

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

TIAGO TADEU AMARAL DE OLIVEIRA

DESENVOLVIMENTO DE UM CONCRETO REFORÇADO COM
FIBRAS (CRF) HÍBRIDAS DE POLIPROPILENO

LINHA DE PESQUISA: TECNOLOGIA DOS MATERIAIS
ESTRUTURAIS

MARINGÁ

2018

TIAGO TADEU AMARAL DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONCRETO REFORÇADO
COM FIBRAS (CRF) HÍBRIDAS DE POLIPROPILENO**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir José Ferrari

MARINGÁ
2018

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

O48d Oliveira, Tiago Tadeu Amaral de
Desenvolvimento de um concreto reforçado com
fibras (CRF) híbridas de polipropileno / Tiago Tadeu
Amaral de Oliveira. -- Maringá, 2018.
97 f. : il. color., figs., tabs.

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, 2018.

1. Concreto reforçado com fibras (CRF). 2.
Híbrido. 3. Fibras de polipropileno (PP). 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 21.ed. 620.136

Elaine Cristina Soares Lira - CRB 1202/9

TIAGO TADEU AMARAL DE OLIVEIRA

DESENVÓLVIMENTO DE UM CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS (CRF)
HÍBRIDAS DE POLIPROPILENO

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de concentração Estruturas para obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 29 agosto de 2018.



Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei

Membro PCV/UEM



Prof. Dr. Gustavo Henrique Siqueira

Membro FEC - Campinas - SP



Prof. Dr. Vladimir José Ferrari

Orientador - PCV/UEM

AGRADECIMENTOS

A minha família pelo incentivo, apoio e conselhos para a conclusão do mestrado.

Ao meu orientador, professor Dr. Vladimir José Ferrari, por sua dedicação e incentivo na realização deste trabalho, contribuindo com seu conhecimento sempre que solicitado.

A Universidade Estadual de Maringá (UEM) e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus de Campo Mourão (UTFPR-CM) por disponibilizarem seus espaços físicos para a realização da pesquisa.

Aos técnicos Fábio e Maiko, dos laboratórios de materiais e de estruturas da UTFPR-CM pela contribuição na execução das diversas etapas práticas realizadas no laboratório.

Aos técnicos e professores responsáveis pelo laboratório de Materiais de Construção Civil da UEM, pela ajuda e contribuição na ruptura dos corpos de prova.

As empresas Macaferri e Viapol pela doação das fibras utilizadas nesta pesquisa.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte de minha formação, o meu muito obrigado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

RESUMO

Existem diversos tipos de fibras, metálicas ou poliméricas, que são empregadas em concreto para melhorar o seu comportamento, principalmente a sua capacidade de deformação, tornando-o mais dúctil. Pesquisas têm sido direcionadas para investigar as propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras (CRF) de forma híbrida por meio do emprego de fibras de diferentes materiais ou distintas geometrias. Hsie (2008) comenta que a maioria das pesquisas têm sido focada em CRF híbridas de aço e de polipropileno (PP). As fibras de aço possuem elevado módulo de elasticidade e podem melhorar a tenacidade do concreto na flexão. Ferreira (2008) concluiu que o efeito das fibras de aço restringe-se apenas a fase pós- pico do histórico de carregamento. Ferrari et al (2013) constatou que a adição fibras metálicas de 13 mm de comprimento as macrofibras potencializa o desempenho do concreto. No entanto, a disponibilidade de fibras de aço no Brasil é bem restrita, restringindo-se a comprimentos da ordem de 25 mm ou superior. Nesta pesquisa a proposta baseia-se na investigação das propriedades mecânicas do CRF híbridas de Polipropileno (PP). São duas formas de fibras de PP a serem investigadas: macrofibras e microfibras. Foram estudados 11 grupos de CRF. Sendo o traço do concreto de referência dosado pelo método da Associação Brasileira de Cimento Portland para a resistência de 30 MPa. A premissa da pesquisa é que as duas formas de fibras de PP trabalhem conjuntamente contribuindo em estágios distintos do histórico de carregamento do material na flexão: as microfibras devido a maior dispersão na matriz atuem na interceptação de microfissuras e com as macrofibras, espera-se a contribuição no sentido de evitar a propagação da fissuração de forma a aumentar a ductilidade do material. Para tanto, foram desenvolvidos ensaios de flexão em quatro pontos em corpos de prova prismáticos (150 x 150 x 500 mm) seguindo-se a metodologia indicada pela norma Japonesa JSCE-SF4 (1984). Foram também moldados corpos de prova cilíndricos (100 x 200 mm) e submetidos a ensaios de compressão para obtenção da resistência e do módulo de elasticidade, bem como, a resistência à tração indireta. A consistência do CRF no estado fresco foi avaliada por meio do ensaio do abatimento do tronco de cone. Resultados de pesquisas anteriores mostraram que a trabalhabilidade diminui devido ao aumento dos teores de fibras, para que não ocorresse esse problema foi adicionado superplastificante até o ponto de considerarmos o concreto com mesma trabalhabilidade. Também foi observado que o processo de hibridização possibilitou a obtenção de um CRF com bons resultados de tenacidade e das tensões residuais, principalmente para os grupos com maiores taxas de fibras. Porém, nesses percebeu-se redução da resistência à compressão axial e do módulo de elasticidade.

Palavras-chave: concreto reforçado com fibras (CRF); híbrido, fibras de polipropileno (PP).

ABSTRACT

There are several types of fibers, metallic or polymeric, that are used in concrete to improve its behavior, mainly its capacity of deformation, making it more ductile. Research has been directed to investigate the mechanical properties of fiber reinforced concrete (CRF) in a hybrid way by using fibers of different materials or different geometries. Hsie (2008) comments that most research has been focused on CFR hybrid steel and polypropylene (PP). The steel fibers have high modulus of elasticity and can improve the tenacity of the concrete in the bending. Ferreira (2008) concluded that the effect of steel fibers is restricted only to the post-peak phase of loading history. Ferrari et al (2013) found that adding 13 mm long metal fibers to macrofibres enhances concrete performance. However, the availability of steel fibers in Brazil is very restricted, being restricted to lengths of the order of 25 mm or greater. In this research the proposal is based on the investigation of the mechanical properties of CFR hybrid polypropylene (PP). There are two forms of PP fibers to be investigated: macrofibres and microfibers. 11 groups of CRF were studied. The mixture of the reference concrete dosed by the method of the Brazilian Association of Portland Cement for the resistance of 30 MPa. The research's premise is that the two forms of PP fibers work together contributing at different stages of the material loading history in the flexion: the microfibers due to greater dispersion in the matrix act in the interception of microcracks and with the macrofibres, it is expected contribution in order to avoid the propagation of cracking in order to increase the ductility of the material. For this, flexural tests were developed at four points in prismatic specimens (150 x 150 x 500 mm), following the methodology indicated by the Japanese standard JSCE-SF4 (1984). Cylindrical test specimens (100 x 200 mm) were also molded and subjected to compression tests to obtain the strength and modulus of elasticity, as well as splitting test. The consistency of the CRF in the fresh state was evaluated by slump test. Results from previous research have shown that the workability decreases due to the increase in the amount of fibers. To avoid this problem, superplasticizer has been added until the point where the concrete can be considered with the same workability as the reference. It was also observed that the hybridization process allowed to obtain a CRF with good results of tenacity and residual stresses, especially for the groups with higher fiber rates. However, it was observed a reduction of the axial compressive strength and modulus of elasticity.

Keywords: concrete fibers reinforced (CFR), hybrid, polypropylene fibers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática evidenciando a zona de transição nos concretos.....	19
Figura 2 - Mecanismo de ação das fibras de aço	24
Figura 3 – Interface fibra-matriz de monofilamentos.....	25
Figura 4 – Fibras com compatibilidade de dimensões (a) e sem compatibilidade de dimensões com o agregado graúdo(b)	26
Figura 5 - Influência do tamanho das fibras na matriz e nas costuras das fissuras	31
Figura 6 - Comportamento carga-deformação de concreto convencional e CRF33	
Figura 7 – Curva Carga <i>versus</i> Deslocamento Vertical típica.....	34
Figura 8 – Representação do ensaio de flexão em quatro pontos.....	35
Figura 9 – Curva de Força <i>versus</i> Deslocamento vertical da ASTM C1609.....	36
Figura 10 – Demonstração dos instrumentos utilizados no ensaio de flexão em três pontos com controle de CMOD (a) e com controle de deflexão (b)	38
Figura 11 – Exemplo de curva Carga x CMOD	39
Figura 12 – Determinação das tensões residuais	40
Figura 13 – Composição Granulométrica do Agregado Miúdo	43
Figura 14 – Composição Granulométrica do Agregado Graúdo	44
Figura 15 – Fibras utilizadas na pesquisa (a) macrofibra (b) microfibra.....	45
Figura 16 – Nomenclatura dos grupos de CRF	46
Figura 17 – Foto da Betoneira Elétrica.....	48
Figura 18 – Teste de abatimento do tronco de cone	48
Figura 19 – Consistência do compósito no estado fresco (a) e moldagem dos CPs (b)	49
Figura 20 – Fotos (a) Prensa hidráulica (b) Ruptura de CP de compressão diametral e (c) Ruptura de CP de compressão simples	49
Figura 21 – Máquina Universal de Ensaio da UTFPR-CM realizando ensaio de módulo de elasticidade	50
Figura 22 – Aparelho Yoke fixado no Corpo de Prova.....	50
Figura 23 – Máquina Universal de Ensaio (a) Sistema de Aquisição de dados (b)	51

Figura 24 – Integração Numérica por meio da Regra do Trapézio para segmentos desiguais	52
Figura 25 – Resistência a compressão (MPa) dos grupos estudados.....	55
Figura 26 – Influência do Teor de macrofibras na resistência a compressão do CRF.....	56
Figura 27 - Influência do Teor de microfibras na resistência a compressão do CRF	56
Figura 28 - Resultados do Módulo de elasticidade (GPa) dos corpos de prova com diferentes teores de macro e microfibras de polipropileno.....	57
Figura 29 - Influência do Teor de Macrofibras no módulo de elasticidade do CRF	58
Figura 30 - Influência do Teor de Microfibras no módulo de elasticidade do CRF	58
Figura 31 – Influência do teor de macrofibras na resistência a tração por compressão diametral	59
Figura 32 – Influência do teor de microfibras na resistência a tração por compressão diametral	60
Figura 33 – Aspecto da ruptura dos CPs (a) sem fibras (b) e com fibras	61
Figura 34 – Seção transversal de ruptura (a) sem fibras (b) somente com macrofibras e (c) com hibridização das fibras.....	61
Figura 35 – Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento dos grupos 1-4	62
Figura 36 – Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento dos grupos 5-7	63
Figura 37 – Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento dos grupos 8-11	63
Figura 38 – Determinação da Carga de Fissuração do CP	64
Figura 39 - Influência do Teor de Macrofibras na resistência a flexão do CRF.	65
Figura 40 - Influência do Teor de Microfibras na resistência a flexão do CRF .	65
Figura 41 – Influência das macrofibras na resistência a Fissuração.....	66
Figura 42 – Influência das microfibras na resistência a fissuração	66
Figura 43 – Influência do Teor de Macrofibras no fator de tenacidade do CRF	67
Figura 44 - Influência do Teor de Microfibras no fator de tenacidade do CRF .	68
Figura 45 - Influência do Teor de Macrofibras na relação de resistência flexional	68
Figura 46 - Influência do Teor de Microfibras na relação de resistência flexional	69

Figura 47 - Influência do Teor de Macrofibras na resistência residual do CRF para deslocamento de 0,75mm (a) e de 3mm (b)	70
Figura 48 - Influência do Teor de Microfibras na resistência residual do CRF para deslocamento de 0,75mm (a) e de 3mm (b)	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do concreto de acordo com a resistência a compressão	15
.....
Tabela 2 – Granulometria do Agregado Miúdo.....	43
Tabela 3 – Granulometria do Agregado Graúdo	43
Tabela 4 – Informações Técnicas do Superplastificante	44
Tabela 5 – Fibras utilizadas na pesquisa.....	45
Tabela 6 – Teor de Fibras em volume do Compósito Reforçado com Fibras (CRF)	
.....	47
Tabela 7 - Consumo de materiais por metro cubico de CRF.....	47
Tabela 8 – Quantidade de Aditivo utilizado e Abatimento dos CRF estudados	53
Tabela 9 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial (f_c), Módulo	
de elasticidade longitudinal (E) e Tração à compressão diametral ($f_{ctm,ed}$)	54
Tabela 10 - Valores médios de resistência à fissuração e máxima à tração na flexão	
dos grupos de CRF estudados.....	64
Tabela 11 Fator de Tenacidade e Relação de Resistência Flexional dos CRF	
estudados	67
Tabela 12 – Resultados da Resistência Residual para deslocamentos de L/600 e	
L/150.....	69

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1.	CONCRETO	14
2.1.1.	Cimento	15
2.1.2.	Adições Minerais	16
2.1.3.	Aditivos Superplastificantes	17
2.1.4.	Agregados	19
2.1.5.	Zona de transição interfacial pasta agregado	19
2.2.	COMPÓSITO CIMENTÍCIO DE ALTO DESEMPENHO COM ADIÇÃO DE FIBRAS 20	
3.3.1.	Hibridização De Fibras Em Compósitos Cimentícios	29
2.3.	TENACIDADE DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS 32	
2.3.1.	Normas Para Avaliação Da Tenacidade Do Concreto	33
2.3.1.1.	JSCE SF4 (1984)	33
2.3.1.2.	ASTM C1609	35
2.3.1.3.	EN 14651 (2007)	37
2.3.1.4.	JSCE (2008)	40
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1.	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES	42
3.1.1.	Cimento Portland	42
3.1.2.	Agregados	42
3.1.3.	Superplastificante	44
3.1.4.	Fibras	44
3.2.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	45
3.2.1.	Determinação Do Traço E Ensaios No Estado Fresco	45
3.2.2.	Preparação dos Corpos De Prova	47
3.2.3.	Ensaios no Estado Endurecido	49
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1.	CRF NO ESTADO FRESCO	53
4.2.	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO	54
4.3.	MÓDULO DE ELASTICIDADE	57
4.4.	TRAÇÃO INDIRETA	59
4.5.	ENSAIO DE FLEXÃO (JSCE SF4-1984)	60
5.	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
5.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	74
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
	APÊNDICE A - DETERMINAÇÃO DO TRAÇO POR MEIO DO MÉTODO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP)	87
	APÊNDICE B – CURVAS CARGA <i>VERSUS</i> DESLOCAMENTO VERTICAL DO ENSAIO DE FLEXÃO	91

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais utilizado pelo homem e sua durabilidade vem aumentando com o passar dos anos, devido ao desenvolvimento de tecnologias que permitem atingir as especificações sem comprometer as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. O mercado da construção civil necessita de concretos que apresentem características especiais, como os concretos de alta resistência, de alto desempenho, auto adensáveis, com fibras, com altos teores de adições pozolânicas, aparentes, coloridos, brancos, sustentáveis, entre outros (TUTIKIAN & DAL MOLIN, 2015).

O concreto reforçado com fibras (CRF) descontínuas apresenta várias aplicações, destacando-se a redução de fissuras. Na década de 1960 algumas experiências foram realizadas a respeito de fibras de asbestos misturadas ao cimento. A partir desta década houve avanço no que diz respeito à incorporação de fibras no concreto, contribuindo à melhoria da ductilidade de peças estruturais, atenuando a fissuração. A incorporação das fibras descontínuas no concreto propicia uma melhora na aderência e impede o crescimento precoce das fissuras. Vários tipos de fibras descontínuas estão disponíveis no mercado e entre as mais usadas como reforço estão as fibras de polipropileno e as fibras de aço.

Segundo Carnio (2009), fissura ou trinca é uma expressão usada de acordo com o contexto que é apresentado. A norma da ABNT NBR 9575 (2010), define fissura como uma abertura ocasionada por ruptura de um material ou componente, inferior ou igual a 0,5 milímetros, enquanto que as trincas atingem valores entre 0,5 e 1,0 milímetro.

O aumento do teor de cimento aumenta a resistência à compressão que é a base para o cálculo de estruturas de concreto e é uma das propriedades adotadas para controle tecnológico das estruturas, porém não aumenta a capacidade de o concreto absorver esforços após a fissuração. O controle das fissuras em estruturas de concreto, está relacionada a resistência a tração do concreto, porém, após o surgimento das primeiras fissuras a contribuição do concreto na absorção dos esforços de tração é muito pequena, sendo na maioria das vezes desprezada. Uma maneira pratica de verificar esse comportamento, é por meio de ensaios de tenacidade em que é verificada a capacidade absoluta de dissipação de energia do material, por meio de índices energéticos

adimensionais, resistências flexionais equivalentes e índices adimensionais baseados em deslocamentos (GOPALARATNAM e GETTU, 1995).

A adição de fibras ao concreto pode proporcionar o incremento na tenacidade e na ductilidade do material, sendo estas melhorias dependentes do tipo, das características e do arranjo espacial das fibras utilizadas. A hibridização do reforço fibroso pode beneficiar ainda mais as características mecânicas de um compósito, auxiliando por exemplo, no controle da propagação de fissuras em diferentes escalas do concreto.

Segundo Banthia e Gupta (2004) a inserção de fibras na matriz cimentícia faz com que o compósito deixe de apresentar comportamento frágil e se comporte como um material pseudo dúctil resultando em um material que é normalmente citado como compósito cimentício de alto desempenho (CCAD). Além disso a adição de fibras no concreto resulta em outros benefícios tais como: a redução e atraso no crescimento das fissuras, resistência à tração após a fissuração da matriz, aumento da resistência de cisalhamento, aumento da resistência à flexão, melhoria de resistência ao impacto e aumento da resistência à fadiga sobre ações cíclicas (FERRARI, 2007).

Dentre os tipos de fibras comumente utilizadas podemos citar: fibras poliméricas, fibras metálicas de aço, fibras vegetais e fibras minerais. O concreto reforçado com fibras de aço tem sido utilizado na produção de segmentos pré-fabricados para revestimento de túneis, onde as fibras de aço são inseridas para aumentar a ductilidade dos elementos. Assim, é possível reduzir a fissuração durante a manipulação dos elementos, provocada por impactos e esforços em muito baixas idades, podendo ainda incrementar a resistência contra a fadiga (BRANDT, 2008; BOULEKBACHE et al., 2010; BURGERS et al., 2007; CARATELLI et al., 2011; DI PRISCO et al., 2004).

Segundo Pakravan et al (2016) e Figueiredo (2011) as fibras podem ser classificadas como fibras de alto módulo de elasticidade e fibras de baixo módulo de elasticidade. Segundo Soe et al. (2013), as 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. Isso ocorre devido a fibra apresentar uma deformação bem abaixo da deformação da matriz cimentícia, gerando uma grande concentração de tensões na interface fibra-matriz (zona de transição). Já as fibras de baixo módulo, como PVC, polipropileno, polietileno melhoram significativamente a ductilidade da matriz de concreto como também a redução da fissuração. Segundo Pakravan et al (2016) e Figueiredo (2011) a concentração de tensões na zona de transição é menos comum em materiais compósitos com fibras de baixo módulo de elasticidade

devido a fibra apresentar uma deformação compatível com a matriz. Com isso essas fibras conseguem melhorar significativamente a ductilidade e diminuir a fissuração da matriz.

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

Kawamata (2003) também compartilha da idéia de que as propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios 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 compósito cimentício 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.

Segundo Taerwe & Gysel (1996), o elevado módulo de elasticidade e rigidez das fibras curtas de aço podem contribuir com o ganho de tenacidade do concreto. Por outro lado, segundo Bayasi & McIntyre (2002), a ductilidade, o diâmetro reduzido e a dispersão das fibras de PP numa matriz cimentícia podem restringir a propagação da fissuração.

Hsie et al. (2008) comentam que o conteúdo necessário de fibras curtas de aço para melhorar as propriedades mecânicas do concreto é muito elevado, resulta em aumento de peso para a estrutura e dificulta a trabalhabilidade da mistura.

Existem, na literatura técnica, vários trabalhos e pesquisas nas quais se demonstra que se melhoram significativamente diversas propriedades mecânicas da matriz cimentícia com a adição de macrofibras poliméricas, com destaque para a resistência à flexão, resistência ao impacto, comportamento à fadiga (TIGUMAN, 2004; PUJADAS, 2013).

As fibras de PP são fornecidas em duas formas básicas: as microfibras e as macrofibras. As microfibras são aquelas largamente empregadas como reforço secundário, visando principalmente controlar a fissuração nas primeiras horas após o lançamento do concreto ou argamassa e possuem pequenas dimensões (TIGUMAN, 2004; PELISSER et al., 2010). Já as macrofibras de PP possuem maiores dimensões e são concebidas para obter o reforço estrutural, nos mesmos moldes que uma fibra de aço (FIGUEIREDO, 2011).

Recentemente, tem se percebido esforços crescentes da indústria para desenvolver uma nova geração de fibras poliméricas com finalidade estrutural, as quais são conhecidas como macrofibras poliméricas. Segundo Cáceres (2016), essas foram disponibilizadas no

mercado recentemente, especialmente no Brasil, com o objetivo de criar uma alternativa para as fibras de aço em aplicações estruturais, mas seu uso é ainda limitado.

Nesta pesquisa procura-se investigar o efeito da hibridização de fibras de PP sobre as propriedades mecânicas do concreto, mais especificamente, a resistência, o módulo de elasticidade e a tenacidade. A intenção é melhorar a ductilidade da matriz de concreto por meio da adição híbrida de microfibras de 12 mm de comprimento e macrofibras de 40 mm de comprimento, ambas de PP.

Espera-se que as microfibras, devido sua pequena dimensão, estejam mais dispersas na matriz, com isso mais próximas das pequenas fissuras. Por outro lado, as macrofibras por possuírem maior dimensão conseguem interceptar fissuras maiores, que são decorrentes da macro fissuração obtida da união de duas ou mais microfissuras na matriz. Portanto, a premissa dessa pesquisa é que as duas formas de fibras de PP trabalhem conjuntamente contribuindo em estágios distintos do histórico de carregamento.

A pesquisa tem como objetivo geral a avaliação do efeito do processo de hibridização com microfibras e macrofibras de PP sobre as propriedades no estado fresco e endurecido, de um CRF.

Para isso, os objetivos específicos associados a pesquisa podem ser assim reunidos:

- Avaliar o comportamento do CRF híbridas de PP no estado fresco utilizando-se para tanto os resultados dos ensaios de abatimento do tronco de cone;
- Avaliar o comportamento mecânico do CRF híbridas de PP procedendo-se com a realização dos seguintes ensaios: tração na flexão em quatro pontos em corpos de prova prismáticos segundo a JSCE SF4 (1984), compressão axial, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade;
- Investigar o efeito da hibridização com micro e macrofibras de PP sobre o comportamento pós-fissuração do CRF em termos de resistências residuais;
- Procurar identificar ao longo do histórico de carregamento do CRF o trecho de contribuição de cada uma das fibras a partir da construção dos gráficos de carga *versus* deslocamento;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONCRETO

O concreto é o material de construção mais utilizado pelo homem, principalmente em conjunto com armaduras transversais e longitudinais de aço, formando o concreto armado. A ASTM C125-07, define concreto como um material compósito que consiste essencialmente de um agente de ligação (cimento Portland) com as partículas ou fragmentos de agregados e água, em determinadas proporções.

Além das inúmeras vantagens o concreto pode ser moldado em formas das mais simples às mais complexas e efeitos especiais em sua superfície. Contudo, no ponto de vista da engenharia, Pompeu Neto (2004) aponta como desvantagens: baixa resistência à tração, ductilidade e tenacidade. Mesmo com as desvantagens expostas, até o momento o concreto pode ser considerado como o principal material de engenharia usado em construções civis.

Cada vez exige-se mais dessa importante opção para estruturas. As notáveis evoluções do cálculo estrutural, principalmente com a disponibilização de programas computacionais, aliados ao maior conhecimento do comportamento mecânico do concreto e do aço, permitem que projetistas especifiquem estruturas cada vez mais arrojadas em concreto armado e protendido. Nessas aplicações, muitas vezes, o concreto convencional (CC) não atende aos requisitos, ou há alternativas que apresentam uma relação técnica e econômica mais favorável. Por isso, foram desenvolvidas misturas especiais, com propriedades superiores aos CC, chamadas de Concretos de Alta Resistência (CAR), Concretos de Alto Desempenho (CAD), e até, de Ultra-Alto Desempenho (CUAD). O desafio que se impõe à cadeia construtiva é torná-los uma opção viável economicamente para obras do cotidiano, fazendo com que o desenvolvimento que se obteve desses materiais em laboratório atravesse a barreira do mercado, tornando-se, assim, uma opção viável para as construções (TUTIKIAN, ISAIA E HELENE, 2011).

O concreto baseado na resistência à compressão referida a 28 dias segundo Li (2011), pode ser classificado em quatro categorias (Tabela 1): i) Concreto de baixa resistência que é usado principalmente para a construção de estruturas de concreto-massa e sub-base para pavimentos rodoviários e utilização em baixa prioridade; ii) Concreto de resistência moderada que é comumente usados em edifícios, pontes e estruturas semelhantes; iii) Concreto de alta resistência que pode ser usado para construir colunas

de edifícios altos, torres, pontes e paredes e iv) Concreto de altíssima resistência, usado apenas em alguns segmentos estruturais, como vigas e passarelas.

Tabela 1 – Classificação do concreto de acordo com a resistência a compressão

Classificação	Resistência a Compressão (MPa)
Concreto de baixa resistência	<20
Concreto de moderada resistência	20-50
Concreto de alta resistência	50-150
Concreto de altíssima resistência	>150

Fonte: Li (2011)

Há mais de 30 anos, a primeira menção sobre o termo Concreto de Alto Desempenho (CAD) foi realizada por Mehta & Aïtcin (1990). CAD é um material que apresenta comportamento durante a utilização da construção em patamar mais elevado que os CC, atendendo satisfatoriamente às exigências requeridas pelo proprietário ou pelo usuário em conformidade com os projetistas da estrutura de concreto. Entende-se por desempenho não apenas a resistência mecânica, mas também a trabalhabilidade, a estética, o acabamento, a integridade, e, principalmente, a durabilidade.

No Brasil não há uma definição consensual do CAD, apenas do CAR. A ABNT NBR 6118:2014 divide o concreto para finalidades estruturais em duas classes. A classe I abange aos concretos de resistência de 20 até 50 MPa e são denominados de concretos comuns. Já a classe II, considerada como CAR, especifica os concretos de 55 até 90 MPa.

Pelo exposto, a definição de CAR não contempla a de CAD, porque o primeiro enfoca a resistência mecânica como elemento básico da sua constituição, enquanto o segundo abrange todas as propriedades do concreto de modo holístico, focado no resultado final: o máximo desempenho global.

2.1.1. Cimento

Para produzir-se CAD, devem-se escolher cimentos mais puros possíveis, até porque a quantidade de pozolanas a serem adicionadas na mistura será grande, porém de qualidade superior às incorporadas nos cimentos comerciais, como a cinza volante e a escória alto-forno (TUTIKIAN, ISAIA E HELENE, 2011). Segundo estes autores sem levar em conta o tamanho das partículas, cimentos CP I e CP V ARI são os mais recomendados enquanto que outros cimentos também podem ser utilizados desde que previamente estudados.

Em resumo, Aïtcin (2000) apresenta os requisitos dos cimentos para CAD descritos a seguir:

- A finura deve ser média, nem muito alta nem baixa;
- Deve-se ter informações sobre o C3A (Aluminato tri-cálcico), tipo de célula cristalina e quantidade, e sobre os sulfatos de cálcio que influirão sobre a velocidade da formação de etringita, devendo ficar a soma desses compostos entre 14 e 16%;
- A difração de raio X (DRX) do cimento tratado com ácido salicílico, com a finalidade de exibir os compostos menores, é importante para dar ideia do tipo de C3A e sulfatos. Para os CAD, o cimento deve ter baixo teor de C3A e preferencialmente ser cúbico ou cúbico e ortorrômbico, dependendo do grau de sulfurização do cimento, pois este controla a hidratação do C3A;
- Ensaio de reologia com mini-slump e cone de Marsh entre o cimento, a água e os superplastificantes são de grande importância para verificar a compatibilidade cimento versus aditivo.

2.1.2. Adições Minerai

Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011) denomina-se adição mineral os materiais com atividade pozolânica que são inseridos na mistura, tipo: pozolanas naturais, cinzas volantes, escória básica granulada de alto forno, cinza de casca de arroz, metacaulim, sílica ativa e outras. A inserção de uma adição mineral pode dar-se por adição ao cimento (com retirada de parte dos agregados) ou por substituição ao cimento (com retirada de parte do cimento) segundo os procedimentos escolhidos durante os estudos de dosagem. Fica claro que, ao adicionar novo material outros deverão sair da mistura para manter a mesma unidade de volume.

As adições pozolânicas mais utilizadas atualmente são a sílica ativa, o metacaulim e a cinza de casca de arroz, por apresentarem grãos de pequena dimensão, além de possuírem o potencial pozolânico para consumir o Ca(OH)_2 , molécula cristalina de grande dimensão que se forma após a hidratação do cimento com a formação C-S-H, elemento resistente da pasta. O tamanho reduzido das partículas permite que as reações ocorram rapidamente, além de quebrarem a inércia do sistema, agindo por ação de nucleação das partículas de cimento e fazendo com que estas hidratem de forma mais rápida e completa.

A substituição de uma parte do cimento, que é altamente reativo, na primeira hora, por uma adição mineral, que é relativamente inerte no concreto fresco, retarda a pega e controla o abatimento. Sabe-se que estes materiais reduzem a resistência à compressão inicial (durante as primeiras 24 horas), mas a um nível não significativo (AÏTCIN, 2000). A segunda forma de atuação das adições é física, pelo denominado efeito-filler (ou de preenchimento de vazios), que colabora para aumentar a coesão e compacidade do concreto, com a diminuição do volume de vazios (porosidade) e com o refinamento dos poros (porometria), tanto da fase pasta quanto da interface pasta-agregado, reduzindo a permeabilidade do concreto (ALMEIDA, 2005). E por último, as adições pozolânicas atuam de forma química, através do potencial de produzir o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) pelas reações pozolânicas com o hidróxido de cálcio (CH) resultante da hidratação do C_3S e C_2S do cimento Portland. Este produto, o C-S-H, é que dá a propriedade ligante e a compacidade ao concreto (AÏTCIN, 2000). A sílica ativa e o metacaulim são as adições minerais mais reativas, em termos de atividade pozolânica, atualmente disponíveis no mercado brasileiro.

A sílica ativa é um subproduto resultante do processo de obtenção do ferro-silício e silício-metálico. As partículas de sílica ativa parecem perfeitamente esféricas, com diâmetros variando de menos de $0,1\mu\text{m}$ até $2\mu\text{m}$, de tal forma que a esfera média da sílica ativa é 100 vezes menor do que a média das partículas de cimento (DAL MOLIN, 1995 e AÏTCIN, 2000).

A superfície específica da sílica ativa varia de 13.000 a $30.000\text{ m}^2/\text{Kg}$, ficando a média em torno de $20.000\text{ m}^2/\text{Kg}$, bastante superior à do cimento Portland (350 a $600\text{ m}^2/\text{Kg}$) ou à da cinza volante (300 a $700\text{ m}^2/\text{Kg}$). Sua massa específica encontra-se em torno de 220 kg/m^3 , menor do que a do cimento, de aproximadamente 315 kg/m^3 . A sílica ativa, devido sua finura, alto teor de SiO_2 e estado amorfo, apresenta-se como um material pozolânico muito reativo, com partículas que podem preencher os vazios entre os grãos maiores de cimento, quando estes estão bem defloculados na presença de uma dosagem adequada de aditivo químico superplastificante (DAL MOLIN, 1995).

2.1.3. Aditivos Superplastificantes

A evolução do concreto convencional para os concretos especiais só foi possível graças à incorporação das adições no concreto, principalmente, dos aditivos químicos, aos materiais básicos de produção do concreto.

A função dos aditivos químicos plastificantes é de melhorar a consistência do concreto sem aumentar a demanda de água; aumentar as propriedades mecânicas e durabilidade da mistura, mantendo a consistência e reduzir o consumo de cimento, para as mesmas resistências e consistência. As características relevantes para os aditivos são a compatibilidade com o cimento, o tempo de ação e grau de elevação de trabalhabilidade no concreto para os materiais utilizados.

Os aditivos superplastificantes são polímeros orgânicos solúveis em água, obtidos como subprodutos da indústria ou, sinteticamente, por polimerização (AÏTCIN, 2000).

Existem três grandes grupos de aditivos superplastificantes, que também são comercialmente classificados em 3 gerações: i) os condensados de lignossulfonatos modificados, ácidos hidroxi-carboxílicos e polímeros hidroxilatos, ou aditivos de primeira geração; ii) os condensados sulfonados de melanina-formaldeídos, condensados sulfonados de naftaleno-formaldeídos e os poliacrilatos, ou aditivos de segunda geração; e iii) os ésteres de ácido sulfônico, base policarboxilato, aditivos de terceira geração (VERONEZ, 2006).

Os aditivos a base de lignossulfonatos são conhecidos como aditivos plastificantes de 1ª geração, utilizados como redutores de água normais, e em alguns casos como superplastificantes (HARTMANN e HELENE, 2003). São obtidos do rejeito líquido do processo de extração da celulose da madeira. São conhecidos por apresentarem problemas de retardo de pega, pois originalmente contêm altos teores de açúcar na sua composição, o que pode gerar atrasos no endurecimento do concreto, além da incorporação indesejável de ar à mistura (TOGNON E CANGIANO, 1982). Segundo a literatura, os lignossulfonatos permitem uma redução da água da mistura entre 8 e 12%, mas alguns fabricantes afirmam que a redução de alguns de seus produtos pode chegar a 15% (RIXOM; MAILVAGANAN, 1999).

Os aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos são os aditivos mais recentemente utilizados na produção do concreto, disponíveis no mercado desde a década de 1990 (VERONEZ, 2006). Eles são também conhecidos como aditivos superplastificantes de alta eficiência, ou ainda, como aditivos hiperplastificantes, pois permitem uma redução de água das misturas em até 40%, mantendo a mesma trabalhabilidade, em alguns casos (AÏTCIN, 2000).

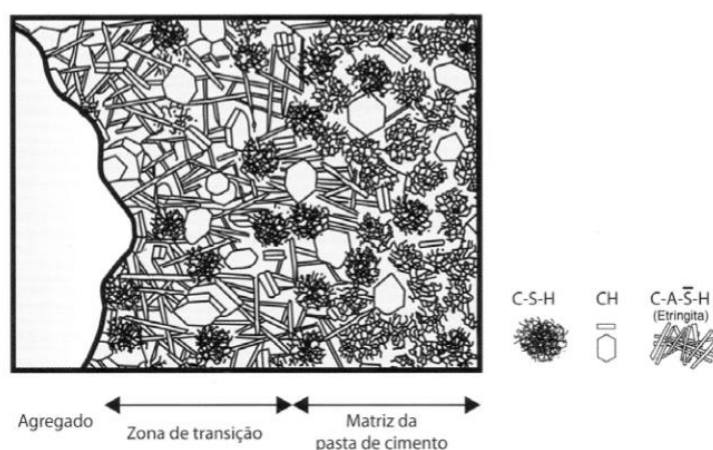
2.1.4. Agregados

Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011) o estudo dos agregados é importante nos CADs, pois estes podem ser o elo fraco da mistura, quando o concreto atingir resistências elevadas. Estes autores argumentam que os agregados devem ter a dimensão máxima característica limitada, pois os de maior granulometria apresentam mais falhas na sua microestrutura e retêm mais água de exsudação, provocando uma zona de transição (ZT) maior. É sabido, no entanto, que agregados de dimensão muito reduzida demandam quantidade maior de água de amassamento, devendo-se, novamente, encontrar o equilíbrio que proporcione as melhores propriedades nos estados frescos e endurecidos. Em relação à distribuição granulométrica, deve-se buscar o empacotamento de todos os agregados, seguindo uma distribuição contínua, que apresente o menor volume de vazios possível.

2.1.5. Zona de transição interfacial pasta agregado

A zona de transição (ZT) segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011) é aquela região situada na interface pasta-agregado, tanto para o agregado graúdo quanto para o miúdo. Segundo os autores como a ZT depende do tamanho e da forma do agregado, certamente é mais pronunciada em agregados de maior dimensão e com forma angular.

Figura 1 - Representação esquemática evidenciando a zona de transição nos concretos.



Fonte Mehta e Monteiro (2008)

A zona de transição (Figura 1), é considerada a zona de resistência limite no concreto, segundo Mehta e Monteiro (2008), por apresentar maior porosidade e heterogeneidade do que o restante da pasta. O aumento da porosidade na ZT é devido à

elevação do fator água/cimento na mistura em decorrência do filme de água que se forma em torno de partículas dos agregados.

Diversas pesquisas (MONTEIRO, 1985 E MASO, 1996) apresentam a forte relação existente entre a espessura e a qualidade da zona de transição interfacial e algumas propriedades dos concretos, tais como resistência mecânica, módulo de deformação, mecanismo de propagação de fissuras e permeabilidade de agentes agressivos nos concretos, justificando, assim, a grande importância do estudo da zona de transição interfacial agregado-matriz dos concretos.

Algumas pesquisas (PAULON, 1991, MONTEIRO, 1993, e KJELLENSEN et al. 1998) apresentam resultados demonstrando que as adições minerais são capazes de produzir uma significativa redução da espessura da zona de transição agregado-matriz, além da densificação dessa região, contribuindo, dessa forma, para a melhoria do desempenho das propriedades relativas à resistência mecânica e à durabilidade dos concretos.

A sílica ativa é considerada uma adição mineral bastante efetiva na redução da espessura da zona de transição agregado-matriz. Nos resultados obtidos por Monteiro e Metha (1988), verificou-se a redução da espessura da zona de transição de 50 μ m, em concretos com agregados tradicionais sem adições minerais, para valores inferiores a 10 μ m, em concretos com sílica ativa.

É importante ressaltar que em concretos reforçados com fibras, sejam elas de qualquer origem, os perímetros das mesmas também funcionam como zona de transição. A diferença é que, dependendo do material da fibra, pode haver maior ou menor adesão à matriz.

2.2. COMPÓSITO CIMENTÍCIO DE ALTO DESEMPENHO COM ADIÇÃO DE FIBRAS

O conceito de reforço de material frágil, com várias formas de fibras descontínuas, é conhecido desde tempos antigos. Bentur e Mindess (2007), relatam que o primeiro composto manufaturado amplamente utilizado foi o cimento de asbesto (amianto), desenvolvido em 1900, pelo austríaco L. Hatscheck, usado para reforçar um número de materiais diferentes, tais como colas epóxi, plásticos e cerâmicos. Após a aplicação do asbesto, outras variedades de fibras foram utilizadas nos compósitos, tais como as fibras de aço, vidro, fibras sintéticas (polipropileno e nylon), bem como as naturais (celulose,

sisal, juta). Estas fibras variam em suas propriedades mecânicas, suas geometrias e de acordo com o uso e o custo/benefício. Bentur e Mindess (2007) relatam que as fibras de aço e de vidro foram utilizadas em obras nas décadas de 50 e 60 e suas geometrias eram retas e lisas. Com o passar dos anos foram desenvolvidas outras geometrias propiciando melhor ligação com a matriz de cimento. Assim, na fabricação atual, há uma variedade de geometrias dessas fibras, como exemplos as de aço que podem ter suas extremidades deformadas (ancoradas) e comercializadas soltas ou coladas em forma de pentes.

A matriz cimentícia de concretos e argamassas tem baixa resistência à tração comparativamente à sua resistência à compressão, uma baixa capacidade de deformação e perde quase que imediatamente a sua resistência após o surgimento da primeira fissura.

Como já foi referido as fibras poliméricas podem ser divididas em sintéticas e naturais. Contrastando com os antigos materiais naturais, palhas por exemplo, o desenvolvimento de polímeros nos últimos 100 anos foi impulsionado pelo crescimento da indústria do petróleo. Desde 1930 o petróleo tem sido a principal fonte de matéria prima para a fabricação de produtos químicos orgânicos, a partir dos quais são fabricados plásticos, fibras, borrachas e adesivos (Illston,1994). Uma grande quantidade de polímeros, com variadas propriedades e formas, tem sido desenvolvidos desde 1955.

Para Taylor (1994) os materiais baseados em cimento Portland são uma opção natural para a aplicação de materiais fibrosos a base de fibras poliméricas, uma vez que são baratos, mas apresentam problemas relativos a ductilidade, resistência ao impacto e capacidade de absorção de energia de deformação. Segundo Johnston (1994), as fibras em uma matriz cimentada podem, em geral, ter dois efeitos importantes. Primeiro, elas tendem a reforçar o compósito sobre todos os modos de carregamento que induzem tensões de tração, isto é, retração restringida, tração direta ou na flexão e cisalhamento e, secundariamente, elas melhoram a ductilidade e a tenacidade de uma matriz frágil.

O desempenho dos compósitos reforçados com fibras é controlado principalmente pelo teor e pelo comprimento da fibra, pelas propriedades físicas da fibra e da matriz e pela aderência entre as duas fases (Hannant, 1994). Johnston (1994) acrescenta o efeito da orientação e distribuição da fibra na matriz. A orientação de uma fibra relativa ao plano de ruptura, ou fissura, influencia fortemente a sua habilidade em transmitir cargas. Uma fibra que se posiciona paralela ao plano de ruptura não tem efeito, enquanto que uma perpendicular tem efeito máximo. Taylor (1994) apresenta os principais parâmetros relacionados com o desempenho dos materiais compósitos cimentados, assumindo que as variações das propriedades descritas abaixo são atingidas independentemente:

a) Teor de fibra. Um alto teor de fibras confere maior resistência pós-fissuração e menor dimensão das fissuras, desde que as fibras possam absorver as cargas adicionais causadas pela fissura;

b) Módulo de elasticidade da fibra. Um alto valor do módulo de elasticidade causaria um efeito similar ao teor de fibra, mas, na prática, quanto maior o módulo maior a probabilidade de haver o arrancamento das fibras;

c) Aderência entre a fibra e a matriz. As características de resistência, deformação e padrões de ruptura de uma grande variedade de compósitos cimentados reforçados com fibras dependem fundamentalmente da aderência fibra/matriz. Uma alta aderência entre a fibra e a matriz reduz o tamanho das fissuras e amplia sua distribuição pelo compósito.

d) Resistência da fibra. Aumentando a resistência das fibras aumenta também a ductilidade do compósito, assumindo que não ocorre o rompimento das ligações de aderência. A resistência da fibra dependerá, na prática, das características pós-fissuração desejadas, bem como do teor de fibra e das propriedades de aderência fibra-matriz;

e) Deformabilidade da fibra: a ductilidade pode ser aumentada com a utilização de fibras que apresentem alta deformação de ruptura. Isto se deve pelo fato de compósitos com fibras de elevado grau de deformabilidade consumirem energia sob a forma de alongamento da fibra;

f) Compatibilidade entre a fibra e a matriz: a compatibilidade química e física entre as fibras e a matriz é muito importante. A curto prazo, as fibras que absorvem água podem causar excessiva perda de trabalhabilidade do concreto. Além disso, as fibras que absorvem água sofrem variação de volume e a aderência fibra/matriz é comprometida. A longo prazo, alguns tipos de fibras poliméricas não possuem estabilidade química frente a presença de álcalis, como ocorre nos materiais a base de cimento Portland. Nestes casos, a deterioração com rápida perda das propriedades da fibra e do compósito pode ser significativa.

g) Comprimento da fibra. Quanto menor for o comprimento das fibras, maior será a possibilidade de elas serem arrancadas. Para uma dada tensão de cisalhamento superficial aplicada à fibra, esta será melhor utilizada se o seu comprimento for suficientemente capaz de permitir que a tensão cisalhante desenvolva uma tensão de tração igual a sua resistência à tração. Na verdade, não basta raciocinar tão somente em cima do comprimento da fibra. Há de se levar em conta o seu diâmetro. Pois depende também dele a capacidade de a fibra desenvolver as resistências ao cisalhamento e à tração.

As fibras plásticas são empregadas no concreto, sendo que a propriedade mais facilmente notada é o aumento da coesão da mistura fresca. Sua função principal é minimizar a fissuração que ocorre no estado plástico e nas suas primeiras horas de endurecimento, não devendo substituir os habituais reforços para o combate da retração hidráulica, pois apresentam pouca influência sobre as propriedades do concreto endurecido (ACI, 1996).

As fissuras de retração plástica são causadas pela mudança de volume do concreto no estado plástico. As retrações que ocorrem no concreto antes do seu endurecimento podem ser divididas em quatro fases (Wang et al, 2001):

Primeira fase - assentamento plástico: ocorre antes da evaporação da água do concreto; quando do lançamento, o espaço entre as partículas sólidas está preenchido com água; assim que essas partículas sólidas assentam, existe a tendência de a água subir para a superfície formando um filme e esse fenômeno é conhecido por exsudação. Neste estágio a mudança de volume do concreto é muito pequena. A retração por assentamento plástico ocorre quando a exsudação é elevada e o cobrimento da armadura é reduzida. A combinação destes fatores provoca elevado grau de assentamento do concreto e se ele for restringido pela armadura, a ponto de gerar tensões internas de tração, certamente ocorrerão fissuras originadas do assentamento plástico. Deve-se notar que estas fissuras são independentes da evaporação e da secagem da superfície. Além da espessura do cobrimento, quanto maior o abatimento do concreto e o diâmetro da armadura maior a possibilidade da ocorrência de fissuras de assentamento plástico (Suprenant, 1999). As fibras de polipropileno reduzem a exsudação diminuindo o nível de assentamento, formando um micro reforço tridimensional que “suspende” ou “sustenta” os agregados, impedindo que eles assentem sob a ação da gravidade e, além disso, as fibras, conforme mencionado anteriormente, aumentam a resistência à tração nas primeiras idades. Com isso as fissuras por assentamento plástico são minimizadas.

Segunda fase - retração plástica primária ou retração por exsudação: é a fissura plástica clássica. A água superficial começa a evaporar-se por razões climáticas – calor, vento, insolação – e quando a taxa de evaporação excede a da exsudação, o concreto começa a contrair-se. Este tipo de retração ocorre antes e durante a pega e é atribuída às pressões que desenvolvem nos poros capilares do concreto durante a evaporação.

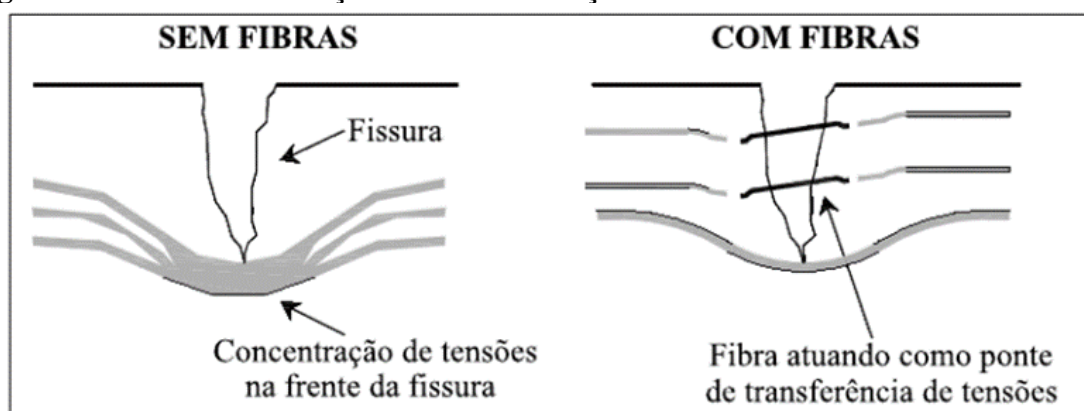
Terceira fase - Retração Autógena: neste caso, quando a hidratação do cimento se desenvolve, os produtos formados envolvem os agregados mantendo-os unidos; nessa fase, a importância da capilaridade decresce e o assentamento plástico e a retração plástica

primária decrescem, tomando seu lugar a retração autógena, que quando o concreto está ainda no estado plástico é pequena, ocorrendo quase que totalmente após a pega do concreto. No passado essa parcela da retração era praticamente desprezada, mas hoje, principalmente com o emprego de baixas relações água/cimento, a retração autógena ganhou destaque importante.

Quarta fase - retração plástica secundária: ocorre durante o início do endurecimento do concreto. Assim que o concreto começa a ganhar resistência, a retração plástica tende a desaparecer. As combinações mais comuns de ocorrência da retração plástica são as três primeiras fases: assentamento plástico, retração por exsudação e a autógena. Sempre que há restrições a essas variações volumétricas, tanto internas como externas, desenvolvem-se tensões de fração com probabilidade da ocorrência de fissuras. Nos últimos anos temos observado um aumento significativo das patologias associadas à retração plástica do concreto, que podem estar ligadas a relações água/cimento mais baixas e ao emprego de cimentos de finura mais elevada, além do emprego de outros materiais cimentícios adicionados a ele, como a escória de alto forno, pozolanas, filer calcário, que geralmente são extremamente finos; é sabido que essas adições incrementam a retração do concreto (KEJIN *et al*, 2001 e Neville, 2011).

Quando ocorre uma fissura num concreto simples, acaba-se criando um obstáculo para a distribuição de tensões ao longo da estrutura. Assim geram-se pontos de concentração de tensão e, caso seja atingida a resistência máxima do material, ocorrerá sua ruptura. O uso de fibras minimiza consideravelmente o processo de fissuração (Figura 2), pois as mesmas se distribuem ao longo da matriz numa forma aleatória, causando uma dissipação da energia ao longo do concreto (FERRARI, 2007).

Figura 2 - Mecanismo de ação das fibras de aço



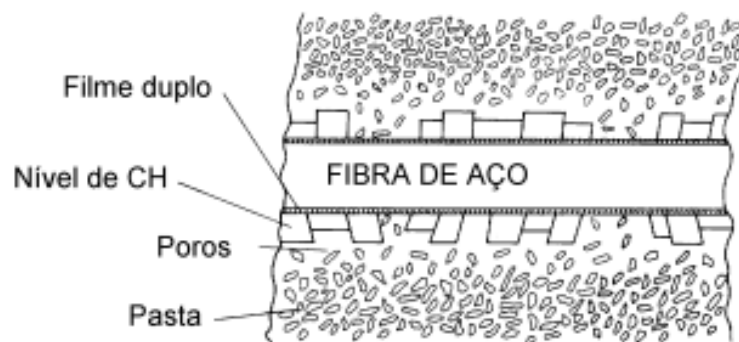
Fonte: Nunes; Agopyan, (1998)

As fissuras existentes numa matriz de concreto podem ser interceptadas pelas fibras (Figura 2), que, por sua vez, opõem-se à tendência de alargamento das fissuras em razão da sua aderência com a matriz. Como resultado, há um aumento na tenacidade do material, pois mais energia é necessária para que ocorra abertura das fissuras. Dessa maneira, a ruína torna-se menos frágil, por conta de deformações plásticas e do escorregamento das fibras.

Ferrari (2007) pontua que a incorporação de fibras dos mais variados tipos, como fibras metálicas, minerais e poliméricas, de elevada resistência à tração e ductilidade, a matriz cimentícia pode melhorar a sua capacidade de carga e de deformação. A presença dessas fibras não melhora a resistência à tração da matriz, mas mantém uma capacidade portante pós fissuração, suportando deformações bem maiores do que a matriz sem fibra.

A zona de transição (Figura 3), por si só, comanda bastante o comportamento do concreto reforçado com fibras uma vez que quanto maior a aderência entre o concreto e as fibras melhores os resultados a nível das propriedades estruturais.

Figura 3 – Interface fibra-matriz de monofilamentos.



Fonte: Adaptado de Bentur e Mindess (2007)

A capacidade de múltipla fissuração e o comportamento de enrijecimento sob deformação (strain-hardening) são as principais características que diferenciam e justificam o comportamento estrutural dos concretos reforçados com fibras tradicionais (normalmente designados pela sigla em inglês FRC – Fiber Reinforced Concrete) e dos compósitos cimentícios de alto desempenho reforçados com fibras (identificados pela sigla HPFRC), (Garcez, 2009).

Segundo Al-Tamini (2001), existem três tipos principais de fibras que podem ser usadas como reforço da matriz cimentícia. São elas:

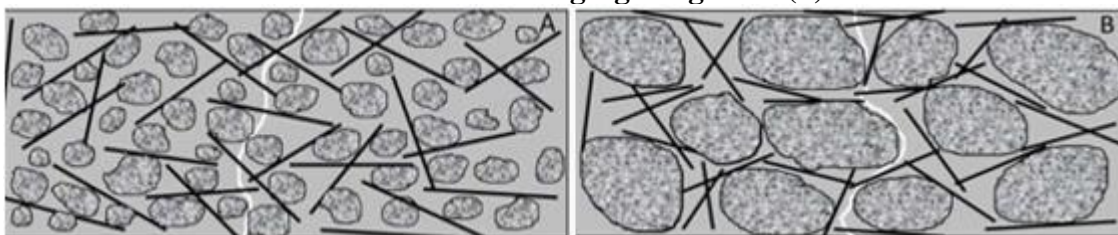
- Fibras metálicas: usualmente de aço;
- Fibras minerais: o vidro é o mais comum;
- Fibras poliméricas: incluindo o carbono, nylon, polipropileno e poliéster

Um aspecto a ser considerado nas fibras é o seu fator de forma que é a relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra. Segundo Zollo (1997) as fibras com pequeno fator de forma apresentam baixa rigidez a flexão, porém ocupam melhor o espaço da matriz cimentícia. Enquanto as fibras com fator de forma maiores apresentam maior rigidez a flexão, porém dificultam no processo de mistura e de adensamento do compósito.

A trabalhabilidade do compósito cimentício no estado fresco é influenciada pelo fator de forma da fibra e pelo volume da adição de fibras. Isso ocorre devido as fibras aumentarem a coesão do material (MEHTA E MONTEIRO, 2008). Segundo Balaguru e Shah (1992) observou-se que as fibras tendiam a embolar-se umas com as outras no processo de mistura do concreto. Para diminuir esse efeito foi restringido o tamanho do agregado graúdo de maneira a se ter uma compatibilidade dimensional.

Para a utilização das fibras em matrizes de concreto devem ser tomados alguns cuidados. Nunes e Agopyan (1998) recomenda que a o diâmetro máximo do agregado graúdo não deve ser duas vezes maior que o comprimento da fibra, pois o efeito de ponte de tensões poderá não ser eficiente. A diminuição do fator de ponte ocorre devido a fissura propagar-se preferencialmente na zona de transição interfacial pasta agregado. Portanto as fibras devem ter compatibilidade de dimensões (Figura 4) com o agregado, de modo as fibras interceptarem as fissuras que surgiram no material com a maior frequência possível (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 4 – Fibras com compatibilidade de dimensões (a) e sem compatibilidade de dimensões com o agregado graúdo(b)



Fonte: Figueiredo (2011)

Outro aspecto a ser considerado na interação fibra matriz é a presença ou não de ganchos. Figueiredo e Torneri (2006) avaliaram a influência de ganchos nas extremidades de fibras com mesmo fator de forma e mesma seção transversal, concluindo que as fibras com ancoragem apresentam uma resistência residual maior nas pequenas deformações comparadas com a sem ancoragem, porém em grandes deformações ocorre o inverso. Esse comportamento se deve a interação fibra-matriz que determina o processo de arrancamento da fibra, mudando o comportamento pós fissuração do material.

Estudo de Ferrari (2007), conclui que as microfibras de aço retas e lisas, se mostram ineficientes, devido à perda de aderência com a matriz, e o seu consequente deslizamento, o que resulta em pequeno aumento de tenacidade do compósito.

A fibra com ganchos possui um vínculo mais forte com a matriz. Devido a isso a força de arrancamento da fibra da matriz é maior, ocasionando melhor comportamento em pequenas deformações. Porém, quando as deformações aumentam, o nível de tensão na matriz na região da ancoragem aumenta, degradando o material neste local (BENTUR e MINDESS, 2007).

Segundo Figueiredo (2011) o material compósito com adições de fibras quando solicitado a tensões de tração poderá romper devido ao alongamento elástico ou plástico das fibras, por degradação da matriz de concreto na zona de transição fibra-matriz, por arrancamento das fibras ou por ruptura da fibra. O autor ainda relata que a resistência da fibra afeta o teor crítico do material compósito, conseqüentemente o comportamento pós-fissuração é afetado. Fato que ocorre devido as tensões serem transferidas pelas fibras.

A resistência do material compósito depende também da orientação das fibras, que nem sempre são aleatórias. Pois no concreto vibrado as fibras tendem preferencialmente ficar orientadas na direção da concretagem.

O tipo de fibra mais utilizado no concreto é a fibra de aço, em função do seu elevado potencial e, provavelmente, por ser a mais facilmente encontrada no mercado. A NBR 15530:2007 prevê três tipos de fibras de aço, classificadas em função de sua conformação geométrica: fibra de aço com ancoragem nas extremidades, corrugada e lisa.

Uma das principais vantagens das fibras de aço sobre os outros tipos de fibra, é a presença de ganchos nas extremidades das fibras retas e da ondulação na fibra ondulada. Tanto os ganchos de extremidades quanto a ondulação das fibras promovem a ancoragem mecânica das fibras na matriz de concreto, o que possibilita que as fibras de aço sejam mais intensamente mobilizadas durante o processo de fissuração da matriz.

A maioria dos trabalhos sobre concreto reforçado com fibras é direcionada a elementos estruturais submetidos à flexão. Concreto reforçado com fibras de aço tem boa durabilidade, mas estão sujeitas à corrosão quando expostas em ambientes quimicamente agressivos, especialmente aos cloretos. O uso em pavimentos, tabuleiros de pontes, entre outros, onde o cloreto pode estar presente, o concreto reforçado com fibras de aço pode apresentar menor resistência à corrosão.

Nos últimos anos tem crescido o uso de fibras poliméricas, principalmente para combater a fissuração por retração do compósito, como é normalmente denominado o

conjunto formado por fibras e pela matriz de cimento que integra o concreto ou argamassa.

Conforme o ACI 544-1R (2002), as fibras típicas de plástico, como poliamida (náilon), polipropileno, polietileno, poliéster (PET), têm diâmetro variando entre 0,02 mm a 0,38 mm. As fibras poliméricas mais empregadas são as sintéticas, em especial as de polipropileno. A adição de fibras de polipropileno interfere pouco na resistência do concreto à tração. A resistência do polipropileno à tração é maior que a da matriz, mas seu módulo de elasticidade é menor, portanto alonga-se mais que a matriz. Atualmente as fibras sintéticas podem ser divididas em microfibras e macrofibras.

Existem dois tipos básicos de fibras de polipropileno: monofilamentos e fibriladas. As fibriladas, apresentam-se como uma malha de finos filamentos de seção retangular. A estrutura em malha das fibras de polipropileno fibrilado promove um aumento de adesão entre a fibra e a matriz, devido a um efeito de intertravamento (Bentur; Mindess, 2007). As fibras chamadas de monofilamento consistem em fios cortados em comprimento padrão.

Segundo Salvador e Figueiredo (2013), as propriedades mecânicas de materiais poliméricos são especificadas pelos mesmos parâmetros utilizados para metais, como módulo de elasticidade, limite de escoamento e resistência à tração. Para a maioria dos polímeros, a caracterização do comportamento mecânico é realizada pelo ensaio de tração, obtendo-se uma curva de tensão deformação (CALLISTER, 2002).

As fibras de polipropileno são produzidas a partir da resina de polipropileno do tipo homopolímero em vários tamanhos e formas, e com diferentes propriedades. As principais vantagens dessas fibras são relativo alto ponto de fusão (165 °C), resistência a álcalis e o baixo preço do material. Em contrapartida suas desvantagens são sua baixa resistência ao fogo, sensibilidade à luz do sol e oxigênio, baixo módulo de elasticidade e fraca aderência com a matriz cimentícia (Bentur e Mindess, 2007). Como o peso específico das fibras de polipropileno é baixo, um alto teor de fibras também reduz o peso do concreto. Isso é um efeito oposto do que acontece com as fibras de aço, onde sua inclusão no concreto aumenta o peso do elemento estrutural.

Zeiml et al.(2006) menciona que o uso de fibras de polipropileno pode diminuir a fissuração do concreto. Segundo Kakooei et al. (2012), o melhor e mais aceitável método de prevenir a formação de fissuras causadas pela retração da pasta de cimento é o uso de fibras, particularmente artificiais (sintéticas), como é o caso das fibras de polipropileno.

Mogre e Parbat (2012), afirmam que o uso de alta fração volumétrica de fibras de polipropileno para o concreto é vantajoso, pois inibe fissuras por retração plástica, aumenta a resistência à tração, aumenta a resistência à flexão, aumenta a resistência à fadiga; aumenta em geral a durabilidade e a resistência à fissuração; impede o lascamento; fornece resistência ao impacto; fornece resistência à abrasão; aumenta a tenacidade.

Com o aumento do volume das fibras de polipropileno, o abatimento da mistura diminui. Logo, para elementos de concreto com alto teor de fibras, Mogre e Parbat (2012) recomendam o uso de superplastificantes para melhorar a trabalhabilidade. Song, Hwang e Sheu (2005) demonstram experimentalmente que a adição de fibras de polipropileno com frações moderadas (1% em volume de concreto) aumentou em 5,8% a resistência à compressão, 9,7% a resistência à tração por compressão diametral e 1,5% a resistência à tração na flexão. Estes resultados não foram expressivos, levando-se em consideração as médias e desvios padrões obtidos.

A tecnologia do emprego de fibras plásticas de polipropileno como elementos de reforço no concreto vem experimentando significativo crescimento de demanda nos últimos anos e essas têm experimentado nos últimos 2 ou 3 anos, no Brasil, um aumento significativo de uso. Atualmente é possível relatar obras diversas que tiveram de alguma forma a incorporação de fibras de polipropileno: barragens, túneis, pontes, canais de irrigação, estações de tratamento de águas e esgoto e, principalmente, em pavimentos e pisos de concreto. Vários são os motivos que explicam esta realidade. No plano técnico, pode-se citar a compatibilidade mecânica, física e química existente entre o concreto e as fibras de polipropileno. O polipropileno é quimicamente inerte, não absorve água, é imputrescível e não enferruja. A mistura destes materiais se enquadra perfeitamente no conceito de compósitos fibrosos. No plano econômico, o aumento do uso de fibra se justifica pelo baixo custo e fácil disponibilidade. A resina de polipropileno é mais barata que outros polímeros, além disso, o processo de fabricação do fio de polipropileno também é mais barato. Soma-se a isto o fato de que o seu manuseio, tanto na fábrica como na obra, não oferece qualquer dano a saúde dos operários.

3.3.1. Hibridização De Fibras Em Compósitos Cimentícios

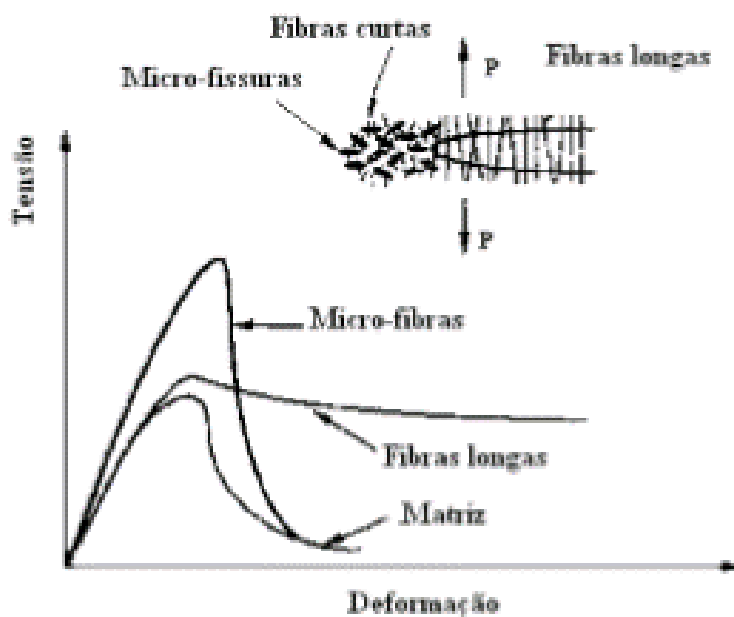
Autores (SILVA e BORDADO, 2013; AHMED E MIHASHI, 2011; FERRARI E HANAI, 2009) tem demonstrado que a hibridização de dois ou mais tipos de fibras podem resultar em um material com comportamento mecânico superior em termos de

encruamento, resistência e capacidade de deformação do que materiais compostos com apenas um tipo de fibra. Isso ocorre devido as fibras serem combinadas com taxas que possibilitam adquirir os benefícios de cada tipo de fibra adicionada na matriz podendo agir em diferentes estágios de carregamento.

Segundo Ferrari (2007) a combinação de microfibras de aço (com gancho nas extremidades) e fibras convencionais é uma alternativa interessante para aplicação no campo da recuperação estrutural, pois a sua adição à matriz cimentícia tem condições de elevar a resistência à tração na flexão e aumentar a tenacidade do material.

BETTERMAN et al. (1995) afirmam que se considerarmos uma matriz reforçada com um mesmo volume de fibras e uma mesma relação de aspecto, porém com diferentes dimensões, quando fibras longas são utilizadas, apenas um pequeno acréscimo na resistência à tração é obtido. Isto provavelmente ocorre porque a fissuração da matriz se inicia em um nível micro, e se as fibras estiverem longe das microfissuras, elas não são capazes de conter a microfissuração. Porém, quando as microfissuras se unirem formando uma microfissura, as fibras longas são capazes de conter a propagação desta microfissura e aumentar substancialmente a tenacidade do compósito. Por outro lado, se um mesmo volume de microfibras é utilizado, em função das suas dimensões, estas estarão muito mais próximas umas das outras, o que possibilita que o maior número de microfissuras sejam interceptadas por elas e, portanto, se contrapondo a tendência de abertura destas microfissuras. Sendo assim, quando microfibras são adicionadas à matriz, ocorre um aumento substancial da resistência à tração do compósito. Porém, para uma mesma relação de aspecto, as microfibras são menores e, portanto, são arrancadas da matriz depois que as microfissuras são formadas, o que causa pequeno acréscimo na tenacidade pós-pico. A Figura 5 apresenta de forma qualitativa o que fora explicado por BETTERMAN et al. (1995). Os autores ainda sugerem que uma combinação de fibras de vários tamanhos pode promover aumentos na resistência à tração e na tenacidade pós-pico uma vez que as fibras menores são mobilizadas em estágios iniciais do carregamento e as fibras longas são mais intensamente mobilizadas em estágios mais avançados, quando as fibras menores já se romperam ou deslizaram da matriz.

Figura 5 - Influência do tamanho das fibras na matriz e nas costuras das fissuras



Fonte: Betterman *et al* (1995)

A adição de fibras híbridas ao concreto, visam promover melhorias na sua resistência à tração e diminuir sua fragilidade, valorizando características pouco comum ao concreto (SALVADOR e FIGUEIREDO, 2013). Ainda segundo este autor a introdução de dois tipos distintos de fibras proporciona ao material maior sinergia, diminuindo a formação e a propagação de fissuras durante o carregamento.

Yap *et al* (2014) concluiu que a adição de fibras híbridas de aço e de polipropileno aumentou significativamente tanto o índice de resistência quanto o fator de resistência residual do CRF. O aumento da resistência após a fissuração foi atribuído para o efeito de ponte de tensões das fibras. O material compósito reforçado com fibras híbridas obteve maior capacidade de absorção de energia e maior resistência residual que a adição simples de fibras de aço com o mesmo volume de fibras.

2.3. TENACIDADE DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS

A principal contribuição das fibras ocorre no estado pós-fissuração, onde a fibra desempenha a função de aumentar a tenacidade do compósito, por fornecer mecanismos de maior absorção de energia (alongamento e descolamento das fibras) (BASTOS, 1999).

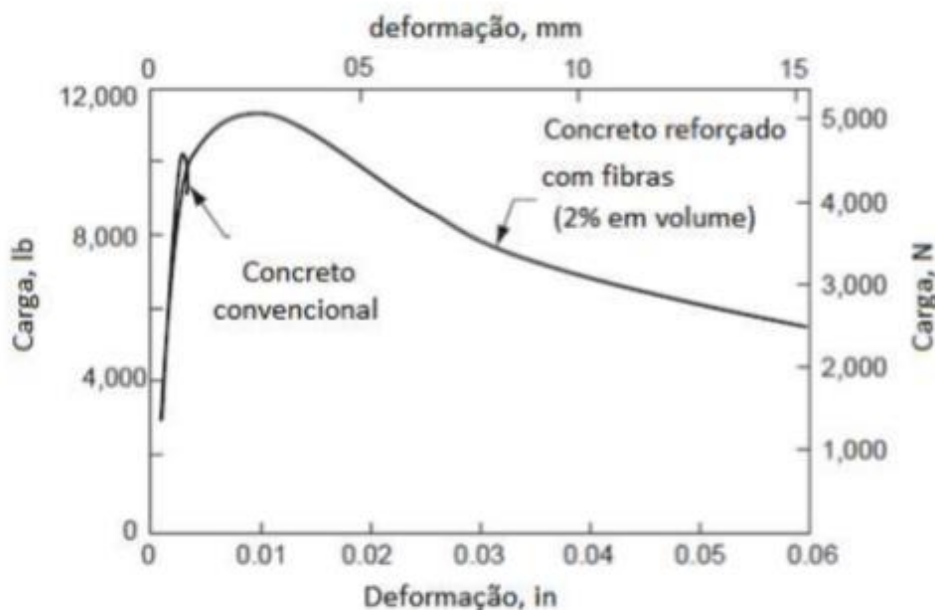
A tenacidade é definida pelo ACI 544-1R (2002) como a energia total absorvida antes da completa separação do corpo de prova. Pode ser medida tomando-se a área completa sob a curva tensão x deformação ou pela área completa sob a curva força x flecha no ensaio à flexão. A tenacidade também pode ser medida por testes de impacto.

Jiang e Banthia (2010) estudaram a influência da tenacidade à tração na flexão em corpos de-prova com dimensões diferentes com concreto reforçado com fibras de polipropileno (CRFP), com três taxas de dosagem de 3, 4,5 e 6kg/m³. As dimensões dos corpos-de-prova que foram testadas correspondem às dimensões de 100x100x350mm e 150x150x500mm respectivamente e utilizaram o procedimento de teste a partir da norma da ASTM C1609/C1609M-10. Os tamanhos dos corpos-de-prova indicaram resultados diferenciados quanto à tenacidade. Os corpos-de-prova com dimensões menores apresentaram maior resistência que os de maiores dimensões, proporcionalmente com o aumento da dosagem de fibras.

Bentur e Mindess (2007) afirmam que a presença de fibras na argamassa promove ao concreto um ganho de resistência à tração, maior capacidade de deformação e aumento da tenacidade. A Figura 6 mostra curvas carga-deformação para o concreto convencional e o concreto reforçado com fibras.

No ensaio de determinação da resistência à flexão, a ruptura do concreto convencional ocorre de forma repentina, assim que a deformação correspondente supera a resistência última à flexão. Já o concreto reforçado com fibras (CRF) é capaz de suportar cargas consideráveis, mesmo com deformações superiores à deformação na fratura do concreto convencional. Portanto, um corpo de prova de CRF após o início da primeira fissuração não se rompe, diferentemente do concreto convencional. As propriedades mecânicas do concreto podem ser melhoradas por fibras curtas discretas aleatoriamente orientadas, que previnem ou controlam a formação e a propagação de fissuras. A fibra induz uma distribuição homogênea das tensões no concreto, o que provoca uma melhor exploração da matriz de elevada resistência (Gencel et al., 2011).

Figura 6 - Comportamento carga-deformação de concreto convencional e CRF



Fonte: Adaptado de Metha e Monteiro, 2008

Os estudos já realizados sobre o assunto reportaram que a adição de fibras de aço possui a tendência de melhorar moderadamente a resistência à flexão do concreto e a sua resistência a tração. Já a adição de fibras de polipropileno tende a ter uma melhora considerável na resistência à flexão e na resiliência do concreto, a resistência à tração não é modificada de maneira significativa. Ambas as fibras transformam o concreto em um material mais dúctil.

2.3.1. Normas Para Avaliação Da Tenacidade Do Concreto

Atualmente existem diversas normas para avaliar o comportamento do concreto com fibras. Entre elas se destacam a JSCE SF4 (1984), a ASTM C1609 (2010), a EN14651 (2007) e a JSCE (2008).

2.3.1.1. JSCE SF4 (1984)

Segundo a JSCE SF4 (1984) o fator de tenacidade a flexão é calculado pela equação (1).

$$\bar{\sigma}b = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \cdot \frac{L}{bh^2} \quad (1)$$

Onde:

$\bar{\sigma}_b$ é o fator de tenacidade na flexão (N/mm²);

T_b é a tenacidade na flexão (N.mm ou J), dada pela área abaixo da curva carga *versus* deslocamento vertical (Figura 7);

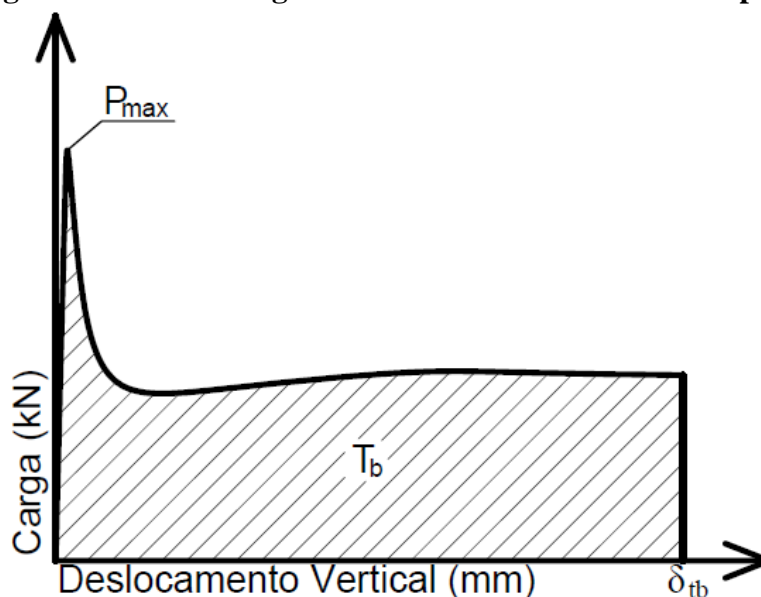
L vão da viga durante o ensaio (mm);

δ_{tb} flecha equivalente a $L/150$ (mm);

b base da viga prismática (mm);

h altura da viga prismática (mm);

Figura 7 – Curva Carga *versus* Deslocamento Vertical típica



Fonte: Adaptado de JSCE (1984)

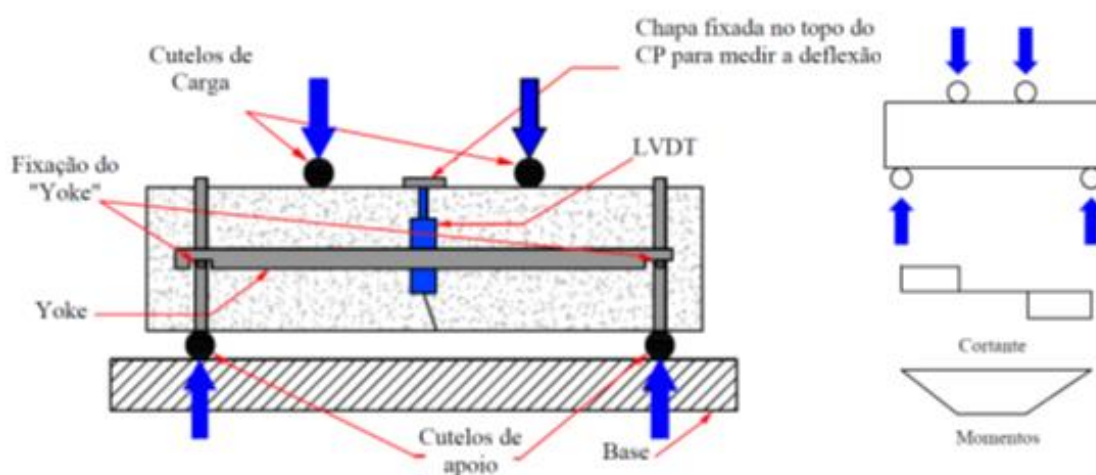
Segundo a JSCE SF-4 (1985) o desempenho à tração na flexão do CRF pode ser avaliado usando-se o conceito da relação de resistência flexional equivalente ($R_{e,3}$), calculada a partir da capacidade de absorção de energia até a deformação de 3 mm (vão/150) do CP e a carga de pico (P_{max}). Assim o valor da relação de resistência flexional equivalente pode ser calculado através da Equação 2.

$$R_{e,3} = \frac{T_b}{P_{max} \cdot \delta_{tb}} \quad (2)$$

Os corpos de prova utilizados para o ensaio são prismáticos com dimensões de 100 mm x 100 mm x 350 mm ou 150 mm x 150 mm x 500 mm, com vão (L) de 300 mm e 450 mm, respectivamente. Para medir a deflexão é necessário um Linear Variable Differential Transformers (LVDT), acoplado ao aparelho Yoke (Figura 8) com a intenção de as medidas dos deslocamentos serem medidos em relação ao próprio corpo de prova, sem interferência do pistão da máquina.

Os resultados utilizando o modelo da norma JSCE – SF4 demonstram uma intensa instabilidade pós-pico na região que corresponde à descida da carga, após o atingimento da carga máxima. Com isto, há uma incerteza quanto à precisão dos pontos nesta região, o que faz que seja duvidosa a fidedignidade do resultado medido nesta condição específica (SALVADOR e FIGUEIREDO, 2013).

Figura 8 – Representação do ensaio de flexão em quatro pontos



Fonte: ARIF (2014)

2.3.1.2. ASTM C1609

A definição da tenacidade de concreto reforçado com fibras, segundo a ASTM C1609 (2010), é idêntica à da norma japonesa, ou seja, a energia absorvida pelo compósito quando este é submetido a flexão, absorvendo a energia antes e após a ruptura da matriz. Ela é definida como a área abaixo da curva carga x deslocamento vertical. Já a resistência residual é calculada a partir da carga sustentada após da fissuração da matriz (SALVADOR e FIGUEIREDO, 2013; ISLAM *et al.*, 2012).

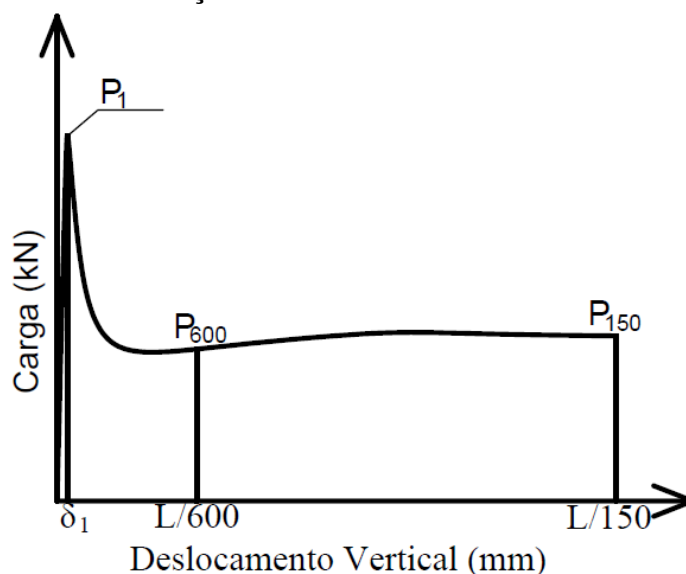
A frequência de aquisição dos dados, conforme a ASTM C1609, deve ser, no mínimo, de 2,5 Hz para a deflexão igual a $L/900$ e, depois, pode ser diminuída para 1 Hz até o final do ensaio. A curva força x deflexão (Figura 9) define como obter a força na ruptura e as forças residuais nas deflexões especificadas

A velocidade de carregamento de ensaio é dividida em duas partes, as quais são definidas até deflexões específicas de $L/900$ e $L/150$. Do início do ensaio até o momento em que o CP atinja o valor de deflexão igual a $L/900$ deve-se utilizar uma velocidade entre 0,035 e 0,1 mm/min. Já para deflexões de $L/900$ até $L/150$ a velocidade do ensaio

pode ser aumentada para valores 0,05 até 0,3 mm/min, pois a instabilidade de pós pico já aconteceu.

Porém a principal vantagem dessa norma é que o mesmo é controlado pelo transdutor de deslocamento enquanto o da norma japonesa é controlada pelo pistão da prensa. Com isso no momento em que ocorre o pico de carregamento a máquina diminui a velocidade do pistão conseguindo ter a leitura de um número maior de pontos na região de pós-pico.

Figura 9 – Curva de Força versus Deslocamento vertical da ASTM C1609



Fonte: Adaptado de ASTM C1609

A norma ASTM C1609 (2010) define a força de primeiro pico como a maior força encontrada na curva força x deflexão até o primeiro ponto em que a inclinação da curva é igual a zero (ponto de máximo). Essa norma tem resposta adequada para compósitos que apresentam comportamento de fissura única (strain softening). Por outro lado, os compósitos que apresentam múltiplas fissuras (strain hardening) não apresentam a força do pico real devido à queda da carga na curva força x deflexão. A resistência à flexão de primeira fissura não é sempre encontrada na parte inicial da curva de força x deflexão quando o corpo de prova apresenta comportamento elásto-plástico ou comportamento (strain-hardening) (ISLAM *et al*, 2012). Os cálculos de resistência à flexão de primeira fissura e as resistências residuais nos deslocamentos L/600 e L/150 são calculadas a partir das Equações 2, 3 e 4 respectivamente:

$$f_1 = P_1 \cdot \frac{L}{bh^2}; \quad (2)$$

$$f_{600} = P_{600} \cdot \frac{L}{bh^2} \quad (3)$$

$$f_{150} = P_{150} \cdot \frac{L}{bh^2} \quad (4)$$

Onde:

f_1 : é a resistência de primeiro pico (MPa);

f_{600}, f_{150} : são as resistências residuais para corpos de prova, quando as deflexões do corpo de prova forem de L/600 e L/150, respectivamente (MPa);

P_1 : é a força de primeiro pico (N);

P_{600}, P_{150} : são as forças residuais quando a deflexão do corpo de prova for L/600 e L/150, respectivamente (N);

L é o vão do ensaio (mm);

b = base do corpo de prova (mm);

h = altura do corpo de prova (mm).

O coeficiente da resistência à flexão equivalente, $R_{T,150}$, é calculado a partir da determinação da resistência de flexão de primeiro pico (MPa) e da tenacidade a flexão, T_{150} , (J). Esse coeficiente é expresso em porcentagem e determinado pela equação 5:

$$R_{T,150} = \frac{150 \cdot T_{150}}{f_1 \cdot b \cdot h^2} \cdot 100\% \quad (5)$$

2.3.1.3. EN 14651 (2007)

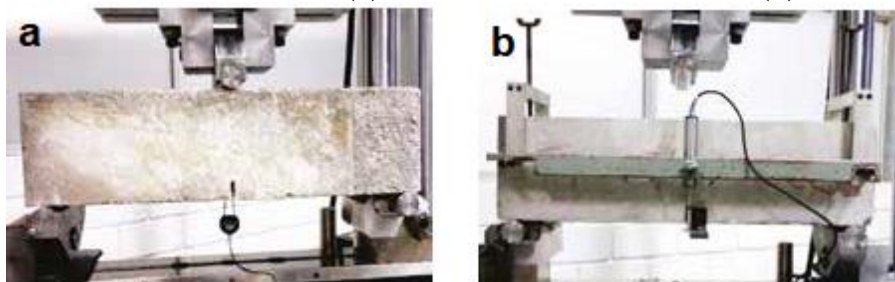
O fib Model Code (FIB, 2013) determina que o método de ensaio para controle do concreto reforçado com fibras (CRF) para aplicações estruturais é o ensaio de flexão em três pontos com entalhe. Nesse ensaio, os prismas recebem um carregamento concentrado em um cutelo superior posicionado no meio do vão e com um entalhe inferior, sendo possível obter uma curva de carga por abertura de fissura (CMOD – Crack mouth opening displacement). Este ensaio é o estabelecido pela norma europeia EN14651:2007.

Segundo a EN14651:2007 o entalhe deverá ser posicionado na região central com dimensões de 5mm de largura e 2,5mm de profundidade e deverá ser executado utilizando um disco de serra diamantado com orientação de 90°.

Segundo Ferrari (2007) esse entalhe tem por objetivo induzir a fratura em um plano preferencial, visto que a máxima sollicitação e a mínima seção transversal estão presentes na região a ser entalhada. Desta forma, durante o ensaio sua abertura de fissura será determinada no plano entalhado.

A norma EN14651:2007 define as dimensões dos corpos de prova prismáticos com seção transversal de 150x150mm e comprimento podendo variar de 550 até 700 mm. De acordo com a norma para a realização do ensaio podem ser medidas a abertura da fissura (CMOD) ou o deslocamento vertical do prisma (δ). Quando é medido o CMOD, o transdutor (clip gauge) deve ser posicionado no entalhe do corpo de prova, de tal forma que a distância entre a borda inferior e a linha de medição seja menor ou igual a 5 mm. No caso de ser medido o deslocamento vertical, um transdutor de deslocamento (LVDT) deve ser montado em uma estrutura rígida (denominado Yoke) fixada ao corpo de prova a meia altura da amostra sobre os cutelos (Figura 10).

Figura 10 – Demonstração dos instrumentos utilizados no ensaio de flexão em três pontos com controle de CMOD (a) e com controle de deflexão (b)



Fonte: Monte E Barboza (2017)

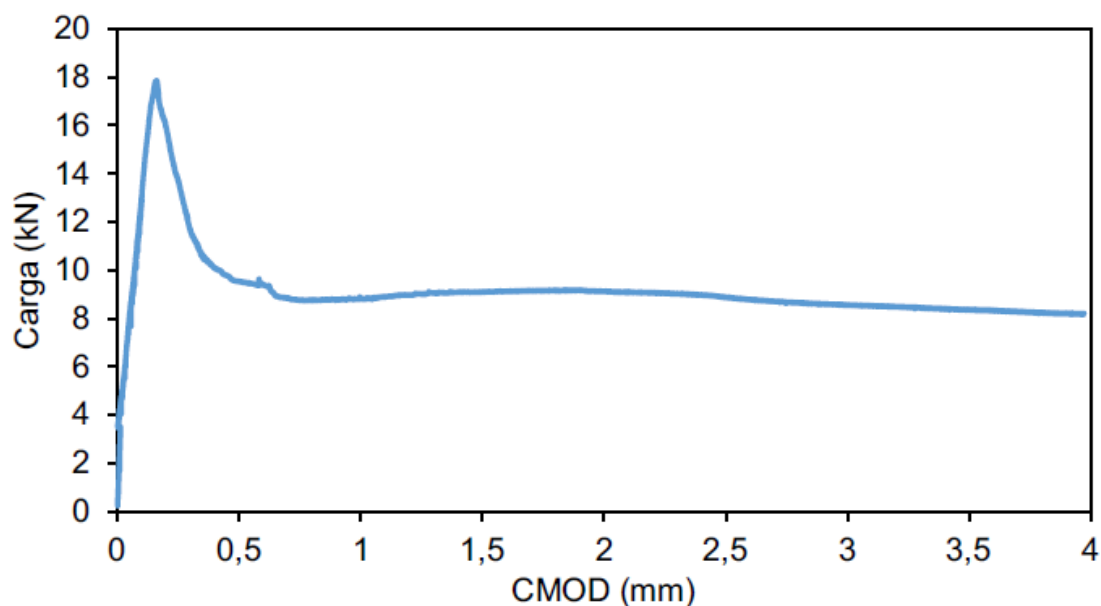
No caso de a máquina de ensaios controlar a taxa de aumento de CMOD, a máquina deve ser operada de modo que CMOD aumente a uma taxa constante de 0,05 mm / min. Quando CMOD = 0,1 mm, a máquina deve ser operada de modo que CMOD aumente a uma taxa constante de 0,2 mm / min. O ensaio deverá ser finalizado com um valor de CMOD não inferior a 4mm.

No caso de uma máquina de teste que controle a taxa de aumento da deflexão, o procedimento de teste acima deve ser aplicado desde que os parâmetros relacionados ao CMOD sejam transformados em parâmetros relacionados à deflexão. A correlação entre o CMOD e o deslocamento é dado pela Equação 6.

$$\delta = 0,85 \text{ CMOD} + 0,04 \quad (6)$$

Com a realização do ensaio é possível determinar uma curva de carga por abertura de fissura (CMOD) (Figura 11)

Figura 11 – Exemplo de curva Carga x CMOD



Fonte: Monte e Barboza (2017)

A norma europeia determina como parâmetros para avaliar o comportamento do material expressões para cálculo do limite de proporcionalidade (Equação 7) e de uma tensão residual de tração na flexão (Equação 8):

$$f_{ct,L}^f = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2} \quad (7)$$

$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2} \quad (8)$$

Em que:

$f_{ct,L}^f$ é o limite de proporcionalidade, em Newton por milímetros quadrado;

$f_{R,j}$ é a resistência à tração na flexão residual correspondente com $CMOD = CMOD_j$ ou $\delta = \delta_j$ ($j = 1,2,3,4$), em Newton por milímetro quadrado;

F_L é o carregamento correspondente ao limite de proporcionalidade, em Newton;

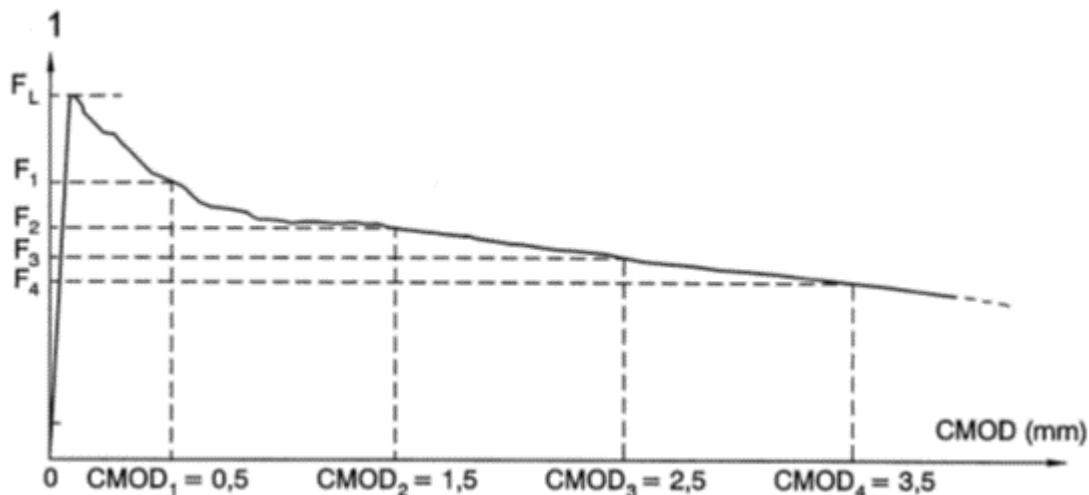
l é o comprimento em milímetros;

b é a base do corpo de prova em milímetros;

h_{sp} é a distância entre a ponta do entalhe e o topo do corpo de prova, em milímetros.

A norma europeia define que o carregamento limite de proporcionalidade deve estar entre o intervalo de início do ensaio até o valor de CMOD igual a 0,5. A mesma norma ainda relata que F_j é a carga correspondente a abertura de fissura específica $CMOD_j$, com $CMOD_1=0,5$ mm, $CMOD_2=1,5$ mm, $CMOD_3=2,5$ mm e $CMOD_4=3,5$ mm (Figura 12).

Figura 12 – Determinação das tensões residuais



Fonte: EN14651:2007

2.3.1.4. JSCE (2008)

A Japanese Society of Civil Engineers (JSCE) publicou em 2008 as recomendações para projeto e construções com uso do Compósitos Cimentícios de Alto Desempenho Reforçado com Fibras. Segundo esta publicação, as principais propriedades do material são determinadas por meio do ensaio de resistência à tração direta. O ensaio é realizado utilizando uma taxa de deslocamento do corpo de prova (sistema fechado) constante em 0,5mm/min, e a curva tensão x deformação é construída a partir dos dados obtidos por meio de equipamentos que determinam os deslocamentos colocados nas faces dos corpos de prova.

A tenacidade é avaliada pela área abaixo da curva tensão-deformação desde o início da curva até a deformação correspondente à tensão máxima do material sob tração axial. Kwon et al. (2014) definiu a tenacidade em termos de capacidade de absorção de energia (g) calculada de acordo com a Equação 9, onde (ϵ_{ts}) é a deformação correspondente à tensão máxima.

$$g = \int_0^{\epsilon_{ts}} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (9)$$

Porém a realização de um ensaio de tração direta é de difícil execução no nosso país, sendo mais prática a utilização do ensaio de flexão em quatro pontos preconizado pela norma Japonesa. Isso ocorre devido a grande maioria dos laboratórios brasileiros não

possuírem uma prensa com controle de velocidade fechado e/ou garras adequadas para a realização desse ensaio.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES

Os materiais que serão utilizados para a produção do compósito cimentício da pesquisa serão: Cimento Portland do tipo CP V ARI de fabricação brasileira; areia natural média; brita zero (pedrisco), aditivo superplastificante, macrofibras de polipropileno, microfibras de polipropileno e água. Os subitens abaixo fornecem a caracterização sucinta dos materiais componentes do CRF produzido.

3.1.1. Cimento Portland

Para a produção dos CRF foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial CPV ARI produzido pela Cimentos CAUE- Grupo Camargo Correa.

No laboratório de Materiais da UTFPR-CM, foram determinados o índice de finura e a massa específica do cimento seguindo os procedimentos das normas nacionais vigentes que são a ABNT NBR 11579:2012, ABNT NBR 16605:2017 respectivamente. Foi constatado que o cimento possui massa específica 3100 kg/m^3 e um índice de finura de 0,45%.

Foi também realizado o ensaio de resistência a compressão do cimento, na qual são utilizadas areias normatizadas com uma granulometria especificada para a produção de uma argamassa com traço pré-determinado, de forma que a única variável seja o cimento. O ensaio foi realizado seguindo os procedimentos da ABNT NBR 7215:1996 e determinou que o cimento possui uma resistência de 35,72 MPa aos 28 dias.

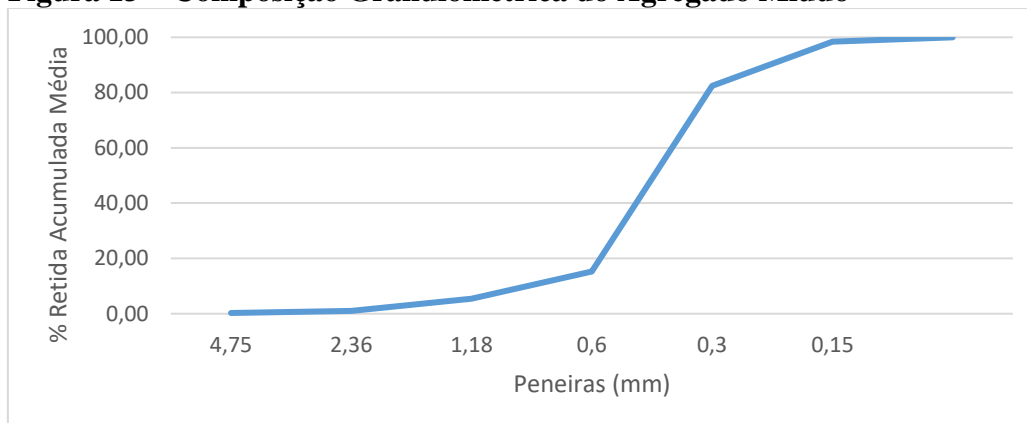
3.1.2. Agregados

Foi utilizado como agregado miúdo uma areia natural quartzosa média obtida no comércio local, proveniente do leito do Rio Paraná, normalmente usada na produção de concretos convencionais na Região de Campo Mourão- PR. O material utilizado foi caracterizado (Tabela 2) conforme a sua granulometria (Figura 13), massa específica real e massa específica aparente utilizando os métodos previstos nas normas ABNT NBR NM 7211:2009, ABNT NBR NM 52 e ABNT NBR NM 45:2006 respectivamente.

Tabela 2 – Granulometria do Agregado Miúdo

Ensaio 1				Ensaio 2			Média
#	Peso	% Retida	% RA	Peso	% Retida	% RA	% RA
4,75	2,79	0,28	0,28	2,3	0,23	0,23	0,25
2,36	6,68	0,67	0,95	9,03	0,90	1,13	1,04
1,18	43,06	4,31	5,26	43,82	4,39	5,52	5,39
0,6	115,18	11,53	16,79	82,94	8,30	13,83	15,31
0,3	659,7	66,05	82,84	682,6	68,35	82,17	82,51
0,15	157,17	15,74	98,57	161,16	16,14	98,31	98,44
Fundo	14,26	1,43	100,00	16,87	1,69	100,00	100
Soma	998,84	100	204,69	998,72	100	201,20	202,94
Módulo de Finura							2,03
Dimensão Máxima Característica							2,36mm

Fonte: Autor

Figura 13 – Composição Granulométrica do Agregado Miúdo

Fonte: Autor

O agregado miúdo apresentou massa específica real igual a 2650 kg/m³ e massa específica aparente igual a 1470 kg /m³

Tabela 3 – Granulometria do Agregado Graúdo

Ensaio 1				Ensaio 2			Média
#	Peso	% Retida	% RA	Peso	% Retida	% RA	% RA
19	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00
12,5	8,03	0,80	0,80	9,97	1,00	1,00	0,90
9,5	22,3	2,23	3,04	26,78	2,68	3,68	3,36
5,6	487,95	48,86	51,90	501,45	50,19	53,87	52,88
4,75	438,38	43,90	95,80	410,26	41,06	94,93	95,37
Fundo	41,95	4,20	100,00	50,62	5,07	100,00	100,00
Soma	998,61			999,08			152,51
Módulo de Finura							1,53
Dimensão Máxima Característica							9,5mm

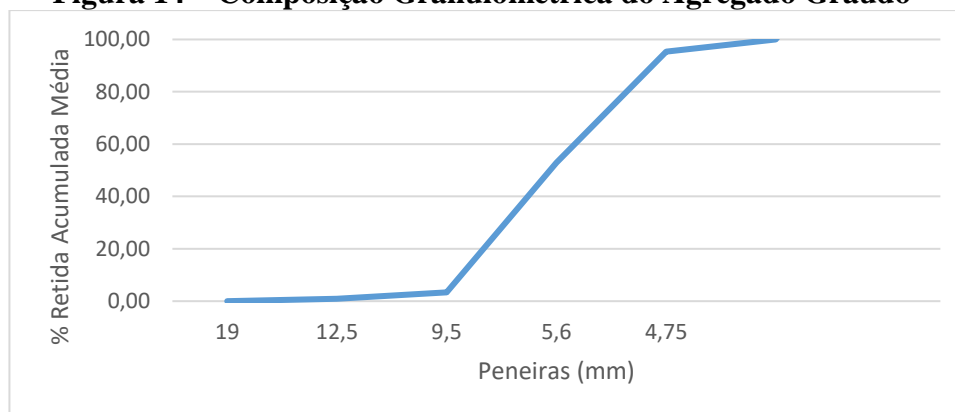
Fonte: Autor

Foi utilizado como agregado graúdo uma brita zero com diâmetro característico de 9,5mm que possui origem basáltica obtida no comércio local de Campo Mourão –

Paraná. Este material foi caracterizado quanto a sua granulometria utilizando os procedimentos da ABNT NBR NM 248 (2003) (Tabela 3 e Figura 14) conforme a norma já citada para agregado miúdo e quanto a sua massa específica real e aparente conforme ABNT NBR NM 53 (2009).

O agregado graúdo apresentou massa específica real de 2890 kg/m³ e massa específica aparente de 1460 kg/m³.

Figura 14 – Composição Granulométrica do Agregado Graúdo



Fonte: Autor

3.1.3. Superplastificante

Será utilizado o MC-PowerFlow 3100 (Tabela 4) que é um superplastificante sintético baseado na nova tecnologia de polímeros policarboxilatos. O fabricante recomenda a utilização de taxas deste superplastificante entre 0,2% e 5% da massa de cimento.

Tabela 4 – Informações Técnicas do Superplastificante

Característica	MC-Powerflow 3100
Densidade (g/cm ³)	1,07
Dosagem Recomendada (%)	0,2 – 5,0
Cor	Marrom

Fonte: MC (2017)

3.1.4. Fibras

Para a realização da pesquisa foram utilizados dois tipos de fibras de polipropileno. A macrofibra (Figura 15a) de polipropileno, denominada de fibra tipo A, foi disponibilizada pela empresa Viapol. A microfibra de polipropileno (Figura 15b), denominada de fibra tipo B, foi disponibilizada pela empresa Macaferri (Tabela 5).

Para a seleção das macrofibras foi tomado o cuidado das mesmas apresentarem compatibilidade dimensional com o diâmetro máximo do agregado (9,5mm). Pois a fibra deve possuir comprimento maior que duas vezes o diâmetro máximo característico dos agregados para que o efeito de ponte de tensões não seja prejudicado.

Tabela 5 – Fibras utilizadas na pesquisa

Característica	Macrofibras	Microfibras
Comprimento	40 mm	12 mm
Diâmetro	0,69mm	18µm
Fator de Forma	58	66,66
Resistência a tração	600-650 MPa	300 MPa
Densidade	920 kg /m ³	910 kg / m ³
Modulo de Elasticidade	9,5 GPa	3 GPa

Fonte: Macaferri (2018) e Viapol (2018)

Figura 15 – Fibras utilizadas na pesquisa (a) macrofibra (b) microfibra



Fonte: Autor

3.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para a produção dos compósitos cimentícios foram realizadas três etapas: (i) determinação do traço e ensaios no estado fresco, (ii) preparação dos corpos de prova e (iii) ensaios no estado endurecido.

3.2.1. Determinação Do Traço E Ensaios No Estado Fresco

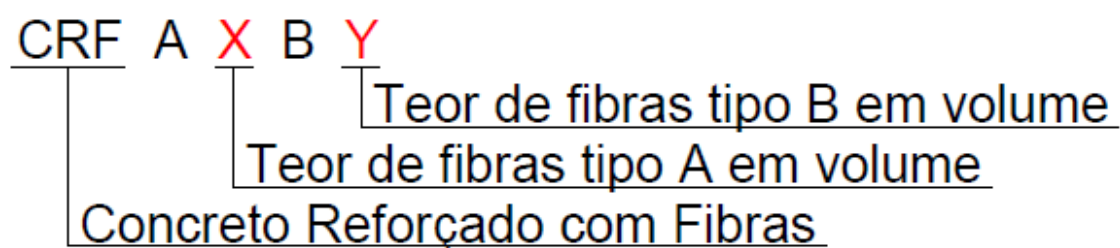
Foi utilizado o método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) para o cálculo de um traço de referência (sem fibras) com resistência à compressão característica definida de 30 MPa aos 28 dias utilizando os materiais caracterizados previamente. Para a produção dos traços foi utilizada a condição de preparo A da ABNT NBR 12655:2015 que descreve que o cimento e os agregados devem ser medidos em

massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados. Para maiores detalhes do procedimento de cálculo do traço consultar o Apêndice A.

Após a determinação do traço inicial definido como sendo de 1:1,43:1,92 (cimento: areia: brita) em massa com relação A/C de 0,47, foi determinada a quantidade de superplastificante a ser adicionada em cada grupo de compósitos. O objetivo da adição do superplastificante é que o incremento de fibras não provoque a perda de trabalhabilidade da mistura. Para que essa afirmação seja garantida, foi medido o abatimento do tronco de cone do compósito de referência e fixado para os demais compósitos utilizando os procedimentos da ABNT NBR NM 67 (1998). Foi incrementado superplastificante até que o abatimento fosse considerado igual pela ABNT NBR 7212 (2012). Porém foi respeitado os limites inferior e superior da quantidade de superplastificante recomendada pelo fabricante.

Foram denominados os grupos de CRF em função da quantidade de cada tipo de fibra na composição, como consta na Figura 16. Os valores de X e Y representam os teores volume dos CRF de macrofibra (Fibra Tipo A) e microfibra (Fibra Tipo B) respectivamente. X e Y podem apresentar os valores de 0, 3, 6 e 9 que representam os teores de fibra na mistura de 0%, 0,3%, 0,6% e 0,9% respectivamente. Os teores de fibras em volume que constituíram os compósitos estudados estão presentes na Tabela 6.

Figura 16 – Nomenclatura dos grupos de CRF



Fonte: Autor

Todos ensaios no estado fresco foram realizados no Laboratório de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus de Campo Mourão (UTFPR-CM).

A Tabela 7 apresenta o consumo de materiais por metro cubico para a produção dos CRF. Para estimar o consumo, foi utilizado como padrão o traço do grupo CRFA3B3.

Tabela 6 – Teor de Fibras em volume do Compósito Reforçado com Fibras (CRF)

Grupos	CRF	Teor* de fibras de PP	
		Macrofibra A	Microfibra B
1	CRFA0B0	0%	0%
2	CRFA3B0	0,3%	0%
3	CRFA6B0	0,6%	0%
4	CRFA9B0	0,9%	0%
5	CRFA3B3	0,3%	0,3%
6	CRFA3B6		0,6%
7	CRFA3B9		0,9%
8	CRFA6B3	0,6%	0,3%
9	CRFA6B6		0,6%
10	CRFA9B3	0,9%	0,3%
11	CRFA9B6		0,6%
*Em relação ao volume de concreto			

Fonte: Autor

Tabela 7 - Consumo de materiais por metro cubico de CRF

Material	Consumo por m ³ (kg)
Cimento	500,86
Areia	716,23
Brita	961,65
Água	235,40
Macrofibra de PP	2,76
Microfibra de PP	2,73

3.2.2. Preparação dos Corpos De Prova

As misturas foram preparadas em betoneira elétrica (Figura 17) com capacidade de 500 litros iniciando-se pela mistura dos agregados e parte da água de amassamento. Em seguida, procedeu-se com a colocação do cimento e o restante da água procedendo-se com a mistura. No fim, as fibras foram adicionadas lentamente com a betoneira em movimento e procedendo-se com a realização do ensaio de abatimento do tronco de cone (Figura 18).

Figura 17 – Foto da Betoneira Elétrica

Fonte: Autor

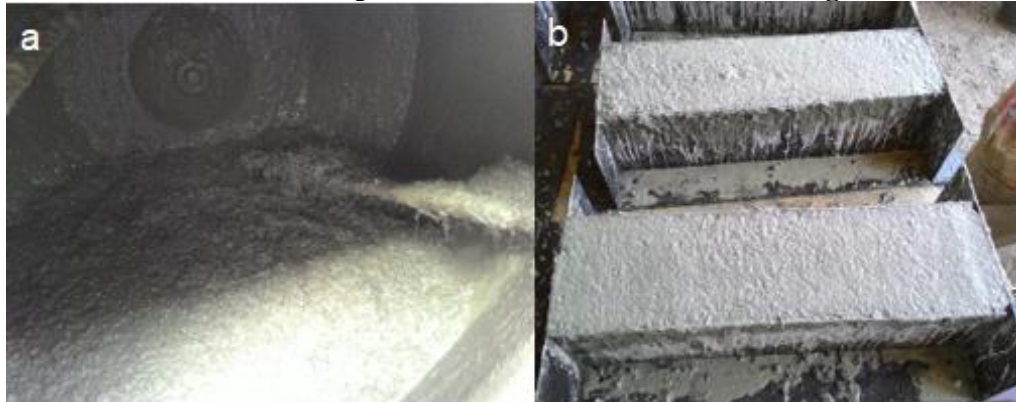
Figura 18 – Teste de abatimento do tronco de cone

Fonte: Autor

A próxima etapa foi moldar os corpos de prova (Figura 19). Para cada compósito com diferentes teores de fibras a ser estudado foram moldados 12 corpos de prova (CPs) cilíndricos (4 para compressão, 4 para módulo de elasticidade e 4 para tração por compressão diametral) totalizando 132 CPs cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Também foram moldados 3 corpos de prova para ensaio de flexão para cada grupo de compósitos, totalizando 33 CPs prismáticos com dimensões de 15x15x50cm.

Todos os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas do momento da moldagem. Após a desforma, os corpos de prova foram submersos em um recipiente com água até 48 horas antes da realização dos ensaios mecânicos, de acordo com o preconizado na ABNT NBR 5738:2003.

Figura 19 – Consistência do compósito no estado fresco (a) e moldagem dos CPs (b)



Fonte: Autor

3.2.3. Ensaio no Estado Endurecido

Primeiramente foram medidos todos os corpos de prova com a utilização de um paquímetro pois, os mesmos podem apresentar geometria diferente do preconizado inicialmente.

Após isso foram realizados os ensaios de compressão, de módulo de elasticidade estático, de tração por compressão diametral e de flexão conforme os procedimentos das normas ABNT NBR 5739:2007, ABNT NBR 8522:2003, ABNT NBR 7222:2004 e JSCE-SF4 1984 respectivamente. Todos os ensaios mecânicos foram realizados com o compósito cimentício na idade de 60 dias para que não houvesse interferência da idade.

Para obter os valores da resistência a compressão e a tração foram realizados os ensaios de compressão simples e de tração por compressão diametral no laboratório de materiais da UTFPR-CM utilizando uma prensa hidráulica (Figura 20).

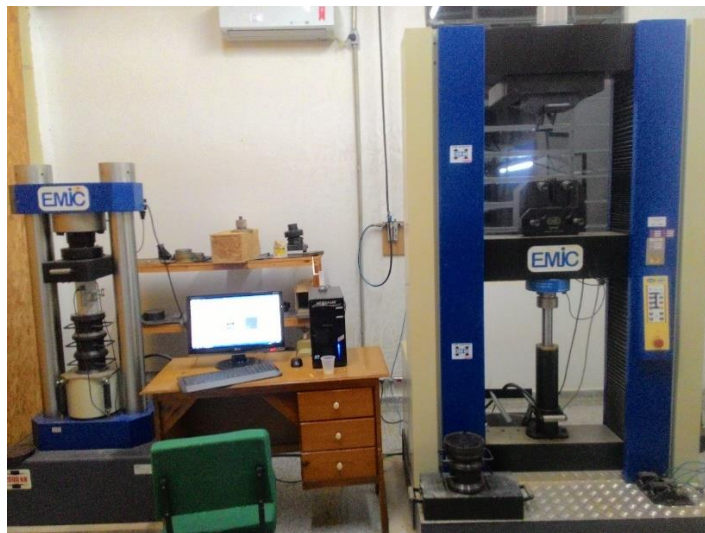
Figura 20 – Fotos (a) Prensa hidráulica (b) Ruptura de CP de compressão diametral e (c) Ruptura de CP de compressão simples



Fonte: Autor

Foi realizado o ensaio de módulo de elasticidade com a utilização de uma máquina universal de ensaios com a leitura de um extensômetro eletrônico de configuração dupla no laboratório de estruturas da UTFPR-CM (Figura 21).

Figura 21 – Máquina Universal de Ensaio da UTFPR-CM realizando ensaio de módulo de elasticidade



Fonte: Autor

3.2.3.1. Ensaio De Flexão Em Quatro Pontos (JSCE-SF4 1984)

Foi seguido o procedimento da norma japonesa JSCE-SF4 1984 para o ensaio de flexão em quatro pontos com uma velocidade constante do pistão de 0,15mm/min com o intuito de obter a resistência a flexão e a tenacidade dos materiais compósitos.

Figura 22 – Aparelho Yoke fixado no Corpo de Prova



Fonte: Autor

A leitura dos dados foi realizada por um deflectômetro eletrônico de configuração dupla posicionado na região central do corpo de prova. O deflectômetro (transdutor de deslocamento tipo LVDT) foi posicionado em um Yoke (Figura 22) para o deslocamento

ser medido em relação ao próprio corpo de prova sem ocorrer interferência do deslocamento do pistão da máquina.

Figura 23 – Máquina Universal de Ensaios (a) Sistema de Aquisição de dados (b)



Fonte: Autor

Os ensaios de flexão foram realizados utilizando uma máquina universal de ensaios Instron (Figura 23) com sistema de aquisição de dados presente no laboratório de materiais da Universidade Estadual de Maringá (UEM).

Para o cálculo da tenacidade na flexão foi utilizado uma adaptação do método de integração numérica da regra do trapézio denominado regra do trapézio para segmentos desiguais. Esta regra consiste em calcular a área abaixo de segmentos de retas formadas pela união dos pontos lidos no ensaio formando um trapézio com a abscissa do gráfico (Figura 24). Com isso a soma de todos os trapézios formados (todos os pontos lidos no ensaio) será a área abaixo do gráfico.

Portanto a tenacidade na flexão pode ser calculada pela Equação 10:

$$T_b = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(P_i + P_{i+1}) \cdot (d_{i+1} - d_i)}{2} \quad (10)$$

Sendo:

n o número total de leituras realizadas no ensaio;

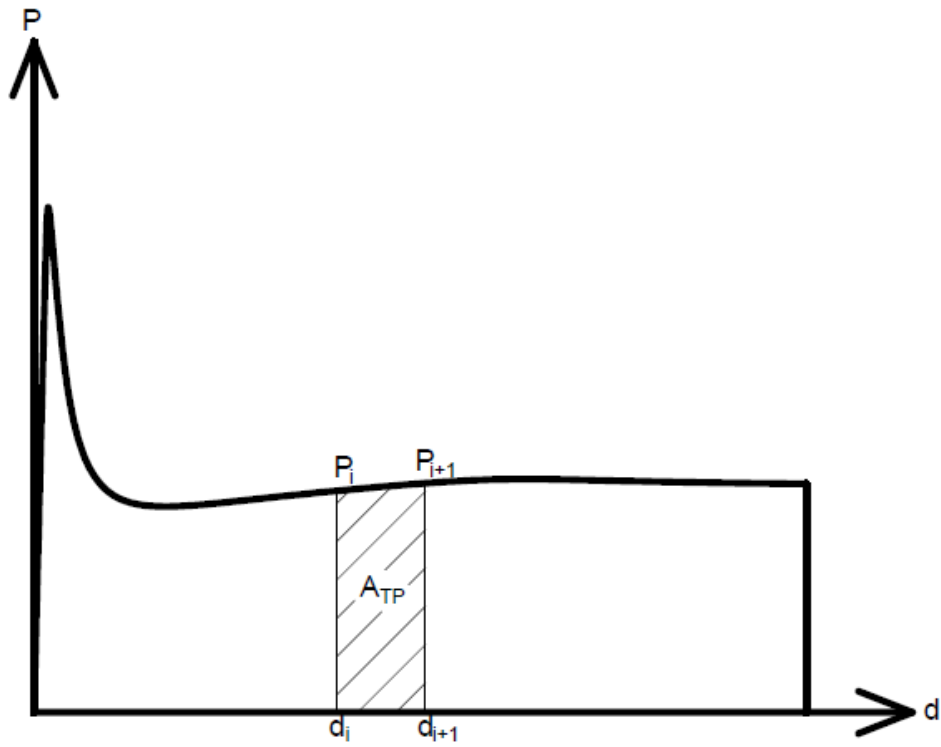
P_i a carga no momento da leitura i ;

P_{i+1} a carga no momento da leitura $i + 1$;

d_i o deslocamento no momento da leitura i ;

d_{i+1} o deslocamento no momento da leitura $i + 1$;

Figura 24 – Integração Numérica por meio da Regra do Trapézio para segmentos desiguais



Fonte: Autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram analisados 11 grupos de CRF por meio dos ensaios de abatimento do tronco de cone, da resistência a compressão, do módulo de elasticidade, da tração indireta e da flexão em quatro pontos.

Nos gráficos demonstrando a influência dos teores de macrofibras e dos teores de microfibras nos grupos estudados foi utilizado a função estatística do erro padrão para a definição das margens de erro para baixo e para cima.

4.1. CRF NO ESTADO FRESCO

Na Tabela 8 são indicados os valores de abatimento e de aditivo superplastificante (SP) utilizado em cada grupo de CRF.

Tabela 8 – Quantidade de Aditivo utilizado e Abatimento dos CRF estudados

Grupo	CRF	Microfibra(%)	Macrofibra (%)	SP (%)*	Abatimento (mm)
1	CRFA0B0	0	0	0	170
2	CRFA3B0	0	0,3	0	165
3	CRFA6B0	0	0,6	0	150
4	CRFA9B0	0	0,9	0,2	210
5	CRFA3B3	0,3	0,3	0,2	215
6	CRFA3B6	0,6	0,3	0,2	160
7	CRFA3B9	0,9	0,3	1,4	140
8	CRFA6B3	0,3	0,6	0,2	195
9	CRFA6B6	0,6	0,6	0,4	200
10	CRFA9B3	0,3	0,9	0,2	165
11	CRFA9B6	0,6	0,9	0,6	160

*OBS: A quantidade de superplastificante é a % em relação a massa de cimento

Fonte: Autor

Lucena (2017) pesquisou o comportamento de propriedades mecânicas para os teores de microfibras de polipropileno de 0, 1 e 2% em volume de concreto. Este autor observou que o índice de consistência decaiu significativamente de amostras sem microfibras para amostras com 1% de fibras, e ocorre uma redução ainda maior para amostras com 2% de fibras de PP. Este autor argumenta que a diminuição do valor do índice de consistência representa um aumento da consistência da mistura e indica uma menor trabalhabilidade.

Para o CRFA0B0 (referência) o valor do abatimento foi de 170 mm, portanto, para que o compósito não perdesse trabalhabilidade com o aumento da quantidade de fibras foi adicionado superplastificante de modo que o compósito ficasse com abatimentos de 170 ± 30 mm respeitando os limites recomendados pelo fabricante do aditivo.

Inicialmente, seriam estudados mais dois grupos de compósitos com taxas de 0,6% de macro fibras e 0,9% de microfibras (CRFA6B9) e de 0,9% de macrofibras e 0,9% de microfibras (CRFA9B9). Porém a partir do grupo CRFA6B9 ocorreu a segregação da mistura devido a quantidade de fibras ser muito alta para o traço utilizado. Com isso não foram estudados esses dois grupos.

Segundo Chen & Liu (2005) quando as fibras são adicionadas à matriz cimentícia é formada uma rede de fibras conectadas que prejudicam a mistura podendo-se chegar até mesmo a formação da segregação devido à falta de fluxo de material.

Segundo Chen & Liu (2005) a área de superfície das fibras de PP absorvem a pasta de cimento para promover o seu envolvimento e isso aumenta a viscosidade da mistura e conseqüentemente o valor do slump é alterado. Foi notado que os dois tipos de fibras tenderam a diminuir a trabalhabilidade do compósito, porém a adição de microfibras de polipropileno comprometeu mais a trabalhabilidade do que às macrofibras. Isso ocorreu, pois, as microfibras possuem maior área superficial que as macrofibras necessitando de maior quantidade de argamassa para ser envolvida.

4.2. RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

A Tabela 9 apresenta os resultados de resistência a compressão de módulo de elasticidade e de tração por compressão diametral. Foram determinados também o coeficiente de variação (CV) e a relação (R) com o concreto de referência que cada grupo de compósito obteve.

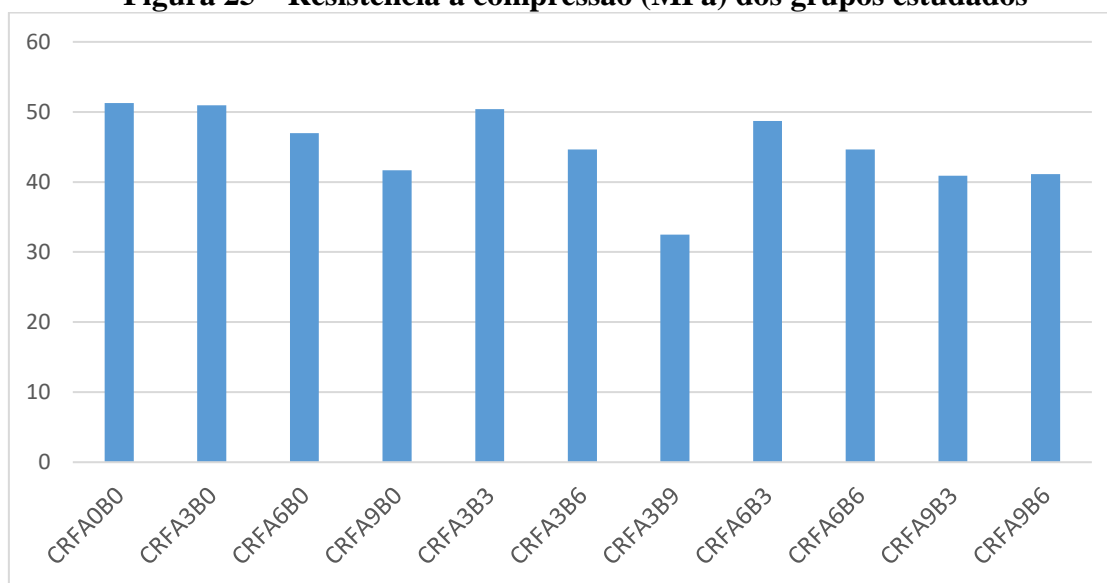
Tabela 9 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial (f_c), Módulo de elasticidade longitudinal (E) e Tração à compressão diametral ($f_{ctm,ed}$)

CRF	f_c (MPa)			E (GPa)			$F_{ctm,ed}$ (MPa)		
	Média	CV (%)	R(%)	Média	CV (%)	R(%)	Média	CV (%)	R(%)
CRFA0B0	51,26	4,08	---	36,95	3,81	---	4,27	5,40	---
CRFA3B0	50,96	5,16	99,42	35,10	0,70	94,99	4,44	3,09	104,13
CRFA6B0	46,98	5,32	91,65	33,45	1,48	90,53	4,97	11,64	116,52
CRFA9B0	41,69	5,90	81,32	31,90	7,18	86,33	4,11	12,81	96,43
CRFA3B3	50,40	7,16	98,32	35,08	2,13	94,93	4,60	8,76	107,79
CRFA3B6	44,63	7,05	87,06	34,98	2,01	94,65	4,31	6,91	101,05
CRFA3B9	32,51	20,05	63,42	28,17	5,38	76,23	3,88	3,77	91,06
CRFA6B3	48,70	7,24	95,01	30,70	2,89	83,09	4,73	11,57	110,95
CRFA6B6	44,65	4,66	87,11	29,20	9,24	79,03	4,32	11,40	101,34
CRFA9B3	40,91	2,48	79,81	28,28	2,21	76,52	4,09	2,80	95,88
CRFA9B6	41,11	8,52	80,21	29,03	3,42	78,55	4,24	11,95	99,29

Fonte: Autor

A resistência à compressão é a propriedade mecânica do concreto mais estudada (SUSSEKIND, 1987) porque ela é a base para o cálculo de estruturas de concreto armado e é uma das propriedades adotadas para controle tecnológico das estruturas. Porém Mheta e Monteiro (1994) afirmam que a resistência à compressão não é a mais importante contribuição do reforço com fibras no concreto. Isto pode ser facilmente identificado na Figura 25 em que todas as misturas reforçadas com fibras, independentemente de teores e comprimentos, obtiveram valores de resistência a compressão inferiores aos valores da mistura de referência.

Figura 25 – Resistência a compressão (MPa) dos grupos estudados



Fonte: Autor

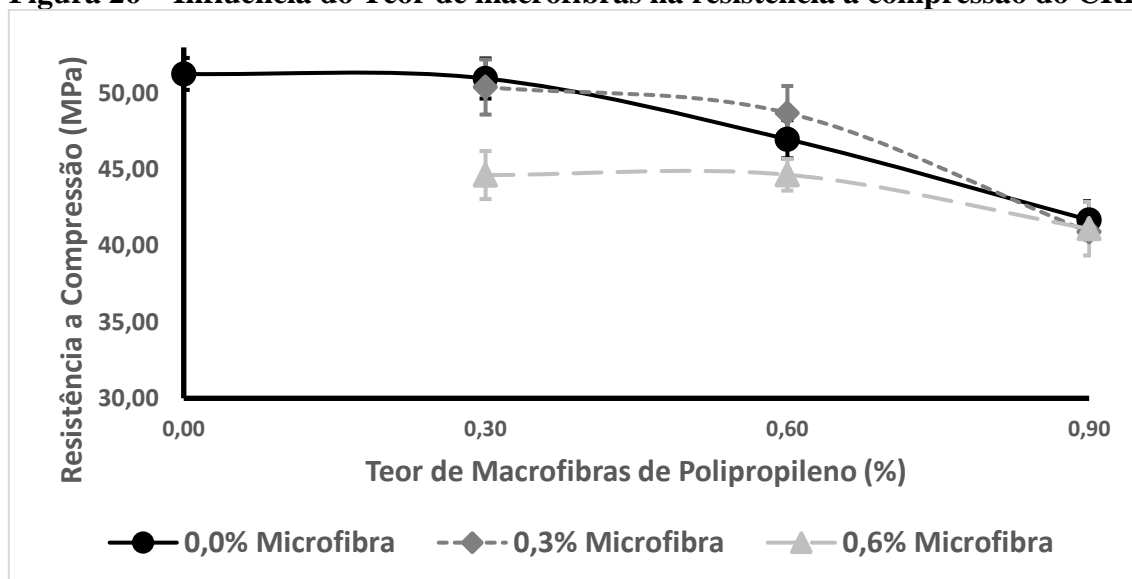
Pode-se observar que o aumento da taxa de macrofibras na matriz proporcionou um decréscimo na resistência do CRF (Figura 26). Considerando o erro médio, foi verificado que enquanto a taxa de macrofibras era superior à de microfibras o valor da resistência a compressão não foi alterado significativamente (Figura 27). Enquanto que a adição de teores de microfibras superiores à de macrofibras grupos (CRFA3B6 e CRFA3B9) a resistência a compressão do compósito diminuiu. Esse fator pode ter ocorrido devido as macrofibras proporcionarem uma maior tendência de aumentar o índice de vazios da matriz em relação as microfibras.

A adição de apenas macrofibras de PP em seu maior teor (0,9%) resultou num decréscimo de 18,7% da resistência à compressão em relação ao traço referência sem adição de fibras, enquanto que a hibridização de 0,3% de macrofibras com 0,0; 0,3; 0,6 e 0,9% de microfibras os valores da resistência média à compressão foi de 50,96; 50,40;

44,63 e 32,51MPa pode-se observar um decréscimo de 36,2% da resistência à compressão quando adicionada a microfibras no seu maior teor.

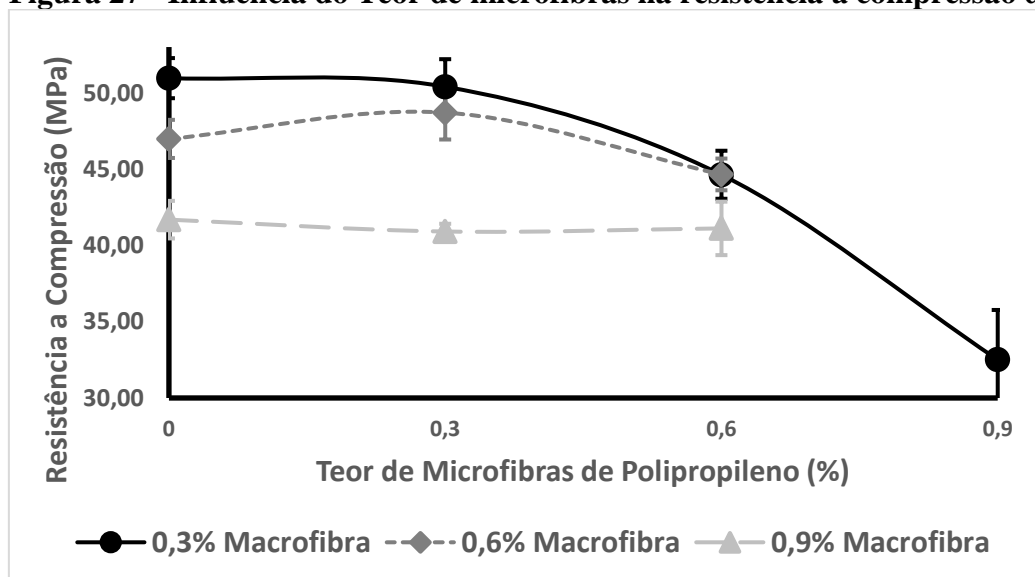
A hibridização de 0,6% de macrofibras com 0,0; 0,3 e 0,6% de microfibras os valores da resistência à compressão foram de 46,98; 48,70 e 44,65MPa. Pode-se observar que todos os valores da resistência à compressão foram menores que o concreto referência e daqueles com taxas de 0,3% de macrofibras. Observou-se também um decréscimo de 5,0% da resistência à compressão quando adicionada a microfibras no seu maior teor (0,6%).

Figura 26 – Influência do Teor de macrofibras na resistência a compressão do CRF



Fonte: Autor

Figura 27 - Influência do Teor de microfibras na resistência a compressão do CRF



Fonte: Autor

Enquanto que a hibridização de 0,9% de macrofibras com 0,0; 0,3 e 0,6% de microfibras os valores da resistência à compressão foram de 41,69; 40,91 e 41,11MPa. Pode-se observar que todos os valores da resistência à compressão foram menores que o concreto referência e menores do que os concretos hibridizado com 0,6% de macrofibras.

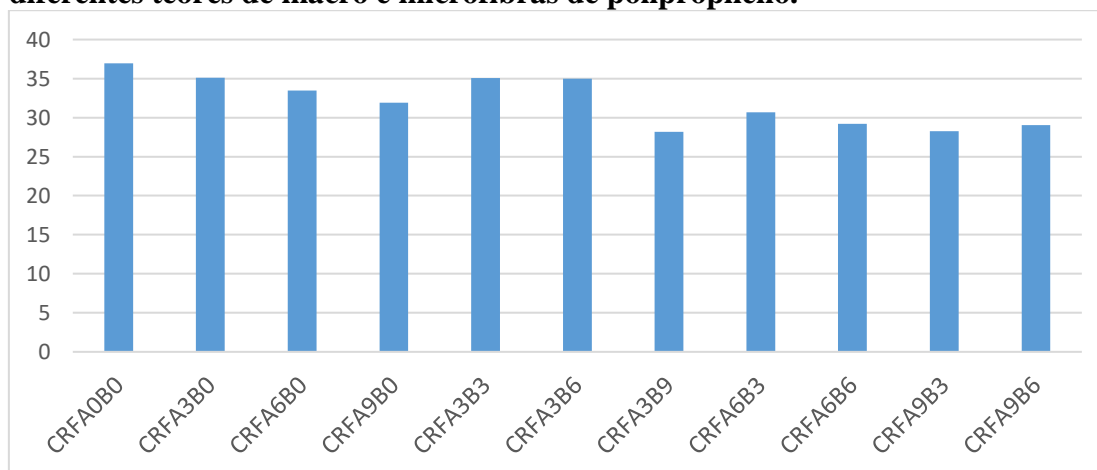
Outros fatores que podem ter interferido na redução da resistência a compressão do compósito devido a adição das fibras são da possível concentração de ar na mistura ou ainda nichos de concretagens.

Goes et al (2016) pesquisaram dois traços de concreto com adição de macrofibras estruturais sintéticas e microfibras de vidro como reforço de pisos e um traço referência sem adição de fibras. Estes autores verificaram que os concretos reforçados com fibras, tanto para o traço com fibras de vidro quanto para o traço com fibras de polipropileno, apresentaram uma redução na sua resistência à compressão axial corroborando com os valores encontrados nesta pesquisa.

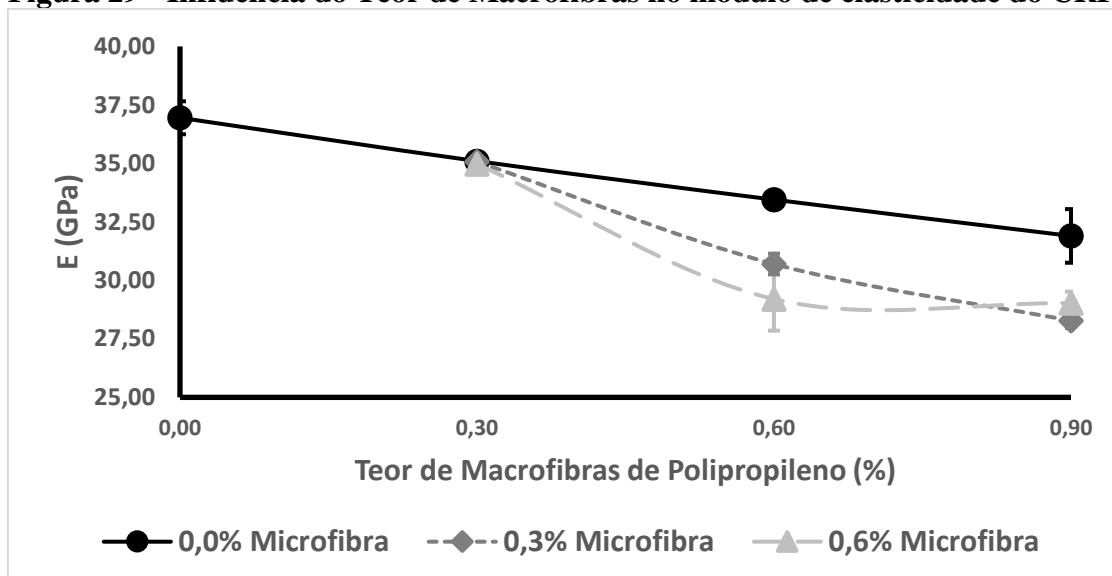
4.3. MÓDULO DE ELASTICIDADE

A Figura 28 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de módulo de elasticidade, para os grupos estudados. Assim como os resultados do ensaio de compressão axial, os traços de concreto com adição de fibras também tiveram uma queda nos resultados comparados ao traço de referência. Este efeito já era esperado, uma vez que o módulo de elasticidade possui correlação com a resistência à compressão axial do concreto.

Figura 28 - Resultados do Módulo de elasticidade (GPa) dos corpos de prova com diferentes teores de macro e microfibras de polipropileno.

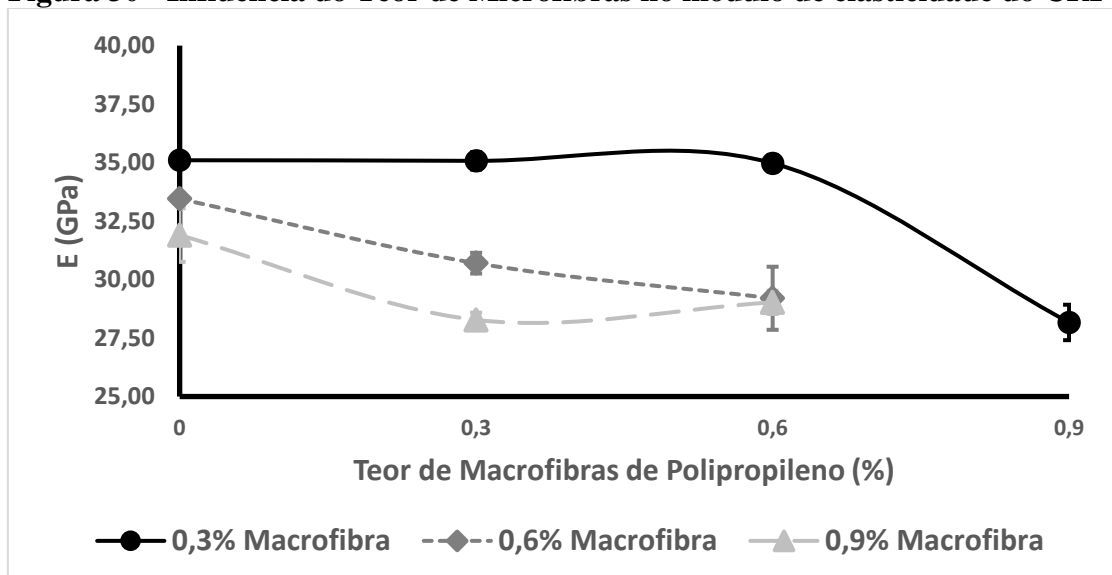


Fonte: Autor

Figura 29 - Influência do Teor de Macrofibras no módulo de elasticidade do CRF

Fonte: Autor

Pode-se observar que o aumento da quantidade de macrofibras de PP (Figura 29) diminuiu o módulo de elasticidade do CRF. O acréscimo das microfibras (Figura 30) também proporcionou um decréscimo no módulo de elasticidade, porém de maneira menos acentuada. Esse fator já era esperado, pois, a utilização da macrofibras no concreto proporciona um aumento da quantidade de vazios maior devido as fibras formarem pequenos nódulos. Outro fator para a diminuição do módulo de elasticidade é que as fibras possuem módulo de elasticidade inferior ao da matriz.

Figura 30 - Influência do Teor de Microfibras no módulo de elasticidade do CRF

Fonte: Autor

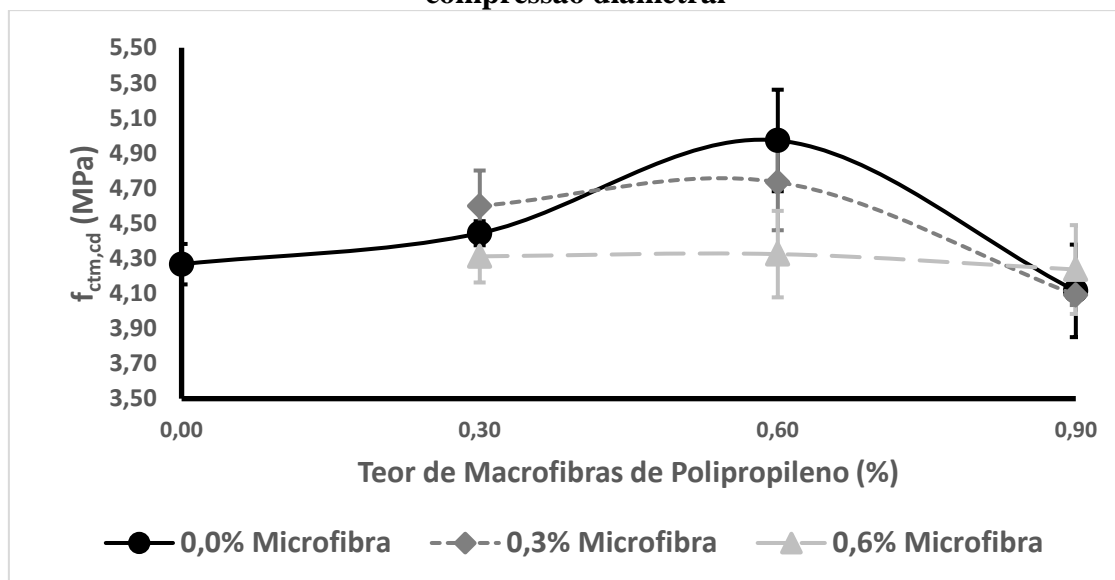
PEREIRA (2005), em sua tese de doutorado sobre a avaliação da influência da adição de fibras sintéticas ao concreto encontrou resultados, na qual o concreto com

adição de fibras de polipropileno, com teor de 0,6% em 7 e 28 dias, apresentou uma queda de resistência à compressão axial, se comparado a amostra de referência. Esta queda de resultados nos traços com fibras incorporadas ao concreto, também ocorreu nos ensaios de módulo de elasticidade, pois segundo o autor, ambas propriedades mecânicas estão diretamente relacionadas. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), baseado em um estudo experimental feito por Shah e Ragan, a contribuição da adição de fibras ao concreto, para fração volumétrica baixa ou moderada, não é para a resistência do material, mas para a tenacidade à flexão do mesmo.

4.4. TRAÇÃO INDIRETA

O efeito da hibridização com 0,3% de macrofibras com 0,0%; 0,3%; 0,6% e 0,9% de microfibras apresentou valores de tração por compressão diametral de 4,44 MPa, 4,60MPa, 4,31MPa e 3,88MPa respectivamente. Pode-se observar que os valores de tração em MPa destes híbridos foram maiores do que concreto referência com exceção daquele com maior teor de microfibras (0,9%). Pode-se observar que a incorporação de macrofibras no compósito na taxa de 0,3% somente foi eficaz quando associada com o menor teor de microfibras de PP (0,3%) em que o valor de tração aumentou de 3,6%.

Figura 31 – Influência do teor de macrofibras na resistência a tração por compressão diametral

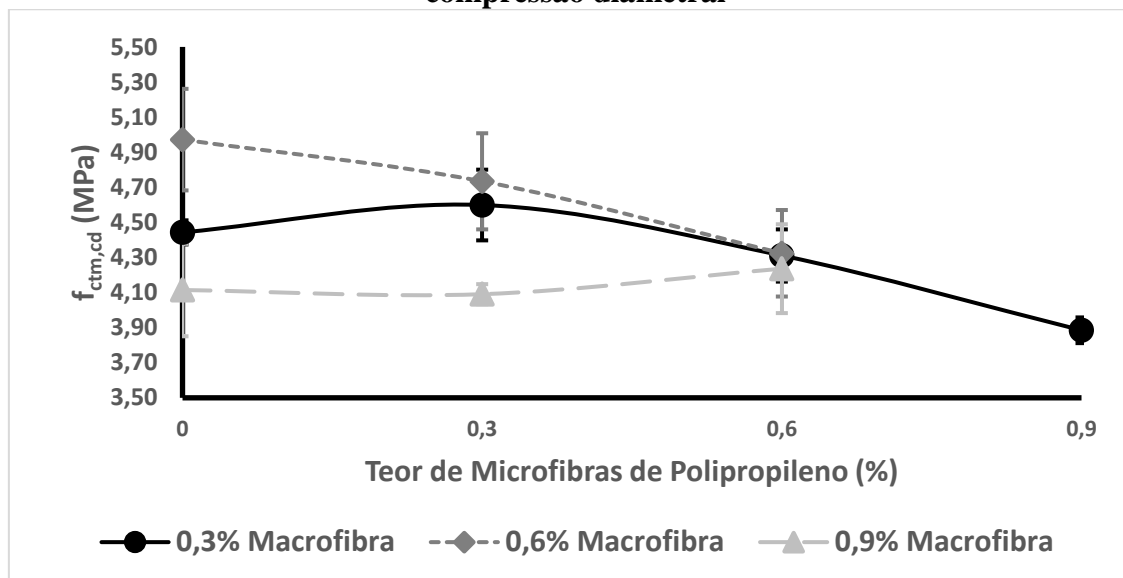


Fonte: Autor

Em relação à hibridização de 0,6% de macrofibras de PP com 0,0%; 0,3% e 0,6% de microfibras os valores de tração observados foram de 4,97 MPa, 4,73MPa e 4,32 MPa respectivamente todos maiores do que o concreto referência sem adição de fibras porém,

pode-se observar que a associação das microfibras as macrofibras não foi eficaz, pois os valores de tração à compressão diametral diminuem a medida que se aumentam os teores de fibras.

Figura 32 – Influência do teor de microfibras na resistência a tração por compressão diametral



Fonte: Autor

A análise da hibridização de 0,9% de macrofibras de PP com 0,0%; 0,3% e 0,6% e de microfibras os valores de tração observados foram de 4,11 MPa, 4,09 Mpa e 4,24MPa respectivamente todos menores do que o concreto referência sem adição de fibras, o que pode-se concluir que estas hibridizações não foram eficientes em relação à propriedade de tração à compressão diametral.

Pode-se observar (Figuras 31 e 32) que a adição de fibras no concreto provocou um fator positivo para pequenos teores de fibras (0,3% e 0,6%) mesmo considerando o erro médio, já para teores mais elevados de fibras ocorreu uma perda de resistência em relação aos teores anteriores, podendo inclusive a possuir resistências inferiores ao do concreto de referência, isto pode ser ocorrência da homogeneização do concreto ter sido dificultada pela maior quantidade de fibras, ou pela ocorrência de nódulos de fibras na matriz.

4.5. ENSAIO DE FLEXÃO (JSCE SF4-1984)

O ensaio de flexão realizado foi o especificado pela norma japonesa JSCE-SF4 (1984) por ser o de uso mais comum no Brasil para o controle do CRF devido a sua concepção mais simples (Figueiredo, 2011) e também por ser o ensaio que vem sendo

realizado sem maiores dificuldades no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Estadual de Maringá.

A ruptura dos CPs ocorreu sempre no terço central (região de flexão pura) como é ilustrado na Figura 33. Dessa forma não se descartou nenhum dos ensaios realizados com os CPs por esse motivo. Foi somente descartado os resultados do corpo de prova 3 do CRFA3B6 pois o mesmo obteve uma ruptura brusca na qual não ocorreu nos demais corpos de prova do seu grupo.

Figura 33 – Aspecto da ruptura dos CPs (a) sem fibras (b) e com fibras



Fonte: Autor

Pode-se verificar que as fibras ficaram distribuídas de forma aleatória ao longo de toda a seção transversal dos CPs dos CRF, demonstrando que a mistura foi realizada de forma adequada (Figura 34).

Figura 34 – Seção transversal de ruptura (a) sem fibras (b) somente com macrofibras e (c) com hibridização das fibras



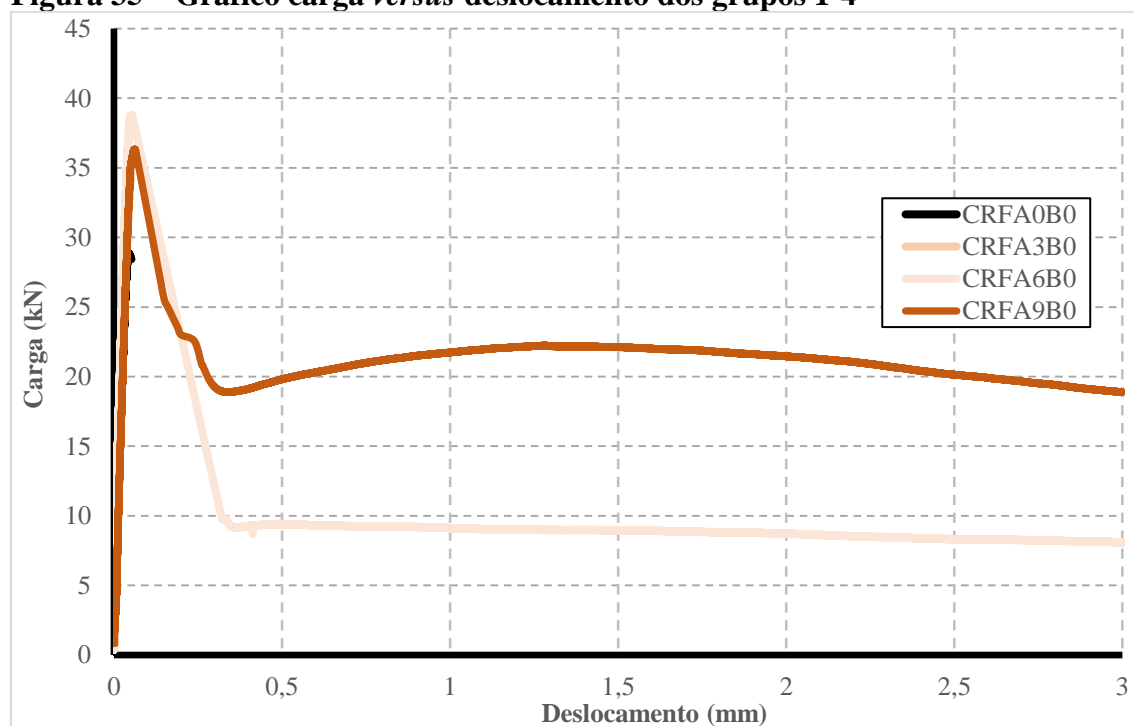
Fonte: Autor

As figuras 35, 36 e 37 apresentam as curvas de carga versus deslocamento dos compósitos, representadas pela curva do corpo de prova com comportamento intermediário de cada grupo de CRF. Como pode-se verificar, a presença de fibras no compósito melhorou o seu comportamento frágil. Os grupos com maior quantidade de fibras foram capazes de absorver maior quantidade de energia após a fissuração da matriz, melhorando gradualmente a tenacidade e ductilidade do compósito. As curvas de todos os CPs podem ser visualizadas no Apêndice B.

O método da norma JSCE SF4 (1984) define que a velocidade do ensaio deve ser controlada pelo deslocamento da travessa, com isso no momento da ruptura da matriz do compósito a máquina não diminui a velocidade até encontrar as fibras provocando uma grande instabilidade na região pós pico podendo levar até a uma ruptura brusca nos corpos de prova com pequena ou nenhuma taxa de fibras. Devido a esse fato os grupos CRFA0B0 e CRFA3B0 não apresentaram comportamento pós pico.

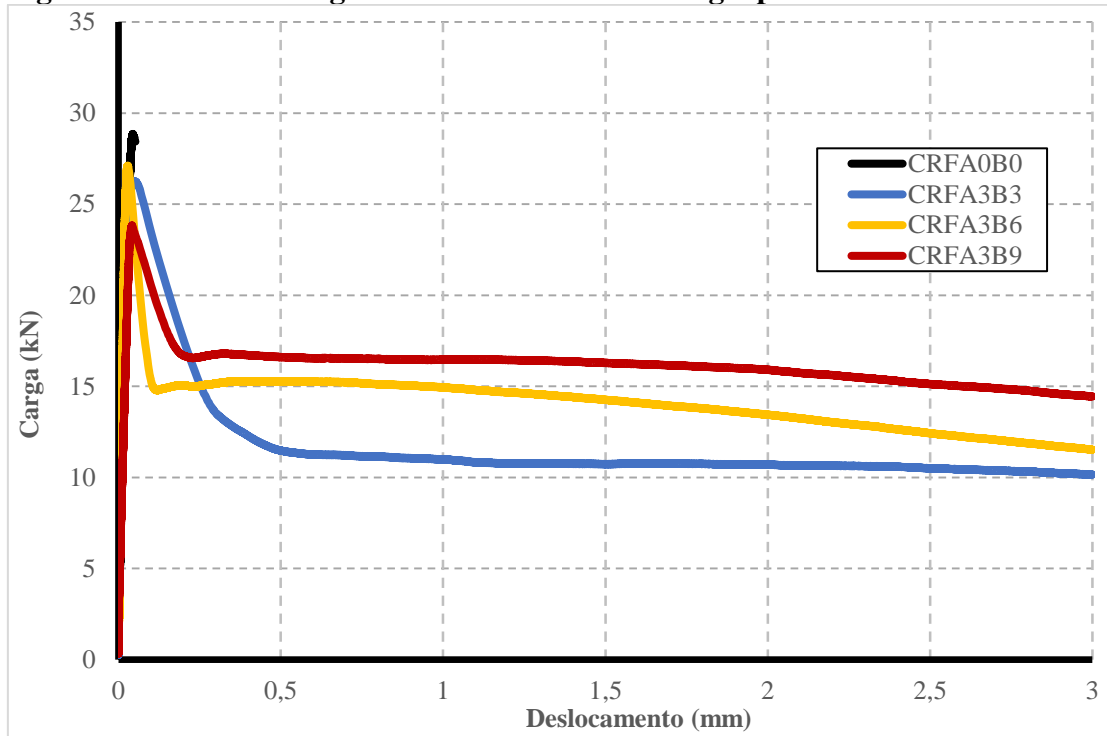
Essa instabilidade foi observada também nos grupos CRFA6B0, CRFA3B3 e CRFA3B6 logo após a fissuração do compósito, caracterizada pelo distanciamento entre os pontos dos gráficos logo após a ruptura da matriz. O aumento no teor de fibras diminuiu ou acabou com esse efeito, como pode ser visto nos demais grupos.

Figura 35 – Gráfico carga versus deslocamento dos grupos 1-4



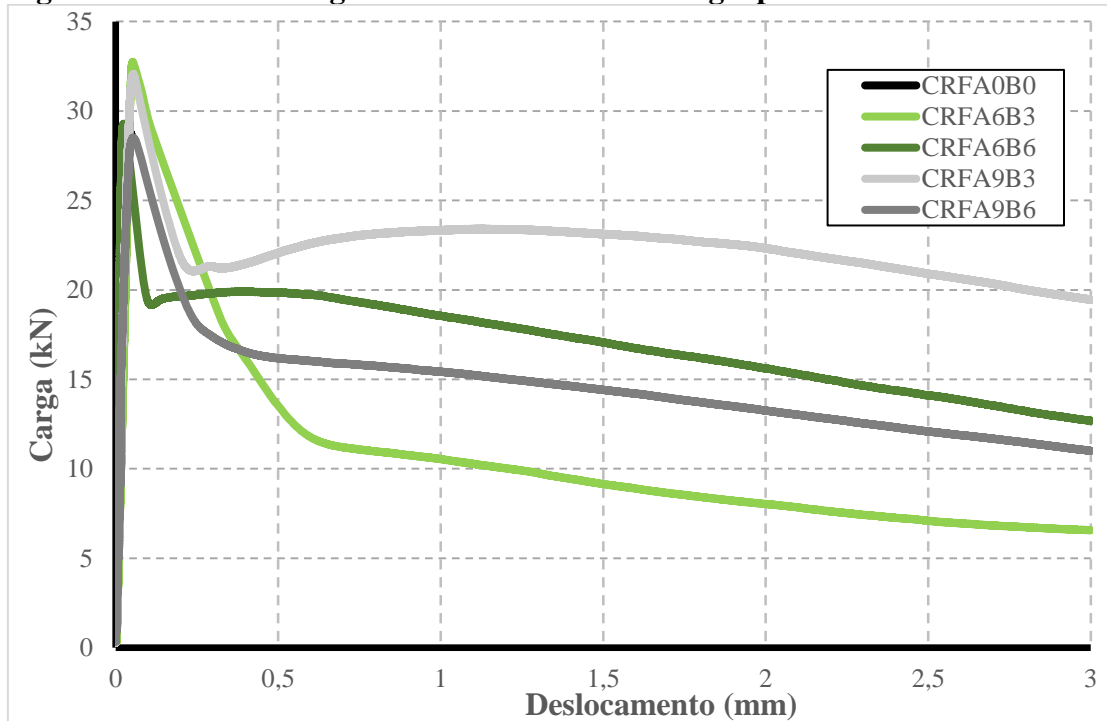
Fonte: Autor

Figura 36 – Gráfico carga *versus* deslocamento dos grupos 5-7



Fonte: Autor

Figura 37 – Gráfico carga *versus* deslocamento dos grupos 8-11

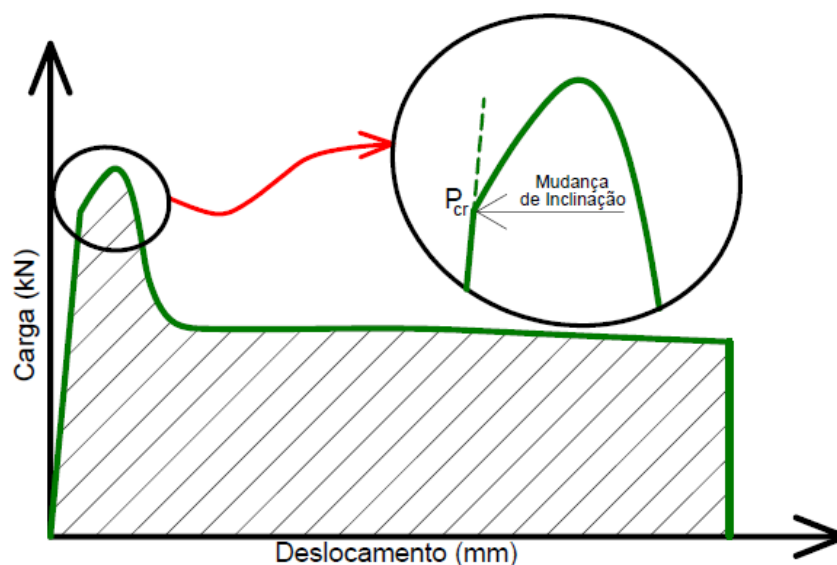


Fonte: Autor

Segundo a JSCE SF4 (1984) a tensão referente ao pico de carregamento do CP é definida como sendo a resistência à flexão do CRF (σ_b). A carga de fissuração (P_{cr}) pode

ser obtida de forma visual por meio dos gráficos de carga versus deslocamento. Pois, inicialmente observa-se um trecho reto elástico e ao final desse trecho ocorre uma perda de rigidez do material (mudança na inclinação do gráfico carga *versus* deslocamento), provocada pela fissuração da matriz (Figura 38). A partir dessa carga de fissuração é possível determinar qual a resistência de fissuração do CP (f_{cr}).

Figura 38 – Determinação da Carga de Fissuração do CP



Fonte: Autor

Os valores da tensão de fissuração e da resistência a flexão dos CRF podem ser encontrados na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores médios de resistência à fissuração e máxima à tração na flexão dos grupos de CRF estudados

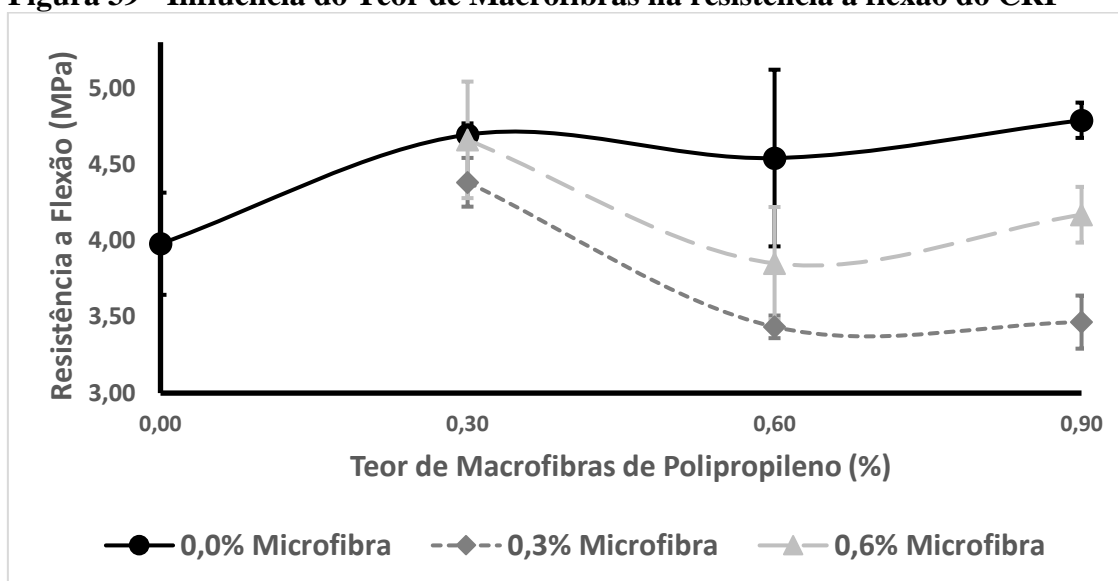
Grupos	CRF	Fissuração			Resistência		
		f_{cr} (MPa)	CV (%)	Relação	σ_b (MPa)	CV (%)	Relação
1	CRFA0B0	3,69	19,60	1,00	3,98	14,58	1,00
2	CRFA3B0	3,88	6,25	1,05	4,69	2,72	1,18
3	CRFA6B0	3,39	14,76	0,92	4,54	22,09	1,14
4	CRFA9B0	4,30	10,87	1,16	4,79	4,19	1,20
5	CRFA3B3	3,49	8,06	0,94	4,38	6,31	1,10
6	CRFA3B6	4,31	15,36	1,17	4,66	14,19	1,17
7	CRFA3B9	3,20	10,64	0,87	3,59	4,67	0,90
8	CRFA6B3	2,99	1,44	0,81	3,43	3,74	0,86
9	CRFA6B6	3,54	17,42	0,96	3,85	16,61	0,97
10	CRFA9B3	3,09	14,28	0,84	3,47	8,70	0,87
11	CRFA9B6	3,68	8,16	1,00	4,17	7,59	1,05

Fonte: Autor

Pode-se observar que em um primeiro momento a adição de macrofibras provocou um aumento na resistência do CRF (Figura 39). Verificou-se também que considerando o erro médio, a adição das macrofibras nos teores de 0,6% para 0,9% não apresentaram mudanças significativas para a resistência a flexão.

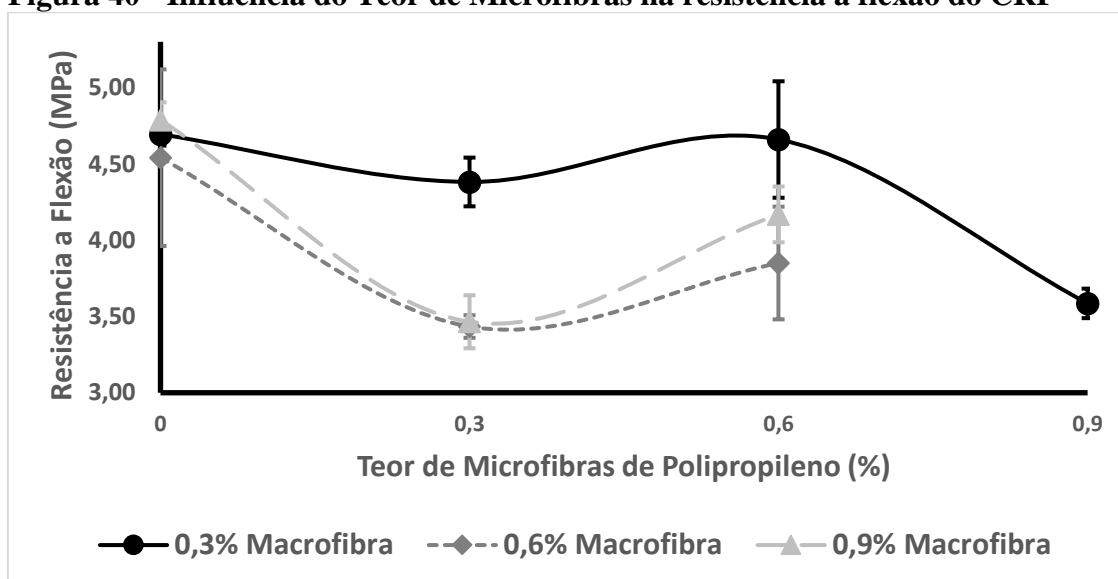
Considerando o erro médio, nota-se que os grupos CRFA3B0, CRFA6B0, CRFA9B0 e CRFA3B6 apresentaram os melhores resultados. Já os grupos CRFA6B3 e CRFA9B3 proporcionaram os piores resultados referentes a resistência à flexão dos compósitos (Figura 40).

Figura 39 - Influência do Teor de Macrofibras na resistência a flexão do CRF



Fonte: Autor

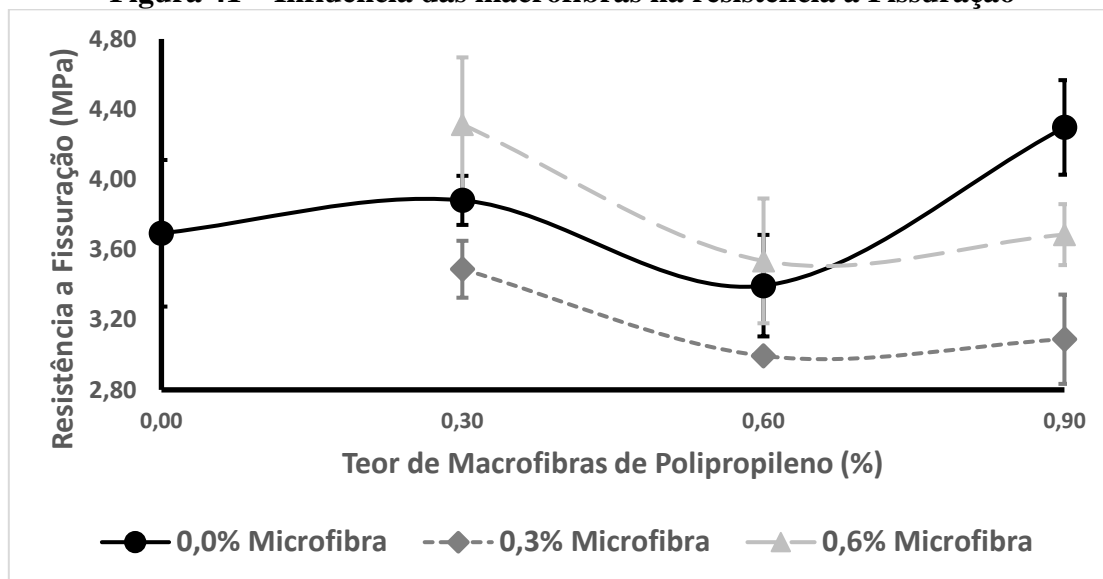
Figura 40 - Influência do Teor de Microfibras na resistência a flexão do CRF



Fonte: Autor

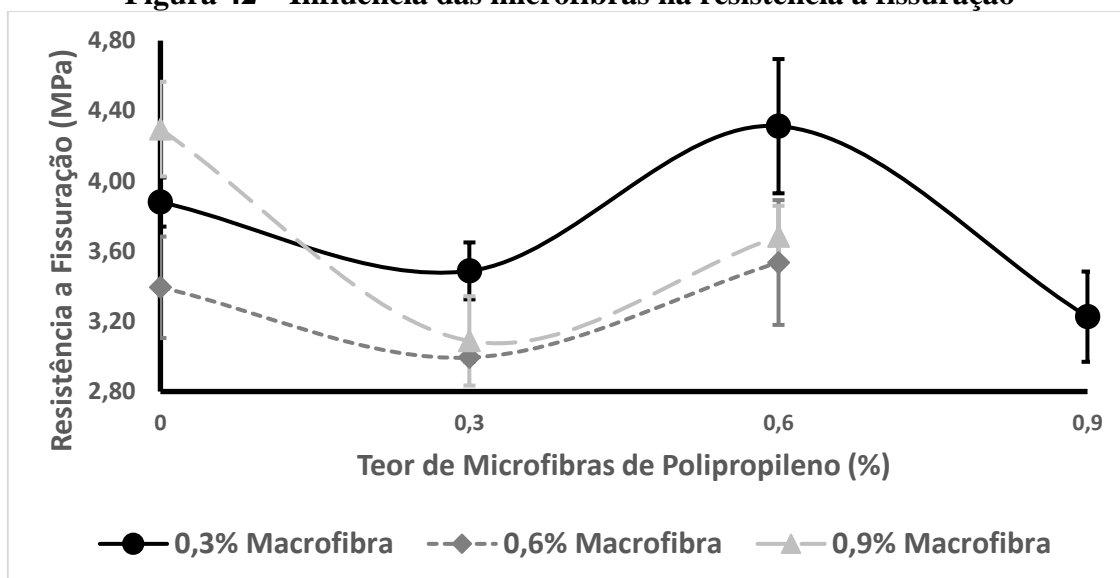
Considerando a erro médio, verifica-se que os grupos com 0,6% de teores de microfibras apresentaram os melhores resultados referentes a resistência a fissuração dos compósitos com hibridização das fibras (Figura 41). Outro grupo que apresentou resultados positivos foi o CRFA9B0 que obteve um ganho de 16% na resistência a fissuração (Figura 42). Por outro lado, verificou-se que os grupos com teores de microfibras de 0,3% se mostraram ineficientes, diminuindo a resistência a fissuração dos CRF.

Figura 41 – Influência das macrofibras na resistência a Fissuração



Fonte: Autor

Figura 42 – Influência das microfibras na resistência a fissuração



Fonte: Autor

A JSCE SF4 (1984) define o fator de tenacidade, $\bar{\sigma}_b$, como sendo a resistência média a flexão do compósito até a deflexão de $L/150$ (3mm). A norma ainda define que

a relação de resistência flexional como sendo uma relação direta entre o fator de tenacidade e a resistência a flexão como demonstrado no tópico 3.2. A Tabela 11 apresenta os valores do Fator de Tenacidade e da Relação de Resistência Flexional dos grupos de CRF estudados.

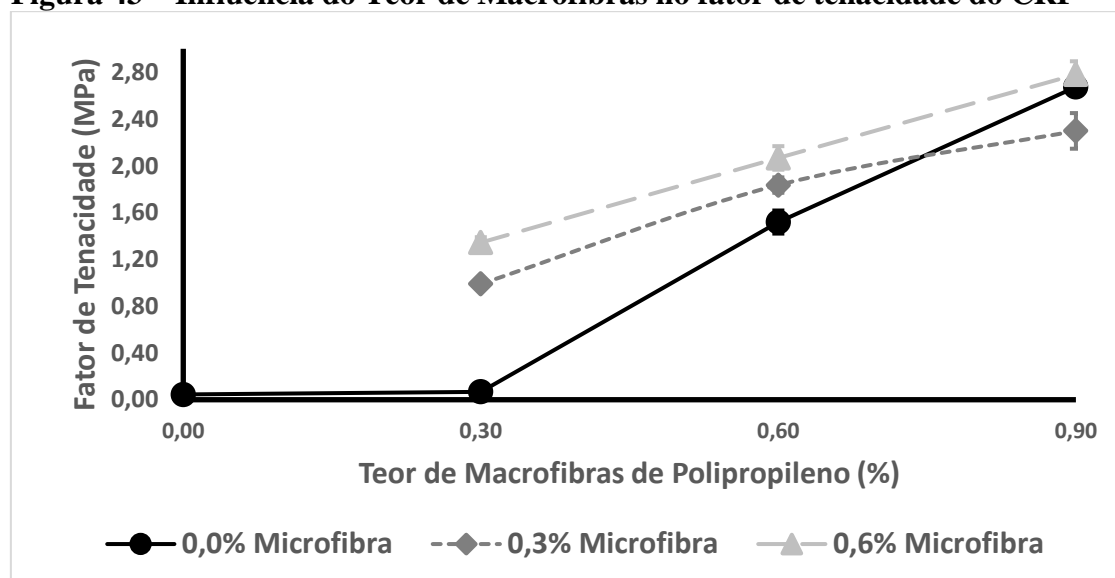
Pode-se observar na Figura 43 que o aumento da quantidade de macrofibras provocou um aumento no fator de tenacidade para todos os teores de fibras. Verificou-se também pela Figura 44 que o aumento da quantidade de microfibras também aumentou o fator de tenacidade do compósito com exceção do CRFA9B3.

Tabela 11 Fator de Tenacidade e Relação de Resistência Flexional dos CRF estudados

CRF	Fator de Tenacidade			Relação de Resistência Flexional		
	σ_b (MPa)	CV (%)	Razão	$R_{e,3}$ (%)	CV(%)	Razão
CRFA0B0	0,05	10,19	1,00	1,14	4,17	1,00
CRFA3B0	0,07	7,21	1,51	1,45	4,65	1,27
CRFA6B0	1,52	11,24	33,67	34,67	25,98	30,45
CRFA9B0	2,67	2,38	59,28	55,91	4,48	49,11
CRFA3B3	0,99	3,68	21,95	22,64	5,06	19,89
CRFA3B6	1,34	5,93	29,78	31,41	7,79	27,60
CRFA3B9	1,75	10,33	38,75	48,95	14,36	43,00
CRFA6B3	1,84	6,19	40,68	53,53	8,72	47,02
CRFA6B6	2,07	8,44	45,82	54,29	11,44	47,70
CRFA9B3	2,30	17,94	50,95	61,16	19,28	53,73
CRFA9B6	2,78	7,06	61,63	68,16	2,65	59,88

Fonte: Autor

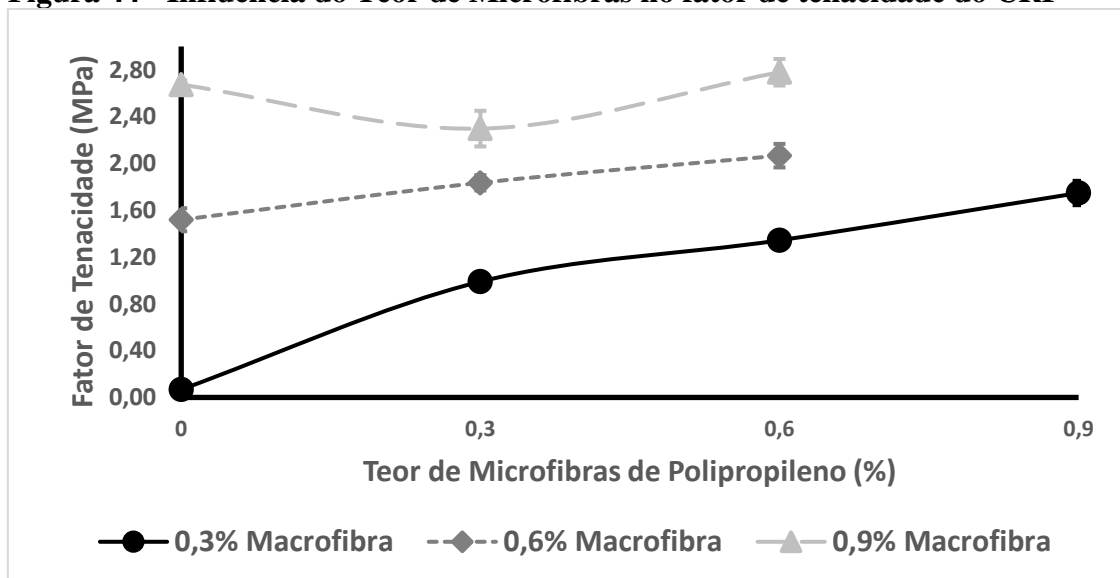
Figura 43 – Influência do Teor de Macrofibras no fator de tenacidade do CRF



Fonte: Autor

Porém o aumento na tenacidade foi muito superior quando se adicionou macrofibras na matriz cimentícia em relação a adição de microfibras. Notou-se que o compósito que apresentou melhores resultados referentes ao fator de tenacidade foi o CRFA9B6, seguido do CRFA9B0 e do CRFA9B3. Demonstrando que os compósitos com teores de 0,9% de macrofibras proporcionaram maior tenacidade.

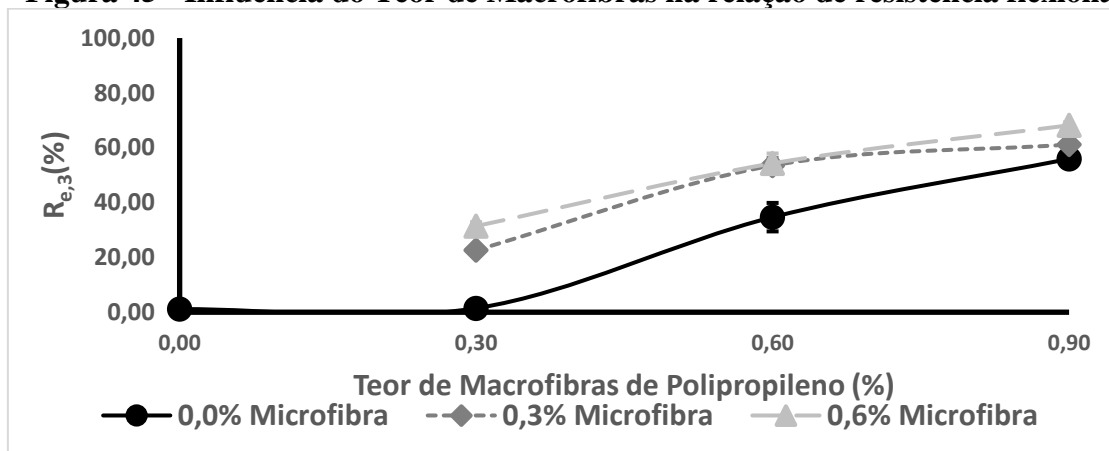
Figura 44 - Influência do Teor de Microfibras no fator de tenacidade do CRF



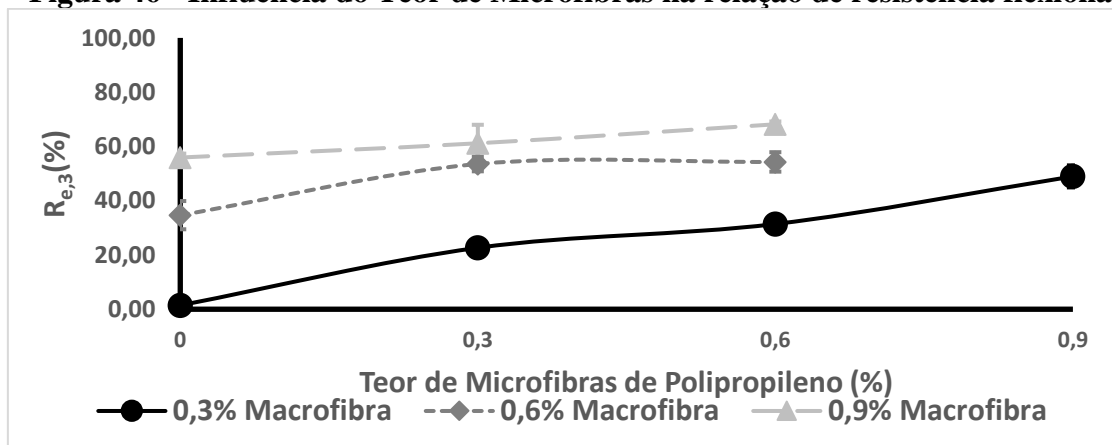
Fonte: Autor

A adição de todos os tipos de fibras proporcionou um aumento da Relação de Resistência Flexional demonstrando que a adição de fibras independentemente do tipo faz com que o material tenha menor perda nos níveis de carregamento após a fissuração da matriz. Porém as macrofibras também proporcionaram um aumento mais significativo nessa relação em relação as microfibras (Figuras 45 e 46).

Figura 45 - Influência do Teor de Macrofibras na relação de resistência flexional



Fonte: Autor.

Figura 46 - Influência do Teor de Microfibras na relação de resistência flexional

Fonte: Autor.

A JSCE-SF4 não faz abordagem sobre a determinação das resistências residuais a flexão. Assim, foi adotado o procedimento da ASTM C 1609 (2010) para determinação dessas resistências relacionadas aos deslocamentos verticais de L/600 (0,75 mm) e L/150 (3 mm) (Tabela 12).

Tabela 12 – Resultados da Resistência Residual para deslocamentos de L/600 e L/150

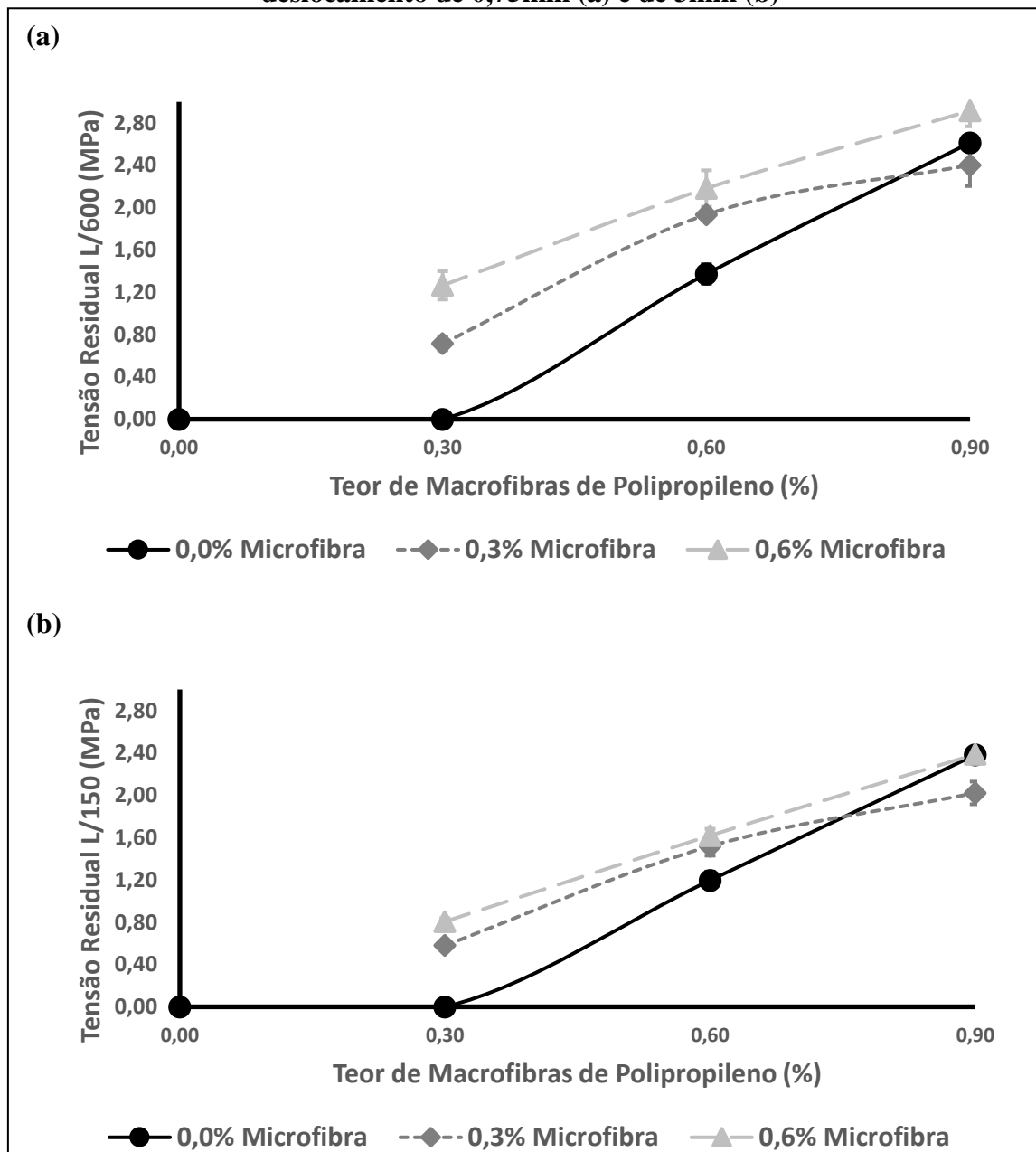
CRF	Resistência Residual d=0,75mm		Resistência Residual d=3mm	
	Média (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	CV(%)
CRFA0B0	0,00	0,00	0,00	0,00
CRFA3B0	0,00	0,00	0,00	0,00
CRFA6B0	1,37	11,51	1,20	11,90
CRFA9B0	2,61	4,80	2,38	1,29
CRFA3B3	0,71	15,09	0,58	1,76
CRFA3B6	1,27	18,32	0,81	7,09
CRFA3B9	1,87	6,43	1,32	18,53
CRFA6B3	1,93	4,63	1,52	10,18
CRFA6B6	2,18	13,61	1,62	6,89
CRFA9B3	2,40	14,28	2,02	9,19
CRFA9B6	2,92	8,76	2,39	4,85

Fonte: Autor

É observado que a carga residual foi mantida quase que constante até o deslocamento de 3 mm, percebendo-se inclusive um leve aumento de carga residual nas curvas referentes aos compósitos com taxas de 0,9% de macrofibras (CRFA9B0,

CRFA9B3 e CRFA9B6). Monte et al. (2014) comentam que esse efeito é proveniente do processo de desfibrilamento das fibras que aumenta a capacidade de reforço com o avanço do deslocamento (slip-hardening).

Figura 47 - Influência do Teor de Macrofibras na resistência residual do CRF para deslocamento de 0,75mm (a) e de 3mm (b)

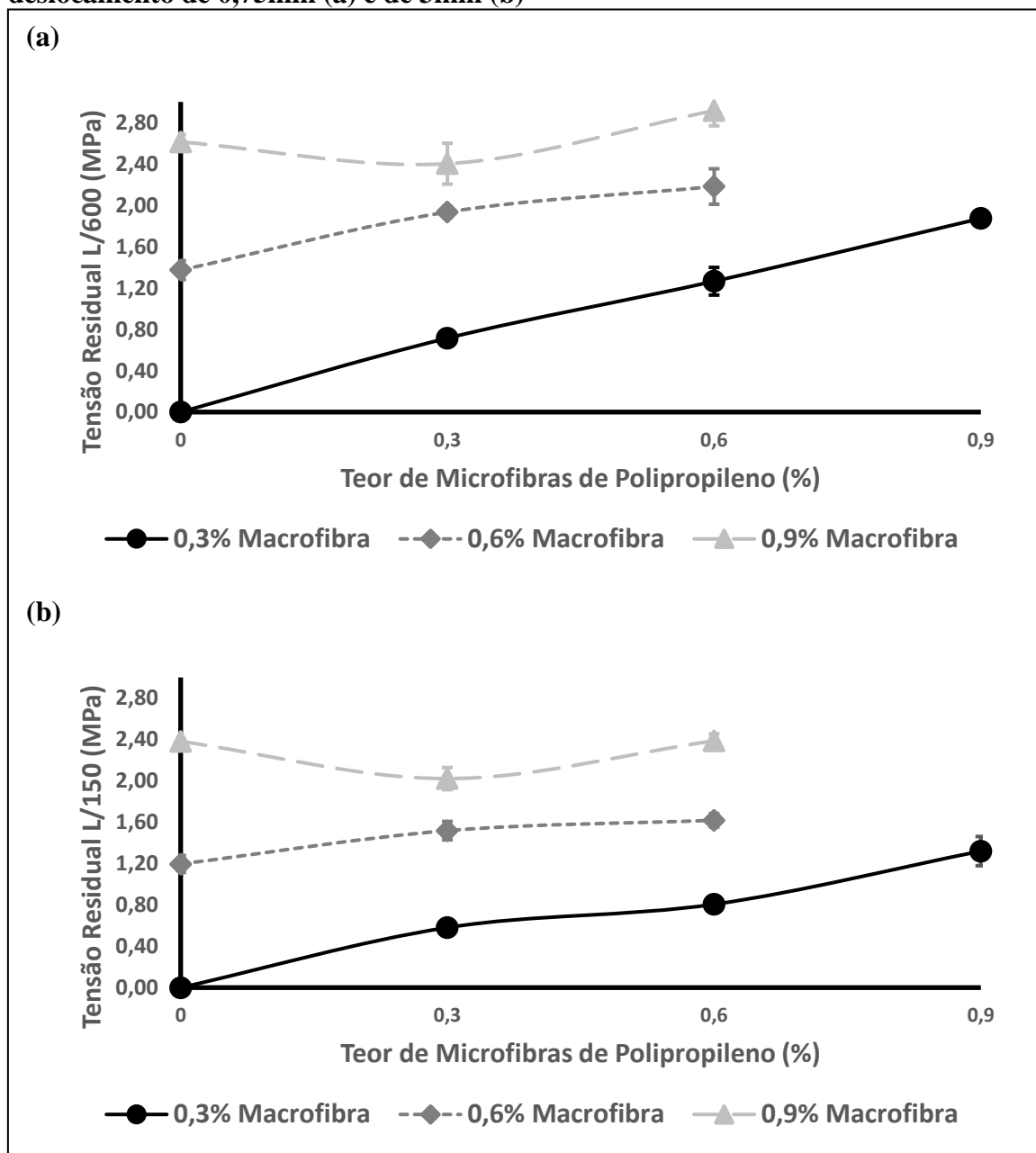


Fonte: Autor

Dias (2006) estudou o comportamento de compósitos com fibras de aço e com fibras de polipropileno relatando que o aumento do teor de fibras resultou em aumento da resistência residual e da tenacidade chegando inclusive a superar ao das fibras de aço. A tensão residual de L/600 e L/300 é a tensão utilizada para cálculo nas estruturas nos Estado Limite de Serviço (ELS) e Estado Limite Ultimo (ELU) respectivamente. Como

esperado os valores das tensões residuais de L/600 (0,75mm) e de L/150 (3mm) obtiverem um aumento com o incremento de fibras com exceção do CRFA9B3. Porém o aumento com a adição de macrofibras foi mais significativo que o aumento devido a adição das microfibras (Figuras 47 e 48).

Figura 48 - Influência do Teor de Microfibras na resistência residual do CRF para deslocamento de 0,75mm (a) e de 3mm (b)



Fonte: Autor

Outro fator observado é que a resistência residual com a deflexão com valores de L/150 (d=3mm) teve uma queda muito pequena em relação a resistência residual para deslocamentos de L/600 (d=0,75mm), aliado ao fato do nível de carregamento ter sido praticamente constante no histórico de carregamento, pode-se concluir que o material não

apresentou tendências de apresentar um comportamento de *slip softening*. Cáceres (2013) estudou sobre o comportamento mecânico de compósitos com adições de fibras de aço e de PP e relatou que as fibras de aço apresentam maior tendência de ocorrer o fenômeno de *slip softening* que as fibras de PP, pois as fibras de PP ficam melhor distribuídas ocasionando um maior número de fibras presente na seção de ruptura do corpo de prova, o que faz com que a variação da capacidade resistente residual não seja tão afetada por pequenas variações na quantidade dessas fibras como ocorre com a fibra de aço.

A adição de microfibras se demonstrou menos eficaz no aumento da tenacidade, e das tensões residuais como pode ser comprovado por meio do Relação de Resistência Flexional. Esse fato pode ter ocorrido, pois o comprimento das microfibras é menor que duas vezes o diâmetro máximo do agregado, podendo ter tido uma incompatibilidade dimensional da fibra para com o agregado prejudicando o efeito de ponte de tensões.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal da pesquisa foi o de investigar o efeito da adição híbrida de fibras de PP, em diferentes teores, no comportamento do concreto no estado fresco e das propriedades mecânicas obtidas por meio dos ensaios de compressão, módulo de elasticidade, tração por compressão diametral e flexão em quatro pontos. São, portanto, as principais conclusões da pesquisa:

- As macrofibras em teores de 0,3% e 0,6% não provocaram mudança significativa na diminuição da trabalhabilidade da mistura;
- As microfibras comprometeram a trabalhabilidade da mistura, exigindo-se a adição de aditivo superplastificante. Em teor de 0,9%, a microfibra comprometeu sobremaneira a trabalhabilidade da mistura e exigiu quantidade elevada de aditivo;
- A macrofibra provocou diminuição no valor da resistência à compressão axial, sendo esse fato mais significativo para as taxas de 0,6% e 0,9%;
- A hibridização com 0,3% de microfibra praticamente não provocou alteração no valor da resistência à compressão axial, independentemente de qual seja a taxa de macrofibra;
- Todos os CRFs apresentaram valores de módulo de elasticidade menores do que aquele obtido para o concreto sem fibras. A redução no valor do módulo aumenta com o aumento da taxa de macrofibra;
- A resistência à tração indireta foi aumentada com o aumento da taxa de macrofibra. Aumento de 4% quando da adição de 0,3% de macrofibra e de 17% para a taxa de 0,6%. Somente a hibridização com a taxa de 0,3% de microfibra resultou em elevação nos valores da resistência à tração indireta. Aumento de 8% quando da adição de 0,3% de microfibra a 0,3% de macrofibra e um aumento de 11% quando da combinação de 0,3% de microfibra com 0,6% de macrofibra;
- O efeito da macrofibra (em teores de 0,3% e 0,6%) na resistência à fissuração foi discreto, já no teor de 0,9% a influência elevou o valor dessa resistência em 16%. A hibridização não contribuiu para o aumento da resistência à fissuração, uma única exceção foi a observada para o CFRA3B6 em que ocorreu um aumento de até 19% nessa propriedade;
- A adição de macrofibra resultou em aumento na resistência à flexão do CRF de até 20% para a taxa de 0,9%. A hibridização influenciou no aumento da

resistência à flexão somente para a taxa de 0,3% de macrofibra, chegando-se a aumentos de 10% e 17% quando da combinação com 0,3% e 0,6% de microfibras;

- A adição de microfibras não resultou em elevação da resistência à flexão quando comparado com aqueles resultados dos CRFs contendo somente macrofibras;

- Em todos os CRFs a resistência à flexão superou o valor da resistência à fissuração. O aumento mais significativo foi o observado de 33% para o CRF contendo 0,6% de macrofibra. A hibridização não resultou em melhoras significativas nesse comportamento, pois os níveis observados foram do mesmo patamar daqueles contendo somente macrofibras;

- O aumento da quantidade de macrofibras correspondeu a um aumento gradativo no fator de tenacidade flexional, sendo no teor de 0,9% a resposta mais incrementada;

- A hibridização resultou em concretos com maiores tenacidades flexionais. O aumento do teor de microfibras correspondeu diretamente a um aumento na tenacidade;

- No teor de 0,3% de microfibras, o aumento na tenacidade foi de 21% quando adicionada ao concreto contendo somente a macrofibra no teor de 0,6%. Com o aumento da microfibras para o teor de 0,6%, o aumento foi ainda maior, ou seja, de 36%;

- No teor de 0,6% de microfibras, o aumento na tenacidade foi de apenas 4% quando adicionada ao concreto contendo somente a macrofibra no teor de 0,9%;

- As resistências residuais foram aumentadas com o aumento do teor de macrofibra. Com a hibridização, melhores respostas foram ainda obtidas com relação aos valores dessas resistências;

- Os CRFs contendo macrofibras foram aqueles que tiveram a maior capacidade de manter a resistência após a fissuração, não deixando de ressaltar o comportamento semelhante obtido com o efeito da hibridização.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar um método de ensaio que utilize sistema fechado para o controle de velocidade pois permite maior confiabilidade dos ensaios nas regiões pós pico de concretos com pequenos teores de fibra;
- Utilizar um concreto auto adensável para melhorar o comportamento do compósito no estado fresco;

- Avaliar um grupo de compósito para concreto somente com adição de microfibras de polipropileno para saber a real contribuição dessa fibra no compósito;
- Avaliar o comportamento do compósito a fadiga e a carregamentos dinâmicos já que os compósitos adquirem maior capacidade de absorção de energia que o concreto simples;

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 544.1R: **Report on Fiber Reinforced Concrete**. 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 544.1R-96: **Manual of concrete practice: State-of-the-art report on fiber reinforced concrete**. Detroit, 1996.

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. **ASTM C1609**: Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using simple beam with third-point loading). USA, 2010.

AHMED, S.F.U.; MIHASHI, H. **Strain hardening behavior of lightweight hybrid polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced cement composites**. Mater. Struct. 44 (2011) 1179–1191.

AITCIN, P. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo: PINI, 2000. 668 p.

AITCIN, P.C., METHA, P.K. **Effect of coarse-aggregate characteristics on mechanical proprieties of high-strength concrete**. ACI Materials Journal, v. 87, n. 2, pp. 103-107, March-April, 1990.

AL-TAMIMI, A. **Fibre-reinforced connections in precast concrete flat slabs**. Thesis (Doctor of Philosophy). School of Civil Engineering, University of Nottingham, Nottingham, UK, 2001.

ALMEIDA, I. R.; **Concretos de alto desempenho**. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: ensaio, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005.

ARIF, M. A. **Avaliação da medida de tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço**. 156 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222:** Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 7211:** Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15530:** Fibras de aço para concreto – especificações. Brasil, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522:** Concreto – Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama tensão x deformação – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9575:** Impermeabilização – Seleção e projeto. São Paulo, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953:** Concreto para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2**: Concreto auto-adensável Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15530-1**: Fibras de aço para concreto - Especificações. Rio de Janeiro, 2007.

BALAGURU, P.; SHAH, S.; **Fiber Reinforced Cement Composite**. McGraw-Hill. 531 p. 1992.

BANTHIA, N. GUPTA, R.; Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): fiber synergy in high strength matrices. **Materials and Structures**, dez. 2004. v.37. n. 10, p. 707-716.

BASTOS, P.S.S.; **Análise experimental de dormentes de concreto protendido reforçados com fibras de aço**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Tese de Doutorado. São Carlos, 1999.

BAYASI, Z.; MCINTYRE, M. **Application of Fibrillated Polypropylene Fibers for Restraint of Plastic Shrinkage Cracking in Silica Fume Concrete**. American Concrete Institute Material Journal, 99 (4), 337-344, 2002.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. United Kingdom: Elsevier, 2007. 625 p.

BETTERMAN, L. R.; OUYANG, C.; SHAH, S. P. (1995). **Fiber-matrix interaction in microfiber-reinforced mortar**. Adv. Cem. Based Mater., 2(2), p.53-61

BOULEKBACHE, B. et al. **Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material**. Construction and Building Materials, v. 24, n. 9, p. 1664-1671, set. 2010.

BRANDT, A. M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. **Composite Structures, Fourteenth International Conference on Composite Structures ICCS/14**. v. 86, n. 1-3, p. 3-9, nov. 2008.

BURGERS, R. et al. Structural behavior of SFRC tunnel segments during TBM operations. In: **Proceedings of the World Tunnel Congress 2007 and 33rd ITA/AITES Annual General Assembly**, Praga, 2007.

CÁCERES, A.R.E.; **Caracterização Geométrica e Mecânica de Macrofibras Poliméricas**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

CÁCERES, A. R. E.; FIGUEIREDO, A. D.; MONTE, R. **Avaliação do comportamento mecânico do concreto com reforço híbrido de fibras**. 55º Congresso Brasileiro do Concreto. Outubro, 2013.

CALLISTER JR., WILLIAM D., **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**, 1a ed., Rio de Janeiro, LTC, 2002, ISBN: 85-216-2188-5.

CARATELLI, A. et al. **Structural behaviour of precast tunnel segments in fiber reinforced concrete**. Tunnelling and Underground Space Technology, v. 26, n. 2, p. 284-291, mar. 2011.

CARNIO, M. A. **Propagação de Trinca por Fadiga do Concreto Reforçado com Baixos Teores de Fibra**. 2009. 145 p. Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

CHEN, B.; LIU, J. **Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability**. Cement Concrete Research, 35, 5, 913-917, 2005.

DAL MOLIN, D. C. C.; Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP (1995).

DI PRISCO, M., PLIZZARI, G.A., FELICETTI, R. 6th **RILEM Symposium on FibreReinforced Concretes (BEFIB 2004)**. RILEM Publications, Bagneaux (France), 2004.

DIAS, C. M. R.; FIGUEIREDO, A. D.; JOHN, V. M. **Avaliação comparativa do comportamento pós-fissuração de concretos com fibras de aço e com fibras de polipropileno de alto módulo de elasticidade**. 48º Congresso Brasileiro do Concreto. 2006.

NORMA DNIT 083/2006 – ES DNIT Tratamento de trincas e fissuras – Especificação de Serviço. 5 p.

EN – EUROPEAN STANDARD. EN 14651 - 07 - Test method for metallic fibre concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). Edition: 2007-12-01.

FERRARI, V.J.; HANAI, J.B. **Desenvolvimento e análise de compósitos cimentícios híbridos de alto desempenho**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais v.2 n.3. São Paulo, Setembro de 2009.

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

FIGUEIREDO, A. D.; **Concreto Reforçado com Fibras**. Tese (Livre Docência) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Construção Civil. 2011.

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

GARCEZ, E. O. **Investigação do Comportamento de Engineered Cementitious Composites Reforçados com Fibras de Polipropileno como Material para Recapeamento de Pavimentos.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

GOES, C. M. W.; FONTANINI, P. S. P.; PIMENTEL, L. L.; JACINTHO, A. E. P. G. A. **Análise da aplicação de concreto com adição de macrofibras estruturais sintéticas e microfibras de vidro anti-crack ar em pisos.** Revista Eletrônica de Engenharia Civil, 2016.

GOLAPALARATNAM, V. S., GETTU, R. **On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concretes.** Cement and concrete composites 17. p 239-254. 1995.

HANNANT, D. J. **Fibre-reinforced cements and concretes.** In: J. M. Illston. Construction Materials. 2a edition. E & FN SPON, 1994.

HARTMANN, C. T. e HELENE, P.; **Pilares com $f_{ck} = 115$ MPa: Record mundial em concreto de alto desempenho.** Revista Internacional Construlink, v.1, p.23 – 31.2003.

HSIE, M.; Tu, C.; Song, P. S. **Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete.** Materials Science and Engineering A, 494, 153-157, 2008.

ISLAM S. M.; HUSSAIN, R. R.; MORSHED, A. Z. **Fiber-reinforced concrete incorporating locally available natural fibers in normal- and high-strength concrete and a performance analysis with steel fiber-reinforced composite concrete.** Journal of Composite Materials, 2012.

JIANG, Z.; BANTHIA, N.; **Size Effects in Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete.** Journal of Testing and Evaluation, Vol. 38, No. 3. 2010.

JOHNSTON, C. D. **Fibre-reinforced Cement and Concrete** – Advances in Concrete Technology. 1994.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **JSCE-SF4**: method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. Part III-2. Concrete Library International. n.3, June, 1984. p.58-61.

KAKOOEI, S.; AKIL, H.M.; JAMSHIDI, M.; ROUHI, J. **The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures**. Construction and Building Materials, v. 27, p. 73 – 77, 2012.

KAWAMATA, A.; MIHASHI, H.; FUKUYAMA, H.; **Properties of Hybrid Fiber Reinforced Cement** - based Composites. Journal of Advanced Concrete Technology, 2003.

KJELLEN, K.O., WALLEVIK, O.H., FJÄLLBERG, L., Microstructures and microchemistry of the paste-aggregate interfacial transition zone of high-performance concrete, Advances in **Cement Research**, v. 10, n. 1, pp.33-40, 1998.

KWON, S.; NISHIWAKI, T.; KIKUTA, T.; MIHASHI, H. **Development of Ultra-High-Performance Hybrid Fiber Reinforced Cement-Based Composites**. Aci Materials Journal. pp. 309-318. May-June 2014.

LI, Z. **Advanced concrete technology**. New Jersey: John Wiley e Son, Inc., 2011. 506p.

LUCENA, J. C. T. **Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina**. Dissertação de mestrado – Programa de pós-graduação em engenharia civil da Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, 2017.

MASO, J.C., Influence of the interfacial transition zone on composite mechanical properties, **Interfacial Transition Zone in Concrete**, ed. by MASO, J.C., E & FN SPON, London, pp.103-16, 1996.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.; Concreto: estrutura, propriedades e materiais. PINI, S. Paulo, SP (2008).

MOGRE, R.P.; PARBAT, D.K. **Behavior of polypropylene fibre reinforced concrete with artificial sand.** International Refereed Journal of Engineering and Science, v. 1, issue 2, p.37 – 40, 2012.

MONTE, R.; TOALDO, G. S.; FIGUEIREDO, A. D. **Avaliação da tenacidade de concretos reforçados com fibras através de ensaios com sistema aberto.** Revista Matéria, v.19, n.2, 132-149, 2014.

MONTEIRO, P.J.M., Caracterização da microestrutura do concreto: Fases e interfaces; aspectos de durabilidade e de microfissuração, Tese livre docência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

MONTEIRO, P.J.M., Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties, Dissertação de mestrado, University of California, Berkeley, 1985.

MONTEIRO, P.J.M., METHA, P.K., Effect of aggregate, cement, and mineral admixtures on the microstructure of the transition zone, MRS Society, **Invited Paper**, Boston, 1988.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**, 5th Edition ISBN 9780273755807, Malaysia, 2011.

NUNES, N. L.; AGOPYAN, V. Influência do fator de forma da fibra na tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibra de aço. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, nº 225, 26p., São Paulo, 1998.

OLIVEIRA, M. B.; Dissertação de Mestrado. Compósito cimentício de alta ductilidade reforçado com fibras. Maringá, 2016.

PAKRAVAN, H. R.; JAMSHIDI, M.; LAFITI, M. **Study on fiber hybridization effect of engineered cementitious composites with low- and high-modulus polymeric fibers.** Construction and Building Materials 112 (2016) 739–746.

PAULON, V.A., Estudos da microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado, Tese doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1991.

PELISSER, F.; NETO, A. B. DA S. S.; ROVERE, H. L. L.; PINTO, R. C. DE A. **Effect of the addition of synthetic fibers to concrete thin slabs on plastic shrinkage cracking.** Construction and Building Materials, v. 24, n. 11, p. 2171–2176, 2010.

POMPEU NETO, B. B., **Efeitos do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo na Resistência e Energia de Fratura do Concreto.** Tese de D. Sc., UNICAMP/CAMPINAS, São Paulo, SP, Brasil, 2004.

PUJADAS, P. **Caracterización y diseño del hormigón reforzado con fibras plásticas.** Tesis doctoral. Universidad Politecnica de Cataluña. Barcelona, Marzo, 2013.

RILEM TC 162-TDF (2002b): Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Design of steel fibre reinforced concrete using the σ -w method: principles and applications. **Materials and Structures / Matériaux et Constructions**, v. 35, p. 262-278. June, 2002.

RIXOM, M. R; MAILVAGANAM, N. P. 1999. Chemical admixtures for concrete. **Third Edition. E & FN Spon.** New York. 437p;

SILVA, E.R. COELHO, J.F.J. BORDADO, J.C. **Strength improvement of mortar composites reinforced with newly hybrid-blended fibres: INFLUENCE of fibres geometry and morphology,** Constr. Build. Mater. 40 (2013) 473–480.

SALVADOR, R., P.; FIGUEIREDO, A., D. **Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço.** Revista Matéria, São Paulo, 2013.

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.

SONG, P.S.; HWANG, S.; SHEU, B.C. **Strength properties of nylon- and polypropylene-fiberreinforced concretes**. Cement and Concrete Research, v. 35, p. 1546 – 1550, 2005.

SUSSEKIND, J. C. **Curso de Análise Estrutural Volume III**. Editora Globo, Rio de Janeiro, 1987.

TAERWE, L.; GYSEL, A.V. **Influence of steel fibers on design stress-strain curve for high-strength concrete**. Journal of Engineering Mechanics ASCE 122(8): 695-704. 1996.

TAYLOR, G. D. **Materials in Construction**. London: Longman Scientific & Technical, 2ed, 284p. 1994.

TIGUMAN, M. P. **Estudo comparativo entre métodos de quantificação de tenacidade usando concreto reforçado com macrofibras de polipropileno**. 2004. 85p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

TOGNON, G; CANGIANO, S. 1982. Air contained in superplasticized concretes. **ACI Journal**, ACI, Vol. 79, N° 4, pp. 350-354;

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. In: ISAIA, G. (Ed). Concreto: ciência e tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011. cap. 36.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C.; Concreto Autoadensável. 2ª Edição. Editora Pini. São Paulo, 2015.

VERONEZ, M. Estudo da influência do tipo de aditivo superplastificante e de adição mineral no comportamento termo-mecânico dos concretos de alto desempenho. 2006. 214 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

WANG, KEJIN, SURENDRA P. S. AND PHUAKSUK, PARIYA. **Plastic shrinkage cracking in concrete materials** – Influence of fly ash and fibers. Journal of Materials. American Concrete Institute, November-December 2001.

YAP, S. P.; BU, C.H.; ALENGARAM, U.J.; MO, K.H.; JUMAAT, M.Z.; **Flexural toughness characteristics of steel–polypropylene hybrid fibre-reinforced oil palm shell concrete**. Materials and Design. v. 57, p.652-659, 2014.

ZHANG, J; MAALEJ, M.; QUEK, S. T. **Performance of Hybrid-Fiber ECC Blast/Shelter Panels Subjected to Drop Weight Impact**. Journal of Materials in Civil Engineering Volume 19 Issue 10 - October 2007.

ZEIML, M.; LEITHNER, D.; LACKNER, R.; MANG, H. **How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in situ concrete?**. Cement and Concrete Research, v. 36, p. 929-942, 2006.

ZOLLO, R. F.; **Fibre-reinforced concrete: na overview after 30 years of development**. Cement and Concrete Composites, v. 19, n. 2, p. 107-122. 1997.

**APÊNDICE A - DETERMINAÇÃO DO TRAÇO POR MEIO DO
MÉTODO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND
(ABCP)**

Para o estudo dos CRF foi determinado um concreto como traço de referência com resistência característica de 30 MPa e abatimento de 80 a 100mm utilizando o método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) foi utilizada a condição de preparo A da ABNT NBR 12655 (2015) para a produção dos grupos de CRF. A norma relata que para a condição de preparo A, em que o cimento e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou em volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados, pode-se considerar como desvio padrão o valor de 4,0MPa;

Os materiais constituintes do concreto possuíram as seguintes especificações:

Cimento:

Resistência a compressão aos 28 dias: 35,72 MPa;

Peso Específico: 3100Kg/m³;

Agregado Miúdo:

Peso Especifico Real:2650 kg/m³

Peso Especifico Aparente:1470 kg/m³;

Módulo de Finura:2,03;

Agregado Graúdo:

Peso Especifico Real:2700 kg/m³

Peso Especifico Aparente:1500 kg/m³;

Diâmetro Máximo Característico:9,5mm;

CÁLCULO DO TRAÇO

O primeiro passo para a determinação do traço é determinar a resistência média do concreto (f_{cm}):

$$f_{cm} = f_{ck} + 1,65 \cdot \sigma_d$$

Sendo:

f_{ck} : a resistência característica do concreto;

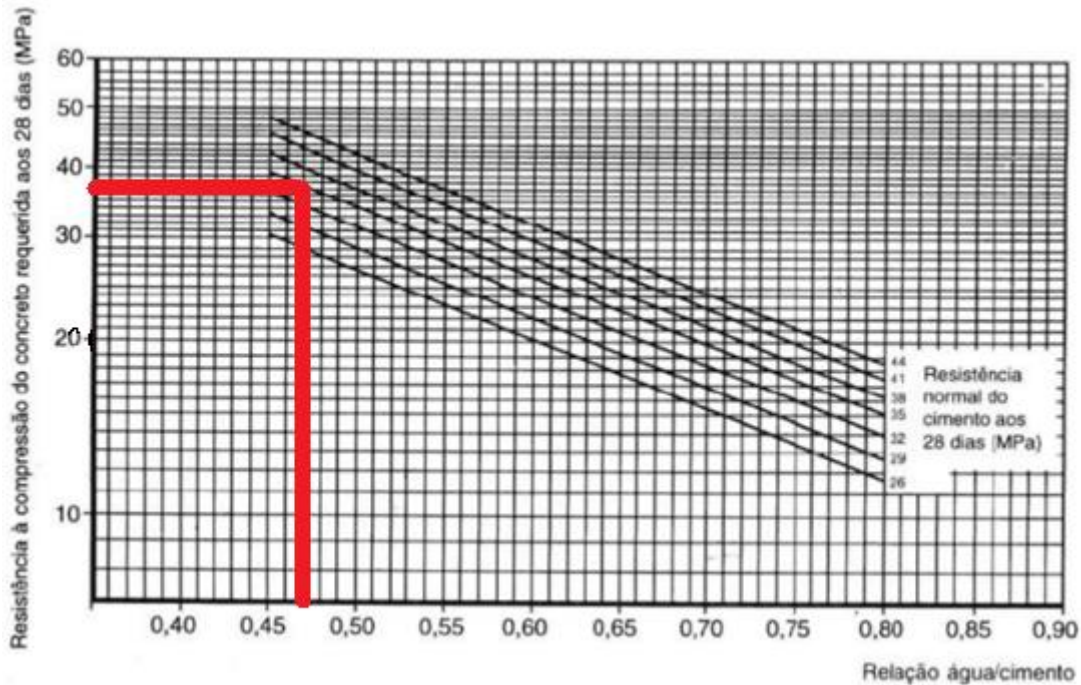
σ_d : o desvio padrão da amostra;

Portanto temos que:

$$f_{cm} = 30 + 1,65 \cdot (4,0);$$

$$f_{cm} = 36,6 \text{ MPa};$$

O próximo passo será verificar a relação água cimento da mistura por meio de um ábaco da Lei de Abrams:



Fonte: ABCP

Com isso a relação A/C estipulada foi de 0,47;

Deve-se verificar agora o consumo de água por metro cúbico de concreto por meio da tabela a seguir:

Abatimento do tronco de cone (mm)	Dimensões máxima característica do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Definindo-se, portanto, como consumo de água de 230 L / m³ de concreto;

Agora deve-se determinar o consumo de cimento com a seguinte expressão:

$$C_c = \frac{C_A}{A/C}$$

Sendo:

C_A : o consumo de água;

A/C: a relação água cimento;

$$C_c = 489,3617 \text{ kg / m}^3$$

Agora deve-se calcular o consumo de agregado graúdo, para isso deve-se estimar o volume de agregado utilizando a tabela a seguir;

Volume compactado seco (V_B) de agregado graúdo por m^3 de concreto					
MF	Dimensão máxima característica do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Com isso, o volume de agregado graúdo compactado seco é de $0,625 m^3/m^3$ de concreto. Para transformar esse volume em massa deve-se multiplicar pelo peso específico aparente do agregado graúdo.

Com isso temos que:

$$C_B = \gamma_{AP} \cdot V$$

$$C_B = 937,5 \text{ kg} / m^3$$

Para estimar a quantidade de agregado miúdo deve-se verificar quanto falta na mistura para completar $1 m^3$. Como na mistura não deve haver vazios deve-se utilizar o peso específico real dos materiais.

Com isso temos que:

$$V_{concreto} = 1 = V_{cimento} + V_{areia} + V_{brita} + V_{\text{água}}$$

$$V_{areia} = 1 - V_{cimento} - V_{brita} - V_{\text{água}}$$

$$V_{areia} = 1 - \frac{C_{cimento}}{\gamma_{cimento}} - \frac{C_{brita}}{\gamma_{brita}} - \frac{C_{\text{água}}}{\gamma_{\text{água}}}$$

$$V_{areia} = 0,2649 \text{ m}^3 / m^3$$

$$C_{areia} = \gamma_{real} \cdot V$$

$$C_{areia} = 702,0358 \text{ kg} / m^3$$

Portanto o traço será igual a:

$$\frac{C_{cimento}}{\gamma_{cimento}} : \frac{C_{brita}}{\gamma_{cimento}} : \frac{C_{areia}}{\gamma_{cimento}}$$

Portanto temos um traço de:

1:1,4345:1,9157 (cimento, areia, brita) em massa com relação A/C de 0,47

**APÊNDICE B – CURVAS CARGA *VERSUS* DESLOCAMENTO
VERTICAL DO ENSAIO DE FLEXÃO**

