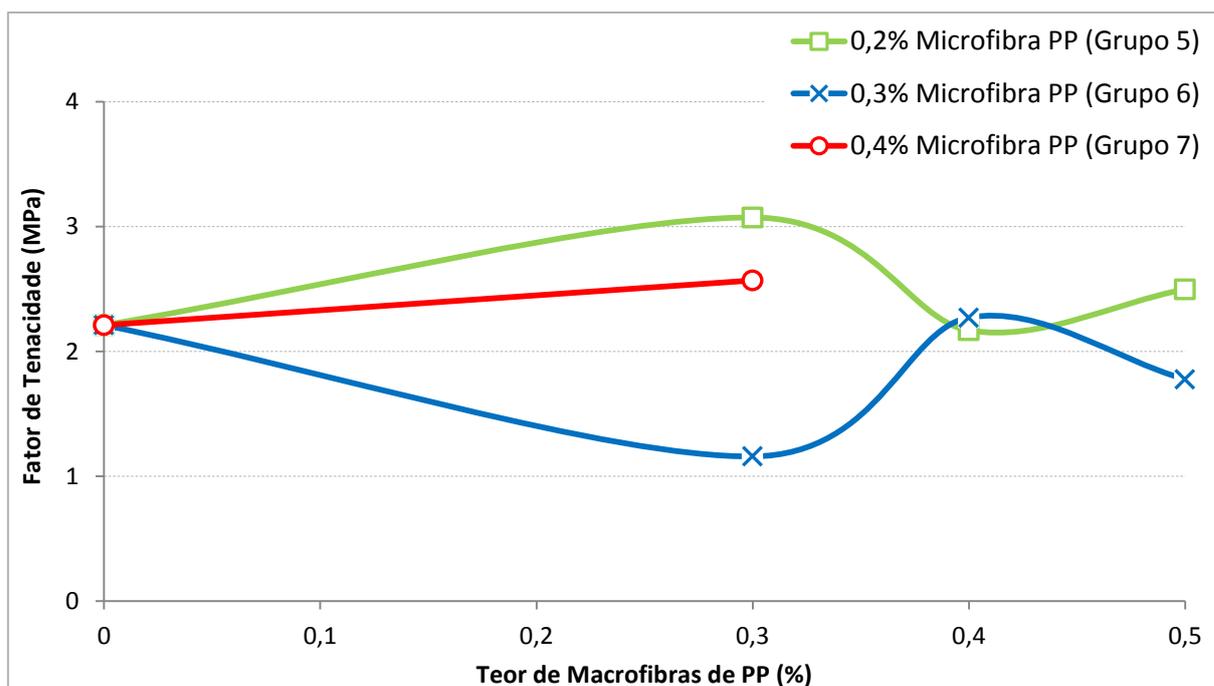
No grupo 3 ocorreu um ganho inicial no fator de tenacidade, porém o aumento do teor de microfibras a tendência foi de estabilização nos valores. Já o grupo 4 houve sempre um aumento no fator de tenacidade (Figura 5.26a). No entanto os valores observados nos dois casos são inferiores a aquele obtido para o CRF2.

O CRF5.1 obteve o maior resultado para o fator de tenacidade, cerca de 38,91% superior ao CRF2. Porém o aumento no teor das macrofibras de PP resultou em diminuição nos valores dentro desse grupo.

O CRF6.1 mostrou o menor resultado, com fator de tenacidade cerca de 90,51% inferior ao CRF2. Ainda no grupo 6, o aumento nas macrofibras conferiu um aumento nos resultados, especialmente para o CRF6.2 que obteve um fator de tenacidade equivalente ao CRF2. O CRF7.1 obteve um teor de tenacidade cerca de 16,28% superior ao CRF2 (Figura 5.26 b).

Figura 5.26: Influência do teor de fibras no fator de tenacidade. a) grupo 3 e 4. b) grupo 5,6 e 7.





Fonte: Autor (2019).

No geral, o fator de tenacidade obtido nessa pesquisa foram superiores aos encontrados por Oliveira (2018), onde o autor utilizou da hibridização entre micro e macrofibras de PP.

Vasconcelos (2012) caracterizou grupos de CRF reforçados apenas com fibras de aço e outro apenas com macrofibras de PP. Para o grupo apenas com as fibras de aço, os resultados dessa pesquisa foram inferiores aos atingidos pelo autor. No caso onde houve a inserção apenas das macrofibras, os resultados dessa pesquisa foram cerca de 34% superiores ao inserir juntamente as fibras de aço. Com isso, pode-se observar que a hibridização entre as duas fibras pode configurar uma melhora na tenacidade do material.

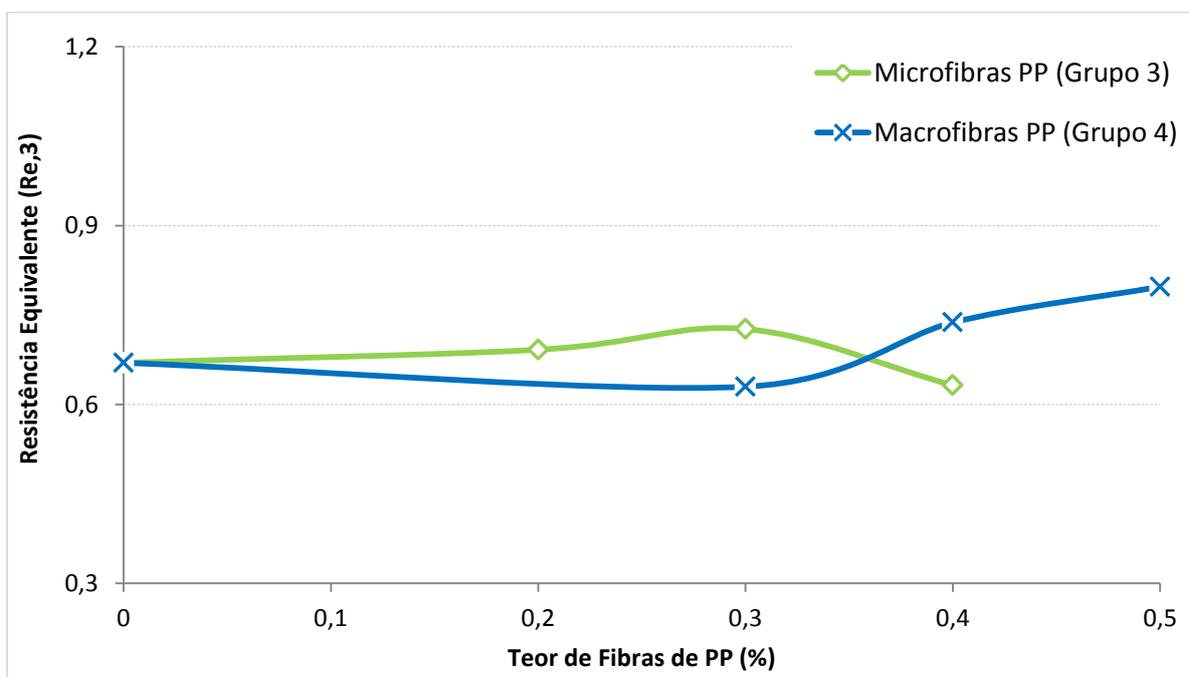
Lucena (2017) ao avaliar CRF apenas com microfibras de PP observou que o aumento nos teores resultou em um aumento na tenacidade do compósito. Nessa pesquisa com a mistura entre microfibra de PP e fibra de aço não percebeu-se essa tendência. O comportamento relatado pelo autor condiz com o observado para o grupo 4, onde utilizou-se a mistura entre macrofibra de PP e fibra de aço.

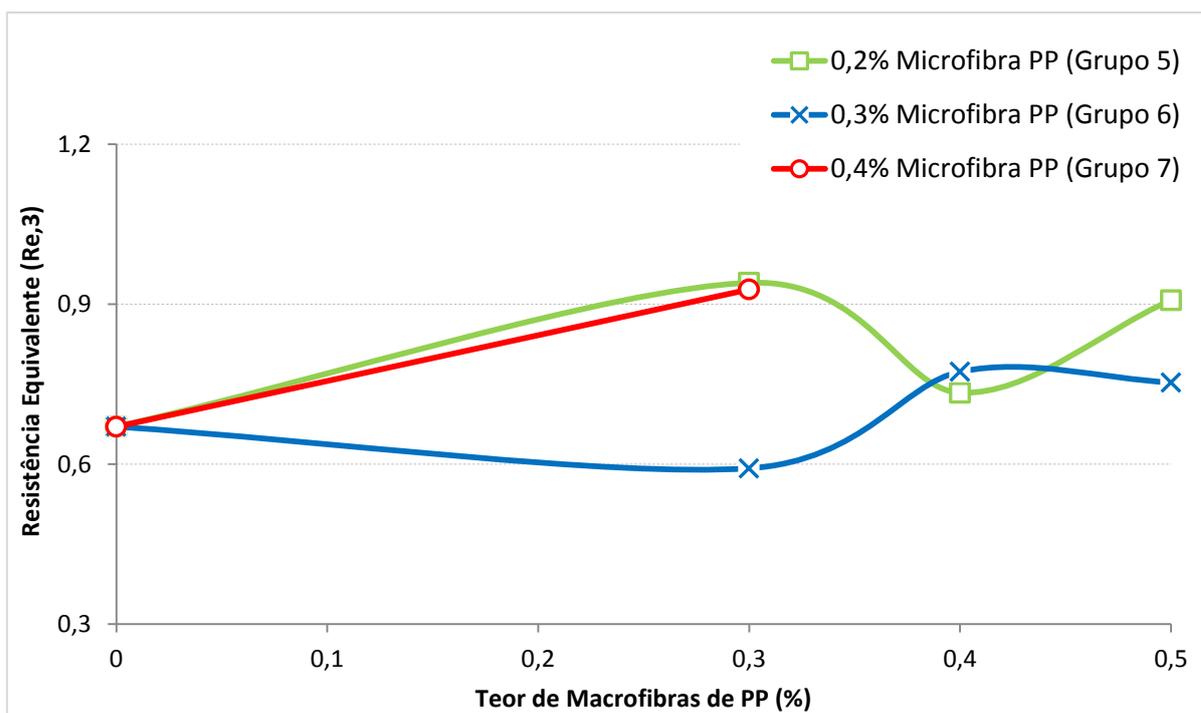
Em relação à resistência equivalente à flexão ( $R_{e,3}$ ) todos os CRF apresentaram comportamento satisfatório, pois a *Concrete Society* (2003) recomenda

que os valores devem ser superiores a 0,3 caso contrário, são classificados como concreto simples.

Assim como verificado no fator de tenacidade, a resistência equivalente observada para o grupo 4 apresenta resultados mais satisfatórios em relação ao grupo 3. O aumento gradativo no teor de macrofibra configura um aumento de  $R_{e,3}$ , comportamento inverso ao observado com o aumento do teor de microfibra, onde resulta em queda (Figura 5.27a). Novamente o CRF5.1 e CRF7.1 apresentaram os maiores resultados de  $R_{e,3}$ , cerca de 40,29% e 38,80% superiores ao CRF2, respectivamente (Figura 5.27b).

Figura 5.27: Influência do teor de fibras na resistência equivalente à tração. a) grupo 3 e 4. b) grupo 5,6 e 7.





Fonte: Autor (2019)

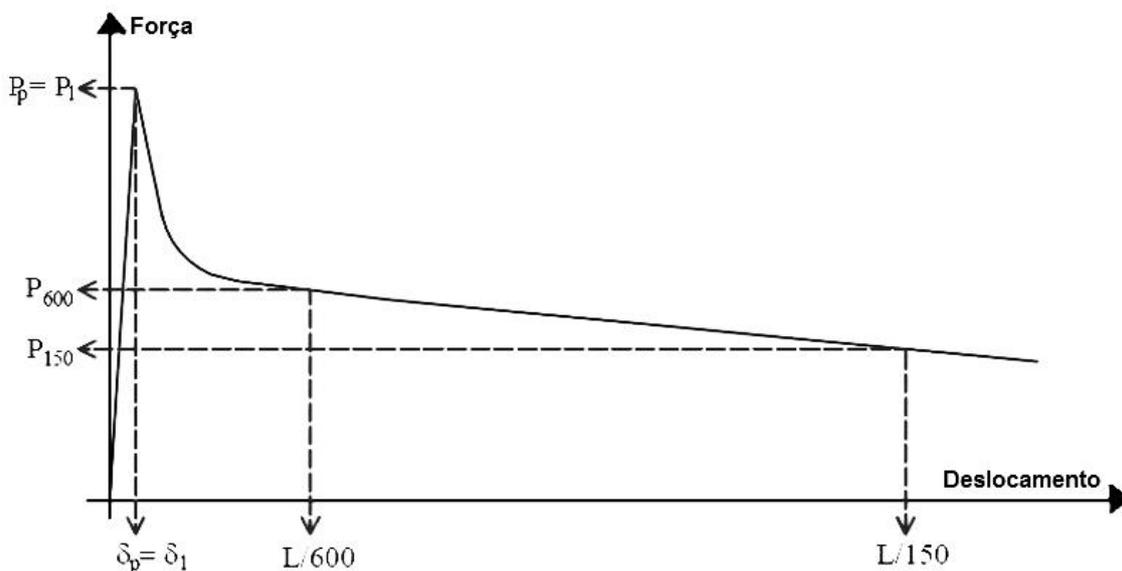
#### 5.4.3 Resistência Residual

A resistência residual permite descrever o comportamento pós-pico com a intenção de avaliar a capacidade de absorção de energia do CRF. Onde é capaz de se observar a deformação e o deslocamento das fibras em relação à matriz de concreto VASCONCELOS (2012).

A JSCE-SF4 (1984) não traz nenhuma abordagem em relação à resistência residual do CRF. Sendo assim, foi utilizado o procedimento descrito pela ASTM C1609 (2010) para avaliar a resistência residual quando o deslocamento do corpo de prova foi L/600 (0,75 mm) e L/150 (3 mm) conforme mostra a Figura 5.28.

Segundo Salvador (2013) em termos de projeto, a resistência residual referente ao deslocamento vertical de L/600 está relacionado com o estado limite de serviço (ELS) e para o deslocamento de L/150 ao estado limite último (ELU).

Figura 5.28: Definição de resistência residual conforme recomendado pela ASTM C1609 (2010).



Fonte: ASTM C1609 (2010).

A determinação das resistências residuais pode ser realizada através da Equação 5.4 e Equação 5.5.

$$f_{d,L/600} = P_{d,L/600} \cdot \frac{L}{b \cdot d^2} \quad \text{Equação 5.4}$$

$$f_{d,L/150} = P_{d,L/150} \cdot \frac{L}{b \cdot d^2} \quad \text{Equação 5.5}$$

Onde:

$f_{d,L/600}$  e  $f_{d,L/150}$ : resistências residuais para corpos de prova de altura  $d$ , quando o deslocamento vertical do corpo de prova for  $L/600$  e  $L/150$ , respectivamente (MPa);

$P_{d,L/600}$  e  $P_{d,L/150}$ : cargas residuais para os corpos de prova de altura  $d$ , quando o deslocamento vertical do corpo de prova for  $L/600$  e  $L/150$ , respectivamente (N);

$L$ : vão do ensaio (mm);

$b$ : largura do corpo de prova (mm)

$d$ : altura do corpo de prova (mm)

O resultado para as resistências residuais dos CRF's está mostrado na Tabela 5.7.

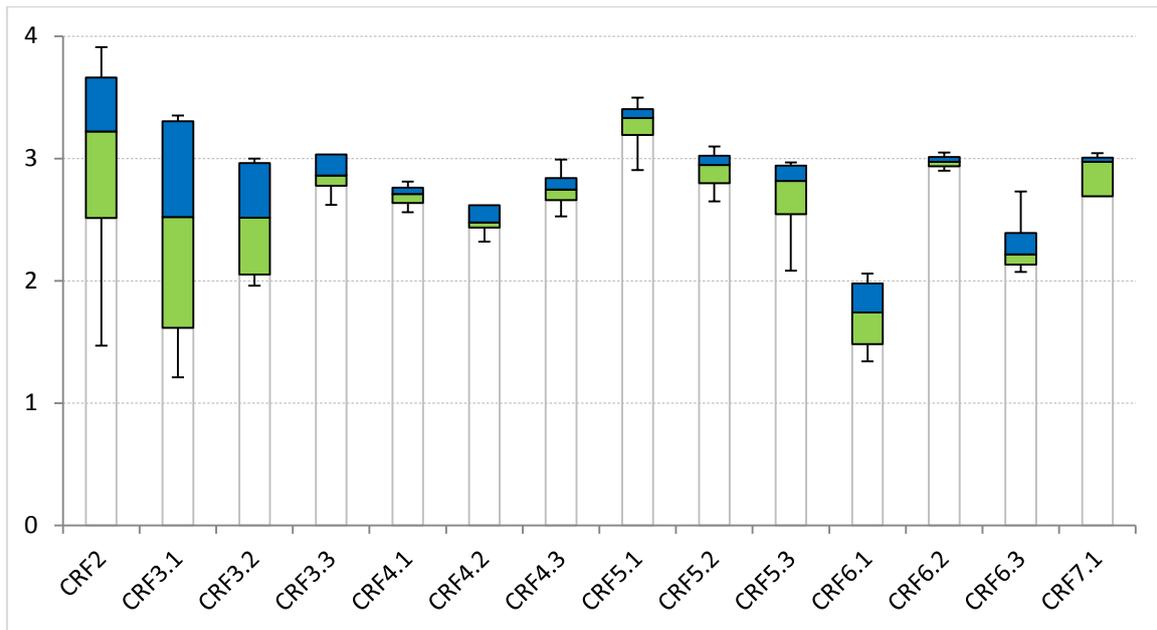
Tabela 5.7: Resultados para resistência residual para deslocamento L/600 e L/150.

GRUPO	CRF	Resistência Residual L/600 (MPa)		Resistência Residual L/150 (MPa)		Dif % entre $f_{d,L600}$ e $f_{d,L150}$
		Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	
1	CRF1	-	-	-	-	
2	CRF2	2,96	1,08	1,44	0,48	-51,27
	CRF3.1	2,40	1,09	1,19	0,53	-50,42
3	CRF3.2	2,50	0,55	1,38	0,60	-44,64
	CRF3.3	2,95	0,36	1,21	0,52	-59,15
	CRF4.1	2,69	0,13	1,28	0,06	-52,35
4	CRF4.2	2,57	0,31	1,72	0,54	-33,26
	CRF4.3	2,75	0,19	1,79	0,66	-35,02
	CRF5.1	3,27	0,25	2,23	0,68	-31,69
5	CRF5.2	2,90	0,23	1,68	0,58	-41,99
	CRF5.3	2,67	0,41	2,01	0,41	-24,88
	CRF6.1	1,72	0,34	0,90	0,17	-47,53
6	CRF6.2	2,97	0,11	1,65	0,23	-44,42
	CRF6.3	2,31	0,29	1,39	0,30	-39,76
7	CRF7.1	2,72	0,54	1,90	0,82	-30,25

Fonte: Autor (2019).

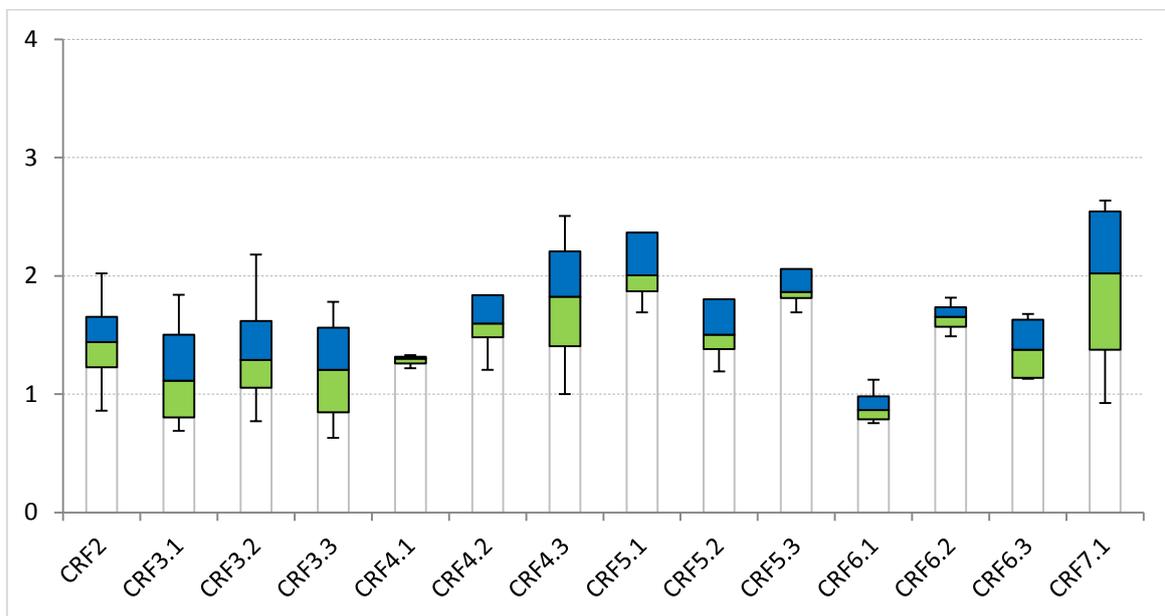
A dispersão dos resultados está mostrada na Figura 5.29 e na Figura 5.30, para as resistências residuais para deslocamento de L/600 e L/150, respectivamente. Nota-se que a dispersão nos valores tende a ser menor do que a verificada para o fator de tenacidade, por exemplo.

Figura 5.29: Resistência residual para deslocamento L/600.



Fonte: Autor (2019).

Figura 5.30: Resistência residual para deslocamento L/150.



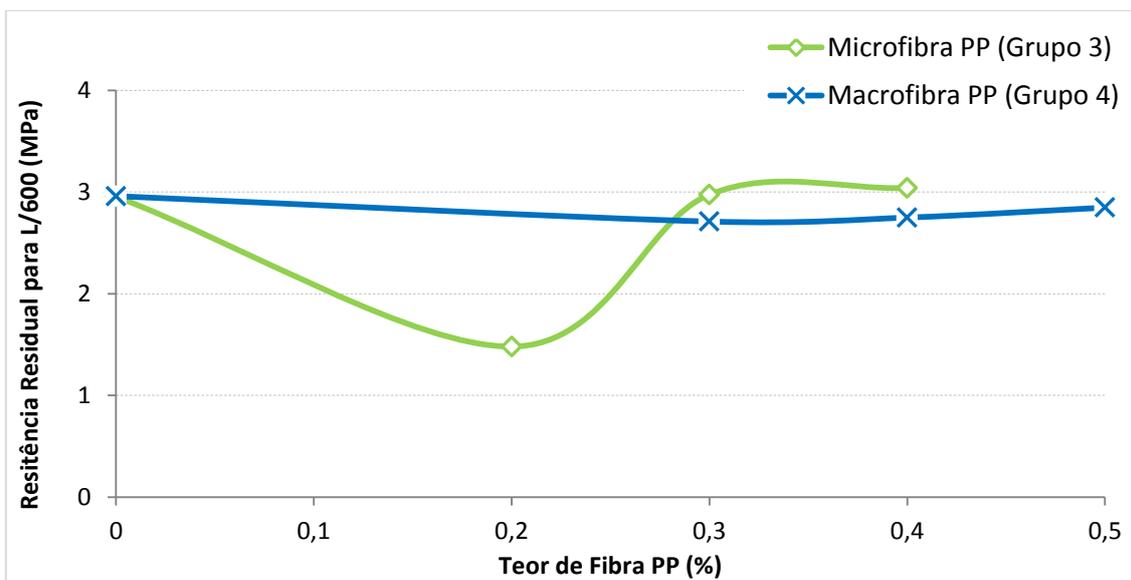
Fonte: Autor (2019).

Através da .Figura 5.31 (a) percebeu que a resistência residual para L/600 (0,75 mm) convergiu para um mesmo valor para os dois grupos avaliados, com exceção do CRF3.1. No entanto os valores obtidos são ligeiramente inferiores em

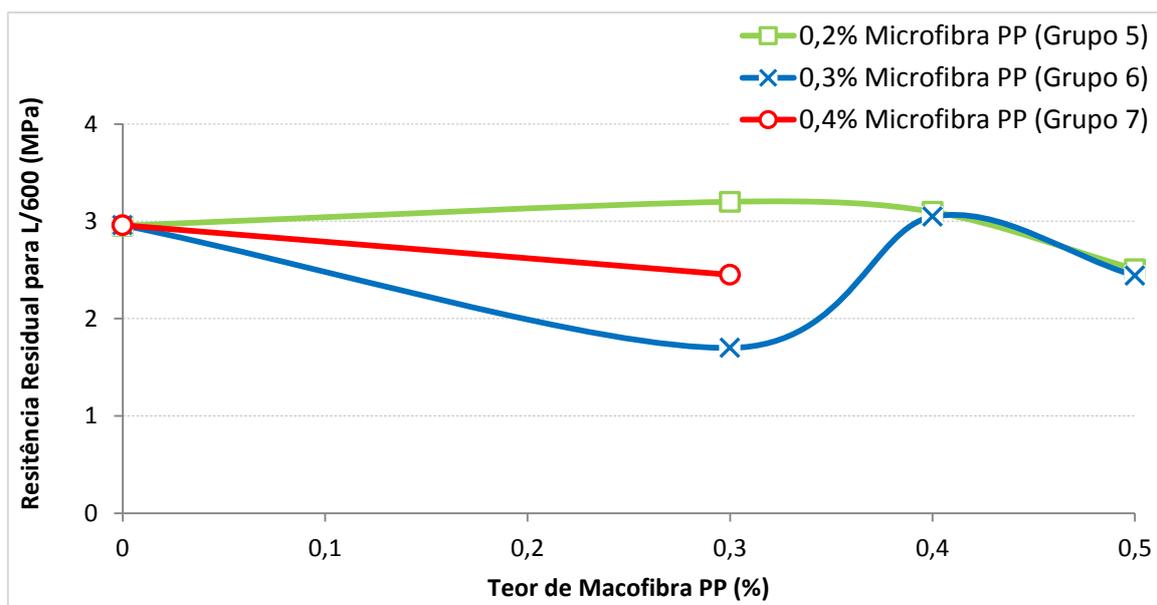
comparação ao CRF2. Tal fato corrobora com a literatura, pois a fibra de aço confere uma maior resistência residual para menores deslocamentos devido ao seu alto módulo de elasticidade e também pelo grau do dano gerado na matriz ser pequeno, deixando a fibra ainda mais ancorada.

Já na .Figura 5.31 (b) o CRF5.1 possui o maior valor entre todos os CRF's avaliados (10,47% superior ao CRF2), no entanto assim como observado no fator de tenacidade o aumento no teor de macrofibras resulta em redução de resistência. O CRF6.1 possui a menor resistência verificada em todos grupos (72,09% inferior ao CRF2), quando aumentou-se o teor de macrofibras o comportamento se aproxima ao verificado para o grupo 5. Já o CRF7.1, que de todos os grupos avaliados possui a maior taxa de fibras inseridas, possui um comportamento intermediário entre o grupo 5 e 7.

.Figura 5.31: Influência do teor de fibras na resistência residual para L/600. a) grupo 3 e 4. b) grupo 5,6 e 7.



(a)

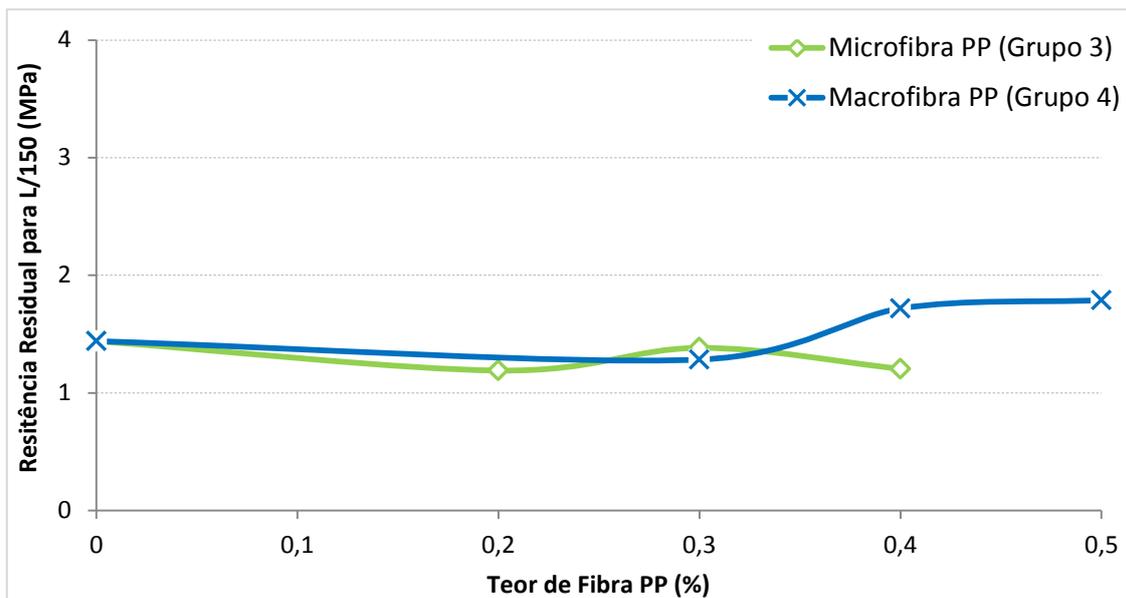


(b)

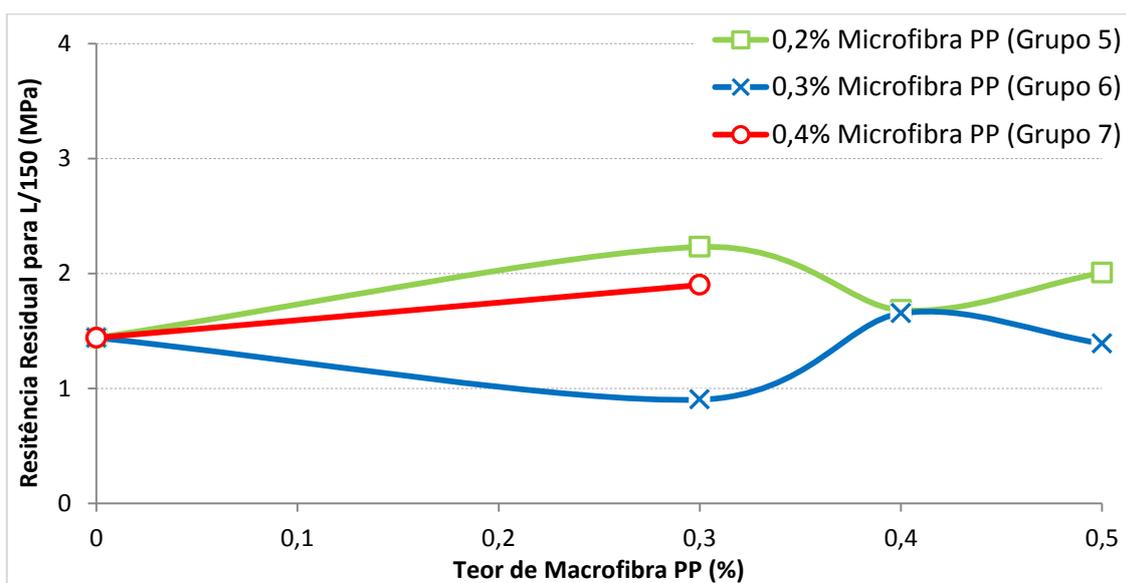
Na resistência residual referente ao deslocamento de L/150 (3 mm) verificou-se que os valores obtidos para o grupo 3 foram ligeiramente inferiores em comparação com o CRF2. No entanto, nota-se valores superiores para o grupo 4, onde há a inserção das macrofibras de PP (Figura 5.32 a)

O CRF5.1 apresentou o maior valor de resistência residual para L/150 (54,86% superior a CRF2). O grupo 6 observou-se uma tendência de aumento de resistência seguido de uma estabilização nos valores e apresenta, através do CRF6.1 o menor valor de resistência verificado, cerca de 60% inferior ao CRF2 (Figura 5.32 b).

Figura 5.32: Influência do teor de fibras na resistência residual para L/150. a) grupo 3 e 4. b) grupo 5,6 e 7.



(a)



(b)

Salvador (2013) ao avaliar compósitos reforçados apenas com macrofibra de PP percebeu em seus resultados que a resistência residual em L/150 eram superiores ao verificado para o deslocamento de L/600, conferindo assim um comportamento dito *slip-hardening*.

Tal fato não foi verificado nessa pesquisa onde, no geral, a resistência para o deslocamento de L/150 foi inferior àquela observada para o deslocamento de L/600. Sendo assim pode-se definir que em todos os casos houve um comportamento *slip-*

*softening* no trecho pós-fissuração. Uma das explicações pode ser a hibridização com a fibra de aço, que por característica não possui uma boa resistência para maiores deslocamentos devida, principalmente, ao seu deslizamento.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões obtidas a partir dos ensaios para caracterização no estado fresco e os ensaios para avaliação das propriedades mecânicas das amostras de concreto reforçado com conteúdo híbrido de fibras, contendo fibras de aço e fibras de PP.

Considerou-se no geral que os objetivos propostos nessa pesquisa foram atingidos, ao avaliar e analisar os resultados nos ensaios de compressão axial, módulo de elasticidade estático e dinâmico e as propriedades mecânicas à flexão, entre elas: resistência à fissuração e tração, fator de tenacidade, resistência equivalente e resistências residuais.

Em relação ao estado fresco concluiu-se que a adição de fibras afeta a consistência da mistura diminuindo assim a sua trabalhabilidade. Tal fato foi observado em todos os casos onde as microfibras de PP promovem uma diminuição na trabalhabilidade muito superior em comparação com as macrofibras. Nos CRF com conteúdo híbrido entre as fibras de aço e de PP o comportamento é o mesmo. No entanto, ao adicionar aditivo à mistura notou-se um aumento significativo na trabalhabilidade, apenas em dois casos não observou-se essa melhora. O aditivo promoveu uma boa capacidade de adensamento da mistura onde, em nenhum dos casos, foi verificado nichos de concretagem ou comprometimento da qualidade dos corpos de prova.

A incorporação das fibras reduziu a resistência à compressão do CRF em todos os casos, em comparação ao concreto sem fibras. Nos grupos onde se inseriu as micro e macrofibras de PP, o aumento gradativo no teor de fibras não diminuiu a resistência à compressão, com valores estáveis. Já nos grupos onde incorporou-se fibras de aço e PP o aumento gradativo na proporção de macrofibra no CRF promoveu perdas consideráveis nessa propriedade.

Em percentual, os CRF que apresentaram melhor desempenho foram àquele reforçado apenas com fibra de aço (redução de 5,18%) e onde inseriu as fibras de aço juntamente com 0,2% micro + 0,3% macrofibra PP (redução de 6,37%). Já os piores desempenhos foram observados onde inseriu fibras de aço com 0,3% micro + 0,3% macrofibra (redução de 56,65%) e àquele com fibra de aço e 0,4% micro + 0,5% macro (redução de 47,63%).

O módulo de elasticidade acompanhou a tendência de queda nos valores assim como observado para a resistência à compressão. Um ponto interessante foi determinar o módulo de elasticidade dinâmico e avaliar como o mesmo acompanha o comportamento em relação ao módulo estático. Os valores obtidos são diferentes, pois cada ensaio impõe uma condição de fissuração ao corpo de prova.

Para aproximar o valor do módulo dinâmico com o estático, utilizaram-se expressões analíticas, onde se verificou que a expressão recomendada por Lyndon e Baladran (1986) obteve uma boa aproximação com o resultado obtido experimentalmente, com uma variação de no máximo 10%.

Para avaliação das propriedades à flexão foi utilizado o ensaio recomendado pela JSCE SF4 (1984). Notou-se em relação à resistência à tração um aumento não muito expressivo em relação à resistência à fissuração da matriz. Nesse caso poderia caracterizar esse comportamento como *deflection-hardening*, onde a carga resistida pelo CRF é superior à matriz. No entanto como esse aumento, no geral, foi inferior a 10% isso não pode ser confirmado.

Como a principal função na adição de fibras ao concreto é avaliar a sua tenacidade, ou seja, capacidade de absorção de energia na fase pós-fissuração, essa propriedade foi avaliada mais criteriosamente. No geral, a adição das fibras de PP não conferiu um aumento de tenacidade expressivo em comparação ao CRF apenas com as fibras de aço. Apenas em dois casos, CRF5.1 e CRF7.1, esse comportamento foi verificado.

Como as fibras de PP não possuem como função promover o aumento da resistência mecânica para pequenos deslocamentos isso pode ter causado a diminuição da tenacidade do material. As fibras de PP são mais requeridas para deslocamento maiores, no entanto, segundo o ensaio da JSCE SF4 (1984) para determinação da tenacidade não existe essa distinção sendo alvo de críticas de estudiosos no assunto.

Com isso, para avaliar o comportamento à flexão para pequenos e grandes deslocamento foi avaliada as resistências residuais dos CRF's, recomendado pela ASTM C1609 (2010). Percebeu-se que o comportamento de todos os grupos foi de *slip-softening*, ou seja, a carga resistida para o deslocamento de L/150 foi inferior àquela obtida para o deslocamento de L/600.

Pode-se avaliar que a diminuição da resistência residual para o concreto reforçado com fibra de aço foi superior à maioria dos grupos, já que esse tipo de fibra

não confere uma alta resistência para maiores deslocamentos. Com isso, a incorporação das fibras de PP mostrou-se eficiente, pois conseguiu manter um nível de carga para maiores deslocamentos.

## REFERÊNCIAS

ACI 544.1R-96 – ACI COMMITTEE 544. **State of-Art Report in Fiber Reinforced Concret**. ACI Manual of Concrete Practice, Part 5, 2000.

AHMED, S.F.U.; MAALEJ, M. Tensile strain behavior of hybrid steel-polyethylene fibre reinforced cementitious composites. **Construction and building materials**, 23. 2009. 96-106.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1609/C1609M**: Standard method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point-loading). West Conshohocken, Pennsylvania, United States of America, 2010. 9p.

\_\_\_\_\_ **E1876-01**, Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration, West Conshohocken, Pennsylvania, United States of America, 2006.

ARIF, M. A.; SANTOS, A. C. dos, **Avaliação de tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibras de aço**. Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, Natal-RN, 2014.

ARQUEZ, A. P. **Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. 242f. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 67, “**Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**”, Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_ NBR NM 248, “**Determinação da composição granulométrica**”, Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_ NBR NM 52, “**Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**”, Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_ NBR NM 53, “**Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**”, Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_ NBR NM 45, “**Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**”, Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_ NBR 5739, “**Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**”, Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_ NBR 8522, “**Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**”, Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_ NBR 9833, “**Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**”, Rio de Janeiro, 2008.

.

\_\_\_\_\_ NBR 12655, “**Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**”, Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_ NBR 5738 “**Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**”, Rio de Janeiro, 2015.

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

BANTHIA, N; **Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites**. The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2001.

BANTHIA, N. & GUPTA, R. Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): fiber synergy in high strength matrices. **Materials and Structures**. V.37, december 2004, pp 707-716.

BANTHIA, N. & SOLEIMANI, S. M., Flexural response of hybrid fiber reinforced mortar under load. **ACI Materials Journal**, 99 (4) 2002 pp 379-385.

BAYASI, Z.; MCLNTYRE, M., *ACI Mater. J.* 99 (4) (2002) 337–344.

BENTUR, A.; MINDNESS, S., **Fibre reinforced cementitious composites**. New York, Elsevier Applied Science, 1990.

BENTUR, A., MINDESS, S., “**Fibre reinforced cementitious composites**”, 2<sup>nd</sup> ed, Modern Concrete Technology Series, 2007.

CÁCERES, A.R.E.; FIGUEIREDO, A.D.; MONTE, R. **Avaliação do comportamento do concreto com reforço híbrido de fibras**. In: 55<sup>o</sup> Congresso Brasileiro do Concreto, 2013, Gramado (RS).

CÁCERES, A. R. E. **Caracterização geométrica e mecânica de macrofibras poliméricas**. Dissertação – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2016.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 8ª edição. LTC. Rio de Janeiro, 2012.

CARNIO, M. A. **Aspectos gerais sobre o uso do concreto reforçado com fibras no Brasil**: produção, projeto, tecnologia, normalização. *Concreto & Construções*, ed. 87, Jul-Set, 2017.

CECCATO, M. R. **Estudo da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras e aço**. 1998. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

CECCATO, M.R.; NUNES, N.L.; FIGUEIREDO, A.D. **Estudo do controle da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço**. In: IV Congresso Iberoamericano de patologia das construções e VI Congresso Brasileiro de controle de qualidade Conpat, 1997, Porto Alegre, v.2, p. 539-546.

CHEN, B & LIU, J. Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability, **Cement and Concrete Research**, 35 (2005) 913–917.

CONCRETE SOCIETY. **Concrete industrial ground floors - A guide to design and construction**, Vol. 34, 3ed, 2003.

DAWOOD, E. T; RAMLI, M. Contribution of Hybrid Fibers on The Hybrid Fibers on the Properties of High Strength Concrete Having High Workability. **Science Direct**. 2011

DIÓGENES, H. J. F.; COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A.; EL DEBS, M. K.; EL DEBS, A. L. H. C. **Determinação do módulo de elasticidade do concreto a partir da resposta acústica**. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 4, No. 5, 2011, pp. 792-813.

ESCARIZ, R. C. **Análise comparativa de desempenho mecânico de tubos de concreto reforçados com macrofibras poliméricas e fibras de aço**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14651**: Test method for metallic fiber-reinforced concrete – Measuring the flexural tensile strength (limito of proportionality (LOP), residual, CEN, London, 2007. 15p.

FERRARI, V. J. (2007). **Reforço à flexão de vigas de concreto armado com manta de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) aderido a substrato de transição constituído por compósito cimentício de alto desempenho**. 328f. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FELDMAN, D; ZHENG, Z. Synthetic fibres for fibre concrete composites. In: High performance polymers and polymer matrix composites: symposium held April 1993. **Materials Research Society Symposia Proceedings V 211**, 119-124, 1993.

FIGUEIREDO, A. D., **“Concreto com Fibras de Aço”**. In: Boletim Técnico – Série BT/PCC/260, Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2000.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras. IBRACON. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto. Cap 39, p. 1195-1225, 2005.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 248p. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FURLAN JÚNIOR, S. **Vigas de concreto armado com taxas reduzidas de armadura de cisalhamento: Influência do emprego de fibras curtas e de protensão.** Tese de Doutorado. 373p. – Escola de Engenharia de São Carlos (EESC). São Carlos, SP, 1995.

GENCEL, O.; OZEL, C.; BROSTOW, W.; MARTINEZ-BARRERA, G. Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with polypropylene fibres. **Materials Research Innovations**, v. 15, p. 216 – 225, 2011.

HSIE, M.; TU, C.; SONG, P.S. Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. **Materials Science and Engineering**. V.494, p. 153-157, 2008.

JSCE-SF4 Concrete Committee, **Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete.** 1984.

KAWAMATA A., MIHASHI H., FUKUYAMA H. Properties of hybrid fiber reinforced cement-based composites. *J Adv Concr Technol* 2003; 1(3):283–90.

KONAPURE, C. G.; KANGIRI, S. D. Evaluation of performance of hybrid fibre reinforced concrete. **Internation Journal of Current Engineering and Technology**, V.4, pp. 1831-1835, 2014.

LEE, J.H; CHO, B.; CHOI, E. Flexural capacity of fiber reinforced concrete with a consideration of concrete strength and fiber content. **Construction and Building Materials**. V.38, p. 222-231, 2017.

LYNDON, F. D.; BALADRAN, R. V; Some observations on elastic properties of plain concrete, **Cement and Concrete Research**, v.16, No.3, pp. 314-24. 1986.

LOPES, M. M. **Substituição parcial de armadura de flexão por fibras de aço em vigas de concreto**. 155f. Dissertação de Mestrado – COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

LUCENA, J. C. T. (2017). **Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina**. 83f. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

LU, X.; SUN, Q.; FENG, W.; TIAN, J. Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method. **Construction and Building Materials**, v. 47, 2013, pp. 231-239.

MARKOVIC, I; WALRAVEN, J. C.; VAN MIER, J. G. M. 2003. Development on high performance hybrid fibre concrete In **A. E. Naaman & H. W. Reinhardt (eds.), RILEM Publication**, p. 277-300.

McGILL, R.; TUKEY, J. W.; LARSEN, W. A. Variations of Boxplots. **The American Statistician**. Vol. 32, n. 1, 1978, p. 12-16.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo. Instituto Brasileiro do Concreto. Pini. 1994

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedade e materiais**. 3. ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto. Cap 12, p. 517-538, Pini, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 2 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto. Pini, 2014.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F.; DARWIN, D. **Concrete**. Prentice Hall, 2nd ed. 2003.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. São Paulo, Pini, 1982.

OLIVEIRA, S. L. **Taxa de armadura longitudinal mínima em vigas de concreto de alta resistência com fibras de aço** – Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

OLIVEIRA, T. T. A. de. **Desenvolvimento de um concreto reforçado com fibras (CRF) híbridas de polipropileno**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018.

PEREIRA, L.A.; RAMOS, M.; GOMES, J.P.C. **Dosagem de concreto auto-adensável reforçado com fibras de aço**. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto, 2005, Recife, p. 568-581.

QIAN, C. X.; STROEVEN, P. Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**. V.30, p. 63-69, 1999.

RAMBO, D. A. S., **Concretos autoadensáveis reforçados com fibras de aço híbridas: aspectos materiais e estruturais**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

RESENDE, F. M., **Influência das Fibras de Aço, Polipropileno e Sisal no Amortecimento de Concretos de Resistência Normal e de Alto Desempenho**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

RIBEIRO, A.; CUNHA, V.; BARROS, J.; ANTUNES, A. **Betão reforçado com fibras de aço: recomendações normativas, investigação experimental e numérica**. V Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto, São Paulo-SP, 2015.

RIGHI, D. P.; COSTA, F. B. P.; STEIN, K.; GRAEFF, A.; SILVA FILHO, L. C. P, **Compósitos cimentícios super deformáveis com a utilização de cinza de casca de arroz e fibra de polipropileno**. Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, Natal-RN, 2014

RILEM TC 162-TDF, “**Test and design methods for steel fibre reinforced concrete**”, Materials and Structures, Vol. 35, November 2002, pp 579 – 582.

SALVADOR, R.P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras**. 201f. Dissertação de Mestrado– Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

SHKOLNIK, I. E. Influence of high strain rates on stress–strain relationship, strength and elastic modulus of concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 30, 2008, pp. 1000-1012.

SOE, K. T.; ZHANG, Y. X.; ZHANG; L. C. Material properties of a new hybrid fibre-reinforced engineered cementitious composite. **Construction and Building Materials** 43 (2013) 399–407.

STÄHLI, P. & VAN MIER, J.G.M. (2004), Three-fibre-type hybrid fibre concrete - in **proceeding FRAMCOS-5**, Vail, USA, ed. V. C. Li et al pp. 1105-1112.

SUN, W.; CHEN, H.; LUO,X. & QIAN, H. The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete, **Cement and Concrete Research** 31 (2001) 595-601.

TAERWE, L., GYSEL, A.V.; J. Eng. Mech. 22 (8) (1996) 695–704.

TAMIL SELVI, M.; THANDAVAMOORTHY, T. S. Studies on the properties of steel and polypropylene fibre reinforced concrete without any admixture. *International Journal of Engineering and Innovative Tecnology*, Vol. 3 (1), pp. 411-416, 2013.

VAIRAGADE, V. S.; KENE, K. S. Experimental investigation on hybrid fiber reinforced concrete. **International Journal of Engineering Reserarch and Applications**, V.2, 1037-1041, 2013

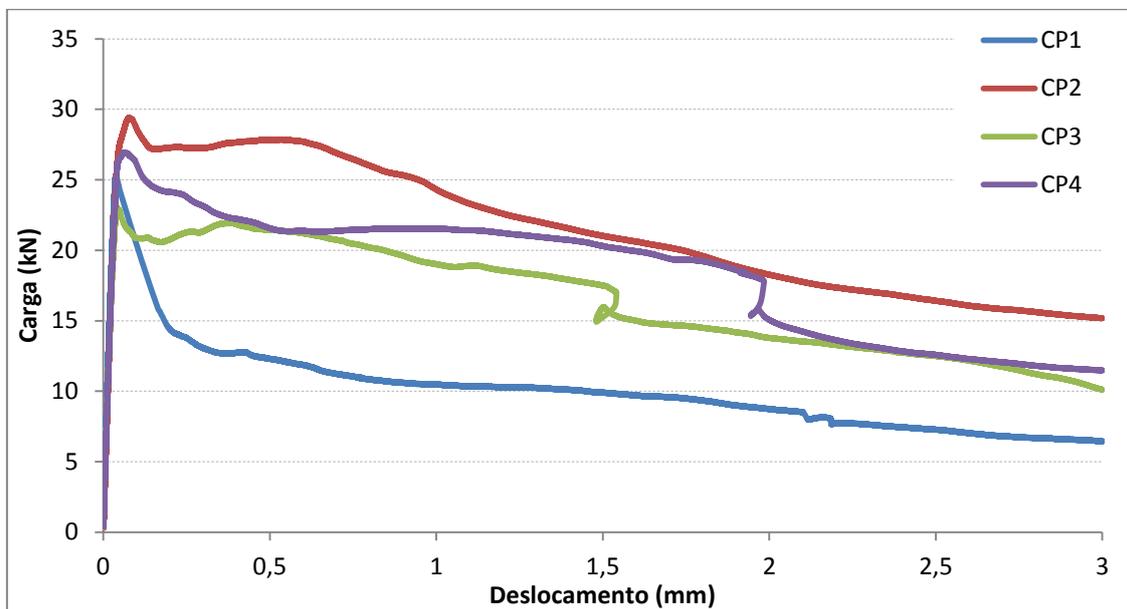
VASCONCELOS, R. E; Fratura do concreto reforçado com fibras de aço e de polipropileno em meios normal e agressivo. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

YEW, M.K.; OTHMAN, I.; YEW, M. C.; YEO, S. H.; MAHMUD, H. B. Strenght properties of hybrid nylon-stell and polypropylene-steel fibre reinforced high strength concrete at low volume fraction, **Internacional Journal of the Physical Sciences**, Vol. 6 (33, pp. 7584-7588, 2011.

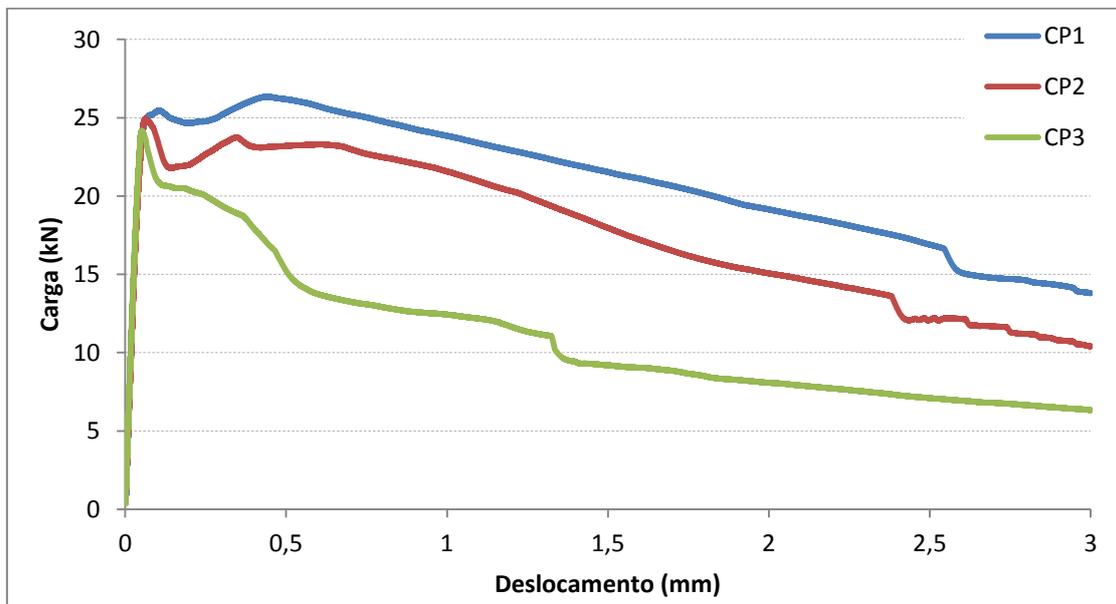
ZHANG, M. H.; SHARIF, M. S. H.; LU, G. **Impact resistance of high-strength fiber-reinforced concrete**. Magazine of Concrete Research Journal, 59 (3), 199-210, 2007.

## APÊNDICE A – Curva carga *versus* deslocamento dos grupos de CRF estudados.

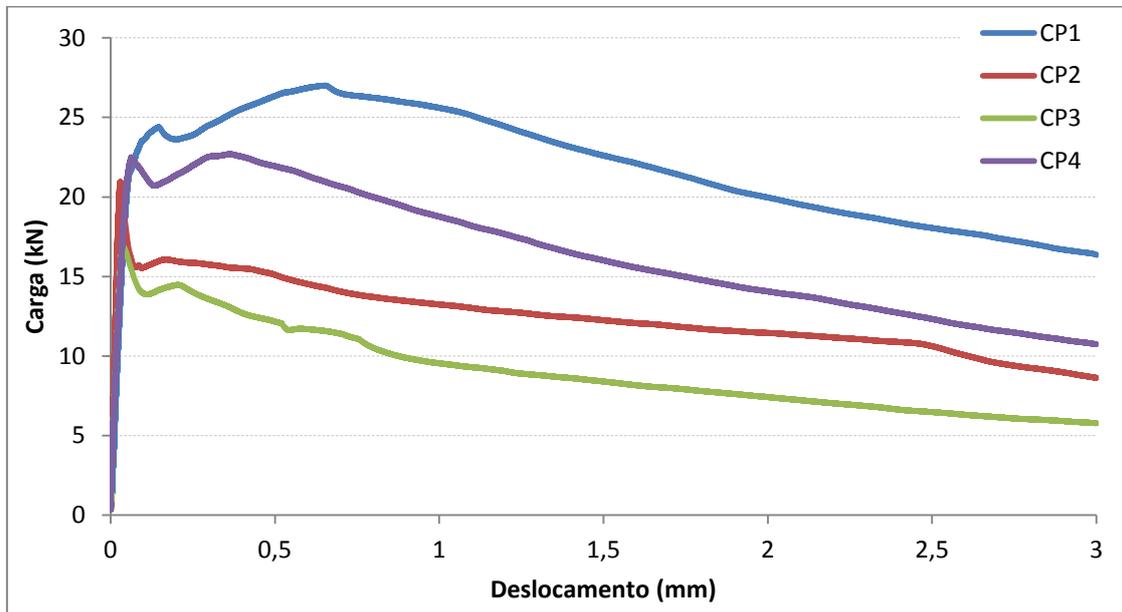
Apêndice A.1: Curvas carga *versus* deslocamento vertical para CRF com fibras de aço (grupo 2).



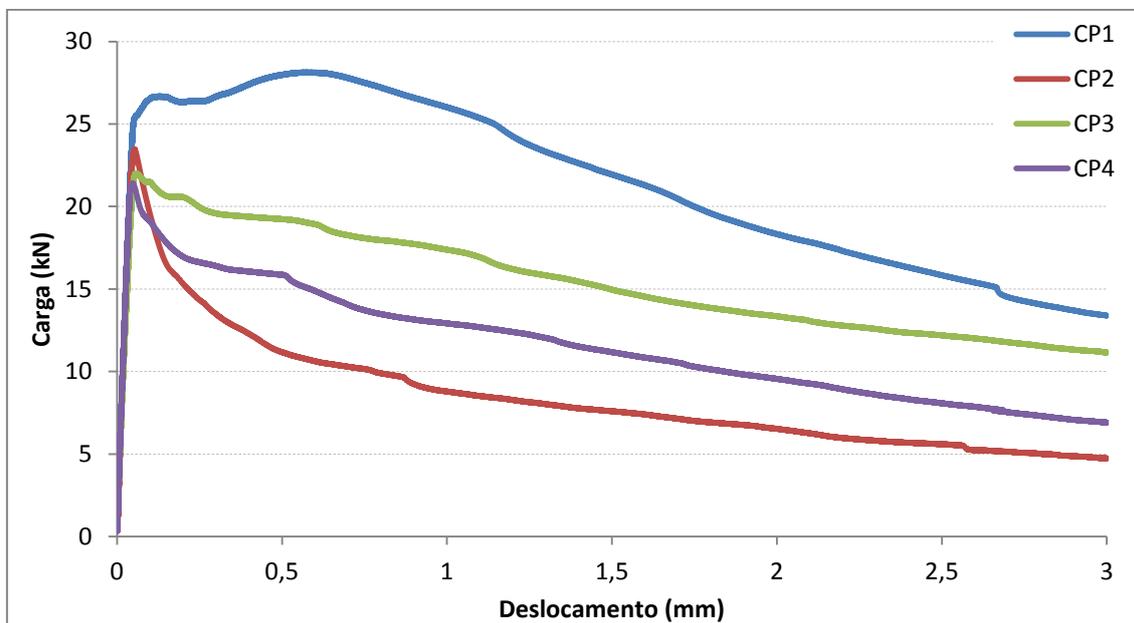
Apêndice A.2: Curvas carga *versus* deslocamento vertical para CRF com fibras de aço e 0,2% de microfibras de PP (grupo 3.1).



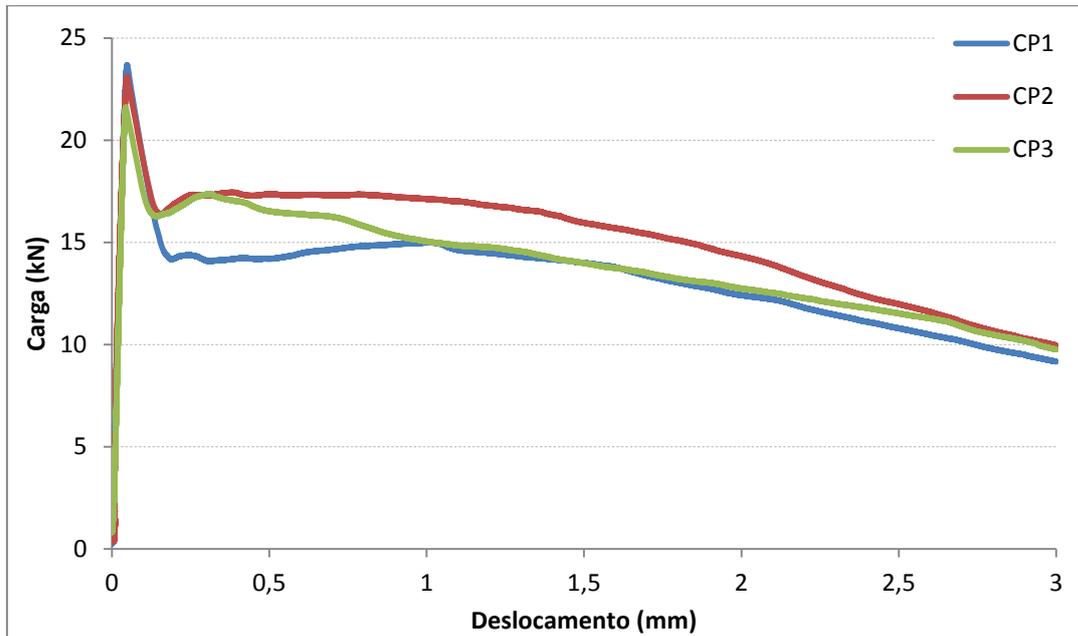
Apêndice A.3: Curvas carga *versus* deslocamento vertical para CRF com fibras de aço e 0,3% de microfibras de PP (grupo 3.2).



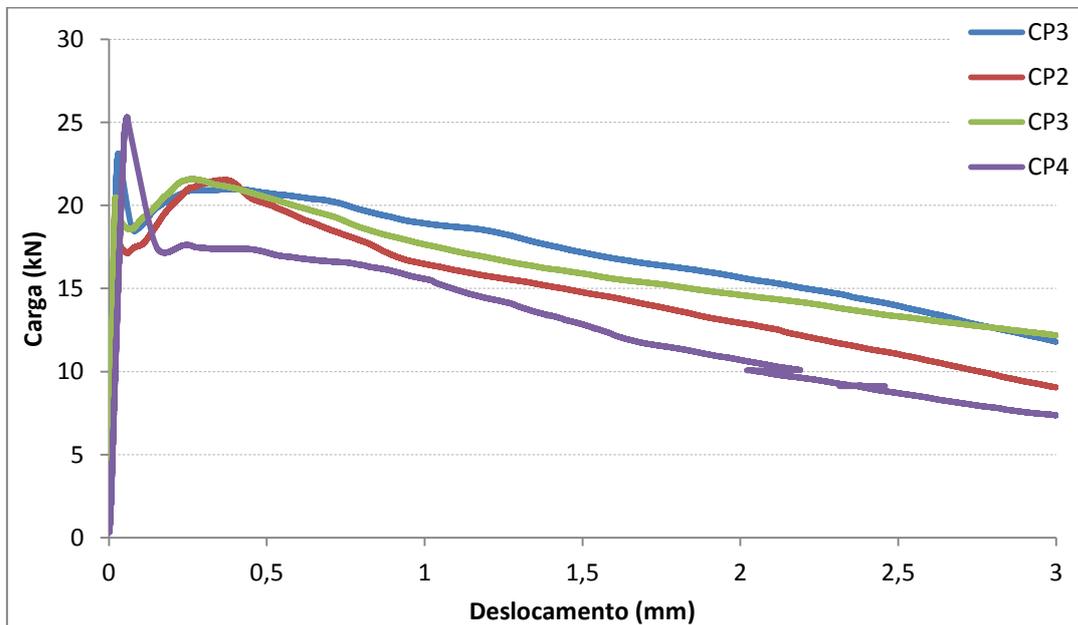
Apêndice A.4: Curvas carga *versus* deslocamento vertical para CRF com fibras de aço e 0,4% de microfibras de PP (grupo 3.3).



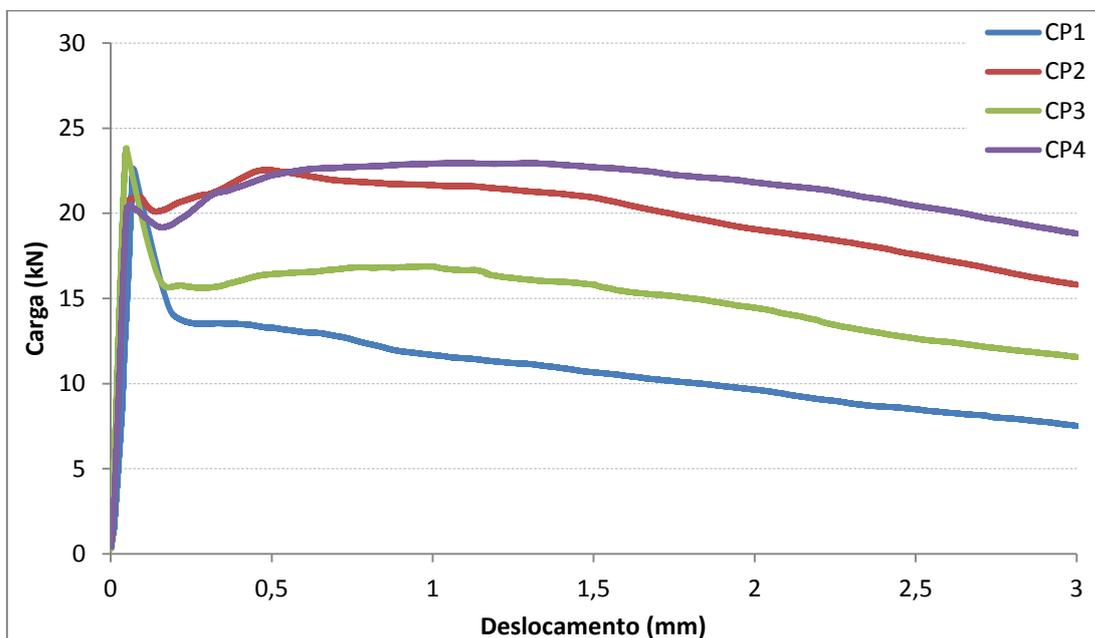
Apêndice A.5: Curvas carga *versus* deslocamento vertical para CRF com fibras de aço e 0,3% de macrofibras de PP (grupo 4.1).



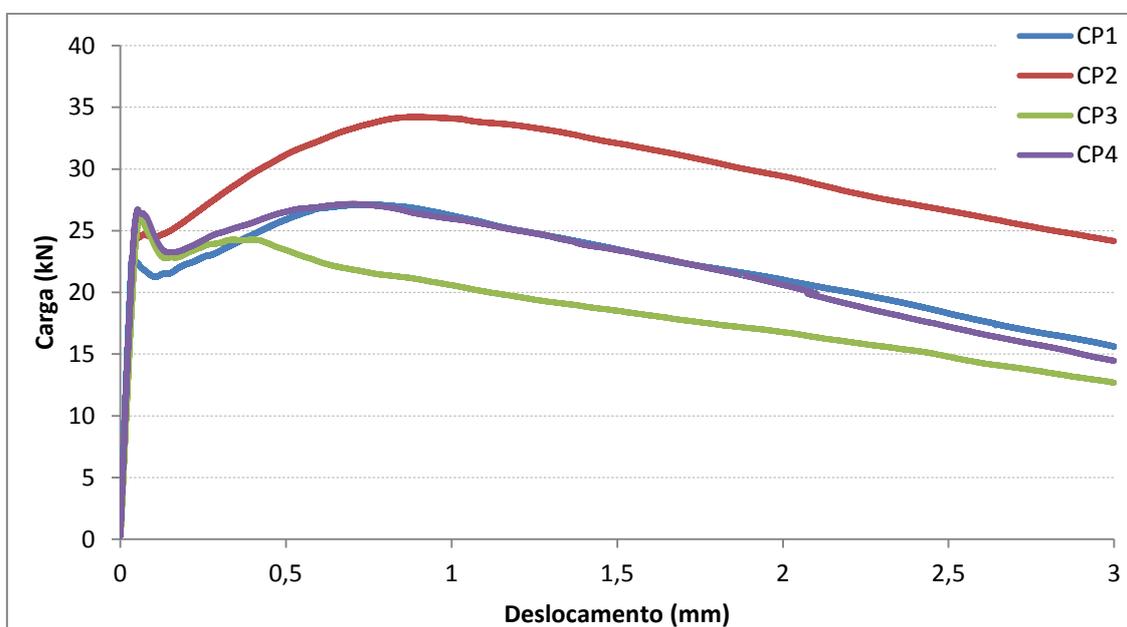
Apêndice A.6: Curvas carga *versus* deslocamento vertical para CRF com fibras de aço e 0,4% de macrofibras de PP (grupo 4.2).



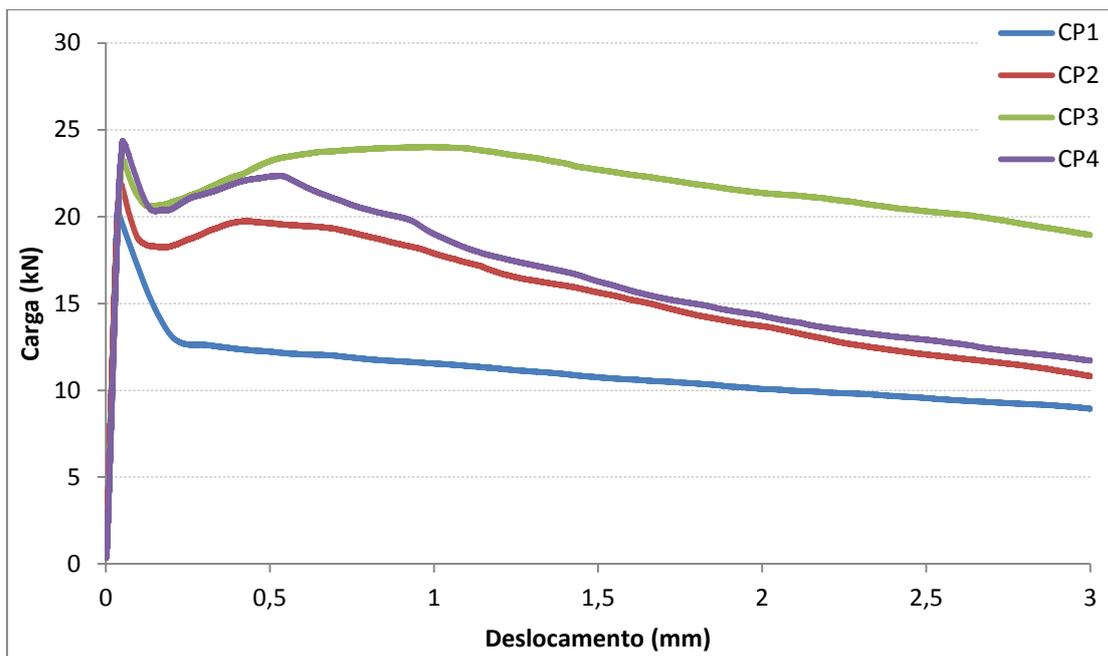
Apêndice A.7: Curvas carga versus deslocamento vertical para CRF com fibras de aço e 0,5% de macrofibras de PP (grupo 4.3).



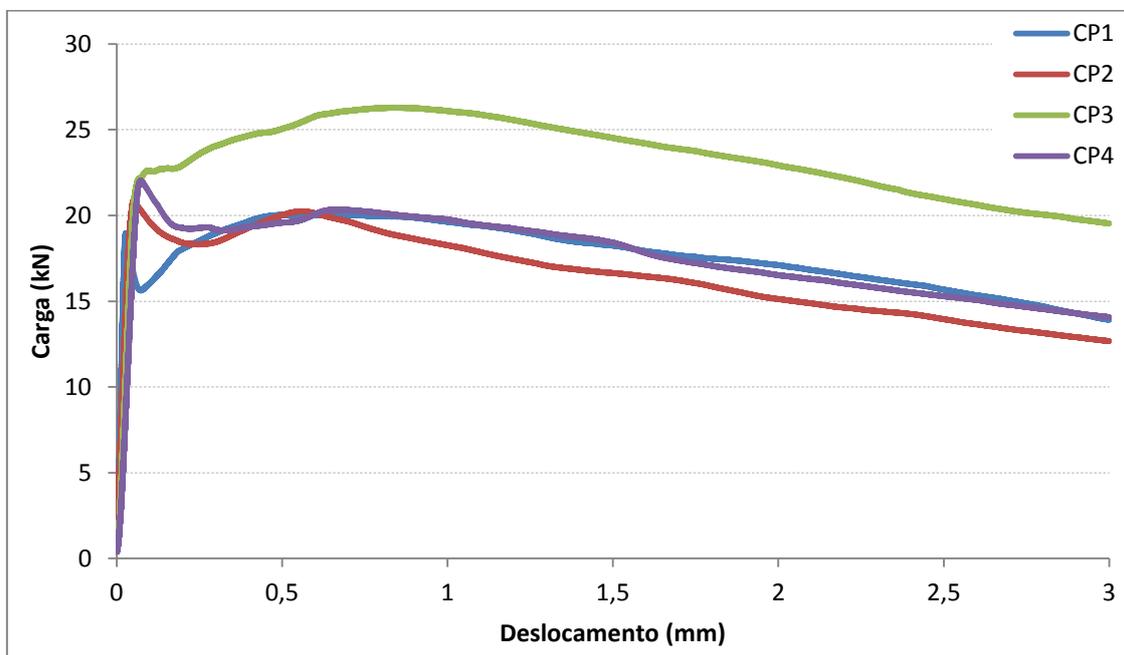
Apêndice A.8: Curvas carga versus deslocamento vertical para CRF com fibras de aço, 0,2% de microfibras e 0,3% de macrofibra de PP (grupo 5.1).



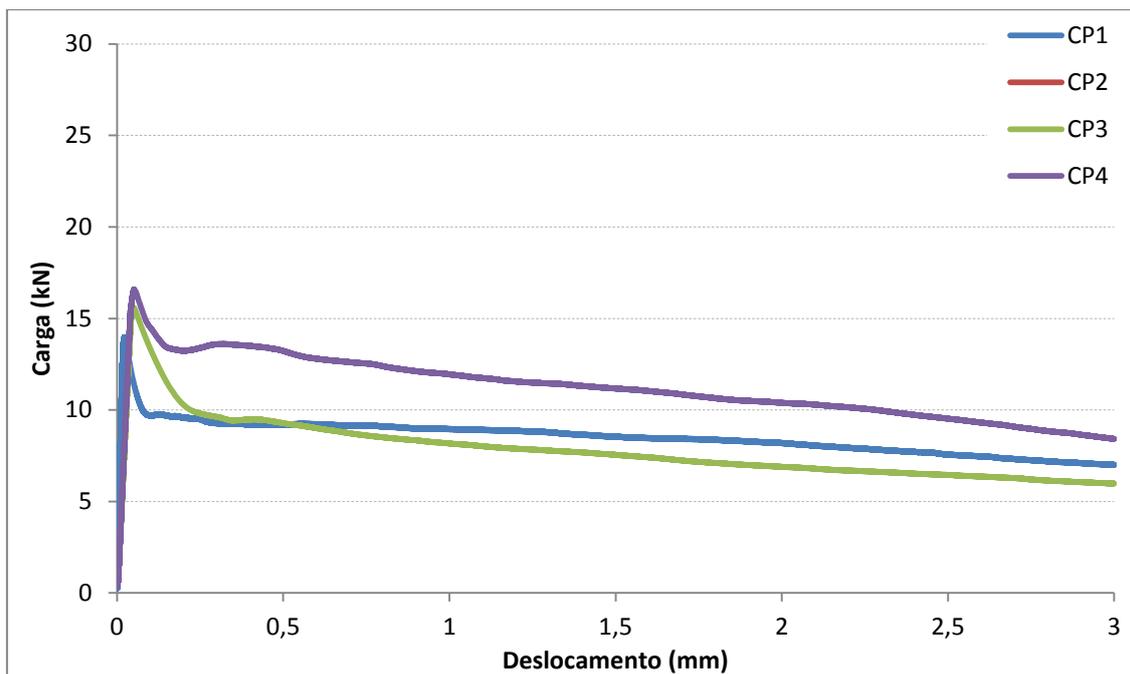
Apêndice A.9: Curvas carga *versus* deslocamento vertical para CRF com fibras de aço, 0,2% de microfibras e 0,4% de macrofibra de PP (grupo 5.2).



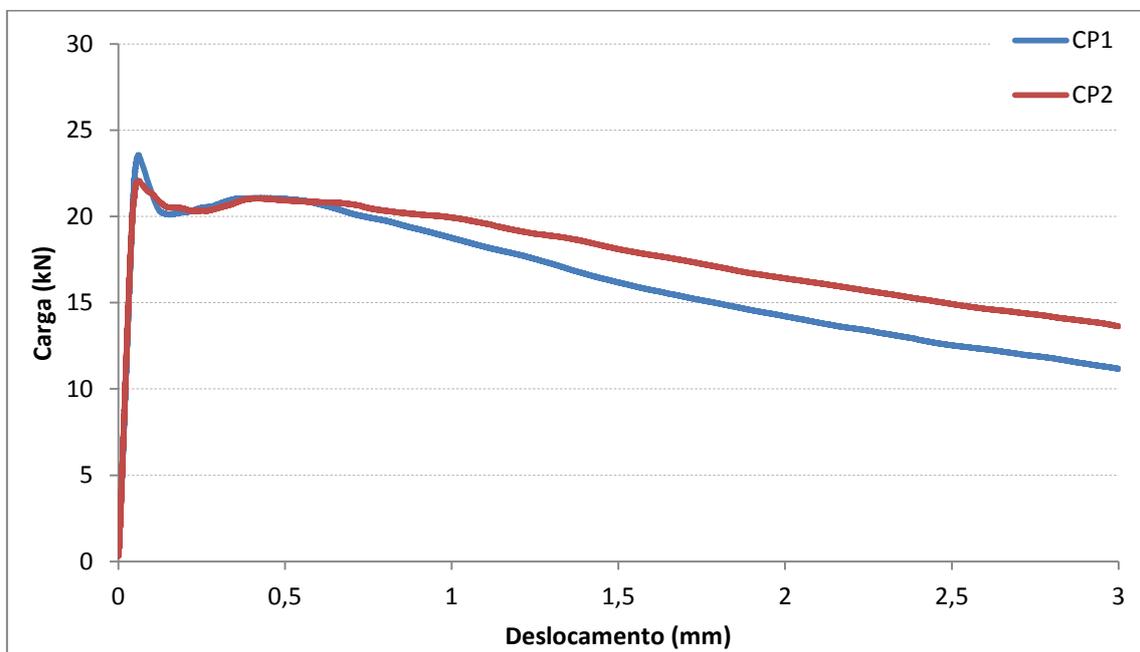
Apêndice A.10: Curvas carga *versus* deslocamento vertical para CRF com fibras de aço, 0,2% de microfibras e 0,5% de macrofibra de PP (grupo 5.3).



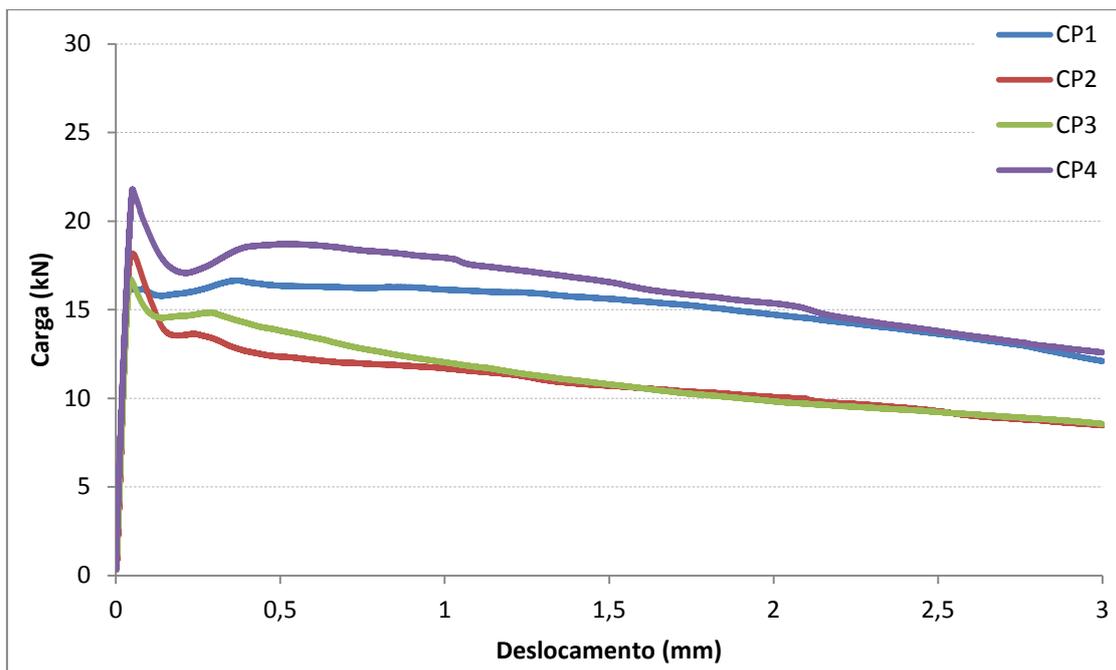
Apêndice A.11: Curvas carga *versus* deslocamento vertical para CRF com fibras de aço, 0,3% de microfibras e 0,3% de macrofibra de PP (grupo 6.1).



Apêndice A.12: Curvas carga *versus* deslocamento vertical para CRF com fibras de aço, 0,3% de microfibras e 0,4% de macrofibra de PP (grupo 6.2).



Apêndice A.13: Curvas carga *versus* deslocamento vertical para CRF com fibras de aço, 0,3% de microfibras e 0,5% de macrofibra de PP (grupo 6.3).



Apêndice A.14: Curvas carga *versus* deslocamento vertical para CRF com fibras de aço, 0,4% de microfibras e 0,3% de macrofibra de PP (grupo 7.1).

