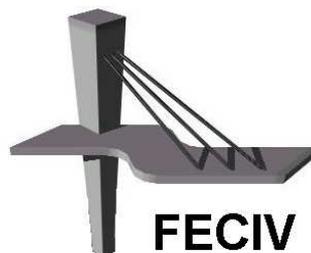


DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO ENSAIO
BARCELONA SIMPLIFICADO PARA A
DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE DO
CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS**

MARINA DA MOTA PEREIRA

UBERLÂNDIA, 31 DE JULHO DE 2017



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Marina da Mota Pereira

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO ENSAIO BARCELONA
SIMPLIFICADO PARA A DETERMINAÇÃO DA
TENACIDADE DO CONCRETO REFORÇADO COM
FIBRAS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos

Uberlândia, 31 de julho de 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

P436a
2017 Pereira, Marina da Mota, 1992-
 Avaliação da eficiência do ensaio Barcelona Simplificado para a
 determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras / Marina
 da Mota Pereira. - 2017.

153 f. : il.

Orientador: Antonio Carlos dos Santos.

Dissertação (mestrado) -- Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2017.16>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Concreto - Estrutura - Teses. 3.
Concreto armado - Teses. 4. Ensaio Bracelona Simplificado - Teses. I.
Santos, Antonio Carlos dos. II. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

ATA Nº: 187/2017

CANDIDATO: Marina da Mota Pereira

Nº. Matrícula: 11422ECV008

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos

TÍTULO: "Estudo interlaboratorial com o ensaio Barcelona simplificado"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Estruturas e Construção Civil

LINHA DE PESQUISA: Estruturas

PROJETO DE PESQUISA: Recuperação e Reforço de Elementos Estruturais

DATA DA DEFESA: 31 de julho de 2017

LOCAL: Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y.

HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO: 14:03

Reuniu-se na **Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y - Campus Santa Mônica** da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGEC, assim composta: Professores Doutores: **Prof. Dr. Antonio de Paulo Peruzzi – FECIV/UFU; Aline da Silva Ramos Barboza – CTEC/UFAL e Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos** orientador da candidata. Ressalta-se que a **Prof.ª Dr.ª Aline da Silva Ramos Barboza** participou da defesa por meio de webconferência desde a cidade de Maceió (AL) e os demais membros da banca e a aluna participaram in loco.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa **Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos** apresentou a Comissão Examinadora e concedeu à discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou a candidata Aprovada. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.

Professor Orientador: **Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos – FECIV/UFU**

Membro externo: **Prof.ª Dr.ª Aline da Silva Ramos Barboza – CTEC/UFAL**

Membro interno: **Prof. Dr. Antonio de Paulo Peruzzi – FECIV/UFU**

Uberlândia, 31 de Julho de 2017.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Antonio Carlos dos Santos por me orientar com sabedoria e competência.

Aos professores Antonio Figueiredo e Renata Monte da Universidade de São Paulo por apoiarem a presente pesquisa e por realizarem os ensaios necessários. Em especial, agradeço a professora Renata Monte pela recepção em São Paulo e por toda ajuda durante a elaboração desse trabalho.

Aos professores da pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia por todo conhecimento oferecido durante o curso.

A Cristiane Pires, técnica do laboratório de estruturas, e todos os funcionários da Faculdade de Engenharia Civil, por toda a ajuda prestada com paciência e atenção.

Aos meus colegas de mestrado por compartilharem os momentos de estudo, as dúvidas e por me auxiliarem na busca de conhecimento.

As empresas Belgo Bekaert Arames e Basf pelo incentivo a essa pesquisa com a doação das fibras de aço e do aditivo superplastificante.

Agradeço a minha família por todo incentivo. Meus pais Donizete e Maria José por terem me dado todo o apoio necessário desde o início, por terem me ajudado na moldagem, na preparação e no transporte das amostras à São Paulo. Esse apoio foi fundamental. A minha irmã Nathália, pelo companheirismo. Ao meu namorado Vinícius, pela paciência e ajuda essencial na realização dos ensaios.

Agradeço a Deus por guiar e iluminar os caminhos da minha vida e por me fortalecer a cada dia.

PEREIRA, M. M. Avaliação da eficiência do ensaio Barcelona simplificado para a determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras. 153 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

RESUMO

A pesquisa e a utilização do concreto reforçado com fibras (CRF) são amplamente difundidas pelo mundo. Entretanto, no Brasil não há prescrições normativas que estabeleçam parâmetros para a utilização do CRF. Dessa forma, o presente trabalho visa avaliar o comportamento mecânico de amostras de concreto reforçadas com fibras de aço (CRFA) por meio do ensaio Barcelona simplificado, uma vez que esse ensaio é mais simples que aqueles frequentemente empregados. Para a realização do ensaio Barcelona simplificado (EBS) foram testados corpos de prova cilíndricos com 15 cm de diâmetro e 15 cm de altura. O programa experimental consistiu em avaliar compósitos com matrizes do concreto com duas resistências características à compressão (20 MPa e 40 MPa) e três dosagens de fibras (40 kg/m³, 50 kg/m³ e 60 kg/m³). Foram moldados 72 corpos de prova cilíndricos para a realização do EBS, sendo que esse ensaio integrou um programa interlaboratorial entre a Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia e a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, a fim de analisar e comparar os resultados encontrados nos dois laboratórios. Todos os corpos de prova foram ensaiados com idade próxima aos 240 dias. Após a análise dos resultados obtidos foi possível concluir que o ensaio Barcelona simplificado apresenta indícios de repetitividade e reprodutibilidade. Obteve-se também que a adição de fibras de aço ao concreto, confere ao mesmo benefícios em relação ao módulo de elasticidade, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e, de modo especial, a tenacidade.

Palavras-chave: Concreto reforçado com fibra - Métodos de ensaio - Ensaio Barcelona simplificado - Programa interlaboratorial - Tenacidade.

PEREIRA, M. M. Evaluation of the efficiency of the simplified Barcelona test for the determination of toughness of fiber reinforced concrete. 153 pp. MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2017.

ABSTRACT

The research and the use of fiber reinforced concrete (FRC) are widely diffused throughout the world. However, in Brazil there are no normative prescriptions that establish parameters for the use of FRC. Thus, the present work aims to evaluate the mechanical behavior of concrete samples reinforced with steel fibers (SFRC) by means of the simplified Barcelona test, since this test is simpler than those frequently used. For the accomplishment of the Barcelona simplified test (BST) cylindrical test specimens with 15 cm of diameter and 15 cm of height were tested. The experimental program consisted in evaluating composites with two compressive strengths (20 MPa and 40 MPa) and three dosages of fibers (40 kg/m³, 50 kg/m³ and 60 kg/m³). 72 cylindrical specimens were molded for BST, and this study integrated an interlaboratory program between the Faculty of Civil Engineering of the Federal University of Uberlândia and the Polytechnic School of the University of São Paulo, in order to analyze and compare the results found in both laboratories. All specimens were assayed at age close to 240 days. After analyzing the obtained results, it was possible to conclude that the simplified Barcelona test shows signs of repeatability and reproducibility. It has also been found that the addition of steel fibers to the concrete gives the same benefits in terms of modulus of elasticity, compressive strength, diametral compression tensile strength and, in particular, toughness.

Keywords: Fiber reinforced concrete - Test methods - Barcelona simplified test - Interlaboratory program - Toughness.

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

SÍMBOLOS

a	- Diâmetro do disco de carga
b	- Largura do corpo de prova
CV	- Coeficiente de variação
d	- Diâmetro da fibra
D	- Diâmetro do corpo de prova
E	- Módulo de elasticidade
E_m	- Módulo de elasticidade médio
f_c	- Resistência à compressão
f_{ck}	- Resistência à compressão característica
f_{cm}	- Resistência à compressão média
$f_{ct,L}^f$	- Limite de proporcionalidade (LOP)
f_{ctm}	- Resistência à tração por compressão diametral média
$f_{ct,sp}$	- Resistência à tração por compressão diametral
$f_{d,L/150}$	- Resistência residual para corpos de prova de altura h , quando o deslocamento vertical do corpo de prova for $L/150$
$f_{d,L/600}$	- Resistência residual para corpos de prova de altura h , quando o deslocamento vertical do corpo de prova for $L/600$
$f_{R,j}$	- Resistência residual à flexão correspondente a abertura de fissura j
f_l	- Resistência de primeiro pico
F_{cr}	- Força máxima atingida
$F_{ct,sp}$	- Resistência à tração por compressão diametral
F_H	- Força horizontal resultante da força aplicada pela máquina de ensaio
F_j	- Força correspondente à abertura de fissura j
F_L	- Força máxima correspondente ao LOP
F_M	- Força aplicada pela máquina de ensaio
$F_{R,0}$	- Força no ponto de início da resistência residual usada no ensaio Barcelona simplificado

F_V	- Força vertical resultante da força aplicada pela máquina de ensaio
h	- Altura do corpo de prova
h_{sp}	- Distância entre o topo do entalhe e a face superior do corpo de prova
l	- Comprimento da fibra
l_c	- Comprimento crítico da fibra
l_{cp}	- Comprimento do corpo de prova
l_{cunha}	- Comprimento da cunha formada
L	- Vão adotado entre apoios para a realização de ensaio
n	- Número de fissuras radiais formadas no ensaio Barcelona
$P_{d,L/150}$	- Força residual para o corpo de prova com altura h , quando o deslocamento vertical do corpo de prova for $L/150$
$P_{d,L/600}$	- Força residual para o corpo de prova com altura h , quando o deslocamento vertical do corpo de prova for $L/600$
P_{pico}	- Força de pico
r	- Raio das fibras
$R_{T,150}^h$	- Coeficiente de resistência à flexão equivalente para um corpo de prova com altura h
s	- Espaçamento médio das fibras
S_d	- Desvio padrão
T_b	- Tenacidade à flexão para o ensaio conforme a norma JSCE-SF4: 1984
T_{150}^h	- Tenacidade à flexão para um corpo de prova de altura h
v_f	- Volume de fibras no compósito
α	- Ângulo da cunha utilizada no ensaio de abertura por encunhamento
δ_{ab}	- Deflexão equivalente a $L/150$
$\delta_{p,cr}$	- Deslocamento vertical no ponto de carga máxima
$\delta_{R,0}$	- Deslocamento vertical no ponto de início da resistência residual
ε_a	- Deformação específica média no corpo de prova sob tensão básica
ε_b	- Deformação específica média no corpo de prova sob tensão maior
φ	- Ângulo de atrito interno do material
σ_b	- Tensão maior ($\sigma_b = 0,3 f_c$) para o cálculo do módulo de elasticidade
σ_f^*	- Limite de resistência à tração das fibras
τ_c	- Tensão de escoamento ao cisalhamento da matriz do compósito

ABREVIATURAS

<i>CRF</i>	- Concreto reforçado com fibras
<i>CRFA</i>	- Concreto reforçado com fibras de aço
<i>DMAE</i>	- Departamento Municipal de Água e Esgoto de Uberlândia
<i>EBS</i>	- Ensaio Barcelona Simplificado
<i>FECIV/UFU</i>	- Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia
<i>FT</i>	- Fator de tenacidade
<i>LVDT</i>	- Transformador diferencial variável linear (Linear variable differential transformers)
<i>MOR</i>	- Módulo de ruptura
<i>Poli/USP</i>	- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
<i>TCOD</i>	- Deslocamento total da abertura circunferencial (Total circumferential opening displacement)

SIGLAS

<i>ABNT</i>	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>ACI</i>	- American Concrete Institute
<i>AENOR</i>	- Asociación Española de Normalización e Certificación
<i>ASTM</i>	- American Society for Testing Materials
<i>EFNARC</i>	- European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures
<i>EN</i>	- European Standard
<i>JSCE</i>	- Japanese Society of Civil Engineers

LISTA DE FIGURAS, QUADROS E TABELAS

FIGURAS

Figura 1 –	Proposta de classificação dos diferentes tipos de compósitos	22
Figura 2 –	Perfis típicos de fibras de aço empregadas para reforço de concreto e detalhe da seção transversal.....	26
Figura 3 –	Curva de carga de carregamento por escorregamento para fibras de aço com diferentes formatos.....	27
Figura 4 –	Esquema da distribuição de tensões para concreto sem reforço de fibras ..	30
Figura 5 –	Esquema da distribuição de tensões para concreto com reforço de fibras..	30
Figura 6 –	Compósitos reforçados com volume de fibras: (A) inferior ao volume crítico, (B) superior ao volume crítico e (C) igual ao volume crítico.....	33
Figura 7 –	Curvas médias de carga por deslocamento para concreto reforçado com diferentes volumes de fibra de aço ($f_{ck} = 20$ MPa)	33
Figura 8 –	Curvas típicas para tensão-deformação para concreto sem adição fibras, com baixo volume de fibras e alto volume de fibras	34
Figura 9 –	Perfil de tensão-deformação de quando o comprimento da fibra é: a) igual ao comprimento crítico b) maior que o comprimento crítico c) menor que o comprimento crítico, para um compósito reforçado com fibras sob tensão de tração igual ao limite de resistência à tração das fibras (σ_f^*).....	35
Figura 10 –	Padrão de deformação na matriz que envolve uma fibra submetida a uma carga de tração	36
Figura 11 –	Curvas médias de carga por deflexão obtidas por meio de ensaio de tração na flexão de concretos ($f_{ck} = 30$ MPa) reforçados com fibras com diferentes comprimentos e mesma seção transversal.....	37
Figura 12 –	Curvas de tensão por deformação para compósitos com diferentes proporções de fibras de aço curtas e longas.....	37
Figura 13 –	a) Comprimento incorreto das fibras, impossibilitando que trabalhem eficientemente; b) Comprimento correto, possibilitando que as fibras	

	trabalhem corretamente.....	38
Figura 14 –	Distribuição das fibras em três e duas dimensões.....	39
Figura 15 –	Modo de ruptura em amostra prismática moldada na direção perpendicular (vertical) ao plano de vibração, do compósito reforçado com 2% de fibras de aço	40
Figura 16 –	Modo de ruptura em amostra prismática moldada na direção paralela (horizontal) ao plano de vibração, do compósito reforçado com 2% de fibras de aço	40
Figura 17 –	Comparação entre os resultados de tenacidade em amostras prismáticas de CRFA	40
Figura 18 –	Diagrama de tensão por deformação elástica me matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto	41
Figura 19 –	Curvas de dosagem conforme o critério JSCE-SF4 para uma mesma fibra de aço em concretos projetados via seca com diferentes valores de resistência à compressão da matriz.....	42
Figura 20 –	Correlação entre os valores de fator de tenacidade e resistência à compressão para CRFA aplicado em pavimentos	43
Figura 21 –	Ensaio de abatimento de tronco de cone para determinação da consistência do concreto	45
Figura 22 –	Ensaio tronco de cone invertido para determinação da consistência do concreto.....	46
Figura 23 –	Equipamento e procedimentos utilizados no ensaio Vebe.....	46
Figura 24 –	Influência do volume de fibras e de agregado graúdo na consistência do CRFA	46
Figura 25 –	Ouriço formado por fibras de aço misturadas de maneira inadequada ao concreto.....	47
Figura 26 –	Influência do teor de fibras no comportamento à compressão do concreto com fibras de aço	50
Figura 27 –	Comportamento do concreto reforçado com fibras de aço sob esforço de compressão.....	51
Figura 28 –	Aumento da resistência à tração por compressão diametral devido a adição de fibras de aço ao concreto	53
Figura 29 –	Representações esquemáticas do comportamento tensão-deformação	

	em tração para materiais frágeis e dúcteis carregados até a fratura.....	53
Figura 30 –	Comportamento mecânico de matrizes de concreto sem e com adição de fibras de aço	55
Figura 31 –	Curva de carga por deslocamento obtida no ensaio prescrito na norma JSCE-SF4: 1984.....	57
Figura 32 –	Posicionamento do corpo de prova, cutelos e LVDT em ensaio de tração na flexão	57
Figura 33 –	Configuração do ensaio normatizado pela JSCE-SF4	58
Figura 34 –	Esquema do ensaio de tenacidade à flexão prescrito pela ASTM C1609 (2012).....	60
Figura 35 –	Esquema de realização do ensaio especificado na EN 14651: 2007	62
Figura 36 –	Esquema de ensaio conforme a EN 14651: 2007 e esforços solicitantes máximos de esforço cortante e momento fletor.....	63
Figura 37 –	Curva carga versus abertura de fissura obtida conforme ensaio prescrito na EN 14651: 2007	63
Figura 38 –	Configuração do ensaio proposto pela EFNARC (1996)	65
Figura 39 –	Curvas de carga por deflexão de concretos projetados reforçados com 30 kg/m ³ e 50 kg/m ³ de fibras de aço obtidas por meio do ensaio de puncionamento em placas	65
Figura 40 –	Curvas de absorção de energia por deflexão de concretos projetados reforçados com 30 kg/m ³ e 50 kg/m ³ de fibras de aço obtidas por meio do ensaio de puncionamento em placas	66
Figura 41 –	Realização do ensaio de punção em placas conforme a EFNARC (1996).....	66
Figura 42 –	Configuração do ensaio de punção em placas quadradas com detalhe do suporte do LVDT	67
Figura 43 –	a) Ensaio Barcelona realizado com o extensometro circunferencial. b) Padrão de configuração típico de fissuração do corpo de prova após o ensaio	68
Figura 44 –	Diferentes estágios de uma amostra no ensaio Barcelona	69
Figura 45 –	Conversão do resultado do ensaio Barcelona simplificado com deslocamento vertical (esquerda) para o TCOD do ensaio Barcelona (direita).....	70

Figura 46 – a) Amostra com cunha cônica formada b) Comprimento da cunha cônica formada.....	71
Figura 47 – Forma geométrica das amostras e configuração do ensaio de abertura por encunhamento.....	72
Figura 48 – Equipamento para ensaio de abertura por encunhamento.....	72
Figura 49 – Configuração do método da cunha para carga uniaxial.....	73
Figura 50 – a) Preparação dos corpos de prova para transporte b) Preenchimento das caixas rígidas de madeira com serragem.....	78
Figura 51 – Entrega das caixas rígidas de madeira contendo os corpos de prova cilíndricos para a realização do ensaio Barcelona simplificado.....	78
Figura 52 – Representação esquemática dos cruzamentos realizados entre cada nível de cada fator a fim de realizar a análise fatorial 1.....	82
Figura 53 – Representação esquemática dos cruzamentos realizados entre cada nível de cada fator a fim de realizar a análise fatorial 2.....	82
Figura 54 – Representação esquemática dos cruzamentos realizados entre cada nível de cada fator a fim de realizar a análise fatorial 3.....	83
Figura 55 – Curvas granulométricas: a) Areia fina ($M_f = 1,24$) b) Areia média ($M_f = 1,63$).....	85
Figura 56 – Curvas granulométricas: a) Brita 0 ($D_{máx} = 12,5$ mm) b) Brita 1 ($D_{máx} = 19$ mm).....	86
Figura 57 – Geometria e dimensões da fibra de aço empregada.....	87
Figura 58 – a) Fibra de aço de seção circular do tipo A e classe I b) Fibra de aço adicionada ao concreto para verificação da tenacidade.....	87
Figura 59 – Betoneira com capacidade de 400 litros.....	89
Figura 60 – a) Ensaio de abatimento de tronco de cone b) Medição do teor de ar incorporado.....	90
Figura 61 – Preparação das formas para a moldagem dos corpos de prova.....	91
Figura 62 – Concreto sob vibração na mesa vibratória.....	91
Figura 63 – Corpos de prova em câmara úmida após a moldagem.....	92
Figura 64 – Corpos de prova submersos em água com cal após a desmoldagem.....	92
Figura 65 – Corte dos corpos de prova cilíndricos para o ensaio Barcelona simplificado: a) Realizado na FECIV/UFU b) Realizado na Poli/USP.....	93
Figura 66 – a) Retífica do corpos de prova para realização dos ensaios de	

	caracterização b) Corpos de prova retificados	94
Figura 67 –	Realização do ensaio de módulo de elasticidade longitudinal.....	95
Figura 68 –	Esquema do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade.....	95
Figura 69 –	Esquema do ensaio de tração por compressão diametral.....	96
Figura 70 –	Discos de carga necessários para a execução do ensaio Barcelona simplificado	97
Figura 71 –	Identificação dos corpos de prova para a realização do ensaio Barcelona simplificado conforme a moldagem	98
Figura 72 –	Configuração do ensaio Barcelona simplificado	98
Figura 73 –	Curvas de carga versus deslocamento vertical e carga versus TCOB obtidas por meio do ensaio Barcelona simplificado (célula de carga e LVDT internos da máquina de ensaio).....	105
Figura 74 –	Curvas de carga versus deslocamento vertical e carga versus TCOB obtidas por meio do ensaio Barcelona simplificado (célula de carga e LVDT externos ao atuador)	108
Figura 75 –	Representação gráfica da relação entre a tenacidade medida por sensores externos e por sensores internos da máquina de ensaio	111
Figura 76 –	Curvas de carga versus deslocamento vertical e carga versus TCOB obtidas por meio do ensaio Barcelona simplificado com célula de carga e LVDT internos da máquina de ensaio no laboratório da Poli/USP	112
Figura 77 –	Gráficos contendo as curvas médias de carga versus deslocamento verticas obtidas por meio de sensores externos na FECIV/UFU e Poli/USP.....	115
Figura 78 –	Relação entre a tenacidade obtida na FECIV/UFU e na Poli/USP.....	117
Figura 79 –	Aumento na tenacidade do CRFA testado na FECIV/UFU ao alterar a série de resistência à compressão de C20 para C40.....	120
Figura 80 –	Aumento na tenacidade do CRFA testado na FECIV/UFU ao aumentar o teor de fibras	120
Figura 81 –	Representação gráfica dos efeitos na tenacidade ao variar o teor de fibras de 0,50% para 0,64% e ao variar a série de resistência (de C20 para C40).....	121
Figura 82 –	Representação gráfica dos efeitos na tenacidade ao variar o teor de	

	fibras de 0,64% para 0,77% e ao variar a série de resistência (de C20 para C40).....	122
Figura 83 –	Representação gráfica dos efeitos na tenacidade ao variar o teor de fibras de 0,50% para 0,77% e ao variar a série de resistência (de C20 para C40).....	123
Figura 84 –	Aumento na tenacidade do CRFA testado na Poli/USP ao alterar a série de resistência à compressão de C20 para C40	124
Figura 85 –	Aumento na tenacidade do CRFA testado na FECIV/UFU ao aumentar o teor de fibras	124
Figura 86 –	Representação gráfica dos efeitos na tenacidade ao variar o teor de fibras de 0,50% para 0,64% e ao variar a série de resistência (de C20 para C40).....	125
Figura 87 –	Representação gráfica dos efeitos na tenacidade ao variar o teor de fibras de 0,64% para 0,77% e ao variar a série de resistência (de C20 para C40).....	126
Figura 88 –	Representação gráfica dos efeitos na tenacidade ao variar o teor de fibras de 0,50% para 0,77% e ao variar a série de resistência (de C20 para C40).....	127
Figura 89 –	Identificação das amostras ensaiadas pelo ensaio Barcelona simplificado, antes do corte das mesmas	149
Figura 90 –	Amostras nas dimensões corretas após serem cortadas	150
Figura 91 –	Gabarito utilizado para centralizar os discos de carga e os corpos de prova	150
Figura 92 –	Posicionamento da célula de carga com auxílio de uma chapa metálica e fixação do LVDT com uma base magnética	151
Figura 93 –	Amostra com as fissuras formadas após a realização do ensaio Barcelona simplificado	151
Figura 94 –	Curva carga versus deslocamento com a discriminação dos pontos de carga crítica e residual com os respectivos deslocamentos	153
Figura 95 –	Curva carga versus TCOB obtida por meio das equações propostas por Pujadas et al. (2013).....	153

QUADROS

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens na utilização de compósitos	22
Quadro 2 – Classificação e geometria das fibras de aço.....	29
Quadro 3 – Resumo do ensaios dos procedimento normalizados.....	75
Quadro 4 – Número de corpos de prova moldados para serem ensaiados para cada traço	79
Quadro 5 – Fatores e níveis a serem analisados	81
Quadro 6 – Métodos de aquisição de dados utilizados em cada laboratório	104

TABELAS

Tabela 1 – Propriedades típicas de fibras	26
Tabela 2 – Pesquisas realizadas por diferentes autores que resultaram em ganhos na resistência à compressão (f_c) com a adição de fibras de aço ao concreto	51
Tabela 3 – Velocidade de carregamento conforme a deflexão	61
Tabela 4 – Matriz de planejamento utilizada para avaliar os efeitos gerados devido ao aumento na resistência à compressão e devido ao aumento do teor de fibras (de 0,50 % para 0,64%)	81
Tabela 5 – Matriz de planejamento utilizada para avaliar os efeitos gerados devido ao aumento na resistência à compressão e devido ao aumento do teor de fibras (de 0,64 % para 0,77%)	81
Tabela 6 – Matriz de planejamento utilizada para avaliar os efeitos gerados devido ao aumento na resistência à compressão e devido ao aumento do teor de fibras (de 0,50 % para 0,77%)	82
Tabela 7 – Caracterização do agregado miúdo (Areia fina – $M_f = 1,24$).....	84
Tabela 8 – Caracterização do agregado miúdo (Areia média – $M_f = 1,63$).....	84
Tabela 9 – Caracterização do agregado graúdo ($D_{m\acute{a}x} = 12,5$ mm).....	85
Tabela 10 – Caracterização do agregado graúdo ($D_{m\acute{a}x} = 19$ mm).....	85
Tabela 11 – Característica do aditivo hiperplastificante empregado.....	86
Tabela 12 – Verificação das dimensões das fibras conforme ABNT NBR 15530: 2007	87

Tabela 13 – Dosagem dos traços utilizados	88
Tabela 14 – Resultados dos ensaios de abatimento de tronco de cone, massa específica e teor de ar incorporado	90
Tabela 15 – Resultados de módulo de elasticidade longitudinal (continua)	99
Tabela 16 – Ganho/perda no módulo de elasticidade das amostras com fibras em relação às amostras sem fibras	100
Tabela 17 – Resultados de resistência à compressão	101
Tabela 18 – Ganho/perda na resistência à compressão das amostras com fibras em relação às amostras sem fibras	101
Tabela 19 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral	103
Tabela 20 – Ganho na resistência à tração das amostras com fibras em relação às amostras sem fibras	103
Tabela 21 – Tenacidade para o ensaio Barcelona simplificado utilizando LVDT e célula de carga internos à máquina de ensaio.....	107
Tabela 22 – Tenacidade obtida por meio do ensaio Barcelona simplificado utilizando LVDT e célula de carga externos ao atuador	110
Tabela 23 – Relação entre a tenacidade medida no laboratório da FECIV/UFU por meio de LVDT e célula de carga externos e por meio de LVDT e célula de carga internos	111
Tabela 24 – Tenacidade para o ensaio Barcelona simplificado utilizando LVDT e célula de carga internos	114
Tabela 25 – Relação entre a tenacidade medida no laboratório da FECIV/UFU e no laboratório da Poli/USP	117
Tabela 26 – Carga máxima de funcionamento para o ensaio Barcelona simplificado realizado na FECIV/UFU com LVDT e célula de carga internos à máquina de ensaio	118
Tabela 27 – Carga máxima de funcionamento para o ensaio Barcelona simplificado realizado na FECIV/UFU com LVDT e célula de carga externos à máquina de ensaio	118
Tabela 28 – Carga máxima de funcionamento para o ensaio Barcelona simplificado realizado na Poli/USP com LVDT e célula de carga internos à máquina de ensaio	118
Tabela 29 – Efeitos do teor de fibras e da resistência à compressão na tenacidade	

	analisando as séries C20 e C40 e teores de fibras de 0,50% e 0,64%	121
Tabela 30 –	Efeitos do teor de fibras e da resistência à compressão na tenacidade analisando as séries C20 e C40 e teores de fibras de 0,64% e 0,77%	122
Tabela 31 –	Efeitos do teor de fibras e da resistência à compressão na tenacidade analisando as séries C20 e C40 e teores de fibras de 0,64% e 0,77%	123
Tabela 32 –	Efeitos do teor de fibras e da resistência à compressão na tenacidade analisando as séries C20 e C40 e teores de fibras de 0,50% e 0,64%	125
Tabela 33 –	Efeitos do teor de fibras e da resistência à compressão na tenacidade analisando as séries C20 e C40 e teores de fibras de 0,64% e 0,77%	126
Tabela 34 –	Efeitos do teor de fibras e da resistência à compressão na tenacidade analisando as séries C20 e C40 e teores de fibras de 0,50% e 0,77%	127
Tabela 35 –	Resultados de tenacidade em corpos de prova prismáticos segundo a ASTM C1609: 2012	128
Tabela 36 –	Relação entre os valores de tenacidade obtidos por meio do ensaio Barcelona simplificado e por meio das prescrições estabelecidas pela ASTM C1609: 2012	128
Tabela 37 –	Valores de tenacidade encontrados para todas as amostras ensaiadas utilizando os sensores da própria máquina de ensaio (FECIV/UFU).....	147
Tabela 38 –	Valores de tenacidade encontrados para todas as amostras ensaiadas utilizando os sensores externos	148
Tabela 39 –	Valores de tenacidade encontrados para todas as amostras ensaiadas utilizando os sensores da própria máquina de ensaio no laboratório da Poli/USP	148

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Justificativa.....	18
1.2	Objetivos.....	19
1.2.1	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>19</i>
1.2.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>20</i>
2	COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADA COM FIBRAS.....	21
2.1	Introdução.....	21
2.2	Matriz do concreto.....	24
2.3	Tipos e propriedades das fibras.....	25
2.4	Interação fibra-matriz.....	29
2.5	Fatores influentes na interação fibra-matriz.....	31
2.5.1	<i>Teor de fibras e volume crítico.....</i>	<i>31</i>
2.5.2	<i>Comprimento crítico.....</i>	<i>34</i>
2.5.3	<i>Fator de forma.....</i>	<i>35</i>
2.5.4	<i>Orientação e distribuição das fibras.....</i>	<i>38</i>
2.5.5	<i>Propriedades mecânicas das fibras e da matriz de concreto.....</i>	<i>41</i>
3	COMPORTAMENTO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS..	44
3.1	Introdução.....	44
3.2	Comportamento no estado fresco.....	44
3.2.1	<i>Trabalhabilidade.....</i>	<i>44</i>
3.2.2	<i>Teor de ar incorporado.....</i>	<i>47</i>
3.3	Comportamento no estado endurecido.....	48

3.3.1	<i>Módulo de elasticidade longitudinal</i>	48
3.3.2	<i>Resistência à compressão</i>	49
3.3.3	<i>Resistência à tração</i>	52
3.3.4	<i>Tenacidade</i>	53
4	MÉTODOS DE ENSAIO PARA AVALIAÇÃO DA TENACIDADE.....	56
4.1	Introdução.....	56
4.2	Ensaio em vigas.....	56
4.2.1	<i>Método JSCE-SF4: 1984</i>	56
4.2.2	<i>Método ASTM C1609: 2012</i>	59
4.2.3	<i>Método EN 14651: 2007</i>	62
4.3	Ensaio por punção.....	64
4.3.1	<i>Método EFNARC (1996)</i>	64
4.3.2	<i>Método AENOR UNE 83515: 2010</i>	67
4.4	Ensaio por encunhamento	71
4.5	Resumo dos métodos de ensaio.....	74
5	PROGRAMA EXPERIMENTAL E MATERIAIS ADOTADOS.....	77
5.1	Introdução.....	77
5.2	Planejamento experimental.....	78
5.2.1	<i>Fatores intervenientes na tenacidade</i>	80
5.2.1.1	Planejamento e análise fatorial.....	80
5.3	Materiais.....	83
5.3.1	<i>Cimento</i>	83
5.3.2	<i>Agregados</i>	84
5.3.3	<i>Aditivo</i>	86
5.3.4	<i>Água</i>	86
5.3.5	<i>Fibras de aço</i>	87
5.4	Dosagem do concreto.....	88
5.5	Produção, moldagem e cura dos corpos de prova.....	89
5.6	Preparação dos corpos de prova no estado endurecido.....	92
5.7	Métodos de ensaio.....	93
5.7.1	<i>Resistência à compressão (f_c)</i>	93

5.7.2	<i>Módulo de elasticidade longitudinal (E)</i>	94
5.7.3	<i>Resistência à tração por compressão diametral</i>	96
5.7.4	<i>Tenacidade por meio do ensaio Barcelona simplificado</i>	97
6	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	99
6.1	Introdução.....	99
6.2	Módulo de elasticidade longitudinal.....	99
6.3	Resistência à compressão.....	101
6.4	Resistência à tração por compressão diametral.....	102
6.5	Tenacidade do concreto com fibras.....	104
6.5.1	<i>Laboratório da FECIV/UFU</i>	104
6.5.2	<i>Laboratório da Poli/USP</i>	112
6.5.3	<i>Análise comparativa entre resultados de tenacidade da FECIV/UFU e Poli/USP</i>	115
6.5.4	<i>Carga máxima de puncionamento</i>	118
6.5.5	<i>Análise fatorial: laboratório da FECIV/UFU</i>	119
6.5.6	<i>Análise fatorial: laboratório da Poli/USP</i>	123
6.6	Ensaio em amostras prismáticas.....	127
7	CONCLUSÕES.....	130
7.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	132
	REFERÊNCIAS.....	133
	APÊNDICE A.....	147
	APÊNDICE B.....	149
	APÊNDICE C.....	152

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O concreto é o material estrutural mais comumente usado no mundo. Tal material caracteriza-se por ser heterogêneo e por possuir um comportamento frágil. Diante disso, para que o mesmo seja aplicado de maneira adequada, faz-se importante compreender seu comportamento mecânico, suas propriedades e, particularmente, seu comportamento de fratura (RIBEIRO; RODRIGUES, 2009).

Além de apresentar um comportamento frágil característico, sabe-se que o concreto, quando tracionado, apresenta uma baixa capacidade de deformação antes da ruptura, uma vez que o concreto simples, após a fissuração, perde por completo a capacidade de resistir aos esforços de tração. Dessa forma, alternativas tecnológicas surgiram a fim de minimizar essas limitações do concreto, como exemplo, tem-se a adoção de fibras para reforço (FIGUEIREDO, 2011b).

A adição de fibras ao concreto confere ao mesmo um acréscimo na resistência residual à tração pós-fissuração, uma vez que as fibras atuam como ponte de transferência de tensões entre as fissuras (DI PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009). Além disso, como as fibras são adicionadas diretamente ao concreto de modo que as mesmas fiquem distribuídas de forma aleatória, tem-se uma redução no tempo, no custo e na mão de obra em relação aos procedimentos convencionais adotados no concreto armado (FIGUEIREDO, 2011b).

Sabe-se que a utilização de compósitos reforçados com fibras na construção civil ocorre desde os primórdios da história. Conforme explicitado em Êxodo 5:6-7, os egípcios empregavam a palha natural a fim de reforçar tijolos de barro para a construção de suas casas. Já na atualidade, Arif (2014) cita que os compósitos possuem diversas aplicações na

construção civil, tais como em painéis de vedação vertical, telhas, pavimentos, túneis, dentre outros.

Os métodos de ensaio usualmente empregados para a caracterização mecânica do concreto reforçado com fibras (CRF) são realizados por meio da flexão de prismas a fim de determinar a resistência residual pós-fissuração ou a tenacidade (SALVADOR; FIGUEIREDO, 2013). Entretanto, ensaios alternativos que utilizam corpos de prova menores também podem ser empregados. Como exemplo desses ensaios, há o ensaio Barcelona.

Com o propósito de discutir a respeito do ensaio Barcelona aplicado na avaliação do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), este trabalho é constituído de sete capítulos, organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 1: Introdução ao tema, com a justificativa da pesquisa e os objetivos;
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre estruturas reforçadas;
- Capítulo 3: Revisão bibliográfica a respeito do comportamento do concreto reforçado com fibras.
- Capítulo 4: Métodos de ensaios utilizados para a determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras;
- Capítulo 5: Programa experimental e materiais usados;
- Capítulo 6: Apresentação e análise dos resultados;
- Capítulo 7: Conclusões.

1.1 JUSTIFICATIVA

No Brasil, não há norma que especifica e normatiza a utilização do concreto reforçado com fibras. Assim, as principais normas adotadas para avaliar a tenacidade ou a resistência residual pós-fissuração são a americana (ASTM C1609: 2012), a japonesa (JSCE-SF4: 1984) e a europeia (EN 14651: 2007), sendo que estas utilizam corpos de prova prismáticos. Além dessas, ainda há a norma europeia que caracteriza o concreto projetado reforçado com fibras por meio da punção em placas (EFNARC: 1996).

Vale ressaltar que a caracterização mecânica do CRF por meio de vigas e placas requer importantes esforços de tempo, material e equipamentos. No caso dos testes de flexão em vigas, que possuem dimensões de 150 x 150 x 500 mm ou 150 x 150 x 550 mm é necessário um volume de concreto de 13,50 ou 14,85 litros, respectivamente, para cada amostra. Dessa forma, cada amostra possui cerca de 30 ou 33 kg. Tendo em vista que para a obtenção de resultados confiáveis é preciso ensaiar no mínimo três amostras, faz-se necessário um volume de 40,50 ou 44,55 litros de CRF (GALOBARDES; FIGUEIREDO, 2015).

Já no caso dos ensaios realizados em placas, a quantidade de material necessária é ainda maior, uma vez que para moldar cada placa é preciso um volume de 43,20 litros de CRF e cada peça possui aproximadamente 96 kg. Além da demanda de material e tempo para a moldagem das amostras, caso o método de ensaio seja baseado no controle da velocidade por meio da deflexão ou pela abertura de fissura do corpo de prova, faz-se necessário utilizar uma máquina de ensaio com sistema fechado (*closed-loop*) que não está presente na maior parcela dos laboratórios brasileiros.

Por outro lado, o ensaio Barcelona exige aproximadamente 3,18 litros (7 kg) de CRF. Além disso, não é preciso utilizar máquinas dotadas de sistema fechado de controle de velocidade de deslocamento.

Malatesta et al. (2009) ainda citam que os resultados obtidos nos ensaios de flexão em vigas em relação ao comportamento pós-fissuração do CRF possuem uma baixa precisão. Já o ensaio Barcelona, por sua vez, pode apresentar parâmetros de caracterização mecânica pós-pico com uma reduzida dispersão.

O presente trabalho, portanto, visa realizar um estudo interlaboratorial sobre um experimento possivelmente mais simples que os já empregados e que possa oferecer parâmetros ao meio técnico para o controle executivo de obras que utilizem o CRFA.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral dessa pesquisa é investigar experimentalmente por meio de um estudo interlaboratorial o comportamento mecânico de concretos reforçados com fibras de aço com foco na tenacidade.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- Produzir amostras de CRFA com duas resistências mecânicas e três volumes de fibras de aço distintos;
- Participar de um programa interlaboratorial entre o Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (FEVIC/UFU) e o Laboratório de Estruturas e Materiais Estruturais da Faculdade Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli/USP) para a realização do ensaio Barcelona simplificado;
- Avaliar a tenacidade das amostras ensaiadas;
- Comparar os resultados obtidos com pesquisas já realizadas na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

CAPÍTULO 2

COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADA COM FIBRAS

2.1 INTRODUÇÃO

A adoção de novas tecnologias requer, em diversas situações, a utilização de materiais que possuem combinações não usuais de propriedades, sendo que estas propriedades não são atendidas pelas ligas metálicas, materiais cerâmicos e poliméricos convencionais. Dessa forma, as propriedades dos materiais e suas possíveis combinações tem sido objeto de estudo para o desenvolvimento de materiais compósitos (CALLISTER JR., 2008).

O material compósito pode ser definido como qualquer material multifásico que apresenta uma proporção relevante das fases que o constituem. Além disso, busca-se que as propriedades do material compósito sejam superiores aquelas encontradas nas fases de maneira individual (CALLISTER JR., 2008).

O emprego de materiais compósitos ocorre desde a antiguidade em aplicações mais simples, como o barro reforçado com palha para a construção de habitações, até em aplicações mais sofisticadas, como em blindagens têxteis reforçados com fibras de aramida (NUNES, 2006).

Os materiais compósitos de alto desempenho foram inseridos de forma definitiva em projetos de engenharia a partir da década de 1960. Tais materiais foram empregados para a fabricação de peças destinadas a diversos setores industriais, como as indústrias naval, eletrônica, automobilística, de construção civil e aeroespacial (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

Conforme Bentur e Mindess (2007), o primeiro compósito amplamente fabricado e empregado foi a matriz cimentícia com fibras de amianto, comumente chamado de cimento amianto desenvolvido por Ludwig Hatschek em 1895. Strong (2008) lista as principais vantagens e desvantagens obtidas ao se utilizar materiais compósitos, conforme apresentado no Quadro 1.

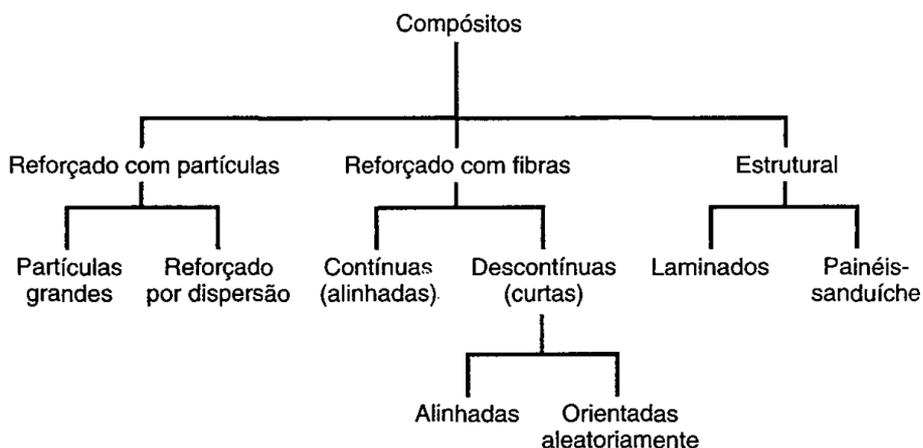
Quadro 1 – Vantagens e desvantagens na utilização de compósitos

Vantagens	Desvantagens
Material leve	Alto custo do material
Resistência elevada	Falta de normatização para aprovação de projetos
Rigidez elevada	Longo período para desenvolvimento
Aumento da resistência à fadiga	Difícil identificação de danos internos
Aumento da ductilidade de materiais frágeis, como o concreto	
Boa resistência ao impacto	
Baixa expansão térmica	
Baixa condutividade elétrica	

Fonte: Adaptado de Strong (2008)..

De modo geral, os compósitos podem ser classificados em reforçados com partículas, reforçados com fibras ou compósitos estruturais (Figura 1). Tendo em vista que o compósito é constituído pela fase matriz e pela fase dispersa, nos compósitos reforçados com partículas, a fase dispersa é equiaxial, ou seja, possui dimensões próximas nas três direções. Já aqueles reforçados com fibras, a fase dispersa possui o formato de uma fibra. Por fim, os compósitos estruturais são combinações de compósitos e materiais homogêneos (CALLISTER JR., 2008).

Figura 1 – Proposta de classificação dos diferentes tipos de compósitos



Fonte: Callister Jr. (2008).

O concreto simples, por sua vez, também pode ser denominado como um material compósito, formado por pasta de cimento, agregados e poros, porém, este termo é frequentemente atribuído aos materiais que possuem componentes de reforço (FIGUEIREDO, 2011a).

Sabe-se que o concreto possui diversas características que lhe tornam o material de construção mais utilizado no mundo, como boa resistência à compressão e ao fogo, possibilidade de pré-fabricação, boa relação entre custo e durabilidade, dentre outros (MEDEIROS, 2012). Por outro lado, o concreto simples (sem adições) apresenta comportamento frágil e baixa capacidade de deformação antes da ruptura (MEDEIROS, 2012). Dessa forma, a fim de minimizar essas limitações, o concreto é reforçado com fibras.

O concreto reforçado com fibras é caracterizado por ser constituído pelos materiais que compõem o concreto simples com a adição de fibras e, por isso, o CRF é definido como um material compósito. O CRF também pode possuir pozolanas e outras adições frequentemente empregadas ao concreto convencional. As fibras adotadas podem possuir diferentes formatos e dimensões e podem ser produzidas de aço, vidro, plástico ou materiais naturais. Entretanto, dentre todas as fibras, a fibra de aço é a mais utilizada (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A adição de fibras ao concreto pode gerar benefícios ao mesmo, como o aumento da ductilidade e da resistência quando submetido à tração na flexão, à tração direta e também à compressão. Além disso, pode-se obter outros benefícios como maior resistência ao impacto, à erosão e à fadiga e redução na retração (MEDEIROS, 2012).

Dentre os objetivos de projeto dos compósitos reforçados com fibras, tem-se alta resistência e/ou rigidez em relação à massa. Tais características são explicitadas por meio dos parâmetros resistência específica e módulo específico. Esses parâmetros correspondem às relações entre o limite de resistência à tração e a massa específica e entre o módulo de elasticidade e a massa específica, respectivamente. Dessa forma, compósitos reforçados com fibras com resistências e módulos específicos elevados são produzidos com a utilização de materiais com baixa massa específica (CALLISTER JR., 2008).

Bentur e Mindess (2007) acrescentam que as fibras desempenham função principal na fase pós-fissuração do CRF, na qual inibem a propagação de fissuras. Tem-se que a transferência de tensões por meio das fissuras pode melhorar a resistência do compósito.

Porém, os mesmos autores ressaltam que a função mais importante das fibras é tornar o compósito mais tenaz por intermédio de mecanismos de absorção de energia relacionados ao seu arrancamento e à quebra de sua ligação com a matriz.

2.2 MATRIZ DO CONCRETO

A fase matriz dos compósitos fibrosos pode ser composta por metais, polímeros ou cerâmicas. No caso dos metais e polímeros, os mesmos são empregados como matriz a fim de conferir ductilidade ao compósito. Já no caso das matrizes cerâmicas, como a do concreto, as fibras são adicionadas para melhorar algumas propriedades mecânicas do compósito, como a tenacidade, por exemplo (CALLISTER JR., 2008).

De acordo com Lopes (2005), as matrizes cimentícias podem ser classificadas em pastas, argamassas ou concretos. Em todas as classificações, a matriz é composta por um esqueleto sólido e por poros, sendo que o esqueleto é constituído principalmente por silicato de cálcio hidratado (CSH).

Já os poros presentes nas matrizes podem possuir diferentes dimensões, sendo eles denominados microporos (diâmetro inferior a 2 nm), mesoporos (diâmetro entre 2 nm e 50 nm) e macroporos (diâmetro superior a 50 nm). A dimensão dos poros e a quantidade de hidratos de CSH formada na matriz interferem de forma direta na resistência das matrizes. Assim, as matrizes podem apresentar resistência normal (inferior a 50 MPa), alta (entre 50 e 100 MPa) ou altíssima (superior a 100 MPa) (LOPES, 2005).

Nos materiais reforçados com fibras, a fase matriz desempenha funções importantes para as propriedades desses compósitos. Segundo Harris (1999), as principais funções são:

- transmitir e distribuir as tensões aplicadas externamente para as fibras, sendo que essa transferência depende da interação fibra/matriz;
- isolar as fibras uma das outras a fim de prevenir a propagação de fissuras frágeis de uma fibra para outra;
- proteger os filamentos de reforço contra danos superficiais devido à abrasão mecânica ou reações químicas com o ambiente.

2.3 TIPOS E PROPRIEDADES DAS FIBRAS

As fibras podem ser classificadas em micro ou macrofibras, conforme suas dimensões. As microfibras apresentam diâmetro entre 10 e 30 μm e comprimento entre 3 e 18 mm e as macrofibras possuem diâmetro maior que 0,30 mm e comprimento entre 30 e 60 mm (SALVADOR, 2013).

De acordo com Bernardi (2003), as microfibras atuam em conjunto com a matriz desde o início do carregamento e, assim, auxiliam no controle da retração e fissuração de matrizes cimentícias na fase plástica (ACI 544.1R: 2002). Já as macrofibras, como as fibras metálicas, contribuem principalmente na fase pós-fissuração conferindo resistência residual ao CRF (BENTUR; MINDESS, 2007).

Segundo Naaman (2003), as fibras empregadas como reforço do concreto podem ser caracterizadas conforme o material constituinte, as propriedades físicas e químicas, e as propriedades mecânicas. Em relação ao material, as fibras podem ser orgânicas naturais, como de celulose, sisal e bambu; mineral natural, como o amianto; sintéticas ou artificiais, como de aço, vidro e titânio.

Já conforme as propriedades físicas e químicas, as fibras apresentam características distintas quanto à massa específica, rugosidade superficial, reatividade com a matriz de cimento, estabilidade química e resistência ao fogo. Por fim, as fibras apresentam diferentes propriedades mecânicas, tais como resistência à tração, módulo de elasticidade e ductilidade (NAAMAN, 2003).

A partir de ensaios e análises experimentais, para as fibras metálicas atuarem como reforço de modo eficaz em matrizes de concreto, as mesmas devem possuir uma resistência à tração significativamente superior a do concreto, uma força de ligação com a matriz de concreto próxima ou superior à resistência à tração da matriz do concreto e um módulo de elasticidade significativamente maior do que da matriz do concreto. Além disso, os coeficientes de Poisson e de expansão térmica da matriz do concreto e das fibras devem ser próximos, a fim de se evitar a descolagem das fibras (NAAMAN, 2003).

A Tabela 1 apresenta propriedades características de algumas fibras típicas e da matriz de cimento.

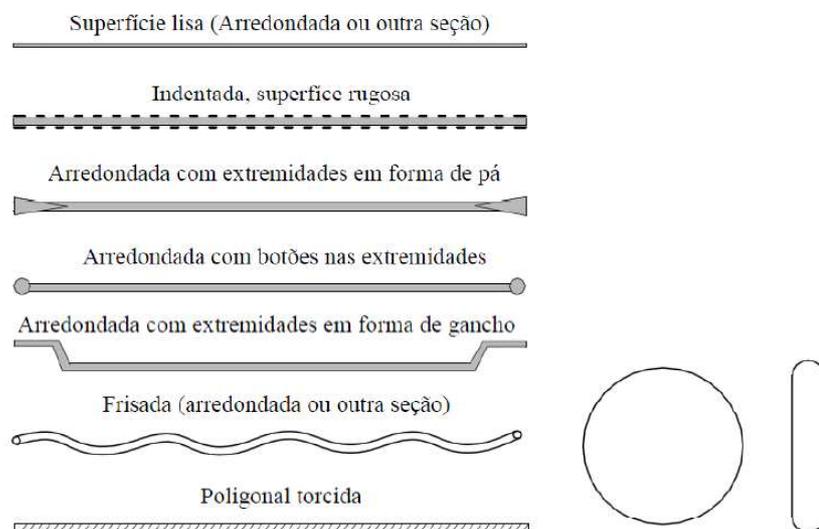
Tabela 1 – Propriedades típicas de fibras

Material	Diâmetro (µm)	Massa específica (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5,00 - 500,00	7,84	190,00 - 210,00	500,00 - 2000,00	0,50 - 3,50
Vidro	9,00 - 15,00	2,60	70,00 - 80,00	2000,00 - 4000,00	2,00 - 3,50
Amianto	0,02 - 0,40	2,60	160,00 - 200,00	3000,00 - 3500,00	2,00 - 3,00
Polipropileno	20,00 - 200,00	0,90	1,00 - 7,70	500,00 - 750,00	8,00
Poliamida (Kevlar)	10,00	1,45	65,00 - 133,00	3600,00	2,10 - 4,00
Carbono	9,00	1,90	230,00	2600,00	1,00
Poliamida (Náilon)	-	1,10	4,00	900,00	13,00 - 15,00
Celulose	-	1,20	10,00	300,00 - 500,00	-
Acrílico	18,00	1,18	14,0 - 19,50	400,00 - 1000,00	3,00
Polietileno	-	0,95	0,30	0,70	10,00
Fibra de madeira	-	1,50	71,00	900,00	-
Sisal	10,00 - 50,00	1,00 - 50,00	-	800,00	3,00
Matriz de cimento (para comparação)	-	2,50	10,00 - 45,00	3700,00	0,02

Fonte: Bentur e Mindess (2007).

Em relação às fibras de aço, as mesmas podem ser classificadas conforme sua geometria em lisas, onduladas e com ganchos nas extremidades (CHENG; PARRA-MONTESINHOS, 2010). Bentur e Mindess (2007) ressaltam que as fibras de geometria lisa já são pouco empregadas, uma vez que a ligação com a matriz pode ser insuficiente. A Figura 2 apresenta diferentes tipos de fibras conforme a geometria.

Figura 2 – Perfis típicos de fibras de aço empregadas para reforço de concreto e detalhe da seção transversal

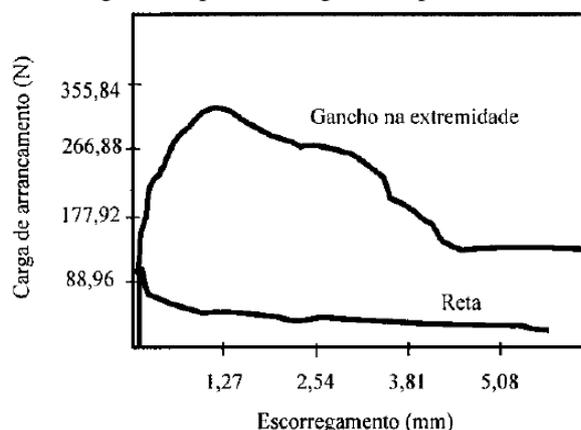


Fonte: Naaman (2003).

De acordo com Garcez (2005), a adoção de fibras deformadas nas extremidades ou ao longo do seu comprimento melhora as condições de ancoragem entre as fibras e a matriz do concreto, uma vez que com tais fibras, tem-se como mecanismo de transferência de tensões, além da aderência e do atrito, a aderência mecânica. Dessa forma, com o aumento da aderência, Banthia e Trottier (1995) citam que, em geral, as fibras deformadas aumentam de modo significativo a capacidade de absorção de energia do compósito, ou seja, aumentam a tenacidade.

Naaman e Najm (1991) analisaram o desempenho de fibras de aço retas, onduladas e com extremidade em gancho por meio do ensaio de arrancamento de fibras individuais e observaram que a fase linear da curva de carga de arrancamento por escorregamento (Figura 3) é semelhante para as fibras com gancho e retas. Entretanto, após a fase linear, as fibras com gancho apresentam melhor desempenho devido à força adicional resultante da deformação mecânica.

Figura 3 – Curva de carga de carregamento por escorregamento para fibras de aço com diferentes formatos



Fonte: Adaptado de Naaman e Najm (1991).

Um fator que pode interferir na capacidade de reforço das fibras no compósito é o espaçamento entre as fibras. Segundo Romualdi e Batson (1963) a resistência à primeira fissura dos compósitos é inversamente proporcional ao espaçamento geométrico entre as fibras, sendo que a resistência à primeira fissura é definida por Villares (2001) como o ponto em que a curva de tensão por deformação perde a linearidade.

Conforme Hannant (1978), o espaçamento entre fibras consiste na distância entre o centro de uma fibra e outra, sendo que tal distância é influenciada pelo volume de fibras no compósito. Diante disso, Romualdi e Mandel (1964) calcularam por meio da Equação 1 o

espaçamento médio entre as fibras de aço distribuídas aleatoriamente em compósitos de matriz de concreto.

$$s = \frac{2,76 \times r}{\sqrt{v_f}} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que s é o espaçamento médio das fibras, r é o raio da fibra e v_f é o volume de fibras no compósito.

Por meio da Equação 1, pode-se perceber que mantendo o mesmo volume de fibras e reduzindo o raio das fibras ou mantendo o raio e aumentando o volume, há uma redução no espaçamento entre as fibras. Por consequência, ao reduzir o espaçamento entre fibras ocorre um aumento na probabilidade de uma fibra interceptar uma fissura (NUNES, 2006).

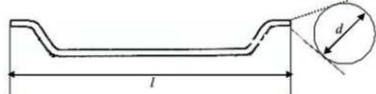
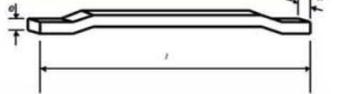
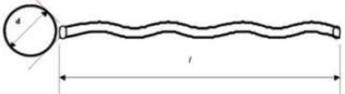
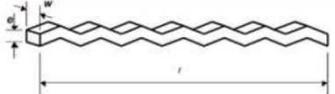
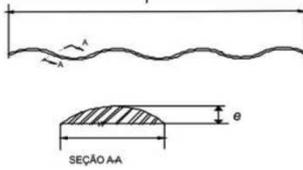
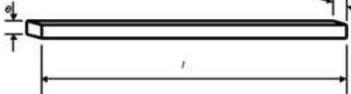
A adição de fibras de aço ao concreto, por sua vez, resulta no aumento da tenacidade do concreto e também em uma melhoria na resistência à cavitação, ao choque térmico e ao impacto e um aumento da ductilidade, pois a propagação da fissura é atrasada nos componentes estruturais de concreto submetidos à tração ou à tração na flexão (ARIF, 2014).

A norma brasileira ABNT NBR 15530: 2007 – Fibras de aço para concreto – Especificação, estabelece critérios para classificar as fibras de aço de baixo teor de carbono e dispõe sobre as condições mínimas relativas à forma geométrica, tolerâncias dimensionais, defeitos de fabricação, resistência à tração e dobramento.

Conforme a ABNT NBR 15530: 2007, as fibras de aço podem ser classificadas em três tipos distintos de acordo com sua conformação: o Tipo A que indica as fibras com ancoragem nas extremidades, o Tipo C referente às fibras corrugadas e o Tipo R que corresponde às fibras retas. A ABNT NBR 15530: 2007 também classifica as fibras de aço conforme o processo de produção das mesmas em três classes: a Classe I agrupa as fibras oriundas de arame trefilado a frio, a Classe II indica as fibras provenientes de chapa laminada cortada a frio e a Classe III é referente às fibras oriunda de arame trefilado e escarificado.

No Quadro 2 é apresentada uma correspondência entre os tipos e classes de fibras de aço especificadas pela ABNT NBR 15530: 2007.

Quadro 2 – Classificação e geometria das fibras de aço

Tipo (geometria)	Classe da fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

Fonte: Figueiredo, Chama Neto e Faria (2008).

Conforme Mehta e Monteiro (2008), as fibras de aço com seção circular podem apresentar diâmetro entre 0,25 e 0,75 mm. Já as fibras de aço achatadas apresentam seção transversal com largura entre 0,25 e 0,90 mm e espessura entre 0,15 e 0,40 mm. Tendo em vista a facilidade no manuseio e na mistura, as fibras de aço são encontradas coladas em feixes com 10 a 30 fibras, com cola solúvel em água.

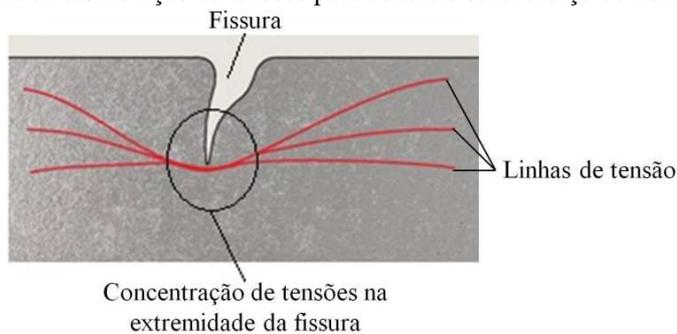
2.4 INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ

As propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras são dependentes das propriedades das fibras e também do nível de transferência de cargas entre a fase da matriz e a fase das fibras. Dessa forma, a ligação interfacial entre a matriz e as fibras é importante para que ocorra essa transferência de cargas.

Barros (2009) explica que para o concreto sem fibras, no momento em que ocorre a formação de fissuras, a tensão que percorria o local em que se formou a fissura desvia sua

trajetória para um local mais próximo que permita sua propagação, isto é, na extremidade da fissura, conforme explicitado na Figura 4. Diante disso, tem-se uma concentração de tensões na extremidade da fissura, de modo que no instante em que esta tensão se tornar superior à resistência do concreto, ocorrerá a ruptura do material.

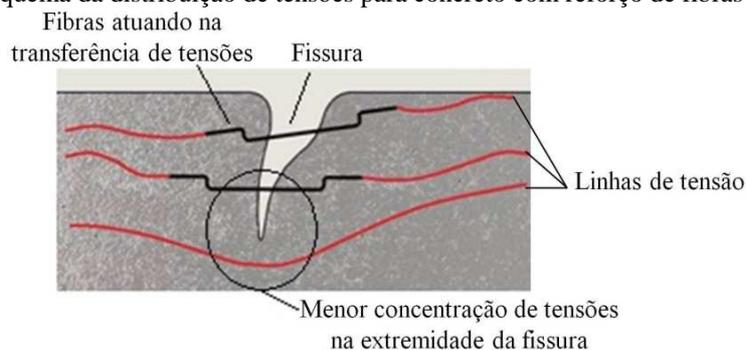
Figura 4 – Esquema da distribuição de tensões para concreto sem reforço de fibras



Fonte: Autora (2017).

Já no caso do concreto reforçado com fibras, quando a capacidade resistente da matriz é superada, as fibras desempenham a função de “pontes” de transferência de tensões (Figura 5). Dessa forma, ao comparar com o concreto sem adição de fibras e para um mesmo nível de tensão aplicada ao elemento, há uma redução nas concentrações das tensões na extremidade da fissura (BARROS, 2009).

Figura 5 – Esquema da distribuição de tensões para concreto com reforço de fibras



Fonte: Autora (2017).

Conforme Figueiredo (2000), como as fibras atuam como pontes de transferência de tensões pelas fissuras e, assim, há uma redução na concentração de tensões das mesmas, o concreto deixa de possuir um comportamento frágil e passa a apresentar um comportamento pseudo-frágil. Dessa forma, há uma diminuição da velocidade de propagação das fissuras no concreto e este passa a apresentar determinada capacidade portante pós-fissuração.

Segundo Bentur e Mindess (2007), pode-se citar três tipos de interações fibra-matriz importantes, essas que são a adesão física e química, o atrito e a ancoragem mecânica induzida por deformação na superfície da fibra ou devido à sua geometria. As ligações por adesão e por atrito são relativamente fracas e apresentam maior contribuição para a utilização de fibras com elevada área de superfície, como as fibras de carbono, ou em matrizes de cimento com baixa porosidade. Já em concretos reforçados com fibras com diâmetros próximos a 0,01 mm ou maiores, a ligação por ancoragem se faz necessária. Por isso, fibras deformadas são frequentemente empregadas.

Vale ressaltar que, para as fibras exercerem função de reforço, elas precisam estar aglutinadas por uma matriz. Como as fibras apresentam grande comprimento e pequeno diâmetro, as mesmas possuem uma alta relação entre área superficial e volume. Diante disso, a área interfacial fibra/matriz disponível para transferência de tensão por unidade de volume de fibra aumenta em função da relação entre o comprimento e o diâmetro das fibras (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

2.5 FATORES INFLUENTES NA INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ

A interação fibra-matriz influencia diretamente a resistência, a deformação e o modo de ruptura dos compósitos reforçados com fibras (FERREIRA, 2008). Segundo Nunes (2006), os principais parâmetros que interferem na interação entre a fibra e a matriz são o tipo de fibras, conforme discutido no item 2.3; o teor de fibras no compósito; as dimensões das fibras e as propriedades mecânicas da matriz e das fibras, tais como resistência à compressão e módulo de elasticidade.

2.5.1 Teor de fibras e volume crítico

De acordo com Quinino (2015), a capacidade de reforço que as fibras apresentam está diretamente relacionada com o teor de fibras empregado, uma vez que, ao aumentar o teor de fibras há uma maior transferência de tensões. Dessa forma, a capacidade de reforço pós-fissuração do compósito é elevada.

Na pesquisa realizada por Nunes (1998), fez-se possível constatar com grande confiança estatística que ao aumentar o teor de fibras de aço adicionado ao concreto, a tenacidade do compósito aumentou de forma significativa. Entretanto, aumentar em demasia esse teor

pode resultar na falta de trabalhabilidade da mistura e diminuição do contato fibra-matriz, comprometendo o desempenho do compósito.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), faz-se importante classificar os compósitos reforçados com fibras conforme a fração volumétrica de fibras empregada:

- baixa fração volumétrica (menor que 1%): nesse intervalo as fibras são empregadas a fim de reduzir a fissuração por retração dos compósitos. Assim, estes compósitos são utilizados em estruturas com grande superfície exposta, como lajes e pavimentos. Ao substituir o emprego de malhas e barras de aço por fibras, tem-se como vantagens o fato das fibras serem menos suscetíveis à corrosão que as barras de aço; as fibras são distribuídas de maneira uniforme nas três dimensões e, assim, a distribuição das solicitações se torna mais eficiente; o emprego de fibras reduz o custo de mão de obra com o preparo e posicionamento das armações;
- fração volumétrica moderada (entre 1 e 2%): com esse intervalo de fração volumétrica, as fibras aumentam a tenacidade à fratura, o módulo de ruptura e a resistência ao impacto dos compósitos. Com isso, estes compósitos são empregados em concretos projetados e em estruturas que demandam maior capacidade de resistência à fadiga, à delaminação e ao lascamento e maior capacidade de absorção de energia;
- alta fração volumétrica (maior que 2%): ao empregar um alto teor de fibras, estas levam ao endurecimento por deformação dos compósitos. Como esses materiais apresentam melhor desempenho, os mesmos são denominados compósitos de alto desempenho.

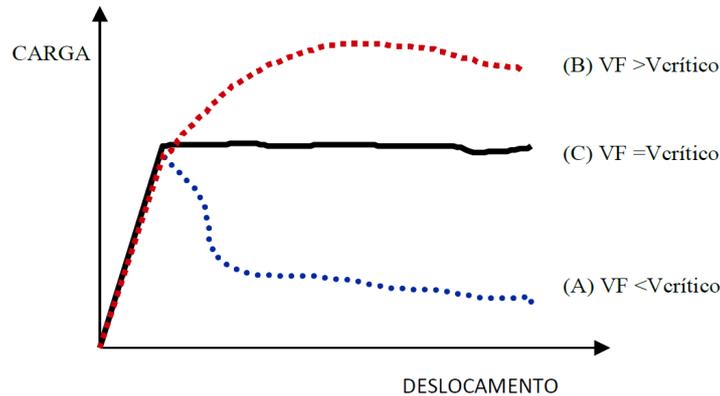
Figueiredo (2011b) conceitua um importante parâmetro para a dosagem do CRF, denominado volume crítico. Segundo esse autor, o volume crítico de um compósito pode ser definido como o teor de fibras em que a capacidade resistente a partir da ruptura é mantida, isto é, abaixo do volume crítico ocorre o comportamento *strain softening*. O comportamento *strain softening* é caracterizado por Naaman (2008) por haver uma perda progressiva na capacidade resistente do compósito após a fissuração da matriz.

Por outro lado, para volumes de fibras empregados superiores ao volume crítico, Figueiredo (2011b) cita que o compósito apresenta comportamento *strain hardening*. Conforme Naaman (2008), o comportamento *strain hardening* é caracterizado pelo

compósito apresentar um ganho crescente de capacidade resistente mesmo após a fissuração da matriz.

A Figura 6 ilustra o conceito do volume crítico em CRF e os comportamentos *strain softening* e *strain hardening*.

Figura 6 – Compósitos reforçados com volume de fibras: (A) inferior ao volume crítico, (B) superior ao volume crítico e (C) igual ao volume crítico

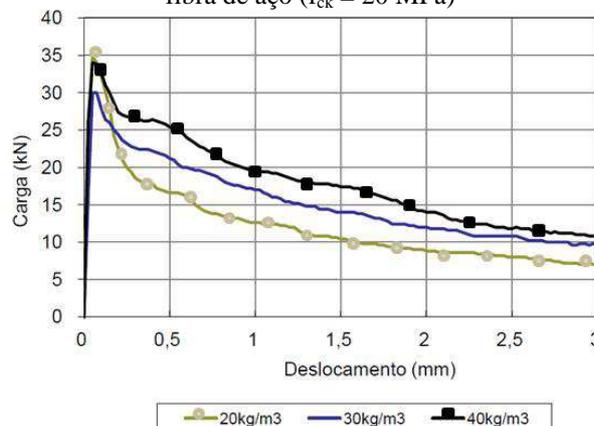


Fonte: Figueiredo (2000).

A prática recomendada IBRACON/ABECE (2016) define o comportamento *strain softening* como um “abrandamento” do CRFA. Já o comportamento *strain hardening* é caracterizado como um “enrijecimento” do CRFA.

A Figura 7 apresenta curvas médias de carga por deslocamento de CRFA com três volumes distintos de fibras obtidas em um ensaio de tração na flexão com deslocamento controlado encontradas na pesquisa realizada por Figueiredo, Nunes e Tanesi (2000). Por meio da figura citada, observa-se que o aumento no volume de fibras não interfere no trecho elástico inicial, mas gera um aumento na carga resistida após a fissuração da matriz.

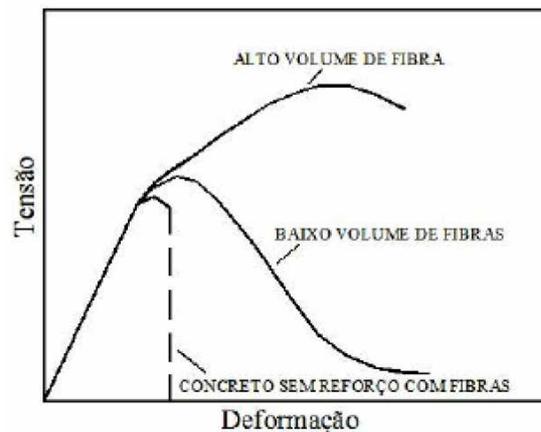
Figura 7 – Curvas médias de carga por deslocamento para concreto reforçado com diferentes volumes de fibra de aço ($f_{ck} = 20 \text{ MPa}$)



Fonte: Adaptado de Figueiredo, Nunes e Tanesi (2000).

Já a Figura 8 apresenta as curvas típicas de concretos sem fibras, reforçados com baixo volume de fibras e reforçados com alto volume de fibras. Por meio dessa figura, pode-se observar que para a adoção de teores baixos de fibras, as principais mudanças ocorrem no comportamento plástico e na tenacidade do compósito, expressos por meio do alongamento da curva de tensão por deformação. Tais mudanças são principalmente devido ao maior controle no estágio pós-fissuração da abertura de fissuras (GACEZ, 2005).

Figura 8 – Curvas típicas para tensão-deformação para concreto sem adição fibras, com baixo volume de fibras e alto volume de fibras



Fonte: Bentur e Mindess (2007).

Ao adicionar altos teores de fibras ao concreto, por sua vez, ocorre um aumento na tenacidade e na resistência última do compósito. Entretanto, a fim de minimizar a perda da trabalhabilidade do CRF, faz-se importante a adoção de técnicas de especiais que garantam a consistência necessária (GACEZ, 2005).

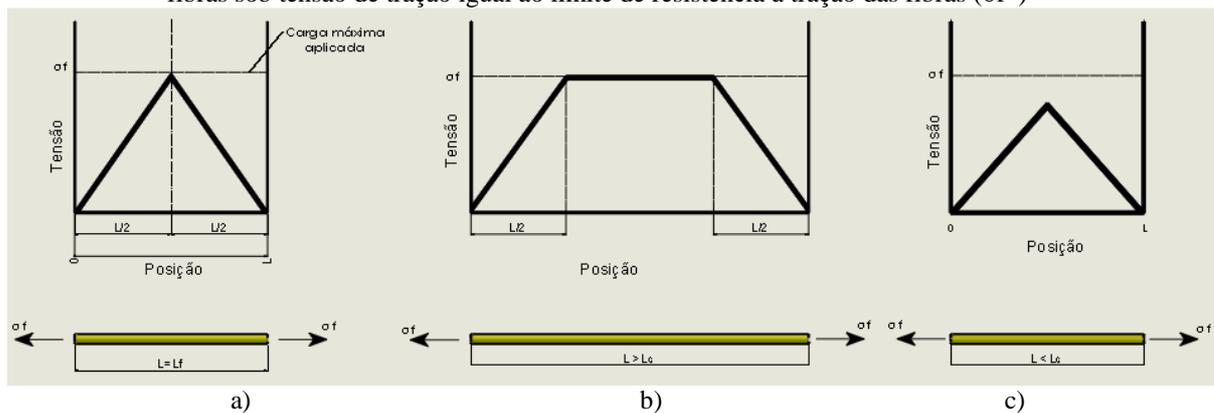
2.5.2 Comprimento crítico

Para que haja um aumento efetivo na resistência e na rigidez dos compósitos é necessário certo comprimento crítico das fibras. De acordo com Figueiredo (2011a), o comprimento crítico de uma fibra pode ser definido como aquele em que a tensão no seu centro é igual à sua tensão de ruptura quando a fissura ocorre perpendicular à fibra e está posicionada na mesma região. Bentur e Mindess (2007) acrescentam que o comprimento crítico consiste no comprimento mínimo em que a fibra rompe antes que seja arrancada da matriz.

A Figura 9a apresenta o perfil tensão-posição de uma fibra exatamente com comprimento crítico e sob tensão. Nesse caso, a carga máxima na fibra é atingida na seção média da mesma. Ao aumentar o comprimento da fibra, o reforço proporcionado pela fibra torna-se

mais efetivo, fato que está representado na Figura 9b. Já a Figura 9c representa quando a fibra possui comprimento menor que o crítico, em que a tensão aplicada não atinge a carga máxima da fibra (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012).

Figura 9 – Perfil de tensão-deformação de quando o comprimento da fibra é: a) igual ao comprimento crítico b) maior que o comprimento crítico c) menor que o comprimento crítico, para um compósito reforçado com fibras sob tensão de tração igual ao limite de resistência à tração das fibras (σ_f^*)



Fonte: Adaptado de Callister Jr. e Rethwisch (2012).

Callister Jr. e Rethwisch (2012) citam que o comprimento crítico das fibras (l_c) está em função do diâmetro da fibra (d) e da sua resistência máxima (ou limite de resistência à tração) (σ_f^*) e também da resistência da ligação fibra-matriz (ou da tensão de escoamento ao cisalhamento da matriz, adotando o menor valor) (τ_c), conforme a Equação 2.

$$l_c = \frac{\sigma_f^*}{2\tau_c} \quad (\text{Equação 2})$$

2.5.3 Fator de forma

Um fator importante a ser considerado são as dimensões das fibras empregadas. Conforme Askeland e Wright (2014), as dimensões das fibras são frequentemente caracterizadas pela razão de aspecto ou fator de forma (l/d), em que l é o comprimento da fibra e d corresponde ao seu diâmetro. No caso das fibras de aço, Mehta e Monteiro (2008) citam que o fator de forma varia entre 30 e 150.

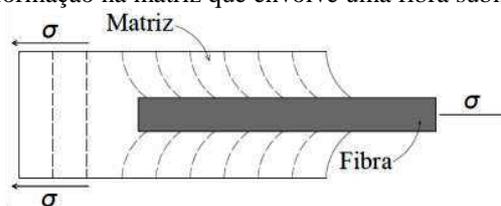
Um maior fator de forma pode ser resultante da adoção de fibras com pequeno diâmetro ou grande comprimento. Askeland e Wright (2014) afirmam que ao adotar fibras com diâmetro mínimo, as mesmas apresentam menor área de superfície e, assim, há menor possibilidade de haver falhas que poderão se propagar. Dessa forma, há um aumento na resistência mecânica do compósito.

Villares (2001) acrescenta que, ao empregar fibras com diâmetros pequenos, há um aumento na quantidade de fibras por volume de concreto para certo teor de fibras. Diante disso, há uma maior probabilidade de uma fissura ser interceptada por uma fibra e, com isso, o comportamento pós-fissuração do compósito é melhorado.

Nunes (1998) em sua pesquisa observou que, embora reduzir o diâmetro das fibras resulte no aumento da quantidade de fibras por volume de concreto, a influência desse aumento na tenacidade à flexão é limitada apenas para níveis de deslocamentos pequenos, em que ocorre a formação das fissuras.

Já em relação ao comprimento, Callister Jr. (2008) afirma que não há transferência de cargas nas extremidades das fibras, como exibido na Figura 10. Assim, conforme Askeland e Wright (2014), um maior comprimento das fibras contribui para a capacidade de sustentação de cargas das mesmas. Entretanto, Mehta e Monteiro (2008) ressaltam que a adoção de fibras com fator de forma superior a 100 pode propiciar a formação de ouriços, conforme será descrito no item 3.2.1.

Figura 10 – Padrão de deformação na matriz que envolve uma fibra submetida a uma carga de tração



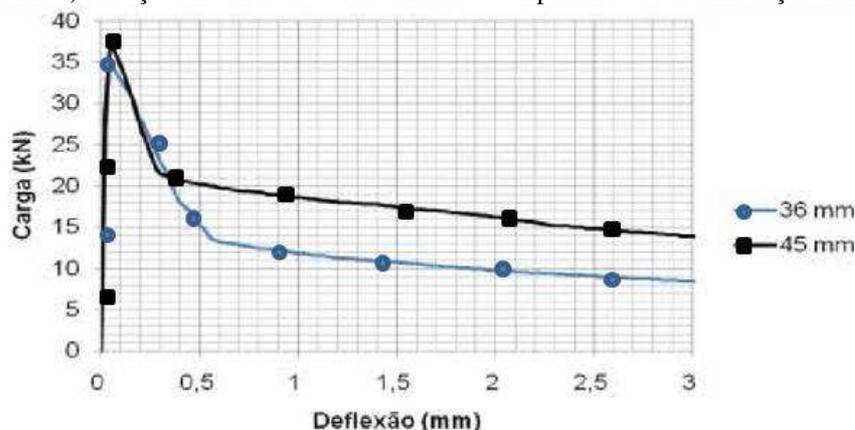
Fonte: Callister Jr. (2008).

Villares (2001) afirma que o emprego de fibras com pequeno comprimento facilita o arrancamento das mesmas durante a aplicação de tensão no compósito. Já para comprimentos acima do crítico, Bentur e Mindess (2007) citam que grande parte das fibras escoam, de modo a atingir o seu máximo potencial. Portanto, o aumento no comprimento da fibra está associado com o aumento da resistência e também com a forma de ruptura do compósito (VILLARES, 2001).

Nunes (1998) concluiu por meio de seu estudo que para baixos teores de fibras o aumento do comprimento das fibras interfere de modo mais relevante que a redução do diâmetro na tenacidade à flexão do CRFA. Além disso, Nunes (1998) também concluiu que para deslocamentos maiores, em que as fibras interceptam as fissuras, o comprimento das fibras influencia de modo significativo na tenacidade.

Figueiredo, Ceccato e Torneri (1997) observaram por meio de ensaios de tenacidade realizados conforme a norma JSCE-SF4: 1984 que ao adicionar fibras de aço com mesma seção transversal e diferentes comprimentos ao concreto, a resistência após a fissuração foi maior para o compósito com adição de fibras de maior comprimento. Na Figura 11 são apresentadas as curvas obtidas por Figueiredo, Ceccato e Torneri (1997).

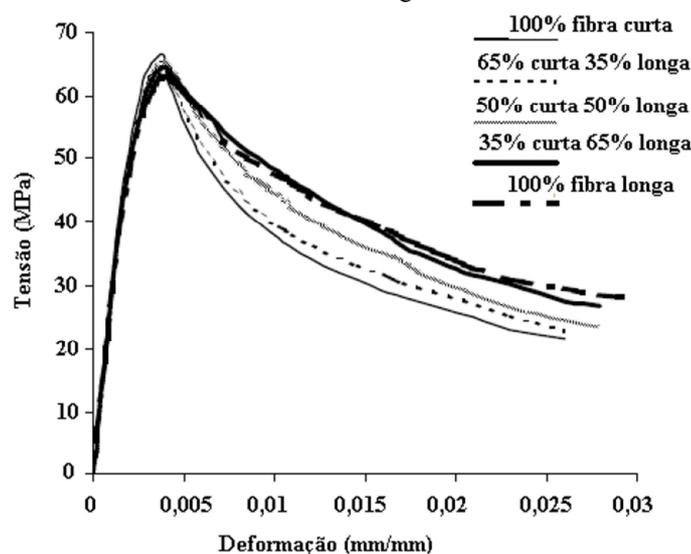
Figura 11 – Curvas médias de carga por deflexão obtidas por meio de ensaio de tração na flexão de concretos ($f_{ck} = 30$ MPa) reforçados com fibras com diferentes comprimentos e mesma seção transversal



Fonte: Adaptado de Figueiredo, Ceccato e Torneri (1997).

Na pesquisa realizada por Bhargava, Sharma e Kaushik (2006) foram misturadas fibras de aço curtas, com comprimento de 25 mm e fator de forma de 20 e fibras longas com comprimento de 50 mm e fator de forma de 40, em diferentes proporções e com mesmo volume total. Como resultado, obtiveram-se as curvas de tensão por deformação apresentadas na Figura 12.

Figura 12 – Curvas de tensão por deformação para compósitos com diferentes proporções de fibras de aço curtas e longas



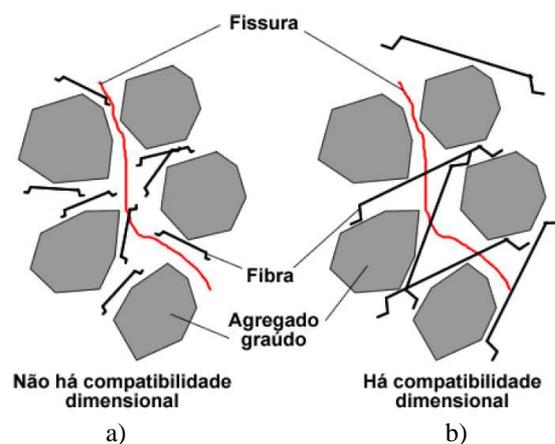
Fonte: Adaptado de Bhargava, Sharma e Kaushik (2006).

A partir da Figura 12, pode-se observar que para os compósitos com maior volume de fibras curtas, tem-se uma maior tensão de pico e uma menor tenacidade pós-pico. Já para o compósito com maior proporção de fibras longas, pode-se observar uma redução na tensão de pico e um aumento da tenacidade pós-pico.

Figueiredo (2011b) salienta que ao adotar grandes comprimentos de fibras, tem-se dois grandes inconvenientes. O primeiro inconveniente é a limitação na mobilidade da mistura e o segundo inconveniente é que ao adotar comprimentos maiores que o crítico, a fibra se rompe no instante em que a fissura surge, o que diminui a resistência residual. Dessa forma, as fibras comercializadas para reforçarem concretos com resistências convencionais apresentam comprimentos menores que o crítico, fazendo que o mecanismo de reforço seja comandado pelo arrancamento da fibra e garantindo a tenacidade do compósito.

Vale ressaltar que a dimensão do agregado graúdo também interfere no comprimento adequado a ser utilizado. A Figura 13a apresenta a situação em que a fibra possui o comprimento inadequado, pois não há compatibilidade dimensional entre elas e o agregado graúdo e, assim, poucas fibras trabalham como ponte de transferência de tensões. Já a Figura 13b apresenta a situação em que as fibras possuem o comprimento adequado, uma vez que há compatibilidade dimensional entre elas e o agregado graúdo e, dessa forma, as fibras trabalham de forma eficiente (FIGUEIREDO, 2000).

Figura 13 – a) Comprimento incorreto das fibras, impossibilitando que trabalhem eficientemente;
b) Comprimento correto, possibilitando que as fibras trabalhem corretamente



Fonte: Barros (2009).

2.5.4 Orientação e distribuição das fibras

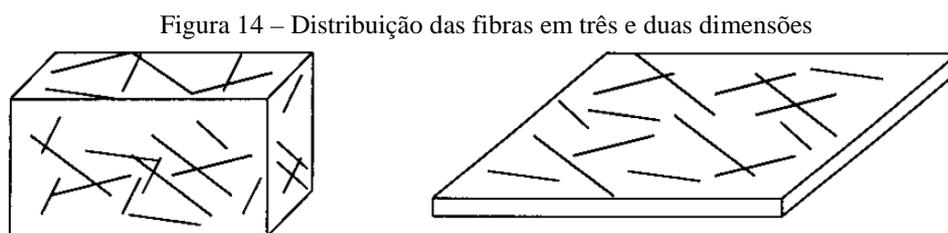
Guimarães e Figueiredo (2003) citam que, normalmente, a distribuição das fibras ocorre de forma aleatória nas três dimensões dos elementos. Entretanto, Quinino (2015) ressaltava que

não é possível comprovar que a distribuição das fibras na matriz ocorra de forma uniforme e que a orientação se dê de modo aleatório, uma vez que há como verificar uma variação em valores medidos e uma dispersão em resultados de ensaios já realizados. Tal fato pode ser justificado, pois durante a moldagem das estruturas, as fibras podem assumir posições preferenciais.

Akçay e Tasdemir (2012) afirmam que no caso do concreto vibrado, as fibras tendem a apresentar orientação perpendicular à direção da concretagem. Aguado e Laranjeira (2007) acrescentam que a adoção de vibradores internos pode causar um excesso de pasta e uma escassez de fibras na região da vibração.

A dimensão das amostras também afeta de forma indireta a orientação das fibras, uma vez que as fibras próximas às paredes das formas tendem a permanecer paralelas a essas superfícies. Esse “efeito parede” traz como consequência distribuições distintas para estruturas com diferentes dimensões (SUURONEN et al., 2013). Entretanto, Oliveira Júnior (2012) ressalta que o “efeito parede” pode ser minimizado ao adotar fibras com comprimento duas ou três vezes menores que a menor dimensão dos corpos de prova.

Conforme Guimarães e Figueiredo (2003), no caso de seções finas, como revestimentos com concreto projetado e pavimentos, a distribuição das fibras ocorre em duas dimensões e, assim, tem-se um aumento na tenacidade principalmente na direção paralela ao plano da seção. A Figura 14 apresenta a distribuição das fibras em três e duas dimensões.



Fonte: Guimarães e Figueiredo (2003).

Outro fator que interfere no alinhamento predominante das fibras na matriz do concreto é a direção empregada na moldagem das amostras. Velasco (2008) em sua pesquisa avaliou amostras prismáticas de CRFA sujeitas à tração direta, moldadas na direção paralela (horizontal) e perpendicular (vertical) ao plano de vibração. Por meio das Figuras 15 e 16, pode-se perceber a diferença no modo de ruptura das vigas ensaiadas devido à orientação das fibras, que é fortemente influenciada pela direção de moldagem.

Figura 15 – Modo de ruptura em amostra prismática moldada na direção perpendicular (vertical) ao plano de vibração, do compósito reforçado com 2% de fibras de aço



Fonte: Velasco (2008).

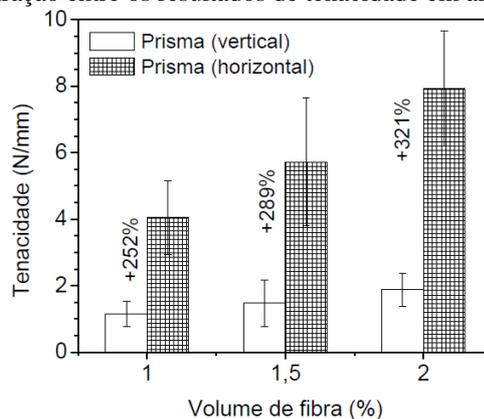
Figura 16 – Modo de ruptura em amostra prismática moldada na direção paralela (horizontal) ao plano de vibração, do compósito reforçado com 2% de fibras de aço



Fonte: Velasco (2008).

A maior diferença constatada devido à orientação das fibras está na máxima tensão pós-fissuração e na capacidade de absorção de energia, sendo que para um volume de fibras de 2%, a tenacidade dos prismas moldados na direção horizontal foi 321% superior em relação aos prismas moldados na vertical, conforme pode ser observado na Figura 17 (VELASCO, 2008).

Figura 17 – Comparação entre os resultados de tenacidade em amostras prismáticas de CRFA



Fonte: Velasco (2008).

De acordo com Carvalho (2012), a eficiência da fibra em transferir tensão por meio das fissuras formadas nos compósitos está diretamente relacionada com sua inclinação em relação ao esforço principal de tensão. Dessa forma, a máxima eficiência é obtida quando a fibra está perfeitamente alinhada em relação à direção da força e a mínima eficiência ocorre quando a fibra está perpendicular à força.

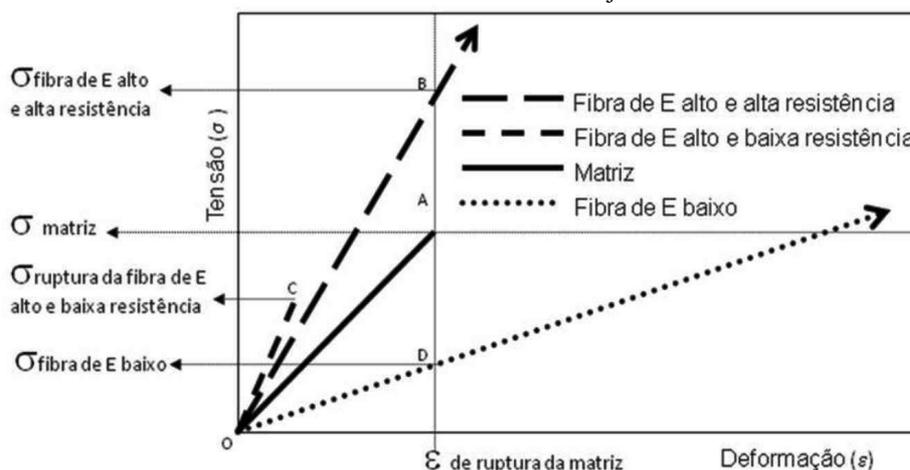
Diante da importância da orientação e da distribuição das fibras no comportamento mecânico dos compósitos, faz-se necessário considerar seus efeitos para a aplicação do CRFA.

2.5.5 Propriedades mecânicas das fibras e da matriz do concreto

Conforme Figueiredo (2011b), tendo em vista que durante a formação de fissuras as tensões são transferidas da matriz de concreto para as fibras e, assim, a resistência da fibra é acionada, tem-se que, ao aumentar a resistência das fibras, a capacidade resistente que as mesmas podem proporcionar ao compósito também aumenta.

O módulo de elasticidade e a resistência mecânica das fibras são as propriedades mecânicas que mais influenciam na capacidade de reforço que as mesmas podem proporcionar ao concreto. A Figura 18 apresenta curvas tensão-deformação de uma matriz de concreto reforçada com três tipos distintos de fibras: com baixo módulo de elasticidade, alto módulo de elasticidade e baixa resistência, e com alto módulo de elasticidade e alta resistência mecânica, considerando como elástico perfeito o comportamento do compósito (FIGUEIREDO, 2011a).

Figura 18 – Diagrama de tensão por deformação elástica me matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto

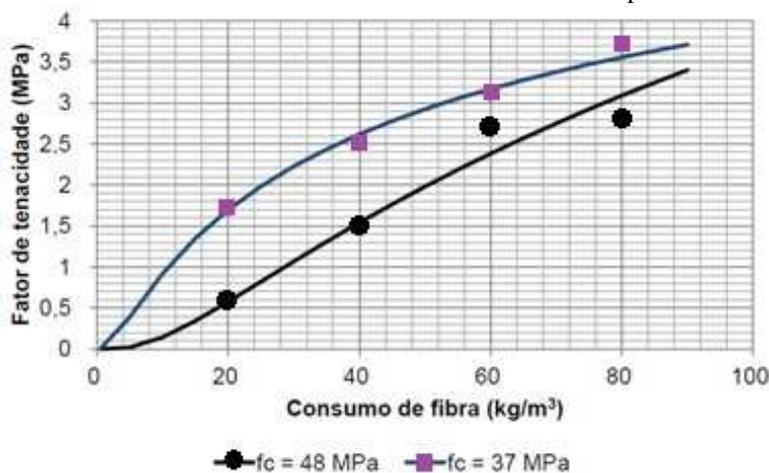


Fonte: Figueiredo (2011a).

De acordo com Kormann, Portella e Pereira (2001) as fibras com alto módulo de elasticidade, como as fibras de aço, carbono e vidro, resultam em compósitos com elevada rigidez, absorção de cargas dinâmicas e resistência à tração. Já as fibras com baixo módulo de elasticidade e maior alongamento, como as fibras de polietileno e polipropileno, possuem maior capacidade de absorver energia, porém não geram um aumento na resistência final.

Em relação à matriz de concreto, tem-se que, ao aumentar a resistência da mesma, há uma redução no desempenho do compósito, principalmente para baixos volumes de fibras, conforme exposto na Figura 19 (FIGUEIREDO, 2011a). Tal fato ocorre, pois ao aumentar a resistência da matriz de concreto, há uma maior aderência entre as fibras e a matriz e, assim, as fibras sofrem ruptura antes de escorregarem. Com isso, há uma redução na tenacidade do compósito, uma vez que a energia gasta para romper as fibras é menor que a energia necessária para o arrancamento das mesmas (VILLARES, 2001).

Figura 19 – Curvas de dosagem conforme o critério JSCE-SF4 para uma mesma fibra de aço em concretos projetados via seca com diferentes valores de resistência à compressão da matriz

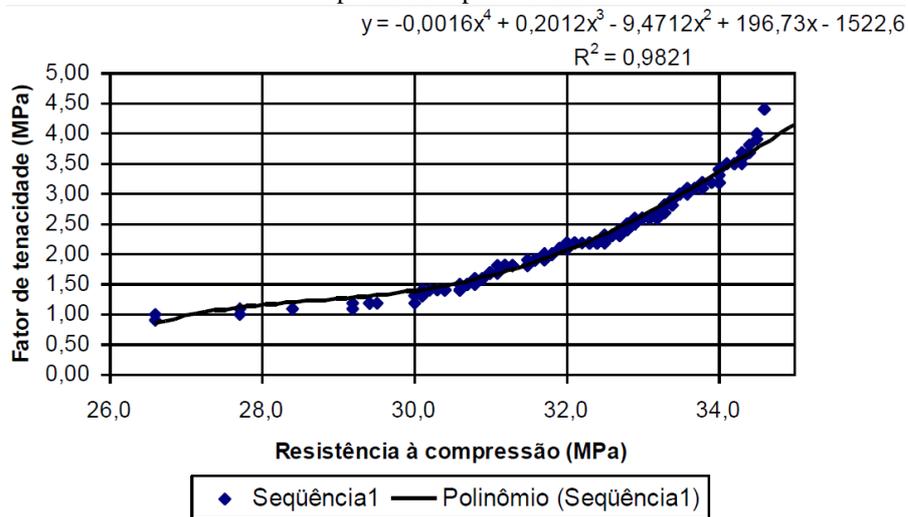


Fonte: Adaptado de Figueiredo (1997).

Figueiredo (2011a) ainda afirma que, para matrizes com maiores resistências, há uma “redução” do comprimento crítico das fibras, de modo que ocorre um aumento no número de ruptura de fibras durante a transferência de tensões da matriz para as fibras no processo de fissuração. Além disso, como o módulo de elasticidade do CRF depende principalmente do módulo da matriz, quanto maior o módulo de elasticidade da matriz, maior deverá ser o volume de fibras para que o compósito apresente um comportamento próximo ao elasto-plástico perfeito, ou seja, maior deverá ser o volume crítico das fibras (FIGUEIREDO, 2011b).

Vale ressaltar, entretanto que, nos casos em que a fibra possui elevada resistência e, assim, tem-se uma menor possibilidade do comprimento superar o crítico com o aumento da resistência da matriz, o comportamento do compósito pode ser distinto do citado. Como exemplo há o estudo realizado por Figueiredo, Mourad e Carvalho (2000), em que os autores obtiveram resultados que demonstram o aumento da resistência residual pós-fissuração para matrizes do concreto com maiores resistência à compressão, conforme exposto na Figura 20. Tal fato ocorre, pois, com a melhoria da qualidade da matriz, há uma maior aderência entre a fibra e a matriz e devido a maior resistência das fibras, essas não rompem prematuramente.

Figura 20 – Correlação entre os valores de fator de tenacidade e resistência à compressão para CRFA aplicado em pavimentos



Fonte: Figueiredo, Mourad e Carvalho (2000).

CAPÍTULO 3

COMPORTAMENTO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

3.1 INTRODUÇÃO

O emprego do concreto reforçado com fibras tem aumentado consideravelmente devido às significativas vantagens que as fibras incorporam ao compósito. Diante disso, faz-se necessário o conhecimento e a quantificação das propriedades desses concretos no estado fresco e no estado endurecido (GACEZ, 2005).

3.2 COMPORTAMENTO NO ESTADO FRESCO

De acordo com Sobral (2013), visando à qualidade do concreto no estado endurecido, torna-se desejável que o concreto no estado fresco apresente propriedades que assegurem a obtenção de uma mistura de fácil transporte, lançamento e adensamento, sem segregação, e que após o endurecimento, apresente-se homogênea e com mínimo de vazios. Assim, considerações a respeito da trabalhabilidade e do teor de ar incorporado no CRF são de suma importância.

3.2.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade pode ser definida como a propriedade do concreto no estado fresco que caracteriza sua maior ou menor capacidade de ser empregado com certa finalidade, sem perda de sua homogeneidade. Já a consistência está relacionada ao grau de umidade do concreto, esse que define o grau de plasticidade da mistura, ou seja, maior ou menor

facilidade de se deformar sob a ação de cargas. Dessa forma, a consistência é um dos principais fatores que influenciam na trabalhabilidade (PETRUCCI, 1998).

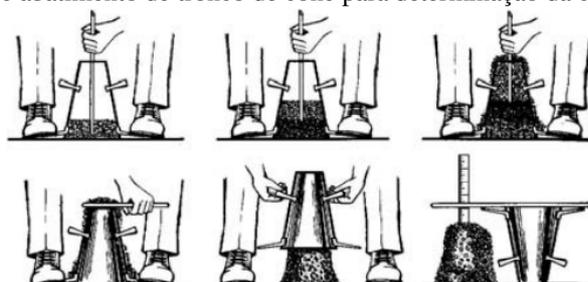
A adição de fibras ao concreto altera a consistência do mesmo e, por consequência, interfere na trabalhabilidade. Tem-se que no CRF, as fibras bloqueiam a mobilidade dos agregados, de modo que a fluidez da mistura é reduzida. Esse bloqueio depende do material constituinte das fibras, do teor e da geometria das fibras. Além disso, o fator de forma e o módulo de elasticidade das fibras, esses que definem o grau de rigidez das mesmas, interferem diretamente na trabalhabilidade do CRF, uma vez que fibras mais rígidas causam maior perda de mobilidade dos concretos (FIGUEIREDO, 2011a).

Medeiros (2012) acrescenta que a quantidade e o tipo de superplastificante adotado e o tipo de misturador empregado para a fabricação da mistura também interferem na trabalhabilidade do concreto. Mehta e Monteiro (2008) citam que, embora a consistência do CRF seja baixa, o lançamento e a compactação são melhores do que o concreto sem fibras com baixa consistência.

De acordo com Carnio e Lintz (2009), a redução da fluidez com a adição de fibras ao concreto ocorre porque as fibras apresentam grande área superficial. Com isso, há maior contato entre as próprias fibras e entre as fibras e os outros componentes do CRF e, por consequência, maior atrito entre os materiais.

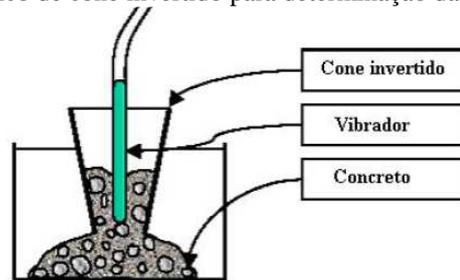
A fim de avaliar a trabalhabilidade do CRF, o ACI 544.3R: 2008 recomenda três métodos distintos. O primeiro método é o ensaio de abatimento do tronco de cone (Figura 21), o segundo é o ensaio de tronco de cone invertido (Figura 22) e o terceiro método é o ensaio Vebe (Figura 23). Conforme Medeiros (2012), o ensaio Vebe define a consistência do CRF como o tempo necessário para que o concreto contido em aparato com formato troncônico seja remoldado para forma cilíndrica e, assim, quanto menor o índice Vebe maior é a trabalhabilidade.

Figura 21 – Ensaio de abatimento de tronco de cone para determinação da consistência do concreto



Fonte: Royer et al. (2005).

Figura 22 – Ensaio tronco de cone invertido para determinação da consistência do concreto



Fonte: Figueiredo (2000).

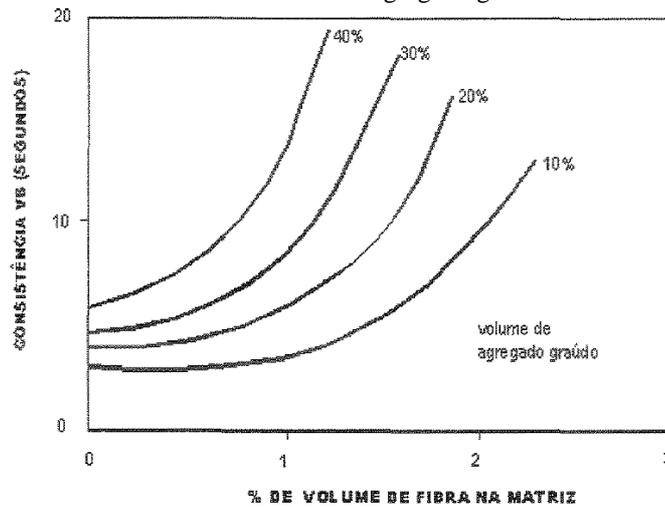
Figura 23 – Equipamento e procedimentos utilizados no ensaio Vebe



Fonte: Hermann (2016).

A dimensão do agregado graúdo também interfere na trabalhabilidade da mistura, uma vez que, caso o diâmetro máximo do agregado for diversas vezes maior que o comprimento da fibra, a trabalhabilidade é reduzida. A fim de minimizar essa redução, o ACI 544.3R: 2008 recomenda o uso de agregados com dimensão máxima inferior a 19 mm. A Figura 24 apresenta a influência do volume do agregado graúdo e do volume de fibras na compactidade do concreto reforçado com fibras de aço, sendo que a compactidade foi avaliada pelo ensaio Vebe.

Figura 24 – Influência do volume de fibras e de agregado graúdo na consistência do CRFA



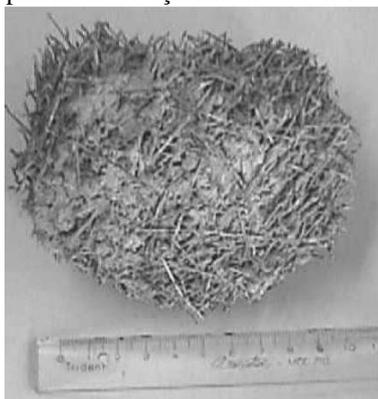
Fonte: Villares (2001).

Villares (2001) acrescenta que o método de compactação adotado também interfere na fluidez da mistura, pois dependendo do diâmetro e do comprimento das fibras em relação ao tipo de vibração e ao molde, a vibração pode causar o alinhamento e a rotação das fibras em certas direções. Assim, em geral, a vibração externa é preferível em relação à vibração interna, a fim de evitar a segregação.

Figueiredo (2011a) afirma que além da perda da fluidez, a adição de fibras ao concreto pode promover o aparecimento dos chamados “ouriços”, estes que são aglomerados de fibras que formam bolas (Figura 25). Os ouriços causam a redução do teor de fibras distribuído de forma homogênea e gera pontos fracos nos locais em que os ouriços se alojam, uma vez que nesses locais há maior porosidade.

Tem-se que a formação de ouriços é causada pela mistura inadequada das fibras ao concreto, seja pelo fator de forma da fibra ou pela adição das fibras à mistura de maneira descuidada. No caso do concreto projetado, se a formação de ouriços não for evitada, os mesmos poderão obstruir o mangote usado para projeção, fato que pode interromper a operação (FIGUEIREDO, 2011a).

Figura 25 – Ouriço formado por fibras de aço misturadas de maneira inadequada ao concreto



Fonte: Figueiredo (2000).

3.2.2 Teor de ar incorporado

Segundo Mehta e Monteiro (2008), certa quantidade de ar é aprisionada ao concreto durante a mistura. Tem-se que os vazios decorrentes de ar incorporado ao concreto são esféricos e normalmente apresentam diâmetro entre 50 e 200 μm . Assim, tais vazios podem afetar negativamente a resistência.

De acordo com Mansur, Nascimento e Mansur (2007), a maioria dos materiais compósitos reforçados apresentam maior teor de ar incorporado que os materiais sem adição de

reforço. Góis (2010) complementa que o aumento do teor de ar incorporado em concretos, embora possa reduzir a resistência do mesmo, favorece a trabalhabilidade da mistura.

Portanto, o teor de ar é um indicativo de possíveis prejuízos no comportamento mecânico dos compósitos reforçados com fibras, uma vez que caso o teor de ar for superior ao previsto, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade podem sofrer redução. Além disso, pode haver prejuízos estéticos, como a formação de macro-bolhas superficiais (GÓIS, 2010).

No Brasil, há dois métodos de ensaio distintos normatizados para quantificar o teor de ar incorporado ao concreto. O primeiro método é especificado pela norma ABNT NBR NM 47 - Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico (2002) e o segundo método é normatizado pela ABNT NBR 9833 - Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico (2009).

O método pressométrico apresenta como desvantagem a necessidade em se utilizar um aparato medidor de ar incorporado. Já o método gravimétrico apresenta como desvantagem o fato de ser preciso possuir o valor da massa específica teórica, totalmente compactada, como parâmetro para calcular o teor de ar incorporado (SANTANA, 2008).

3.3 COMPORTAMENTO NO ESTADO ENDURECIDO

O bom comportamento do CRF no estado endurecido é caracterizado por sua capacidade em suportar os esforços solicitantes. Diante disso, nos itens a seguir são apresentadas as características de desempenho do CRF em várias situações.

3.3.1 Módulo de elasticidade longitudinal

O nível de deformação que uma estrutura sofre depende da intensidade da tensão aplicada. Para diversos materiais submetidos a níveis de tensão relativamente baixos, a deformação e a tensão são proporcionais, em que a constante de proporcionalidade é o módulo de Young ou módulo de elasticidade (E), conforme a Lei de Hooke (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2012).

Nas situações em que há proporção entre a tensão e a deformação, a deformação é elástica, de modo que em um gráfico de tensão (ordenada) em função da deformação (abscissa) há

um segmento linear e a inclinação deste segmento corresponde ao módulo de elasticidade (E). Além disso, sabe-se que diferentemente da deformação plástica, a deformação elástica não é permanente, ou seja, após a liberação da tensão imposta, a peça retorna à sua forma original (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2012).

A rigidez de um material está relacionada com seu módulo de elasticidade e também sofre interferências das dimensões do componente. Assim, uma peça constituída por um material com elevado módulo de elasticidade sujeita a tensões que causam apenas deformação elástica apresenta mudanças em suas dimensões menores se comparada a uma peça constituída por um material com baixo módulo de elasticidade (ASKELAND, WRIGHT, 2014).

Tem-se que para materiais metálicos, o valor módulo de elasticidade sofre grande interferência das forças de ligações atômicas. Já nas cerâmicas, esse valor sofre influência do nível de porosidade. Nos compósitos, por sua vez, o módulo de Young depende da rigidez dos seus componentes individuais e das quantidades de cada componente (ASKELAND, WRIGHT, 2014).

No caso do concreto, o cimento hidratado não apresenta sempre a mesma estrutura, uma vez que é constituído por cristais de diferentes espécies. Além disso, o módulo de elasticidade é afetado pela microestrutura da zona de transição do concreto. Dessa forma, o módulo de elasticidade do concreto varia em função das matérias-primas utilizadas e de sua resistência mecânica (GÓIS, 2010).

Já para o concreto reforçado com fibras, o módulo de elasticidade é a soma dos módulos da fibra e da matriz multiplicadas pelos seus volumes, respectivamente. Assim, como o volume de fibras é pequeno se comparado ao volume da matriz, o módulo de elasticidade do CRF depende principalmente do módulo da matriz (FIGUEIREDO, 2011b).

3.3.2 Resistência à compressão

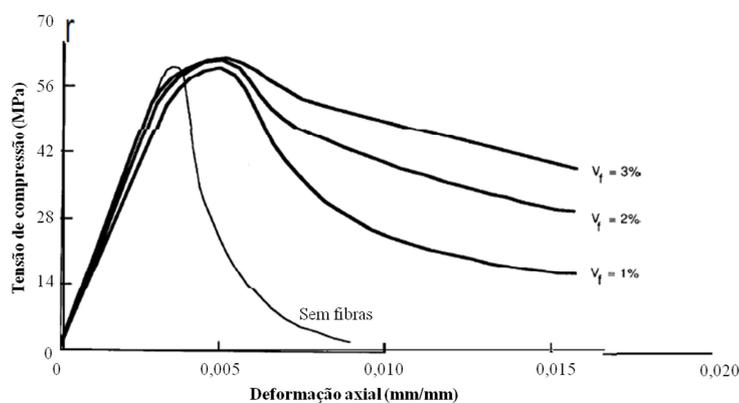
De acordo com Neville e Brooks (2013), a resistência à compressão normalmente é considerada como a principal propriedade do concreto, ainda que em muitos casos a durabilidade, a impermeabilidade e a estabilidade de volume possam ser mais importantes. A resistência indica de modo geral a qualidade do concreto, pois a mesma está diretamente relacionada com a estrutura da pasta de cimento.

Em algumas situações, a ruptura é identificada com o surgimento de fissuras, mas no caso do concreto há pequenas fissuras mesmo antes do mesmo ser submetido a ações externas. Assim, a resistência do concreto está relacionada com a tensão necessária para causar a sua ruptura, mesmo sem que haja indícios visíveis de ruptura externa. No ensaio de resistência à compressão, a amostra é considerada rompida quando essa não suporta um acréscimo de carga (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Ao adicionar fibras ao concreto não se tem como objetivo alterar sua resistência à compressão. Estudos já realizados a respeito de concretos com fibras demonstram que o comportamento à compressão de concretos com volumes de fibras comumente empregados (menores do que 2%) sofre menor interferência que o comportamento à tração e à flexão (MEDEIROS, 2012).

Segundo o ACI 544.4R: 2009, a adição de fibras de aço em teores menores que 2% não acrescentam melhoras na resistência à compressão do concreto, podendo até levar a uma pequena redução nessa propriedade, conforme apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Influência do teor de fibras no comportamento à compressão do concreto com fibras de aço



Fonte: ACI 544.4R: 2009.

Em concretos em que são empregados maiores volumes de fibra, por sua vez, pode haver acréscimo ou decréscimo na resistência e no módulo de elasticidade. Os acréscimos ocorrem devido à otimização da matriz com relação ao empacotamento da mistura granular seca e também devido à utilização de misturador e vibração apropriados. Já os decréscimos decorrem de aspectos negativos gerados, como o aumento do teor de ar incorporado (MEDEIROS, 2012).

De acordo com o ACI 544.1R: 2002, para adição de fibras ao concreto em frações volumétricas acima de 1,5%, a carga última na compressão é sensivelmente afetada, nos

quais podem ser observados acréscimos entre 0 e 15%. Em pesquisas realizadas por diversos autores, obteve-se um aumento nos valores de resistência à compressão devido à adição de fibras de aço, conforme é apresentado na Tabela 2.

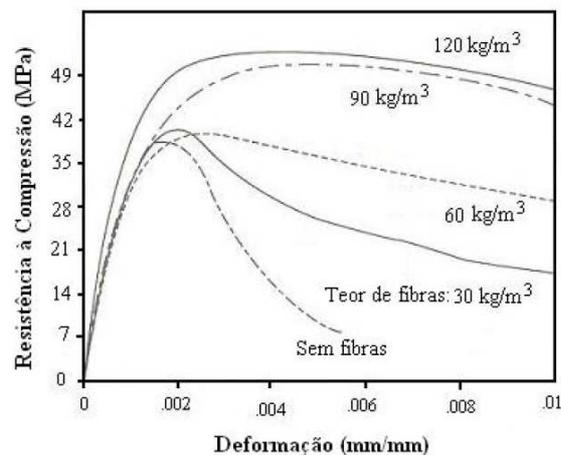
Tabela 2 – Pesquisas realizadas por diferentes autores que resultaram em ganhos na resistência à compressão (f_c) com a adição de fibras de aço ao concreto

Autores	V_f (%)	Ganho de f_c em relação ao concreto sem fibras (%)
Bhargava, Sharma e Kauskik (2006)	2	17,4
Mohammadi, Sigh e Kaushik (2008)	1,0	3,0
	2,0	26,0
Arif (2014)	0,38	14
	0,77	18,0
Perumal (2015)	1,5	12,4

Fonte: Vitor (2017).

Oliveira (2005) acrescenta que o aumento da ductilidade possui relevância no comportamento à compressão do concreto com fibras. No caso do concreto de alta resistência, esse apresenta uma tendência em ser mais frágil que o concreto de resistência normal. Dessa forma, os concretos de alta resistência precisam de um maior volume de fibras para que tenham sua ductilidade melhorada e, por consequência, a resistência à compressão. A Figura 27 apresenta a variação na resistência à compressão de concretos reforçados com diferentes volumes de fibras de aço.

Figura 27 – Comportamento do concreto reforçado com fibras de aço sob esforço de compressão



Fonte: Balaguru e Shah (1992).

3.3.3 Resistência à tração

A resistência à tração do concreto é obtida, de modo geral, por meio de três métodos de ensaios distintos, que são: tração direta, tração indireta por compressão diametral e tração na flexão, sendo que conforme Neville (2016) os valores de resistência à tração obtidos em cada método de ensaio são distintos.

Conforme Sudano (2010), a adição de fibras em volume suficiente e com resistência e módulo e elasticidade apropriados resulta na necessidade de uma maior quantidade de energia para a formação e a propagação das fissuras. Dessa forma, há um aumento na resistência à tração do compósito permitindo o aumento de solicitações externas. Entretanto, Quinino (2015) ressalta que o aumento da resistência à tração sofre interferência do volume de fibras empregado e do alinhamento das fibras na direção das tensões principais de tração.

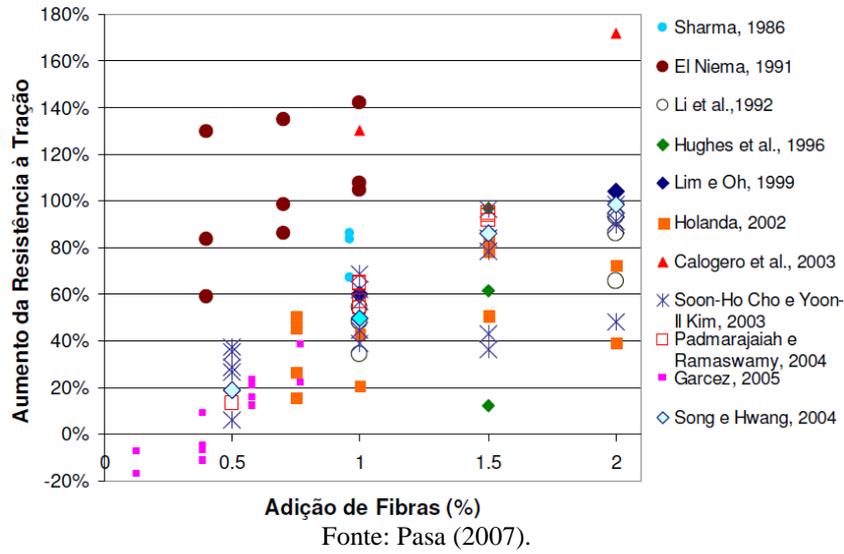
De acordo Bentur e Mindess (2007), para o aumento da resistência à tração se faz necessário a adição de altos teores de fibras. Desse modo, o ACI 544.1R: 2002 apresenta que ao adicionar um volume de 1,5% de fibra ao concreto, obtém-se um aumento na resistência à tração direta entre 30 e 40%.

Já em relação ao alinhamento das fibras, Gacez (2005) salienta que há um incremento na resistência à tração direta quando as fibras estão alinhadas na direção da tensão de tração, porém diversos fatores interferem na orientação e na distribuição das fibras, conforme exposto no item 2.5.4. Desse modo, o aumento na resistência à tração pode ser reduzido.

Diante do exposto, Bentur e Mindess (2007) afirmam que ao empregar 5% em volume de fibras alinhadas na direção da tração, pode-se obter um aumento na resistência à tração direta de até 133%. Já ao empregar o mesmo volume e tipo de fibras de forma aleatória, o aumento na resistência à tração pode ser irrelevante ou, em algumas situações, o aumento pode atingir até 60%.

Em relação à tração por compressão diametral, Pasa (2007) apresenta em sua pesquisa os resultados obtidos por diversos autores que avaliaram o concreto com adição de fibras aço. Como se pode observar na Figura 28, esses autores obtiveram um aumento nessa característica do CRFA.

Figura 28 – Aumento da resistência à tração por compressão diametral devido a adição de fibras de aço ao concreto

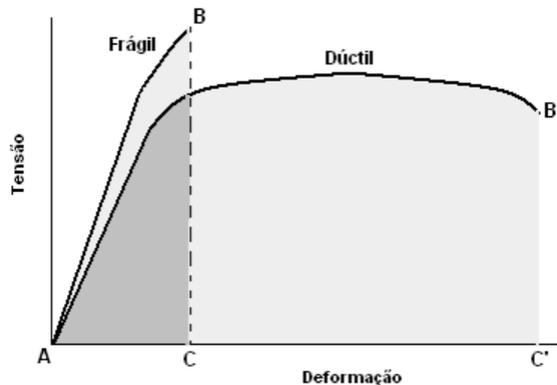


3.3.4 Tenacidade

A tenacidade pode ser definida como uma medida da habilidade de um material em absorver energia. Essa propriedade é empregada para caracterizar o material quanto à resistência à fratura, quando o mesmo é submetido a deformações estáticas ou dinâmicas ou quando é submetido a carregamentos de impacto (QUININO, 2015).

Callister Jr. (2008) afirma que, para um material ser caracterizado como tenaz, o mesmo deve apresentar resistência e ductilidade. Além disso, frequentemente, um material dúctil é mais tenaz que um material frágil, fato que está demonstrado na Figura 29. Dessa forma, embora o material frágil apresente um maior limite de resistência à tração e um maior limite de escoamento, o mesmo apresenta menor tenacidade devido à sua pequena ductilidade.

Figura 29 – Representações esquemáticas do comportamento tensão-deformação em tração para materiais frágeis e dúcteis carregados até a fratura



Fonte: Callister Jr. (2008).

Collins (2006) caracteriza de maneira específica a tenacidade ao fraturamento como a capacidade inerente do material em resistir determinada tensão na extremidade de uma trinca já presente no material sem que ocorra a fratura. Nesse caso, há um único nível de intensidade de tensões capaz de causar a fratura, denominado nível crítico e definido como a tenacidade à fratura.

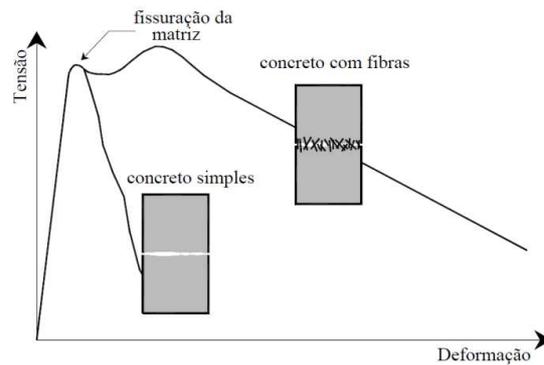
De acordo com Callister Jr. (2008), para pequenas taxas de deformação, a tenacidade pode ser definida com a área sob a curva de tensão por deformação em tração até o ponto de fratura, em que a unidade de medida é energia por volume do material. Entretanto, conforme Nunes (1998), esse conceito não é aplicável experimentalmente para o CRFA, uma vez que determinar a tensão após a fissuração da matriz é muito difícil.

Figueiredo (2011b) define a tenacidade para os materiais compósitos como a energia absorvida antes e após a fissuração da matriz quando o elemento está sob tensão, sendo que após a fissuração da matriz as fibras atuam de forma mais efetiva. Diante disso, para a presente pesquisa, a definição proposta por Figueiredo (2011b) é adotada.

Conforme Medeiros (2012), o CRF consegue suportar tensões e deformações consideravelmente maiores que o concreto convencional após atingir a tensão máxima. Segundo Oliveira (2005) o CRF pode sofrer ruína 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 das fibras. Desse modo, uma amostra de CRF suporta tensões e deformações mesmo após o início da primeira fissura, absorvendo mais energia até a ruptura (MEDEIROS, 2012).

Ao comparar o concreto simples com o CRFA, tem-se que após a fissuração da matriz a capacidade de carga do concreto simples é reduzida rapidamente. Já o CRFA apresenta uma tenacidade considerável, uma vez que as fibras retardam a abertura de fissuras, assim como pode ser observado na Figura 30 (VITOR, 2017).

Figura 30 – Comportamento mecânico de matrizes de concreto sem e com adição de fibras de aço



Fonte: Ferrari (2007).

Segundo Quinino (2015), a tenacidade do CRF pode ser obtida por meio do ensaio de tração direta, porém esse teste é de difícil execução. Diante disso, testes de flexão em vigas tem sido recomendados pela literatura para a determinação da tenacidade devido às facilidades de execução se comparados ao ensaio de tração direta. Além disso, a flexão em vigas simula situações de carregamento próximas às que ocorrem na prática.

Os ensaios frequentemente indicados pela literatura para a determinação da tenacidade oferecem índices de tenacidade e/ou resistência residual. Por meio desses índices, torna-se possível a análise desse comportamento do concreto reforçado com fibras.

CAPÍTULO 4

MÉTODOS DE ENSAIO PARA AVALIAÇÃO DA TENACIDADE

4.1 INTRODUÇÃO

A avaliação da tenacidade do concreto reforçado com fibras pode ser realizada por meio de alguns métodos de ensaio. Dentre esses ensaios há aqueles que adotam vigas prismáticas, aplicam punção em placas ou cilindros e há ensaios realizados por encunhamento.

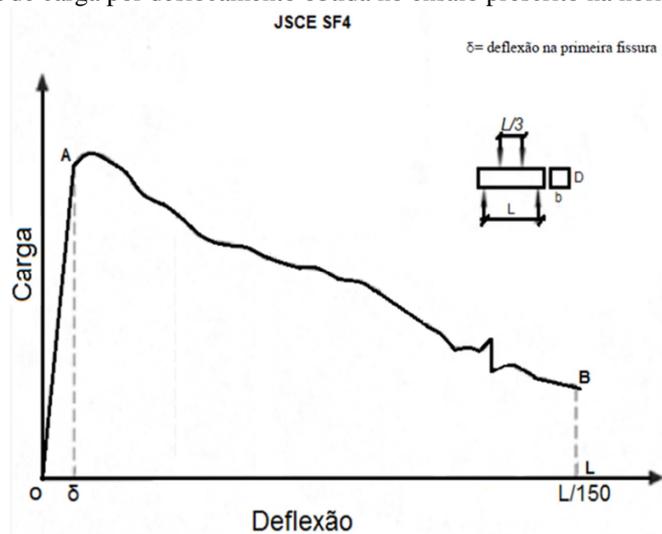
Diante disso, nesse capítulo são descritos métodos que podem ser empregados para avaliar a tenacidade do CRF.

4.2 ENSAIOS EM VIGAS

4.2.1 Método JSCE-SF4: 1984

Segundo a *Japanese Society of Civil Engineers – Steel Fiber 4* (JSCE-SF4), a tenacidade pode ser definida como a área sob a curva de carga por deslocamento obtida no ensaio de tração na flexão até o deslocamento limite de $L/150$, em que L é o vão adotado entre apoios na realização do ensaio, conforme apresentado na Figura 31. Tem-se que as dimensões dos corpos de prova empregados são 100 mm x 100 mm x 350 mm ou 150 mm x 150 mm x 500 mm com vãos de 300 mm e 450 mm, respectivamente. Além disso, a norma JSCE-SF4: 1984 estabelece que o comprimento da amostra ensaiada deve ser três vezes maior que a largura.

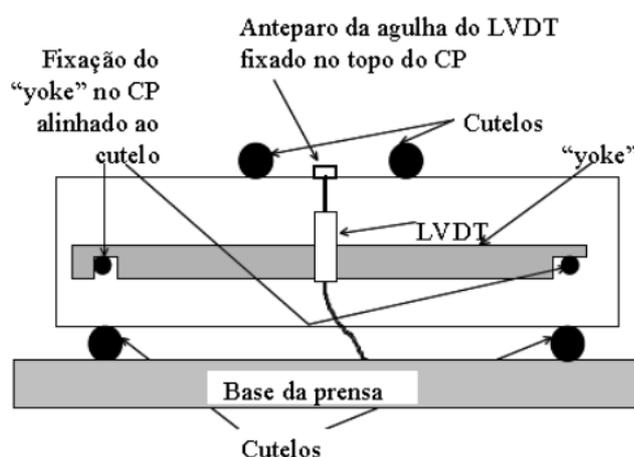
Figura 31 – Curva de carga por deslocamento obtida no ensaio prescrito na norma JSCE-SF4: 1984



Fonte: Adaptado de Pillar (2014).

O ensaio prescrito pela norma JSCE-SF4: 1984 consiste em aplicar carga em amostras prismáticas por meio de quatro cutelos posicionados a cada terço do vão, sendo que dois cutelos são posicionados na face superior e dois cutelos são posicionados nas extremidades da face inferior da amostra, conforme exibido na Figura 32. Além disso, para a realização do experimento, faz-se necessária a utilização de prensas servo controladas e com capacidade de controle de deslocamento (BORGES; MONTE; FIGUEIREDO, 2013).

Figura 32 – Posicionamento do corpo de prova, cutelos e LVDT em ensaio de tração na flexão



Fonte: Figueiredo (2011b).

Para o controle do deslocamento é utilizado um transformador diferencial variável linear (LVDT) a fim de garantir a acuidade necessária para o levantamento da curva carga por deslocamento (CAMARGO, 2016). Esse transformador, conforme apresentado nas Figuras 32 e 33 deve estar apoiado no suporte denominado *yoke*.

De acordo com Arif (2014), o dispositivo *yoke* pode ser caracterizado como um acessório para fixar e posicionar os equipamentos de medição necessários durante a execução do ensaio. Para a realização do ensaio, o *yoke* deve ser posicionado na linha neutra dos corpos de prova.

Figura 33 – Configuração do ensaio normatizado pela JSCE-SF4



Fonte: Monte, Toaldo e Figueiredo (2014).

A velocidade para o deslocamento da prensa é estabelecida entre $L/1500$ e $L/3000$ mm/min. Dessa forma, o método de ensaio permite o uso máquinas com controle tipo *open-loop*, ou seja, em que a velocidade de deslocamento da máquina é mantida constante e não a velocidade de deslocamento do corpo de prova. Diante disso, o ensaio pode apresentar instabilidade pós-pico, fato que não ocorre em um sistema de controle fechado de deslocamento (*closed-loop*) (SALVADOR; FIGUEIREDO, 2013). Conforme Monte, Toaldo e Figueiredo (2014) a instabilidade pós-pico é identificada pelo aumento do espaçamento entre pontos na curva de carga por deslocamento.

A partir da curva de carga por deslocamento, faz-se possível calcular o fator de tenacidade (FT) e o módulo de ruptura (MOR) (SALVADOR, 2013). O fator de tenacidade é obtido por meio da Equação 3.

$$FT = \frac{T_b}{\delta_{ab}} \times \frac{L}{bh^2} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que FT é o fator de tenacidade à flexão para área abaixo a curva de carga por deslocamento entre 0 e $L/150$ (MPa); T_b é a tenacidade à flexão até o limite de deflexão de δ_{ab} ; δ_{ab} é a deflexão equivalente a $L/150$; L é o vão entre apoios no ensaio de flexão (mm); b é a largura do corpo de prova ensaiado (mm) e h é a altura do corpo de prova (mm).

De acordo com Pillar (2014), para calcular a tensão resistente à flexão do compósito, deve-se empregar a Equação 4, por meio da qual se obtém o módulo de ruptura do compósito (*MOR*).

$$MOR = \frac{P_{pico} \times L}{b \times h^2} \quad (\text{Equação 4})$$

Em que *MOR* é o módulo de ruptura do compósito (MPa); *P_{pico}* é a carga máxima no instante em que ocorre a fissuração (N); *L* é o vão entre apoios no ensaio de flexão (mm); *b* é a largura da amostra ensaiada (mm) e *h* é a altura da amostra (mm).

O ensaio prescrito pela norma japonesa possui como vantagens o fato de apresentar uma concepção simples e, por isso, é o mais empregado mundialmente para caracterizar o CRF (PILLAR, 2014) e os dados de tenacidade encontrados são pouco afetados por deformações externas ou pela máquina de ensaio utilizada (SALVADOR, 2013).

Entretanto, como desvantagens, tem-se que o fator de tenacidade (FT) sofre grande influência da geometria do corpo de prova e os comportamentos pré e pós-fissuração não são distinguidos pelos parâmetros de tenacidade (PILLAR, 2014). Além disso, curvas distintas de carga por deslocamento podem resultar em um mesmo valor de FT, o ensaio possui um deslocamento máximo para finalizar e o comportamento após a primeira fissura não é discriminado pelo FT (BENTUR; MINDESS, 2007).

Vale ressaltar que segundo Islam (2012), o ensaio prescrito pela norma japonesa é indicado para o ensaio de compósitos com resistência à compressão média menor que 60 MPa, uma vez que para resistências maiores ocorre a ruptura frágil do material.

4.2.2 Método ASTM C1609: 2012

O ensaio normatizado pela ASTM C1609: 2012 é uma variação do método japonês e também visa analisar o comportamento do concreto reforçado com fibras sujeito à flexão. Para tal análise, utilizam-se parâmetros obtidos a partir da curva carga por deslocamento obtida no experimento. Entretanto, para a realização desse experimento, faz-se necessário um equipamento dotados de sistema fechado de controle de velocidade de deslocamento.

O sistema fechado é característico por controlar a velocidade de deformação por meio de um sistema de medida da própria velocidade, isto é, a velocidade do ensaio é definida a partir da velocidade constante de deformação obtida por transdutor conectado ao corpo de

prova. Diante dessa maior exigência, um maior nível de precisão nos resultados é garantido (SALVADOR; FIGUEIREDO, 2013; SALVADOR; FERNANDES; FIGUEIREDO, 2015).

As amostras empregadas no ensaio são prismáticas com dimensões de 100 mm x 100 mm x 350 mm e vão de 300 mm ou com dimensões de 150 mm x 150 mm x 500 mm e vão de 400 mm. Além disso, tem-se que a largura e a altura das amostras utilizadas devem ser três vezes maiores que o comprimento da fibra empregada (ASTM C1609: 2012). Assim, para amostras com largura e altura de 100 mm, o comprimento máximo da fibra deve ser 33,3 mm e para amostras com largura e altura de 150 mm, o comprimento de fibra a ser utilizada deve ser inferior a 50 mm.

O procedimento de ensaio é próximo ao estabelecido pela norma japonesa, conforme apresentado na Figura 34, sendo que a principal semelhança está na apresentação da curva força por deflexão e na força de primeiro pico. A partir disso, as resistências residuais em certos pontos da curva força por deflexão são calculadas (ARIF, 2014).

A ASTM C1609: 2012 estabelece que, de acordo com a deflexão, devem ser utilizadas duas velocidades de carregamento distintas durante o ensaio. A Tabela 3 apresenta as velocidades indicadas pela norma. Além disso, tem-se que a taxa de incremento da deflexão deve ser limitada a 0,05 mm/min.

Figura 34 – Esquema do ensaio de tenacidade à flexão prescrito pela ASTM C1609: 2012

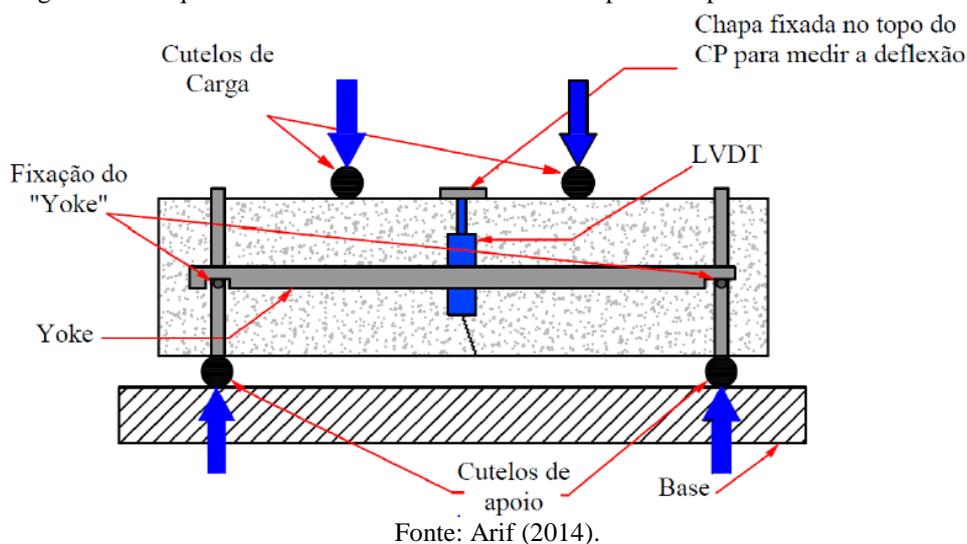


Tabela 3 – Velocidade de carregamento conforme a deflexão

Dimensão do corpo de prova	Velocidade para deflexão até	
	L/900	Velocidade para deflexão superior a L/900
100 x 100 x 350 mm	0,025 – 0,075 mm/min	0,05 – 0,20 mm/min
150 x 150 x 500 mm	0,035 – 0,10 mm/min	0,05 – 0,30 mm/min

Fonte: ASTM C1609: 2012.

A velocidade de carregamento inicial até L/900 de flexão está associada ao comportamento elástico, em que a carga é transferida da matriz para as fibras, e ao início do comportamento elastoplástico. Já a velocidade entre L/900 e L/150 de deflexão está relacionada ao trecho pós-fissuração, em que não há instabilidade e, por isso, uma maior velocidade é adotada (ARIF, 2014).

O cálculo das resistências residuais ($f_{d,L/600}$ e $f_{d,L/150}$) é realizado a partir da obtenção das cargas residuais ($P_{d,L/600}$ e $P_{d,L/150}$), quando o deslocamento vertical da amostra é L/600 e L/150, respectivamente. A resistência residual relacionada ao deslocamento de L/600 faz referência ao estado limite de serviço e a resistência residual referente ao deslocamento de L/150 está relacionada ao estado limite último (SALVADOR, 2013). As resistências residuais são obtidas por meio da Equação 5.

$$f = \frac{P \times L}{b \times h^2} \quad (\text{Equação 5})$$

Em que f é a resistência residual quando o deslocamento vertical do corpo de prova for L/600 ou L/150 (MPa); P é a carga residual para o corpo de prova quando o deslocamento vertical for L/600 ou L/150; L é o vão do ensaio (mm); b é a largura do corpo de prova (mm); e h é a altura do corpo de prova (mm).

O valor da tenacidade à flexão é obtido a partir do cálculo da área sob a curva de carga-deflexão até uma deflexão de 1/150. Já o coeficiente da resistência à flexão equivalente é calculado a partir da resistência à flexão do primeiro pico e da tenacidade. Tal coeficiente é obtido por meio da Equação 6.

$$R_{T,150}^h = \frac{150 \times T_{150}^h}{f_1 \times b \times h^2} \times 100\% \quad (\text{Equação 6})$$

Em que $R_{T,150}^h$ é o coeficiente da resistência à flexão equivalente para um corpo de prova com altura h (%); T_{150}^h é a tenacidade à flexão para um corpo de prova de altura h (J); f_1 é a

resistência de primeiro pico (MPa); b é a largura do corpo de prova (mm); e h é a altura do corpo de prova (mm).

De acordo com Islam (2012), a norma americana ASTM C1609: 2012 apresenta resultados adequados para compósitos com comportamento *strain softening*, com uma única fissura. Porém, para compósitos com comportamento *strain hardening*, com múltiplas fissuras, a norma americana não resulta nos valores reais da força de pico, uma vez que há uma queda na curva de força por deflexão.

4.2.3 Método EN 14651: 2007

O princípio do ensaio prescrito na norma EN 14651: 2007 consiste em aplicar carga por meio de um cutelo no centro de um prisma simplesmente apoiado (Figura 35). Dessa forma, o comportamento à tração na flexão do concreto reforçado com fibra pode ser avaliado a partir dos valores de resistência residual à tração na flexão obtidos por meio da curva de carga por abertura de fissura.

No ensaio são utilizados corpos de prova prismáticos com 150 mm x 150 mm x 550 mm (até 700 mm) com entalhe de 5 mm por 25 mm de altura centralizado na face em que o prisma é apoiado, sendo que a função do entalhe é induzir o posicionamento da fissura. Tendo em vista as dimensões dos corpos de prova, pode-se empregar agregados de até 32 mm e fibras de até 60 mm.

Figura 35 – Esquema de realização do ensaio especificado na EN 14651: 2007



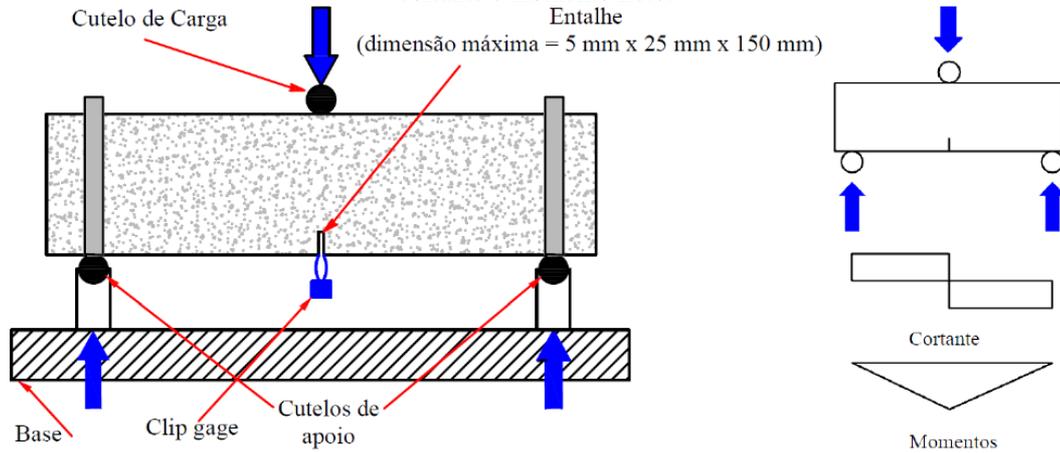
Fonte: Salvador (2013).

A abertura de fissura é o parâmetro utilizado para o controle do ensaio. Esse parâmetro pode ser calculado a partir do deslocamento vertical do corpo de prova obtido por meio de um LVDT ou medido de forma direta por meio do *clip-gage*. Entretanto, Salvador (2013)

afirma que a abertura de fissura pode ser medida com confiança por um LVDT posicionado na horizontal instalado no *yoke*.

A Figura 36 apresenta a configuração do ensaio especificado pela norma EN 14651: 2007.

Figura 36 – Esquema de ensaio conforme a EN 14651: 2007 e esforços solicitantes máximos de esforço cortante e momento fletor

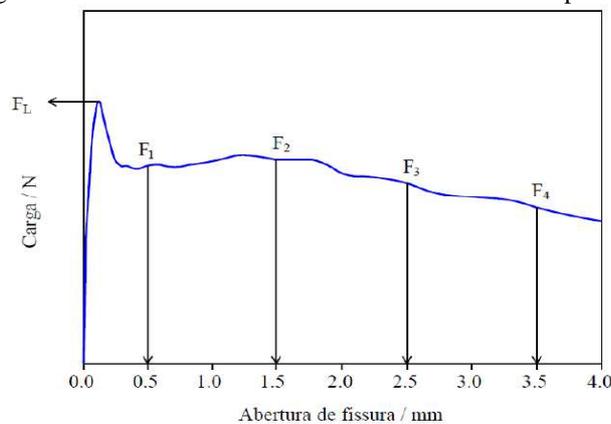


Fonte: Arif (2014).

A velocidade de abertura de fissura especificada é dividida em dois trechos, conforme a medida da abertura de fissura. Para a abertura de fissura até 0,5 mm, a velocidade deve ser igual a 0,05 mm/min. Já para o intervalo de abertura de fissura de 0,5 a 4,0 mm, a velocidade deve ser 0,2 mm/min.

A partir do ensaio prescrito na norma EN 14651: 2007, obtém-se as resistências residuais em pontos determinados de abertura de fissura. Tais pontos definem o comportamento mecânico do compósito antes, durante e após da ruptura da matriz, conforme apresentado na Figura 37 (ARIF, 2014).

Figura 37 – Curva carga versus abertura de fissura obtida conforme ensaio prescrito na EN 14651: 2007



Fonte: EN 14651 (2007).

A norma EN 14651: 2007 especifica que a Equações 7 e 8 devem ser usadas para a análise da curva carga por abertura de fissura.

$$f_{ct,L}^f = \frac{3 \times F_L \times l}{2 \times b \times h_{sp}^2} \quad (\text{Equação 7})$$

$$f_{R,j} = \frac{3 \times F_j \times l}{2 \times b \times h_{sp}^2} \quad (\text{Equação 8})$$

Em que $f_{ct,L}^f$ é denominado limite de proporcionalidade (MPa) e também pode ser identificado como LOP; $f_{R,j}$ é a resistência residual à flexão correspondente à abertura de fissura j, em que o valor do j é 0,50, 1,5, 2,5 ou 3,5 mm e, assim, obtém-se os valores de $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ e $f_{R,4}$, respectivamente (MPa). Já F_L é a carga máxima de ensaio no intervalo de abertura de fissura de 0 a 0,05 mm (N); F_j é a carga correspondente à abertura de fissura j, em que j apresenta os valores de 0,50, 1,5, 2,5 ou 3,5 mm para os valores de F_1 , F_2 , F_3 e F_4 , respectivamente (N); l é o vão de ensaio (mm); b é a largura do corpo de prova (mm); e h_{sp} é a distância entre o topo do entalhe e a face superior do corpo de prova (mm).

O ensaio normatizado pela EN 14651: 2007 apresenta como vantagens o fato da presença do entalhe permitir que toda energia dissipada seja atribuída à abertura de fissura (GIACCIO; TOBES; ZERBINO, 2008) e a curva de carga por abertura de fissura ser mais confiável que a curva de carga por deslocamento (SALVADOR, 2013). Por outro lado, tem-se como desvantagem a necessidade de empregar duas velocidades de abertura de fissura durante o ensaio.

4.3 ENSAIOS POR PUNÇÃO

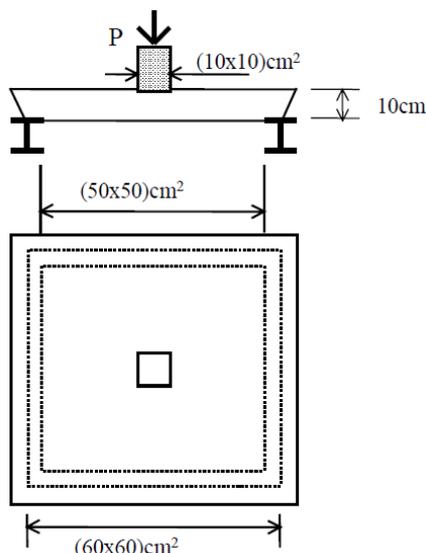
4.3.1 Método EFNARC (1996)

O ensaio de punção em placas descrito pela European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures (EFNARC) (1996) para a avaliação da tenacidade do concreto projetado é o mais empregado no Brasil (FIGUEIREDO, 2011a). Esse ensaio consiste em puncionar placas quadradas de CRF com 600 mm de lado e 100 mm de espessura apoiadas nos quatros lados. A carga é aplicada no ponto central da placa

em uma superfície de contato quadrada com 100 mm de lado, conforme exibido na Figura 38 (EFNARC, 1996).

Como prescrições da EFNARC (1996), deve-se serrar as bordas inclinadas das placas quando as mesmas são preparadas em laboratório. Além disso, as placas devem ser mantidas em água por no mínimo três dias antes da realização do ensaio e também devem ser conservadas úmidas durante o ensaio. Já a taxa de deformação no ponto médio da placa deve ser de 1,5 mm/min.

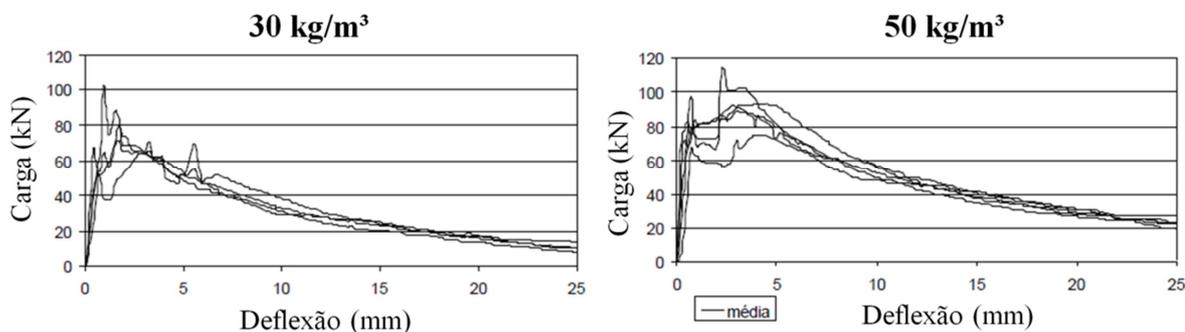
Figura 38 – Configuração do ensaio proposto pela EFNARC (1996)



Fonte: Figueiredo (1997).

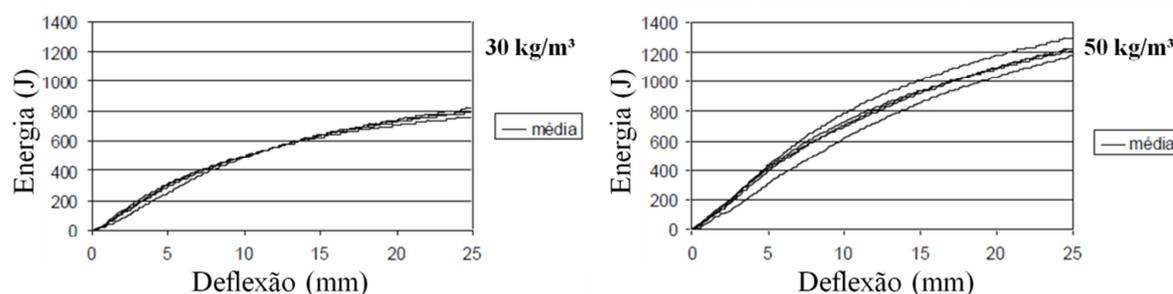
O ensaio deve ser realizado até uma deflexão de 25 mm no ponto central da placa seja atingido e, a partir disso, registra-se a curva de carga por deflexão, conforme exposto na Figura 39. Diante da curva de curva de carga por deflexão, traça-se a curva de energia absorvida por deflexão, assim como ilustra a Figura 40 (EFNARC, 1996).

Figura 39 – Curvas de carga por deflexão de concretos projetados reforçados com 30 kg/m³ e 50 kg/m³ de fibras de aço obtidas por meio do ensaio de punção em placas



Fonte: Figueiredo (2011a).

Figura 40 – Curvas de absorção de energia por deflexão de concretos projetados reforçados com 30 kg/m³ e 50 kg/m³ de fibras de aço obtidas por meio do ensaio de punção em placas



Fonte: Figueiredo (2011a).

A Figura 41 exemplifica a execução do ensaio de punção em placas realizado em laboratórios da Bekaert S.A.

Figura 41 – Realização do ensaio de punção em placas conforme a EFNARC (1996)



Fonte: Saludes (2006).

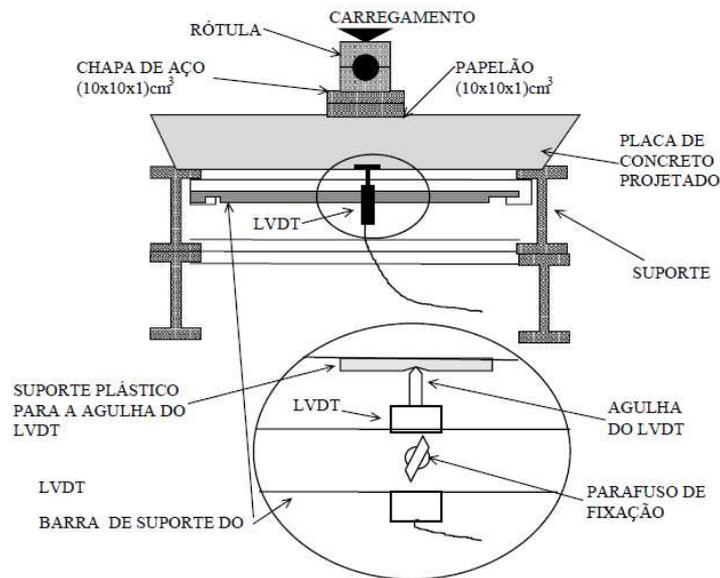
Como o ensaio de placa é realizado em uma escala maior que os ensaios que utilizam corpos de prova prismáticos, este ensaio apresenta como principal vantagem permitir uma avaliação comparativa entre o desempenho do CRF e de concretos com outros tipos de reforço, como a tela metálica (FIGUEIREDO, 2000). Já como desvantagens há a massa da placa que se aproxima de 100 kg e a possibilidade de haver concentração de tensões, uma vez que, devido ao impacto do jato de concreto, a placa fica sujeita ao esforço de projeção e, assim, pode haver deformações na placa que dificultam o apoio da mesma (FIGUEIREDO, 2011a).

Diante das desvantagens citadas, Figueiredo (2000) ressalta que para assegurar uma melhor precisão na obtenção dos resultados do ensaio da placa, recomenda-se a adoção de métodos

ligeiramente distintos daqueles especificados pela EFNARC (1996), conforme descrito a seguir:

- a) A medição da deflexão é realizada por um LVDT fixado na parte superior da alma do perfil de apoio da placa e posicionado na face inferior da placa, conforme exposto na Figura 42. Tal procedimento visa à redução máxima da parcela de deformação referente ao suporte, medida pelo LVDT.

Figura 42 – Configuração do ensaio de punção em placas quadradas com detalhe do suporte do LVDT



Fonte: Figueiredo (2000).

- b) A fim de garantir um apoio contínuo da placa sobre o suporte, recomenda-se que este apoio seja realizado por meio de encunhamento metálico e não com argamassa, pois a argamassa apresenta grande deformabilidade e gera alterações nas condições iniciais de leitura. Além disso, o apoio da face lisa da placa é mais recomendável, mas a EFNARC (1996) recomenda que a face rugosa da placa seja apoiada no suporte. Entretanto, puncionar a face rugosa reproduz a tensão causada por um tirante no revestimento de um túnel e, assim, torna-se mais realista.
- c) Os níveis de deflexão do ensaio podem ser variados (de 4 a 25 mm) de modo a se correlacionar a mesma com a abertura média das fissuras da placa.

4.3.2 Método AENOR UNE 83515: 2010

O ensaio de duplo puncionamento foi idealizado por Chen em 1970 com a finalidade de medir indiretamente a resistência à tração do concreto simples. Já em 2006 Saludes propôs

a adoção desse ensaio para medir a tenacidade do concreto reforçado com fibras (MONTE, 2015).

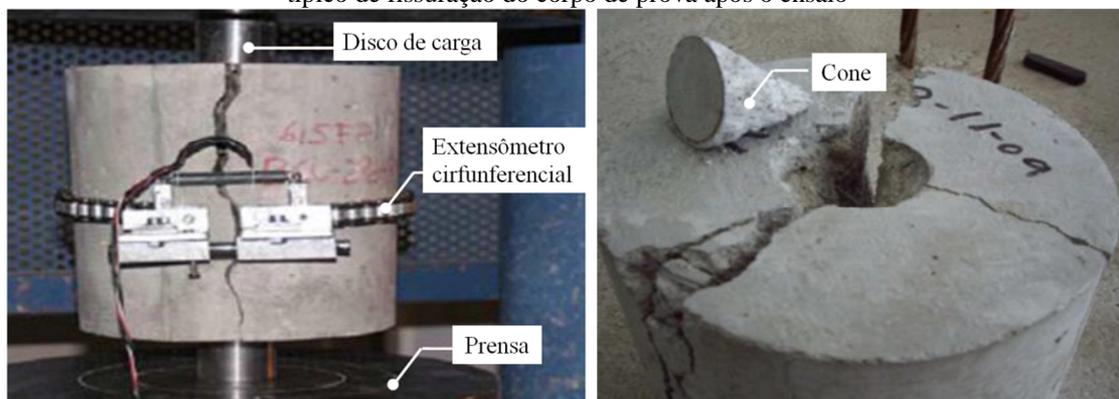
Em seguida, na Espanha o ensaio foi normalizado por meio da AENOR UNE 83515: 2010 – Concreto com fibras – Determinação da resistência à fissuração, tenacidade e resistência residual a tração – Ensaio Barcelona a fim de avaliar o comportamento pós-fissuração do concreto reforçado com fibras.

Segundo a AENOR UNE 83515: 2010, no ensaio Barcelona devem ser utilizados corpos de prova cilíndricos com diâmetro igual à altura, em que o diâmetro mínimo é de 150 mm para corpos de prova moldados e 100 mm para corpos de prova extraídos. Além disso, a carga deve ser transferida ao corpo de prova de modo uniforme com velocidade de 0,5 mm/min por meio de discos de carga tanto na face superior quanto na face inferior. Tais discos de carga possuem diâmetro igual a 1/4 do diâmetro do corpo de prova e altura igual a 1/5 da altura do corpo de prova.

De acordo com Aires, Molins e Aguado (2013), a adoção do ensaio Barcelona apresenta como vantagem, além do fato de permitir a extração de testemunhos, também apresentar coeficientes de variação inferiores aos obtidos em métodos onde se empregam vigas.

Um fator limitante do uso do ensaio Barcelona especificado pela norma AENOR UNE 83515: 2010 é a utilização de extensômetro circunferencial para realização da medida do aumento do perímetro circunferencial ou TCOD (*total circumferential opening displacement*) (Figura 43), uma vez que esse equipamento é pouco frequente em grande parte dos laboratórios e possui elevado custo.

Figura 43 – a) Ensaio Barcelona realizado com o extensômetro circunferencial. b) Padrão de fissuração do corpo de prova após o ensaio



Fonte: Pujadas (2013).

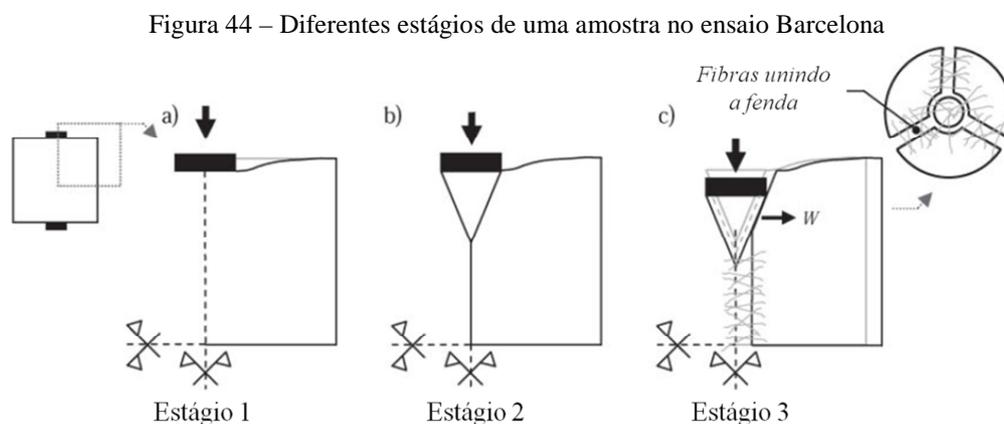
A fim de dispensar o uso do extensômetro circunferencial, Pujadas et al. (2013) propuseram um método analítico para converter o deslocamento vertical da prensa em TCOD. Dessa forma, tem-se o Ensaio Barcelona Simplificado (EBS), em que é medido o deslocamento vertical da prensa ao invés da abertura circunferencial do cilindro. O EBS foi validado experimentalmente com um erro menor que 6,7%.

A partir da pesquisa realizada por Toaldo, Monte e Figueiredo (2013), tem-se que assim como no ensaio Barcelona, o ensaio Barcelona simplificado apresenta bons resultados com reduzida variabilidade para avaliação do comportamento pós-fissuração de concretos reforçados com fibras.

O método proposto por Pujadas et al. (2013) considera que o ensaio Barcelona é formado por três estágios, conforme exposto a seguir:

- 1º estágio: começa no período inicial do carregamento em que a tensão interna é resistida pela matriz de concreto e o CRFA não apresenta grandes fissuras, de modo que há a acomodação dos discos de carga nas superfícies do corpo de prova.
- 2º estágio: inicia quando a resistência à tração do material é superada e, assim, as fissuras principais e as cunhas cônicas sob os discos de carga são formadas de forma abrupta.
- 3º estágio: ocorre quando as principais fissuras formadas estabilizam e, dessa forma, as fibras começam a atuar atribuindo a resistência residual enquanto as cunhas escorregam para o interior do corpo de prova.

A Figura 44 exemplifica os estágios que ocorrem durante o ensaio Barcelona.



Fonte: Pujadas et al. (2013).

Pujadas et al. (2013) propuseram as Equações 9, 10 e 11, apresentadas a seguir, para a conversão do deslocamento vertical em TCOOD para cada estágio do ensaio Barcelona.

$$TCOD=0 \quad \delta \leq \delta_{cr} \tag{Equação 9}$$

$$TCOD = n \times \frac{a \times \delta_{R,0}}{2 \times l_{cunha}} \times \text{sen} \frac{\pi}{n} \left(1 - \frac{F}{F_{cr}} \right) \quad \delta_{cr} < \delta < \delta_{R,0} \tag{Equação 10}$$

$$TCOD = n \times \frac{a}{2 \times l_{cunha}} \times \text{sen} \frac{\pi}{n} \times \left[\delta - \delta_{CR} + \delta_{R,0} \times \left(1 - \frac{F_{R,0}}{F_{cr}} \right) \right] \quad \delta \geq \delta_{R,0} \tag{Equação 11}$$

Em que,

n : número de fissuras radiais formadas no ensaio;

a : diâmetro do disco de carga;

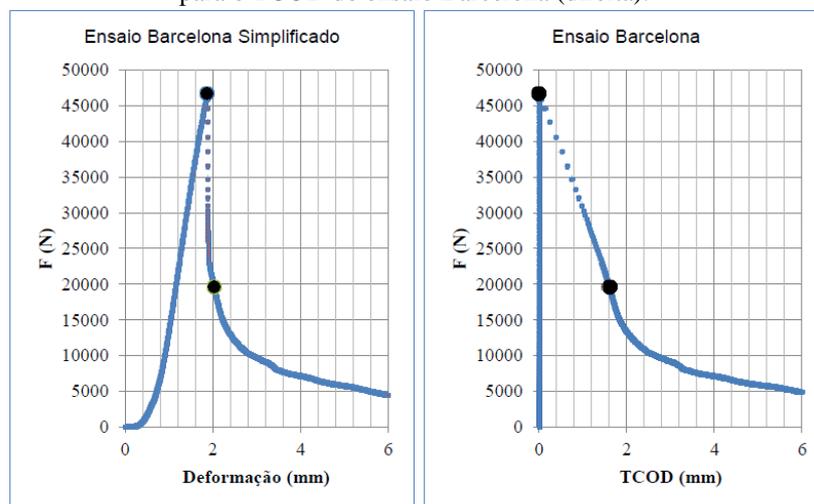
l_{cunha} : comprimento da cunha formada;

$F_{cr}, \delta_{p,cr}$: força e deslocamento vertical no ponto de carga máxima;

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

De acordo com Monte, Toaldo e Figueiredo (2014) e como pode-se observar a partir das equações citadas, as mesmas utilizam como parâmetros a força e o deslocamento correspondente do ponto de carga máxima e do ponto de início da resistência residual, além de grandezas que podem ser observadas ou medidas no corpo de prova. Os pontos necessários para a resolução das equações são ilustrados na Figura 45.

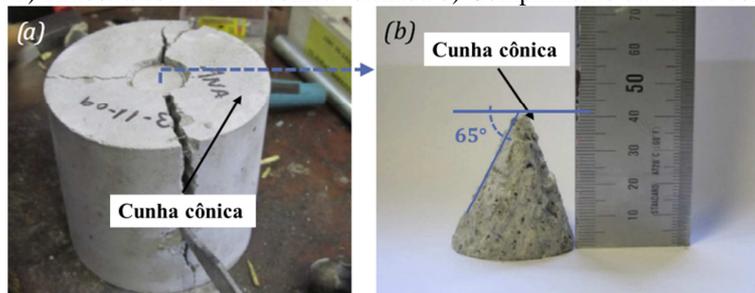
Figura 45 – Conversão do resultado do ensaio Barcelona simplificado com deslocamento vertical (esquerda) para o TCOOD do ensaio Barcelona (direita).



Fonte: Monte, Toaldo e Figueiredo (2014).

Vale ainda ressaltar que o comprimento da cunha formada (l_{cunha}) pode ser obtido experimentalmente (BLANCO et al., 2014). Conforme Monte (2015), para um corpo de prova com as dimensões de 150 mm e disco de carga com diâmetro de 37,5 mm, o comprimento da cunha cônica é próximo a 40 mm (Figura 46).

Figura 46 – a) Amostra com cunha cônica formada b) Comprimento da cunha cônica formada



Fonte: Adaptado de Blanco et al. (2014).

Além disso, conhecendo o comprimento da cunha e, por consequência, o ângulo de atrito interno do material (φ) que é 65° , pode-se encontrar o comprimento da cunha para ensaios que utilizem outro diâmetro do disco de carga por meio da Equação 12 (MONTE, 2016).

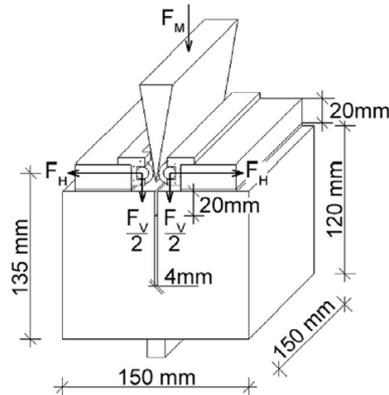
$$l_{cunha} = \frac{a}{2} \times \text{tg} \varphi \quad (\text{Equação 12})$$

4.4 ENSAIO POR ENCUNHAMENTO

O método de ensaio de abertura por encunhamento, método da cunha ou *Wedge Splitting Test (WST)* foi proposto por Linsbauer e Tschegg (1986) e tem sido objeto de estudo de outros autores a fim de caracterizar a tenacidade dos compósitos reforçados com fibras (MALAESTA et al., 2009).

As amostras empregadas no método da cunha possuem $150 \times 150 \times 140 \text{ mm}^3$ e necessitam de uma ranhura retangular na parte superior com altura de 20 mm para posicionar as peças de transmissão de carga. Essa ranhura pode ser obtida pela colagem de peças retangulares na face superior da amostra ou pela moldagem do corpo de prova já com essa ranhura. Além disso, no centro dessa ranhura deve haver um entalhe com espessura inferior a 4 mm e altura de 20 mm. A forma geométrica das amostras está ilustrada na Figura 47 (TSCHEGG et al., 2015).

Figura 47 – Forma geométrica das amostras e configuração do ensaio de abertura por encunamento

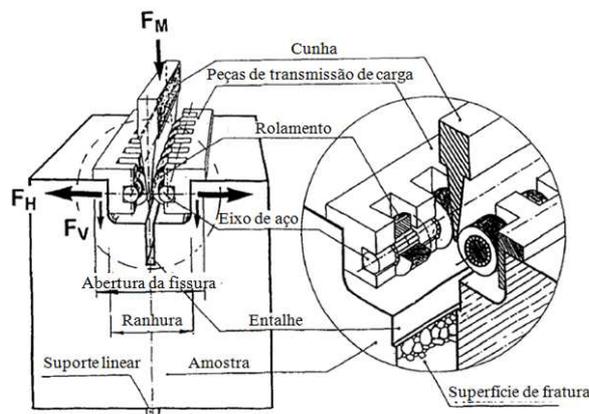


Fonte: Tschegg et al. (2015).

O método de ensaio de abertura por encunamento para carga uniaxial é caracterizado por inicialmente posicionar a amostra em um suporte linear estreito. Em seguida, as peças de transmissão de carga são inseridas na ranhura da amostra. Nessas peças de transmissão, a cunha é posicionada. A força (F_M) aplicada pela máquina de teste é transmitida por meio das peças de transmissão para a amostra. Dessa forma, ocorre a abertura da amostra por encunamento, conforme apresentado na Figura 48 (TSCHEGG et al., 2015).

A força vertical de compressão (F_M) aplicada pela máquina de teste, medida por meio de célula de carga, é dividida vetorialmente em uma grande força horizontal (F_H) (força de divisão) e em uma menor força vertical (F_V), por meio de uma cunha esbelta. Os valores obtidos de F_H e F_V dependem do ângulo da cunha, sendo que quando este ângulo é inferior a 15° não há interferências mensuráveis nessas forças (TSCHEGG; ELSER; STANZL-TSCHEGG, 1995a). A velocidade de deslocamento da máquina de teste deve ser mantida constante em 0,5 mm/min (TSCHEGG et al., 2015).

Figura 48 – Equipamento para ensaio de abertura por encunamento



Fonte: Tschegg, Elser e Stanzl-Tschegg (1995a).

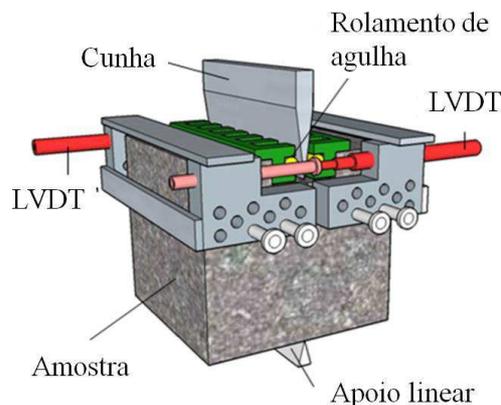
O erro de medição devido ao atrito entre as peças de transmissão e a cunha é minimizado pelos rolamentos que compõem o equipamento de ensaio e, por isso, é insignificante (menor que 1%). Já a força de divisão (F_H) pode ser determinada por meio de um cálculo simples e a força vertical (F_V) é baixa e não perturba o comportamento da fratura (TSCHEGG, 2009; TSCHEGG; ELSER; STANZL-TSCHEGG, 1995a).

A relação entre a força da máquina (F_M) aplicada à cunha e a força horizontal (F_H) é dada pela Equação 12, em que o atrito entre as peças de transmissão e a cunha é desprezado (TSCHEGG et al., 1995b). Na Equação 13 α é o ângulo da cunha.

$$F_H = \frac{F_M}{2 \times \tan \frac{\alpha}{2}} \quad (\text{Equação 13})$$

A abertura da fissura é medida nas duas extremidades da ranhura por meio de transformadores diferenciais variáveis lineares (LVDT), para detectar uma possível fissuração assimétrica. Os eixos dos LVDTs são posicionados na linha de aplicação da força por meio de uma estrutura de metal e, assim, a aplicação da força e a medição do deslocamento estão no mesmo plano, conforme explicitado na Figura 49 (TSCHEGG; ELSER; STANZL-TSCHEGG, 1995a).

Figura 49 – Configuração do método da cunha para carga uniaxial



Fonte: Autora (2016).

Os resultados obtidos na pesquisa realizada por Löfgren, Stang e Olesen (2004), em que foram comparados os ensaios por encunhamento e o por flexão em três pontos, segundo as recomendações do RILEM TC-162 TDF (2002), demonstraram que o ensaio patenteado por Tschegg apresenta resultados com menor dispersão que o teste de flexão.

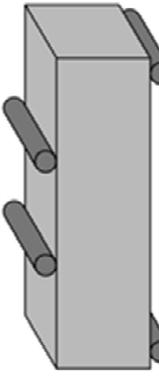
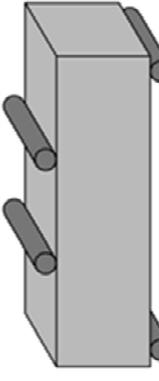
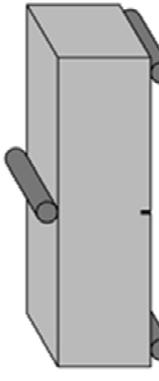
Saludes (2006) acrescenta que o ensaio por encunhamento apresenta outras vantagens, tais como:

- não são necessários equipamentos de ensaio sofisticados;
- o teste é estável;
- devido à configuração do ensaio, o deslocamento coincide com a abertura da fissura;
- o ensaio pode ser realizado com corpos de prova prismáticos ou cilíndricos e permite a extração de testemunhos em estruturas existentes a fim de realizar o controle de qualidade;
- para a realização do ensaio é preciso pequenas quantidade de CRF, pois a amostras possuem dimensões menores em relação a outros testes, como aqueles que utilizam vigas ou placas.

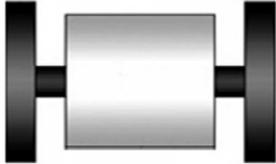
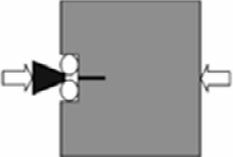
4.5 RESUMO DOS MÉTODOS DE ENSAIO

No Quadro 3 é apresentado um resumo dos ensaios citados na presente pesquisa

Quadro 3 – Resumo do ensaios dos procedimento normalizados (continua)

Método de ensaio	JSCE-SF4 (1984)	ASTM C1609 (2012)	EN 14651 (2007)
Esquema de ensaio			
Tipo de controle de ensaio	Open loop	Closed loop	Closed loop
Equipamento de controle da máquina	LVDI	LVDI	LVDI ou Clip Gage
Geometria do corpo de prova	Prismático	Prismático	Prismático
Dimensões do corpo de prova e velocidade de ensaio	100 mm x 100 mm x 350 mm	100 mm x 100 mm x 350 mm	150 mm x 150 mm x 550 mm
	150 mm x 150 mm x 500 mm	150 mm x 150 mm x 500 mm	
Primeira velocidade de deflexão ou da abertura de fissura	(Para C.P. 100 x 100 x 350) L/1500 a L/3000 (mm/min)	(Para C.P. 100 x 100 x 350) 0 a L/900 (mm) de deflexão: 0,025 a 0,075	0 a 0,5 (mm) de abertura de fissura: 0,05 (mm/min)
Segunda velocidade de deflexão ou da abertura de fissura		L/900 a L/150 de deflexão: 0,05 a 0,2 (mm/min)	0,5 a 4 (mm) de abertura de fissura: 0,2 (mm/min)
Primeira velocidade de deflexão ou da abertura de fissura	(Para C.P. 150 x 150 x 500) L/1500 a L/3000 (mm/min)	Para C.P. 150 x 150 x 500) 0 a L/900 (mm) de deflexão: 0,035 a 0,1 (mm/min)	—
Segunda velocidade de deflexão ou da abertura de fissura		L/900 a L/150 de deflexão: 0,05 a 0,3 (mm/min)	—

Quadro 3 – Resumo do ensaios dos procedimento normalizados (conclusão)

Método de ensaio	EFNARC (1996)	AENOR UNE 83515 (2010)	Método da cumha - <i>WST</i> (1986)
Tipo de controle de ensaio			
Equipamento de controle da máquina	<i>Open loop</i>	<i>Open loop</i>	<i>Open loop</i>
Geometria do corpo de prova	Prismático (Placa)	Cilíndrico	Prismático
Dimensões do corpo de prova e velocidade de ensaio	100 mm x 600 mm x 600 mm	100 mm x 100 mm 150 mm x 150 mm	120 mm x 150 mm x 150 mm
Velocidade de deflexão	1,5 mm/min	0,5 mm/min	0,5 mm/min

Fonte: Arif (2014) e Saludes (2006).

CAPÍTULO 5

PROGRAMA EXPERIMENTAL E MATERIAIS ADOTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

A presente pesquisa visa avaliar o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras de aço, de modo especial à tenacidade. Como procedimento de análise foram moldados corpos de prova cilíndricos para o ensaio de duplo puncionamento ou ensaio Barcelona simplificado.

No Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (FECIV/UFU) foi produzido o CRFA e foram moldadas as amostras para a realização de todos os ensaios. O ensaio Barcelona simplificado foi realizado nos laboratórios da FECIV/UFU e da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli/USP), uma vez que o mesmo integra um programa interlaboratorial.

O programa interlaboratorial é organizado de modo que seja possível analisar certo material distribuído por um provedor por determinado número de laboratórios participantes.

Para a presente pesquisa, tem-se como objetivo aplicar o programa interlaboratorial para comparar os dados obtidos entre os laboratórios participantes. Dessa forma, pode-se avaliar a repetitividade e a reprodutibilidade do ensaio Barcelona simplificado.

Portanto, o foco do programa interlaboratorial desta pesquisa está em definir as características de desempenho do ensaio Barcelona simplificado, de forma a monitorar sua efetividade e comparabilidade.

Os corpos de prova pertencentes ao Programa Interlaboratorial foram todos produzidos no Laboratório de Materiais e Estruturas da FECIV/UFU. A quantidade total produzida foi de 36 corpos de prova cilíndricos com 150 mm x 300 mm, sendo que metade desta quantidade foi transportada até o Laboratório de Estruturas e Materiais Estruturais da Poli/USP para a realização do ensaio Barcelona simplificado também neste laboratório.

Para o transporte, os corpos de prova foram armazenados em caixas rígidas de madeira preenchidas com serragem, assim como determina a ABNT NBR 5738: 2016. As Figuras 50 e 51 mostram a montagem das caixas para o transporte dos corpos de prova e a entrega das caixas na Poli/USP.

Figura 50 – a) Preparação dos corpos de prova para transporte b) Preenchimento das caixas rígidas de madeira com serragem



Fonte: Autora (2016).

Figura 51 – Entrega das caixas rígidas de madeira contendo os corpos de prova cilíndricos para a realização do ensaio Barcelona simplificado



Fonte: Autora (2016).

5.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental proposto considera a adoção de dosagens já estudadas em pesquisas realizadas na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de

Uberlândia (FECIV/UFU) utilizando corpos de prova prismáticos, tal como o estudo feito por Vitor (2017). Dessa forma, a partir dos resultados já existentes, pode-se realizar um comparativo com os resultados encontrados.

Esse planejamento consiste em utilizar dois valores de resistência característica à compressão (20 MPa e 40 MPa) e três volumes de fibra de aço distintos (40 kg/m³, 50 kg/m³ e 60 kg/m³).

Para cada cruzamento entre as resistências características e o volume de fibras foram moldadas réplicas, a fim de avaliar estatisticamente a técnica experimental utilizada. O Quadro 4 apresenta a quantidade de corpos de prova moldados para a realização dos ensaios de caracterização e do ensaio Barcelona simplificado.

Quadro 4 – Número de corpos de prova moldados para serem ensaiados para cada dosagem

Traços e suas características	Quantidade de corpos de prova moldados para cada ensaio		
	Ensaio de caracterização mecânica	Ensaio Barcelona simplificado realizado na FECIV/UFU	Ensaio Barcelona simplificado realizado na Poli/USP
Traço I: $f_{ck} = 20$ MPa Sem fibras	16	-	-
Traço II: $f_{ck} = 20$ MPa Com fibras (40 kg/m ³)	16	6	6
Traço III: $f_{ck} = 20$ MPa Com fibras (50 kg/m ³)	16	6	6
Traço IV: $f_{ck} = 20$ MPa Com fibras (60 kg/m ³)	16	6	6
Traço V: $f_{ck} = 40$ MPa Sem fibras	16	-	-
Traço VI: $f_{ck} = 40$ MPa Com fibras (40 kg/m ³)	16	6	6
Traço VII: $f_{ck} = 40$ MPa Com fibras (50 kg/m ³)	16	6	6
Traço VIII: $f_{ck} = 40$ MPa Com fibras (60 kg/m ³)	16	6	6

Fonte: Autora (2016).

Vale ressaltar que também foram moldados corpos de prova sem fibras com resistência característica de 20 MPa e 40 MPa para a realização de ensaios de caracterização mecânica aos 28 e 240 dias, que são eles: resistência à compressão (3 amostras), módulo de

elasticidade longitudinal (3 amostras) e resistência à tração por compressão diametral (2 amostras).

5.2.1 Fatores intervenientes na tenacidade

De acordo com Barros Neto et al. (2001), após a realização de testes experimentais, faz-se necessário avaliar a influência de uma ou mais variáveis sobre os resultados encontrados e, para isso, tem-se o planejamento e a análise fatorial.

5.2.1.1 Planejamento e análise fatorial

O planejamento e a análise fatorial permitem que os parâmetros citados a seguir possam ser encontrados (BARROS NETO et al., 2001):

- efeito principal: esse que consiste na diferença média encontrada na variável de resposta quando o nível do fator de controle analisado sofre alteração (ARIF, 2014). Esse efeito é expresso por meio da Equação 14:

$$EP = 2 \times \frac{(\sum x^+ - \sum x^-)}{b^a} \quad (\text{Equação 14})$$

Em que x^+ e x^- representam a média dos efeitos individuais das medidas resultantes dos testes realizados com o fator de controle alternado entre o maior e o menor nível, respectivamente; b^a é o número total de experimentos do planejamento;

- efeito de interação: a metade da diferença entre a variável de resposta obtida devido à interação entre os fatores analisados;
- estimativa do erro experimental: como são realizadas observações em mais de uma amostra para o mesmo experimento, pode-se estimar o erro padrão médio global das variáveis de resposta por meio da Equação 15:

$$S(\text{efeito}) = \frac{\sigma}{\sqrt{2^{k-1}}} \quad (\text{Equação 15})$$

Em que σ é o erro na medida (desvio padrão) e k é o número de fatores experimentais no planejamento fatorial.

A presente pesquisa possui os fatores e respectivos níveis apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 – Fatores e níveis analisados

Fator	Nível
Resistência característica à compressão (MPa)	20
	40
Teor de fibras (%)	0,50
	0,64
	0,77

Fonte: Autora (2015).

Diante dos fatores e níveis citados, o planejamento fatorial 2^2 foi empregado a fim de possibilitar a análise de dados. Esse planejamento que consiste em testar e avaliar dois fatores com dois níveis distintos cada. Dessa forma, para a análise dos dados de tenacidade, as Tabelas 4, 5 e 6 foram utilizadas como matrizes de planejamento para o ensaio Barcelona simplificado.

Tabela 4 – Matriz de planejamento utilizada para avaliar os efeitos gerados devido ao aumento na resistência à compressão e devido ao aumento do teor de fibras (de 0,50 % para 0,64%)

Ensaio	Resistência característica à compressão (f_{ck})	Teor de fibras (TF)	Variável de resposta: Tenacidade média (N.m)
1	C20	0,50%	\bar{x}_a
2	C40	0,50%	\bar{x}_b
3	C20	0,64%	\bar{x}_c
4	C40	0,64%	\bar{x}_d

Fonte: Autora (2017).

Tabela 5 – Matriz de planejamento utilizada para avaliar os efeitos gerados devido ao aumento na resistência à compressão e devido ao aumento do teor de fibras (de 0,64 % para 0,77%)

Ensaio	Resistência característica à compressão (f_{ck})	Teor de fibras (TF)	Variável de resposta: Tenacidade média (N.m)
3	C20	0,64%	\bar{x}_a
4	C40	0,64%	\bar{x}_b
5	C20	0,77%	\bar{x}_c
6	C40	0,77%	\bar{x}_d

Fonte: Autora (2017).

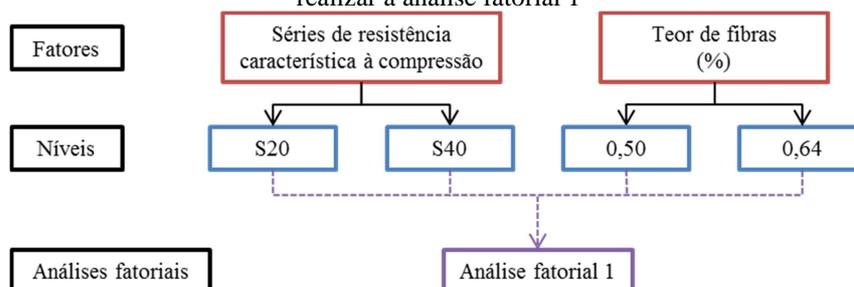
Tabela 6 – Matriz de planejamento utilizada para avaliar os efeitos gerados devido ao aumento na resistência à compressão e devido ao aumento do teor de fibras (de 0,50 % para 0,77%)

Ensaio	Resistência característica à compressão (f_{ck})	Teor de fibras (TF)	Variável de resposta: Tenacidade média (MPa)
1	C20	0,50%	\bar{x}_a
2	C40	0,50%	\bar{x}_b
5	C20	0,77%	\bar{x}_c
6	C40	0,77%	\bar{x}_d

Fonte: Autora (2017).

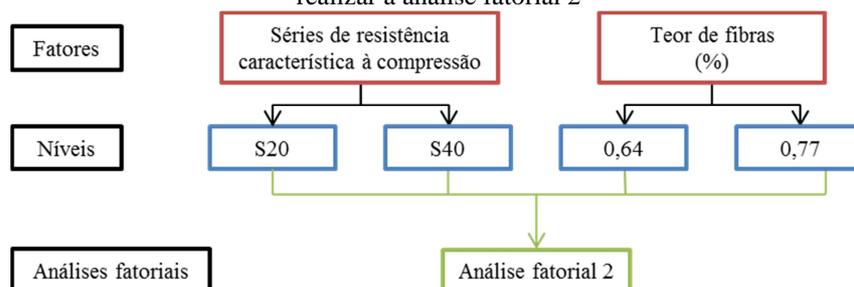
As Figuras 52, 53 e 54 apresentam uma representação esquemática das matrizes de planejamento utilizadas para realizar a análise fatorial.

Figura 52 – Representação esquemática dos cruzamentos realizados entre cada nível de cada fator a fim de realizar a análise fatorial 1



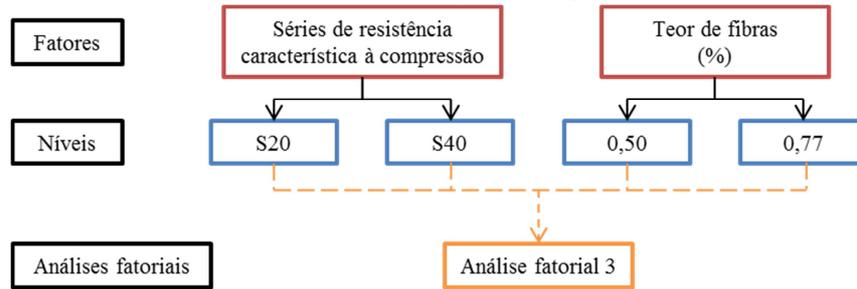
Fonte: Autora (2017).

Figura 53 – Representação esquemática dos cruzamentos realizados entre cada nível de cada fator a fim de realizar a análise fatorial 2



Fonte: Autora (2017).

Figura 54 – Representação esquemática dos cruzamentos realizados entre cada nível de cada fator a fim de realizar a análise fatorial 3



Fonte: Autora (2017).

A partir das matrizes de planejamento e dos valores médios variáveis de resposta (\bar{x}), as Equações 16 e 17 são empregadas para obter os valores dos efeitos principais para a resistência à compressão (E_{fck}) e o teor de fibras (E_{TF}).

$$E_{fck} = \frac{(\bar{x}_b - \bar{x}_a) + (\bar{x}_d - \bar{x}_c)}{2} \quad \text{(Equação 16)}$$

$$E_{TF} = \frac{(\bar{x}_c - \bar{x}_a) + (\bar{x}_d - \bar{x}_b)}{2} \quad \text{(Equação 17)}$$

Por fim, o efeito de interação (EI) entre a resistência à compressão e o teor de fibras é encontrado por meio da Equação 18.

$$EI = \frac{(\bar{x}_a + \bar{x}_d)}{2} - \frac{(\bar{x}_b - \bar{x}_c)}{2} \quad \text{(Equação 18)}$$

5.3 MATERIAIS

Os materiais empregados na moldagem das amostras ensaiadas nesse estudo estão descritos nos itens a seguir.

5.3.1 Cimento

O material aglomerante empregado para a produção do concreto reforçado com fibra foi o cimento composto CP III 40-RS. As prescrições da ABNT NBR NM 23: 2001 – Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica foram utilizadas para obter-se a massa específica do cimento empregado. Como resultado, obteve-se o valor de 2,90 g/cm³.

5.3.2 Agregados

Como agregado miúdo, empregou-se areia lavada fina e média retirada do rio Grande na região do Triângulo Mineiro. O agregado miúdo foi caracterizado conforme as prescrições da ABNT NBR NM 45: 2006 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios, da ABNT NBR NM 52: 2009 – Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente, da ABNT NBR NM 248: 2003 – Agregados – Determinação da composição granulométrica e ABNT NBR 7211: 2005 – Agregados para concreto – Especificação. As características e as curvas granulométricas do agregado miúdo estão dispostas nas Tabelas 7 e 8 e na Figura 55.

Tabela 7 – Caracterização do agregado miúdo (Areia fina – $M_f = 1,24$)

Ensaio realizado	Resultados	Métodos de ensaio
Massa específica (g/cm ³)	2,58	ABNT NBR NM 52: 2009
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	1,45	ABNT NBR NM 45: 2006
Dimensão máxima (mm)	1,18	ABNT NBR NM 248: 2003
Módulo de finura	1,24	ABNT NBR NM 248: 2003

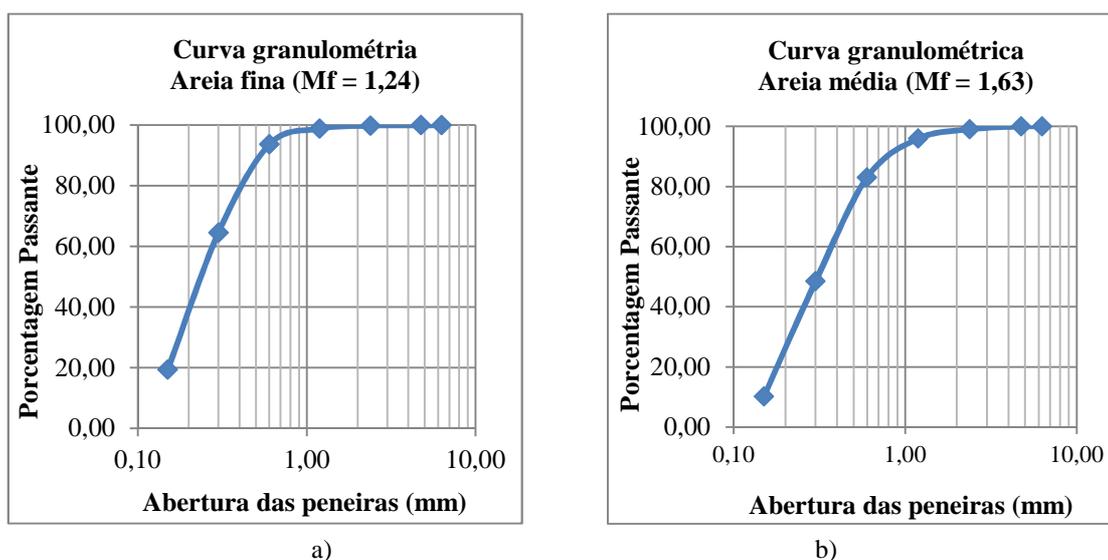
Fonte: Autora (2016).

Tabela 8 – Caracterização do agregado miúdo (Areia média – $M_f = 1,63$)

Ensaio realizado	Resultados	Métodos de ensaio
Massa específica (g/cm ³)	2,60	ABNT NBR NM 52: 2009
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	1,46	ABNT NBR NM 45: 2006
Dimensão máxima (mm)	1,18	ABNT NBR NM 248: 2003
Módulo de finura	1,63	ABNT NBR NM 248: 2003

Fonte: Autora (2016).

Figura 55 – Curvas granulométricas: a) Areia fina (Mf = 1,24) b) Areia média (Mf = 1,63)



Fonte: Autora (2016).

Como agregado graúdo, utilizou-se pedra britada de rocha basáltica com dimensões máximas ($D_{máx}$) de 12,5 mm e 19,0 mm. As normas ABNT NBR NM 45: 2006, ABNT NBR NM 53: 2009 – Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água, ABNT NBR NM 248: 2003 e ABNT NBR 7211: 2005 foram utilizadas para caracterizar o agregado graúdo, sendo que os resultados obtidos estão dispostos nas Tabelas 9 e 10. Já as curvas granulométricas estão expostas na Figura 56.

Tabela 9 – Caracterização do agregado graúdo ($D_{máx} = 12,5$ mm)

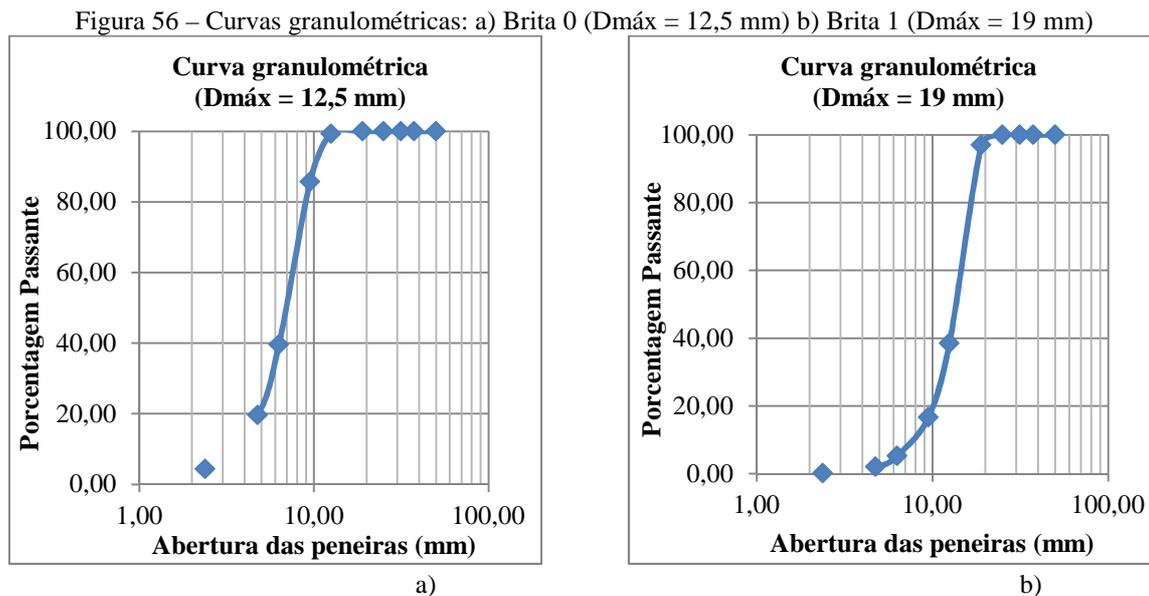
Ensaio realizado	Resultados	Métodos de ensaio
Massa específica (g/cm^3)	2,88	ABNT NBR NM 53: 2009
Massa unitária no estado solto (g/cm^3)	1,53	ABNT NBR NM 45: 2006
Massa unitária no estado compactado (g/cm^3)	1,65	ABNT NBR NM 45: 2006
Dimensão máxima	12,50	ABNT NBR NM 248: 2003
Módulo de finura	5,85	ABNT NBR NM 248: 2003

Fonte: Autora (2016).

Tabela 10 – Caracterização do agregado graúdo ($D_{máx} = 19$ mm)

Ensaio realizado	Resultados	Métodos de ensaio
Massa específica (g/cm^3)	2,97	ABNT NBR NM 53: 2009
Massa unitária no estado solto (g/cm^3)	1,49	ABNT NBR NM 45: 2006
Massa unitária no estado compactado (g/cm^3)	1,64	ABNT NBR NM 45: 2006
Dimensão máxima (mm)	19,00	ABNT NBR NM 248: 2003
Módulo de finura	6,83	ABNT NBR NM 248: 2003

Fonte: Autora (2016).



5.3.3 Aditivo

O aditivo superplastificante foi empregado a fim de se obter a trabalhabilidade necessária para a moldagem dos corpos de prova. As características desse aditivo, de acordo com o catálogo do fabricante estão descritas na Tabela 11.

Tabela 11 – Característica do aditivo superplastificante empregado

Dados técnicos	Características
Base química	Éter Policarboxílico
Aspecto	Líquido castanho
Densidade (g/cm^3)	1,090 a 1,130
pH	8 – 10
Teor de sólidos (%)	42,5 a 46,5

Fonte: Catálogo do fabricante (2016).

5.3.4 Água

Na produção dos concretos foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento de água do Departamento Municipal de Água e Esgoto de Uberlândia (DMAE).

5.3.5 Fibras de aço

As fibras adicionadas ao concreto foram produzidas a partir de fios de aço trefilado. A fibra utilizada é denominada pelo catálogo do fabricante como DRAMIX RC 60/65 RN, apresenta seção transversal circular e possui as dimensões mostradas na Figura 57.

Figura 57 – Geometria e dimensões da fibra de aço empregada



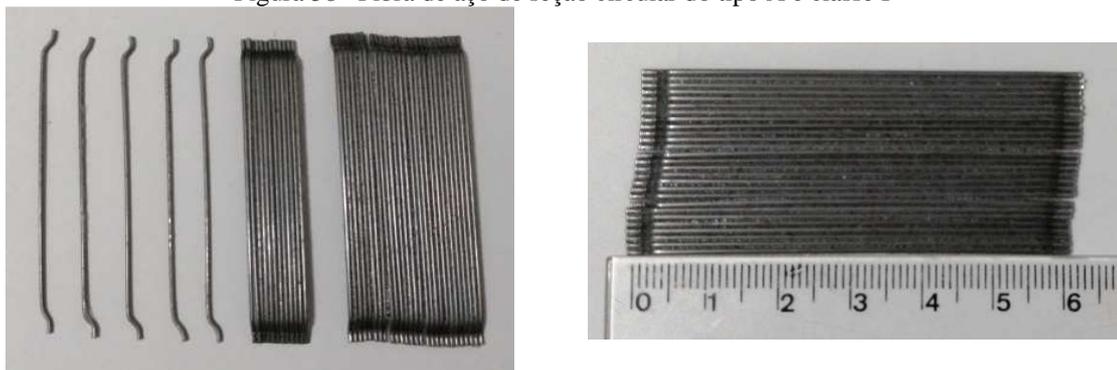
Comprimento: 60 mm

Diâmetro: 0,90 mm

Fonte: Catálogo do fabricante (2016).

De acordo com a ABNT NBR 15530: 2007, a fibra de aço empregada é classificada como de seção circular do tipo A e classe I, assim como apresentado na Figura 58.

Figura 58 –Fibra de aço de seção circular do tipo A e classe I



Fonte: Autora (2017).

Conforme a prescrição da norma ABNT NBR 15530: 2007 foram analisadas 60 fibras de aço para a verificação dimensional por meio de um paquímetro digital com 0,01 mm de precisão. Os resultados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Verificação das dimensões das fibras conforme ABNT NBR 15530: 2007

Fibra de aço	Dimensão média
Comprimento	61,48 ± 0,25 mm
Diâmetro	0,88 ± 0,02 mm
Fator de forma	70,16 ± 1,55

Fonte: Autora (2017).

5.4 DOSAGEM DO CONCRETO

A presente pesquisa utilizou como referência o estudo de dosagem de concreto sem fibras e com adição de fibras já realizado por Vitor (2017), a fim de possibilitar a comparação de resultados. Esse estudo visou a obtenção de séries com resistência de 20 MPa e 40 MPa. Dessa forma, tendo em vista as características dos materiais empregados, a Tabela 13 apresenta as composições de cada série adotada.

Tabela 13 – Dosagem dos traços utilizados

Material	Série C20					Série C40		
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Cimento CP III 40 RS (kg/m ³)		315,99				459,27		
Agregado miúdo: M _f = 1,24 (kg/m ³)		290,71				257,19		
Agregado miúdo: M _f = 1,63 (kg/m ³)		543,50				477,64		
Agregado graúdo: D _{max} = 12,5 mm (kg/m ³)		265,43				275,56		
Agregado graúdo: D _{max} = 19 mm (kg/m ³)		796,28				826,69		
Água (l/m ³)		208,55				183,71		
Teor de aditivo (%)	0,50	0,68	0,75	0,80	0,60	0,70	0,80	0,85
Teor de ar (%)		2,00				2,00		
Volume de fibra (kg/m ³)	0,00	40,00	50,00	60,00	0,00	40,00	50,00	60,00
Teor de fibras (%)	0,00	0,50	0,64	0,77	0,00	0,50	0,64	0,77
Traço em massa		1,00: 2,64: 3,36: 0,66				1,00: 1,60: 2,40: 0,4		

Fonte: Autora (2016).

A partir dos traços de referência para o concreto simples das séries C20 e C40 foram formados dois traços de concreto sem fibras, um para cada série, e seis traços de concretos reforçados com fibras de aço, três para cada série, sendo que o concreto sem fibras foi avaliado apenas em relação à resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. Já para os CRFs, o consumo de fibras de aço variou entre 40 kg/m³, 50 kg/m³ e 60 kg/m³.

5.5 PRODUÇÃO, MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Inicialmente, todos os materiais foram separados e pesados e a quantidade de água foi corrigida de acordo com a umidade das areias fina e média segundo a ABNT NBR NM 30: 2001. Em seguida, a produção de concreto ocorreu seguindo os seguintes procedimentos:

- a) imprimação da betoneira a fim de minimizar a perda de água de cada traço;
- b) adição do agregado graúdo, do cimento e de metade da água e mistura durante 1 minuto;
- c) adição da areia e do restante da água com aditivo superplastificante diluído e mistura durante 2 minutos;
- d) adição da fibra de aço à mistura de forma lenta e mistura durante 5 minutos.

O volume de concreto sem fibras produzido para a moldagem dos corpos de prova foi de 43,07 litros. Já o volume de concreto com fibras produzido foi de 114,54 litros. Para tal produção, uma betoneira de 400 litros foi utilizada, conforme mostrado na Figura 59.

Figura 59 – Betoneira com capacidade de 400 litros



Fonte: Autora (2016).

A consistência do concreto foi avaliada por meio do ensaio de tronco de cone normatizado pela ABNT NBR NM 67: 1998, como mostra a Figura 60a. Além disso, a massa específica e o teor de ar incorporado foram determinados conforme ABNT NBR 9833: 2009, como exibido na Figura 60b.

Figura 60 – a) Ensaio de abatimento de tronco de cone b) Medição do teor de ar incorporado



a)

b)

Fonte: Autora (2016).

Os resultados encontrados para o abatimento de tronco de cone, massa específica e teor de ar incorporado estão dispostos na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados dos ensaios de abatimento de tronco de cone, massa específica e teor de ar incorporado

Dosagem	Abatimento de tronco de cone (mm)	Massa específica (kg/m ³)	Teor de ar incorporado (%)
C20 – 0,00% (Traço I)	160	2956,18	3,5
C20 – 0,50% (Traço II)	145	2956,18	4,5
C20 – 0,64% (Traço III)	135	2962,72	3,2
C20 – 0,77% (Traço IV)	115	2962,72	3,2
C40 – 0,00% (Traço V)	140	2969,26	3,7
C40 – 0,50% (Traço VI)	135	3015,04	2,4
C40 – 0,64% (Traço VII)	125	3021,58	2,4
C40 – 0,77% (Traço VIII)	105	3021,58	2,4

Fonte: Autora (2017).

Os resultados de abatimento de tronco de cone medidos estão contidos entre 25 mm e 175 mm, esse que é o intervalo recomendado pelo ACI 544.3R (2008). Pode-se notar que o aumento do teor de fibras contribuiu para reduzir o abatimento da mistura. Entretanto, como o adensamento foi realizado por meio de mesa vibratória, esse contribuiu para a compactação do material, fato que pode ser observado pela uniformidade dos valores encontrados para o teor de ar incorporado (SALVADOR; FIGUEIREDO, 2013).

Após a produção do CRFA foram moldados os corpos de prova. Para tal moldagem foram utilizados moldes metálicos padronizados cilíndricos com dimensões de 100 mm x 200 mm para a realização dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade e moldes metálicos padronizados

cilíndricos com dimensões de 150 mm x 300 mm para a realização do ensaio Barcelona simplificado, conforme exposto na Figura 61.

Figura 61 – Preparação das formas para a moldagem dos corpos de prova



Fonte: Autora (2016).

O procedimento de moldagem consistiu em, inicialmente, umedecer todos os moldes com óleo desmoldante. Em seguida, as formas usadas para a moldagem do CRFA foram preenchidas em apenas uma camada e o concreto foi adensado em mesa vibratória por aproximadamente 10 segundos (Figura 62). Já o concreto sem fibras foi adensado manualmente.

Figura 62 – Concreto sob vibração na mesa vibratória



Fonte: Autora (2016).

Em sequência, todos os corpos de prova foram identificados e estocados em câmara úmida por 24 horas até a desforma (Figura 63). Por fim, após a desforma, os corpos de prova foram mantidos em água com cal até um dia antes da data de realização dos ensaios (Figura 64).

Figura 63 – Corpos de prova em câmara úmida após a moldagem



Fonte: Autora (2016).

Figura 64 – Corpos de prova submersos em água com cal após a desmoldagem



Fonte: Autora (2016).

5.6 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA NO ESTADO ENDURECIDO

Para o ensaio Barcelona simplificado, como as dimensões especificadas por norma para corpos de prova moldados são de 150 mm x 150 mm e foram utilizados moldes de 300 mm x 150 mm, fez-se necessário o corte dos corpos de prova tanto no Laboratório de Estruturas e Materiais Estruturais da Poli/USP quanto no Laboratório de Materiais e Estruturas da FECIV/UFU, como mostrado na Figura 65.

Figura 65 – Corte dos corpos de prova cilíndricos para o ensaio Barcelona simplificado: a) realizado na FECIV/UFU b) realizado na Poli/USP



Fonte: Autora (2016).

Tendo em vista a irregularidade do corte obtido na FECIV/UFU, as amostras foram retificadas. Já na Poli/USP, como o corte apresentou maior regularidade, não se fez necessária a retífica dos corpos de prova.

5.7 MÉTODOS DE ENSAIO

As dosagens sem fibras foram executadas a fim de avaliar apenas seu comportamento mecânico no que diz respeito a resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral. Já os traços com fibras foram ensaiados também à tenacidade por meio do ensaio Barcelona simplificado.

5.7.1 Resistência à compressão (f_c)

O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme as prescrições da ABNT NBR 5739: 2007 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Conforme tal norma, os corpos de prova precisam ter seus diâmetros medidos para o cálculo da área da seção transversal e também é preciso medir a altura dos corpos de prova. Tem-se que o ensaio deve ser realizado em uma idade determinada, sendo que após 91 dias de idade a tolerância permitida para a realização do ensaio é maior que 48 horas.

Anteriormente à realização do ensaio, as faces dos corpos de prova foram preparadas a fim de se tornassem planas e perpendiculares ao eixo longitudinal do corpo de prova, conforme a ABNT NBR 5738: 2016. Para a presente pesquisa, a retificação das faces foi adotada, conforme exposto na Figura 66.

Figura 66 – a) Retífica do corpos de prova para realização dos ensaios de caracterização b) Corpos de prova retificados



Fonte: Autora (2016).

Após a preparação das faces dos corpos de prova, essas faces e os pratos da máquina de ensaio foram limpos e secos. Em seguida, o corpo de prova foi posicionado no centro do prato inferior e o carregamento de ensaio ocorreu de forma contínua e sem choques a uma velocidade constante de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. O carregamento cessou no instante em que uma queda na força aplicada indicou a ruptura do corpo de prova (ABNT NBR 5738: 2016).

Após a realização do ensaio, a resistência à compressão foi calculada por meio da Equação 19.

$$f_c = \frac{4 \times F_{cr}}{\pi \times D^2} \quad (\text{Equação 19})$$

Em que f_c é a resistência à compressão (MPa), F_{cr} é a força máxima alcançada (N) e D é o diâmetro do corpo de prova.

Para cada dosagem empregada no presente estudo foram realizados três ensaios de resistência à compressão, totalizando 24 corpos de prova ensaiados à compressão. Todos os corpos de prova ensaiados são cilíndricos e possuem 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura. As idades adotadas para a realização dos ensaios foi 28 dias e aproximadamente 240 dias. A Máquina Universal EMIC com capacidade de 600 kN foi adotada para a execução desses ensaios.

5.7.2 Módulo de elasticidade longitudinal (E)

A realização do ensaio de módulo de elasticidade ocorreu de acordo com as prescrições da ABNT NBR 8522: 2008 – Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Conforme essa norma as faces dos corpos de prova precisam ser preparadas assim como para o ensaio de resistência à compressão e para essa pesquisa a retificação

dessas faces foi adotada. Além disso, o comprimento dos corpos de prova deve ser duas vezes maior que o diâmetro.

A fim de verificar a relação entre comprimento e diâmetro, tais dimensões devem ser verificadas. Para esse estudo foram empregados corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento.

Para a determinação do módulo de elasticidade, faz-se necessário a prévia obtenção dos resultados de resistência à compressão em no mínimo dois corpos de prova similares aos empregados no ensaio de módulo. A norma ABNT NBR 8522: 2008 especifica que três corpos de prova devem ser ensaiados para a determinação do módulo de elasticidade.

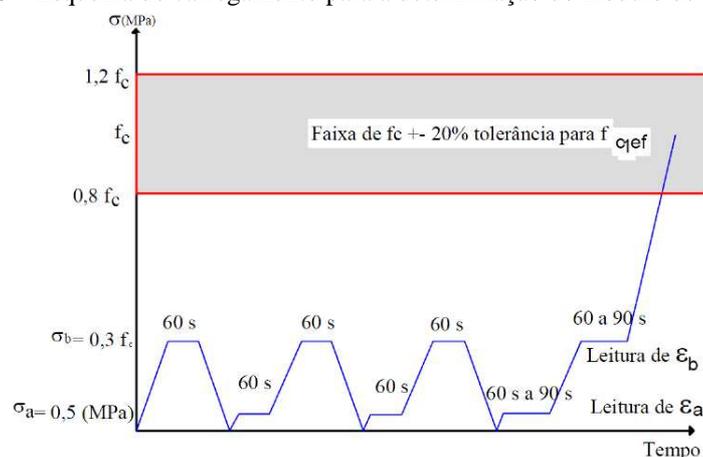
O ensaio consistiu em centralizar o corpo de prova nos pratos da máquina de ensaio, aplicar carregamentos e descarregamentos a uma velocidade de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s e realizar leituras de deformações, conforme apresentado na Figura 67. A Figura 68 explicita os valores de carregamento e descarregamento e os períodos de tempo que devem ser empregados.

Figura 67 – Realização do ensaio de módulo de elasticidade longitudinal



Fonte: Autora (2017).

Figura 68 – Esquema do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade



Fonte: ABNT NBR 8522: 2008.

Após a realização do ensaio, o módulo de elasticidade foi obtido por meio da Equação 20.

$$E = \left(\frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \right) \times 10^{-3} \quad (\text{Equação 20})$$

Em que σ_b é a tensão maior ($\sigma_b = 0,3f_c$) (MPa), ε_b é a deformação específica média do corpo de prova sob a tensão maior e ε_a é a deformação específica médias dos corpos de prova sob a tensão básica (0,5 MPa).

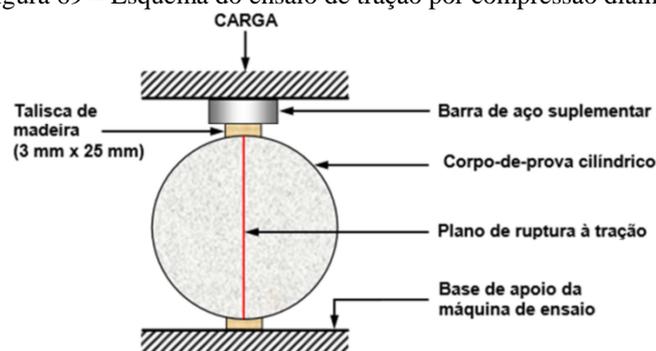
5.7.3 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de tração por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos foi desenvolvido no ano de 1943 pelo engenheiro, professor e pesquisador brasileiro Fernando Luiz Lobo Carneiro (JACINTHO; GIONGO, 2005). Esse ensaio é normatizado pela ABNT NBR 7222: 2011 – Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

Conforme a ABNT NBR 7222: 2011, admite-se a utilização de corpos de prova com relação comprimento/diâmetro entre 1 e 2. Dessa forma, para realização deste ensaio foram moldados dois corpos de prova para cada traço com diâmetro de 100 mm e comprimento de 200 mm.

O procedimento de ensaio consistiu em aplicar cargas de compressão ao longo das geratrizes diametralmente opostas dos corpos de prova. A carga foi aplicada continuamente e sem choques a uma velocidade constante de $0,05 \pm 0,02$ MPa/s até a ruptura do corpo de prova. Conforme a ABNT NBR 7222: 2011, tiras de chapa dura de fibra de madeira ou aglomerado devem ser colocadas entre os pratos da máquina e os corpos de prova. A Figura 69 apresenta uma representação esquemática do ensaio de tração por compressão diametral.

Figura 69 – Esquema do ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Conforme Mehta e Monteiro (2008), a tensão de compressão produz uma tensão de tração transversal, que é uniforme ao longo do diâmetro vertical. Dessa forma, a resistência à tração por compressão diametral é obtida pela Equação 21.

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \times F_{cr}}{\pi \times D \times l_{cp}} \quad (\text{Equação 21})$$

Em que $f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral (MPa), F_{cr} é a força máxima obtida (N), D é o diâmetro do corpo de prova (mm) e l_{cp} é o comprimento do corpo de prova (mm).

5.7.4 Tenacidade por meio do ensaio Barcelona simplificado

O ensaio Barcelona simplificado foi realizado em doze corpos de prova para cada mistura produzida, sendo que seis corpos de prova foram ensaiados no Laboratório de Estruturas e Materiais da FECIV/UFU e seis corpos de prova foram ensaiados no Laboratório da Poli/USP. Conforme especificado pela norma AENOR UNE 83515: 2010 foram empregados dois discos de carga de aço inoxidável com 37,5 mm de diâmetro e 30 mm de altura, assim como exposto na Figura 70.

Figura 70 – Discos de carga necessários para a execução do ensaio Barcelona simplificado



Fonte: Autora (2016).

Para a realização dos testes, os corpos de prova foram previamente cortados e identificados de acordo com o sentido da moldagem com auxílio de uma seta, de modo que a metade inferior do corpo de prova foi identificada pela letra A e a metade superior pela letra B, conforme a Figura 71. Tal especificação foi necessária, uma vez que os corpos de prova foram posicionados sempre no sentido em que foram moldados (com a seta apontando para cima) para a realização do ensaio Barcelona simplificado.

Figura 71 – Identificação dos corpos de prova para a realização do ensaio Barcelona simplificado conforme a moldagem



Fonte: Autora (2016).

Para a realização dos ensaios foi utilizada a máquina servo eletromecânica EMIC com capacidade de 600 kN. Já a aquisição de dados foi realizada utilizando o programa computacional Catman Easy pelo equipamento QuantumX. Além disso, a velocidade de deslocamento empregada foi de 0,5 mm/min.

As respostas do ensaio Barcelona simplificado, que são carga de puncionamento e deslocamento vertical, foram obtidas pelos próprios sensores da máquina de ensaio e também por sensores externos. Desse modo, fez-se possível comparar as medidas encontradas por meio de métodos distintos de aquisição de dados.

A Figura 72 apresenta o posicionamento dos sensores externos durante a realização do ensaio Barcelona simplificado.

Figura 72 – Configuração do ensaio Barcelona simplificado



Fonte: Autora (2017).

CAPÍTULO 6

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 INTRODUÇÃO

Diante da realização dos ensaios propostos, nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos para caracterizar o material compósito estudado. Dessa forma, a seguir são analisados os dados encontrados nos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade longitudinal, resistência à tração por compressão diametral e tenacidade, por meio do ensaio Barcelona simplificado. A fim de verificar se algum dos valores medidos em todos os ensaios é discrepante dos demais e extrapola a tendência dominante, o critério Chauvenet foi aplicado.

6.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL

Na Tabela 15 são exibidos os resultados encontrados de módulo de elasticidade médio (E_m) aos 28 dias e aos 240 dias segundo a ABNT NBR 8522: 2008 com os respectivos valores de desvio padrão (S_d) e coeficiente de variação (CV).

Tabela 15 – Resultados de módulo de elasticidade longitudinal (continua)

Dosagem	Módulo de elasticidade aos 28 dias			Módulo de elasticidade aos 240 dias		
	E_m (GPa)	S_d (GPa)	CV (%)	E_m (GPa)	S_d (GPa)	CV (%)
C20 – 0,00% (Traço I – referência)	30,77	0,38	1,23	39,97	3,71	9,28
C20 – 0,50% (Traço II)	37,00	1,25	3,39	44,70	0,87	1,95
C20 – 0,64% (Traço III)	31,87	0,93	2,92	44,00	5,20	11,83
C20 – 0,77% (Traço IV)	33,40	0,72	2,16	42,10	8,48	20,14

Tabela 15 – Resultados de módulo de elasticidade longitudinal (conclusão)

Dosagem	Módulo de elasticidade aos 28 dias			Módulo de elasticidade aos 240 dias		
	E_m	S_d	CV	E_m	S_d	CV
	(GPa)	(GPa)	(%)	(GPa)	(GPa)	(%)
C40 – 0,00% (Traço V – referência)	57,00	3,04	5,34	54,80	6,65	12,13
C40 – 0,50% (Traço VI)	57,20 ¹	2,83 ¹	4,94 ¹	70,53	0,99	1,40
C40 – 0,64% (Traço VII)	59,43	8,95	15,06	68,40	2,76	4,04
C40 – 0,77% (Traço VIII)	60,63	1,45	2,39	67,87	1,37	2,01

Fonte: Autora (2017).

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que o módulo de elasticidade aos 28 dias e aos 240 dias da série C20 foi ligeiramente superior para os concretos com fibras. A Tabela 16 apresenta o aumento ou a redução do módulo de elasticidade e a diferença percentual de cada dosagem de CRFA em relação à dosagem de referência (sem fibras).

Tabela 16 – Ganho/perda no módulo de elasticidade das amostras com fibras em relação às amostras sem fibras

Dosagem	Módulo de elasticidade aos 28 dias		Módulo de elasticidade aos 240 dias	
	Aumento/redução nos valores (GPa)	Aumento/redução percentual (%)	Aumento nos valores (GPa)	Aumento percentual (%)
	C20 – 0,00% (Traço I – referência)	-	-	-
C20 – 0,50% (Traço II)	+ 6,23	+ 20,25	+ 4,73	+ 11,83
C20 – 0,64% (Traço III)	+ 1,10	+ 3,57	+ 4,03	+ 10,08
C20 – 0,77% (Traço IV)	+ 2,63	+ 8,55	+ 2,03	+ 5,08
C40 – 0,00% (Traço V – referência)	-	-	-	-
C40 – 0,50% (Traço VI)	+ 0,20	+ 0,35	+ 15,73	+ 28,70
C40 – 0,64% (Traço VII)	+ 2,43	+ 4,26	+ 13,60	+ 24,82
C40 – 0,77% (Traço VIII)	+ 3,63	+ 6,37	+ 13,07	+ 23,85

Fonte: Autora (2017).

Conforme citado no item 3.3.1, o material compósito é constituído em volume principalmente pela fase matriz, de modo que essa é a fase que mais interfere no módulo de elasticidade resultante. Dessa maneira, como pode ser notado na Tabela 12, a alteração na resistência da matriz gera um aumento mais significativo no módulo de elasticidade que a adição de fibras.

¹Valores encontrados por meio de ensaios em duas amostras.

6.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Na Tabela 17 são apresentados os resultados de resistência à compressão obtidos conforme a ABNT NBR 5739: 2007. Nessa tabela são discriminados os valores de resistência à compressão média (f_{cm}), desvio padrão (S_d) e coeficiente de variação (CV) para os ensaios realizados aos 28 dias e aos 240 dias após a moldagem.

Tabela 17 – Resultados de resistência à compressão

Dosagem	Resistência à compressão aos 28 dias			Resistência à compressão aos 240 dias		
	f_{cm}	S_d	CV	f_{cm}	S_d	CV
	(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)
C20 – 0,00% (Traço I - referência)	27,40	2,93	10,70	39,25	1,14	2,90
C20 – 0,50% (Traço II)	35,17	0,76	2,15	47,96	0,97	2,01
C20 – 0,64% (Traço III)	31,41	2,27	7,22	46,60	0,97	2,01
C20 – 0,77% (Traço IV)	32,45	0,36	1,10	46,10	0,97	2,01
C40 – 0,00% (Traço V - referência)	45,76	11,48	25,09	55,40 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹
C40 – 0,50% (Traço VI)	42,09	9,26	22,00	63,04	7,72	12,25
C40 – 0,64% (Traço VII)	57,83	5,11	8,83	69,58	3,23	4,64
C40 – 0,77% (Traço VIII)	56,31	1,67	2,96	64,39	5,77	8,95

Fonte: Autora (2017).

A partir da Tabela 17, pode-se notar que as amostras da série C20 com fibras ensaiadas aos 28 dias e aos 240 dias apresentaram resistência à compressão média maior que as amostras sem fibras (Traço I). Os dados da série C40 também indicam um aumento na resistência à compressão para todas as dosagens com fibras, exceto para o compósito com 0,50% de fibras ensaiado aos 28 dias, esse que apresentou uma redução na resistência.

A Tabela 18 apresenta o aumento ou a redução da resistência à compressão e a diferença percentual de cada dosagem de CRFA em relação à dosagem de referência (sem fibras).

Tabela 18 – Ganho/perda na resistência à compressão das amostras com fibras em relação às amostras sem fibras (continua)

Dosagem	Resistência à compressão aos 28 dias		Resistência à compressão aos 240 dias	
	Aumento/redução nos valores (MPa)	Aumento/redução percentual (%)	Aumento nos valores (MPa)	Aumento percentual (%)
	C20 – 0,00% (Traço I – referência)	-	-	-
C20 – 0,50% (Traço II)	+ 7,77	+ 28,36	+ 8,71	+ 22,19
C20 – 0,64% (Traço III)	+ 4,01	+ 14,64	+ 7,35	+ 18,73
C20 – 0,77% (Traço IV)	+ 5,05	+ 18,43	+ 6,85	+ 17,45

Tabela 18 – Ganho/perda na resistência à compressão das amostras com fibras em relação às amostras sem fibras (conclusão)

Dosagem	Resistência à compressão aos 28 dias		Resistência à compressão aos 240 dias	
	Aumento/redução nos valores (MPa)	Aumento/redução percentual (%)	Aumento nos valores (MPa)	Aumento percentual (%)
C40 – 0,00% (Traço V – referência)	-	-	-	-
C40 – 0,50% (Traço VI)	- 3,67	- 8,02	+ 7,64	+ 13,79
C40 – 0,64% (Traço VII)	+ 12,07	+ 26,38	+ 14,18	+ 25,60
C40 – 0,77% (Traço VIII)	+ 10,55	+ 23,06	+ 8,99	+ 16,23

Fonte: Autora (2017).

Vale ressaltar que a redução na f_{cm} entre o concreto com 0% de fibras e 0,50% da série C40 foi de 3,67 MPa, isto é, inferior ao desvio padrão para o compósito contendo esse teor de fibras, sugerindo uma similaridade entre as resistências obtidas. Além disso, especificamente em relação ao Traço VI, pode-se levantar a hipótese de que a dosagem e/ou a moldagem dos corpos de prova tenha sido executada de modo inadequado e, por isso, os dados obtidos tenham certa discordância em relação aos demais. Outro fator que também poderia interferir nas propriedades dessa dosagem seria o teor de ar incorporado medido.

Porém, os procedimentos adotados durante a mistura e a moldagem das amostras ocorreram de modo estritamente igual para todos os traços e conforme exposto na Tabela 14, o teor de ar encontrado para o Traço VI foi igual ou similar às outras dosagens. Diante do exposto, a discordância encontrada no Traço VI para a resistência à compressão é atribuída à variabilidade inerente do material analisado

Já ao comparar os valores encontrados aos 28 dias e 240 dias, pode-se observar que todas as dosagens obtiveram ganho de resistência à compressão média com o aumento da idade.

Arif (2014) em sua pesquisa obteve valores superiores de resistência à compressão do concreto (f_{ck} de 30 MPa e 40 MPa) adicionando 30 kg/m³ e 60 kg/m³ de fibras de aço com ancoragem nas extremidades e fator de forma próximo a 67. O aumento obtido pelo autor foi de 7,43% até 22,35% em relação aos concretos de referência. Tais porcentagens que estão similares às encontradas no presente estudo.

6.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Na Tabela 19 são apresentados os resultados de resistência à tração obtidos conforme a ABNT NBR 7222: 2010. Nessa tabela são discriminados os valores de resistência à tração

por compressão diametral média (f_{cm}), desvio padrão (S_d) e coeficiente de variação (CV) para os ensaios realizados aos 28 dias e aos 240 dias após a moldagem.

Tabela 19 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral

Dosagem	Resistência à tração aos 28 dias			Resistência à tração aos 240 dias		
	f_{cm} (MPa)	S_d (MPa)	CV (%)	f_{cm} (MPa)	S_d (MPa)	CV (%)
C20 – 0,00% (Traço I - referência)	1,49	0,10	6,64	1,84	0,09	5,01
C20 – 0,50% (Traço II)	2,10	0,01	0,34	2,76	0,13	4,74
C20 – 0,64% (Traço III)	2,01	0,30	14,78	1,97	0,15	7,71
C20 – 0,77% (Traço IV)	1,81	0,16	8,59	2,16	0,08	3,93
C40 – 0,00% (Traço V - referência)	1,69	0,62	36,82	1,81	0,01	0,78
C40 – 0,50% (Traço VI)	2,59	0,12	4,65	2,88	0,11	3,69
C40 – 0,64% (Traço VII)	2,59	0,59	22,70	3,28	0,47	14,35
C40 – 0,77% (Traço VIII)	3,06	0,47	15,25	2,64	0,14	5,47

Fonte: Autora (2017).

Diante dos resultados apresentados, pode-se afirmar que todas as amostras com adição de fibras atingiram maiores valores de resistência à tração que as amostras de referência (sem fibras). Entretanto, o ganho de resistência não foi crescente conforme o aumento do volume de fibras. A Tabela 20 apresenta o ganho de resistência e o ganho percentual de cada dosagem de CRFA em relação à dosagem de referência.

Tabela 20 – Ganho na resistência à tração das amostras com fibras em relação às amostras sem fibras

Dosagem	Resistência à tração média aos 28 dias		Resistência à tração média aos 240 dias	
	Aumento nos valores (MPa)	Aumento percentual (%)	Aumento nos valores (MPa)	Aumento percentual (%)
C20 – 0,00% (Traço I – referência)	-	-	-	-
C20 – 0,50% (Traço II)	+ 0,61	+ 40,94	+ 0,92	+ 50,00
C20 – 0,64% (Traço III)	+ 0,52	+ 34,90	+ 0,13	+ 7,07
C20 – 0,77% (Traço IV)	+ 0,32	+ 21,48	+ 0,32	+ 17,39
C40 – 0,00% (Traço V – referência)	-	-	-	-
C40 – 0,50% (Traço VI)	+ 0,90	+ 53,25	+ 1,07	+ 59,12
C40 – 0,64% (Traço VII)	+ 0,90	+ 53,25	+ 1,47	+ 81,22
C40 – 0,77% (Traço VIII)	+ 1,37	+ 81,07	+ 0,83	+ 45,86

Fonte: Autora (2017).

Por meio da Tabela 20, pode-se observar que os maiores ganhos na resistência média à tração por compressão diametral ocorreram para a série C40. Tal fato pode se justificado, pois conforme estudo realizado por Figueiredo, Mourad e Carvalho (2000) a maior resistência à compressão da matriz do concreto confere maior aderência entre a matriz e as

fibras de aço. Desse modo, as solicitações impostas ao compósito são transferidas às fibras de maneira mais eficiente.

Ao comparar os resultados encontrados aos 28 dias e aos 240 dias, vale ressaltar que os Traços III e VIII apresentaram um menor valor de resistência com o aumento da idade. Porém, ao analisar o desvio padrão, que demonstra a dispersão dos resultados em torno do valor médio, conclui-se que os valores aos 28 dias e aos 240 dias estão na mesma faixa de dados, fato que demonstra a similaridade entre resultados.

6.5 TENACIDADE DO CONCRETO COM FIBRAS

A tenacidade do material compósito produzido foi a propriedade avaliada por meio do ensaio Barcelona simplificado, esse que fez parte integrante do programa interlaboratorial entre a FECIV/UFU e a Poli/USP. A aquisição de dados ocorreu de diferentes maneiras no laboratório da FECIV/UFU e no laboratório da Poli/USP, conforme apresentado no Quadro 6.

Quadro 6 – Métodos de aquisição de dados utilizados em cada laboratório

Laboratórios	Aquisição de dados
FECIV/UFU	Célula de carga e LVDT internos da máquina de ensaio
	Célula de carga e LVDT externos ao atuador
Poli/USP	Célula de carga e LVDT internos da máquina de ensaio

Fonte: Autora (2017).

A seguir são apresentados e analisados os resultados obtidos em cada laboratório por meio dos métodos de aquisição de dados empregados.

6.5.1 Laboratório da FECIV/UFU

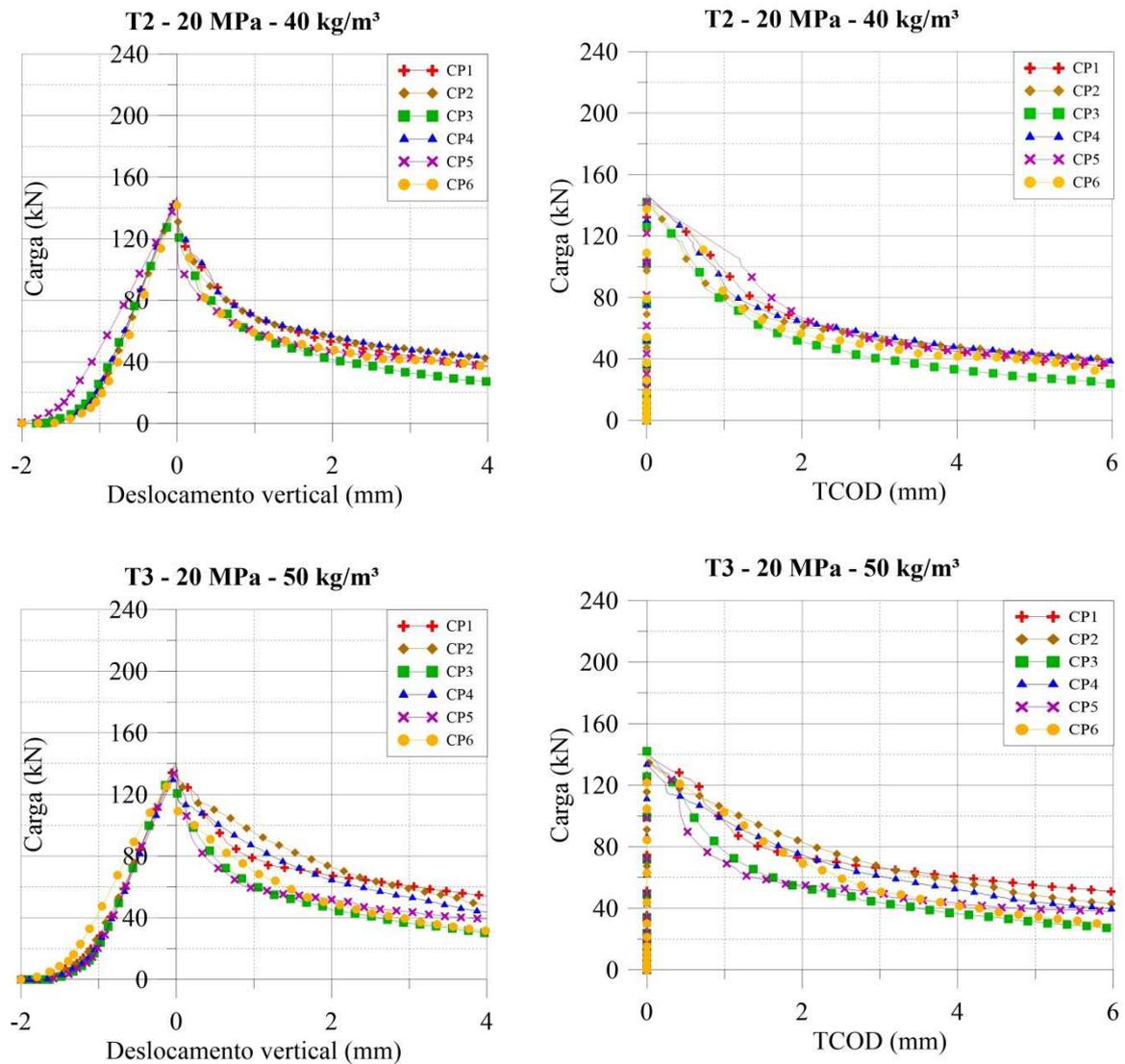
A obtenção dos resultados dos ensaios realizados na FECIV/UFU, conforme apresentado no Quadro 6, ocorreram de duas maneiras distintas: por meio dos sensores internos da máquina de ensaio e por meio de LVDT e célula de carga externos a máquina de ensaio. A obtenção de resultados com métodos distintos tem por finalidade verificar as possíveis variações decorrentes do tipo de sensor empregado.

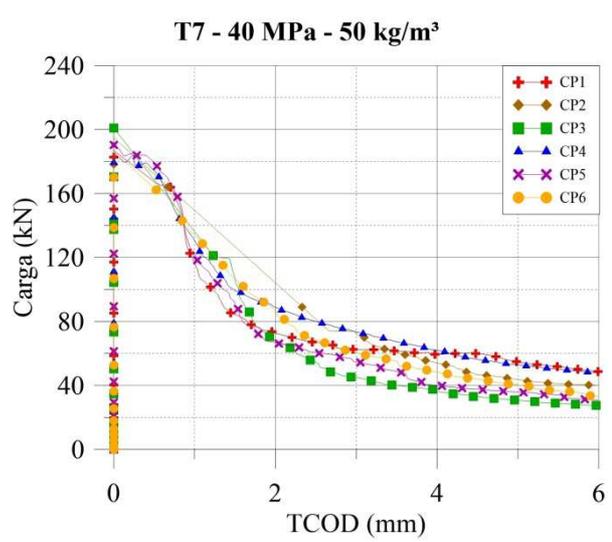
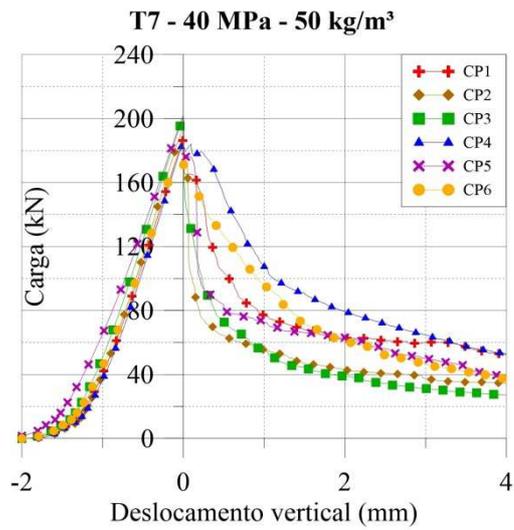
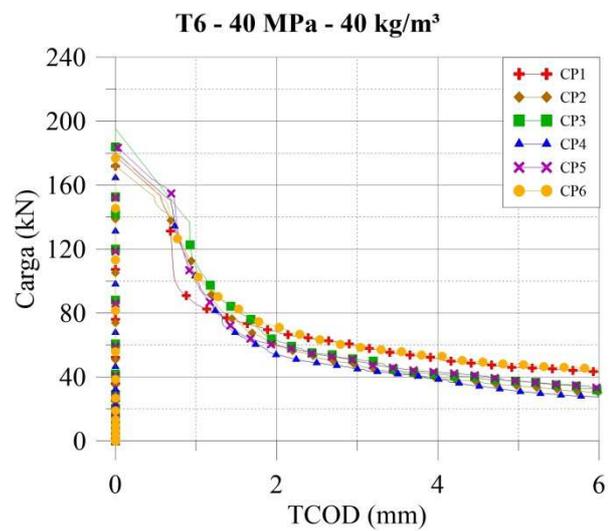
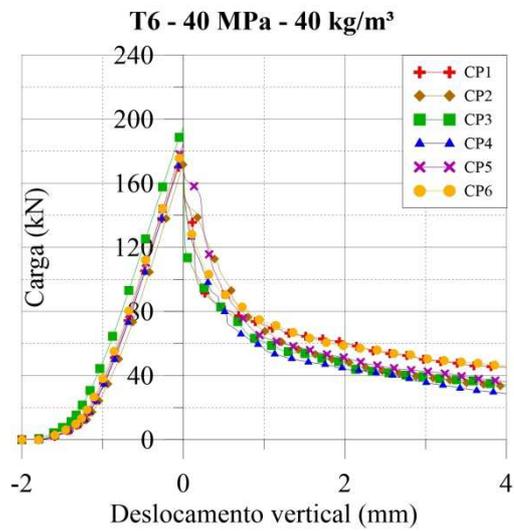
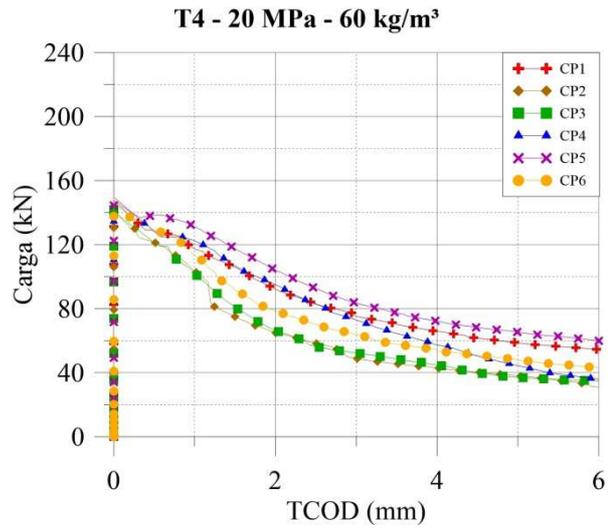
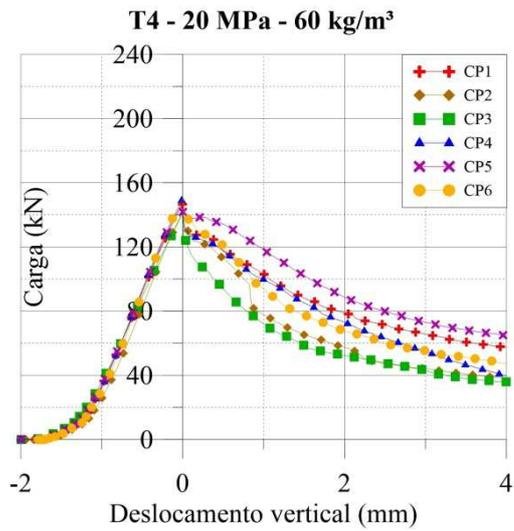
Vale ressaltar ainda que, assim como cita Barros Neto et al. (2001), os testes foram realizados de modo aleatório, a fim de impedir que fatores indesejáveis, dos quais não se

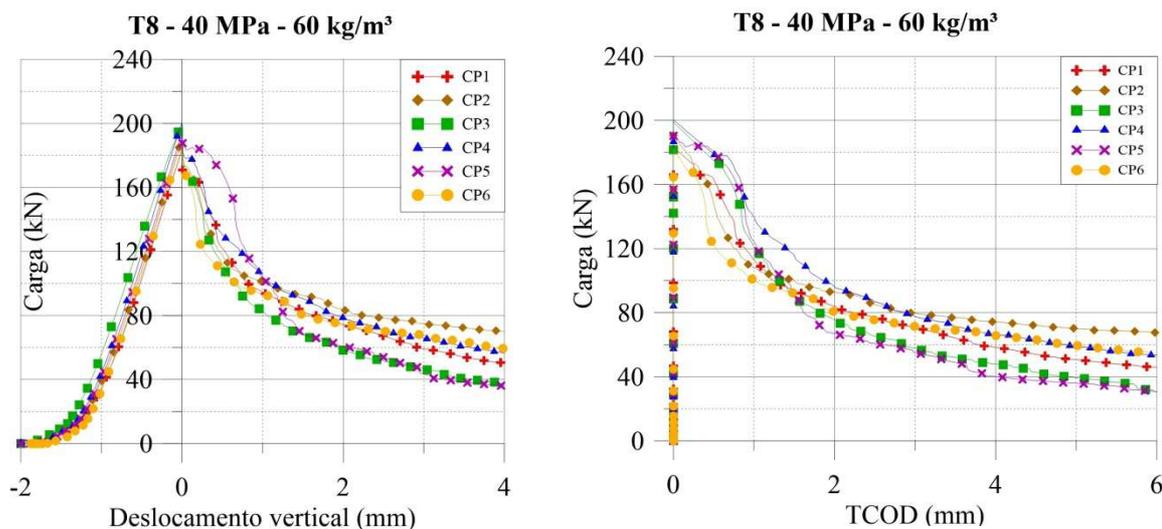
tem ciência, contaminassem os efeitos que se tem o objetivo de investigar. Desse modo, a seguir são apresentados os resultados obtidos por meio de cada método de aquisição de dados.

Na Figura 73 são apresentadas as curvas de carga por deslocamento vertical obtidas por meio do ensaio Barcelona simplificado realizado na FECIV/UFU utilizando os sensores (célula de carga e LVDT) internos da máquina de ensaio. Além disso, a partir das curvas de carga versus deslocamento vertical e tendo em vista as Equações 9, 10 e 11 apresentadas no item 4.3.2 propostas por Pujadas et al. (2013), também são apresentadas as curvas de carga versus TCOOD.

Figura 73 – Curvas de carga versus deslocamento vertical e carga versus TCOOD obtidas por meio do ensaio Barcelona simplificado (célula de carga e LVDT internos da máquina de ensaio)







Fonte: Autora, 2017.

Por meio das curvas de carga versus deslocamento vertical expostas na Figura 73, a tenacidade de cada dosagem é obtida ao calcular a área sob essas curvas. Assim, a Tabela 21 exibe os valores médios de tenacidade, com os respectivos desvios padrões (S_d) e coeficientes de variação (CV).

Tabela 21 – Tenacidade para o ensaio Barcelona simplificado utilizando LVDT e célula de carga internos à máquina de ensaio

Dosagem	Tenacidade		
	Média (N.m)	S_d (N.m)	CV (%)
C20 – 0,50% (Traço II)	227,9560	22,4387	9,8435
C20 – 0,64% (Traço III)	258,1401	43,5945	16,8879
C20 – 0,77% (Traço IV)	308,1188	50,7689	16,4770
C40 – 0,50% (Traço VI)	238,8037	22,4425	9,3979
C40 – 0,64% (Traço VII)	270,9782	68,0870	25,1264
C40 – 0,77% (Traço VIII)	333,6092	31,4178	9,4175

Fonte: Autora (2017).

Um parâmetro a ser definido para a análise dos dados é a repetitividade, esse que pode ser caracterizado como a variabilidade de certo instrumento ou método de medição. De modo que a repetitividade está em função da capacidade do método de medição em fornecer respostas muito próximas, sob mesmas condições e em repetidas vezes (VIM, 2008).

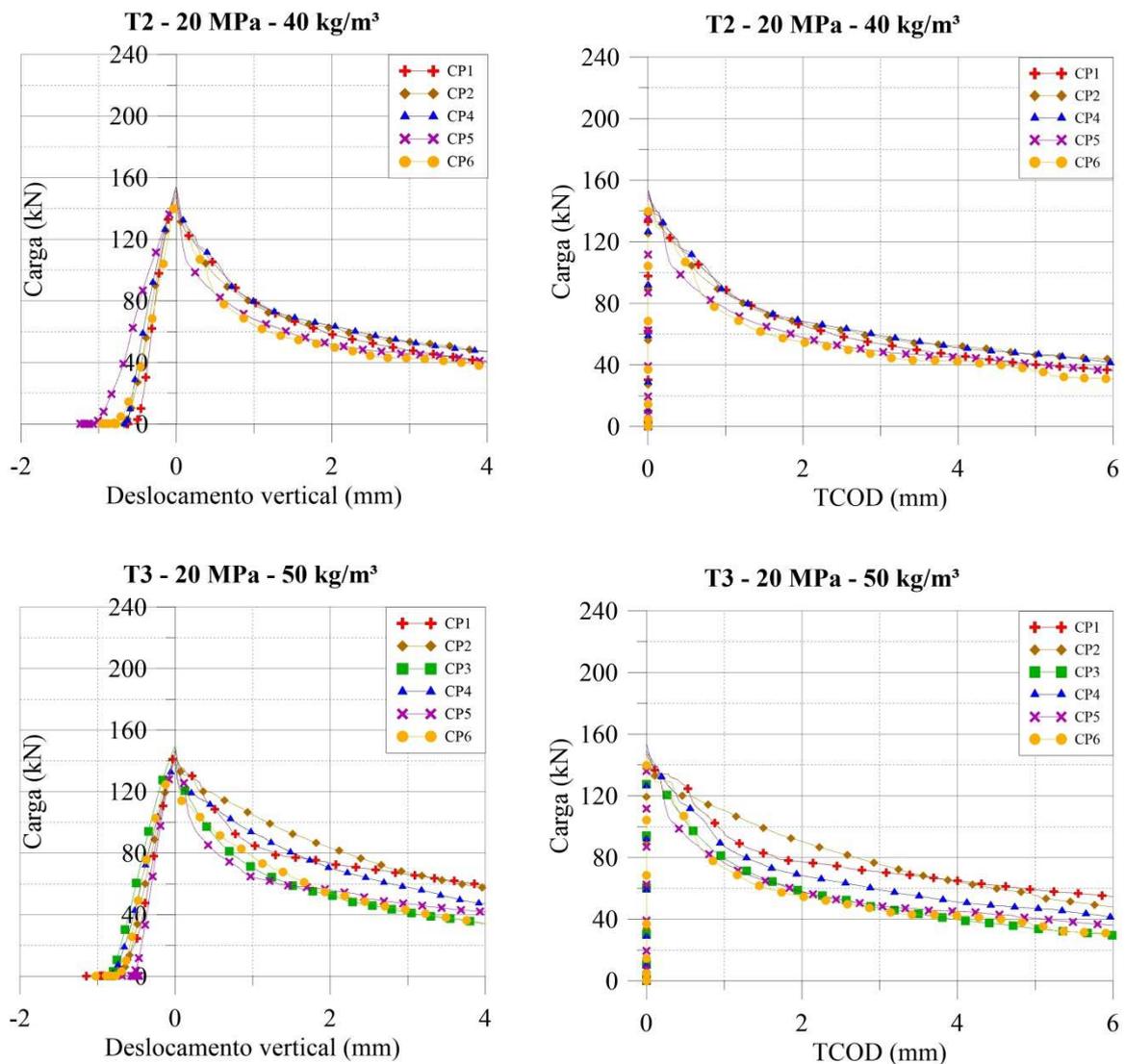
Diante disso, a partir das curvas apresentadas na Figura 73, com os resultados de desvio padrão e coeficientes de variação dispostos na Tabela 19, esses que são próximos ou inferiores aos obtidos por Molins et. al (2009), pode-se observar que houve concordância

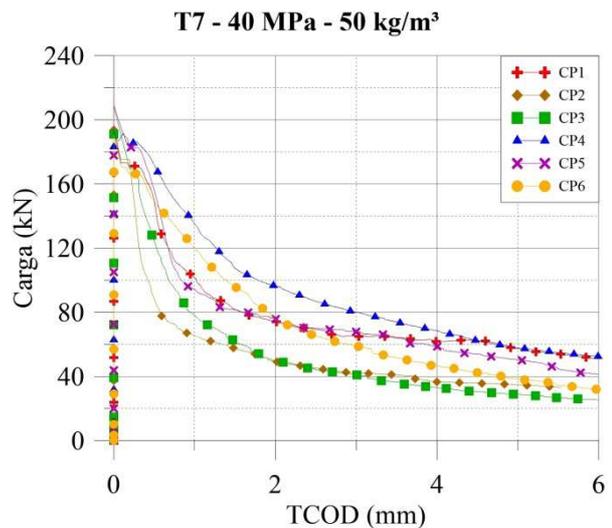
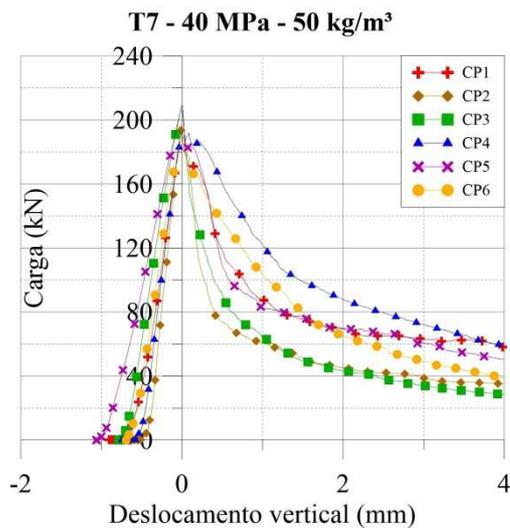
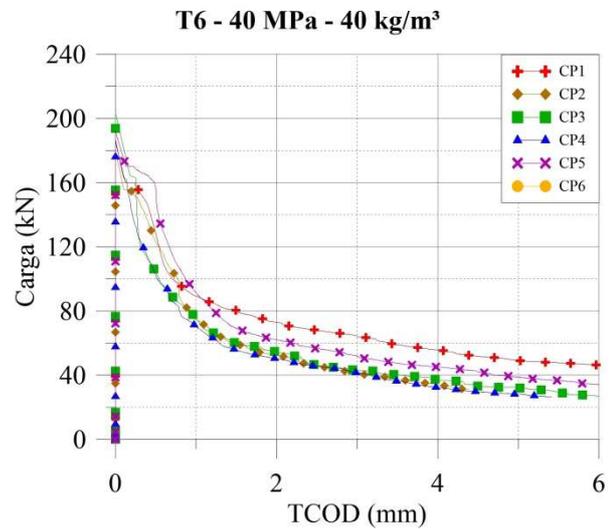
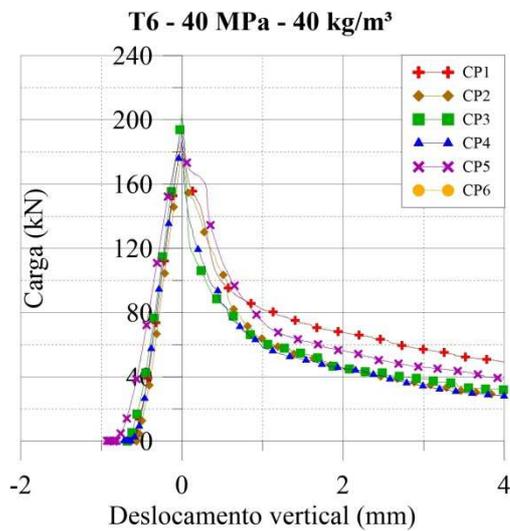
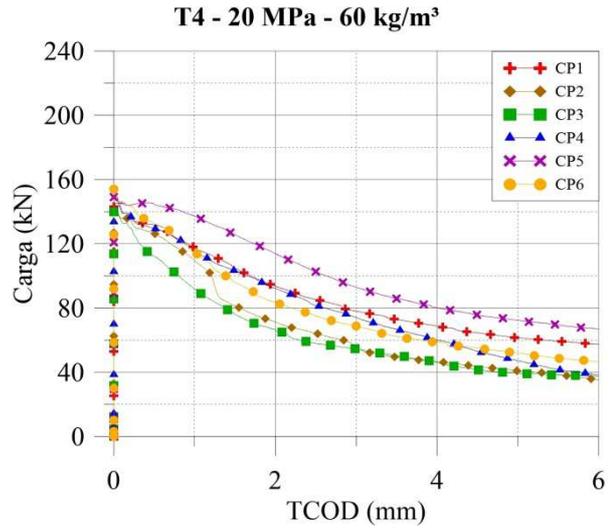
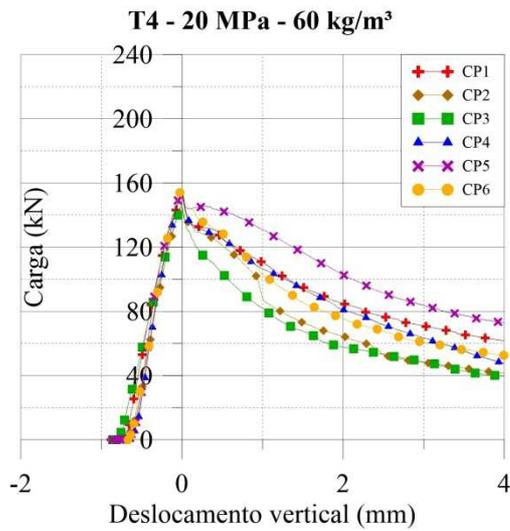
entre os resultados das medições realizadas por meio do ensaio Barcelona simplificado, conferindo indícios de repetitividade ao mesmo.

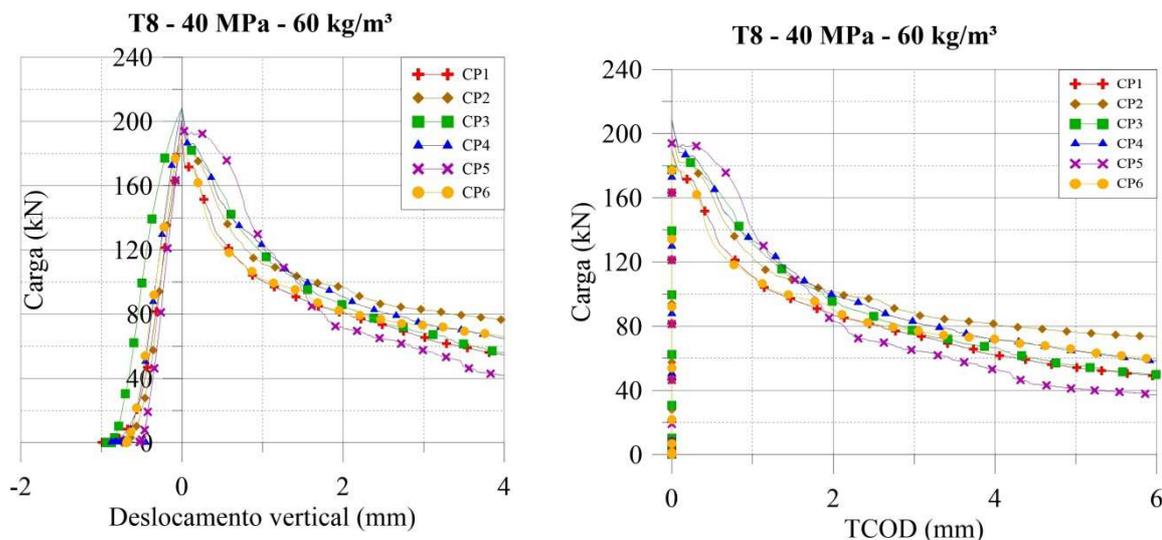
Para averiguar possíveis alterações nos valores medidos de tenacidade devido aos sensores empregados, a carga e o deslocamento vertical também foram medidos por célula de carga e LVDT externos, sendo que as curvas obtidas estão apresentadas na Figura 74. No caso do Traço II (série C20 e 40 kg/m³ de fibras), após aplicar o critério de Chauvenet uma das curvas resultantes foi excluída.

Assim como para os resultados encontrados pelos sensores da máquina de ensaio, as curvas de carga versus TCOD também foram traçadas para os dados medido por sensores externos. Tais curvas também estão dispostas na Figura 74.

Figura 74 – Curvas de carga versus deslocamento vertical e carga versus TCOD obtidas por meio do ensaio Barcelona simplificado (célula de carga e LVDT externos ao atuador)







Fonte: Autora (2017).

A fim de avaliar a tenacidade das amostras testadas utilizando sensores externos, as áreas sob as curvas de carga versus deslocamento vertical da Figura 74 foram calculadas em N.m. Na Tabela 22 são dispostos os valores médios de tenacidade obtidos para cada dosagem, com os respectivos desvios padrões (S_d) e coeficientes de variação (CV).

Tabela 22 – Tenacidade obtida por meio do ensaio Barcelona simplificado utilizando LVDT e célula de carga externos ao atuador

Dosagem	Tenacidade		
	Média (N.m)	S_d (N.m)	CV (%)
C20 – 0,50% (Traço II)	282,9006	11,3839	4,0240
C20 – 0,64% (Traço III)	301,1042	49,9100	16,5757
C20 – 0,77% (Traço IV)	355,5404	62,8417	17,6750
C40 – 0,50% (Traço VI)	312,1378	43,7871	14,0281
C40 – 0,64% (Traço VII)	334,2690	71,1641	21,2895
C40 – 0,77% (Traço VIII)	396,2895	20,9745	5,2927

Fonte: Autora (2017).

Diante dos valores explicitados nas Tabelas 21 e 22, pode-se notar a similaridade na relação entre os resultados médios e também nos coeficientes de variação obtidos com métodos distintos de aquisição de dados. As relações encontradas entre os resultados de tenacidade estão dispostas na Tabela 23.

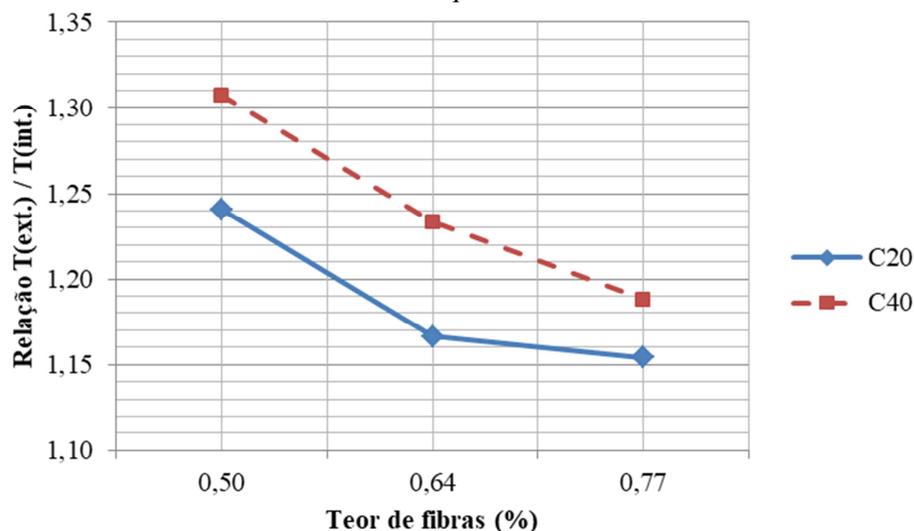
Tabela 23 – Relação entre a tenacidade medida no laboratório da FECIV/UFU por meio de LVDT e célula de carga externos e por meio de LVDT e célula de carga internos

Dosagem	UFU – EBS		UFU - EBS		Relação $T_{EXT.}/T_{INT.}$
	Aquisição Externa		Aquisição Interna		
	Tenacidade média (N.m)	CV (%)	Tenacidade média (N.m)	CV (%)	
C20 – 0,50% (Traço II)	282,9006	4,0240	227,9560	9,8435	1,2410
C20 – 0,64% (Traço III)	301,1042	16,5757	258,1401	16,8879	1,1664
C20 – 0,77% (Traço IV)	355,5404	17,6750	308,1188	16,4770	1,1539
C40 – 0,50% (Traço VI)	312,1378	14,0281	238,8037	9,3979	1,3071
C40 – 0,64% (Traço VII)	334,2690	21,2895	270,9782	25,1264	1,2336
C40 – 0,77% (Traço VIII)	396,2895	5,2927	333,6092	9,4175	1,1879

Fonte: Autora (2017).

Por meio dos dados da Tabela 20, faz-se possível representar graficamente a relação entre os resultados obtidos. Essa representação está exposta na Figura 75.

Figura 75 – Representação grafica da relação entre a tenacidade medida por sensores externos e por sensores internos da máquina de ensaio



Fonte: Autora (2017).

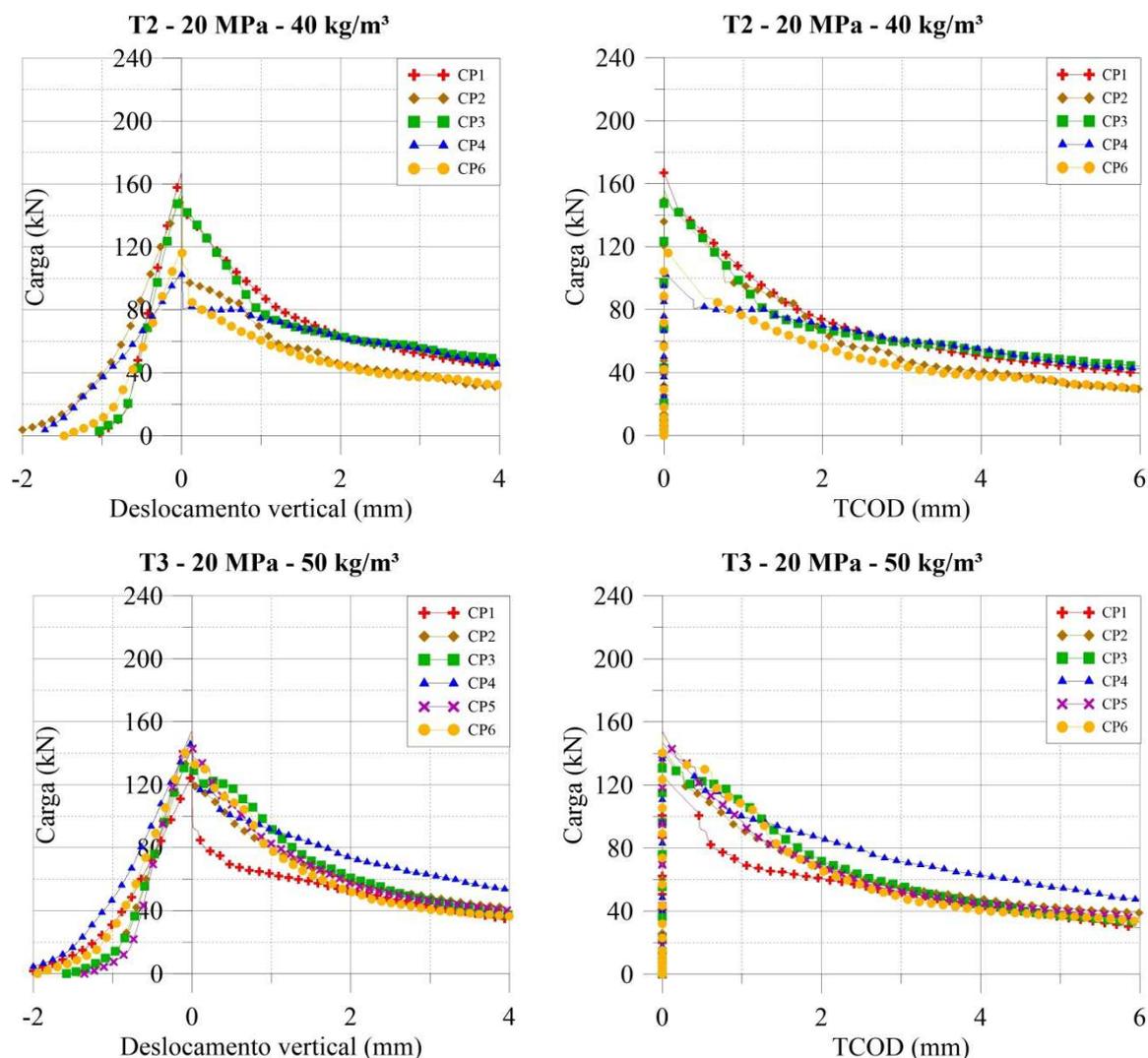
Tendo em vista os resultados médios de tenacidade encontrados utilizando os sensores da própria máquina de ensaio e sensores externos e a relação entre os mesmos, tem-se que aqueles medidos por sensores externos apresentam valores de tenacidade em média 18,71% superiores aos demais para a série C20 e 24,29% superiores aos demais para a série C40. Dessa forma, os resultados obtidos pela máquina de ensaio podem ser considerados como favoráveis à segurança, uma vez que são em média 21,50% superiores aos obtidos por sensores externos.

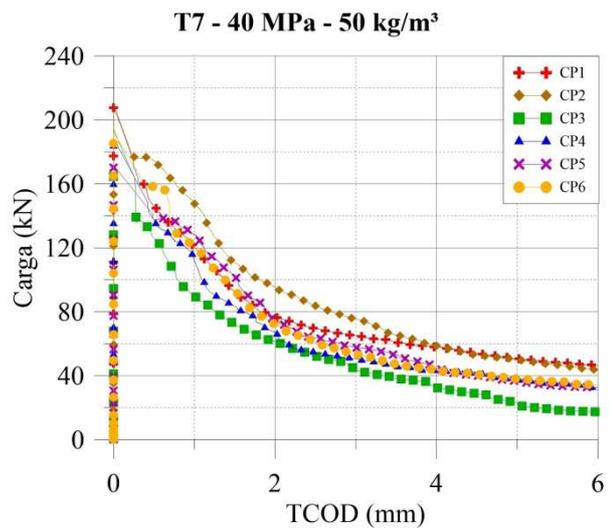
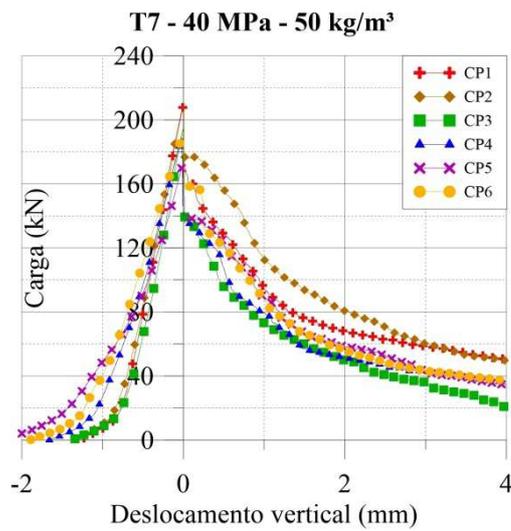
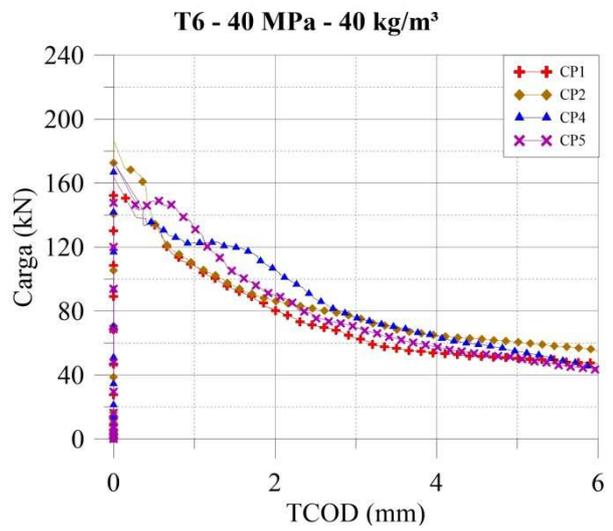
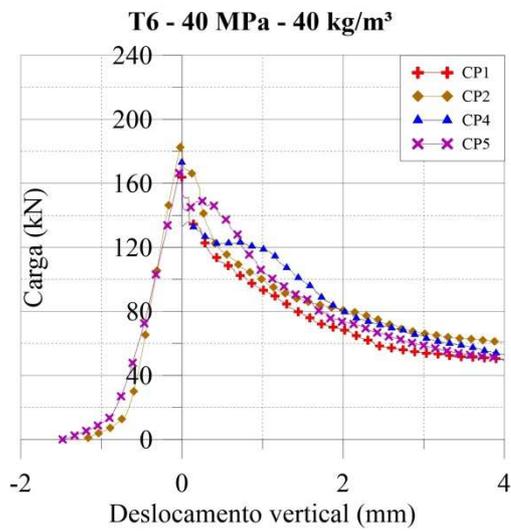
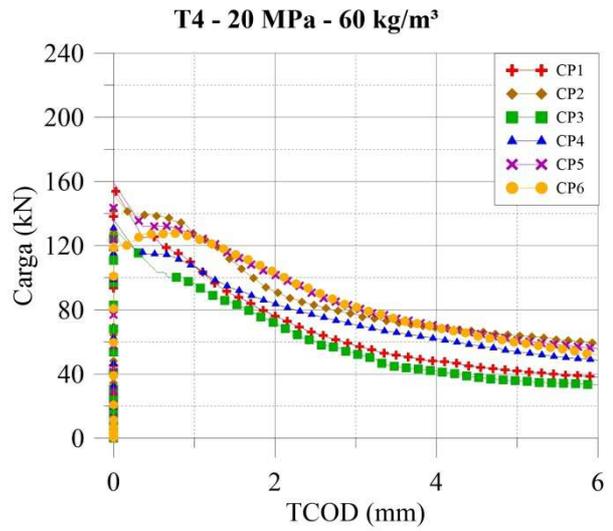
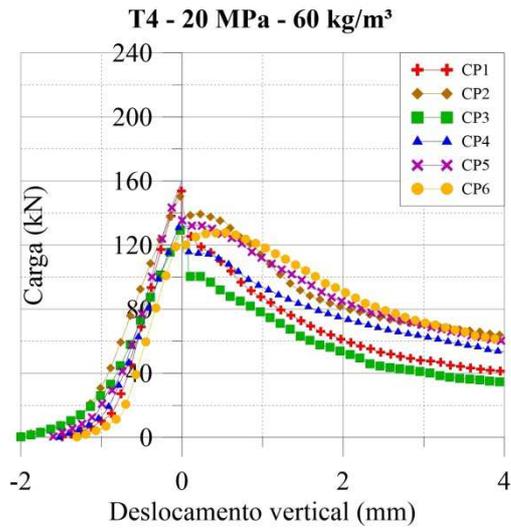
6.5.2 Laboratório da Poli/USP

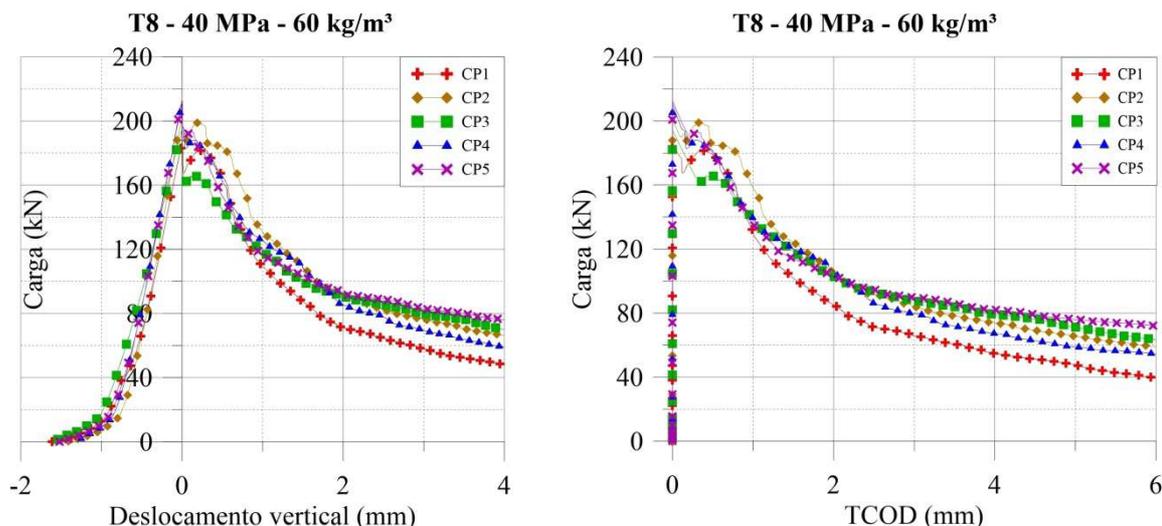
A aquisição de dados dos ensaios realizados no laboratório da Universidade de São Paulo ocorreu por meio da célula de carga e do LVDT da própria máquina de ensaio. Diante disso, na Figura 76 são apresentadas as curvas de carga por deslocamento vertical de cada dosagem e as respectivas curvas de carga versus TCOd.

Vale ressaltar que a dosagem de 20 MPa e com 0,50% de fibras (Traço II) apresentou uma curva com formato anômalo e, por isso, a mesma foi excluída. A dosagem com 0,50% de fibras e 40 MPa (Traço VI) resultou em duas curvas com características discordantes às demais e, assim, ambas foram excluídas. Já a dosagem de 40 MPa e 0,77% (Traço VIII) teve uma de suas curvas excluídas após a aplicação do critério de Chauvenet.

Figura 76 – Curvas de carga versus deslocamento vertical e carga versus TCOd obtidas por meio do ensaio Barcelona simplificado com célula de carga e LVDT internos da máquina de ensaio no laboratório da Poli/USP







Fonte: Autora (2017).

Para avaliar a tenacidade, as áreas sob as curvas de carga versus deslocamento vertical das amostras ensaiadas foram calculadas em N.m. Assim, na Tabela 24 são dispostos os valores médios de tenacidade para cada dosagem, com os respectivos desvios padrões (S_d) e coeficientes de variação (CV).

Tabela 24 – Tenacidade para o ensaio Barcelona simplificado utilizando LVDT e célula de carga internos

Dosagem	Tenacidade		
	Média (N.m)	S_d (N.m)	CV (%)
C20 – 0,50% (Traço II)	254,3279	40,7942	16,0400
C20 – 0,64% (Traço III)	267,6907	31,4290	11,7408
C20 – 0,77% (Traço IV)	323,3183	55,6228	17,2037
C40 – 0,50% (Traço VI)	338,2058	22,4356	6,6337
C40 – 0,64% (Traço VII)	291,4545	51,4928	17,6675
C40 – 0,77% (Traço VIII)	408,0324	30,2018	7,4018

Fonte: Autora (2017).

Tendo em vista os dados citados na Tabela 24, pode-se observar um comportamento discordante ao esperado para a série C40. Entretanto, ao verificar o desvio padrão de cada dosagem, nota-se que a diferença entre as tenacidades médias é inferior a soma dos desvios.

Todavia, vale ressaltar que os corpos de prova ensaiados no laboratório da Universidade de São Paulo passaram por procedimentos um pouco distintos daqueles ensaiados no laboratório da Universidade Federal de Uberlândia e, por isso, embora todos os procedimentos tenham sido executados conforme as normativas técnicas, a série C40 pode ter apresentado comportamento anômalo devido a essas diferenças. Como exemplo dos

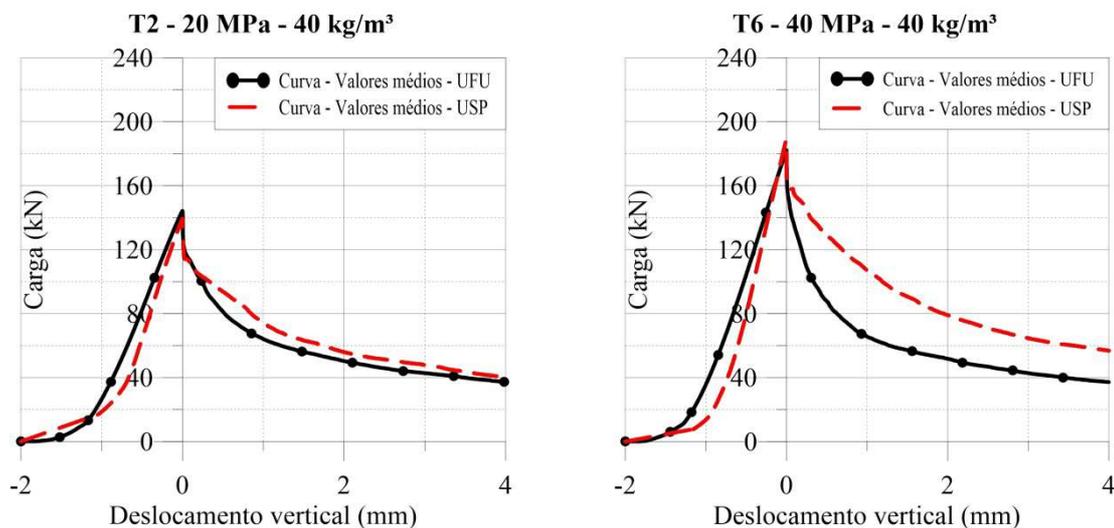
procedimentos, pode-se citar que as amostras precisaram ser embaladas e transportadas para São Paulo; as mesmas não foram retificadas, uma vez que não se viu necessidade para tal procedimento e as amostras não necessariamente foram ensaiadas de modo aleatório.

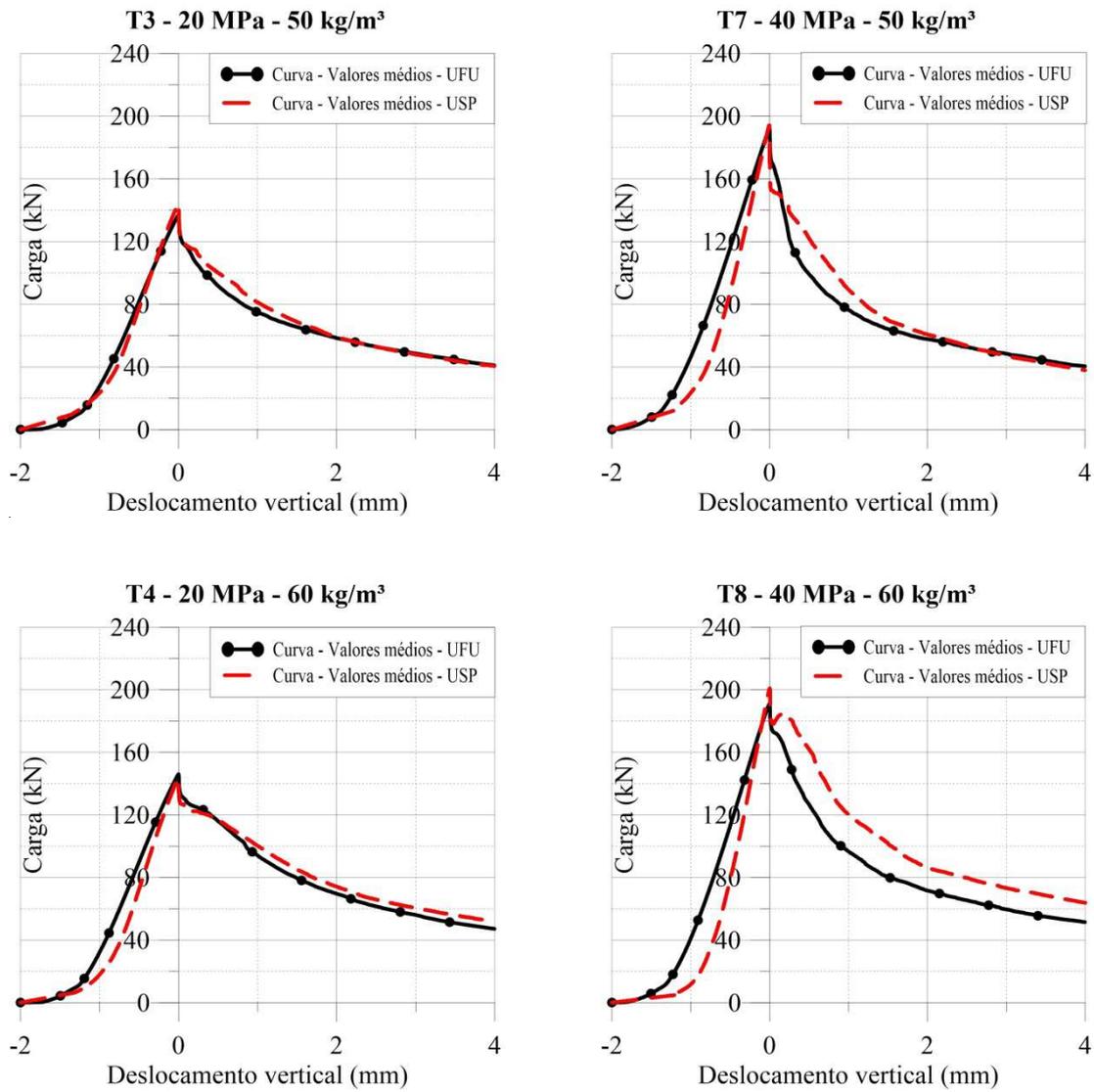
Em relação à repetitividade, assim como observado nos resultados dos testes realizados na FECIV/UFU, nota-se por meio das curvas que as mesmas apresentam concordância. Além disso, os valores dos coeficientes de variação encontrados apresentam similaridade e estão próximos ao limite de 16% estabelecido pela ASTM C1609: 2012, essa que utiliza sistema fechado de controle de velocidade, fato que demonstra a homogeneidade do conjunto de resultados.

6.5.3 Análise comparativa entre resultados de tenacidade da FECIV/UFU e Poli/USP

A fim de avaliar de modo comparativo os resultados de tenacidade encontrados nos laboratórios da FECIV/UFU e da Poli/USP por meio dos sensores da máquina de ensaio, as curvas de carga versus deslocamento vertical foram traçadas em apenas um gráfico para cada dosagem. Os gráficos resultantes são apresentados na Figura 77.

Figura 77 – Gráficos contendo as curvas médias de carga versus deslocamento verticas obtidas por meio de sensores externos na FECIV/UFU e Poli/USP





Com o intuito de avaliar comparativamente os dados encontrados nos dois laboratórios participantes do programa interlaboratorial, pode-se definir o parâmetro reprodutibilidade como a capacidade de avaliadores distintos em produzirem resultados consistentes ao utilizarem os mesmos procedimentos e equipamentos (VIM, 2008).

Diante do exposto, ao analisar as curvas médias de cada dosagem testada em cada laboratório, nota-se que houve poucas diferenças entre as medidas realizadas pelos diferentes laboratórios, de modo que o Traço VI apresentou maior variação. Como possibilidade das variações encontradas, pode-se citar as diferenças nos procedimentos realizados nas amostras ensaiadas em São Paulo, conforme já explicitado no 5.6.2, sendo que de modo especial é possível citar que os ensaios realizados na USP podem não ter

ocorrido de maneira aleatória e, além disso, a máquina de ensaio utilizada em São Paulo é distinta da utilizada em Uberlândia (EMIC).

Na Tabela 25 são apresentadas as relações obtidas entre a tenacidade resultante dos testes realizados na FECIV/UFU e na Poli/USP.

Tabela 25 – Relação entre a tenacidade medida no laboratório da FECIV/UFU e no laboratório da Poli/USP

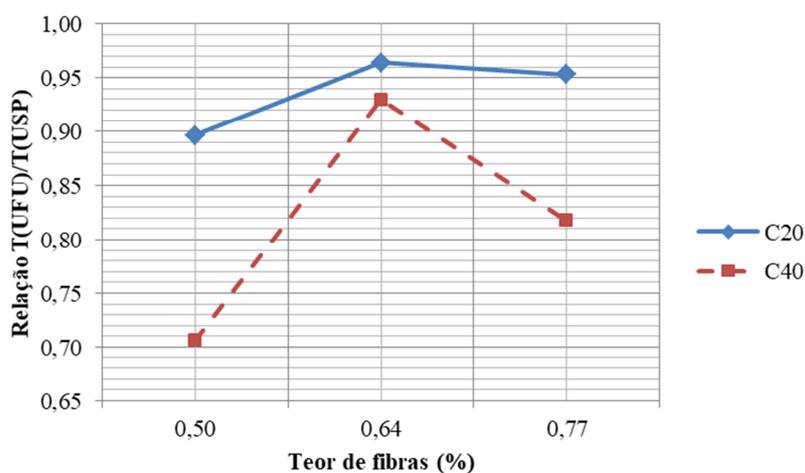
Dosagem	EBS - UFU		EBS - USP		Relação $T_{(UFU)}/T_{(USP)}$
	Tenacidade média (N.m)	CV (%)	Tenacidade média (N.m)	CV (%)	
C20 – 0,50% (Traço II)	227,9560	9,8435	254,3279	16,0400	0,8963
C20 – 0,64% (Traço III)	258,1401	16,8879	267,6907	11,7408	0,9643
C20 – 0,77% (Traço IV)	308,1188	16,4770	323,3183	17,2037	0,9530
C40 – 0,50% (Traço VI)	238,8037	9,3979	354,9703	8,8388	0,7061
C40 – 0,64% (Traço VII)	270,9782	25,1264	291,4545	17,6675	0,9297
C40 – 0,77% (Traço VIII)	333,6092	9,4175	408,0324	7,4018	0,8176

Fonte: Autora (2017).

Por meio da Tabela 25 é possível citar que os coeficientes de variação encontrados nos dois laboratórios apresentam similaridade. Diante disso e das curvas obtidas, pode-se afirmar que o ensaio Barcelona simplificado apresentou indícios de reprodutibilidade.

Diante da relação entre as tenacidades médias obtidas na FECIV/UFU e na Poli/USP, pode-se representar graficamente a variação da mesma, conforme ilustrado na Figura 78.

Figura 78 – Relação entre a tenacidade obtida na FECIV/UFU e na Poli/USP



Fonte: Autora (2017).

Por meio da Figura 78, tem-se que os valores de tenacidade resultantes dos ensaios realizados na FECIV/UFU representam em média 87,78% dos valores encontrados na

Poli/USP, de modo que a diferença média entre os resultados é de 12,22%. Além disso, por meio da Figura 78, o comportamento discordante da série C40 fica nítido para o teor de 0,64% de fibras.

6.5.4 Carga máxima de puncionamento

A partir curvas de carga versus deslocamento vertical apresentadas nas Figuras 73, 74 e 76, faz-se possível analisar a carga máxima de puncionamento para cada dosagem. Diante disso, os valores médios de carga máxima de puncionamento, assim como os desvios padrões (S_d) e os coeficientes de variação (CV) estão nas Tabelas 26, 27 e 28.

Tabela 26 – Carga máxima de puncionamento para o ensaio Barcelona simplificado realizado na FECIV/UFU com LVDT e célula de carga intenos à máquina de ensaio

Dosagem	Carga máxima de puncionamento		
	Média (N.m)	S_d (N.m)	CV (%)
C20 – 0,50% (Traço II)	144,2350	2,3093	1,6011
C20 – 0,64% (Traço III)	136,7800	3,1944	2,3354
C20 – 0,77% (Traço IV)	146,0750	4,1417	2,8353
C40 – 0,50% (Traço VI)	182,1350	7,7325	4,2455
C40 – 0,64% (Traço VII)	192,6350	7,5130	3,9001
C40 – 0,77% (Traço VIII)	191,2200	7,5369	3,9415

Fonte: Autora (2017).

Tabela 27 – Carga máxima de puncionamento para o ensaio Barcelona simplificado realizado na FECIV/UFU com LVDT e célula de carga externos à máquina de ensaio

Dosagem	Carga máxima de puncionamento		
	Média (N.m)	S_d (N.m)	CV (%)
C20 – 0,50% (Traço II)	150,5674	3,4408	2,2852
C20 – 0,64% (Traço III)	143,8317	3,7257	2,5903
C20 – 0,77% (Traço IV)	152,5286	4,3835	2,8739
C40 – 0,50% (Traço VI)	189,6074	8,8034	4,6429
C40 – 0,64% (Traço VII)	198,6365	8,1788	4,1175
C40 – 0,77% (Traço VIII)	198,9115	8,2382	4,1416

Fonte: Autora (2017).

Tabela 28 – Carga máxima de puncionamento para o ensaio Barcelona simplificado realizado na Poli/USP com LVDT e célula de carga intenos à máquina de ensaio (continua)

Dosagem	Carga máxima de puncionamento		
	Média (N.m)	S_d (N.m)	CV (%)
C20 – 0,50% (Traço II)	139,2281	26,6840	19,1657
C20 – 0,64% (Traço III)	147,7646	5,0726	3,4329
C20 – 0,77% (Traço IV)	143,6427	13,4931	9,3935

Tabela 28 – Carga máxima de puncionamento para o ensaio Barcelona simplificado realizado na Poli/USP com LVDT e célula de carga intenos à máquina de ensaio (conclusão)

Dosagem	Carga máxima de puncionamento		
	Média (N.m)	S _d (N.m)	CV (%)
C40 – 0,50% (Traço VI)	188,3260	23,2064	12,3225
C40 – 0,64% (Traço VII)	194,0380	14,2561	7,3471
C40 – 0,77% (Traço VIII)	200,8925	11,0185	5,4848

Fonte: Autora (2017).

A fim de verificar se as cargas máximas de puncionamento variam em função do aumento do volume de fibras de aço foram realizadas análises de variância com nível de significância (p) igual a 0,05. Para a série C20, os resultados obtidos no laboratório da FECIV/UFU sugerem que a carga máxima de puncionamento dessa série sofre interferência significativa do volume de fibras (hipótese de igualdade de médias é rejeitada com valor de $p = 0,0045$ para os dados medidos por LVDT e célula de carga externos e $p = 0,0005$ para os dados medidos pela máquina de ensaio). Já os resultados obtidos no laboratório da Poli/USP indicam que a carga máxima de puncionamento não sofre interferência com a variação do teor de fibras (hipótese de igualdade de médias não é rejeitada com valor de $p = 0,7410$).

Os dados da série C40 encontrados das três maneiras citadas, por sua vez, indicam que a carga máxima de puncionamento não sofre interferência com a variação do volume de fibras (hipótese de igualdade de médias não é rejeitada com valor de $p = 0,1579$, $p = 0,0615$ e $p = 0,5045$, para os dados obtidos por LVDT e célula de carga externos e internos da máquina de ensaio na UFU, e obtidos na USP, respectivamente).

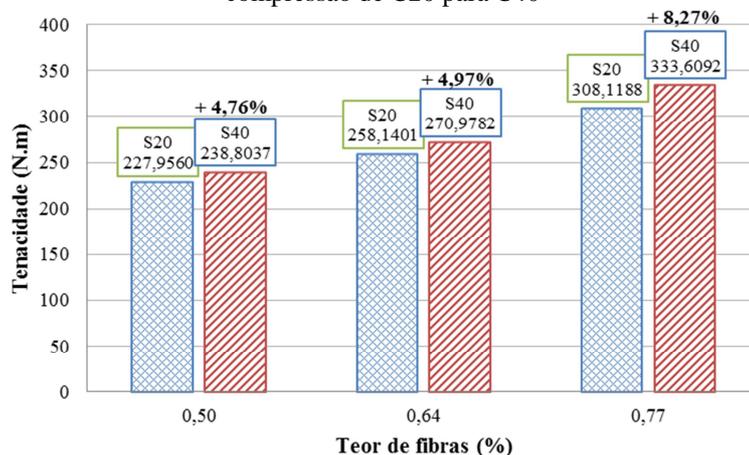
Embora a análise de variância tenha indicado a interferência do volume de fibras na carga máxima de puncionamento para a série C20, os gráficos apresentados exibem curvas com cargas de pico próximas e, além disso, a literatura explicita que tal interferência não ocorre. Como exemplo, tem-se a pesquisa de Monte (2016), em que também por análise de variância com nível de significância (p) igual a 0,05 ficou demonstrado que a variação do teor de fibras de aço não interfere na carga máxima de puncionamento do ensaio Barcelona simplificado.

6.5.5 Análise fatorial: laboratório da FECIV/UFU

Tendo em vista os resultados obtidos por meio do ensaio Barcelona simplificado utilizando os sensores da máquina de ensaio do laboratório da FECIV/UFU, tem-se as Figuras 79 e 80

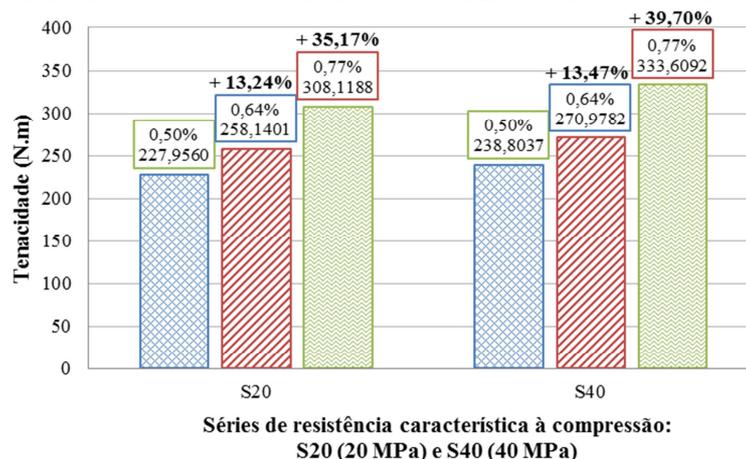
que apresentam graficamente a interferência do teor de fibras e da resistência à compressão na tenacidade.

Figura 79 – Aumento na tenacidade do CRFA testado na FECIV/UFU ao alterar a série de resistência à compressão de C20 para C40



Fonte: Autora (2017).

Figura 80 – Aumento na tenacidade do CRFA testado na FECIV/UFU ao aumentar o teor de fibras



Fonte: Autora (2017).

Como está exposto nas Figuras 79 e 80, ao aumentar o teor de fibras há um aumento percentual maior na tenacidade do compósito do que aumentar a resistência à compressão característica de 20 MPa para 40 MPa. Esse aumento que também é expresso por meio da análise fatorial.

A análise fatorial para os dados obtidos e realizada com as matrizes de planejamento dispostas nas Tabelas 4, 5 e 6 resultou nos efeitos expostos nas Tabelas 29, 30 e 31. Tais efeitos demonstram a influência da variação do teor de fibras e da variação da série de

resistência na tenacidade. As Figuras 81, 82 e 83, por sua vez, representam graficamente os efeitos calculados.

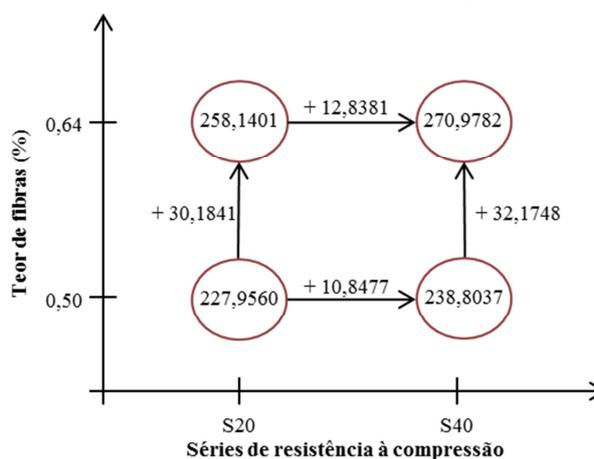
Na Tabela 29 e na Figura 81, tem-se os efeitos gerados na tenacidade ao variar as séries de resistência à compressão e ao aumentar o teor de fibras de 0,50% para 0,64%.

Tabela 29 – Efeitos do teor de fibras e da resistência à compressão na tenacidade analisando as séries C20 e C40 e teores de fibras de 0,50% e 0,64%

Efeitos principais	Valores (N.m)
Efeito do teor de fibras na tenacidade, quando o teor aumenta de 0,50% para 0,64% e erro experimental	31,1793 ± 30,7072
Efeito da resistência à compressão na tenacidade, quando série ensaiada é alterada de C20 para C40 e erro experimental	11,8429 ± 30,7072
Efeito de interação entre a resistência e o teor de fibras e erro experimental	0,9952 ± 30,7072

Fonte: Autora (2017).

Figura 81 – Representação gráfica dos efeitos na tenacidade ao variar o teor de fibras de 0,50% para 0,64% e ao variar a série de resistência (de C20 para C40)



Fonte: Autora (2017).

A partir da Tabela 29 e da Figura 81, pode-se afirmar que:

- aumentando o teor de fibras de 0,50% para 0,64% há um aumento mais pronunciado na tenacidade do que elevando resistência à compressão do compósito;
- considerando a estimativa do erro experimental, as variações na tenacidade devido à alteração do teor de fibras e devido a mudança na resistência à compressão podem estar no mesmo intervalo.

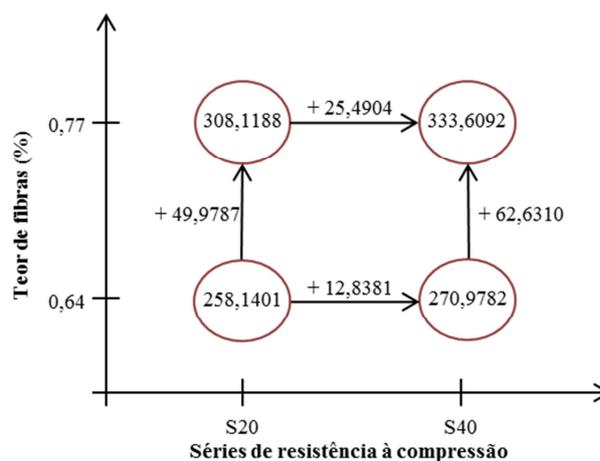
Já na Tabela 30 e na Figura 82 são dispostos os efeitos gerados na tenacidade ao variar as séries de resistência à compressão e ao aumentar o teor de fibras de 0,64% para 0,77%.

Tabela 30 – Efeitos do teor de fibras e da resistência à compressão na tenacidade analisando as séries C20 e C40 e teores de fibras de 0,64% e 0,77%

Efeitos principais	Valores (N.m)
Efeito do teor de fibras na tenacidade, quando o teor aumenta de 0,64% para 0,77%	$56,3048 \pm 35,5332$
Efeito da resistência à compressão na tenacidade, quando série ensaiada é alterada de C20 para C40	$19,1643 \pm 35,5332$
Efeito de interação entre a resistência e o teor de fibras	$6,3262 \pm 35,5332$

Fonte: Autora (2017).

Figura 82 – Representação gráfica dos efeitos na tenacidade ao variar o teor de fibras de 0,64% para 0,77% e ao variar a série de resistência (de C20 para C40)



Fonte: Autora (2017).

Diante da Figura 82, pode-se afirmar que:

- ao aumentar o teor fibras de 0,64% para 0,77%, tem-se um acréscimo maior na tenacidade do que aumentar a resistência à compressão do compósito;
- considerando a estimativa do erro experimental, as variações na tenacidade devido à alteração do teor de fibras e devido a mudança da série de resistência à compressão podem estar no mesmo intervalo de dados.

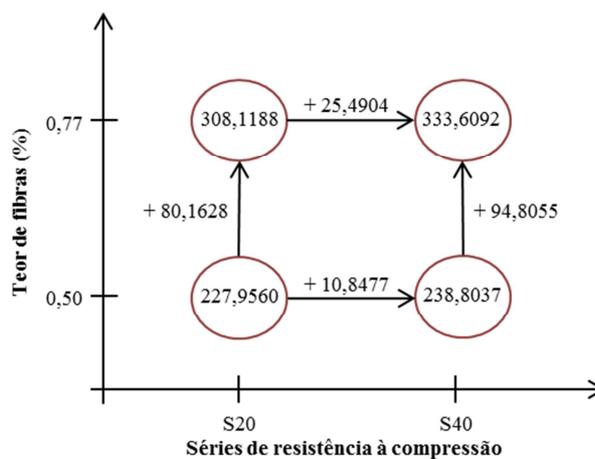
Por fim, na Tabela 31 e na Figura 83 são exibidos os efeitos gerados na tenacidade ao variar as séries de resistência à compressão e ao aumentar o teor de fibras de 0,50% para 0,77%.

Tabela 31 – Efeitos do teor de fibras e da resistência à compressão na tenacidade analisando as séries C20 e C40 e teores de fibras de 0,64% e 0,77%

Efeitos principais	Valores (N.m)
Efeito do teor de fibras na tenacidade, quando o teor aumenta de 0,50% para 0,77%	87,4841 ± 23,9053
Efeito da resistência à compressão na tenacidade, quando série ensaiada é alterada de C20 para C40	18,1691 ± 23,9053
Efeito de interação entre a resistência e o teor de fibras	7,3213 ± 23,9053

Fonte: Autora (2017).

Figura 83 – Representação gráfica dos efeitos na tenacidade ao variar o teor de fibras de 0,50% para 0,77% e ao variar a série de resistência (de C20 para C40)



Fonte: Autora (2017).

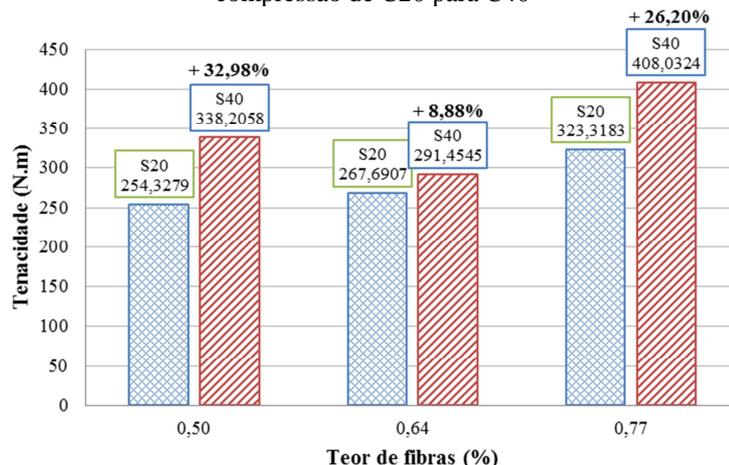
Tendo em vista as Figura 81, 82 e 83, pode-se concluir que:

- ao aumentar o teor fibras de 0,50% para 0,77%, o aumento na tenacidade é mais pronunciado que aumentar a resistência à compressão do compósito;
- os maiores valores de tenacidade ocorreram para a série C40 com 0,77% de fibras.

6.5.6 Análise fatorial: laboratório da Poli/USP

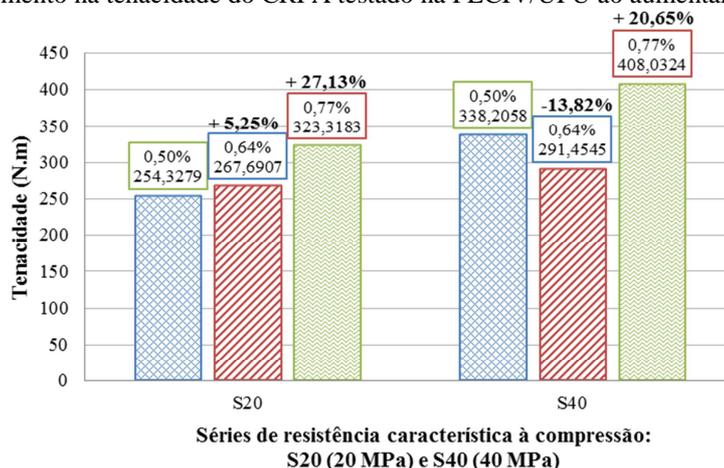
De maneira análoga à análise realizada com os dados da FECIV/UFU, também foi verificada a interferência do teor de fibras e da resistência à compressão do compósito nos resultados de tenacidade obtidos nos testes da Poli/USP. Dessa forma, as Figuras 84 e 85 representam graficamente a variação na tenacidade em função do teor de fibras e da resistência à compressão.

Figura 84 – Aumento na tenacidade do CRFA testado na Poli/USP ao alterar a série de resistência à compressão de C20 para C40



Fonte: Autora (2017).

Figura 85 – Aumento na tenacidade do CRFA testado na FECIV/UFU ao aumentar o teor de fibras



Fonte: Autora (2017).

A partir dos valores médios de tenacidade e das matrizes de planejamento dispostas nas Tabelas 4, 5 e 6, os efeitos devido à variação do teor de fibras e da resistência à compressão na tenacidade também foram calculados e estão dispostos nas Tabelas 32, 33 e 34. Já as Figuras 86, 87 e 88 representam graficamente esses efeitos.

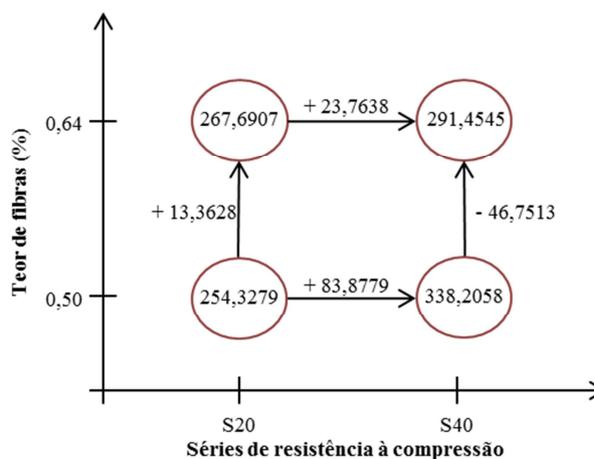
Na Tabela 32 e na Figura 86, tem-se os efeitos gerados na tenacidade ao variar as séries de resistência à compressão e ao aumentar o teor de fibras de 0,50% para 0,64%.

Tabela 32 – Efeitos do teor de fibras e da resistência à compressão na tenacidade analisando as séries C20 e C40 e teores de fibras de 0,50% e 0,64%

Efeitos principais	Valores (N.m)
Efeito do teor de fibras na tenacidade, quando o teor aumenta de 0,50% para 0,64%	-16,6943 ± 26,9417
Efeito da resistência à compressão na tenacidade, quando série ensaiada é alterada de C20 para C40	53,8208 ± 26,9417
Efeito de interação entre a resistência e o teor de fibras	-30,0571 ± 26,9417

Fonte: Autora (2017).

Figura 86 – Representação gráfica dos efeitos na tenacidade ao variar o teor de fibras de 0,50% para 0,64% e ao variar a série de resistência (de C20 para C40)



Fonte: Autora (2017).

Diante a Figura 86, pode-se atestar que:

- aumentando a resistência à compressão do compósito ocorre um aumento na tenacidade, entretanto esse efeito é mais pronunciado com o teor de fibras de 0,50% do que com o teor de 0,64% (+83,8779 N.m contra +23,7638 N.m);
- para a série C40, ao aumentar o teor de fibras de 0,50% para 0,64% há uma redução na tenacidade, enquanto que para a série C20 há um aumento;
- os maiores valores de tenacidade ocorre para a série C40 com 0,50% de fibras.

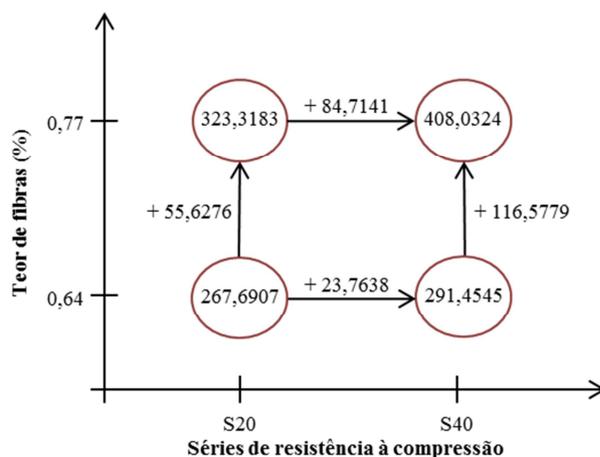
A Tabela 33 e a Figura 87, por sua vez, dispõem os efeitos gerados na tenacidade ao variar as séries de resistência à compressão e ao aumentar o teor de fibras de 0,64% para 0,77%.

Tabela 33 – Efeitos do teor de fibras e da resistência à compressão na tenacidade analisando as séries C20 e C40 e teores de fibras de 0,64% e 0,77%

Efeitos principais	Valores (N.m)
Efeito do teor de fibras na tenacidade, quando o teor aumenta de 0,64% para 0,77%	86,1027 ± 30,9139
Efeito da resistência à compressão na tenacidade, quando série ensaiada é alterada de C20 para C40	54,2389 ± 30,9139
Efeito de interação entre a resistência e o teor de fibras	30,4751 ± 30,9139

Fonte: Autora (2017).

Figura 87 – Representação gráfica dos efeitos na tenacidade ao variar o teor de fibras de 0,64% para 0,77% e ao variar a série de resistência (de C20 para C40)



Fonte: Autora (2017).

Como observações a partir da Figura 87, pode-se afirmar que:

- ao aumentar a resistência à compressão do compósito ocorre um aumento na tenacidade, entretanto esse efeito é mais pronunciado com o teor de fibras de 0,77% do que com o teor de 0,64%;
- considerando a estimativa do erro experimental, as variações na tenacidade devido à alteração do teor de fibras e devido a mudança na resistência à compressão podem estar no mesmo intervalo;
- para as séries C20 e C40, ao aumentar o teor de fibras de 0,64% para 0,77% há um aumento na tenacidade, porém, para a série C40 esse aumento é maior;
- ao avaliar os valores médios dos efeitos, elevar o teor de fibras gera uma maior variação na tenacidade do que alternar da série C20 para C40;

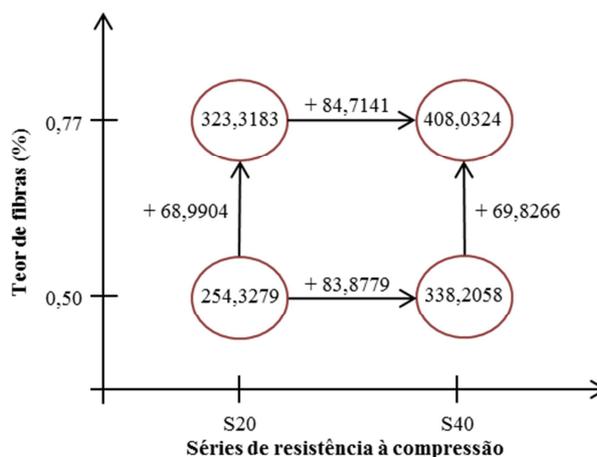
Por fim, na Tabela 34 e na Figura 88 são expostos os efeitos gerados na tenacidade ao variar as séries de resistência à compressão e ao aumentar o teor de fibras de 0,50% para 0,77%.

Tabela 34 – Efeitos do teor de fibras e da resistência à compressão na tenacidade analisando as séries C20 e C40 e teores de fibras de 0,50% e 0,77%

Efeitos principais	Valores (%)
Efeito do teor de fibras na tenacidade, quando o teor aumenta de 0,50% para 0,77%	$69,4085 \pm 27,7794$
Efeito da resistência à compressão na tenacidade, quando série ensaiada é alterada de C20 para C40	$84,2960 \pm 27,7794$
Efeito de interação entre a resistência e o teor de fibras	$0,4181 \pm 27,7794$

Fonte: Autora (2017).

Figura 88 – Representação gráfica dos efeitos na tenacidade ao variar o teor de fibras de 0,50% para 0,77% e ao variar a série de resistência (de C20 para C40)



Fonte: Autora (2017).

Com base nas Figuras 86, 87 e 88, pode-se concluir que:

- ao aumentar a resistência à compressão do compósito, o aumento na tenacidade é mais pronunciado que aumentar o teor fibras de 0,50% para 0,77%;
- considerando a estimativa do erro experimental, as variações na tenacidade devido à alteração do teor de fibras e devido ao aumento da resistência à compressão podem estar no mesmo intervalo;
- os maiores valores de tenacidade ocorreram para a série C40 com 0,77% de fibras.

6.6 Ensaio em amostras prismáticas

Vitor (2017) analisou amostras prismáticas de concreto reforçado com fibras de aço com características similares ao empregado na presente pesquisa, uma vez que o traço em massa, o tipo de fibras e as séries de resistência à compressão são os mesmos. A autora analisou tais amostras por meio do ensaio de tenacidade normatizado pela ASTM C1609: 2012. Na Tabela 35 são apresentados os resultados obtidos por Vitor (2017).

Tabela 35 – Resultados de tenacidade em corpos de prova prismáticos segundo a ASTM C1609: 2012

Dosagem	Tenacidade		
	Média (N.m)	S _d (N.m)	CV (%)
C20 – 0,64%	126,26	16,71	13,24
C20 – 0,77%	137,96	11,51	8,34
C40 – 0,64%	152,09	48,19	31,69
C40 – 0,77%	185,00	19,37	10,47

Fonte: Vitor (2017).

Em comparação aos dados resultantes do ensaio Barcelona simplificado realizado na FECIV/UFU, tem-se as relações dispostas na Tabela 36.

Tabela 36 – Relação entre os valores de tenacidade obtidos por meio do ensaio Barcelona simplificado e os obtidos por Vitor (2017) conforme as prescrições estabelecidas pela ASTM C1609: 2012

Dosagem	EBS - UFU		ASTM C1609: 2012		Relação T _{EBS} /T _{ASTM}
	Tenacidade média (N.m)	CV (%)	Tenacidade média (N.m)	CV (%)	
C20 – 0,64% (Traço III)	258,14	16,89	126,26	13,24	2,0445
C20 – 0,77% (Traço IV)	308,12	16,48	137,96	8,34	2,2334
C40 – 0,64% (Traço VII)	270,98	25,13	152,09	31,69	1,7817
C40 – 0,77% (Traço VIII)	333,61	9,42	185,00	10,47	1,8033

Fonte: Autora (2017).

Tendo em vista as relações encontradas, tem-se de maneira simplificada que a tenacidade obtida por meio do ensaio Barcelona apresenta o valor médio de 96,57% superior ao obtido pela norma americana. Além disso, pode-se observar que os coeficientes de variação do ensaio Barcelona simplificado são próximos aos encontrados pela norma americana.

Já no estudo realizado por Monte, Toaldo e Figueiredo (2014), os autores pesquisaram a respeito da relação entre o ensaio Barcelona e o ensaio prescrito pela norma japonesa. Entretanto, os valores de tenacidade calculados foram baseados nas curvas de carga versus TCO. De maneira simplificada, pode-se concluir pelos resultados apresentados pelos autores, que os dados de tenacidade encontrados no ensaio Barcelona simplificado para o CRFA são 5,32 vezes superiores aos encontrados pela norma japonesa. Além disso, os autores obtiveram uma correlação linear entre os dois ensaios com coeficiente de determinação R² superior a 0,9 para a tenacidade.

Por fim, pode-se citar a pesquisa realizada por Molins et al. (2009), em que os autores correlacionaram geometricamente o ensaio Barcelona e o ensaio de flexão em vigas especificado pela norma belga NBN B 15-238: 1992. Como conclusão, obteve-se que o deslocamento vertical medido no ensaio de flexão em viga e a abertura circunferencial do ensaio Barcelona (TCOD) estão correlacionados na proporção 2:1.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

A presente pesquisa teve como objetivo investigar experimentalmente o comportamento mecânico, com foco na tenacidade, do concreto reforçado com fibras por meio do ensaio Barcelona simplificado. Esse ensaio que foi parte integrante de um estudo interlaboratorial. Além disso, verificou-se a influência do volume de fibras de aço em propriedades mecânicas no CRFA. Dessa forma, diante dos resultados apresentados e analisados no capítulo 6, tem-se as seguintes conclusões:

- a adição de fibras ao concreto teve, de modo geral, um efeito benéfico para o módulo de elasticidade, para a resistência à compressão e para a resistência à tração por compressão diametral do compósito, sendo que os maiores ganhos observados foram para a resistência à tração;
- no caso da resistência à tração por compressão diametral, tem-se que os compósitos com maior resistência à compressão obtiveram um maior ganho na resistência à tração. Tal fato é justificado pela maior aderência entre as fibras e matriz do concreto;
- ao avaliar as curvas de carga versus deslocamento vertical geradas com os dados obtidos com a realização do ensaio Barcelona simplificado na FECIV/UFU e na Poli/USP, concluiu-se que o mesmo apresenta indícios de repetitividade, pois as curvas exibem certa concordância e similaridade e, além disso, os valores de coeficiente de variação estão próximos ao limite estabelecidos pela ASTM C1609:2012;
- ao comparar os resultados obtidos no ensaio Barcelona simplificado com aquisição de dados por meio de sensores internos (LVDT e célula de carga da própria máquina de

- ensaios) e sensores externos, concluiu-se que aqueles obtidos pela máquina de ensaio são inferiores aos obtidos por sensores externos em média 21,50%. Dessa maneira, deve-se atentar para o método de aquisição de dados a ser empregado na realização do ensaio Barcelona simplificado e pode-se considerar que os resultados da máquina de ensaio são favoráveis à segurança;
- os ensaios realizados na FECIV/UFU e na Poli/USP resultaram em curvas de carga versus deslocamento vertical consistentes, de modo que pode ser considerado que esse ensaio apresenta indicativos de reprodutibilidade;
 - em relação à carga máxima de puncionamento aplicada durante o ensaio Barcelona simplificado, a presente pesquisa não resultou em dados conclusivos, uma vez que a análise de variância indicou influência significativa do volume de fibras de aço para os resultados da série C20 realizados na FECIV/UFU, entretanto, o mesmo não ocorreu para os resultados encontrados na Poli/USP;
 - ao adicionar fibras de aço ao concreto, obteve-se um aumento de tenacidade para os resultados encontrados na FECIV/UFU para a série C20 e para a série C40, conforme o esperado segundo a literatura. Porém, os resultados obtidos na Poli/USP apresentaram comportamento discordante ao esperado para a série C40, porém é necessário considerar que alguns procedimentos realizados foram diferentes para as amostras ensaiadas em Uberlândia e em São Paulo. Além disso, ao analisar o desvio padrão de cada dosagem, observou-se que as tenacidades medidas estão na mesma faixa de dados;
 - ao verificar a interferência da resistência à compressão do compósito e do teor de fibras na tenacidade, obteve-se para os resultados dos ensaios realizados na FECIV/UFU que ao aumentar o teor de fibras sempre há um aumento maior na tenacidade que aumentar a resistência característica à compressão de 20 MPa para 40 MPa;
 - já nos resultados encontrados na Poli/USP, devido ao comportamento discordante ao esperado encontrado na série C40, obteve-se que apenas ao aumentar o teor de fibras de 0,64% para 0,77%, tem-se um efeito na tenacidade maior que o efeito obtido ao alterar a série ensaiada de C20 para C40;

-
- ao relacionar os resultados de tenacidade do ensaio Barcelona com os dados encontrados por meio do ensaio prescrito pela ASTM C1609: 2012, realizado por Vitor (2017), obteve-se uma proporção entre os mesmos de 1,9657: 1,000.

7.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como proposta para futuros trabalhos, sugere-se:

- pesquisar a influência das dimensões dos corpos de prova testados nos dados encontrados com o ensaio Barcelona simplificado, a fim de avaliar o efeito de escala;
- realizar o ensaio Barcelona simplificado com diferentes tipos de fibras (incluindo material constituinte e fator de forma) para analisar os efeitos da fibra nas respostas do ensaio;
- analisar comparativamente o ensaio Barcelona simplificado com outros ensaios, como por exemplo, o ensaio de abertura por encunhamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUADO A.; LARANJEIRA, F. Presentación Del anejo de hormigón con fibras de La EHE y ecuación constitutiva Del hormigón com fibras. **Jornada sobre Aplicaciones Estructurales de Hormigon com Fibras**: p. 1-32; Barcelona, Espanha; 2007.

AIRES, C.; MOLINS, C.; AGUADO, A. Ensayo de doble punzonamiento para concreto reforzado con fibra: efecto del tamaño y origen de la probeta. **Concreto y cemento**. Investigación y desarrollo. V. 5, n. 1, p. 17-21, 2013.

AKCAY, B.; TASDEMIR, M. A. Mechanical behavior and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, 28, p. 287-293, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.044>

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 544.1R**: State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. ACI Committee 544. Detroit, USA, 1996. Reapproved 2002.

_____. **ACI 544.3R**: Guide for specifying, proportioning, and production of fiber-reinforced concrete. ACI Committee 544. Detroit, USA, 2008.

_____. **ACI 544.4R**: Design considerations for steel fiber reinforced concrete. ACI Committee 544. Detroit, USA, 1988. Reapproved 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C1609**: Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforce Concrete (Using Beam with Third-Point Loading). Pennsylvania, USA, 2012.

ARIF, M. A. **Avaliação da medida de tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço**. 2014. 156 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. Tradução da 3ª edição norte-americana. 648 p. 2ª ed. Cengage Learning, 2014.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **UNE 83515: hormigones con fibras – Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción – Método Barcelona**. 10p. España, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**, Rio de Janeiro, 2016.

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

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**, Rio de Janeiro, 2005.

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

_____. **NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**, Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 9833: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**, Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 15530: Fibras de aço para concreto – Especificação**, Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR NM 23: Cimento Portland – Determinação da massa específica**, Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 30: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água**, Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios, Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 47:** Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico, Rio de Janeiro, 2002.

_____. **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, 2006.

_____. **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.

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

BANTHIA, N.; TROTTIER, J-F. Concrete reinforced with deformed steel fibers - Part II: Toughness Characterization. **ACI Materials Journal**. V. 92, n. 2, p. 146-154, Detroit, USA, 1995.

BARROS, A. R. **Avaliação do comportamento do concreto auto-adensável reforçado com fibras de aço**. 2009. 178 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 401 p. 2ª ed. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2001.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. London and New York: Modern Concrete Technology Series, 601 p. 2 ed. 2007.

BHARGAVA, P.; SHARMA, U. K.; KAUSHIK, S. K. Compressive stress-strain behavior of small scale steel fibre reinforced high strength concrete cylinders. **Journal of Advanced Concrete Technology**, Toquio, v. 4, n. 1, p. 109-121, feb. 2006.

BLANCO, A; PUJADAS, P.; CAVALARO, S.; de la FUENTE, A.; AGUADO, A. Constitutive model for fiber reinforced concrete based on the Barcelona test. **Cement and Concrete Composites**, v. 54, p. 327-340. Oct. 2014.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.017>

BORGES, L. A. C.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. Avaliação da tenacidade de concretos reforçados com fibras através do ensaio de compressão de corpos de prova com entalhe. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. 55. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2013.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. Tradução: Sérgio Murilo Stamile Soares. 705 p. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. Tradução: Sérgio Murilo Stamile Soares. Revisão técnica: José Roberto Moraes d'Almeida. 817 p. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CAMARGO, M. M. **Análise da produção de concreto auto-adensável reforçado com fibras de aço**. 2016. 87 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2016.

CARNIO, M. A.; LINTZ, R. C. C. Concreto projetado reforçado com fibras aplicado no revestimento de encostas. In: 5ª Conferência Brasileira de Estabilidade de Encontros (COBRAE). **Anais...** São Paulo, 2009.

CARVALHO, E. **Estudo da variabilidade da tenacidade de concretos reforçados com fibras de aço por meio de ensaios à flexão em prismas moldados e extraídos**. 2012. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

CHENG, M-Y.; PARRA-MONTESINOS, G. J. Evaluation of Steel Fiber Reinforcement for Punching Shear Resistance in Slab-Column Connections - Part I: Monotonically Increased Load. **ACI Structural Journal**. v.107, n.1, p. 101-109, 2010.

COLLINS, J. A. **Projeto mecânico de elemento de máquina: uma perspectiva de prevenção da falha**. 740 p. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

DI PRISCO, M.; PLIZZARI, G.; VANDEWALLE, L. Fibre reinforced concrete: new design perspectives. **Materials and Structures**, v. 42, n.9, p. 415-425, 2009.

<https://doi.org/10.1617/s11527-009-9529-4>

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

EUROPEAN FEDERATION OF NATIONAL ASSOCIATIONS REPRESENTING FOR CONCRETE. **EFNARC**: European Specification for Sprayed Concrete. Hampshire, UK, 1996.

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

FERREIRA, N. F. M. **Influência das características das fibras no desempenho do betão**. 2008. 106 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com Fibras de Aço**. 2000. 69 p. Boletim Técnico, Série BT/PCC/260 – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras**. In: Geraldo Cechella Isaia. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), v. 2, p. 1327-1365, 2011a.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 2011b. 247 f. Tese (Livre docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011b.

FIGUEIREDO, A. D. **Parâmetros de controle e dosagem do concreto projetado com fibras de aço**. 342 f. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

FIGUEIREDO, A. D.; CECCATO, M. R. ; TORNERI, P. Influência do comprimento da fibra no desempenho do concreto reforçado com fibras de aço. In: 39^a Reunião do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), Anais... v. 1, p. 347-356, São Paulo, 1997.

FIGUEIREDO, A. D.; CHAMA NETO, P. J.; FARIA, H. M. A. Nova normalização brasileira sobre fibras de aço. **Concreto & construções**, São Paulo, v. 36, n. 50, p. 67-76, abr./maio/jun. 2008.

FIGUEIREDO, A. D.; MOURAD, F. A.; CARVALHO, J. L. C. Aspectos de controle do concreto reforçado com fibras de aço para pavimentos. In: 42^o Congresso Brasileiro do Concreto, Fortaleza, 2000. **Anais...** Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), São Paulo, 2000.

FIGUEIREDO, A. D.; NUNES, N. L.; TANESI, J. Mix design analysis on steel fiber reinforced concrete. In: 5th International RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), **Anais...** p. 103-118, 2000.

GALOBARDES, I.; FIGUEIREDO, A. Correlations between beam and Barcelona tests for FRC quality control for structural application. In: 8th International Conference on Fibre Concrete, **Anais...** Prague. Fibre Concrete 2015. Prague : Czech Technical University in Prague, p. 1-10, 2015.

GARCEZ, E. O. A. **Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibra de aço submetidos a cargas de impacto**. 2005. 113 f. Dissertação

(Mestrado) – Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GIACCIO, G.; TOBES, J. M.; ZERBINO, R. Use of small beams to obtain design parameters of fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**. V. 30, n. 4, p. 297-306, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.10.004>

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. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

GUIMARÃES, M. C. N.; FIGUEIREDO, A. D. **Fatores intervenientes na tenacidade à flexão dos concretos reforçados com fibra de aço**. 2003. 28 p. Boletim Técnico, Série BT/PCC/337 – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

HANNANT, D. J. **Fibre cements and fibre concretes**. Chichester: John Wiley, 1978.

HARRIS, B. **Engineering Composite Materials**. London: The Institute of Materials, 194 p., 1999.

HERMANN, A. **Empacotamento de agregados reciclados para concretos vibrocompactados**. 2016. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO/ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONSULTORIA E ENGENHARIA ESTRUTURAL. **Prática recomendada IBRACON/ABECE**: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras. Ed. IBRACON/ABECE, 39 p., 2016.

ISLAM, S. T. **Study of Same Parameters Affecting the Measured Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete**. Dissertação (Mestrado). The Faculty of Graduate Studies(Civil Engineering), The University of British Columbia, 2012.

JACINTHO, A. E. P. G. A.; GIONGO, J. S. **Resistência Mecânica do Concreto**. In: Geraldo C. Isaia. (Org.). *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 605-632, 2005.

KORMANN, A. C. M.; PORTELLA, K. F.; PEREIRA, P. N. Processos erosivos em superfícies de concreto de barragens – Mecanismos e recuperação. In: XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens. CBDB. **Anais...**, p. 667-676, Fortaleza – CE, 2001.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: Ciência e tecnologia**. 313 p., São Paulo: E. Blucher, 2006.

LÖFGREN, I.; STANG, H.; OLESEN, J. F. Wedge Splitting Test – A test to determine fracture properties of FRC. In: 6th RILEM Symposium on FRC. **Anais...** Itália, p. 379-388, 2004.

LOPES, M. M. **Substituição parcial de armadura de flexão por fibras de aço em vigas de concreto**. 2005. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MALATESTA, S. C.; CEA, A. A.; BORRELL, C. M.; CONTRERAS, M. C. Control de la tenacidad de los hormigones reforzados con fibras usando el ensayo de doble punzonamiento (ensayo barcelona). **Revista Ingeniería de Construcción**. V. 24, n. 2, p. 199-140, 2009.

MANSUR, H. S.; NASCIMENTO, O. L.; MANSUR, A. A. P. Avaliação do Teor de Ar Incorporado em Argamassas Modificadas com Poli (Álcool Vinílico). In: 9o Congresso Brasileiro de Polímeros. **Anais...**, p. 478-486, v. 1, Campina Grande – PB, 2007.

MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. 2012. 201 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 674 p. São Paulo: Pini, 2008.

MOLINS, C., AGUADO, A., SALUDES, S., Double Punch Test to control the tensile properties of FRC (Barcelona test), **Materials and Structures**, v. 42, n. 4, pp. 415-425, 2009. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9391-9>

MONTE, R. **Caracterização e controle do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras para tubos**. 2015. 158 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

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

NAAMAN, A. E. Development and evolution of tensile strength-hardening FRC composites. In: 7th International RILEM Symposium on Fiber Reinforced Concrete: Design and Application, 2008, Chennai, India. **Fiber Reinforced Concrete: Design and Applications**. Babneux – France: RILEM Publications S.A.R.L., v. 1. p. 1-28. 2008.

NAAMAN, A. E. Engineered Steel fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**. Japan Concrete Institute, v. 1, n. 9, p. 241-252, 2003.

NAAMAN, A. E.; NAJM, H. Bond-Slip Mechanisms of Steel Fibers in Concrete. **ACI Materials Journal**. V. 88, n. 2, p. 135-145, 1991.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5^a ed. São Paulo: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2^a ed. São Paulo: Bookman, 472 p. 2013.

NUNES, N. L. **Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos**. 2006. 253 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

NUNES, N. L. **Estudo da influência da geometria da fibra de aço na tenacidade à flexão dos compósitos de matriz de concreto**. 1998. 181 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

OLIVEIRA, S. L. **Taxa de armadura longitudinal mínima em vigas de concreto de alta resistência com fibras de aço**. 2005. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

OLIVEIRA JUNIOR, L. A. **Ligação viga-pilar em elementos pré-moldados de concreto solidarizados por concreto reforçado com fibras de aço: análise estática e dinâmica**. 2012. 233 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

PASA, V. F. **Análise do comportamento de estruturas de concreto reforçado com fibras de aço via método dos elementos finitos**. 2007. 130 f. Dissertação (Mestrado Engenharia) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 13 ed. São Paulo: Globo, 1998.

PILLAR, N. M. P. **Propriedades mecânicas nas primeiras idades como preditoras das tensões induzidas e fissuração de concreto projetado reforçado com fibras**. 2014. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

PUJADAS, P. **Caracterización y diseño del hormigón reforzado com fibras plásticas**. 2013. 263 p. Tesis Doctoral. UPC, Barcelona, España, 2013.

PUJADAS, P; BLANCO, A.; CAVALARO, S.; de la FUENTE, A; AGUADO, A. New analytical model to generalize the Barcelona test using axial displacement. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 19, n. 2, p. 259-71, 2013.

<https://doi.org/10.3846/13923730.2012.756425>

- QUININO, U. C. M. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. 2015. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- RAMBO, D. A. S.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D. Mechanical behavior of hybrid steel-fiber self-consolidating concrete: materials and structural aspects. **Materials and Design**, v. 54, p. 32-42, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.014>
- REZENDE, M. C.; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C. **Compósitos estruturais: tecnologia e prática**. 396 p. São Paulo: Artliber Editora, 2011.
- RIBEIRO, S.; RODRIGUES, J. A. Influência da forma e do processo de obtenção do entalhe na carga máxima e energia de fratura de argamassas utilizando o método da cunha para propagação estável da trinca. **Cerâmica**, v. 66, p. 181-189, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132009000200011>
- ROMUALDI, P. J.; BATSON, G. B. Behavior of reinforced concrete beams with closely spaced reinforcement. **ACI Journal**, v. 60, n. 6, p. 775-790, 1963.
- ROMUALDI, P. J.; MANDEL, J. A. Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement. **ACI Journal**, v. 61, n. 6, p. 657-672, 1964.
- ROYER, B.; ASSUNÇÃO, R. M. N.; RODRIGUES FILHO, G.; MOTTA, L. A. C. Efeito da aplicação do poliestireno sulfonado (PSSNa) como aditivo em argamassas e concretos de cimento Portland CPV32. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 15, n. 1, p. 63-67, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282005000100014>
- SALUDES, S. R. **Ensayo de doble punzonamiento aplicado al hormigón reforzado con fibras (Ensayo Barcelona)**. Minor Thesis, UPC, Barcelona, España, 2006.
- SALVADOR, R. P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras**. 2013. 178 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SALVADOR, R. P.; FERNANDES, J. F.; FIGUEIREDO, A. D. Avaliação do concreto reforçado com baixos teores de fibras para fins estruturais segundo a norma EN 14651 - 2007. **Revista Matéria**, p. 961-974, 2015.

SALVADOR, R. P.; FIGUEIREDO, A. D. Análise comparativa de comportamento mecânico do concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço. **Revista Matéria**, p. 1273-1285, 2013.

SANTANA, J. A. **Viabilidade do uso de resíduos de britagem em concretos de estruturas pré-fabricadas em Salvador**. 2008. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.

SHACKELFORD, J. M. **Introdução à ciência dos materiais para engenheiros**. Tradução Daniel Viana, Revisão técnica Nilson C. Cruz. 556 p. 6ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SOBRAL, E. S. **Propriedades do concreto fresco**. In.: Luiz Alfredo Falcão Bauer (Org.) Materiais de construção. Revisão Técnica: João Fernando Dias. 471 p. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

STRONG, A. B. **Fundamentals of Composite Manufacturing: Materials, Methods and Applications**. 2. ed. Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Michigan, 2008.

SUURONEN, J. P.; KALLONEN, A.; EIK, M.; PUTTONEN, J.; SERIMAA, R. HERRMAN, H. Analysis of short fibres orientation in steel fibre-reinforced concrete (SFRC) by X-ray tomography. **J Mater Sci**, v. 48, n.3, p.1358-1367, 2013.

<https://doi.org/10.1007/s10853-012-6882-4>

SUDANO, A. L. **Desenvolvimento de estratégias híbridas de reforços de pilares de concreto armado por encamisamento de pilares com compósitos de alto desempenho**.

2010. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

THE JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. JSCE-SF4: **Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete**. [S.I.]: Concrete library of JSCE, 1984, p. 58-61.

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. **Anais... IBRACON**. São Paulo, 2013.

TSCHEGG, E. K. Biaxial fracture behavior of steel-span and steel-fibre-reinforced concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 7, n. 2, p. 229-238, 2009. <https://doi.org/10.3151/jact.7.229>

TSCHEGG, E. K.; ELSER, M; STANZL-TSCHEGG, S. E. Biaxial Fracture Tests on Concrete – Development and Experience. **Cement & Concrete Composites**, v. 17, p. 57-75, 1995a. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)95760-W](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)95760-W)

TSCHEGG, E. K.; ROTTER, H. M.; ROELFSTRA, P. E.; BOURGUND, U.; JUSSEL, P. Fracture mechanical behavior of aggregate-cement matrix interfaces. **Journal Of Materials in Civil Engineering**, v. 7, 4 ed., p. 199-203, 1995b.

TSCHEGG, E. K.; SCHNEEMAYER, A.; MERTA, I.; RIEDER, K. A. Energy dissipation capacity of fibre reinforced concrete under biaxial tension–compression load. Part I: Test equipment and work of fracture. **Cemente & Concrete Composites**. v. 62, p. 95-203, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.07.002>

VELASCO, R. V. **Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas**. 2008. 349 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

VILLARES, A. M. O. **Influência da largura do corpo-de-prova na medida da tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço.** 2001. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

VIM. **International vocabulary of metrology:** basic and general concepts and associated terms. 3th ed. Joint Committee for Guides in Metrology: 2008.

VITOR, P. C. P. **Resistência ao cisalhamento de vigas de concreto armado sem armadura transversal reforçadas com fibras de aço.** 2017. 224 f. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

APÊNDICE A

A seguir são apresentados os valores de tenacidade de todas as amostras ensaiadas.

A.1 RESULTADOS DE TENACIDADE OBTIDOS NA FECIV/UFU

Na Tabela 37 são apresentados todos os valores de tenacidade medidos por meio dos sensores da própria máquina de ensaio no laboratório da FECIV/UFU para cada amostra ensaiada, com os respectivos valores médios, desvios padrões (S_d) e coeficientes de variação (CV).

Tabela 37 – Valores de tenacidade encontrados para todas as amostras ensaiadas utilizando os sensores da própria máquina de ensaio (FECIV/UFU)

Dosagem	Tenacidade (N.m)						Média (N.m)	S_d (N.m)	CV (%)
	Corpos de prova								
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6			
T II	240,5334	248,2283	196,5567	252,6428	212,5004	217,2742	227,9560	22,4387	9,8435
T III	294,8213	312,4490	209,7448	282,7272	223,1183	225,9802	258,1401	43,5945	16,8879
T IV	339,3633	265,0013	241,2678	311,7735	382,7475	308,5592	308,1188	50,7689	16,4770
T VI	257,0556	239,7014	216,2516	208,4623	246,0355	265,3159	238,8037	22,4425	9,3979
T VII	301,0036	199,0766	191,6227	370,8822	264,2887	298,9955	270,9782	68,0870	25,1264
T VIII	333,9859	370,2327	281,1100	360,6976	323,5222	332,1067	333,6092	31,4178	9,4175

Fonte: Autora (2017).

Já na Tabela 38 são apresentados os valores de tenacidade encontrados por meio de sensores acessórios (LVDT e célula de carga externos), com os respectivos valores médios, desvios padrões (S_d) e coeficientes de variação (CV).

Tabela 38 – Valores de tenacidade encontrados para todas as amostras ensaiadas utilizando os sensores externos

Dosagem	Tenacidade (N.m)						Média (N.m)	S _d (N.m)	CV (%)
	Corpos de prova								
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6			
T II	286,8471	293,7412	-	292,2588	272,5893	269,0667	282,9006	11,3839	4,0240
T III	332,8565	357,4222	249,0116	347,5532	261,7478	258,0338	301,1042	49,9100	16,5757
T IV	376,5637	299,4863	280,0081	359,2660	457,6172	360,3008	355,5404	62,8417	17,6750
T VI	318,0740	292,3799	270,4540	295,3615	384,4194	-	312,1378	43,7871	14,0281
T VII	373,3994	256,3029	240,4595	416,2973	338,3428	380,8121	334,2690	71,1641	21,2895
T VIII	368,2980	421,5609	392,4372	416,3589	401,1334	377,9485	396,2895	20,9745	5,2927

Fonte: Autora (2017).

A.2 RESULTADOS DE TENACIDADE OBTIDOS NA POLI/USP

Na Tabela 39, por sua vez, são apresentados os valores de tenacidade calculados para cada amostra ensaiada no laboratório da Poli/USP, em que a carga aplicada e o deslocamento do corpos de prova forma medidos pelos sensores da máquina de ensaio. Dessa forma, são apresentados os valores médios, desvios padrões (S_d) e coeficientes de variação (CV).

Tabela 39 – Valores de tenacidade encontrados para todas as amostras ensaiadas utilizando os sensores da própria máquina de ensaio no laboratório da Poli/USP

Dosagem	Tenacidade (N.m)						Média (N.m)	S _d (N.m)	CV (%)
	Corpos de prova								
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6			
T II	295,3284	225,0572	291,9539	256,9002	-	202,3998	254,3279	40,7942	16,0400
T III	217,1992	264,9945	282,7035	312,5688	272,0968	256,5816	267,6907	31,4290	11,7408
T IV	277,9508	365,8894	238,4657	318,1433	364,0710	375,3899	323,3183	55,6228	17,2037
T VI	305,5348	351,6221	-	354,0502	341,6162	-	338,2058	22,4356	6,6337
T VII	326,2380	374,9039	232,4339	254,7715	279,4848	280,8947	291,4545	51,4928	17,6675
T VIII	359,3202	437,4120	407,3602	407,7386	428,3307	-	408,0324	30,2018	7,4018

Fonte: Autora (2017).

APÊNDICE B

A realização do ensaio Barcelona simplificado seguiu procedimentos de ensaios a fim de que possíveis interferências nas respostas obtidas fossem minimizadas. Os procedimentos adotados são:

- a) Como foram moldados corpos de prova com 15 cm x 30 cm, os mesmos inicialmente foram identificados, conforme apresentado na Figura 89. Essa identificação incluiu o número do traço (T2) e número da amostra (1). Além disso, as amostras receberam uma seta, indicando a face superior do corpo de prova, tendo em vista a direção de moldagem das amostras. O ensaio sempre foi realizado com a seta apontada para cima. Já que as amostras foram cortadas ao meio para atingirem as dimensões corretas, a metade do fundo da forma recebeu a letra (a) como identificação e a metade do topo recebeu a letra (b).

Figura 89 – Identificação das amostras ensaiadas pelo ensaio Barcelona simplificado, antes do corte das mesmas



Fonte: Autora (2017).

- b) Em seguida, as amostras foram serradas ao meio e atingiram as dimensões necessárias para a realização do ensaio Barcelona simplificado (Figura 90);

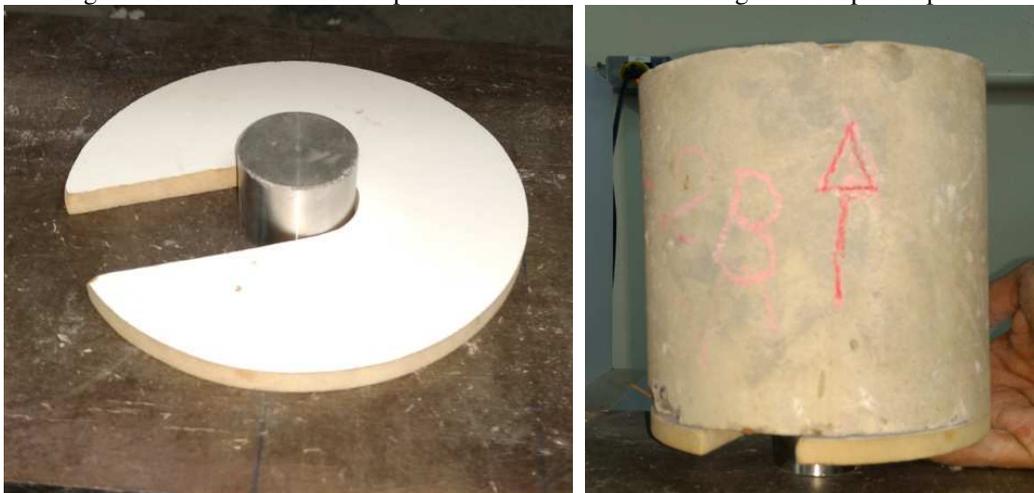
Figura 90 – Amostras nas dimensões corretas após serem cortadas



Fonte: Autora (2017).

- c) A fim de facilitar o procedimento de ensaio, dois gabaritos em madeira compensada foram produzidos para o posicionamento centralizado dos discos de carga e dos corpos de prova. A Figura 91 demonstra a utilização desses gabaritos.

Figura 91 – Gabarito utilizado para centralizar os discos de carga e os corpos de prova



Fonte: Autora (2017).

- d) Para o apoio da célula de carga, uma chapa metálica foi posicionada sobre o disco de carga superior e para a fixação do LVDT, uma base magnética foi utilizada (Figura 92). Após tais procedimentos, o ensaio era iniciado.

Figura 92 – Posicionamento da célula de carga com auxílio de uma chapa metálica e fixação do LVDT com uma base magnética



Fonte: Autora (2017).

- e) Por fim, o número de fissuras obtidas em cada amostra foi quantificado para que as equações propostas por Pujadas et al. (2013) fossem empregadas (Figura 93).

Figura 93 – Amostra com as fissuras formadas após a realização do ensaio Barcelona simplificado



Fonte: Autora (2017).

APÊNDICE C

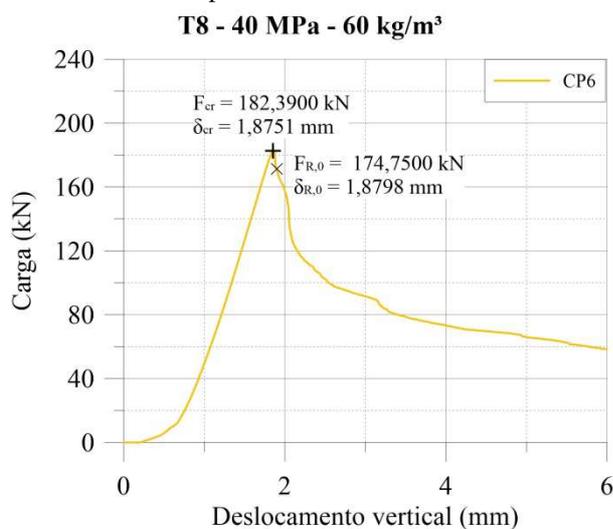
No item 4.3.2 foram explicitadas as equações propostas por Pujadas et al. (2013) a fim de converter o deslocamento vertical medido no ensaio Barcelona simplificado em abertura circunferencial (TCOD), essa que é a resposta obtida no ensaio Barcelona original. A fim de exemplificar o cálculo do TCOD, tem-se a seguir os procedimentos de cálculo utilizados para obter a curva da amostra CP6 da dosagem correspondente ao Traço VIII para o ensaio realizado na FECIV/UFU utilizando os sensores da máquina de ensaio:

- I. Inicialmente, deve-se estabelecer as variáveis presentes nas equações estudadas por Pujadas et al. (2013), que são elas:
 - a) Número de fissuras radiais formadas nas amostras após a aplicação do duplo puncionamento (n): esse número que é facilmente quantificado após a realização do ensaio, sendo que para a presente pesquisa foi adotado o valor médio de três fissuras radiais;
 - b) Diâmetro do disco de carga (a): conforme apresentado no item 4.3.2, o diâmetro do disco de carga empregado está relacionado se as amostras ensaiadas são moldadas ou extraídas, como nesse estudo as amostras foram moldadas, o diâmetro utilizado foi de 37,5 mm;
 - c) Comprimento da cunha formada (l_{cunha}): tendo em vista a Equação 12, o comprimento da cunha é encontrado utilizando o diâmetro do disco de carga adotado e o ângulo de atrito interno do material (φ) igual a 65° , conforme a Equação 22:

$$l_{cunha} = \frac{a}{2} \times \operatorname{tg} \varphi = \frac{37,5}{2} \times \operatorname{tg}(65) = 40,2095 \text{ mm} \quad (\text{Equação 22})$$

- II. Em seguida, por meio da curva encontrada com os valores de carga de funcionamento e deslocamento vertical, pode-se estabelecer os valores de carga máxima e carga residual com seus respectivos deslocamentos. Na Figura 94 estão discriminados os valores empregados de carga máxima (F_{cr}) e seu respectivo deslocamento (δ_{cr}) e também de carga residual ($F_{R,0}$) e seu deslocamento ($\delta_{R,0}$).

Figura 94 – Curva carga versus deslocamento com a discriminação dos pontos de carga crítica e residual com os respectivos deslocamentos



- III. Com todas as variáveis necessárias estabelecidas, as Equações 9, 10 e 11 são empregadas e a curva carga versus TCOD é encontrada, conforme apresentado na Figura 95.

Figura 95 – Curva carga versus TCOD obtida por meio das equações propostas por Pujadas et al. (2013)

