

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RAFAEL ALBERTO HEIDRICH LANZARIN

**AVALIAÇÃO DO ENSAIO BARCELONA COMO CONTROLE
TECNOLÓGICO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE
AÇO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO

2018

RAFAEL ALBERTO HEIDRICH LANZARIN

**AVALIAÇÃO DO ENSAIO BARCELONA COMO CONTROLE
TECNOLÓGICO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE
AÇO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel, do curso de
Engenharia Civil, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Savaris.

TOLEDO
2018



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 175

Avaliação do ensaio Barcelona como controle tecnológico do concreto reforçado com fibras de aço

por

Rafael Alberto Heidrich Lanzarin

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 10:20 h do dia **06 de novembro de 2018** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof. Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra
(UTFPR – TD)

Prof. Dr. Rodnny Jesus Mendoza Fakhye
(UTFPR – TD)

Prof. Dr. Gustavo Savaris
(UTFPR – TD)
Orientador

Visto da Coordenação
Prof. Dr. Fúlvio Natércio Feiber
Coordenador da COECI

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, à minha família, em especial aos meus queridos pais, Marilis Cristina Heidrich e Elcide Alberto Lanzarin, que foram parte fundamental na concepção deste trabalho e, mesmo com a grande distância, sempre me deram apoio e amparo nas situações difíceis.

Presto gratidão também ao meu orientador, Professor Dr. Gustavo Savaris e à toda a comunidade da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *campus* Toledo, por todo apoio e conhecimento passado durante o curso e a elaboração deste trabalho.

Agradeço aos laboratoristas da UTFPR Wilson Leobet e Marcos Vinicius Schlichting e ao laboratorista Alex Minga da Universidade Paranaense (UNIPAR) pelo auxílio prestado na execução dos ensaios.

Por fim, quero agradecer aos grandes amigos que fiz durante o curso, em especial a Guilherme Roque Chiela e Yan Carlos do Nascimento que foram de grande ajuda na realização dos ensaios.

RESUMO

LANZARIN, Rafael A. H. **Avaliação do ensaio Barcelona como controle tecnológico do concreto reforçado com fibras de aço**. 2018. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2018.

Estruturas de concreto necessitam de métodos de controle de qualidade confiáveis, econômicos e, preferencialmente, de simples execução. Em se tratando de concretos reforçados com fibras (CRF), este controle baseia-se na tenacidade e nas resistências residuais, usualmente obtidas a partir de ensaios de flexão de prismas, sendo o ensaio da norma japonesa JSCE-SF4 o mais utilizado no Brasil atualmente devido à falta de uma norma de controle tecnológico no país específica para este tipo de concreto. Estes ensaios, porém, necessitam de corpos de prova de grandes dimensões e equipamentos específicos raramente encontrados nos laboratórios convencionais, além de apresentarem problemas de confiabilidade devido aos altos coeficientes de variação (em média 20%) comumente observados entre ensaios. Neste contexto surge o ensaio Barcelona como alternativa promissora e confiável na avaliação dos principais parâmetros do CRF, pois utiliza de corpos de prova cilíndricos e equipamentos de fácil acesso na maioria dos laboratórios. No presente trabalho foram confeccionados concretos com três teores de fibras aço de fator de forma igual a 80 (0,0%, 0,5% e 1,0%), submetidos ao ensaio Barcelona de forma a analisar a influência das fibras na tenacidade do concreto e a precisão deste ensaio quando comparado aos ensaios de flexão de prismas. Também foi analisada influência que a adição de fibras ao concreto provoca nas resistências à compressão e à tração do mesmo. Foi verificado que apesar de não influenciarem tanto nas resistências à compressão e à tração, as fibras mostraram-se muito efetivas no incremento da tenacidade do concreto, além de provocarem um comportamento pós-ruptura, com o surgimento de resistências residuais que impedem o rompimento abrupto do concreto mesmo após atingida a carga de pico. Os coeficientes de variação obtidos no ensaio Barcelona ficaram entre 7% e 13%, valores bem abaixo daqueles comumente observado em ensaios de flexão de prismas, indicando uma boa reprodutibilidade e precisão deste ensaio e comprovando sua viabilidade de execução como controle tecnológico do concreto reforçado com fibras de aço.

Palavras-chave: Concreto reforçado com fibras. Flexão de prismas. Ensaio Barcelona. Coeficiente de variação. Tenacidade.

ABSTRACT

LANZARIN, Rafael A. H. **Evaluation of the Barcelona test as a technological control of fiber-reinforced concrete.** 2018. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2018.

Concrete structures require reliable, economic and, preferably, simple execution methods. In case of fiber-reinforced concretes (FRC), this control is based on tenacity and residual resistances, usually obtained from beam flexural tests, being the Japanese test JSCE-SF4 the most commonly used in Brazil due to the lack of a norm of technological control specific to this type of concrete in the country. These tests, however, require large specimens and specific equipment rarely found in conventional laboratories and have reliability problems due to the high coefficients of variation (on average 20%) commonly observed between trials. In this context, the Barcelona test emerges as a promising and reliable alternative in the evaluation of the main parameters of the CRF, as it uses cylindrical specimens and equipment that is easily accessible in most laboratories. In the present work, three grades of 80 form factor steel fibers (0,0%, 0,5% and 1,0%) were submitted to the Barcelona test in order to analyze the influence of the fibers on the toughness of the concrete and the accuracy of this test when compared to the flexural tests. It was also analyzed the influence that the addition of fibers to the concrete causes in the compressive and the tensile strengths. It was verified that, although they did not influence much in both the compressive and tensile strengths, the fibers proved to be very effective in increasing the concrete's toughness, provoking a post-rupture behavior, with the appearance of residual resistances that prevent abrupt rupture of the concrete even after reaching the peak load. The coefficients of variation obtained in the Barcelona test were between 7% and 13%, values well below those commonly observed in flexural tests, indicating a good reproducibility and precision of this test and proving its feasibility of execution as a technological control of the reinforced concrete with fibers of steel.

Keywords: Fiber reinforced concrete. Beam flexion. Barcelona test. Coefficient of variation. Toughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição do mercado brasileiro de fibras de aço por tipo de aplicação no ano de 2009 e no primeiro semestre de 2010	13
Figura 2 - Classificação das fibras.	17
Figura 3 - Fibras de diferentes tipos de materiais	17
Figura 4 - Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto	19
Figura 5 - Esquema da concentração de tensões para concreto sem reforço de fibras	20
Figura 6 - Esquema da concentração de tensões para concreto reforçado com fibras	21
Figura 7 - Representação gráfica do comportamento entre a carga de arrancamento em função do deslocamento do concreto de referência (CR) e concreto reforçado com fibras (CRF).....	21
Figura 8 - Representação das zonas de transferência de tensões ao longo de uma fissura.....	22
Figura 9 - Ouriço formado por fibras de aço mal misturadas ao concreto	24
Figura 10 - Faixa de carga versus curvas de deflexão para matriz não reforçada e concreto reforçado com fibras	26
Figura 11 - Aplicação do CRF em lajes pavimento industrial em São Paulo	27
Figura 12 - Aplicação do CRF em lajes revestimento de talude em Minas Gerais	28
Figura 13 - Posicionamento de corpo-de-prova, LVDT e cutelos no ensaio de tração na flexão com o sistema "yoke"	29
Figura 14 – Tenacidade (Tb).....	30
Figura 15 - Resultado típico do ensaio JSCE-SF4 correlacionando a carga (F) pela deformação (mm)	30
Figura 16 - Esquema idealizado do modo de ruptura onde se pode observar a formação dos planos radiais e os cones de ruptura	32
Figura 17 - Representação de a) curva de carga-TCOD, b) curva de carga-deslocamento vertical (δ)	34
Figura 18 - Detalhe do modo de ruptura assumido para o ensaio NBN B 15-238.....	36
Figura 19 - Modo de ruptura simplificado assumido para o ensaio Barcelona.	37
Figura 20 - Fibras de aço RC 80/60 BN	39
Figura 21 - (a) Molde para o ensaio Barcelona (b) Aplicação de óleo desmoldante .	40

Figura 22 - Desmolde dos corpos de prova do ensaio Barcelona	41
Figura 23 - Disco de aço utilizado no ensaio Barcelona.....	42
Figura 24 - Posicionamento do disco de aço no corpo de prova.....	42
Figura 25 - Resultados do <i>slump test</i> : (a) Sem fibras; (b) 0,5% de fibras; (c) 1,0% de fibras.	44
Figura 26 - Nichos de concretagem em corpo de prova R2	45
Figura 27 - Resistência à compressão e desvio padrão das composições R0, R1 e R2	46
Figura 28 - Resultados do teste de Tukey para resistência à compressão do concreto reforçado com diferentes teores de fibras	48
Figura 29 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral (a) e Barcelona (b).....	49
Figura 30 - Resistência à tração por compressão diametral e desvio padrão das composições R0, R1 e R2.....	53
Figura 31 - Resistência à tração e desvio padrão das composições R0, R1 e R2 no ensaio Barcelona.....	54
Figura 32 - Modo de ruptura do corpo de prova no ensaio Barcelona	55
Figura 33 - Padrão de ruptura do ensaio de compressão diametral: (a) sem fibras (b) com fibras.....	57
Figura 34 – Resultados do teste de Tukey para a resistência à tração por compressão diametral do concreto reforçado com diferentes teores de fibras.....	58
Figura 35 - Curva de carga por deslocamento dos corpos de prova R0	59
Figura 36 - Curva de carga por deslocamento dos corpos de prova R1	60
Figura 37 - Curva de carga por deslocamento dos corpos de prova R2	60
Figura 38 - Curva de carga por TCOD dos corpos de prova R1	61
Figura 39 - Curva de carga por TCOD dos corpos de prova R2	61
Figura 40 - Resistências residuais para um TCOD de 1 mm	64
Figura 41 - Resistências residuais para um TCOD de 4 mm	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibra e matrizes	18
Tabela 2 - Resultados de tenacidade e do fator de tenacidade para corpos de prova prismáticos com diferentes teores de fibras de aço	31
Tabela 3 - Características da fibra de aço utilizada.....	38
Tabela 4 - Quantidade de materiais (kg) para produção de 40 litros de concreto	39
Tabela 5 - Caracterização dos agregados	43
Tabela 6 - Resistência à compressão axial dos corpos de prova R0	45
Tabela 7 - Resistência à compressão axial dos corpos de prova R1	46
Tabela 8 - Resistência à compressão axial dos corpos de prova R2	46
Tabela 9 - Teste de Análise de Variância (ANOVA) da resistência à compressão do concreto com diferentes teores de fibras	47
Tabela 10 - Teste de Tukey para diferentes teores de fibras	47
Tabela 11 - Aplicação do critério de Chauvenet para os corpos de prova R0	50
Tabela 12 - Aplicação do critério de Chauvenet para os corpos de prova R1	50
Tabela 13 - Aplicação do critério de Chauvenet para os corpos de prova R2	51
Tabela 14 - Resistência à tração dos corpos de prova R0	51
Tabela 15 - Resistência à tração dos corpos de prova R1	52
Tabela 16 - Resistência à tração dos corpos de prova R2	53
Tabela 17 - Relação entre as resistências à tração direta e por ensaio Barcelona (MPa)	55
Tabela 18 - Resistência à tração por ensaio de compressão diametral, barcelona e tração direta	56
Tabela 19 - Teste de Análise de Variância (ANOVA) para a resistência à tração por compressão diametral do concreto com diferentes teores de fibras	57
Tabela 20 - Teste de Análise de Variância (ANOVA) para a resistência à tração por ensaio Barcelona do concreto com diferentes teores de fibras	59
Tabela 21 - Tenacidade dos corpos de prova R1	62
Tabela 22 - Tenacidade dos corpos de prova R2	62
Tabela 23 - Teste de Análise de Variância (ANOVA) da tenacidade das composições R1 e R2	63
Tabela 24 - Resistências residuais dos corpos de prova R1	63

Tabela 25 - Resistências residuais dos corpos de prova R2.....	64
Tabela 26 – Comparação entre a média dos coeficientes de variação obtidos em diferentes ensaios com concreto reforçado com fibras de aço.....	65

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute – Instituto Americano do Concreto
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
ARI	Alta Resistência Inicial
CR	Concreto de Referência
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
CRFA	Concreto Reforçado com Fibras de Aço
DMC	Dimensão Máxima Característica
FIB	Fédération Internationale du Béton
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
JSCE	<i>Japanese Society of Civil Engineers</i> – Sociedade Japonesa de Engenheiros Civis
LVDT	Linear Variable Differential Transformer – Transdutor de Deslocamento Variável Linear
MF	Módulo de Finura
NBR	Norma Brasileira
TCOD	<i>Total Circumferential Opening Displacement</i>
UNIPAR	Universidade Paranaense
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

f_c	Resistência à compressão do concreto
$f_{c,m}$	Resistência à compressão média do concreto
f_t	Resistência à tração do concreto
$f_{t,m}$	Resistência à tração média do concreto
σ_b	Resistência à flexão do concreto
P	Carga máxima aplicada
L	Vão do corpo de prova no ensaio
b	Largura do corpo de prova
h	Altura do corpo de prova
FT	Fator de tenacidade na flexão
T_b	Tenacidade na flexão
δ_{tb}	Deslocamento equivalente a $L/150$
$f_{t(BCN)}$	Resistência à tração no ensaio Barcelona
P	Carga máxima aplicada
a	Diâmetro do disco de aço do ensaio Barcelona
H	Altura do corpo de prova no ensaio Barcelona
$f_{t,TCOD_x}$	Resistência residual referente a um $TCOD_x$
P_{TCOD_x}	Carga aplicada referente a um $TCOD_x$
n	Número de fissuras radiais formadas no ensaio Barcelona
l	Comprimento da cunha formada
F	Carga no ponto calculado
F_{cr}	Carga no ponto de carga máxima
δ_{cr}	Deslocamento vertical no ponto de carga máxima
$F_{R,0}$	Carga no ponto de início da resistência
$\delta_{R,0}$	Deslocamento vertical no ponto de início de resistência
w_{NBN}	Abertura de fissura no ensaio norueguês
w_{BCN}	Abertura de fissura no ensaio Barcelona
δ	Deslocamento vertical da prensa
d	Diâmetro do corpo de prova

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVO GERAL	15
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	FIBRAS COMO REFORÇO NA CONSTRUÇÃO	16
2.1.1	Definição e Histórico	16
2.1.2	Tipos de Fibras	16
2.1.3	Fibras de Aço	18
2.2	CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO	19
2.2.1	Interação Fibra-Matriz	20
2.2.2	Comportamento à Compressão	22
2.2.3	Comportamento à Tração	23
2.2.4	Trabalhabilidade	24
2.2.5	Tenacidade	25
2.2.6	Aplicações do CRFA	26
2.3	ENSAIO DE FLEXÃO DO CRF	28
2.4	ENSAIO DE DUPLO PUNÇIONAMENTO DO CRF	31
2.5	RELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS BARCELONA E DE FLEXÃO DO CRF	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	MATERIAIS	38
3.2	PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	39
3.3	ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	43
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS	43
4.2.1	Trabalhabilidade	44
4.2.2	Resistência à compressão	45
4.2.3	Resistência à tração	49
4.2.4	Tenacidade	59
5	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
	APÊNDICE A	74

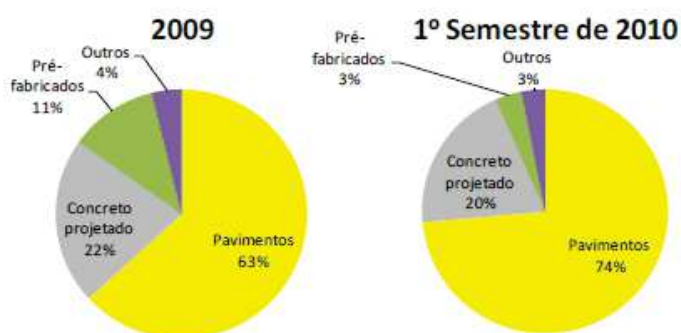
1 INTRODUÇÃO

O concreto simples é um material frágil que apresenta baixas resistência à tração e capacidade de deformação e, uma vez fissurado, perde sua capacidade de resistir aos esforços de tração (FIGUEIREDO, 2011). Como forma de contornar estes problemas, fibras de diversas formas e materiais vêm sendo adicionadas à matriz de concreto, principalmente nos últimos 40 anos. Sua função não é aumentar a resistência do compósito e sim servir como ponte de transferência de tensões, reduzindo a propagação de fissuras e alterando o comportamento do concreto na situação pós-fissuração (BENTUR e MINDESS, 2007).

A adição de fibras de aço no concreto provoca um aumento na quantidade de energia de deformação que o material pode absorver, ou seja, promove um aumento notável na tenacidade. Também podem ser observadas melhorias na qualidade do concreto, pois, devido à redução da abertura de fissuras pela adição de fibras, menos substâncias agressivas do meio ambiente penetram no material, aumentando sua vida útil (ACI 554.1R-96, 1996).

Segundo Figueiredo (2011), no Brasil, as fibras mais utilizadas como reforço do concreto são as de aço e suas aplicações se concentram em estruturas contínuas, com baixo consumo de fibras, tais como pavimentos e túneis revestidos com concreto projetado (Figura 1). Esta pouca utilização do material pode estar associada ao fato de que ainda não existem normas brasileiras específicas para o controle tecnológico do concreto reforçado com fibras.

Figura 1 - Distribuição do mercado brasileiro de fibras de aço por tipo de aplicação no ano de 2009 e no primeiro semestre de 2010



Fonte: Figueiredo (2011).

Já existem diversos métodos de ensaio para caracterizar o comportamento do concreto reforçado com fibras, dentre eles se destacam os ensaios de flexão de prismas, sendo o ensaio prescrito pela norma japonesa JSCE-SF4 (1984) o mais utilizado no Brasil atualmente (FIGUEIREDO, 2011). Porém, de acordo com Molins et al. (2009), estes ensaios apresentam certos problemas relacionados às dimensões dos corpos de prova e à necessidade de se utilizarem equipamentos mais complexos.

O ensaio Barcelona, idealizado por Chen (1970), apresenta uma configuração diferente destes ensaios de flexão, pois utiliza de corpos de prova cilíndricos e de dimensões menores. Inicialmente, fazia-se necessário o uso de um extensômetro de circunferência para medir a abertura circunferencial, ou *Total Circumferential Opening Displacement* (TCOD), do corpo de prova durante o ensaio Barcelona, o que comprometia sua simplicidade. Porém, Pujadas et al. (2013) estabeleceram uma relação entre o deslocamento vertical da prensa e a abertura circunferencial, eliminando a necessidade de utilizar um extensômetro de circunferência, simplificando ainda mais o ensaio.

Neste contexto, o presente trabalho pretende avaliar o comportamento do concreto reforçado com diferentes teores de fibras e a viabilidade da utilização do ensaio Barcelona como controle tecnológico do concreto reforçado com fibras em substituição aos ensaios de flexão, em específico ao JSCE-SF4 (1984) comumente empregado no país.

1.1 JUSTIFICATIVA

Fibras podem ser adicionadas à composição do concreto como forma de reduzir a característica de fragilidade que este material apresenta, porém, no Brasil ainda não existe uma utilização em grande escala do concreto reforçado com fibras (CRF) devido principalmente à falta de uma norma brasileira para o controle do mesmo (FIGUEIREDO, 2011).

Várias alternativas de ensaios para o CRF existem pelo mundo, sendo que a maioria utiliza de prismas submetidos à flexão. O grande problema é que estes ensaios necessitam de aparelhagem complexa e corpos de prova de grandes dimensões (MOLINS et al., 2009).

Neste quadro de ausência de normas brasileiras para o controle do concreto reforçado com fibras associado ao fato de que os ensaios de flexão, comumente

usados no Brasil, são complexos e necessitam de aparelhagem específica, surge o ensaio Barcelona, também denominado ensaio de duplo puncionamento, como uma possível solução para o controle tecnológico do CRF a ser analisada.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a utilização do ensaio Barcelona como controle tecnológico do concreto reforçado com fibras.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos este trabalho tem:

- Analisar a influência da adição de fibras de aço nas resistências à compressão e tração por compressão diametral e na tenacidade do concreto;
- Realizar ensaios Barcelona do CRFA, verificando sua simplicidade de execução;
- Comparar os valores de resistência à tração obtidos pelo ensaio Barcelona e pelo ensaio de compressão diametral;
- Analisar a dispersão dos resultados de tenacidade e resistências residuais obtidos no ensaio de duplo puncionamento, comparando com os ensaios de flexão de prismas de outros autores, avaliando qual se mostrou mais eficiente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FIBRAS COMO REFORÇO NA CONSTRUÇÃO

2.1.1 Definição e Histórico

O CRF é um compósito que apresenta duas fases, onde a matriz é representada pelo concreto de Cimento Portland e a segunda fase são as fibras, elementos que possuem o comprimento como dimensão dominante e estão distribuídos aleatoriamente sobre toda a matriz (NUNES, 1998).

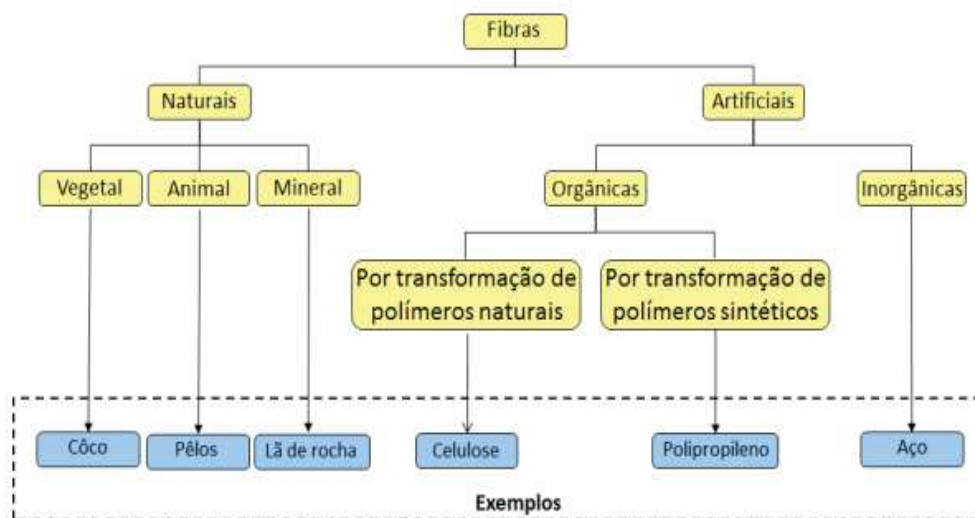
Segundo Bentur e Mindess (2007), na década de 1900, Ludwig Hatschek desenvolveu o primeiro composto de cimento reforçado com fibras de amianto que, posteriormente, foi muito utilizado para coberturas, tubos, e produtos de revestimento e, devido à sua grande estabilidade térmica, também foi usado em muitas aplicações que exigem alta resistência ao fogo.

No entanto, sabe-se que amianto oferece riscos à saúde e devido, principalmente, a este fato, fibras de outros tipos começaram a ser introduzidas ao longo dos anos 1960 e 1970 (NAAMAN, 2008).

2.1.2 Tipos de Fibras

Conforme relatado por Vasconcelos (2012), as fibras podem ser classificadas em fibras naturais e artificiais de acordo com o material de que são produzidas, sendo fibras naturais as de origem vegetal, animal e mineral e as artificiais divididas em orgânicas e inorgânicas. A Figura 2 apresenta exemplos de fibras de diferentes classificações:

Figura 2 - Classificação das fibras.



Fonte: Adaptado de Sarzalejo et. al., 2008.

As fibras utilizadas como reforço do concreto são também denominadas macrofibras e possuem diversos formatos e tamanhos, podendo ser de aço ou poliméricas (Figura 3). Microfibras também são utilizadas, mas atuam no concreto em seu estado fresco e não como forma de reforço (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 3 - Fibras de diferentes tipos de materiais



Fonte: Santos (2010).

Figueiredo (2005), destaca também que o papel que a fibra desempenhará no concreto depende de uma série de características da mesma, sendo o módulo de elasticidade e a resistência mecânica à tração as mais relevantes. As fibras com módulo de elasticidade inferior ao do concreto endurecido são denominadas fibras de

baixo módulo, sendo fibras de alto módulo aquelas que apresentam módulo de elasticidade superior.

A combinação de alto módulo de elasticidade e resistência mecânica determinam o melhor tipo de fibra a ser utilizada como reforço do concreto, pois fibras que apresentam módulo de elasticidade elevado, mas baixa resistência, necessitam de teores maiores na matriz, o que afeta o custo e a trabalhabilidade do concreto (FIGUEIREDO, 2011). A Tabela 1 apresenta as principais características de alguns tipos de fibras:

Tabela 1 - Valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibra e matrizes

Material da Fibra	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	190-210	0,5-2	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,6	70-80	2-4	2-3,5
Polipropileno	20-200	0,9	1-7,7	0,5-0,75	8
Carbono	9	1,9	230	2,6	1
Matriz de cimento (para comparação)	-	2,5	10-45	0,0037	0,02

Fonte: Bentur e Mindess (2007).

Pela Tabela 1 tem-se que as fibras de aço são as que se enquadram melhor nos requisitos apresentados acima, motivo pelo qual elas se tornaram as mais utilizadas para aplicações estruturais e são levadas em consideração em muitas aplicações não estruturais (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.1.3 Fibras de Aço

Devido à sua grande utilização como reforço do concreto, as fibras de aço já possuem, desde 2007, uma norma brasileira publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) – NBR 15530 – Fibras de aço para o concreto. Esta norma tem por objetivo classificar as fibras de aço de acordo com seu modo de produção e geometria, além de determinar os requisitos e tolerância mínimos para que se tenha um produto com qualidade garantida (ABNT, 2007).

Segundo Figueiredo (2008) as fibras podem ser divididas em A para fibras de aço com ancoragem nas extremidades, C para fibras corrugadas e R para as retas. Além desta classificação, elas podem ser de Classe I para fibras oriundas de arame

trefilado a frio, Classe II para as oriundas de chapa laminada cortada a frio e as oriundas de arame trefilado e escarificado de Classe III (Figura 4):

Figura 4 - Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto

Tipo	Classe da fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

Fonte: Figueiredo (2008).

As fibras de aço são usadas principalmente para controle da fissuração, substituindo a armadura secundária utilizada em lajes de edifícios, pavimentos e túneis, como também em recuperações de estruturas (ONUKE e GASPARETTO, 2013).

Segundo estudos realizados por Nunes e Agopyan (1998), o aumento no fator de forma, relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra, pode representar uma melhora na resistência ao arrancamento da fibra, um aumento no número de fibras que podem interceptar uma fissura ou até os dois casos simultaneamente, ou seja, quanto maior o fator de forma da fibra, maior é a tenacidade do compósito.

2.2 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

Mesmo possuindo um bom comportamento estrutural quando relacionado à resistência compressão, o concreto apresenta limitações quanto à sua resistência à tração, sendo esta apenas de 7 a 10% o valor da primeira. Sendo assim, a adição de fibras de aço no concreto se tornou uma alternativa a ser empregada como forma de

melhorar o seu desempenho como um todo, pois, além de melhorar sua resistência à tração na flexão, as fibras reduzem o comportamento frágil característico do concreto (HANAI, 2005).

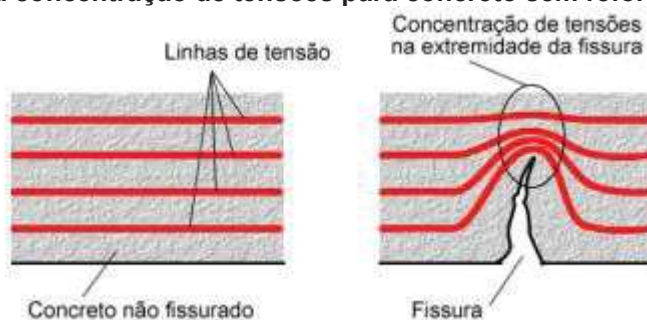
A adição de fibras de aço, em frações volumétricas adequadas, pode ser uma aliada importante ao concreto armado no combate às tensões de tração induzidas. Desse modo, o uso de fibras pode ajudar na redução do aparecimento de fissuras, inclusive aquelas decorrentes da retração do concreto (BARROS, 2009).

Bayasi e Soroushian (1992) destacam, porém, que para que um concreto seja empregado como matriz de um compósito com fibras de aço, deve-se ter cuidado com a trabalhabilidade deste, pois a adição das fibras aumenta consideravelmente a coesão do concreto. O American Concrete Institute (ACI 544.1R-96, 1996) sugere utilizar um teor máximo de até 2% do peso do concreto em fibras.

2.2.1 Interação Fibra-Matriz

De acordo com Figueiredo (2011), as tensões provenientes de esforços atuando na estrutura tendem a se propagar no interior do concreto e o surgimento de uma fissura atua como barreira à propagação destas tensões. Com isso ocorre um desvio nas linhas de tensões que passam a se concentrar na extremidade da fissura e, caso esta tensão supere o valor da tensão crítica, ocorrerá a ruptura abrupta do material, caracterizando um comportamento tipicamente frágil, como se observa na Figura 5:

Figura 5 - Esquema da concentração de tensões para concreto sem reforço de fibras



Fonte: Barros (2009).

Pela Figura 6 nota-se que as fibras atuam como “pontes” de transferência de tensões na matriz de concreto, reduzindo a concentração de tensões na extremidade da fissura em comparação com o concreto sem fibras (BARROS, 2009).

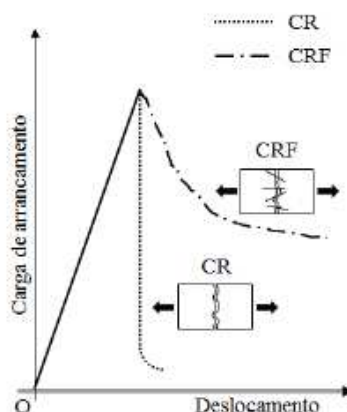
Figura 6 - Esquema da concentração de tensões para concreto reforçado com fibras



Fonte: Barros (2009).

Esta diferença no comportamento entre o concreto simples e o reforçado com fibras pode ser melhor entendida pela Figura 7:

Figura 7 - Representação gráfica do comportamento entre a carga de arrancamento em função do deslocamento do concreto de referência (CR) e concreto reforçado com fibras (CRF)



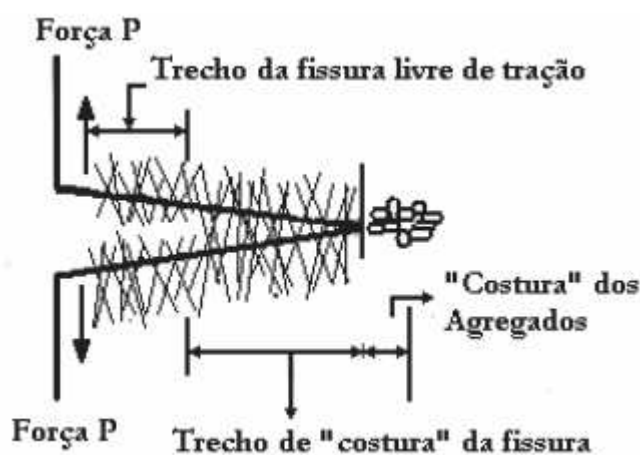
Fonte: Vasconcelos (2012).

Pela Figura 7 percebe-se que, ao romper, a curva do concreto de referência (linha pontilhada) desloca-se verticalmente no sentido decrescente enquanto que na curva do concreto reforçado com fibras a capacidade de carga diminui, mas o compósito passa a ter resistências residuais pós-fissuração (linha traço-ponto), provocando um aumento na energia absorvida pelo concreto (tenacidade) (VASCONCELOS, 2012). Este aumento na tenacidade ajuda a manter a integridade estrutural e de coesão do material, reduzindo a fissuração do concreto e contribuindo na resistência ao impacto e a fadiga (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A ruína do compósito fibroso pode ocorrer por alongamento elástico ou plástico das fibras, por degradação da matriz de concreto na zona de aderência entre a fibra e a matriz, e por arrancamento ou ruptura da fibra (OLIVEIRA, 2005).

Segundo Bentur e Mindess (2007), uma fissura do concreto reforçado com fibras apresenta três fases distintas (Figura 8): trecho livre de tração, onde a matriz se encontra fissurada e as fibras rompidas ou arrancadas da matriz; trecho de "costura" das fissuras pelas fibras, no qual a tensão é transferida da matriz para as fibras por atrito; e trecho de micro fissuração da matriz, mas com suficiente continuidade e ancoragem dos agregados, para que ocorra transferência de tensão pela própria matriz.

Figura 8 - Representação das zonas de transferência de tensões ao longo de uma fissura



Fonte: Góis (2010).

Percebe-se pela Figura 8 que quanto maior o comprimento das fibras, maior a possibilidade de elas possuírem ancoragem suficientes de cada lado da fissura. A eficiência da interação entra a fibra e a matriz é determinada pelo processo de arrancamento das fibras (GÓIS, 2010).

2.2.2 Comportamento à Compressão

As fibras de aço contribuem muito pouco para o aumento da resistência à compressão do concreto, raramente ultrapassando 25% para casos com maiores teores de fibras. Para teores de fibra abaixo de 0,75%, o aumento na resistência pode ser desprezado (BALAGURU e SHAH, 1992).

Segundo o ACI 544.4R-88 (1988), para teores de fibras normalmente empregados (menos que 2%) não ocorrem melhorias na resistência a compressão do concreto, podendo inclusive ocorrer uma redução da mesma (FIGUEIREDO, 2000), conforme pode ser observado em ensaios realizados por Costa (2017) que obteve uma redução de cerca de 15% na resistência à compressão do concreto com um incremento de 1,0% no teor de fibras de aço.

Melhoras significativas na resistência à compressão só são obtidas com a utilização de concretos com altos teores de fibras, o que afeta a trabalhabilidade do mesmo (FIGUEIREDO, 2011), ou alta concentração de materiais finos, como observado em estudos mais recentes realizados por Velasco (2008), onde foi possível observar incrementos de até 31% na resistência à compressão axial em concretos auto adensáveis reforçados com teores de até 2,5% de fibras.

Por outro lado, como já citado, a adição de fibras contribui para um aumento na ductilidade, resultando em uma curva de tensão por deformação com um ramo descendente menos inclinado (Figura 7). Este aumento na ductilidade depende de fatores como o teor de fibras, a geometria das fibras e a composição da matriz (BALAGURU e SHAH, 1992).

2.2.3 Comportamento à Tração

Bentur e Mindess (2007) destacam que as fibras são particularmente efetivas quando submetidas a tensões de tração na flexão, cisalhamento e impacto sob cargas dinâmicas. Porém, a adição de baixos teores de fibras de aço não eleva tanto a resistência à tração direta do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), sendo esta geralmente da mesma ordem de grandeza do que aquela para o concreto sem adição de fibras (ACI, 1994).

A razão pelo qual a resistência à tração do CRFA não se eleva consideravelmente com a incorporação de fibras pode estar ligada ao fato de que ocorre a incorporação de ar e o surgimento de vazios entre as fibras e a matriz, conforme afirma Garcez (2005).

Sendo assim, como a principal contribuição das fibras ocorre após a matriz sofrer ruptura, adicionar fibras no concreto apenas como forma de aumentar a resistência à tração do compósito torna-se ineficaz e inviável (NUNES, 1998).

2.2.4 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade pode ser definida como a facilidade de lançamento e adensamento do concreto sem que haja segregação (NEVILLE, 1997).

É uma das propriedades básicas que deve ser atendida, pois caso a mistura de concreto não consiga ser lançada e adensada com facilidade ela provavelmente terá sua resistência, durabilidade e aparência inadequadas (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A adição de fibras no concreto altera sua trabalhabilidade devido a dois fatores. O primeiro é que as fibras provocam uma restrição à mobilidade das partículas, em especial os agregados graúdos. O segundo está relacionado a área superficial das fibras, que aumenta a demanda de água de molhagem, conseqüentemente, aumenta a coesão causa uma perda de mobilidade do compósito no estado fresco. Essa alteração depende do material que compõe a fibra, da geometria da fibra e de seu teor (FIGUEIREDO, 2011).

Entre os problemas que envolvem a trabalhabilidade do CRFA, Figueiredo (2005) destaca os ouriços (Figura 9), que são bolas formadas por fibras aglomeradas. Eles podem causar a redução do teor de fibras homogeneamente distribuído, dar origem a um ponto muito poroso e mais fraco e entupir os mangotes na aplicação do concreto projetado.

Figura 9 - Ouriço formado por fibras de aço mal misturadas ao concreto



Fonte: Figueiredo (2000).

A aparição destes ouriços está relacionada a uma mistura inadequada do material. Como forma de minimizar este efeito deve-se realizar o lançamento

controlado das fibras juntamente com os agregados e utilizar fibras coladas em pente, que têm a cola dissolvida ao serem misturadas ao concreto (FIGUEIREDO, 2011).

Existem três ensaios recomendados pelo ACI 544.3R-93 (2000) para avaliar a trabalhabilidade do CRF: abatimento do tronco de cone, vibração e abatimento de cone invertido e ensaio VeBe.

No entanto, em estudos realizados por Ceccato (1998), concluiu-se que o ensaio de cone invertido não é adequado para a avaliação da trabalhabilidade pois se o concreto for muito plástico ele passa pela extremidade inferior aberta do cone e, se for muito coeso acaba por entupir a mesma extremidade.

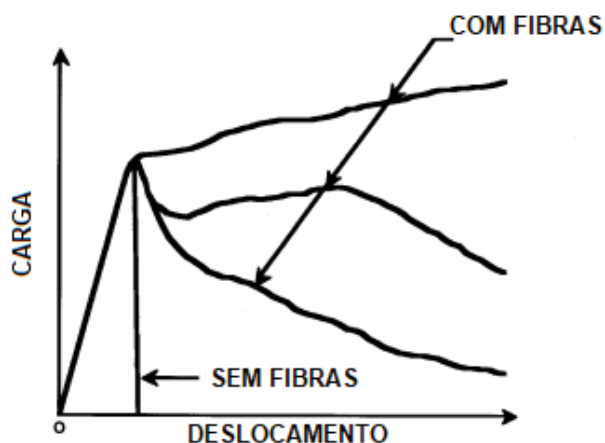
Mehta e Monteiro (2008) não consideram o ensaio de abatimento do tronco de cone como um bom índice de trabalhabilidade pois reduções nas medidas do abatimento não significam que o concreto terá seu lançamento e compactação por vibração reduzidos.

2.2.5 Tenacidade

Tenacidade é a energia que um material dúctil pode absorver até se romper (CALLISTER, 2002). Porém, o concreto reforçado com fibras foge um pouco desta definição, devido ao fato de sua tenacidade ser considerada tanto na fase antes de ocorrer fissuração, quanto após fissurar, sendo este momento em que as fibras passam a contribuir de forma mais eficiente (FIGUEIREDO, 2011).

Conforme Barros (1995), a energia absorvida após a fissuração da matriz é muito maior que aquela absorvida até ruptura da mesma, sendo esta a principal propriedade beneficiada pelo reforço das fibras. A Figura 10 apresenta a diferença entre as curvas de carga por deslocamento do concreto sem e com reforço de fibras.

Figura 10 - Faixa de carga versus curvas de deflexão para matriz não reforçada e concreto reforçado com fibras



Fonte: Adaptado de ACI 544.1R (1996).

Sendo assim, o desempenho das fibras como reforço do concreto é avaliado pela medida de tenacidade do compósito (BENTUR e MINDESS, 2007). Esta avaliação é feita através da área sob a curva de carga por deslocamento vertical, que representa o trabalho dissipado no material, conforme é destacado por Figueiredo (2011).

Existem diversos ensaios que podem ser realizados para aferir a tenacidade do concreto reforçado com fibras. A maioria deles utiliza de corpos de provas prismáticos em ensaios de flexão, mas também podem ser realizados ensaios com corpos de prova cilíndricos (ARIF, 2014).

2.2.6 Aplicações do CRFA

Conforme visto anteriormente, os concretos quando são reforçados com fibras possuem um ganho de desempenho e, em consequência disso, diversas aplicações para tal material vêm surgindo nos últimos anos.

Segundo Barros (1995), as principais aplicações do concreto reforçado com fibras são:

- Pavimentos;
- Estruturas hidráulicas;
- Estruturas de concreto projetado;
- Estruturas de concreto refratário;
- Elementos pré-moldados;

- Componentes estruturais;
- Reparação e reforço de estruturas.

No Brasil as principais aplicações do concreto reforçado com fibras de aço são em pavimentos (Figura 11) e revestimento de túneis (Figura 12). O uso deste tipo de concreto na pavimentação propicia vantagens como a eliminação da etapa de colocação das telas metálicas, o que proporciona uma economia em relação ao número de operários e tempo para executar a obra (FIGUEIREDO, 2000).

Além disso, Barros (1995) também destaca como vantagens do uso do CRFA em pavimentos o aumento da resistência às ações de fadiga e impacto, a diminuição da espessura do pavimento devido ao aumento da resistência a flexão e a diminuição do número de juntas devido à maior resistência à tração e tenacidade.

Quanto ao concreto utilizado no revestimento de túneis, Figueiredo (2000) destaca que, na maioria das vezes, o mesmo é aplicado como concreto projetado e oferece vantagens como: aumento na durabilidade devido à redução de fissurações, aumento na velocidade de execução do túnel e a diminuição do risco de acidentes devido ao desprendimento de parte do maciço.

Figura 11 - Aplicação do CRF em lajes pavimento industrial em São Paulo



Fonte: Figueiredo (2014).

Figura 12 - Aplicação do CRF em lajes revestimento de talude em Minas Gerais



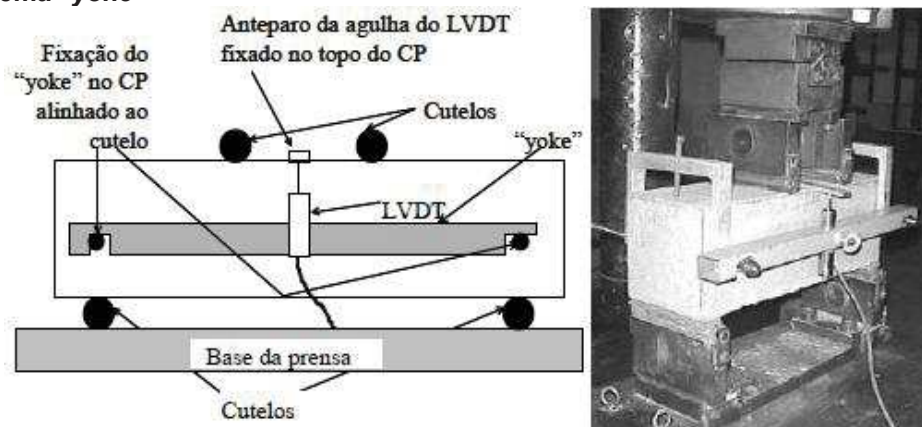
Fonte: Figueiredo (2014).

2.3 ENSAIO DE FLEXÃO DO CRF

Conforme afirmam Bentur e Mindess (2007), as propriedades do concreto reforçado com fibras são avaliadas a partir da determinação das resistências residuais e da tenacidade do compósito que, geralmente, são obtidas através de ensaios de flexão de prismas. Existem diversos ensaios de flexão de prismas normatizados, sendo aquele recomendado pela *Japanese Society of Civil Engineers* (JSCE-SF4, 1984) o mais utilizado no Brasil atualmente (FIGUEIREDO, 2011).

Este ensaio consiste na flexão de um corpo de prova prismático com dimensões de $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$ e 30 cm de vão ou $15 \times 15 \times 50 \text{ cm}^3$, com 45 cm de vão, através de um sistema de aplicação de carga com velocidade controlada e com quatro cutelos. Para se obter a curva de carga por deslocamento utiliza-se de um transdutor do tipo LVDT que deve ser apoiado em um suporte denominado “yoke” na região central do prisma (JSCE-SF4, 1984). O esquema de execução deste ensaio está ilustrado na Figura 13:

Figura 13 - Posicionamento de corpo-de-prova, LVDT e cutelos no ensaio de tração na flexão com o sistema "yoke"



Fonte: Figueiredo (2011).

A partir da curva de carga por deslocamento pode-se obter a resistência à flexão através da Equação 1:

$$\sigma_b = \frac{P \times L}{b \times h^2} \quad (1)$$

Onde:

σ_b = Resistência à flexão (N/mm²)

P = Carga máxima aplicada (N)

L = Vão do corpo de prova no ensaio (cm)

b = Largura do corpo de prova (cm)

h = Altura do corpo de prova (cm)

Além disso, a norma JSCE-SF4 (1984) também diz que devem ser calculados a medida de tenacidade pela área abaixo da curva até o deslocamento δ_{tb} , equivalente a $L/150$ (Figura 14), onde L é o vão ensaiado que pode ser de 30 ou 45 cm, e o fator de tenacidade na flexão (Equação 2) que representa a tensão média fictícia resistida pelo corpo de prova durante o ensaio (FIGUEIREDO, 2011):

$$FT = \frac{T_b \times L}{\delta_{tb} \times b \times h^2} \quad (2)$$

Onde:

FT = Fator de tenacidade na flexão (MPa)

T_b = Tenacidade na flexão (J)

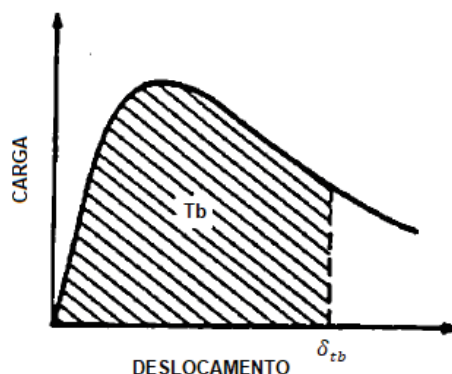
δ_{tb} = Deslocamento equivalente a $L/150$ (cm)

b = Largura do corpo de prova (cm)

L = Vão do corpo de prova durante o ensaio (cm)

h = Altura do corpo de prova (cm)

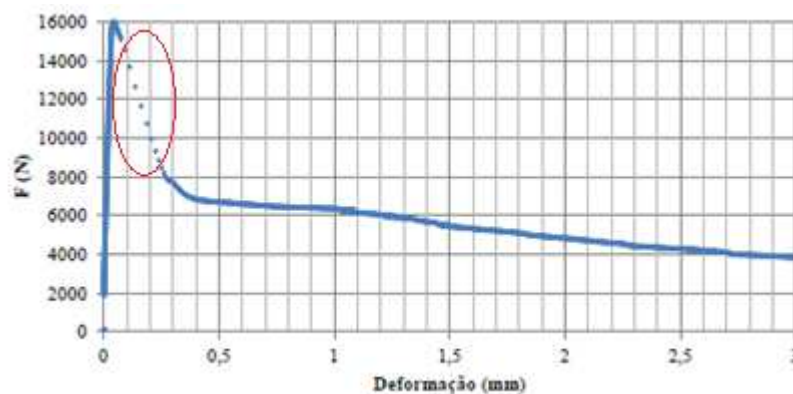
Figura 14 – Tenacidade (T_b)



Fonte: Adaptado de JSCE-SF4 (1984).

Porém, conforme afirma Figueiredo (2011), neste ensaio pode ocorrer um problema associado à instabilidade pós-pico que está relacionada com a diferença entre a carga resistida pela matriz de concreto e a carga resistida pelas fibras. Consiste em uma superestimação da carga que o corpo de prova suporta após a carga de pico, ou seja, quando ocorre o rompimento da matriz a carga é abruptamente transferida às fibras com uma conseqüente elevação na velocidade do deslocamento. Isto provoca um distanciamento maior dos pontos obtidos na curva de carga por deslocamento como se pode observar na Figura 15:

Figura 15 - Resultado típico do ensaio JSCE-SF4 correlacionando a carga (F) pela deformação (mm)



Fonte: Toaldo et al. (2013).

Devido a esta instabilidade, os valores de tenacidade calculados tendem a possuir uma incerteza quanto à sua precisão, fazendo com que o coeficiente de variação relacionado à tenacidade entre ensaios seja muito alto, conforme pode ser observado na Tabela 2 de ensaios desta norma realizados por Fugii (2008):

Tabela 2 - Resultados de tenacidade e do fator de tenacidade para corpos de prova prismáticos com diferentes teores de fibras de aço

Teor de Fibras (kg/m ³)	Prisma	Tenacidade (Tb) (kN.mm)	Fator de Tenacidade (FT) (MPa)	FT médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
10	1	32,71	1,45	1,27	0,23	18,11
	2	22,87	1,02			
	3	30,4	1,35			
15	1	29,11	1,29	1,43	0,65	45,45
	2	15,81	0,71			
	3	51,42	2,29			
20	1	48,33	2,15	2,33	0,48	20,60
	2	42,43	1,89			
	3	66,21	2,94			
25	1	75,05	3,34	2,90	0,35	12,06
	2	55,85	2,48			
	3	64,51	2,87			
30	1	77,92	3,46	2,97	0,39	13,13
	2	56,43	2,51			
	3	66,21	2,94			

Fonte: Adaptado de Fugii (2008).

2.4 ENSAIO DE DUPLO PUNÇIONAMENTO DO CRF

Como já visto, os principais métodos de determinação do comportamento do concreto reforçado com fibras envolvem ensaios de flexão de corpos de prova prismáticos. No entanto, estes ensaios apresentam certa complexidade na preparação dos corpos de prova e requerem equipamentos específicos para sua realização. (MOLINS et al., 2009). Além disso, o Brasil ainda não possui uma norma que estabeleça o controle tecnológico do concreto reforçado com fibras, o que é o principal empecilho para o uso do CRF no país (FIGUEIREDO, 2014).

Woods (2012) afirma que os métodos atuais de ensaio do CRF falham nos seguintes critérios, isoladamente ou combinados:

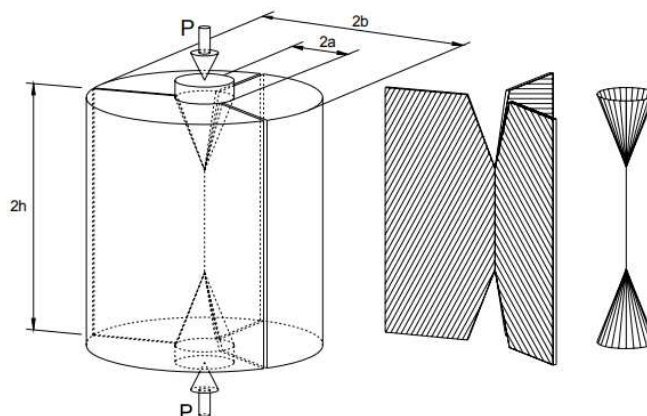
- Simplicidade, devido à dificuldade em se fabricar e transportar os corpos de prova e a necessidade de equipamentos específicos;

- Confiabilidade, pois as fibras estão orientadas e distribuídas de forma aleatória, sendo assim, analisar apenas uma única fissura em um plano bem definido não fornece confiabilidade suficiente;
- Reprodutibilidade, pois a maioria dos ensaios apresentam um coeficiente de variação interlaboratorial alto ou indefinido.

Afim de contornar estes problemas tem-se o ensaio de duplo puncionamento do concreto que foi idealizado por Chen (1970) como forma indireta de medir a resistência à tração direta do concreto. Sua pesquisa foi desenvolvida na Universidade Politécnica da Catalunha em Barcelona, motivo pelo qual também é denominado ensaio Barcelona (MOLINS et al., 2009). A partir da pesquisa desenvolvida por Chen (1970), Saludes et. al (2007) propôs utilizar deste ensaio para avaliar a tenacidade do CRF e mais tarde o ensaio foi normalizado na Espanha através da AENOR UNE 83515 (2010). No Brasil este ensaio ainda não é normalizado, porém, recentemente foi publicada uma prática recomendada por Carnio e Diniz (2017) para o controle da qualidade do concreto reforçado com fibras que especifica como este ensaio deve ser realizado.

O ensaio de dupla punção é realizado pela compressão de um corpo de prova cilíndrico posicionado entre dois discos de aço (Figura 16). Ao comprimir o corpo de prova surgem duas rupturas em forma de cone diretamente abaixo dos discos e várias rachaduras na direção radial. Os cones se movem um em direção ao outro, produzindo sobre os planos diametrais uma tensão de tração praticamente uniforme (CHEN, 1970).

Figura 16 - Esquema idealizado do modo de ruptura onde se pode observar a formação dos planos radiais e os cones de ruptura



Fonte: Saludes et. al (2007).

A prática recomendada de controle da qualidade do concreto reforçado com fibras estabelece que os corpos de prova para o ensaio devem ter diâmetro igual a 150 mm e altura igual ao diâmetro, sendo que os discos de aço devem possuir dimensões de um quarto do diâmetro do corpo de prova e um quinto da altura do mesmo. A carga deve ser aplicada com uma velocidade de descida controlada e igual a 0,5 mm/min. Durante a execução do ensaio devem ser medidos a carga aplicada e a abertura circunferencial do corpo de prova, também denominado *Total Circumferential Opening Displacement* (TCOD), através de um extensômetro de circunferência (CARNIO e DINIZ, 2017).

Através do método de bielas e tirantes, Saludes et. al (2007) deduziram a Equação 3, que representa a resistência a tração do CRF no ensaio Barcelona:

$$f_{t(BCN)} = \frac{4 \times P}{9 \times \pi \times a \times H} \quad (3)$$

Onde:

$f_{t(BCN)}$ = Resistência à tração pelo ensaio Barcelona (MPa);

P = Carga máxima aplicada (N);

a = Diâmetro do disco de aço (mm);

H = Altura do corpo de prova (mm).

Através de uma equação semelhante (Equação 4) devem ser obtidas as resistências residuais para valores de TCO_{D_x}:

$$f_{t,TCOD_x} = \frac{4 \times P_{TCOD_x}}{9 \times \pi \times a \times H} \quad (4)$$

Onde:

$f_{t,TCOD_x}$ = Resistência residual referente a um TCO_{D_x} (MPa);

P_{TCOD_x} = Carga referente a um TCO_{D_x} (N);

a = Diâmetro do disco de aço (mm);

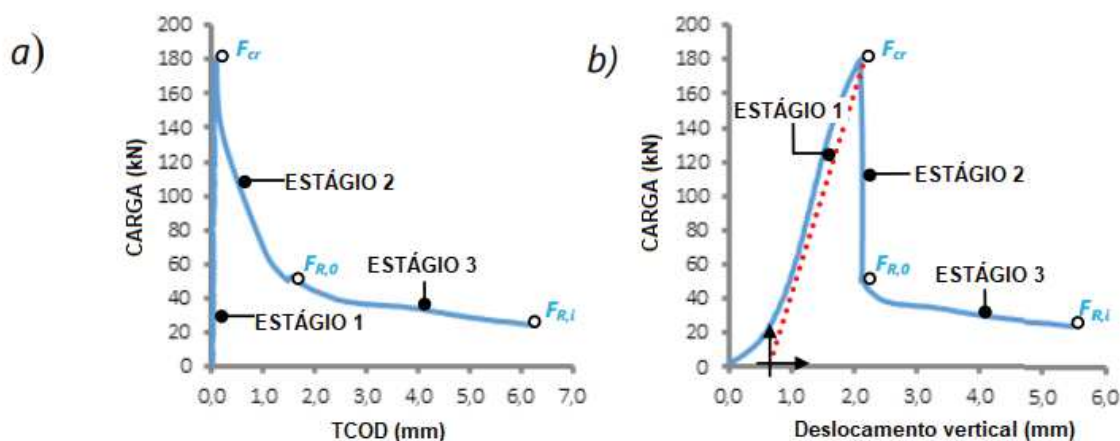
H = Altura do corpo de prova (mm).

Um dos empecilhos deste ensaio, porém, é o extensômetro de circunferência que, por ser um material caro, afeta a simplicidade do ensaio. Para contornar esta situação, Pujadas et al. (2013) propuseram o ensaio Barcelona simplificado, estabelecendo uma correlação entre os valores de deslocamento vertical da máquina com os valores de TCOD.

Segundo Pujadas et al. (2013) os corpos de prova apresentam três estágios no ensaio Barcelona (Figura 17):

- No primeiro estágio a carga aplicada é resistida pela matriz de concreto que não apresenta grandes rachaduras;
- Ao atingir a resistência à tração do material o corpo de prova entra-se segundo estágio, com grandes rachaduras radiais e cunhas cônicas se formando abruptamente;
- Por fim, as rachaduras se estabilizam e dá-se início ao terceiro estágio, onde o concreto passa a apresentar resistências residuais devido às ancoragens das fibras.

Figura 17 - Representação de a) curva de carga-TCOD, b) curva de carga-deslocamento vertical (δ)



Fonte: Adaptado de Pujadas et al. (2007).

Para cada um destes estágios foram estabelecidas as Equações 5 a 7 com o objetivo de se converter os deslocamentos verticais (δ) em TCOD:

$$TCOD = 0 \qquad \delta \leq \delta_{cr} \qquad (5)$$

$$TCOD = n \times \frac{a \times \delta_{R,0}}{2 \times l} \times \text{sen} \frac{\pi}{n} \times \left(1 - \frac{F}{F_{cr}}\right) \quad \delta_{cr} < \delta < \delta_{R,0} \quad (6)$$

$$TCOD = n \times \frac{a}{2 \times l} \times \text{sen} \frac{\pi}{n} \times \left[\delta - \delta_{cr} + \delta_{R,0} \times \left(1 - \frac{F_{R,0}}{F_{cr}}\right) \right] \quad \delta \geq \delta_{R,0} \quad (7)$$

Onde:

n = Número de fissuras radiais formadas no ensaio;

a = Diâmetro dos discos de aço;

l = Comprimento da cunha formada;

F = Carga no ponto calculado;

F_{cr}, δ_{cr} = Carga e deslocamento vertical no ponto de carga máxima;

$F_{R,0}, \delta_{R,0}$ = Carga e deslocamento vertical no ponto de início da resistência residual.

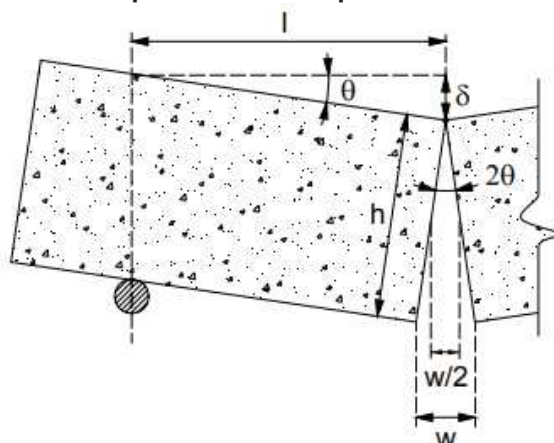
Sendo assim, a menor dimensão dos corpos de prova e a necessidade de utilizar equipamentos que são de fácil acesso na maioria dos laboratórios torna o ensaio Barcelona um método mais simples de avaliação do CRF em comparação com os ensaios de flexão de prismas.

O fato do corpo de prova se romper em mais de uma fissura radial beneficia a confiabilidade dos ensaios de flexão e, por fim, pesquisas recentes realizadas por Nogueira et al. (2017) comprovaram a reprodutibilidade interna do ensaio de duplo puncionamento para o controle do concreto reforçado com fibras, além de estabelecer o tamanho mínimo da amostra para realização do ensaio igual a 6 corpos de prova.

2.5 RELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS BARCELONA E DE FLEXÃO DO CRF

Saludes et al. (2007) propuseram uma relação entre o ensaio de duplo puncionamento e o ensaio de flexão de prismas com quatro pontos da norma belga NBN B 15-238 (1992), que é similar ao ensaio da norma japonesa JSCE-SF4. No modelo idealizado de fissura proposto tem-se a configuração da Figura 18:

Figura 18 - Detalhe do modo de ruptura assumido para o ensaio NBN B 15-238



Fonte: Saludes et al. (2007).

Onde δ representa o deslocamento do corpo de prova prismático, w (ou w_{CMOD}) a abertura da fissura medida no ensaio, h representa a altura do corpo de prova prismático, l o comprimento médio entre apoios e θ o ângulo de giro da amostra em relação à horizontal. A abertura de fissura média (w_{NBN}) é $w/2$ e o valor do ângulo θ , assumindo que ($\text{sen}\theta = \tan\theta = \theta$), será (Equação 8) (SALUDES et al., 2007):

$$\theta = \frac{\delta}{l} = \frac{\frac{w}{2}}{h} = \frac{w_{NBN}}{h} \quad (8)$$

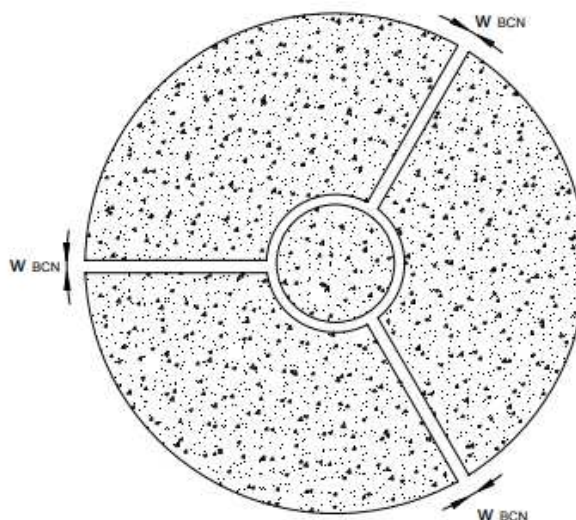
Então, a Equação 9 representa a relação entre o deslocamento vertical e a abertura de fissura média:

$$w_{NBN} = \frac{w}{2} = \frac{2}{3} \times \delta \quad (9)$$

Já para o ensaio Barcelona, Saludes et al. (2007) assumiram a hipótese da formação de três fissuras radiais (Figura 19). Assume-se também que as fissuras apresentam faces paralelas entre si e com mesma abertura. Com isso, tem-se a Equação 10:

$$TCOD = 3 \times w_{BCN} \quad (10)$$

Figura 19 - Modo de ruptura simplificado assumido para o ensaio Barcelona.



Fonte: Saludes et al. (2007).

Finalmente, Saludes et al. (2007) estabeleceram a relação entre a abertura de fissura média do ensaio de flexão (w_{NBN}) e a do ensaio Barcelona (w_{BCN}) pela Equação 11:

$$w_{BCN} = \frac{TCOD}{3} = w_{NBN} = \frac{h}{l} \times \delta \quad (11)$$

Como as dimensões h e l do corpo de prova prismático são iguais a 15 cm e 22,5 cm, respectivamente, a relação entre o deslocamento vertical do ensaio de flexão e a abertura total de fissura do ensaio Barcelona será na proporção 2:1.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O processo de caracterização dos materiais foi realizado no laboratório de materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *campus* Toledo e os ensaios com os corpos de prova de concreto foram realizados no laboratório de materiais da Universidade Paranaense (UNIPAR), *campus* Toledo.

3.1 MATERIAIS

O cimento utilizado para produção do concreto foi do tipo CP V-ARI.

O agregado miúdo utilizado foi a areia natural extraída do Rio Paraná e teve sua caracterização feita a partir dos ensaios de determinação da composição granulométrica – NBR NM 248 (ABNT, 2003) e determinação da massa específica – NBR NM 52 (ABNT, 2003).

Foram utilizados agregados graúdos de dimensão máxima característica (DMC) igual a 9,5 mm e 19 mm, de origem basáltica, caracterizados conforme ensaios de granulometria – NBR NM 248 (ABNT, 2003) e determinação da massa específica – NBR NM 53 (ABNT, 2009).

Por fim, foram utilizadas fibras de aço coladas em pente, oriundas de arame trefilado a frio, da marca Belgo Bekaert (Tabela 3), modelo DRAMIX, tipo RC 80/60 BN e em conformidade com a NBR NM 15530 (ABNT, 2007), segundo o fabricante (Figura 20).

Tabela 3 - Características da fibra de aço utilizada

Fibra	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Resistência à tração (N/mm ²)	Fator de forma
RC 80/60 BN	60	0,75	1100	80

Fonte: Belgo Bekaert (2018).

Figura 20 - Fibras de aço RC 80/60 BN



Fonte: Autor (2018).

3.2 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

O traço utilizado foi de 1: 2,20: 2,70: 0,57 (cimento: areia: brita: água/cimento), sendo produzidos 120 Litros de concreto, 40 L para cada teor de fibras. O concreto de referência, sem fibras, foi denominado de (R0) e os concretos com adição de 0,5% (40 kg/m^3) e 1,0% (80 kg/m^3) de teor de fibra de aço foram denominados de R1 e R2, respectivamente. Este traço de concreto é o mesmo utilizado por Costa (2017) e apresentou uma resistência à compressão média de 40 MPa. A Tabela 4 apresenta a quantidade de materiais utilizados em cada betonada:

Tabela 4 - Quantidade de materiais (kg) para produção de 40 litros de concreto

Material	R0	R1	R2
Cimento	14,88	14,88	14,88
Brita 0	26,52	26,52	26,52
Brita 1	13,66	13,66	13,66
Água	8,48	8,48	8,48
Areia	32,75	32,75	32,75
Fibra de aço	0,00	1,60	3,20

Fonte: Autor (2018).

A produção dos concretos foi realizada em betoneira com volume de cuba de 220 litros, sendo que, de forma a garantir a homogeneidade da mistura, foram adicionados parte da água e o agregado graúdo inicialmente, o cimento em sequência e por fim o agregado miúdo e o restante de água. As fibras foram adicionadas por

último, lentamente, conforme recomenda Figueiredo (2011), a fim de se prevenir a formação de “ouriços”. Após adquirida a homogeneidade do compósito, foi determinada a consistência pelo abatimento de tronco de cone.

Para os ensaios de resistência do concreto foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm para cada teor de fibra, sendo 6 para a análise da resistência à compressão e 6 para tração. O adensamento foi feito manualmente em 2 camadas, com 12 golpes por camada.

Para o ensaio Barcelona foram fabricados moldes de 150x150mm utilizando-se de tubos de PVC e madeira (Figura 21), moldando-se 7 corpos de prova para cada teor de fibras, totalizando 57 corpos de prova, sendo 36 para ensaios de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral e 21 para o ensaio de duplo puncionamento.

Figura 21 - (a) Molde para o ensaio Barcelona (b) Aplicação de óleo desmoldante



Fonte: Autor (2018).

Após 24 horas os corpos de prova foram desmoldados e colocados submersos em tanque de curar por 28 dias, sendo que os moldes de PVC necessitaram ser serrados para retirada do concreto (Figura 22). Por fim, os corpos de prova tiveram suas superfícies retificadas e suas dimensões aferidas.

Figura 22 - Desmolde dos corpos de prova do ensaio Barcelona



Fonte: Autor (2018).

3.3 ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Para determinar a resistência à compressão axial foram utilizados corpos de prova cilíndricos de 100 de diâmetro e 200 mm de altura, ensaiados de acordo com a norma NBR 5739 (ABNT, 2007).

A resistência à tração por compressão diametral foi determinada seguindo as recomendações da norma NBR 7222 (ABNT, 2011), sendo o valor da resistência calculado através da Equação 12:

$$f_t = \frac{2 \times F}{\pi \times d \times L} \quad (12)$$

Onde:

f_t = Resistência à tração por compressão diametral (MPa)

F = Carga de ruptura (N)

d = Diâmetro do corpo de prova (mm)

L = Comprimento do corpo de prova (mm)

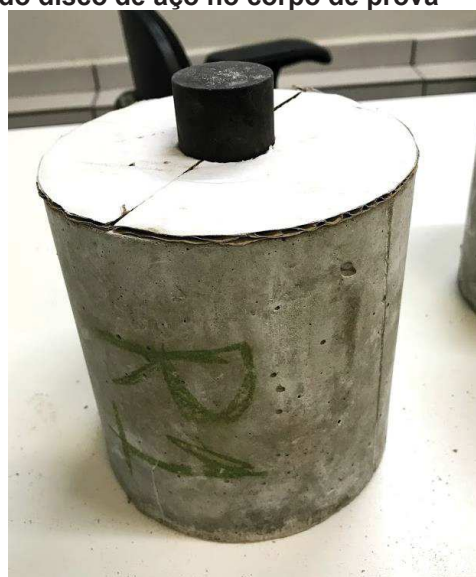
O ensaio de duplo puncionamento, apresentado no item 2.4, foi realizado conforme a prática recomendada de Carnio e Diniz (2017) com os corpos de prova de 150 x 150 mm posicionados entre os discos de aço com o auxílio de um papelão com as dimensões do corpo de prova e um furo de 3,7 cm de diâmetro no centro (Figuras 23 e 24), prensados com velocidade de descida igual 0,5 mm/min. Medidos a carga e o deslocamento da prensa, posteriormente será possível converter o deslocamento em TCOB de acordo com o que foi proposto por Pujadas et al. (2013).

Figura 23 - Disco de aço utilizado no ensaio Barcelona



Fonte: Autor (2018).

Figura 24 - Posicionamento do disco de aço no corpo de prova



Fonte: Autor (2018).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Os agregados tiveram sua caracterização feita por ensaios de distribuição granulométrica, massa específica e massa específica unitária, de acordo com as normas NBR NM 248 (ABNT, 2003), NBR NM 52 (ABNT, 2009), NBR NM 53 (ABNT, 2009) e NBR NM 45 (ABNT, 2006). Os resultados da caracterização dos agregados estão apresentados na Tabela 5 e as curvas granulométricas para areia, brita 0 e brita 1 estão apresentadas no apêndice A.

Tabela 5 - Caracterização dos agregados

Material	DMC (mm)	MF	Massa Específica (g/cm ³)	Massa Unitária (g/cm ³)
Areia	-	1,85	2,65	1,53
Brita 0	9,5	-	2,84	1,58
Brita 1	19	-	2,86	1,65

Fonte: Autor (2018).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS

Os concretos produzidos foram analisados, inicialmente, em termos de trabalhabilidade a partir do ensaio de abatimento de tronco de cone.

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais foram avaliados utilizando teste de hipótese de análise de variâncias (ANOVA), com nível de significância $\alpha = 5\%$, a fim de analisar o efeito da adição de fibras nas resistências do concreto.

O teste ANOVA se baseia na hipótese nula de que a média de duas ou mais amostras são iguais, sendo assim, as médias de resistências dos ensaios de compressão e tração para diferentes teores de fibras serão submetidas ao teste. Caso a hipótese nula seja verdadeira tem-se que a adição de fibras ao concreto não provocou um aumento ou redução na respectiva resistência. Caso o teste retorne que a hipótese nula é falsa, tem-se que uma ou mais médias são diferentes entre si. Nesta condição serão realizados teste de Tukey para definir qual teor de fibras apresentou maior diferença na resistência.

4.2.1 Trabalhabilidade

O concreto sem adição de fibras (R0) apresentou uma boa trabalhabilidade, com um abatimento de 140mm (Figura 25), sendo observada a redução do abatimento para 120mm e 70mm quando adicionados 0,5% e 1,0% de fibras, respectivamente. De acordo com Figueiredo (2011), a adição de fibras ao concreto, mesmo que em pequenas quantidades provoca alta perda de trabalhabilidade, pois além de aumentar a demanda de água de molhagem, as fibras acabam provocando restrições à movimentação dos agregados.

Figura 25 - Resultados do *slump test*: (a) Sem fibras; (b) 0,5% de fibras; (c) 1,0% de fibras.



Fonte: Autor (2018).

Além disso, a redução da trabalhabilidade resultou em uma maior dificuldade no adensamento dos corpos de prova, sendo necessário descartar 2 corpos de prova da dosagem R2 devido à ocorrência de nichos de concretagem (Figura 26).

Figura 26 - Nichos de concretagem em corpo de prova R2



Fonte: Autor (2018).

4.2.2 Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão estão apresentados nas Tabelas 6 a 8, onde f_c , $f_{c,m}$, s e CV representam, respectivamente, a resistência à compressão de cada corpo de prova, resistência à compressão média, desvio padrão e coeficiente de variação de cada composição.

De posse destes resultados, foram aplicados teste de Chauvenet de forma a descartar possíveis valores de resistência discrepantes.

Tabela 6 - Resistência à compressão axial dos corpos de prova R0

R0 (0,0% fibras)							
Exemplar	Força Máxima (kN)	Resistência à compressão				Chauvenet	
		f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	s	CV	T	T (máx)
1	366,15	46,62				1,229	
2	407,55	51,89				0,497	
3	422,70	53,82				1,129	
4	393,50	50,10	50,37	3,05	6,06	0,089	1,732
5	368,45	46,91				1,133	
6	415,40	52,89				0,824	

Fonte: Autor (2018).

Tabela 7 - Resistência à compressão axial dos corpos de prova R1

R1 (0,5% fibras)							
Exemplar	Força Máxima (kN)	Resistência à compressão				Chauvenet	
		f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	s	CV	T	T (máx)
1	378,65	48,21				0,697	
2	386,15	49,17				1,207	
3	345,25	43,96				1,576	
4	358,20	45,61	46,91	1,87	3,99	0,695	1,732
5	369,55	47,05				0,078	
6	372,65	47,45				0,289	

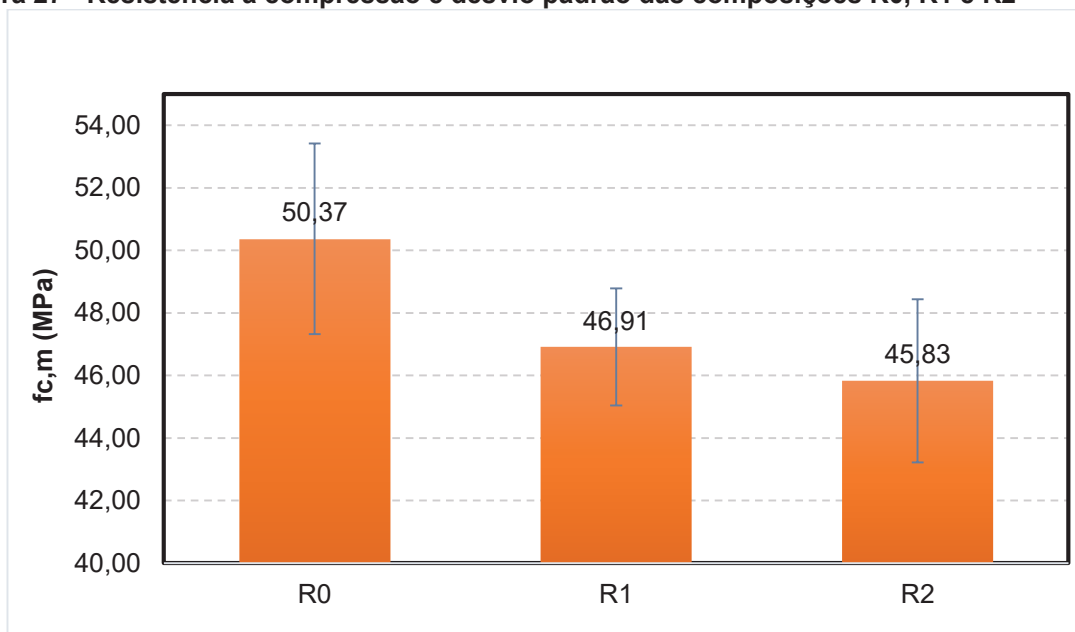
Fonte: Autor (2018).

Tabela 8 - Resistência à compressão axial dos corpos de prova R2

R2 (1,0% fibras)							
Exemplar	Força Máxima (kN)	Resistência à compressão				Chauvenet	
		f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	s	CV	T	T (máx)
1	381,60	48,59				1,058	
2	339,90	43,28				0,978	
3	336,20	42,81	45,83	2,61	5,69	1,159	1,732
4	371,00	47,24				0,541	
5	370,95	47,23				0,538	

Fonte: Autor (2018).

Figura 27 - Resistência à compressão e desvio padrão das composições R0, R1 e R2



Fonte: Autor (2018).

Conforme o critério de Chauvenet, como para todos os casos o valor de T calculado foi menor que o valor T(máx), não foi necessário descartar nenhum dos dados obtidos para resistência à compressão.

Observa-se que houve uma perda na resistência à compressão média com o incremento de fibras na composição do concreto, semelhante ao observado anteriormente por Figueiredo (2000) e Costa (2017).

De forma a verificar a significância desta redução na resistência à compressão do concreto causado pelas fibras foram realizados testes de Análise de Variância (ANOVA) com nível de significância de $\alpha = 5\%$ (Tabela 9):

Tabela 9 - Teste de Análise de Variância (ANOVA) da resistência à compressão do concreto com diferentes teores de fibras

	<i>G.L.</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrado Médio</i>	<i>Estat. F</i>	<i>P.valor</i>
Fator	2	63,937	31,968	4,899	0,0244
Resíduos	14	91,358	6,526		

Fonte: Autor (2018).

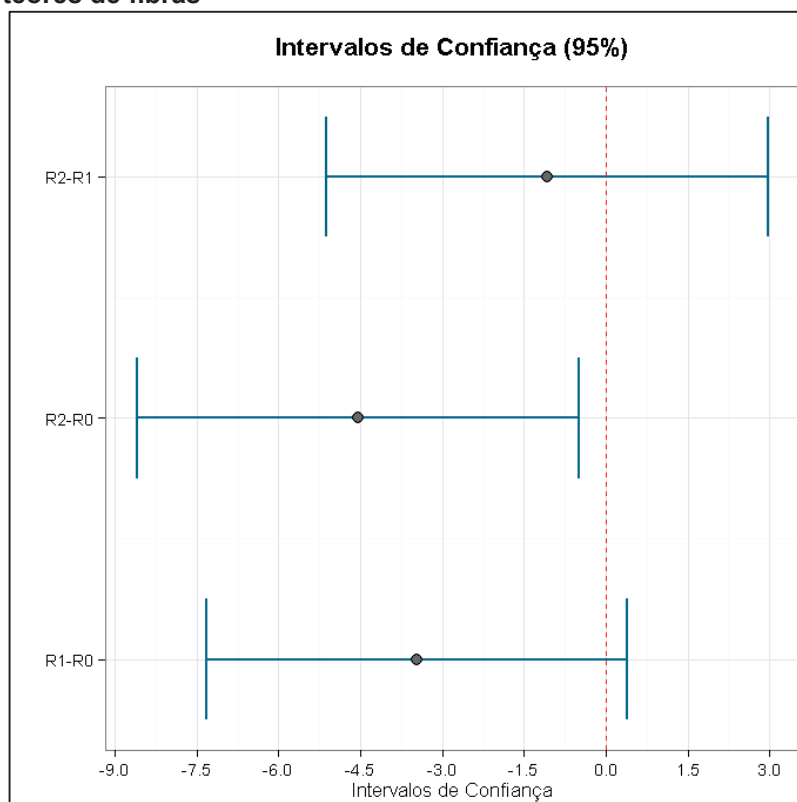
Como o valor-P obtido (~2,44%) é menor que o nível de significância (5%), conclui-se que hipótese nula de que a média de duas ou mais amostras são iguais é falsa, ou seja, ao menos uma das composições do concreto apresentou diferença significativa na resistência à compressão. De forma a avaliar qual composição apresentou esta maior diferença foram realizados testes de Tukey com o auxílio do software *Action* (Tabela 10). Este software analisa as três composições par a par, retornando os pares que apresentaram intervalos de confiança com diferenças significativas (Figura 28).

Tabela 10 - Teste de Tukey para diferentes teores de fibras

<i>Níveis</i>	<i>Comparações Múltiplas</i>			<i>P-valor</i>
	<i>Centro</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>	
R1-R0	-3,4653	-7,3254	0,3948	0,0814
R2-R0	-4,5448	-8,5933	-0,4963	0,0274
R2-R1	-1,0795	-5,1280	2,9690	0,7686

Fonte: Autor (2018).

Figura 28 - Resultados do teste de Tukey para resistência à compressão do concreto reforçado com diferentes teores de fibras



Fonte: Autor (2018).

Sendo assim, pelo teste de Tukey realizado confere-se que a hipótese de médias iguais foi rejeitada apenas entre as composições R0 e R2, ou seja, pode-se dizer que o incremento de 0,5% de fibras na composição do concreto não foi suficiente para provocar alterações na sua resistência à compressão, porém, com 1,0% de fibras já houve uma redução significativa neste valor.

Segundo Figueiredo (2000), isto pode ser explicado pelo fato das fibras reduzirem a trabalhabilidade, ocasionando em problemas na compactação do concreto.

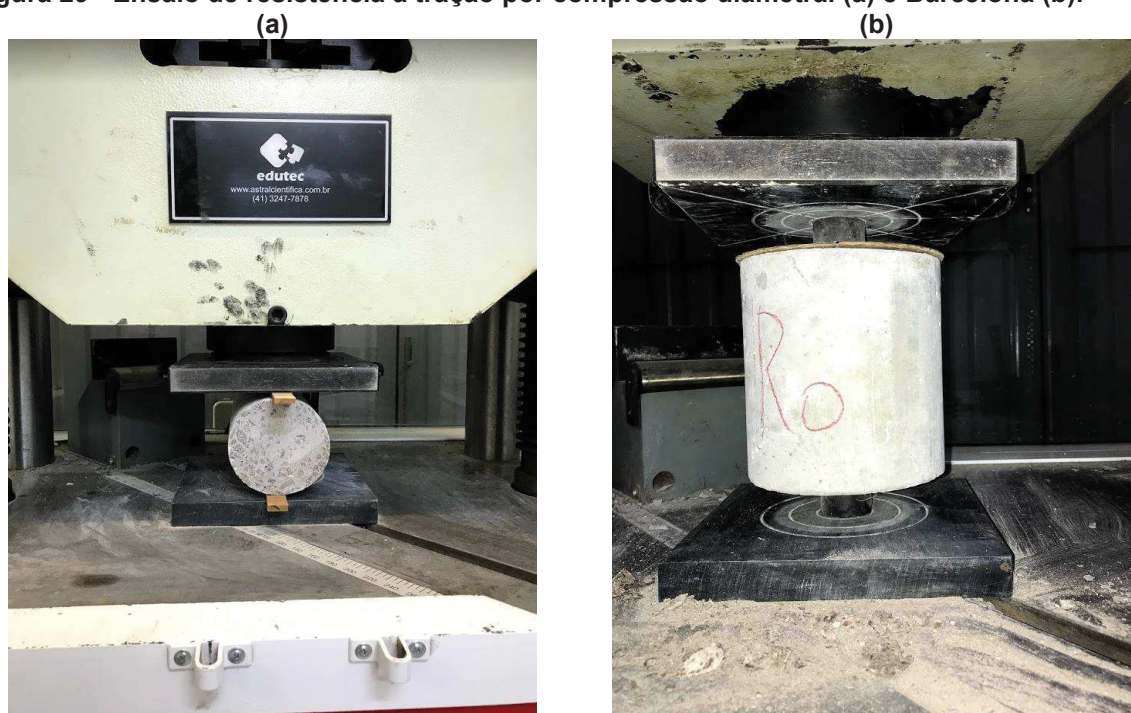
Além disso, conforme observado por Garcez (2005), fibras de maior fator de forma e maior comprimento causam perdas na resistência à compressão, pois elas prejudicam a homogeneidade das misturas, principalmente com corpos de prova de seções de pequena dimensão. Sendo assim, a perda de trabalhabilidade e a incorporação de ar causadas pela adição das fibras, associadas ao fato de que a dimensão dos corpos de prova (10 cm de diâmetro) pode ter favorecido o alinhamento das fibras na direção da altura do mesmo, afetaram os resultados de resistência à compressão encontrados.

A mesma situação pode ser observada por Lee et al. (2015), que realizaram ensaios de compressão em concretos com fibras de fatores de forma variados, sendo que as composições com fibras de menor fator de forma ($l_f/d_f = 45$) apresentaram leves incrementos na resistência à compressão do concreto, enquanto que as composições com o mesmo fator de forma utilizado no presente trabalho ($l_f/d_f = 80$) reduziram esta resistência em 8,2% com 0,5% de fibras e em 12,4% com 1,0% de fibras.

4.2.3 Resistência à tração

A resistência à tração do concreto foi calculada a partir dos ensaios de compressão diametral e duplo puncionamento (Figura 29), utilizando-se das Equações 3 e 12.

Figura 29 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral (a) e Barcelona (b).



Fonte: Autor (2018).

Os resultados destes ensaios estão apresentados nas Tabelas 11 a 13, onde f_t , $f_{t,m}$, s e CV representam, respectivamente, a resistência à tração de cada corpo de prova, resistência à tração média, desvio padrão e coeficiente de variação de cada

composição. Novamente foram aplicados teste de Chauvenet de forma a descartar possíveis valores de resistência discrepantes, representados na cor vermelha:

Tabela 11 - Aplicação do critério de Chauvenet para os corpos de prova R0

R0 (0,0% fibras)							
Resistência à tração (Ensaio de compressão diametral)						Chauvenet	
Exemplar	Força Máxima (kN)	f_t (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	s	CV	T	T (máx)
1	149,95	4,71				0,289	
2	154,70	4,86				0,493	
3	130,75	4,11				0,535	1,732
4	167,85	5,27	4,50	0,73	16,27	1,058	
5	153,60	4,83				0,446	
6	102,40	3,22				1,752	
Resistência à tração (Ensaio Barcelona)							
Exemplar	Força Máxima (kN)	f_t (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	s	CV	T	T (máx)
1	164,55	3,93				0,137	
2	180,45	4,31				1,198	
3	161,85	3,87				0,043	
4	171,10	4,09	3,88	0,36	9,22	0,574	1,803
5	170,35	4,07				0,524	
6	155,60	3,72				0,460	
7	133,55	3,19				1,931	

Fonte: Autor (2018).

Tabela 12 - Aplicação do critério de Chauvenet para os corpos de prova R1

R1 (0,5% fibras)							
Resistência à tração (Ensaio de compressão diametral)						Chauvenet	
Exemplar	Força Máxima (kN)	f_t (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	s	CV	T	T (máx)
1	179,60	5,64				0,137	
2	170,05	5,34				0,631	
3	155,15	4,87				1,402	1,732
4	180,85	5,68	5,73	0,61	10,61	0,073	
5	208,15	6,54				1,339	
6	199,75	6,28				0,905	
Resistência à tração (Ensaio Barcelona)							
Exemplar	Força Máxima (kN)	f_t (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	s	CV	T	T (máx)
1	154,00	4,15				0,349	
2	165,00	4,45	4,20	0,14	3,22	1,843	1,803
3	152,35	4,11				0,677	

(continua)

R1 (0,5% fibras)							
Resistência à tração (Ensaio Barcelona)						Chauvenet	
Exemplar	Força Máxima (kN)	f_t (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	s	CV	T	T (máx)
4	154,95	4,18				0,159	
5	159,30	4,29				0,707	
6	155,00	4,18	4,20	0,14	3,22	0,149	1,803
7	149,65	4,03				1,215	

Fonte: Autor (2018).

Tabela 13 - Aplicação do critério de Chauvenet para os corpos de prova R2

R2 (1,0% fibras)							
Resistência à tração (Ensaio de compressão diametral)						Chauvenet	
Exemplar	Força Máxima (kN)	f_t (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	s	CV	T	T (máx)
1	212,80	6,69				1,629	
2	175,65	5,52				0,427	
3	168,40	5,29	5,76	0,57	9,86	0,828	1,732
4	171,80	5,40				0,640	
5	188,15	5,91				0,265	
Resistência à tração (Ensaio Barcelona)						Chauvenet	
Exemplar	Força Máxima (kN)	f_t (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	s	CV	T	T (máx)
1	156,05	4,21				0,064	
2	161,30	4,35				0,556	
3	140,90	3,80				1,853	
4	162,35	4,37	4,22	0,23	5,41	0,680	1,803
5	162,60	4,38				0,709	
6	148,05	3,99				1,009	
7	149,2	4,02				0,873	

Fonte: Autor (2018).

Com a aplicação do critério de Chauvenet, verificou-se a existência de 4 exemplares com valores de resistência discrepantes. Com o descarte destes exemplares, os valores de resistência à tração foram novamente calculados (Tabelas 14 a 16):

Tabela 14 - Resistência à tração dos corpos de prova R0

R0 (0,0% fibras)					
Resistência à tração (Ensaio de compressão diametral)					
Exemplar	Força Máxima (kN)	f_t (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	s	CV

(continua)

R0 (0,0% fibras)					
Resistência à tração (Ensaio de compressão diametral)					
Exemplar	Força Máxima (kN)	f_t (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	s	CV
1	149,95	4,71			
2	154,70	4,86			
3	130,75	4,11	4,76	0,42	8,83
4	167,85	5,27			
5	153,60	4,83			
Resistência à tração (Ensaio Barcelona)					
Exemplar	Força Máxima (kN)	f_t (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	s	CV
1	164,55	3,93			
2	180,45	4,31			
3	161,85	3,87			
4	171,10	4,09	4,00	0,21	5,15
5	170,35	4,07			
6	155,60	3,72			

Fonte: Autor (2018).

Tabela 15 - Resistência à tração dos corpos de prova R1

R1 (0,5% fibras)					
Resistência à tração (Ensaio de compressão diametral)					
Exemplar	Força Máxima (kN)	f_t (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	s	CV
1	179,60	5,64			
2	170,05	5,34			
3	155,15	4,87			
4	180,85	5,68	5,73	0,61	10,61
5	208,15	6,54			
6	199,75	6,28			
Resistência à tração (Ensaio Barcelona)					
Exemplar	Força Máxima (kN)	f_t (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	s	CV
1	154,00	4,15			
2	152,35	4,11			
3	154,95	4,18			
4	159,30	4,29	4,16	0,09	2,08
5	155,00	4,18			
6	149,65	4,03			

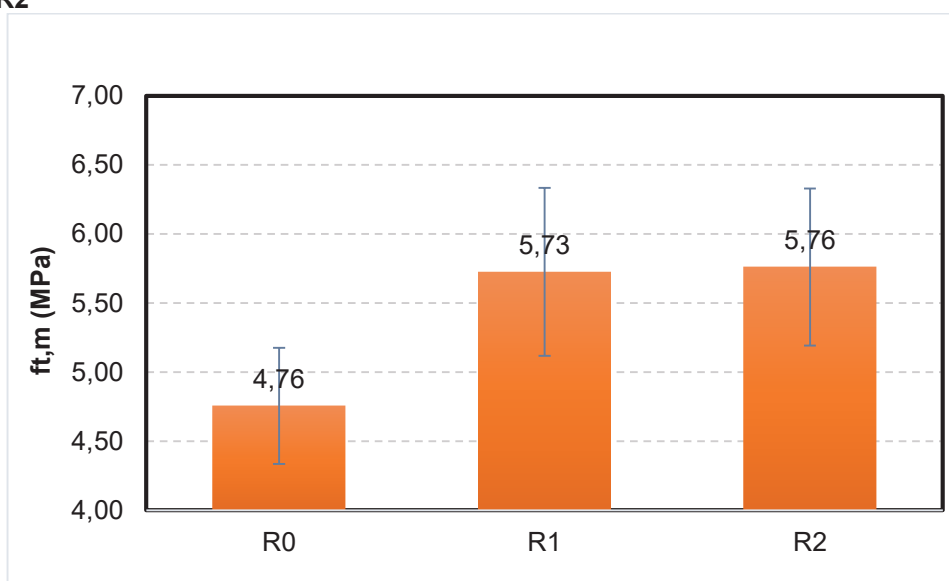
Fonte: Autor (2018).

Tabela 16 - Resistência à tração dos corpos de prova R2

R2 (1,0% fibras)					
Resistência à tração (Ensaio de compressão diametral)					
Exemplar	Força Máxima (kN)	f_t (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	s	CV
1	212,80	6,69			
2	175,65	5,52			
3	168,40	5,29	5,76	0,57	9,86
4	171,80	5,40			
5	188,15	5,91			
Resistência à tração (Ensaio Barcelona)					
Exemplar	Força Máxima (kN)	f_t (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	s	CV
1	156,05	4,21			
2	161,30	4,35			
3	162,35	4,37			
4	162,60	4,38	4,22	0,18	4,23
5	148,05	3,99			
6	149,20	4,02			

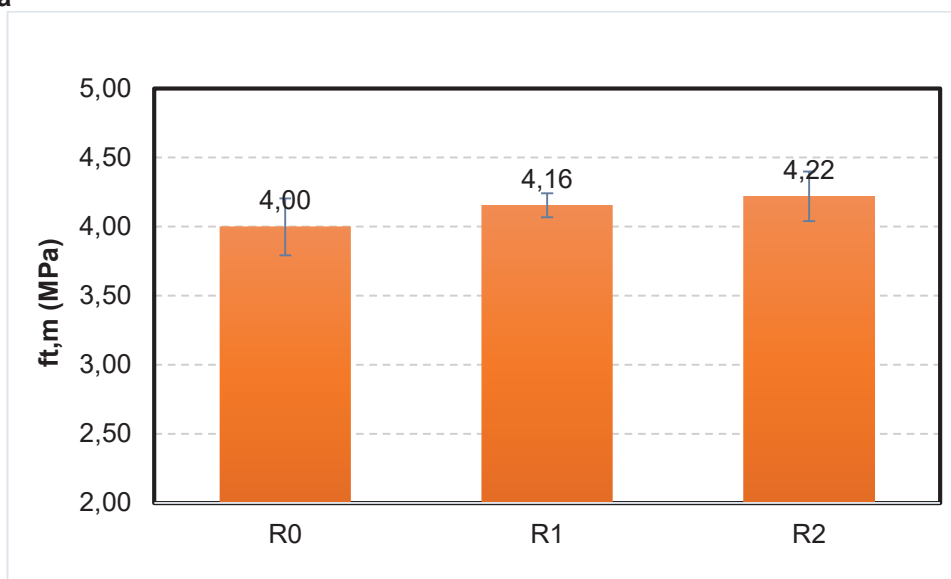
Fonte: Autor (2018).

Figura 30 - Resistência à tração por compressão diametral e desvio padrão das composições R0, R1 e R2



Fonte: Autor (2018).

Figura 31 - Resistência à tração e desvio padrão das composições R0, R1 e R2 no ensaio Barcelona



Fonte: Autor (2018).

O primeiro ponto a ser observado é que em ambos os ensaios houve um incremento na resistência à tração do concreto com a adição de fibras de aço, conforme já observado por diversos autores, como Vasconcelos (2012), Onuki e Gasparetto (2013) e Costa (2017).

Percebe-se que para todas as composições (R0, R1 e R2) os resultados de resistência à tração apresentaram menores coeficientes de variação (*CV*) e desvio padrão (*s*) para o ensaio Barcelona em relação ao ensaio de tração por compressão diametral, indicando uma maior precisão e consistência do ensaio Barcelona na determinação da resistência à tração do concreto.

Observa-se também que há uma superestimação dos valores de resistência à tração calculados para o ensaio de compressão diametral quando comparados ao ensaio Barcelona. Conforme Colgrove e Chen (1972), isto pode ser explicado pelo fato de que no ensaio de tração por compressão diametral o plano de ruptura já está predeterminado, ou seja, ele romperá em um plano vertical, seja esta a área mais resistente do corpo de prova ou não. Em contrapartida, no ensaio Barcelona o plano de ruptura não está predeterminado, sendo assim, o corpo de prova tende a falhar nos planos de menor resistência (Figura 32), o que explica os menores valores de resistência à tração obtidos.

Figura 32 - Modo de ruptura do corpo de prova no ensaio Barcelona



Fonte: Autor (2018).

De acordo com o CEB-FIB Model Code (1993), a resistência à tração direta pode ser calculada a partir da resistência à tração por compressão diametral através da Equação 13:

$$f_t = 0,9f_{t,sp} \quad (13)$$

Onde:

f_t = Resistência à tração direta (MPa);

$f_{t,sp}$ = Resistência à tração por compressão diametral (MPa);

Pela Tabela 17, tem-se que o valor de resistência à tração do concreto sem fibras (R0) obtido pelo ensaio Barcelona se aproximou da resistência à tração direta calculada a partir da resistência à tração por compressão diametral pela Equação 13, porém, nas composições com adição de fibras (R1 e R2) estes valores já não foram tão próximos.

Tabela 17 - Relação entre as resistências à tração direta e por ensaio Barcelona (MPa)

Composição	Compressão Diametral	$f_t = 0,9f_{t,sp}$	Barcelona (BCN)	BCN/ f_t
R0	4,76	4,28	4,00	0,934
R1	5,73	5,15	4,16	0,806
R2	5,76	5,18	4,22	0,814

Fonte: Autor (2018).

Goiaz et al. (2018) realizaram ensaios de resistência à tração direta, por compressão diametral e duplo puncionamento (Tabela 18) em concretos reforçados com fibras de aço, sendo que os valores de resistência à tração por compressão diametral superestimaram em 40% a resistência à tração direta, atingindo valores até 78% maiores com teores de fibras mais elevados, enquanto no ensaio Barcelona esta superestimação não ultrapassou 11%.

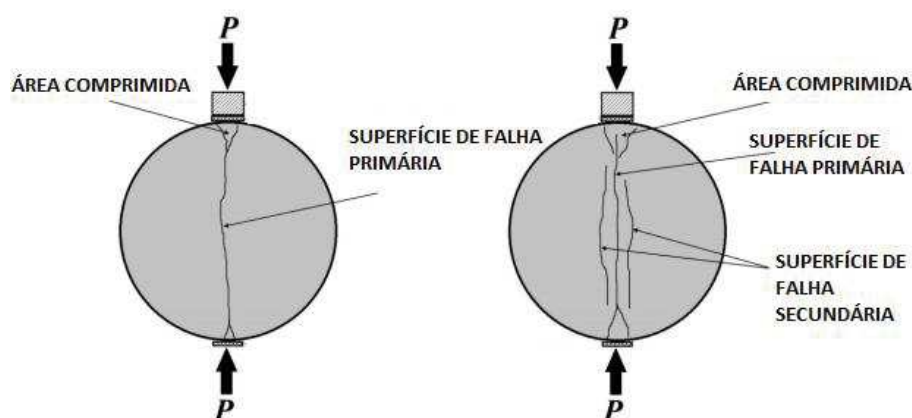
Tabela 18 - Resistência à tração por ensaio de compressão diametral, Barcelona e tração direta

Composição	Compressão Diametral (CD)		Barcelona (BCN)		Tração Direta (TD)		CD/TD	BCN/TD
	f_t	$f_{t,m}$	f_t	$f_{t,m}$	f_t	$f_{t,m}$		
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)		
RPC1	5,82		4,86		4,19			
	5,89	6,26	4,98	4,94	4,40	4,46	1,40	1,11
	7,07		4,98		4,79			
RPC2	9,52		6,19		5,52			
	9,08	9,10	6,38	6,29	5,84	5,78	1,57	1,09
	8,70		6,31		5,98			
RPC3	11,93		7,97		7,58			
	14,55	12,94	9,10	8,21	7,91	7,78	1,66	1,06
	12,34		7,56		7,85			
RPC4	17,30		10,32		9,70			
	15,56	17,42	9,51	10,23	9,96	9,81	1,78	1,04
	19,40		10,86		9,77			

Fonte: Adaptado de Goiaz et al. (2018).

De acordo com tais autores isto acontece, pois, a tração por compressão diametral é calculada levando-se em consideração que o corpo de prova irá se partir em duas metades através de uma superfície de falha primária. Porém, introduzindo-se fibras de aço na composição, a tensão de tração horizontal distribui-se ao longo de uma falha na superfície primária e mais de uma na superfície secundária, criando uma zona de falha vertical em vez de uma falha na superfície (Figura 33), resultando em um valor de resistência à tração maior do que o real.

Figura 33 - Padrão de ruptura do ensaio de compressão diametral: (a) sem fibras (b) com fibras



Fonte: Adaptado de Goaz et al (2018).

Do mesmo modo que na resistência à compressão, foram realizados teste de Análise de Variância (ANOVA) e Tukey para determinar a influência das fibras de aço na resistência à tração do concreto por compressão diametral (Tabela 19).

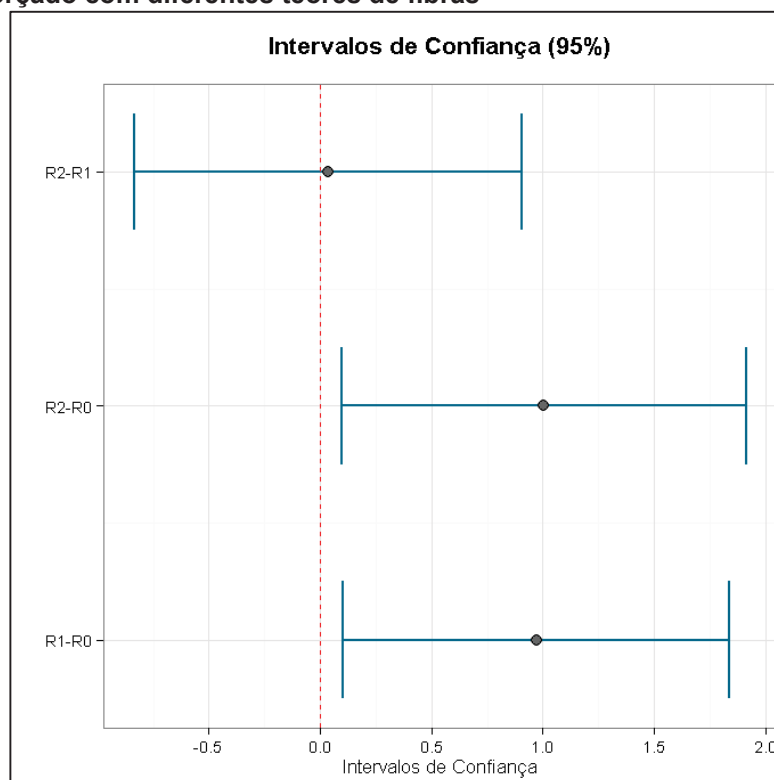
Tabela 19 - Teste de Análise de Variância (ANOVA) para a resistência à tração por compressão diametral do concreto com diferentes teores de fibras

	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P.valor
Fator	2	3,346	1,673	5,664	0,0170
Resíduos	13	3,840	0,295		

Fonte: Autor (2018).

Como o teste ANOVA retornou um valor-P (1,70%) menor que o coeficiente de significância (5,0%), tem-se que a hipótese nula de que a média de duas ou mais amostras são iguais é falsa, ou seja, pelo menos uma das composições do concreto apresentou diferença significativa na resistência à tração por compressão diametral. Com isso, foram realizados teste de Tukey para determinar quais composições apresentaram diferenças significativas nesta resistência (Figura 34).

Figura 34 – Resultados do teste de Tukey para a resistência à tração por compressão diametral do concreto reforçado com diferentes teores de fibras



Fonte: Autor (2018).

Pela Figura 34 é possível perceber que os teores de 0,5% e 1,0% de fibras, quando comparados ao concreto convencional, foram suficientes para provocar alterações significativas na resistência à tração por compressão diametral do concreto, porém, entre as composições R1-R2 não houve diferenças consideráveis nesta resistência, assim pode se dizer que a adição de fibras, mesmo que em pequena fração (0,5%), provocou um incremento na resistência à tração por compressão diametral, porém um aumento no teor de fibras de 0,5 para 1,0% já não interferiu consideravelmente nesta resistência.

Entretanto, no teste ANOVA realizado para a resistência à tração calculada no ensaio Barcelona (Tabela 20) o valor-P retornado (8,89%) foi maior que o coeficiente de significância (5,0%), confirmando a hipótese nula de que a média de duas ou mais amostras são iguais, ou seja, a adição de 0,5% e 1,0% de fibras de aço não foi suficiente para provocar mudanças significativas na resistência à tração obtida pelo ensaio.

Tabela 20 - Teste de Análise de Variância (ANOVA) para a resistência à tração por ensaio Barcelona do concreto com diferentes teores de fibras

	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P.valor
Fator	2	0,155	0,078	2,856	0,0889
Resíduos	15	0,408	0,027		

Fonte: Autor (2018).

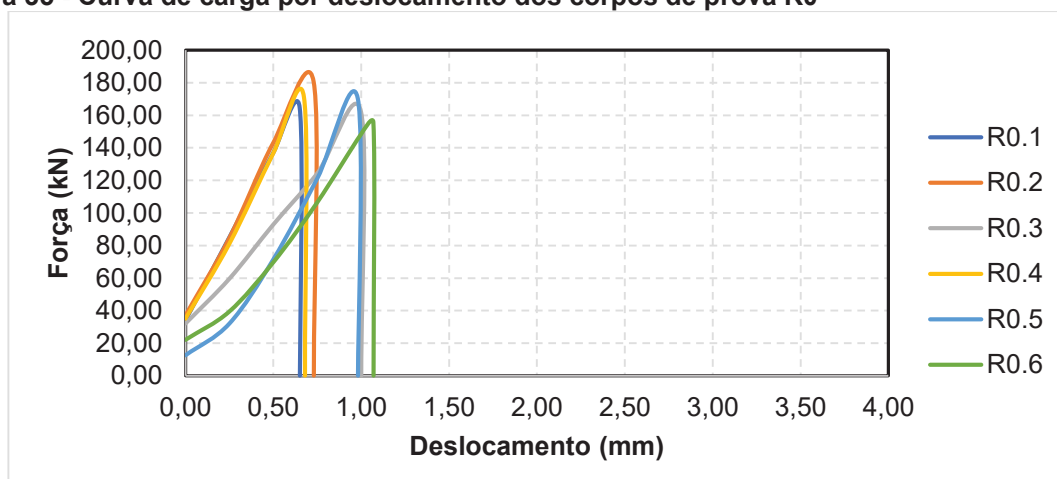
Dessa forma, de acordo com os resultados dos testes estatísticos e o que foi exposto por Goiz et al. (2018), pode se dizer que, em se tratando de concreto reforçado com fibras, o ensaio Barcelona mostra-se mais preciso e com valores de resistência à tração mais próximos aos reais que o ensaio de compressão diametral.

4.2.4 Tenacidade

Segundo Bentur e Mindess (2007), a tenacidade é a principal propriedade influenciada pela adição de fibras ao concreto.

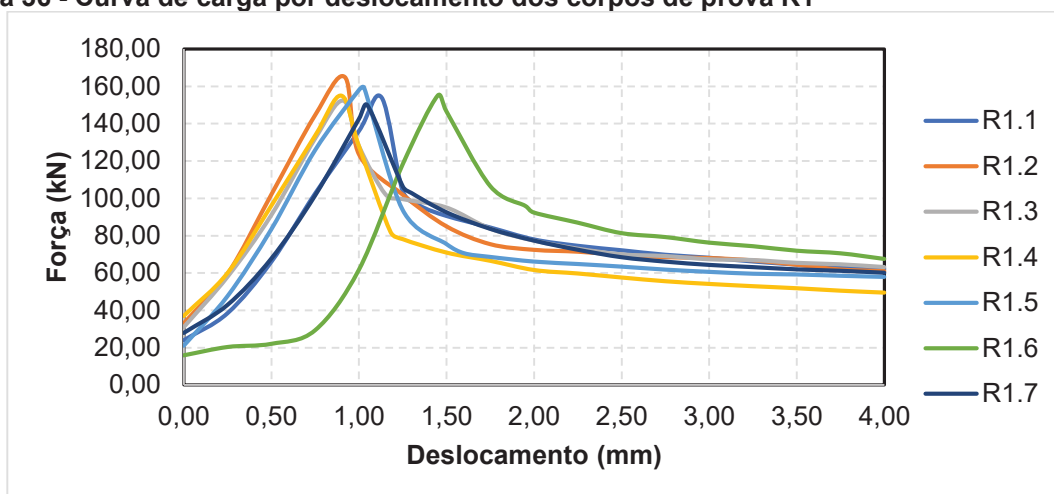
No ensaio Barcelona, a tenacidade pode ser obtida pelo cálculo da área abaixo da curva de carga por abertura de circunferência (TCOD). Porém, com a ideia inicial de se manter a máxima simplicidade possível na execução do ensaio, não foi utilizado o extensômetro de circunferência, sendo os valores de TCOD obtidos a partir da conversão dos valores de deslocamento da prensa pelas Equações 5 a 7, conforme proposto por Pujadas et al. (2013). Destaca-se o fato de que não foi possível elaborar a curva de um dos corpos de prova R2 (R2.1) devido a um erro durante a execução do ensaio. As curvas de carga por deslocamento obtidas no ensaio Barcelona estão apresentadas nas Figuras 35 a 37:

Figura 35 - Curva de carga por deslocamento dos corpos de prova R0



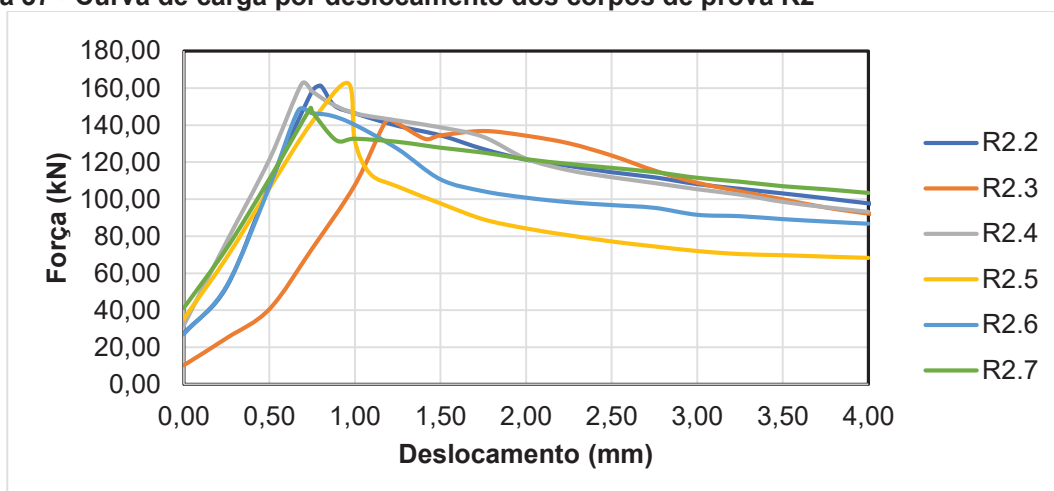
Fonte: Autor (2018).

Figura 36 - Curva de carga por deslocamento dos corpos de prova R1



Fonte: Autor (2018).

Figura 37 - Curva de carga por deslocamento dos corpos de prova R2



Fonte: Autor (2018).

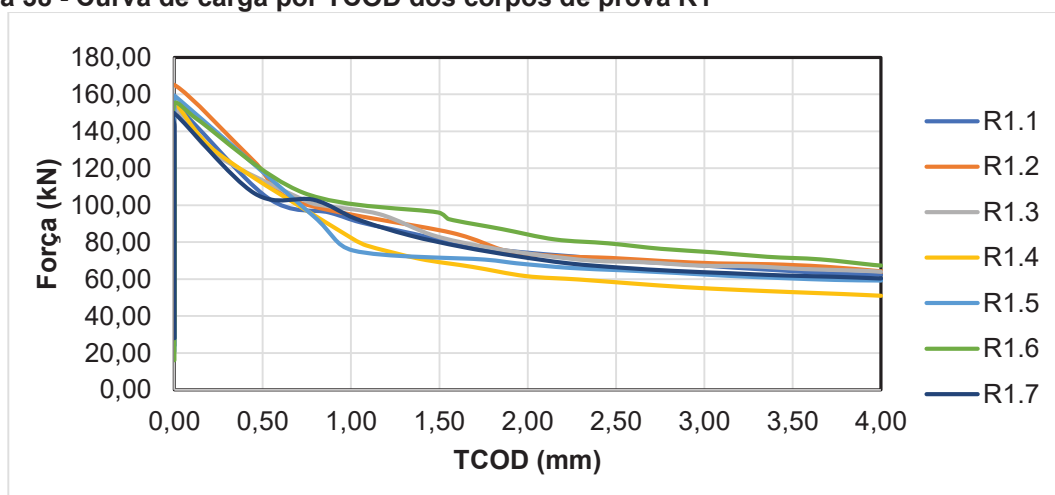
Nota-se que apesar de possuírem cargas de pico semelhantes, algumas curvas apresentaram-se mais deslocadas para à direita do que outras. Segundo Toaldo et al. (2013) isto ocorre devido a uma acomodação inicial dos discos de punção no corpo de prova, o que não interfere no cálculo da tenacidade pelo fato deste ser feito a partir da carga de pico.

Outro ponto a ser observado é o comportamento pós-ruptura adquirido pelo concreto com a adição de fibras à sua composição, que continuou a apresentar resistências residuais mesmo após a carga de pico, ou seja, um comportamento pseudo-dúctil. Esta situação pôde ser observada durante a execução do ensaio, onde os corpos de prova sem fibras rompiam abruptamente ao atingirem a carga máxima,

enquanto os que possuíam fibras controlavam a redução da carga, além de não romperem abruptamente após a carga de pico.

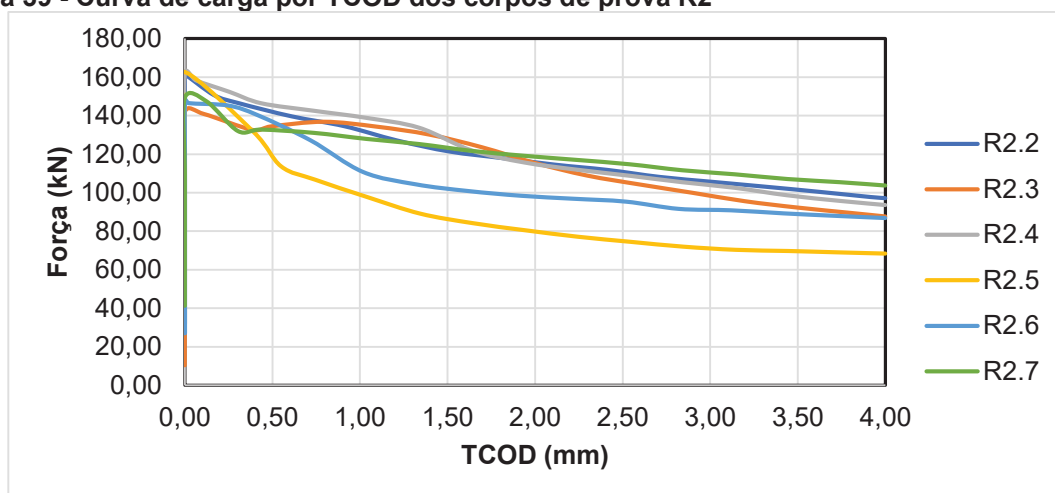
De acordo com a norma JSCE-SF4 (1984), o cálculo da tenacidade deve ser feito até um deslocamento de 2 mm, portanto, levando-se em consideração que a relação entre o TCOD do ensaio Barcelona e o deslocamento vertical do ensaio de flexão é de 2:1, conforme proposto por Saludes et al. (2007), o cálculo da tenacidade pelo ensaio Barcelona foi feito até um TCOD de 4 mm. Como os corpos de prova sem fibras não apresentam comportamento pós-ruptura, as curvas de carga por TCOD foram elaboradas apenas para as composições R1 e R2, sendo apresentadas nas Figuras 38 e 39:

Figura 38 - Curva de carga por TCOD dos corpos de prova R1



Fonte: Autor (2018).

Figura 39 - Curva de carga por TCOD dos corpos de prova R2



Fonte: Autor (2018).

Os valores de tenacidade calculados a partir da área abaixo das curvas de carga por TCOOD estão apresentados nas Tabelas 21 e 22, onde T_b , $T_{b,m}$, s e CV representam, respectivamente, a tenacidade de cada corpo de prova, tenacidade média, desvio padrão e coeficiente de variação de cada composição.

Tabela 21 - Tenacidade dos corpos de prova R1

Exemplar	T_b (kN.mm)	$T_{b,m}$ (kN.mm)	s	CV (%)
1	331,33			
2	346,35			
3	337,09			
4	295,31	331,02	23,12	6,99
5	315,59			
6	367,98			
7	323,51			

Fonte: Autor (2018).

Tabela 22 - Tenacidade dos corpos de prova R2

Exemplar	T_b (kN.mm)	$T_{b,m}$ (kN.mm)	s	CV (%)
1	478,03			
2	462,30			
3	482,26			
4	356,97	446,71	49,59	11,10
5	420,93			
6	479,75			

Fonte: Autor (2018).

Verifica-se nas Tabelas 20 e 21 que o coeficiente de variação da tenacidade obtido no ensaio Barcelona é consideravelmente menor que aqueles obtidos por ensaios de flexão de prismas, que, segundo Morgan et al. (1995), ultrapassam 20% frequentemente.

Esta situação também foi observada por outros autores, como Monte et al. (2014), que obtiveram para um teor de 0,5% de fibras de aço um coeficiente de variação da tenacidade de 16% no ensaio JSCE-SF4, enquanto que no ensaio Barcelona este coeficiente caiu para os mesmos 7% observados na Tabela 20.

Fugii (2008) realizou ensaios de flexão de prismas em concretos reforçados com 5 teores diferentes de fibras de aço, obtendo coeficientes de variação da tenacidade de 12 até 45% (Tabela 2).

Figueiredo (2000) obteve coeficientes de variação de 16 a 21% em concretos com teores de 0,5% de fibras de aço, ensaiados de acordo com a norma JSCE-SF4.

Constata-se novamente, então, uma maior precisão na determinação da tenacidade no ensaio Barcelona que nos ensaios de flexão de prismas. Foi realizado teste de análise de variância de forma avaliar a significância da adição das fibras de aço na tenacidade do concreto (Tabela 23):

Tabela 23 - Teste de Análise de Variância (ANOVA) da tenacidade das composições R1 e R2

	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P.valor
Fator	1	43237,108	43237,108	30,674	0,0001757
Resíduos	11	15505,121	1409,556		

Fonte: Autor (2018).

Como o valor-P (0,017%) foi menor que o coeficiente de significância (5,0%), conclui-se que a hipótese nula de que a tenacidade média das composições R1 e R2 são iguais é falsa. Sendo assim, verifica-se que as fibras se mostraram muito efetivas em termos de melhorias na tenacidade do concreto, provocando um incremento de 26% nesta, com a adição de 0,5% de fibras.

Além da tenacidade, a norma JSCE-SF4 recomenda que seja feito o cálculo das resistências residuais para os estados limites de serviço (ELS) e último (ELU) nos deslocamentos de 0,5 e 2 mm, respectivamente. Sendo assim, mantendo-se a relação de 2:1 entre os ensaios JSCE-SF4 e Barcelona apresentada no item 2.5, foram calculadas as resistências residuais para os deslocamentos de 1 e 4 mm pela Equação 4 (Tabelas 24 e 25).

Tabela 24 - Resistências residuais dos corpos de prova R1

Exemplar	F (kN)	TCOD (mm)	$f_{t,TCOD_{1,0}}$	$f_{t,m}$	s	CV (%)
1	92,26		2,35			
2	95,99		2,45			
3	97,53		2,49			
4	82,31	1,000	2,10	2,04	0,23	11,42
5	76,44		1,95			
6	102,86		2,62			
7	93,79		2,39			

Exemplar	F (kN)	TCOD (mm)	$f_{t,TCOD_{4,0}}$	$f_{t,m}$	s	CV (%)
1	62,32		1,59			
2	64,18		1,64			
3	64,00		1,63			
4	50,94	4,000	1,30	1,56	0,13	8,57
5	59,25		1,51			
6	67,28		1,71			
7	60,31		1,54			

Fonte: Autor (2018).

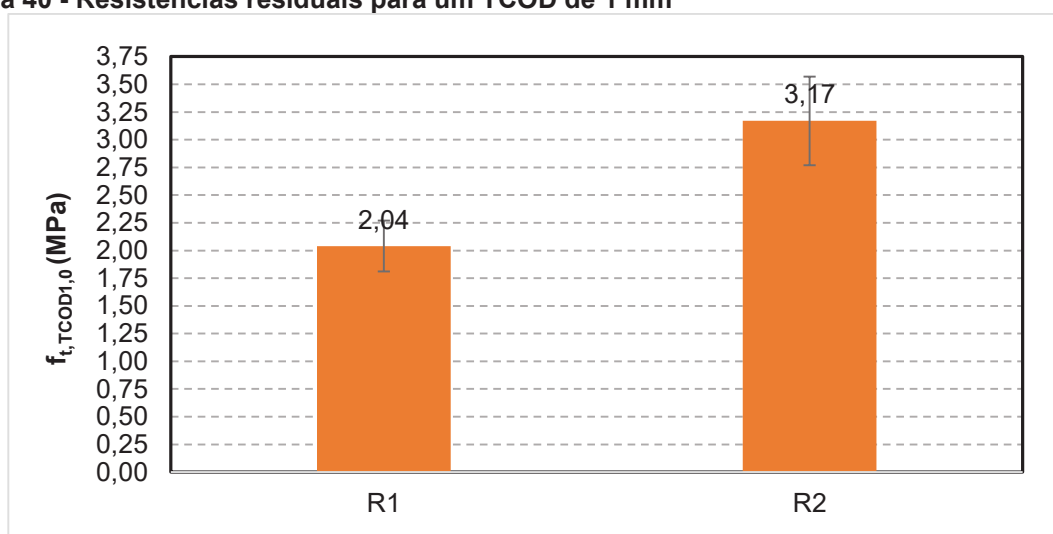
Tabela 25 - Resistências residuais dos corpos de prova R2

Exemplar	F (kN)	TCOD (mm)	$f_{t,TCOD1,0}$	$f_{t,m}$	s	CV (%)
2	132,31		3,37			
3	135,16		3,45			
4	139,25	1,000	3,55	3,17	0,40	12,57
5	99,01		2,52			
6	111,68		2,85			
7	128,24		3,27			
Exemplar	F (kN)	TCOD (mm)	$f_{t,TCOD4,0}$	$f_{t,m}$	s	CV (%)
2	97,15		2,48			
3	87,68		2,23			
4	93,54	4,000	2,38	2,28	0,31	13,51
5	68,40		1,74			
6	86,83		2,21			
7	103,67		2,64			

Fonte: Autor (2018).

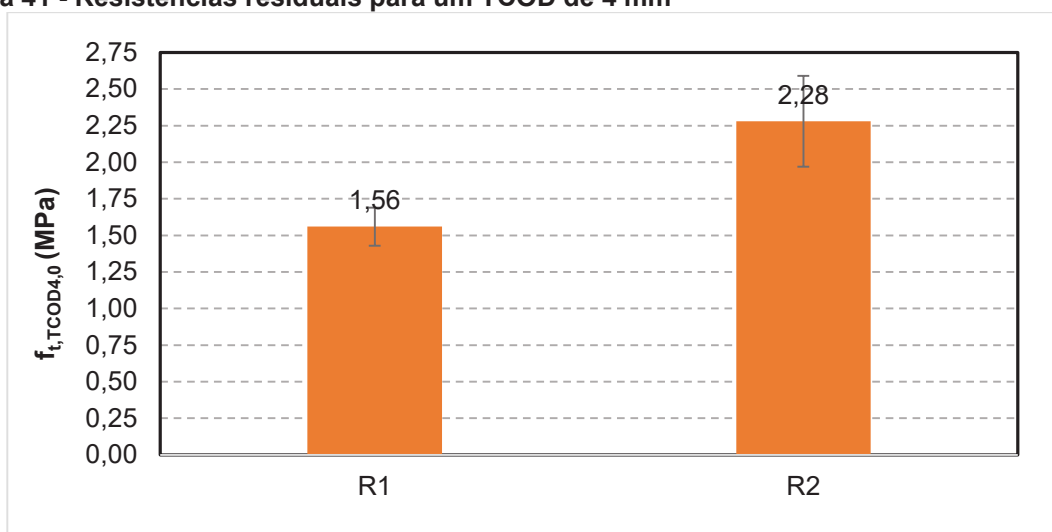
Os valores de resistência residual obtidos para o TCOD de 4 mm (Figura 40) foram menores que aqueles para o TCOD de 1 mm (Figura 41) nas duas composições, caracterizando um comportamento de *slip-softening* do concreto, representado por um amortecimento da curva. De acordo com Bentur e Mindess (2007), este comportamento é típico de concretos reforçados com fibras de aço, devido à alta rigidez da fibra em relação a matriz de concreto, fazendo com que o deslizamento da fibra cause a abrasão da matriz, resultando em um declínio na resistência residual com o aumento do deslocamento.

Figura 40 - Resistências residuais para um TCOD de 1 mm



Fonte: Autor (2018).

Figura 41 - Resistências residuais para um TCO_D de 4 mm



Fonte: Autor (2018).

Tem-se, novamente, baixas variações nos resultados de resistências residuais obtidas pelo ensaio Barcelona que, mesmo no pior caso (13,51%), ainda são inferiores às variações comumente encontradas nos ensaios de flexão de prismas. A tabela 26 apresenta uma comparação feita entre a dispersão dos resultados de resistência residual obtidos pelo ensaio Barcelona deste trabalho, com ensaios de flexão de prismas realizados por outros autores, comprovando essa menor variação do ensaio de duplo punção.

Tabela 26 – Comparação entre a média dos coeficientes de variação obtidos em diferentes ensaios com concreto reforçado com fibras de aço

	0,5% de fibras de aço				1,0% de fibras de aço	
	Autor (2018)	Monte et al. (2014)	Soetens e Matthys (2014)		Autor (2018)	Olimb (2012)
Ensaio	Barcelona	JSCE-SF4	EN-14651	NBN B 15-238	Barcelona	EN-14651
CV (%)	10,00	22,50	19,50	18,00	13,04	19,43

Fonte: Autor (2018).

Deste modo, a partir da análise dos resultados verificam-se vantagens no ensaio Barcelona nos critérios citados no item 2.4, em que, segundo Woods (2012), os atuais métodos de controle do CRF falham:

- Simplicidade, pois utilizam corpos de prova cilíndricos e equipamentos de fácil acesso na maioria dos laboratórios de controle tecnológico do concreto, reduzindo custos e facilitando o transporte dos corpos de prova.

- Confiabilidade, pois o corpo de prova rompe, geralmente, em três fissuras radiais e que não são predeterminadas, evitando uma possível análise equivocada de um plano onde as fibras podem não estar homogeneamente distribuídas, como pode ocorrer em ensaios de flexão.
- Reprodutibilidade, pois a dispersão dos resultados obtidos neste ensaio é muito menor que as obtidas em ensaios de flexão de prismas.

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa foi possível determinar a viabilidade de utilização do ensaio Barcelona como um método alternativo para o controle tecnológico do concreto reforçado com fibras, bem como a influência que estas fibras têm nas principais propriedades do concreto, concluindo-se que:

- As fibras de aço, mesmo que em pequenos volumes, afetam muito a trabalhabilidade do concreto, provocando uma redução no abatimento de tronco de cone de 20 mm com 0,5% de fibras e de 70mm com 1,0%.
- Foi observada uma redução na resistência à compressão do concreto com o incremento das fibras de aço. Esta redução, segundo Figueiredo (2000), está associada à perda de trabalhabilidade, que afeta a compactação do concreto e provoca o surgimento de vazios, e ao elevado fator de forma das fibras utilizadas ($l_f/d_f = 80$) que, de acordo com Garcez (2005), afetam a homogeneidade e favorecem o alinhamento das fibras na direção da altura do corpo de prova. Lee et al. (2015) obtiveram uma redução semelhante nesta resistência com o uso de fibras de aço com este mesmo fator de forma.
- A resistência à tração sofreu um incremento com a adição de fibras de aço tanto no ensaio de tração por compressão diametral, como no ensaio Barcelona, porém, este incremento foi muito mais expressivo no primeiro ensaio do que no segundo. Pelos testes de ANOVA foi conferida uma diferença significativa na resistência no ensaio de tração por compressão diametral, o que não ocorreu para o ensaio Barcelona. De acordo com o que foi exposto por Colgrove e Chen (1972) e Goiaz et al. (2018), o ensaio Barcelona mostrou-se mais efetivo na determinação da resistência à tração do concreto reforçado com fibras de aço que o ensaio de tração por compressão diametral devido a uma superestimação que o último causa na resistência, com a presença das fibras. Além disso, a dispersão dos resultados de resistência à tração foi muito menor no ensaio Barcelona que no ensaio de tração por compressão diametral.
- Em relação à tenacidade fica nítido o benefício que as fibras trazem, sendo observado um incremento de 26% nesta propriedade quando o teor de fibras foi elevado de 0,5% a 1,0%, fato comprovado pelo teste de ANOVA, que apresentou

um valor-P (0,017%) muito menor que o coeficiente de significância (5,0%), confirmando a hipótese alternativa de que a tenacidade média das composições R1 e R2 são diferentes.

- Foi possível observar um comportamento de *split-softening* pós-ruptura do concreto, típico de concretos reforçados com fibras de aço, caracterizado pelo surgimento de resistências residuais decrescentes com o aumento do deslocamento. Este comportamento traz benefícios no sentido de reduzir a abertura de fissuras do concreto e impedir o rompimento abrupto do mesmo.

- A dispersão dos resultados de tenacidade e resistência residual, que são as principais propriedades avaliadas no controle tecnológico do CRF, do ensaio Barcelona foi muito menor ($\pm 10\%$) que a dos ensaios de flexão de prismas ($\pm 20\%$), evidenciando uma maior confiabilidade para o ensaio Barcelona.

- Vale ressaltar também que o ensaio Barcelona, por utilizar de corpos de prova cilíndricos, apresenta vantagens em relação aos ensaios de flexão de prismas no sentido de simplificação da metodologia de ensaio, redução de custos e possibilidade de obtenção de corpos de prova extraídos de estruturas já existentes.

Logo, perante aos resultados deste trabalho e tendo em vista que o Brasil ainda não possui uma norma específica para controle do concreto reforçado com fibras, comprova-se o potencial que o ensaio Barcelona possui em ser utilizado como esta norma devido à sua maior simplicidade, confiabilidade e menor custo de execução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.3R-93). In: Manual of concrete Practice. Detroit, Michigan, v. 90. 1993.

_____. State-of-the-art report on fiber reinforced concrete (ACI 544.1R-96). In: Manual of concrete Practice. Detroit, Michigan, v. 93. 1996.

_____. Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.4R-88). In: Manual of concrete Practice. Detroit, Michigan, v. 85. 1988.

ARAÚJO, D. L. **Cisalhamento entre viga e laje pré-moldada ligadas mediante nichos preenchidos com concreto de alto desempenho**. Tese de doutorado – EESC. São Carlos, 2002.

ARIF, MOHAMMED A. **Avaliação da Medida de Tenacidade do Concreto Reforçado com Fibras de Aço**. 2014. 156p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia. Minas Gerais, 2014.

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

_____. **NBR NM 46**: Determinação do teor de material pulverulento. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

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

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

_____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 73

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 15530**: Fibras de aço para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2007.

BALAGURU, P. N.; SHAH, S. P. **Fiber-Reinforced Cement Composites**. McGraw-Hill International Editions. 530p. 1992.

BARROS, A. R. **Avaliação do comportamento de vigas de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço**. 2009. 155p. Dissertação (Pós-graduação) – Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2009.

_____. **Análise de pilares de concreto de alta resistência com adição de fibras metálicas submetidos à compressão centrada**. 1999. 145p. Dissertação (Doutorado) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

BAYASI, M. Z.; SOROUSHIAN, P. **Effect of Steel Fiber Reinforcement on Fresh Mix Properties of Concrete**. ACI Materials Journal, v. 89, p. 369-374. 1992

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Compostos de cimento reforçados com fibras**. Reino Unido, cidade de Barking, editora Elsevier, 2007.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. LTC – Livros Técnicos e Científicos. 5ª. Edição. Rio de Janeiro, 2002.

CARNIO, M. A.; DINIZ, S. M. C. Controle da qualidade do concreto reforçado com fibras. In: 59º Congresso Brasileiro do Concreto, 2017, Bento Gonçalves. **Anais...** IBRACON/ABECE. São Paulo, 2017.

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

CHEN, W. F. **Double punch test for tensile strength of concrete**. ACI Materials Journal, p. 993-995. 1970.

COLGROVE, T. A.; CHEN, W. F. **Further studies of double-punch test for tensile strength of concrete**. Fritz engineering laboratory library, Pensilvânia. 1972.

COSTA, João D. M. **Avaliação da resistência ao cisalhamento direto em peças de concreto reforçadas com fibras de aço**. 2017. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2017.

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

FIGUEIREDO, A. D. A nova especificação brasileira das fibras de aço para concreto. In: 50º Congresso Brasileiro do Concreto, Salvador, 2008. **Anais...** Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. São Paulo, 2008.

_____. **Concreto com fibras de aço**. Boletim Técnico BT/PCC/260. 69p. Departamento de Engenharia e Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). São Paulo. 2000.

_____. **Concreto com fibras**. Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, v. 2, capítulo 39, p. 1195-1225, 2005.

_____. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. 248p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil II. São Paulo, 2011.

_____. Os desafios para o uso do concreto reforçado com fibras como material estrutural. In: 56º Congresso Brasileiro do Concreto, Natal, 2014. **Anais...** Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. São Paulo, 2014.

FUGII, A. P. **Avaliação de tubos de concreto reforçados com fibras de aço segundo a NBR 8890**. 2008. 166 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Ilha Solteira, 2008.

GARCEZ, E. O. **Análise Teórico-Experimental do Comportamento de Concretos Reforçados com Fibras de Aço Submetidos a Cargas de Impacto**. 2005. 141p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GOAIZ, H. A.; YU, T.; HADI, M. N. S. **Quality Evaluation Tests for Tensile Strength of Reactive Powder Concrete**. Journal of Materials in Civil Engineering, 30p. 2018.

GÓIS, F. A. P. **Avaliação experimental do comportamento de concreto fluido reforçado com fibras de aço: Influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto**. 2010. 156p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2010.

HANAI, J. B. Comportamento resistente, ductilidade e confinamento. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. IBRACON, v. 1. São Paulo: Ippis Gráfica e Editora, 2005. cap. 6.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Method of making specimens for strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete**. JSCE-SF4. Concrete Library of JSCE. Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete. p. 49-55, 1984.

LEE, S.; OH, J.; CHO, J. Compressive Behavior of Fiber-Reinforced Concrete with End-Hooked Steel Fibers. **Materials**, Seul, v. 8, p.1442-1458, 2015.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MOLINS, C.; AGUADO, A.; SALUDES, S. Double Punch Test to control the energy dissipation in tension of FRC (Barcelona test). **Materials and Structures**, v. 42, n. 4, p.415-425, Barcelona, 2009.

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, 2014.

MORGAN, D. R.; MINDESS, S.; CHEN, L. Testing and Specifying Toughness for Fiber Reinforced Concrete and Shotcrete. **In: Second University-Industry Workshop on Fiber Reinforced Concrete and Other Advanced Materials**, Toronto, Canadá, 1995.

NAAMAN, A. E. High Performance Fiber Reinforced Cement Composites. **High-performance Construction Materials**, p.91-153, Hunan, 2008.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

NOGUEIRA, A. B.; SIMÃO, L.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. Avaliação da reprodutibilidade do ensaio Barcelona para controle do concreto reforçado com fibras. **In: 59º Congresso Brasileiro do Concreto**, Bento Gonçalves, 2017. **Anais...** Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. São Paulo, 2017.

NUNES, N. L.; AGOPYAN, V. **A influência do fator de forma da fibra na tenacidade a flexão do concreto reforçado com fibras de aço**. Boletim Técnico nº.225, Departamento de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, S.P., 1998.

OLIMB, A. M. **Testing of Fibre Reinforced Concrete Structures**. 123 f. Tese (Doutorado) – Estruturas de concreto, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2012.

OLIVEIRA, S. L. **Taxa de Armadura Longitudinal Mínima em Vigas de Concreto de Alta Resistência com Fibras de Aço**. 2005. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

ONUKE, M. A. F.; GASPARETTO, P. A. **Comparativo das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido com adição de fibras de aço e de polipropileno**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba – PR, 2013.

PUJADAS, P. et. al. New analytical model to generalize the Barcelona test using axial displacement. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 19, n.2, p.71-259, 2013.

SALUDES, S.; AGUADO A.; MOLINS, C. **Ensayo de doble punzonamiento aplicado al hormigón reforzado com fibras (Ensayo Barcelona)**. 338p. Cátedra BMB Innovación en Tecnología del Hormigón. Barcelona, 2007.

SANTOS, A. Fibras para concreto. **Massa cinzenta**, Curitiba, 2010. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/fibras-para-concreto>>. Acesso em: 06 de abril de 2018.

SARZALEJO, A. G. et. al. **Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto**. Manual Técnico. São Paulo: Maccaferri Industrial Group. 247p. 2008

SOETENS, T; MATTHYS, S. **Different methods to model the post-cracking behaviour of hooked-end steel fibre reinforced concrete**. Construction And Building Materials, Zwijnaarde, v. 73, p.458-471, 2014.

TOALDO, G. S.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. **Avaliação comparativa de métodos de ensaio para a determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras**. In: 55º Congresso Brasileiro do Concreto, Gramado, 2013. **Anais...** Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. São Paulo, 2013.

VASCONCELOS, R. E. **Fatura do concreto reforçado com fibras de aço e de polipropileno em meios normal e agressivo**. 2012. 158p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas. São Paulo. Março 2012.

VELASCO, R. V. **Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas**. 2008. 388p. Tese (Doutorado em Estruturas) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

WOODS, A. P. **Double-Punch Test for Evaluating the Performance of Steel Fiber-Reinforced Concrete**. 2012. 214p. Tese (Mestrado) - Universidade do Texas, Austin, 2012.

APÊNDICE A

