



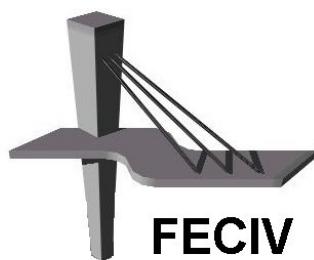
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Dissertação DE MESTRADO

COMPARAÇÃO DA DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE
DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO
POR MEIO DO ENSAIO DE ABERTURA POR
ENCUNHAMENTO E DA ASTM C1609

RAPHAEL FONSECA DIAS

UBERLÂNDIA, 26 DE FEVEREIRO DE 2018



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



Raphael Fonseca Dias

**COMPARAÇÃO DA DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE DO
CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO POR MEIO DO
ENSAIO DE ABERTURA POR ENCUNHAMENTO E DA ASTM C1609**

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. Antônio Carlos dos Santos

Uberlândia, 26 de fevereiro de 2018

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

D541c Dias, Raphael Fonseca, 1990-
2018 Comparação da determinação da tenacidade do concreto reforçado
com fibras de aço por meio do ensaio de abertura por encunhamento e da
ASTM C1609 / Raphael Fonseca Dias. - 2018.
137 f. : il.

Orientador: Antônio 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.2018.280>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Concreto - Teses. 3. Fibras de metal -
Teses. 4. Concreto - Aditivos - Teses. I. Santos, Antônio Carlos dos, . II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624

Maria Salete de Freitas Pinheiro – CRB6/1262



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

ATA Nº: 202/2018

CANDIDATO: Raphael Fonseca Dias

Nº. Matrícula: 11612ECV018

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos

TÍTULO: "Comparação de determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço por meio do Ensaio de Abertura por Encunhamento e da ASTM C1609"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Estruturas e Construção Civil

LINHA DE PESQUISA: Construção Civil

PROJETO DE PESQUISA: Recuperação e Reforço de Elementos Estruturais

DATA DA DEFESA: 26 de fevereiro de 2018

LOCAL: Sala de Reuniões Prof. Marcio Antônio Ribeiro da Silva, bloco 1Y.

HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO: 9h10 - 11h45

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.^a Dr.^a Andrielli Moraes de Oliveira – FECIV/UFU; Leandro Mouta Trautwein – FEC/UNICAMP e Antonio Carlos dos Santos** orientador do candidato. Ressalta-se que o todos os membros da banca e o aluno participaram in loco.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa **Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos** apresentou a Comissão Examinadora e concedeu ao discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou o candidato Aprovado. 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**

Leandro Mouta Trautwein

Membro externo: **Prof. Dr. Leandro Mouta Trautwein – FEC/UNICAMP**

Andrielli M. Oliveira

Membro interno: **Prof.^a Dr.^a Andrielli Moraes de Oliveira – FECIV/UFU**

Uberlândia, 26 de Fevereiro de 2018

*“Eu posso ir muito além de onde estou,
vou nas asas do Senhor,
o Teu amor é o que me conduz”*

*Aos meus pais Clovis e Vanilce
e aos meus saudosos avós José e Alaíde (in memoriam).*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus e a Nossa Senhora da Imaculada Conceição, a quem sou consagrado, pelo dom da vida e por me guiarem até aqui. Aos meus avós José e Alaíde que na “faculdade da vida”, me ensinaram a ser bom. Sei que de onde estão me ajudaram na conclusão desse trabalho.

Aos meus pais, Clovis e Vanilce, e minha irmã Rayanne, por serem meus apoios e fortaleza, sou grato pelo carinho e compreensão. Essa conquista é por vocês!

Ao meu companheiro Ederson Garcia, que chegou no momento certo para me fazer acreditar em mim e dizer que tudo daria certo.

Ao meu cunhado Breno Guilherme, aos meus avós, tios e primos, por darem muito mais sentido à minha vida.

Aos meus amigos, muitas vezes anjos na minha vida, a força e compressão de vocês foram essenciais. Em especial, Luciana Matias, Renata Nicurgo, Danielle Ganda, Gilson Junior e Pe. Geraldo Magela, vocês são minhas inspirações.

Aos meus amigos que conquistei na Faculdade de Engenharia Civil, Mariana de Carvalho, Ismara Arantes, Lorena Campos, Juliete Ribeiro, Bruno Marques, Luana Borges, Marina Mota e Mohammed Arif. Obrigado pela colaboração!

À Cristiane Pires, laboratorista da Faculdade de Engenharia Civil, pela paciência, ajuda e amizade.

A todos os professores da pós-graduação em engenharia civil (Turíbio José, Leila Aparecida, Rodrigo Delalibera, Maria Cristina Vidigal) por contribuírem com minha formação pessoal e profissional. Aos professores Andrielli Oliveira e Leandro Trautwein por contribuírem com meu trabalho

De maneira singular, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Antônio Carlos dos Santos, por me transmitir tanto conhecimento e sabedoria. Agradeço pela paciência e por não desistir de mim.

À empresa Belgo Bekaert Arames pelo incentivo a esta pesquisa com a doação das fibras de aço.

À CAPES pelo indispensável apoio financeiro.

Raphael Fonseca Dias

Dias, R. F. Comparação da determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço por meio do ensaio de abertura por encunhamento e da ASTM C1609. 129 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

RESUMO

O objetivo geral dessa pesquisa é analisar o comportamento mecânico, com foco na tenacidade à tração, de corpos de provas de concreto reforçado com fibras de aço, por meio do ensaio de abertura por encunhamento, patenteado por Elmar K. Tschegg, comparando os resultados com os valores obtidos pelo método da ASTM C1609. Deseja-se ainda, avaliar a influência do teor de fibra de aço e da resistência à compressão na tenacidade do compósito. E também contribuir com a regulamentação e o controle na aplicação do material. O programa experimental foi composto de 112 corpos de prova (64 cilíndricos para caracterização, 24 prismáticos para ASTM C1609 e 24 cúbicos para encunhamento) que foram ensaiados no Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia. Todos os corpos de prova foram moldados e ensaiados com idade mínima de 60 dias. Após a realização dos ensaios e análise dos resultados, conclui-se que as fibras de aço conferem ao concreto um aumento na tenacidade à tração. Observou-se também o comportamento *strain-hardening* à tração do concreto com teor de fibras de 0,64%. O ensaio de abertura por encunhamento apresenta indicativos de reprodutibilidade e coerência, quando comparado com o teste ASTM C1609 (2012), ou seja, há uma correlação e confirma-se como um procedimento alternativo para o controle tecnológico do compósito.

Palavras chave: concreto reforçado com fibras de aço, métodos de ensaio, ensaio de abertura por encunhamento, tenacidade.

Dias, R. F. Comparison of the determination of the toughness of the reinforced concrete with steel fibers through the aperture test by ASTM C1609. 129 p. MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2018.

ABSTRACT

The general objective of the research is to analyze the mechanical behavior, focusing on the tensile strength, of concrete reinforced concrete test bodies with steel fibers, by means of the Elmar K. Tscheegg patented aperture test by comparing the results with the values obtained by the method of ASTM C1609. It is also desired to evaluate the influence of the steel fiber content and the compressive strength on the composite toughness. And also contribute with a regulation and control in the application of the material. The experimental program was composed of 112 test specimens (64 cylindrical characterization, 24 prismatic for ASTM C1609 and 24 cubic for encouragement) that were tested in the Structures Laboratory of the Faculty of Civil Engineering of the Federal University of Uberlândia. All specimens were molded and assayed at least 60 days old. After the tests and analysis of the results, it is concluded that the steel fiber gives the concrete an increase in tensile toughness. The strain-hardening behavior of the concrete with a fiber content of 0.64% was also observed. The Wedge Splitting Test presents indications of reproducibility and coherence, when compared with ASTM C1609 (2012), that is, there is a correlation and it is confirmed as an alternative procedure for the technological control of the composite.

Keywords: reinforced concrete with steel fibers, test methods, open set test, toughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fibras adequadas em relação às propriedades de matriz de concreto	7
Figura 2: Caracterização da fibra de aço com base na origem e conformação, segundo a ABNT NBR 15530:2007	12
Figura 3: Esquema de concentração de tensões para um concreto sem (a) e com reforço de fibras (b).....	13
Figura 4: Descrição esquemática de uma fibra embebida numa matriz	15
Figura 5:Estágios de fissuração do concreto reforçado com fibras	18
Figura 6: Comportamento de matrizes cimentícias sem a adição de fibras e com adição de fibras de aço	19
Figura 7: CRFA com teores abaixo, acima e igual ao $V_f, crit$ durante o ensaio de tração na flexão	21
Figura 8:Padrão de fissuração no concreto armado e no CRFA submetidos à tração....	21
Figura 9: Resultados de tenacidade à flexão do CRF, em diferentes teores de fibras, da pesquisa de Zhang et al. (2014).....	22
Figura 10: Corpo de prova em formato de "osso para cão" e instrumentação necessária para o ensaio à tração direta	288
Figura 11:Representação do ensaio de punção de placas de acordo com a EFNARC (1996): (a) Esquema do ensaio de punctionamento de placas; (b) Suporte de LVDT no ensaio de punção de placas.....	300
Figura 12:Curva obtida no ensaio descrito pela JSCE-SF4 (1984)	311
Figura 13: Posicionamento do corpo de prova, cutelos e LVDT em ensaio de tração na flexão	322
Figura 14: Esquema do ensaio de tenacidade à flexão prescrito pela ASTM C1609 (2012)	333
Figura 15: Esquema de realização do ensaio especificado na EN 14651 (2007)	334

Figura 16: Esquema de ensaio conforme a EN 14651 (2007) e esforços solicitantes máximos de esforço cortante e momento fletor.....	35
Figura 17: a) Padrão de configuração típico de fissuração do corpo de prova após o ensaio. B) Ensaio Barcelona realizado com o extensômetro circunferencial.....	36
Figura 18: Configuração de ensaio do Barcelona Simplificado, substituindo o extensômetro circunferencial.....	37
Figura 19: Forma geométrica das amostras e configuração do ensaio de abertura por encunhamento	38
Figura 20: Equipamento para ensaio de abertura por encunhamento.....	38
Figura 21: Configuração do método da cunha para carga uniaxial	39
Figura 22: Configuração do corpo de prova para ensaio pelo método DEWS.....	41
Figura 23: Correlação linear entre os valores de tenacidade obtidos pelo ensaio DEWS e o método JSCE	43
Figura 24: Correlação linear entre os valores de tenacidade obtidos pelo ensaio DEWS e o método JSCE	44
Figura 25: Fluxograma com as variáveis do planejamento experimental	47
Figura 26: Curva granulométrica para caracterização do agregado miúdo: a) areia fina e b) areia média	49
Figura 27: Curva granulométrica para caracterização do agregado graúdo: a) brita 0 e b) brita 1	50
Figura 28: Geometria e dimensões da fibra de aço empregada	51
Figura 29: Fibra de aço de seção circular Tipo A e classe I.....	52
Figura 30: Forma metálica dividida em cubos para moldagem dos corpos de provas para teste por encunhamento	53
Figura 31: Teste para conferência do teor de fibras: a) forma cilíndrica e fibras recolhidas após lavagem do material; b) determinação do volume das fibras por proveta graduada.....	54

Figura 32: Retificação dos corpos de prova para os testes de resistência à compressão do CRFA.....	55
Figura 33: Teste de resistência à compressão em corpos de prova cilíndrico realizado no laboratório de estruturas da FECIV-UFU.....	556
Figura 34: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	58
Figura 35: Corpo de prova cúbico com dimensões de 150 x 150 x 140 mm para ensaio por encunhamento.....	59
Figura 36: Execução de entalhe de 20 mm no corpo de prova.....	59
Figura 37: Equipamento e configuração do ensaio de abertura por encunhamento, realizado na FECIV-UFU	60
Figura 38: Corpos de provas após o ensaio de abertura por encunhamento: a) sem fibras e b) com fibras	61
Figura 39: Equipamento e configuração do ensaio da ASTM, realizado na FECIV-UFU	62
Figura 40: Corpos de provas do CRFA após o ensaio de tenacidade à flexão ASTM C1609 (2012).....	63
Figura 41: Curvas carga <i>versus</i> deflexão obtidas pelo ensaio de tenacidade à flexão realizado na FECIV-UFU	73
Figura 42: Curvas carga <i>versus</i> deflexão, variando o teor de fibras, para o ensaio à flexão ASTM C1609	76
Figura 43: Curvas carga <i>versus</i> deflexão, variando a resistência da matriz, para o ensaio à flexão ASTM C1609.....	76
Figura 44: Curvas carga <i>versus</i> deflexão obtidas pelo ensaio de abertura por encunhamento realizado na FECIV-UFU	77
Figura 45: Curvas carga <i>versus</i> deflexão, variando o teor de fibras, para o ensaio de encunhamento.....	81
Figura 46: Curvas carga <i>versus</i> deflexão, variando a resistência da matriz, para o ensaio de encunhamento.....	81

Figura 47: Correlação entre os valores de tenacidade obtidos pelos testes realizados na FECIV – UFU (Abertura de fissura = 2,5 mm).....	83
Figura 48; Correlação entre os valores de tenacidade obtidos pelos testes realizados na FECIV – UFU (Abertura de fissura = 3,0 mm).....	84
Figura 49: Correlação entre os valores de tenacidade obtidos pelos testes realizados na FECIV – UFU (Abertura de fissura = 3,5 mm).....	85
Figura 50: Variação na tenacidade ao aumentar o teor de fibras, segundo a ASTM	86
Figura 51: Variação na tenacidade ao aumentar a classe de resistência, segundo a ASTM	86
Figura 52: Representação gráfica dos efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,37% para 0,50%) ...	87
Figura 53: Representação gráfica dos efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,50% para 0,64%) ...	88
Figura 54: Representação gráfica dos efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,37% para 0,64%) ...	89
Figura 55: Variação na tenacidade ao aumentar o teor de fibras, segundo o teste por encunhamento	90
Figura 56: Variação na tenacidade ao aumentar a classe de resistência, segundo o teste por encunhamento.....	91
Figura 57: Representação gráfica dos efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,37% para 0,50%) ...	92
Figura 58: Representação gráfica dos efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,50% para 0,64%) ...	93
Figura 59: Representação gráfica dos efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,37% para 0,64%) ...	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades típicas da matriz cimentícia	8
Tabela 2: Características físicas de algumas fibra sem compósitos reforçados	10
Tabela 3: Características dos tipos e classes de fibras, de acordo com a ABNT NBR 15530:2007	12
Tabela 4: Medida da deflexão de primeira fissura por métodos diferentes.....	25
Tabela 5: Influência do tamanho e da geometria do corpo de prova na medida de tenacidade	25
Tabela 6: Velocidade de carregamento do ensaio da ASTM C1609, conforme a deflexão.	33
Tabela 7: Tenacidade para concreto com teor de fibra de 20 kg/m ³	42
Tabela 8: Tenacidade para concreto com teor de fibra de 30 kg/m ³	42
Tabela 9: Tenacidade para concreto com teor de fibra de 45 kg/m ³	43
Tabela 10: Valores de Tenacidade, obtidos por Toaldo (2013), para concreto com teor de fibra de 30 kg/m ³	44
Tabela 11: Número de corpos de prova moldados para serem ensaiados para cada dosagem.....	48
Tabela 12: Caracterização do agregado miúdo.....	49
Tabela 13: Caracterização do agregado graúdo (dmáx = 12,5 mm).....	500
Tabela 14: Característica do aditivo hiperplastificante empregado.....	51
Tabela 15: Dosagem dos materiais a serem utilizados	52
Tabela 16: Velocidade de carregamento de acordo com a ASTM C1609	62
Tabela 17: Critério de Chauvenet para eliminação de valor medido	64
Tabela 18: Fatores e níveis analisados	65

Tabela 19: 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 0,37 % para 0,50 %).....	66
Tabela 20: 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 %).....	66
Tabela 21: 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 0,37 % para 0,64 %).....	66
Tabela 22: Resistência à compressão aos 28 dias e aos 60 dias	69
Tabela 23: Ganho na resistência à compressão das amostras com fibras em relação às amostras sem fibras	69
Tabela 24: Resistência à tração por compressão diametral aos 60 dias	70
Tabela 25: Ganho/perda na resistência à tração das amostras com fibras em relação às amostras sem fibras	71
Tabela 26: Módulo de Elasticidade médio do concreto reforçado com fibras para 28 dias e 60 dias	72
Tabela 27: Ganho do módulo de elasticidade das amostras com fibras em relação às amostras sem fibras	72
Tabela 28: Valores de Tenacidade obtidos pelo ensaio à flexão ASTM C1609	75
Tabela 29: Valores de Tenacidade obtidos pelo ensaio de abertura por encunhamento ($w = 2,5$).....	79
Tabela 30: Valores de Tenacidade obtidos pelo ensaio de abertura por encunhamento ($w = 3,0$).....	79
Tabela 31: Valores de Tenacidade obtidos pelo ensaio de abertura por encunhamento ($w = 3,5$).....	80
Tabela 32: Correlação entre os valores de tenacidade obtidos pelos testes realizados na FECIV – UFU (Abertura de fissura = 2,5 mm).....	82

Tabela 33: Correlação entre os valores de tenacidade obtidos pelos testes realizados na FECIV – UFU (Abertura de fissura = 3,0 mm).....	83
Tabela 34: Correlação entre os valores de tenacidade obtidos pelos testes realizados na FECIV – UFU (Abertura de fissura = 3,5 mm).....	84
Tabela 35: Efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,37% para 0,50%).....	87
Tabela 36: Efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,50% para 0,64%).....	88
Tabela 37: Efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,37% para 0,64%).....	89
Tabela 38: Efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,37% para 0,50%).....	92
Tabela 39: Efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,50% para 0,64%).....	93
Tabela 40: Efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,37% para 0,64%).....	94

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

ABREVIATURAS

<i>AENOR</i>	- Asociación Española de Normalización y Certificación
<i>AR</i>	- Alkali Resistant
<i>ASTM</i>	- American Society For Testing Materials
<i>CMOD</i>	- Crack Mouth Opening Displacement
<i>CRF</i>	- Concreto Reforçado Com Fibras
<i>CRFA</i>	- Concreto Reforçado Com Fibras De Aço
<i>DEWS</i>	- Double Edge Wedge Splitting
<i>EBS</i>	- Ensaio Barcelona Simplificado
<i>EFNARC</i>	- European Federation of National Associations Representing for Concrete
<i>FIB</i>	- Fédération Internationale Du Béton
<i>JSCE</i>	- Japan Society of Civil Engineers
<i>LVDT</i>	- Linear Variable Differential Transformer
<i>TCOD</i>	- Total Circumferential Opening Displacement
<i>UNE</i>	- Asociación Española de Normalización
<i>WST</i>	- Wedge Splitting Test

SÍMBOLOS

<i>a</i>	- Diâmetro do disco de carga
<i>D</i>	- Diâmetro do corpo de prova
<i>E</i>	- módulo de elasticidade
<i>E_m</i>	- módulo de elasticidade médio
<i>f_c</i>	- Resistência a compressão

f_{cm}	- Resistência a compressão média
F_{cr}	- Força máxima alcançada
f_{ctm}	- Resistência à tração por compressão diametral média
$f_{ct,sp}$	- Resistência à tração por compressão diametral
FH	- Força Horizontal
FM	- Força da máquina
$F_{R,0}, \delta_{R,0}$	- Força e deslocamento vertical no ponto de início da resistência residual
FV	- Força Vertical
h	- Altura do corpo de prova
L	- Vôo entre apoios
l_{cunha}	- Comprimento da cunha
n	- Número de fissuras radiais formadas no ensaio
S_d	- Desvio Padrão
t	- Tensões de cisalhamento
Tb	- Tenacidade à flexão
V_f	- Volume de fibra
$V_{f, crit}$	- Volume de fibra crítico
w	- abertura de fissura
α	- Ângulo da cunha
δ	- Deflexão
δ_{ab}	- Deflexão equivalente a L/150
ε_a	- Deformação específica médias dos corpos de prova sob a tensão básica
ε_b	- Deformação específica média do corpo de prova sob a tensão maior
σ_b	- Maior tensão obtida no ensaio
σ_{cc}	- Tensão de fissuração
σ_f	- Tensão de tração na fibra

σp_c - Tensão máxima pós-fissuração

SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI - American Concrete Institute

EN - European Standard

FT - Fator de tenacidade

mm - milímetros

MOR - módulo de ruptura

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	3
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.2.1 Objetivo Geral	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
2. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS.....	5
2.1 INTRODUÇÃO.....	5
2.2 A FASE MATRIZ.....	7
2.3 FASE FIBRA.....	9
2.3.1 Fibras de aço.....	10
2.4 INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ.....	13
3. TENACIDADE DO CONCRETO	17
3.1. TENACIDADE NO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO	17
3.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NA TENACIDADE DE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO	24
3.2.1 Tipo de máquina de ensaio	24
3.2.2 Tamanho e geometria dos corpos de prova	25
3.2.3 Resistência das fibras.....	26
3.2.4 Resistência da matriz	266
3.2.5 Teor e espaçamento das fibras.....	27
4. MÉTODOS DE ENSAIO PARA AVALIAÇÃO DA TENACIDADE	288
4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO DIRETA	288

4.2 ENSAIOS DE TRAÇÃO INDIRETA	29
4.2.1 Ensaio de flexão de placas.....	29
4.2.2 Ensaios de flexão em vigas.....	300
4.2.2.1 Método JSCE-SF4 (1984)	311
4.2.2.2 Método ASTM C1609 (2012)	322
4.2.2.3 Método EN 14651 (2007).....	34
4.2.3 Ensaios por punção.....	35
4.2.3.1 Método AENOR UNE 83515 (2010) (Barcelona Teste) e Barcelona Simplificado	35
4.2.3.2 Método da Abertura por Encunhamento	36
4.2.3.3 Método com Duplo Corte em Cunha (DEWS)	40
4.3 COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE ENSAIOS.....	41
4.4 SÍNTESE DOS MÉTODOS DE ENSAIO.....	45
5. PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS	46
5.1 INTRODUÇÃO	46
5.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	46
5.3 MATERIAIS UTILIZADOS	48
5.3.1 Cimento	48
5.3.2 Agregados	49
5.3.3 Aditivo	51
5.3.4 Água	51
5.3.5 Fibras de aço.....	51
5.4 DOSAGEM DO CONCRETO	52
5.5 PRODUÇÃO, MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA	53
5.6 MÉTODOS DE ENSAIO.....	55
5.6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (f_{Cm})	55

5.6.2 Módulo de elasticidade (E_{ci})	57
5.6.3 Resistência à tração por compressão diametral	57
5.6.4 Tenacidade por meio do ensaio de abertura por encunhamento.....	59
5.6.5 Tenacidade à flexão segundo a ASTM C1609	61
5,7 CRITÉRIO DE CHAUVENET.....	63
5,8 PLANEJAMENTO E ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	64
6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	68
6.1 INTRODUÇÃO	68
6.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	68
6.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	70
6.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE (E_{ci}).....	71
6.5 TENACIDADE DO CONCRETO COM FIBRAS	73
6.7.1 Ensaio tenacidade à flexão ASTM C1609 (2012).....	73
6.7.2 Ensaio de abertura por encunhamento.....	77
6.7.3 Análise comparativa entre o ensaio à flexão e o ensaio de abertura por encunhamento	82
6.7.4 Análise fatorial: Ensaio à flexão ASTM C1609.....	85
6.7.5 Análise fatorial: Ensaio de abertura por encunhamento	90
7. CONCLUSÃO.....	95
7.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
ANEXO A	108
APÊNDICE A	111
APÊNDICE B.....	112
APÊNDICE C	113
APÊNDICE D	114

APÊNDICE E.......... 114

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

O concreto ainda é um dos materiais de construção civil mais utilizado no mundo. Justamente por isso, exige-se o conhecimento de suas propriedades e comportamento mecânico para que seja bem aplicado. Sabe-se, a princípio, que é um material heterogêneo e de fratura frágil. Ou seja, possui pequena capacidade de deformação antes da sua ruptura à tração.

Pensando nisso, diversas propostas técnico-científicas foram apresentadas para reduzir essa limitação do concreto. Uma das alternativas, é a utilização de fibras na sua composição. São utilizadas fibras vegetais, de vidro e mais comumente fibras de aço, que possuem tamanhos e formas diferentes, além de se organizarem na pasta de concreto, de maneira descontínua.

Estudos mostram que a utilização de fibras no concreto contribui positivamente, pois conferem ao concreto 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). E, por dificultar a propagação de fissuras no material, aumenta a sua ductilidade. Observa-se ainda, o aumento da tenacidade do compósito, que é a capacidade de absorver energia.

Sabe-se que a utilização de compósitos reforçados com fibras na construção civil ocorre há milhares de anos. No Egito Antigo já se empregava a palha natural a fim de reforçar tijolos de barro para a construção de suas casas. Atualmente, 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 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, por exemplo, o Barcelona Teste e o Ensaio por Encunhamento, também podem ser empregados.

Este trabalho integra um grupo de pesquisas coordenado pelo professor Dr. Antônio Carlos dos Santos da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, sobre o concreto reforçado com fibras. Antecedeu a essa pesquisa, as seguintes dissertações de mestrado:

- Avaliação da medida de tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço (ARIF, 2014).
- Resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado sem armadura transversal reforçadas com fibras de aço (VITOR, 2017).
- Avaliação da eficiência do ensaio Barcelona simplificado para a determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibra (PEREIRA, 2017).

1.1 JUSTIFICATIVA

Por se tratar de um dos materiais de construção civil mais comercializado no mundo, várias pesquisas e estudos são realizados com o intuito de aprimorar as propriedades e melhorar o comportamento, principalmente mecânico, do concreto. Um dos avanços nesse sentido é a utilização de fibras no concreto, tornando-o um material compósito. Esse material já vem sendo aplicado, por exemplo, em revestimentos de túneis, pisos industriais e pavimentos. No entanto, não existem no Brasil normas que avaliem e especifiquem o uso do concreto reforçado com fibras.

Para suprir essa carência de material técnico sobre o CRFA, o CT 303 - Comitê Técnico IBRACON/ABECE, que trata do Uso de Materiais Não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras, elaborou a Prática Recomendada “Projeto de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibras” (2016). Ela traz as diretrizes para o desenvolvimento do projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras e pretende ser a base para os trabalhos de normalização técnica sobre o tema.

Sabe-se do interesse de profissionais e indústrias na aplicação dos compósitos na construção civil. Pois, quando bem estudados, projetados e aplicados, apresentam um desempenho melhor que seus próprios componentes isolados. No caso de compósitos em elementos estruturais, deseja-se um aumento na resistência à compressão, resistência à tração e na absorção de energia (FIGUEIREDO, 2011).

Propriedades como a resistência à tração e tenacidade dependem da natureza da matriz, tipo e quantidade de fibras empregadas. Dessa forma, para contribuir nesse sentido, desenvolveu-se, para essa pesquisa, um estudo experimental, caracterizando compósitos com diferentes teores de fibras, duas diferentes resistências à tração e avaliando sua tenacidade por dois métodos distintos (ASTM e Ensaio por Encunhamento).

Enfim, deseja-se aprimorar o conhecimento sobre metodologias para avaliação à tenacidade e do controle tecnológico, contribuindo com os estudos existentes sobre o desempenho mecânico do CRFA e a correlação entre os ensaios existentes.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral dessa pesquisa é correlacionar os valores de tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço obtidos pelo ensaio à tração da ASTM C1609 e pelo ensaio por encunhamento, patenteado por Tscheegg (1986).

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência da resistência à compressão do concreto e do teor de fibras na tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA).
- Avaliar o comportamento mecânico à tração do concreto reforçado com fibras de aço, por meio da determinação da tenacidade.
- Avaliar a viabilidade do ensaio por encunhamento (TSCHEGG, 1986), como alternativa de ensaio para o controle tecnológico do CRFA.

Com o intuito de desenvolver uma correlação entre os ensaios de abertura por encunhamento e o ensaio à tração (ASTM C1609), aplicados na avaliação do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), este trabalho é constituído de capítulos, organizados da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução ao tema, justificativa e objetivos;

Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre o Concreto Reforçado com Fibras;

Capítulo 3: Revisão bibliográfica sobre a Tenacidade do Concreto Reforçado com Fibras;

Capítulo 4: Revisão bibliográfica sobre os Métodos de ensaios utilizados para a determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras;

Capítulo 5: Programa experimental: materiais e métodos

Capítulo 6: Apresentação e análise dos resultados

Capítulo 7: Conclusão

CAPÍTULO 2

2. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

2.1 INTRODUÇÃO

O concreto possui uma série de características que lhe garantem o posto de material estrutural mais utilizado no mundo. Entre as principais vantagens, pode-se listar o baixo custo e a capacidade de se adequar a variadas condições de produção, além de possibilitar infinitas variações de forma para as peças moldadas. Apesar disso, o concreto apresenta também várias limitações, como a baixa relação resistência/peso e o fato de ter sua qualidade aferida apenas depois que a peça estrutural foi produzida. Mais recentemente surgiu uma nova possibilidade de reforço do concreto por meio do uso de fibras (FIGUEREDO, 2000).

O concreto reforçado com fibras (CRF) é um tipo de material compósito produzido com cimento hidráulico, agregados de vários tamanhos e adição de fibras discretas e descontínuas de forma a ser composto basicamente de duas fases: a matriz, que mesmo multifásica é considerada como uma fase única, e as fibras (BENTUR; MINDESS, 2007).

O compósito estrutural é um sistema de material formado por duas ou mais fases em escala microscópica. A fase descontínua é mais dura, mais resistente e é chamada de reforço; a outra fase, menos resistente, é chamada de matriz (DANIEL; ISHAI, 2006). A interação matriz-reforço permite que o desempenho do compósito seja superior ao daqueles materiais que lhe deram origem. Desta forma, algumas das limitações das matrizes frágeis como o concreto podem ser compensadas pelo material que é utilizado para seu reforço (FIGUEIREDO, 2011).

Para Arif (2014), com a aplicação dos materiais compósitos nos elementos estruturais, podem-se citar algumas de suas vantagens e desvantagens. As vantagens dos materiais compósitos são:

- material leve;
- aumenta a ductilidade dos materiais frágeis como o concreto;
- aumento da resistência à fadiga;
- resistência elevada;
- rigidez elevada;
- baixa expansão térmica;
- baixa condutividade elétrica;
- boa resistência ao impacto.

As desvantagens em se utilizar materiais compósitos nos elementos estruturais são:

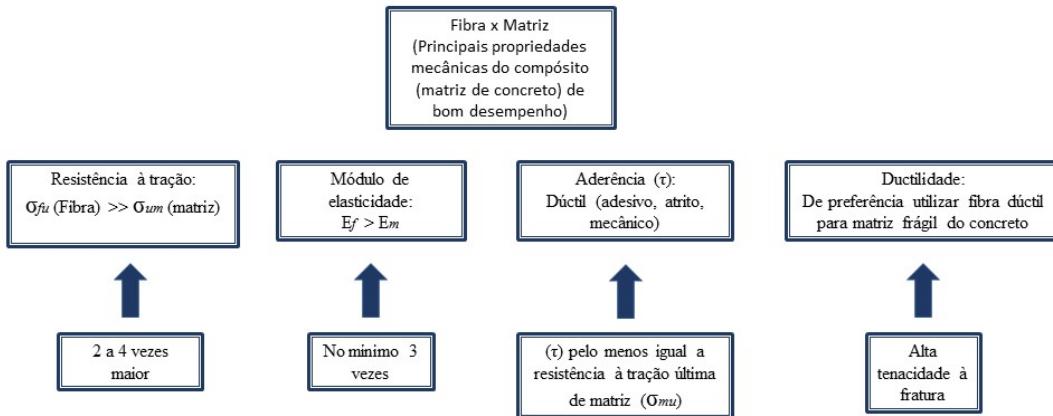
- elevado custo do material;
- ainda falta normatização para aprovação dos projetos;
- temperatura limitada dependendo do tipo de fibra utilizada;
- difícil identificar os danos internos.

As propriedades do concreto reforçado com fibras dependem de vários fatores, entre eles: (GOIS, 2010)

- a) teor de fibras adicionadas no concreto;
- b) características geométricas das fibras;
- c) orientação e distribuição das fibras dentro do concreto;
- d) relação de aspecto ou fator forma (LF/DF) das fibras;
- e) resistência da matriz de concreto e tensão de aderência entre as fibras e a matriz;
- f) relação entre dimensão máxima do agregado e comprimento da fibra.

Segundo Naaman (2003), para obter o melhor desempenho e mais eficiência de matriz de concreto reforçada com fibras, o coeficiente de Poisson e o coeficiente de expansão térmica devem ser da mesma ordem de grandeza e as fibras devem ter as propriedades apresentadas na figura 1.

Figura 1: Fibras adequadas em relação às propriedades de matriz de concreto



Fonte: Naaman (2003)

- A resistência à tração deve ser maior que a do concreto (duas a quatro ordens de grandeza);
- A força de aderência à matriz de concreto (τ) deve ser, de preferência, igual ou maior do que a resistência à tração da matriz;
- O menor auto esforço é usado no compósito através de reforço de fibra, sendo o módulo de elasticidade da fibra maior do que a matriz de concreto, pelo menos três ordens de grandeza.

2.2 A FASE MATRIZ

O concreto de cimento Portland já é, por si só, um compósito formado por três fases principais: a pasta de cimento, os agregados miúdos e os graúdos. Tem inúmeras vantagens como a capacidade de produzir estruturas com infinitas variações de forma. Também é capaz de apresentar uma grande variação de suas propriedades em função do tipo de componentes principais e de suas proporções, bem como de utilização ou não de uma grande variedade de aditivos e adições.

No entanto, o concreto apresenta algumas limitações como o comportamento de ruptura frágil e pequena capacidade de deformação quando comparado com outros materiais estruturais como o aço (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Além disso, o concreto

apresenta resistência à tração bem inferior à resistência à compressão cuja relação está, geralmente, em torno de 0,07 e 0,11. Este comportamento está associado às fissuras que se formam ou já estão presentes no concreto que prejudicam muito mais o material quando solicitado à tração do que à compressão.

Pode-se associar a reduzida capacidade de resistência à tração à muito maior dificuldade do concreto interromper a propagação das fissuras quando é submetido a este tipo de tensão. Logo, a ruptura na tração é causada por algumas fissuras que se unem e não por numerosas fissuras, como ocorre quando o concreto é comprimido (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Arif (2014), cita as principais funções da matriz do concreto no compósito:

- dar a forma ao compósito;
- proteger o reforço do ambiente;
- transferir cargas para o reforço;
- contribuir para melhorias das propriedades que dependem tanto da matriz quanto do reforço, tais como absorção da energia do concreto.

As propriedades físicas da matriz, apresentadas na tabela 1, e a relação água/cimento influenciam a resistência de ligação no compósito (HANNANT, 1978). A eficácia da fibra é muito dependente da resistência da matriz (FIGUEIREDO, 2011).

Tabela 1: Propriedades típicas da matriz cimentícia

Matriz	Densidade (Kg/m ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação na ruptura $\times 10^{-6}$
Pasta de cimento Portland comum	2000 - 2200	10 - 25	3 - 6	100 - 500
Pasta de cimento de alta alumina	2100 - 2300	10 - 25	3 - 7	100 - 500
Argamassa de cimento Portland Comum	2200 - 2300	25 - 35	2 - 4	50 - 150
Concreto de cimento Portland comum	2300 - 2450	30 - 40	1 - 4	50 - 150

Fonte: Hannant (1978)

Assim como a zona de transição formada na periferia dos agregados graúdos, a microestrutura da zona de transição da interface das fibras é muito mais porosa e sua resistência depende do volume e tamanho dos vazios existentes. Essa microestrutura especial da zona de transição na vizinhança das fibras tem duas consequências: redução global na ligação entre a fibra e a matriz e localização da parte mais fraca da ligação na camada porosa da zona de transição, um pouco afastada da superfície da fibra (BENTUR; MINDESS, 2007).

2.3 FASE FIBRA

O CRF é um compósito, onde as fibras têm um papel essencial. As fibras são elementos descontínuos, cujo comprimento é bem maior que a maior dimensão da seção transversal. As fibras utilizadas em compósitos cimentícios podem ser classificadas em: macrofibras quando o comprimento da fibra excede duas vezes o tamanho máximo do agregado graúdo e seu diâmetro é muito maior que o diâmetro dos grãos de cimento; e microfibras quando o diâmetro da fibra é o mesmo dos grãos de cimento e seu comprimento é menor que o tamanho máximo do agregado.

Segundo Figueiredo (2011), as macrofibras são destinadas ao reforço do concreto e podem ser de aço ou poliméricas. O emprego das microfibras, poliméricas no geral, não enfoca o reforço do concreto, uma das suas aplicações é na proteção do concreto contra incêndio e na redução da fissuração, especialmente as oriundas de retração (TAMAKI, 2011).

As fibras ainda podem ser classificadas de outras formas. Segundo Naaman (2003), a classificação pode ser baseada no material da fibra (natural orgânica, natural mineral e sintética), nas propriedades químicas e físicas (densidade, rugosidade superficial, estabilidade química, reatividade com a matriz e resistência ao fogo) e nas propriedades mecânicas (resistência à tração, módulo de elasticidade, rigidez e ductilidade).

A escolha do tipo de fibra a ser utilizada na matriz do concreto pode ser feita, conforme as suas propriedades mecânicas, por exemplo, resistência à tração e módulo de elasticidade. Alguns exemplos de fibras utilizadas como reforço no concreto estão listados na tabela 2.

Tabela 2: Características físicas de algumas fibras sem compósitos reforçados

Tipo de Fibra	Diâmetro (μm)	Peso específico (g/cm³)	Modulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à Tração (GPa)	Alongamento na ruptura (%)
Aço	5 - 500	7,84	200	0,50 - 2,00	0,50 - 3,50
Vidro	5 - 500	2,60	70 - 80	2 - 4	2 - 3,50
Polipropileno	20 - 200	0,90	5 - 77	0,50 - 0,75	8
Aramida (Kevlar)	10	1,45	65 - 133	3,60	2,10 - 4
Carbono	9	1,90	230	2,60	1
Polietileno	--	0,95	0,30	$0,70 \times 10^{-3}$	10
Sisal	10 - 50	1,50	--	0,80	3
<hr/>					
Matriz de cimento (para efeito de comparação)					

Fonte: Bentur; Mindess (1990)

Para Strong (2008), a fibra na matriz de concreto atua como reforço, pois, de maneira geral, ela é capaz de:

- Dar resistência, rigidez e tenacidade para o compósito;
- Dominar outras propriedades como o coeficiente de expansão térmica e condutividade.

2.3.1 Fibras de aço

Segundo Bentur e Mindess (1990), o emprego da fibra de aço no reforço do concreto já confirmou-se como uma tecnologia eficiente, promovendo restrição à propagação de fissuras ocorridas por retração e esforços solicitantes na estrutura, como cargas atuantes excessivas, concentração de esforços, recalques diferenciais e variações de temperatura. Pelo fato do módulo de elasticidade da fibra de aço apresentar-se superior ao módulo de elasticidade da matriz de concreto, possuindo também alta resistência mecânica, o

concreto reforçado com fibra de aço possui certa capacidade resistente após sua fissuração, descaracterizando o comportamento inerente a um material cerâmico, quando tracionado.

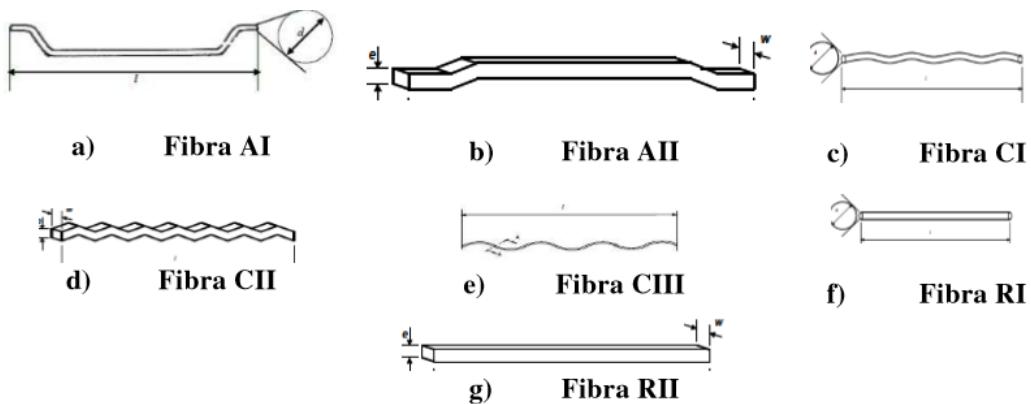
Por se mostrarem mais eficazes, econômicas e de fácil mistura à matriz, as fibras de aço são as mais utilizadas em reforços de concreto e podem ser obtidas por meio de diferentes processos de fabricação e vários tipos de seção transversal (JOHNSTON, 2001). As fibras de seção circular são produzidas a partir do corte de arames e as de seção transversal retangular, por corte de chapas de aço (VILLARES, 2001).

O uso das fibras de aço no compósito estrutural é permitido apenas para resistir ao cisalhamento em membros de flexão. Não há dados disponíveis sobre o potencial de problemas de corrosão, devido à ação galvânica, por isso, não é recomendado utilizar as fibras de aço em membros estruturais reforçados com barras de aço inoxidáveis ou barras de aço galvanizado (ACI, 2011).

O desempenho do CRFA é influenciado pelo tipo de fibra de aço. Segundo Naaman (2003), para desenvolver uma melhor aderência entre as fibras e a matriz e consequentemente alterar o desempenho do compósito, as fibras podem ser modificadas ao longo do seu comprimento. Essa alteração pode ser uma alteração da rugosidade da superfície da fibra ou a indução de deformações mecânicas.

Basicamente, segundo a ABNT NBR 15530: 2007, norma brasileira que dita às especificações e recomendações sobre o controle de qualidade das fibras de aço, existem três tipos e três classes de fibras. Os tipos, A, C e R, são determinados em função da conformação da fibra e as três classes, I, II e III são divididas de acordo com o processo de produção. Cada fibra de aço tem uma denominação baseada no seu tipo e classe. Sendo a letra o tipo da fibra e o numeral romano a classe ao qual ela pertence, conforme a figura 2.

Figura 2: Caracterização da fibra de aço com base na origem e conformação, segundo a ABNT NBR 15530:2007



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15530:2007

As fibras do tipo A, C e R são, respectivamente, fibras com ancoragem na extremidade, fibra corrugada e fibra reta. As classes I, II e III compõem respectivamente, fibras oriundas de arame trefilado frio, chapa laminada cortada a frio e arame trefilado e escarificado.

As características pertencentes a cada tipo e classe de fibra podem ser visualizadas na tabela 3.

Tabela 3: Características dos tipos e classes de fibras, de acordo com a ABNT NBR 15530:2007

Tipo	Classe	Fator de forma	Limite de resistência à tração do aço
		λ mínimo	f_u (MPa)
A	I	40	1000
	II	30	500
B	I	40	800
	II	30	500
	III	30	800
R	I	40	1000
	II	30	500

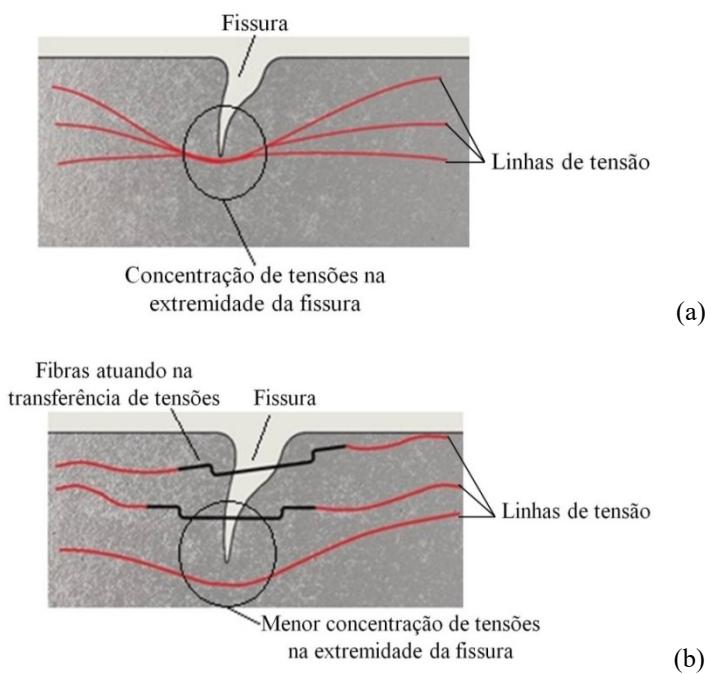
Fonte: Adaptada da ABNT NBR 15530:2007

2.4 INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ

No concreto simples, representado na Figura 3a, uma fissura irá proporcionar uma barreira à propagação de tensões de tração, representadas simplificadamente pelas linhas de tensão. Esse desvio das linhas de tensão irá implicar numa concentração de tensões nas extremidades da fissura e, no caso de essa tensão superar o valor da tensão crítica, ocorrerá a ruptura abrupta do material. Caso o esforço seja cíclico, pode-se interpretar a ruptura por fadiga da mesma forma. Assim, para cada ciclo há uma pequena propagação das microfissuras e, consequentemente, um aumento progressivo na concentração de tensões em sua extremidade até que ocorra a ruptura completa do material.

A partir do momento em que a fissura atinge um comprimento crítico, ocorre a ruptura abrupta do material, caracterizando um comportamento tipicamente frágil. Assim, não se pode contar com nenhuma capacidade resistente residual à tração do concreto fissurado. Quando se adicionam fibras de resistência e módulo de elasticidade adequados e num teor apropriado, o concreto deixa de ter o caráter marcadamente frágil. Isso ocorre pelo fato de a fibra servir como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, cuja concentração de tensões nas extremidades será então minimizada, conforme o ilustrado na figura 3.

Figura 3: Esquema de concentração de tensões para um concreto sem (a) e com reforço de fibras (b)



Fonte: Pereira (2017)

Com isso, tem-se uma grande redução da velocidade de propagação das fissuras no compósito que passa a ter um comportamento pseudo-dúctil ou não frágil. Em outras palavras, apresenta certa capacidade resistente após a fissuração. Assim, com a utilização de fibras, poderá ser obtida uma menor fissuração do concreto. Este fato pode vir a recomendar sua utilização mesmo para concretos convencionalmente armados, como uma armadura complementar para reduzir a fissuração do material (MINDESS, 1995). Já é conhecimento clássico o fato de que, com a utilização de fibras, será assegurada uma menor fissuração do concreto (LI, 1992).

Uma das características do reforço proporcionado pelas fibras é o fato de estas se distribuírem aleatoriamente no material, reforçando toda a peça e não uma determinada posição, como ocorre com as armaduras convencionais. Isto pode ser muito interessante para o caso de estruturas contínuas, como é o caso dos pavimentos, onde as tensões de tração variam de posição na peça ao longo de um dia. Isto ocorre devido às variações de temperatura ambiente, aquecendo a superfície superior ao longo do dia e resfriando-a durante a noite. Dada a inércia térmica do concreto, isto é capaz de gerar tensões de tração nas duas faces do pavimento (SEVERI, 2002).

No entanto, se a peça estrutural tem esforços bem localizados, como é o caso de uma laje suspensa apoiada em vigas, por exemplo, onde as tensões de tração concentram-se na parte inferior, o uso das fibras pode ser considerado inviável, pois não conseguem substituir as barras de aço de maneira econômica. Isto ocorre porque as barras de aço podem ser posicionadas de forma precisa para otimizar o reforço da estrutura. Em outras situações, como é o caso dos tubos de concreto, pode haver a situação em que a melhor condição de reforço é conseguida com o uso combinado de fibras e armadura convencional (FIGUEREDO, 2011).

As características mecânicas de um CRF dependem do modo segundo o qual uma carga aplicada é transmitida para as fibras pela fase matriz (ASLANI; NEJADI, 2012; CALLISTER; RETHWISCH, 2012). A interação fibra-matriz é responsável por governar esse processo de transferência de tensões num volume relativamente pequeno da matriz em torno da fibra (ARAUZ, 2002; BENTUR; MINDESS, 2007).

A interação fibra-matriz é influenciada pelo fator de forma ou de aspecto das fibras (relação entre o comprimento da fibra e seu diâmetro), ancoragem das fibras na matriz, resistência à tração das fibras, resistência da ligação entre as fibras e a matriz, teor de

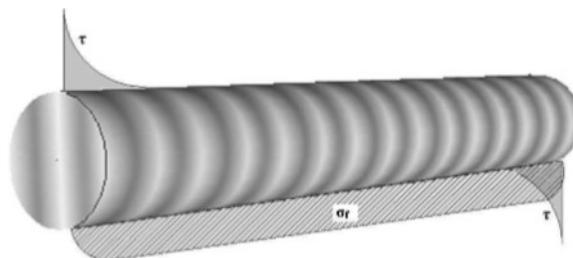
fibras incorporado e o comprimento da fibra embebido na matriz de concreto quando a matriz se encontra fissurada (ARAUZ, 2002; FIGUEIREDO, 2011; ASLANI; NEJADI, 2012).

O entendimento dos mecanismos responsáveis por transferir as tensões entre a matriz e as fibras fornece a base para prever o comportamento da curva - do CRF e consequentemente seu modo de fratura, dúctil ou frágil. No caso de compósitos com matrizes frágeis como o concreto, esses mecanismos de transferência de tensões devem ser considerados de maneira distinta para os estágios pré-fissuração e pós-fissuração.

Na matriz não fissurada, a transferência de tensão elástica é o mecanismo dominante. A tensão desenvolvida na interface é uma tensão de cisalhamento paralela ao eixo longitudinal do reforço que distribui o carregamento externo entre as fibras e matriz (BENTUR; MINDESS, 2007).

Na figura 4 é possível visualizar as tensões de cisalhamento (τ) por aderência elástica desenvolvidas de maneira não uniforme na interface entre a fibra e a matriz e a distribuição da tensão de tração na fibra (σ_f).

Figura 4: Descrição esquemática de uma fibra embebida numa matriz



Fonte: Vitor (2017)

A σ_f aumenta a partir da extremidade da fibra alcançando um máximo no centro e a τ tem um valor máximo nas extremidades da fibra e cai para zero no centro, local da interface onde a tensão é transferida da matriz para a fibra.

Na fase pré-fissuração, a transição de transferência de tensão elástica para transferência por atrito ocorre por processo gradual durante o qual ambos os mecanismos de transferência de tensão atuam (BENTUR; MINDESS, 2007). O início desta transição ocorre quando as tensões interfaciais de cisalhamento devido a uma carga excedem a resistência ao cisalhamento da interface fibra-matriz, em seguida é iniciado o

descolamento da interface e as tensões de atrito começam a agir na interface da zona descolada.

No estágio pós-fissuração, os mecanismos de transferência de tensão são os mesmos descritos para a matriz não fissurada sendo constituídos por uma parcela elástica e outra parcela de atrito. A principal diferença é que na matriz fissurada as fibras que cruzam as superfícies das fissuras são tracionadas para fora da matriz e a máxima ocorre no ponto onde a fibra entra na matriz (BARTOS, 1981, BENTUR; MINDESS, 2007).

Em materiais compósitos como o concreto com matrizes de baixa resistência à tração, a fissuração da matriz pode preceder o descolamento. Neste caso, o descolamento da fibra, resultado de uma fissura em avanço e a fibra colocado no seu caminho assume uma natureza diferente (BENTUR; MINDESS, 2006).

CAPÍTULO 3

3. TENACIDADE DO CONCRETO

A definição da tenacidade pode gerar dúvidas. Alguns livros didáticos a definem como a área total sob a curva tensão por deformação específica (POLAKOWSKI e RIPLING, 1966), o que forneceria a energia absorvida por unidade de volume. Isto só seria aplicável experimentalmente para o ensaio de tração direta do aço, por exemplo, onde a deformação medida ocorre na mesma direção da tensão principal, sendo esta facilmente determinada. No caso dos concretos reforçados com fibras de aço é muito difícil realizar a determinação da tensão após a fissuração da matriz.

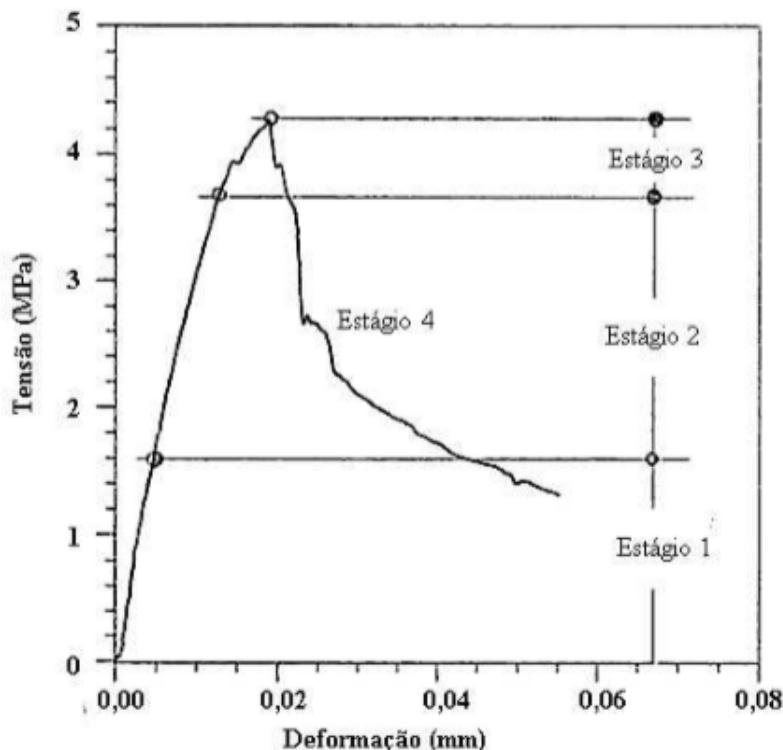
Para os compósitos, a definição mais aceita atualmente a interpreta como a área sob a curva carga por deflexão (ACI, 1988; BENTUR e MINDESS, 1990; BALAGURU e SHAH, 1992), que representa o trabalho dissipado no material até um certo nível de deflexão. Tal valor é o utilizado na avaliação dos compósitos e possui a desvantagem básica de depender das dimensões do corpo-deprova, bem como do sistema de aplicação dos esforços.

3.1. TENACIDADE NO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

O concreto é um material frágil, ou seja, rompe-se com pequenas deformações. A adição de fibras de aço ao concreto altera seu comportamento mecânico melhorando a sua capacidade de absorção de energia, ou seja, sua tenacidade. Para Figueiredo (2011), a tenacidade do CRF é a energia absorvida pelo compósito quando carregado, abrangendo a energia absorvida antes e após a fissuração da matriz, quando as fibras passam a atuar de maneira mais efetiva.

A ruptura das estruturas do concreto é usualmente causada pela propagação de fissuras de tração. Baseada nesta propagação de fissuras, a curva - (tensão-deformação) do concreto simples pode ser dividida em quatro estágios conforme figura 5.

Figura 5:Estágios de fissuração do concreto reforçado com fibras



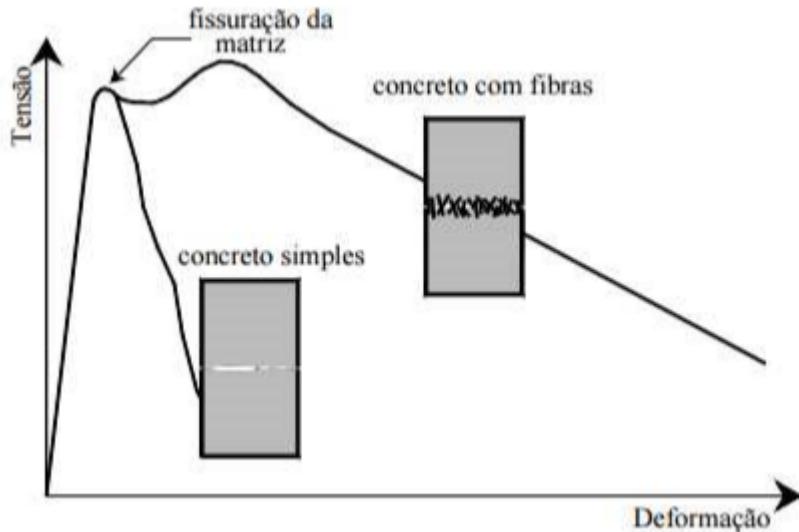
Fonte: Naaman e Reinhardt (1995)

De acordo com Naaman e Reinhardt (1995), até 30 % da tensão de pico o concreto é considerado teoricamente não fissurado correspondendo ao Estágio 1 de fissuração. No Estágio 2, cerca de 80 % da carga de ruptura, a resistência da matriz é alcançada e são desenvolvidas microfissuras internas que se propagam. Neste segundo estágio, as microfissuras são isoladas e distribuídas aleatoriamente no elemento de concreto.

No Estágio 3, as fissuras internas começam a se localizar em uma grande fissura que se propaga com o aumento da carga. O comprimento desta grande fissura na carga de pico é referido como comprimento crítico de fissura. O quarto estágio ocorre após a tensão de pico, onde uma grande fissura se propaga de maneira frágil, ou seja, mesmo que não exista aumento da tensão.

A adição de fibras de aço ao concreto não influencia o comportamento do compósito no Estágio 1 uma vez que teoricamente a matriz não se encontra fissurada. Neste estágio inicial, tanto o concreto simples como o CRFA tendem a responder quase que linearmente até o primeiro ponto de fratura (figura 6).

Figura 6: Comportamento de matrizes cimentícias sem a adição de fibras e com adição de fibras de aço



Fonte: Ferrari (2007)

Conforme é visto na Figura 6, após a fissuração da matriz, a capacidade de carga do concreto não reforçado diminui rapidamente e o CRFA apresenta uma tenacidade considerável. A presença das fibras retarda a abertura das fissuras até que haja o arrancamento ou a ruptura da fibra que a intercepta.

Segundo Naanam (2003), a típica resposta tensão-longamento do CRFA indica duas propriedades de interesse, a tensão de fissuração (σ_{cc}) e a tensão máxima pós-fissuração (σ_{pc}). A resistência à fissuração do compósito é primariamente influenciada pela resistência da matriz enquanto a resistência pós-fissuração depende dos parâmetros de reforço proporcionados pelas fibras. Na grande maioria dos CRFA, a σ_{pc} é menor que a σ_{cc} e a ruptura se desenvolve por meio da abertura de uma única macrofissura com consequente redução da tenacidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Esta classe de compósito apresenta comportamento *strain-softening* à tração ou *deflection softening* na flexão (NAAMAN, 2003, BENTUR; MINDESS, 2007). Quando a resistência pós-fissuração é maior que a resistência à primeira fissura, ocorre um endurecimento à

tração causado pela formação de múltiplas fissuras e aumento da tenacidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014). CRFA com este tipo de comportamento *strain-hardening* à tração, ou *deflectin-hardening* à flexão também são chamados de HPFRCC, High Performance *Fiber Reinforced Cement Composites* (NAAMAN, 2003).

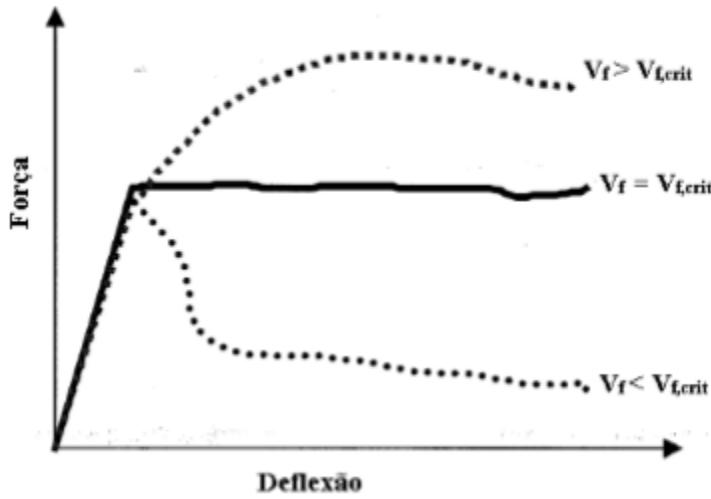
Quando σ_{pc} é maior que a σ_{cc} , é identificado um segundo estágio de comportamento (II) onde microfissuras são desenvolvidas. Nas situações onde σ_{cc} é maior que a σ_{pc} , o segundo estágio de fissuração desaparece e a resposta tensão-deformação do compósito fica reduzida ao estágio I e III.

Esse processo de formação de múltiplas fissuras continua até que o carregamento alcance a resistência ao arrancamento das fibras que costuram a fissura crítica. Neste ponto se inicia o Estágio III. Em alguns casos, o arrancamento da fibra pode ser precedido pela sua ruptura, sendo este mecanismo de colapso menos desejável devido à sua natureza frágil (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Independente do mecanismo, o trabalho necessário para realizá-lo causa um aumento da tenacidade do compósito.

Recentemente, a prática recomendada Projeto de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibras do comitê IBRACON/ABECE (2016) caracterizou o comportamento *strain-softening* como um abrandamento do CRFA e o comportamento *strain-hardening* como um enrijecimento do CRFA.

O princípio básico para a obtenção de um comportamento do CRFA *strain-hardening* à tração, ou *deflectin-hardening* à flexão é a concepção de um compósito onde o teor de fibras excede o $V_{f,crit}$ (NAAMAN, 2003; BENTUR; MINDESS, 2007).

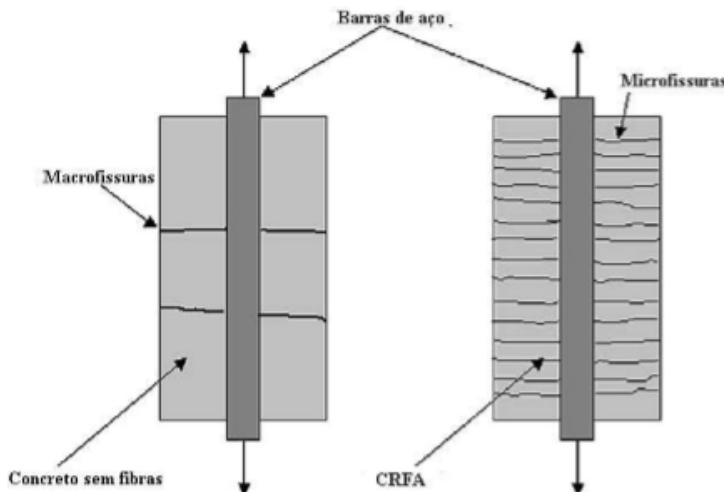
Concretos dosados com V_f inferiores ao $V_{f,crit}$ apresentam uma redução da resistência após a fissuração da matriz apresentando o comportamento *deflectin-softening*. Ao contrário, concretos dosados com V_f superiores ao $V_{f,crit}$ continuam aceitando níveis de carregamentos crescentes após a fissuração da matriz apresentando o comportamento *deflectin-hardening* (figura 7).

Figura 7: CRFA com teores abaixos, acima e igual ao $V_f, crit$ durante o ensaio de tração na flexão

Fonte: Figueiredo (2000)

Na figura 8, é visto a faixa de microfissuração do CRFA com comportamento *strain-hardening*. Observa-se que macrofissuras são substituídas por um denso sistema de microfissuras favoráveis tanto para a segurança como para a durabilidade (BRANDT, 2008).

Figura 8: Padrão de fissuração no concreto armado e no CRFA submetidos à tração



Fonte: Adaptado de Brandt (2008)

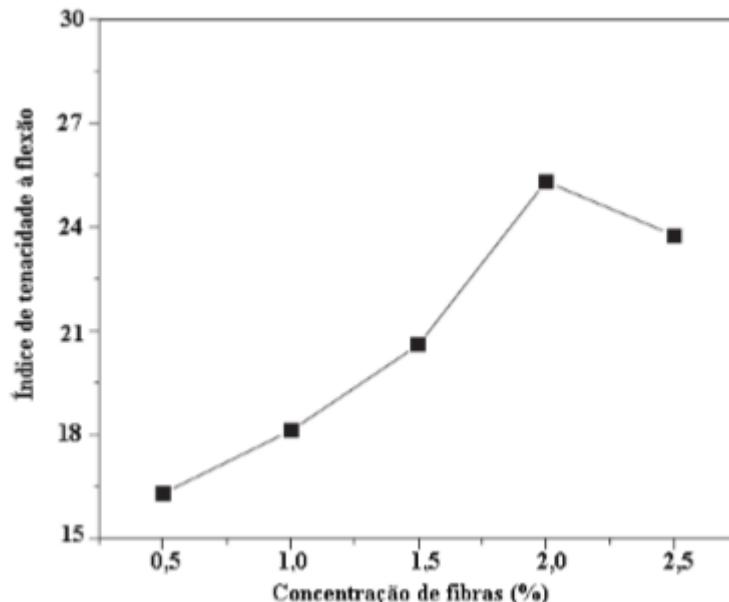
A rede de microfissuração caracteriza a maior capacidade de deformação e maior tenacidade do CRFA com consequente ruptura menos frágil. Além disso, a formação de múltiplas microfissuras é melhor do ponto de vista da durabilidade, já que a abertura de fissura afeta fortemente a permeabilidade do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A magnitude da melhoria da tenacidade é influenciada pela concentração, tipo, geometria e orientação das fibras, pela aderência fibra-matriz e pelas características da matriz (FIGUEIREDO, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Song e Hwang (2004) observaram aumento da tenacidade à flexão com a elevação do V_f em 15 amostras prismáticas. Neste estudo foram utilizadas fibras de aço com fator de aspecto de 64 em dosagens entre 40 kg/m^3 e 157 kg/m^3 de concreto. Observação similar foi obtida por Koksal *et al.* (2008) em estudo da análise do efeito combinado da adição de fibras de aço e sílica nas propriedades do concreto de alta resistência. Köksal *et al.* (2008) ensaiou 40 amostras prismáticas de concretos reforçados com dois níveis de fibras de aço, 40 kg/m^3 e $78,5 \text{ kg/m}^3$ de concreto.

Na figura 9 é observado o aumento da tenacidade à flexão com a elevação da concentração de fibras do estudo de Zhang *et al.* (2014), cujo objetivo foi avaliar a tenacidade de concretos de alto desempenho reforçados com fibras de aço.

Figura 9: Resultados de tenacidade à flexão do CRF, em diferentes teores de fibras, da pesquisa de Zhang *et al.* (2014)



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2014)

Na Figura 9 a tenacidade é caracterizada como índice de tenacidade à flexão conforme orientação do método ASTM C1018 atualmente substituído pelo ensaio ASTM C1609.

Conforme é visto, valores de V_f entre 2 % e 2,5 % por volume de concreto (157 kg/m^3 e 196 kg/m^3) apresentaram queda da tenacidade à flexão. Segundo Zhang et al. (2014), estas regras de variação de tenacidade à flexão indicam que a contribuição das fibras de aço para a tenacidade à flexão do concreto ocorre somente quando o V_f não ultrapassa 2%. Mesmo para baixas frações volumétricas de fibras, se observam aumentos bastante significativos na tenacidade do concreto, tanto à flexão quanto à compressão (OLIVEIRA JUNIOR, 2012).

Um determinado tipo de fibra pode ser apenas eficaz em uma gama limitada de abertura de fissuras. Para explorar o benefício de cada fibra para melhora da tenacidade foram desenvolvidos compósitos produzidos com a associação de fibras com diferentes características. Este tipo de reforço é denominado híbrido.

A fim de analisar o efeito da mistura de fibras de aço com diferentes fatores de aspecto, Bhargava, Sharma e Kaushik (2006) misturaram fibras longas (comprimento de 50 mm e fator de aspecto de 40) e curtas (comprimento de 25 mm e fator de aspecto de 20) em diferentes proporções e com mesmo volume total. Foi possível observar um aumento relativo da tensão de pico acompanhado de uma redução da tenacidade pós-pico quando o volume total de fibras curtas na mistura foi aumentando. Ao contrário, o aumento de fibras longas foi acompanhado por uma elevação relativa da tenacidade pós-pico e uma redução da tensão de pico.

A tenacidade pode ser estimada pela área sob a curva - ou força-deslocamento (ACI 544.4R, 2009; MEHTA; MONTEIRO, 2014) produzida pelo ensaio de tração uniaxial direta ou ensaios de flexão. Essa área representa o trabalho dissipado no material. O comportamento força-deslocamento na flexão assemelha-se ao observado na tração e possui a desvantagem básica de depender das dimensões dos corpos-de-prova utilizados, bem como do sistema de aplicação dos esforços (Figueiredo, 2011).

Devido às dificuldades de realização dos ensaios de tração uniaxial, ensaios à flexão de elementos prismáticos de concreto são mais utilizados para a determinação da tenacidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Acréscimos na tenacidade também podem ser obtidos por meio do proporcionamento adequado de agregados, da relação água/cimento e de outras adições uma vez que as características das fibras não são as únicas responsáveis pelo melhor desempenho dos compósitos. Desta forma é necessário considerar as características da matriz na

metodologia de dosagem tanto no que se refere à sua trabalhabilidade como quanto à sua resistência mecânica (FIGUEIREDO, 2011).

3.2 FATORES OU CONDIÇÕES INTERVENIENTES NA TENACIDADE DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

Os fatores ou condições que influenciam a medida da tenacidade do concreto reforçado com fibras podem ser classificados em intrínsecos (tamanho e geometria do corpo de prova, resistência das fibras, resistência da matriz, teor e espaçamento das fibras, produção dos corpos de prova (moldagem ou serragem) e temperatura durante o ensaio) e extrínsecos (tipo da máquina de ensaio (*open loop* ou *closed loop*), configuração de teste, taxa de carregamento, configuração de carga (concentrada ou linear), tipo de controle de carga (força, deflexão, abertura de fissura), tipo de equipamento de medição (LVDT, *Clip Gage*) e localização de dispositivo de medição da deflexão).

3.2.1 Tipo de máquina de ensaio

Uma das principais atenções na medição de tenacidade à flexão do CRF é a aplicação de controle de *feedback* (um sensor instalado no corpo de prova). Os testes podem ser executados em um arranjo de circuito aberto ou em um arranjo de circuito fechado. Num sistema em circuito fechado, existe *feedback* para controlar a máquina que manipula e ajusta as suas entradas com base num critério previamente determinado. Por outro lado, num sistema em circuito aberto, o circuito de *feedback* não existe e o teste não pode ser executado com um modelo de resposta desejada (ISLAM, 2012). A resposta indesejada está envolvida na região pós-fissuração, imediatamente após a ruptura da matriz, até que as fibras comecem trabalhar por ancoragem e por aderência.

Para ensaio de tenacidade à flexão nos corpos de prova prismáticos, as variáveis de entrada dependem do tamanho e da geometria do corpo de prova e da velocidade de aplicação de carga, deslocamento ou abertura de fissura. As variáveis de saída podem ser em forma de curva força x deflexão ou de curva força x abertura de fissura. Segundo Villares (2001), a determinação da medida de deflexão de primeira fissura é influenciada pelo tipo de equipamento utilizado para a medida de deflexão, pois as deformações externas da máquina afetam consideravelmente a deflexão de primeira fissura. Além disso, o valor

delas representa aproximadamente 5 a 8 vezes o valor verdadeiro de deflexão de primeira fissura.

Assim, pode-se confirmar que, na região elástica, as deformações externas influenciam na medida de deflexão e, consequentemente, na tenacidade do CRFA. A influência da localização de dispositivos de medição de deflexão de ensaio de tração na flexão está apresentada na tabela 4.

Tabela 4: Medida da deflexão de primeira fissura por métodos diferentes

Método de medida do deslocamento vertical	Deflexão de primeira fissura
Medida com dispositivo "YOKE"	0,024
Medida com LVDT no topo da viga	0,683
Medida do deslocamento fibra superior	1,450

Fonte: Adaptado de Villares (2001).

3.2.2 Tamanho e geometria dos corpos de prova

De acordo com ASTM C1609 (2010) e JSCE (1984), o tamanho e a geometria do corpo de prova podem afetar significativamente o resultado da curva força x deflexão, pois quanto maiores as dimensões da seção transversal do corpo de prova, maior será a energia absorvida (tabela 5).

Tabela 5: Influência do tamanho e da geometria do corpo de prova na medida de tenacidade

Teor de fibra (kg/m ³)	Dimensão do corpo de prova (b x h x L) (mm)	Tenacidade à flexão (kN x mm)
20	150 x 150 x 450	29,15
	300 x 150 x 450	62,62
	450 x 150 x 450	112,8
30	150 x 150 x 450	44,84
	300 x 150 x 450	100,03
	450 x 150 x 450	168,13
40	150 x 150 x 450	60,26
	300 x 150 x 450	135,08
	450 x 150 x 450	226,13

Fonte: Villares (2001)

Conforme Villares (2001), a variação do tamanho e da geometria do corpo de prova modifica o mecanismo da ruptura e altera a distribuição de tensões. A curva força x deflexão é influenciada pela rigidez à flexão e ao cisalhamento do corpo de prova. Quando a relação vão/altura é maior, pode ocorrer torção na viga durante o ensaio da tração na flexão e afetar o resultado de ensaio.

3.2.3 Resistência das fibras

A adição de fibras de alto módulo de elasticidade na matriz de concreto demonstra ser bastante eficaz na redução da fragilidade associada com a ruptura por flexão (BENTUR; MINDESS, 1990). De acordo com a *Fédération Internationale du Béton* (FIB, 2010), a adição das fibras no concreto modifica as suas propriedades mecânicas. As fibras de aço são capazes de limitar a abertura de fissuras, melhorar a ductilidade e a absorção de energia dos membros.

A transferência de tensões para a fibra ocorre de forma brusca quando a matriz possui maior resistência. Então, se as fibras possuem resistência alta, menor é a probabilidade de ocorrer sua ruptura. Devido à maior aderência da fibra em matrizes de maior resistência, maior é a carga resistida por cada fibra durante seu arrancamento (SALVADOR, 2012).

3.2.4 Resistência da matriz

Além da dosagem da fibra e dos parâmetros geométricos de corpo de prova, as características da tenacidade são significativamente influenciadas pelo aumento da resistência de uma matriz que pode suportar um pico de carga maior, o que inadvertidamente leva à maior liberação de energia para a ocorrência do pico de carga (DATTATREYA; HARISH; NEELAMEGAN, 2008).

O concreto de elevada resistência mecânica apresenta menor absorção de energia (FIGUEIREDO, 2000; VILLARES, 2001). A elevada resistência da matriz produz níveis de ruptura muito regulares por não contornarem os agregados, que se apresentam como material frágil.

Quanto maior o módulo de elasticidade da matriz, maior é o volume crítico necessário para proporcionar ao compósito o comportamento de elasto-plástico perfeito (FIGUEIREDO, 2011). A adição de sílica ativa na matriz de concreto de alto desempenho possui zona de transição menos porosa, o que aumenta a aderência entre fibra e matriz, que

leva as fibras a romperem antes de deslizarem, provocando uma queda na tenacidade (VILLARES, 2001).

3.2.5 Teor e espaçamento das fibras

O desempenho mecânico do concreto reforçado com fibras depende de alguns fatores, por exemplo, teor de fibra, dimensões dos agregados e das fibras e geometria dos corpos de prova. O teor de fibra é conhecido como o fator principal quando os outros fatores dentro da mistura são fixados. Quando a dosagem das fibras é maior, a variação do desempenho mecânico do concreto reforçado com fibras por esse fator é menor, pelo fato de que as dosagens elevadas, estatisticamente, permitem mais uniformidade para a mistura e reduz a variação de distribuição de fibras (quando a dosagem é mais elevada mais fibras atravessam a seção) (PARMENTIER; VANDEWALLE; RICKSTAL, 2008).

Bentur e Mindness (1990), explicam que o volume de fibra deve ser menor que 2% do volume do concreto. Hannant (1978) afirma que o número das fibras que atravessam a área da fissura é a razão entre o volume de fibras e a área da seção da fibra. O número de fibras é calculado conforme a sua orientação.

O espaçamento entre as fibras é a distância entre o centro de uma única fibra e o centro da outra. Também pode ser definido pela quantidade de fibras que atravessam a área da fissura em um determinado plano da seção do compósito (HANNANT, 1978). Em um certo volume de fibra no compósito, a diminuição do diâmetro da fibra leva à redução do espaçamento entre as fibras e, em consequência, a resistência à tração e à absorção de energia aumenta (HANNANT, 1978; VILLARES, 2001).

O aumento de volume de fibras no concreto aumenta a resistência à primeira fissura na tração, diminui a propagação de fissuras e aumenta a tenacidade do compósito (BENTUR; MINDESS, 1990; NAAMAN, 2008). Consequentemente, a resistência à tração é proporcional ao inverso da raiz quadrada do espaçamento das fibras.

CAPÍTULO 4

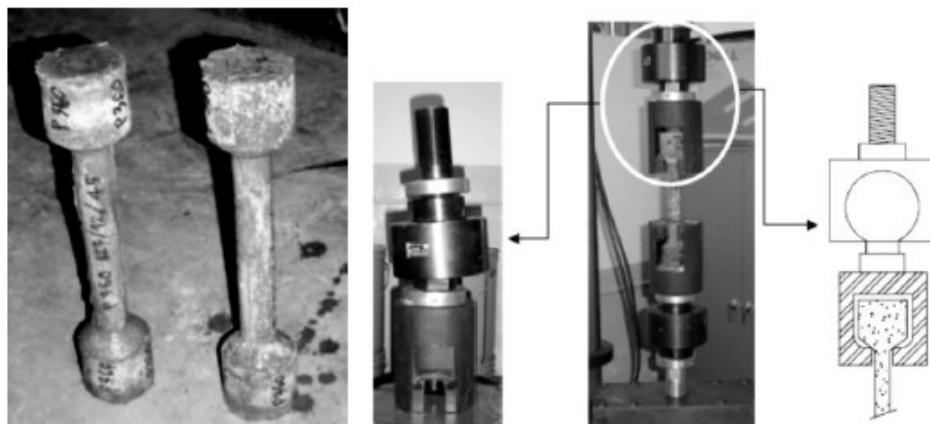
4. MÉTODOS DE ENSAIO PARA AVALIAÇÃO DA TENACIDADE

4.1 ENSAIOS VIA TRAÇÃO DIRETA PARA DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE

Considera-se ensaios de tração direta aqueles na qual a direção de aplicação do carregamento e a do esforço resultante é a mesma, o que proporciona tensões de tração perpendiculares ao plano de ruptura do material. Estes seriam os ideais a serem utilizados para caracterizar qualquer material à tração, uma vez que transmitem unicamente um esforço de tração uniaxial (SORANAKOM *et al*, 2008).

Os corpos de prova mais conhecidos para o teste de tração direta é o formato de “osso para cão” ou haltere, por isso também chamado de *dog-bone* ou *dumbbel* (figura 10). A metodologia do ensaio permite a relação direta entre a tensão e a deformação ou a distribuição da abertura de fissura. (di PRISCO; FERREIRA E LAMPERTI, 2013).

Figura 10: Corpo de prova em formato de "osso para cão" e instrumentação necessária para o ensaio à tração direta



Fonte: SUKONTASUKKUL (2004)

Porém esse procedimento apresenta as desvantagens de:

- a necessidade de se dispor de um sistema fechado e, também de um conjunto de aparatos que tenham exatamente a geometria cônica das extremidades ou um sistema de fixação adequado. Ou seja, nem sempre, pode-se ensaiar em outras geometrias.
- garantia de que a ruptura não ocorra junto à extremidade fixada do corpo de prova, ou ainda de não haver excentricidade na carga aplicada.
- dificuldade na produção e moldagem dos corpos de prova, justamente devido à geometria.
- inviabilização da qualificação do CRF a partir da estrutura caso haja a necessidade de se conhecer as reais propriedades do material *in loco*, pois neste caso é possível que haja elevada orientação das fibras em uma única direção preferencial.

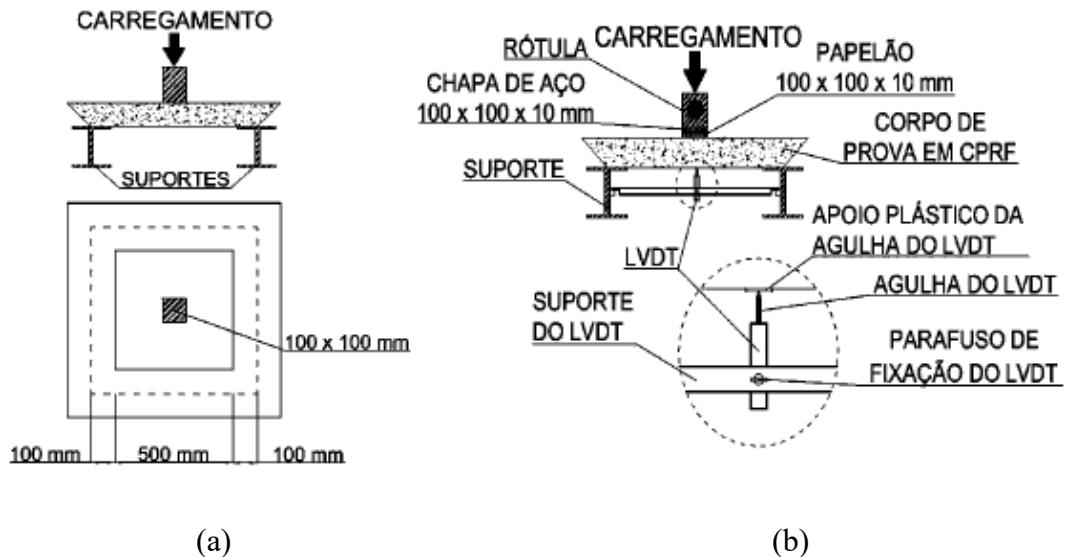
4.2 ENSAIOS VIA TRAÇÃO INDIRETA PARA DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE

Nestes ensaios, embora não se aplique ao corpo de prova um carregamento de tração direta, é possível gerar esse tipo de esforço a partir da disposição do apoio do corpo de prova no ensaio ou por meio de modificações em sua geometria. Ou seja, a direção de aplicação do carregamento não é a mesma que a do esforço resultante no plano da ruptura.

4.2.1 Ensaio de flexão de placas

A EFNARC (1996) preconiza o ensaio de flexão em placas que é utilizado na avaliação de concretos projetados, simulando o uso de tirantes em túneis, o que caracterizaria a punção. No ensaio de flexão em placas, as mesmas possuem as dimensões de 600 x 600 x 100 mm apoiada nos quatro lados ficando um vão de 500 x 500 mm, sendo flexionada por uma carga aplicada no centro da superfície superior em uma região de 100 x 100 mm, conforme figura 11.

Figura 11:Representação do ensaio de punção de placas de acordo com a EFNARC (1996): (a) Esquema do ensaio de punctionamento de placas; (b) Suporte de LVDT no ensaio de punção de placas.



Fonte: EFNARC (1996)

A curva carga x deflexão é medida até uma deflexão de 25 mm e as tenacidades necessárias são dadas como absorção de energia específica até este nível de deflexão. No entanto, alguns fatores negativos podem ser destacados (ALMEIDA, 1999):

- a deformação imposta é de 25 mm, o que causa uma abertura de fissura, que de maneira alguma, representa o real comportamento do material quando aplicado em obras.
- outra restrição é observada por Figueiredo (1997), onde os corpos de prova necessários para os ensaios podem chegar a aproximadamente 100 kg, o que dificulta o manuseio para a execução do ensaio.
- além disso, a forma do corpo de prova fica sujeita ao esforço de projeção (impacto do jato), que passa a apresentar deformações que dificulta muito as condições de apoio e, consequentemente, concentra esforços durante o ensaio.

4.2.2 Ensaios de flexão em vigas

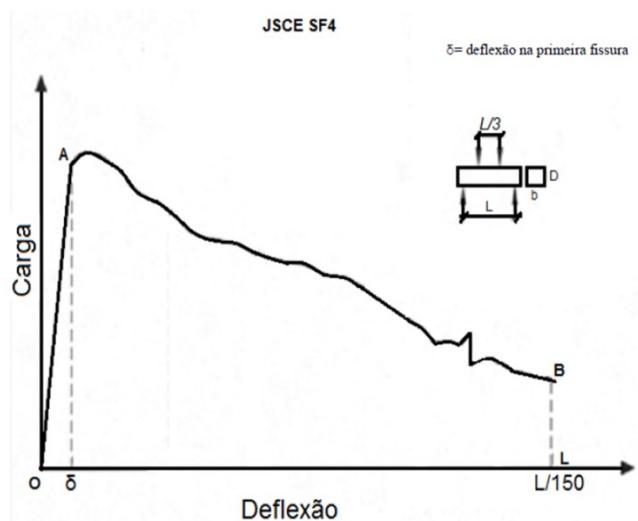
Grande parte dos ensaios que avaliam a capacidade resistente à tração dos CRF utiliza como princípio a flexo-compressão. São, portanto, os ensaios de flexão de prismas os mais utilizados, seja por simular realisticamente muitas situações práticas ou também por ser a

maneira mais simples de se produzir esforços de tração (GOPALARATNAM e GETTU, 1995).

4.2.2.1 Método JSCE-SF4 (1984)

Segundo a Japanese Society of Civil Engineers – Steel Fiber 4 (JSCE-SF4-1984), a tenacidade pode ser definida como a área sob a curva de carga por deslocamento, conforme apresentado na figura 12, 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. 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.

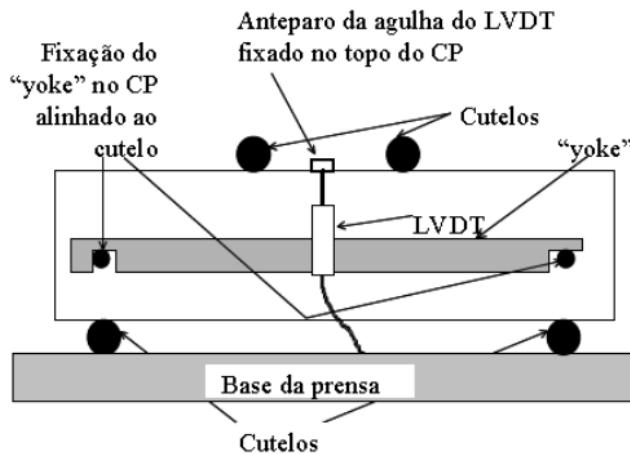
Figura 12:Curva obtida no ensaio descrito pela JSCE-SF4 (1984)



Fonte: Adaptado de PILLAR, 2014

A norma JSCE-SF4 (1984) prescreve que o ensaio 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 13. Além disso, para a realização do experimento, faz-se necessária a utilização de prensas servo controladas e com capacidade de controle de deslocamento.

Figura 13: Posicionamento do corpo de prova, cutelos e LVDT em ensaio de tração na flexão



Fonte: FIGUEIREDO, 2011

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 deflexão . Esse transformador deve estar apoiado no suporte denominado *yoke*, conforme ilustrou a figura 13.

4.2.2.2 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 versus deslocamento obtida no experimento. Entretanto, para a realização desse experimento, faz-se necessário um equipamento dotado 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).

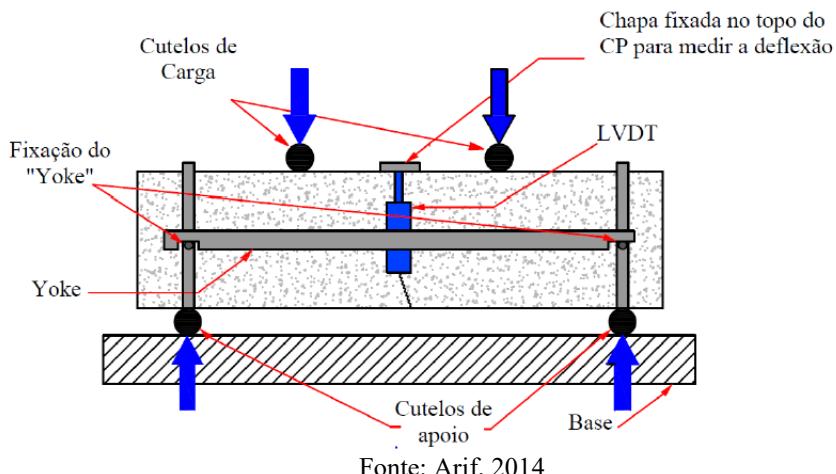
As amostras empregadas no ensaio são prismáticas com dimensões de 100 mm x 100 mm x 350 mm e vão de 300 mm ou com dimensões de 150 mm x 150 mm x 500 mm e vão de 400 mm. Além disso, tem-se que a largura e a altura das amostras utilizadas devem ser

três vezes maiores que o comprimento da fibra empregada (ASTM C1609, 2012). Assim, para amostras com largura e altura de 100 mm, o comprimento da fibra deverá ser no máximo 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 14, sendo que a principal semelhança está na apresentação da curva força *versus* 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 6 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 14: Esquema do ensaio de tenacidade à flexão prescrito pela ASTM C1609 (2012)



Fonte: Arif, 2014

Tabela 6: Velocidade de carregamento do ensaio da ASTM C1609, 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

4.2.2.3 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 15). Dessa forma, o comportamento à tração na flexão por três pontos 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 versus 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, podem-se empregar agregados com dimensão máxima de 32 mm e fibras de até 60 mm.

Figura 15: Esquema de realização do ensaio especificado na EN 14651 (2007)

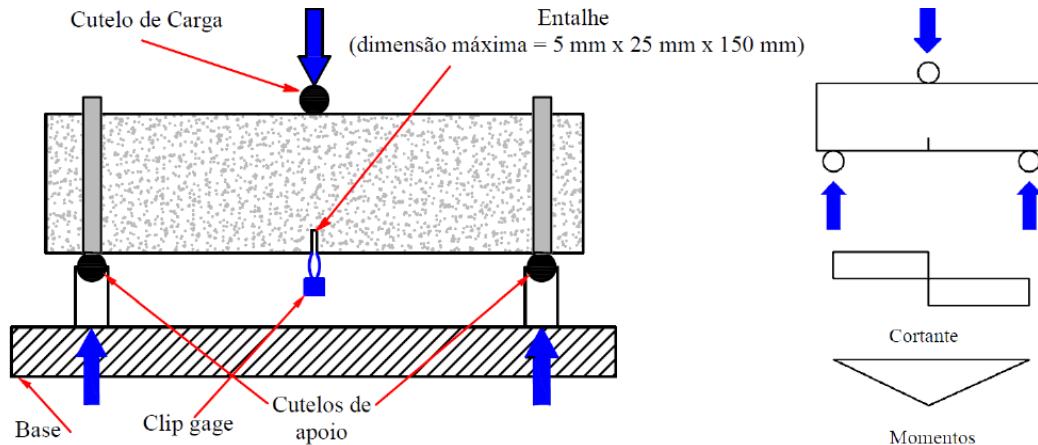


Fonte: SALVADOR, 2013

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 16 apresenta a configuração do ensaio especificado pela norma EN 14651 (2007).

Figura 16: 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 mm, a velocidade deve ser 0,2 mm/min.

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.

4.2.3 Ensaios por punção

4.2.3.1 Método AENOR UNE 83515 (2010) (Barcelona Teste) e Barcelona Simplificado

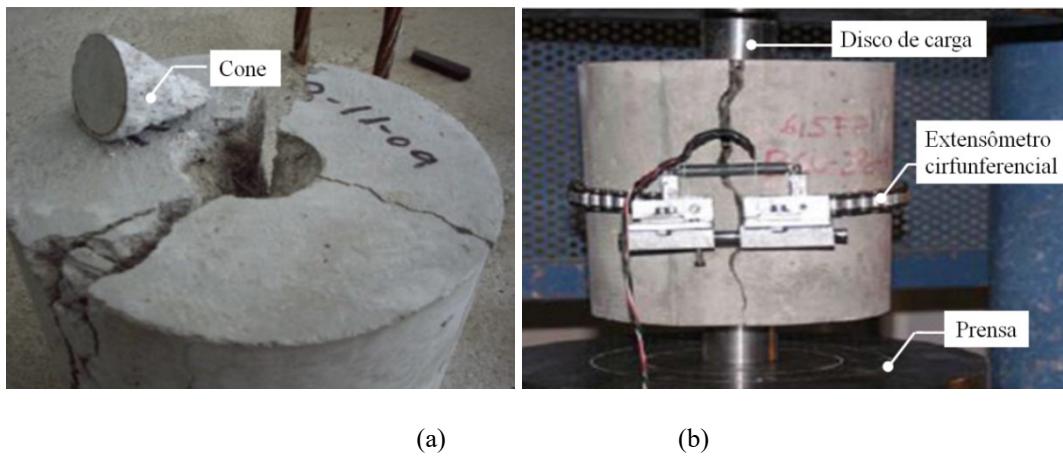
Segundo a AENOR UNE 83515 (2010), no ensaio Barcelona devem ser utilizados corpos de prova cilíndricos com diâmetro igual à altura, em que o diâmetro mínimo é de 150 mm para corpos de prova moldados e 100 mm para corpos de prova extraídos. Além disso, a carga deve ser transferida ao corpo de prova com velocidade de 0,5 mm/min, de modo uniforme, 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 17), uma vez que esse equipamento é pouco frequente em grande parte dos laboratórios e possui elevado custo.

Figura 17: a) Padrão de configuração típico de fissuração do corpo de prova após o ensaio. B) Ensaio Barcelona realizado com o extensômetro circunferencial.



(a) (b)

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. A figura 18 apresenta a configuração de ensaio do Barcelona Simplificado (EBS).

Figura 182: Configuração de ensaio do Barcelona Simplificado, substituindo o extensômetro circunferencial.



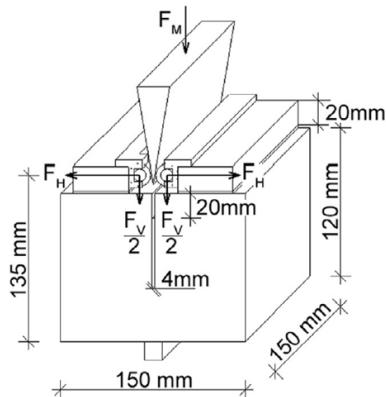
FONTE: TOALDO, MONTE E FIGUEIREDO, 2013

4.2.3.2 Método da Abertura por Encunhamento

O método de ensaio de abertura por encunhamento, método da cunha ou *Wedge Splitting Test* (WST) foi proposto por Linsbauer e Tscheegg (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 x 150 x 140 mm 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 19 (TSCHEGG *et al.*, 2015).

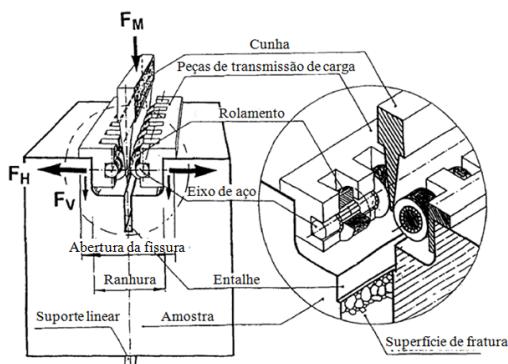
Figura 19: Forma geométrica das amostras e configuração do ensaio de abertura por encunhamento



Fonte: TSCHEGG *et al.*, 2015.

O método de ensaio de abertura por encunhamento 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 (FM) aplicada pela máquina de teste é transmitida por meio das peças de transmissão para a amostra. Dessa forma, ocorre a abertura da amostra por encunhamento, conforme apresentado na figura 20 (TSCHEGG *et al.*, 2015).

Figura 20: Equipamento para ensaio de abertura por encunhamento



Fonte: TSCHEGG; ELSER; STANZL-TSCHEGG, 1995a.

A força vertical de compressão (FM) aplicada pela máquina de teste, medida por meio de célula de carga, é dividida vetorialmente em uma grande força horizontal (FH) (força de divisão) e em uma menor força vertical (FV), por meio de uma cunha esbelta. Os valores obtidos de FH e FV dependem do ângulo da cunha, sendo que quando este ângulo é inferior a 15° não há interferências mensuráveis nessas forças. A velocidade de

deslocamento da máquina de teste deve ser mantida constante em 0,5 mm/min (TSCHEGG et al., 2015).

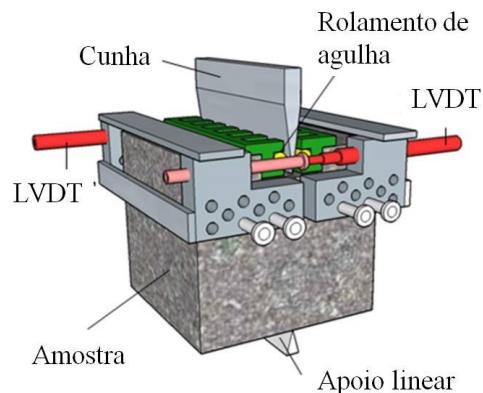
O erro de medição devido ao atrito entre as peças de transmissão e a cunha é minimizado pelos rolamentos que compõem o equipamento de ensaio e, por isso, é insignificante (menor que 1%). Já a força de divisão (F_H) pode ser determinada por meio de um cálculo simples e a força vertical (F_V) é baixa e não perturba o comportamento da fratura (TSCHEGG; 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 01, em que a atrito entre as peças de transmissão e a cunha é desprezado (TSCHEGG et al., 1995b). Na Equação 01 α é o ângulo da cunha.

$$F_H = \frac{F_M}{2 \times \tan \frac{\alpha}{2}} \quad (\text{Equação 01})$$

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 21 (TSCHEGG; ELSER; STANZL-TSCHEGG, 1995a).

Figura 21: Configuração do método da cunha para carga uniaxial



Fonte: PEREIRA, 2017

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:

- a) não são necessários equipamentos de ensaio sofisticados;
- b) o teste é estável;
- c) devido à configuração do ensaio, o deslocamento coincide com a abertura da fissura;
- d) 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;
- e) 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.

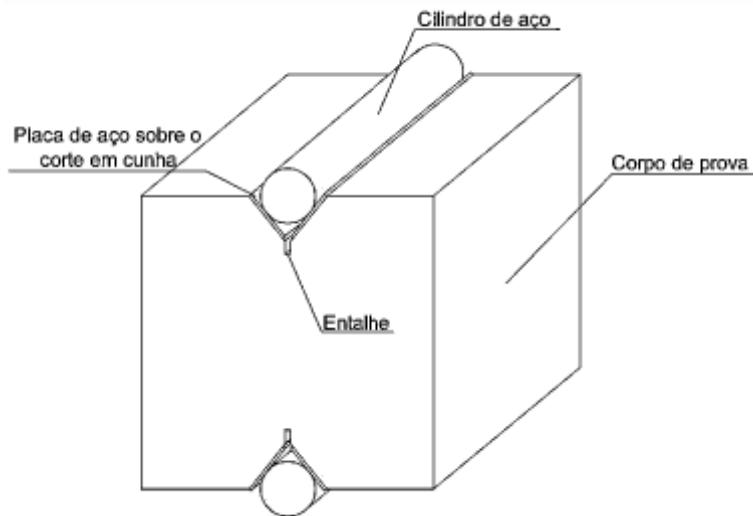
4.2.3.3 Método com Duplo Corte em Cunha (DEWS)

O ensaio de compressão de corpo de prova com duplo corte em cunha, do inglês *Double Edge Wedge Splitting* (DEWS), foi proposto em resultados preliminares por di Prisco, Lamperti e Lapolla (2010), como alternativa aos métodos convencionais de flexão de prismas usados na avaliação de CRF.

A proposta buscava simplificar o aparato necessário para a execução do ensaio, eliminando a cunha e o conjunto de peças para transmissão de carga, típicos do WST. Nessa metodologia, dois cortes duplos em formato de cunha a 45º são executados em faces opostas do corpo de prova e a carga passa a ser transferida ao mesmo por meio de cilindros apoiados sobre a superfície dos cortes. Como alternativa, chapas metálicas ou qualquer tipo de material, podem ser fixadas sobre a superfície dos cortes em cunha com intuito de eliminar a perda de carga por atrito entre a superfície e o cilindro.

Entalhes executados nos vértices da cunha assumem a função de indutores de fissuração. Assim, a energia elástica armazenada no estágio pré-fissuração é reduzida, permitindo a existência de uma fase pós pico estável, pelo menos com as amostras constituídas por concretos reforçados com altos teores de fibra de aço (*di PRISCO; FERREIRA E LAMPERTI, 2013*). A configuração do corpo de prova para esse método é apresentada na figura 22.

Figura 22: Configuração do corpo de prova para ensaio pelo método DEWS



Fonte: BORGES, 2017

O fundamento da geometria proposta ao corpo de prova destinado ao DEWS é gerar na seção transversal deste, uma tensão de tração uniaxial a partir de um carregamento à compressão, cuja resistência medida seja muito próxima a que seria obtida na realização de um ensaio de tração uniaxial direta.

4.3 COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE ENSAIOS

A fim de garantir a qualidade das estruturas produzidas com o concreto reforçado com fibras (CRF), é fundamental a existência de um método de controle de tenacidade confiável, econômico e compatível com modelos de dimensionamento.

Os estudos a seguir apresentam os resultados da comparação entre os valores de tenacidade obtidos por procedimentos distintos.

Borges, *et al* (2013), realizou estudo comparativo entre os ensaios à flexão, como proposto pela JSCE-SF4, e de compressão de corpos de prova com duplo entalhe, do inglês *Double Edge Wedge Splitting* (DEWS).

Fez-se o cálculo da tenacidade para os corpos de prova com teor de fibras de aço de 20 kg/m³, 30 kg/m³ e 45 kg/m³. Os resultados são apresentados nas tabelas 7, 8 e 9.

Tabela 7: Tenacidade para concreto com teor de fibra de 20 kg/m³

Abertura de Fissuras (mm)	TDEWS (N.m)	TJSCE (N.m)	TDEWS/TJSCE (N.m)
0,50	7,34	5,86	1,25
0,75	9,12	7,52	1,21
1,00	10,73	8,75	1,23
1,25	12,26	9,87	1,24
1,50	13,72	10,93	1,26
1,75	15,10	11,85	1,27
2,00	16,38	12,73	1,29

Fonte: Adaptado de Borges *et al*, 2013

Tabela 8: Tenacidade para concreto com teor de fibra de 30 kg/m³

Abertura de Fissuras (mm)	TDEWS (N.m)	TJSCE (N.m)	TDEWS/TJSCE (N.m)
0,50	9,14	4,91	1,86
0,75	11,30	6,40	1,77
1,00	13,60	7,87	1,73
1,25	15,92	9,34	1,70
1,50	18,16	10,79	1,68
1,75	20,31	12,23	1,66
2,00	22,33	13,63	1,64

Fonte: Adaptado de Borges *et al*, 2013

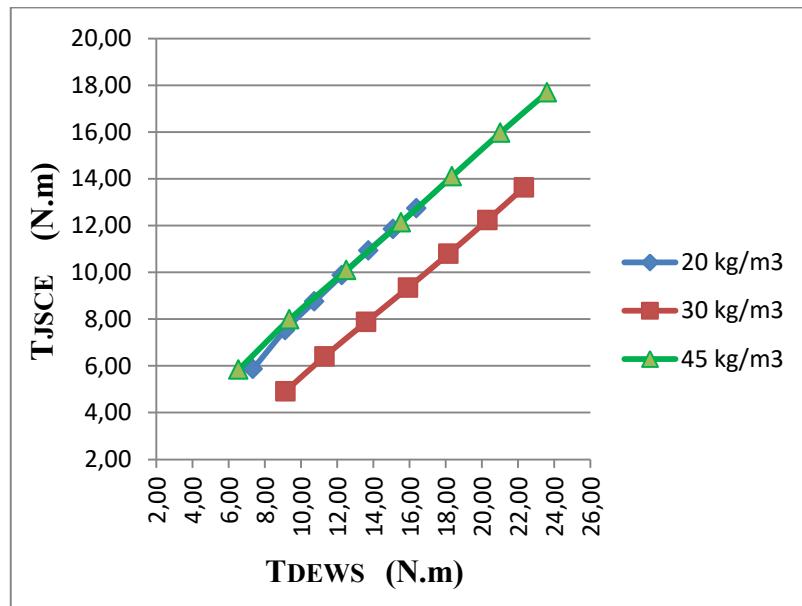
Tabela 9: Tenacidade para concreto com teor de fibra de 45 kg/m³

Abertura de Fissuras (mm)	TDEWS (N.m)	TJSCE (N.m)	TDEWS/TJSCE (N.m)
0,50	6,54	5,83	1,12
0,75	9,36	7,98	1,17
1,00	12,51	10,09	1,24
1,25	15,54	12,13	1,28
1,50	18,35	14,10	1,30
1,75	21,03	15,97	1,32
2,00	23,61	17,69	1,33

Fonte: Adaptado de Borges *et al*, 2013

Segundo Borges *et al* (2013), por meio da análise das correlações das curvas obtidas em seus ensaios, pode-se notar que há uma correlação linear entre os valores obtidos através do ensaio DEWS e o método JSCE-SF4, conforme é observado na figura 23. Ressalta-se ainda, que foram ensaiados apenas três corpos de prova no ensaio DEWS e este apresentou elevada variabilidade pós-fissuração para aberturas de fissura da ordem de 0,5mm.

Figura 23: Correlação linear entre os valores de tenacidade obtidos pelo ensaio DEWS e o método JSCE



Fonte: AUTOR, 2017

Por sua vez, Toaldo *et al* (2013), realizou em seu estudo uma comparação entre os valores obtidos pelo ensaio proposto pela JSCE-SF4 e o Ensaio Barcelona Simplificado (EBS).

Calculou-se a média da tenacidade dos corpos de prova para cada ensaio para intervalos de 0,5 mm, obtendo-se os resultados presentes na Tabela 10.

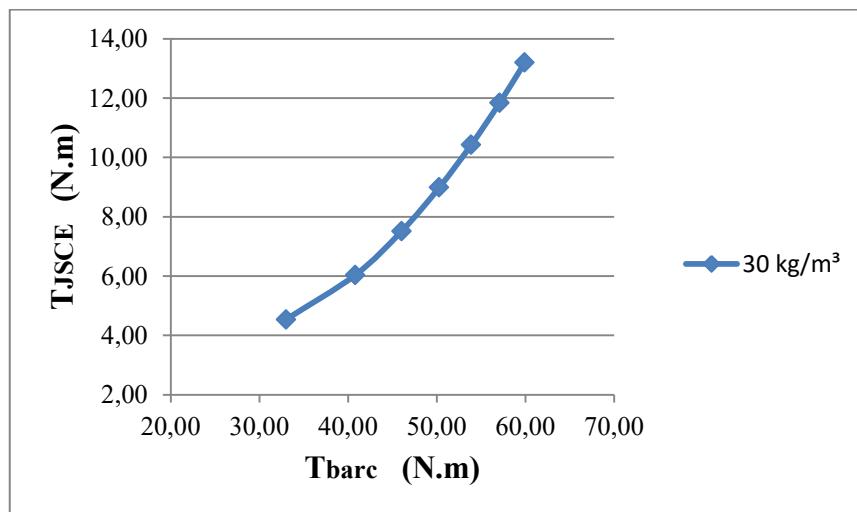
Tabela 10: Valores de Tenacidade, obtidos por Toaldo (2013), para concreto com teor de fibra de 30 kg/m³

δ (mm)	T_{barc} (N.m)	Desvio Padrão (N.m)	T_{JSCE} (N.m)	Desvio Padrão (N.m)	T_{barc}/T_{JSCE}
0,50	33,02	2,34	4,54	0,45	7,28
0,75	40,83	2,80	6,04	0,66	6,76
1,00	46,06	3,10	7,52	0,96	6,13
1,25	50,29	3,44	8,99	1,29	5,59
1,50	53,90	3,87	10,43	1,64	5,17
1,75	57,09	4,50	11,84	1,99	4,82
2,00	59,93	5,26	13,20	2,35	4,54

Fonte: TOALDO *et al*, 2013

Buscando obter uma correlação entre os ensaios, a análise baseou-se em relacionar a tenacidade dos dois ensaios. Os resultados revelaram que há significativa correspondência de resposta entre ambos os ensaios em termos de tenacidade, pois se obteve altos índices de determinação tanto para a regressão linear quanto para a polinomial (figura 24).

Figura 24: Correlação linear entre os valores de tenacidade obtidos pelo ensaio DEWS e o método JSCE



Fonte: AUTOR, 2017

JSCE-SF4 é o mais utilizado no Brasil ainda hoje, é possível então estabelecer uma correspondência que permita a transição de um método para outro (TOALDO *et al*, 2013).

4.4 SÍNTESE DOS MÉTODOS DE ENSAIO

No ANEXO A, serão apresentadas, as principais características de alguns ensaios citados neste trabalho.

CAPÍTULO 5

5. PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 INTRODUÇÃO

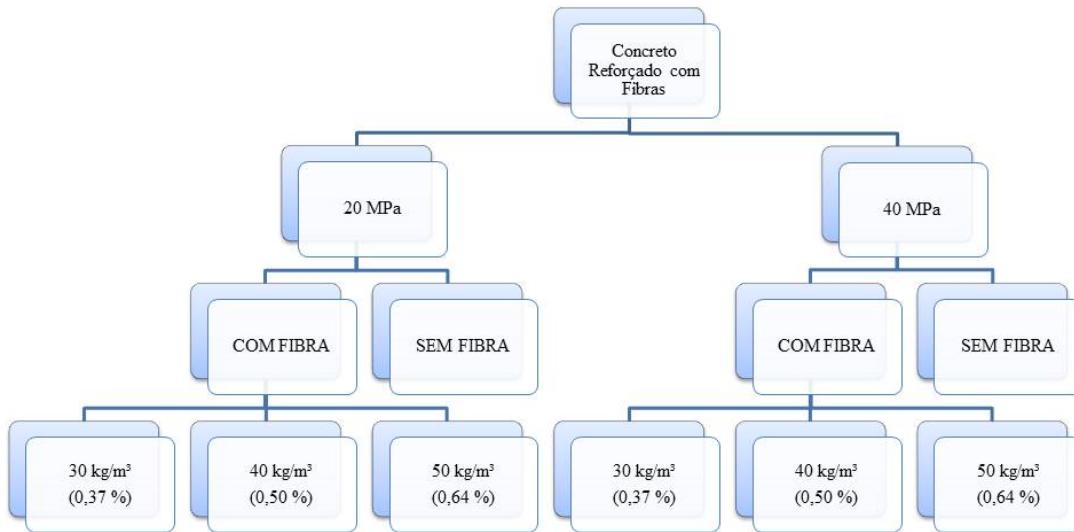
Esta pesquisa tem como objetivo a análise da tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço. Como procedimento de teste serão moldados corpos de prova cúbicos para a realização do ensaio de abertura por encunhamento e corpos de prova prismáticos para o ensaio à flexão pelo Método ASTM C1609.

5.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental proposto considera a adoção de dosagens já estudadas por Vitor (2017) e Pereira (2017), utilizando corpos de prova prismáticos. Dessa forma, a partir dos resultados já existentes, pode-se realizar um comparativo com os resultados obtidos no presente estudo.

Esse planejamento consiste em utilizar para os concretos dois valores de resistência característica à compressão (20 MPa e 40 MPa) e três teores de fibra de aço distintos: 30 kg/m³, 40 kg/m³ e 50 kg/m³, que correspondem à 0,37 %, 0,50 % e 0,64 % de volume de fibras, respectivamente (Figura 25).

Figura 25: Fluxograma com as variáveis do planejamento experimental



Fonte: AUTOR, 2017

Para cada cruzamento entre as resistências características e o volume de fibras foram moldadas réplicas, a fim de avaliar estatisticamente a técnica experimental utilizada. A tabela 11 apresenta a quantidade de corpos de prova moldados para a realização do ensaio de abertura por encunhamento e do ensaio à flexão americano.

Ressalta-se 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, os quais: resistência à compressão aos 28 dias(3 amostras), resistência à compressão aos 60 dias (3 amostras) e resistência à tração por compressão diametral (2 amostras) aos 60 dias.

Tabela 11: Número de corpos de prova moldados para serem ensaiados para cada dosagem

Características dos traços	Quantidade de corpos de prova para cada ensaio		
	Ensaios de caracterização	Ensaio por encunhamento	Ensaio à tração ASTM
Traço I: $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$ Sem fibras	8	3	3
Traço II: $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$ com fibras (30 kg/m^3)	8	3	3
Traço III: $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$ com fibras (40 kg/m^3)	8	3	3
Traço IV: $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$ com fibras (50 kg/m^3)	8	3	3
Traço V: $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$ Sem fibras	8	3	3
Traço VI: $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$ com fibras (30 kg/m^3)	8	3	3
Traço VII: $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$ com fibras (40 kg/m^3)	8	3	3
Traço VIII: $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$ com fibras (50 kg/m^3)	8	3	3

Fonte: AUTOR, 2017

5.3 MATERIAIS UTILIZADOS

Como dito anteriormente, as dosagens utilizadas nesse trabalho são baseadas nos estudos de Vitor (2017) e Pereira (2017).

5.3.1 Cimento

O material aglomerante empregado para a produção do concreto reforçado com fibras foi o cimento Portland composto CP IV 40-RS.

As prescrições da ABNT NBR NM 23 – Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica (2001) foram utilizadas para determinar a massa específica do cimento empregado. Obteve-se o valor absoluto de 2,90 g/cm³.

5.3.2 Agregados

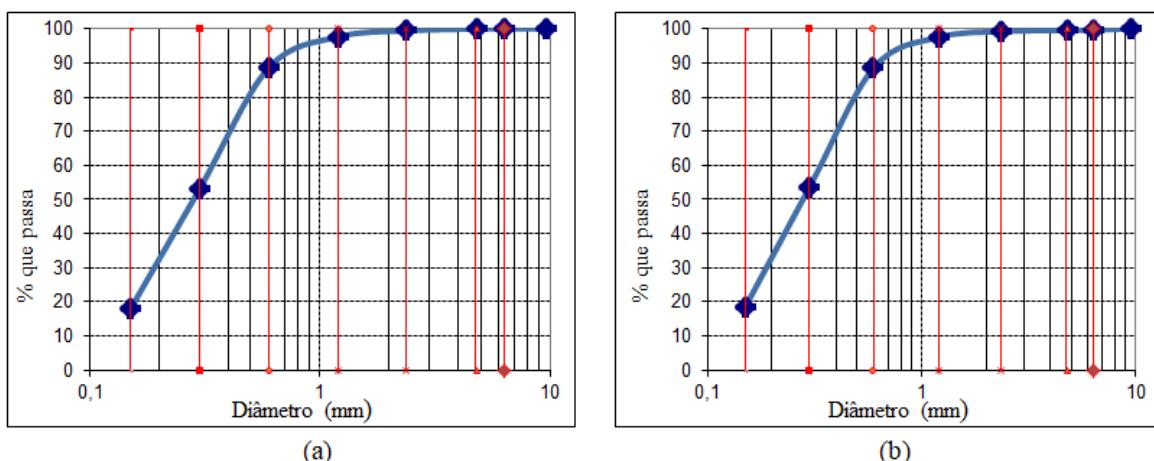
Como agregado miúdo, empregaram-se areia lavada fina e média retiradas de rio na região do Triângulo Mineiro. O agregado miúdo foi caracterizado conforme as prescrições da ABNT NBR NM 45 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios (2006), da ABNT NBR NM 52 – Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente (2009) e da ABNT NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica (2003). As características e as curvas granulométricas do agregado miúdo estão dispostas na tabela 12 e na Figura .

Tabela 12: Caracterização do agregado miúdo

Ensaios realizados	Areia Fina	Areia Média	Métodos de ensaio
Massa específica (g/cm ³)	2,60	2,84	ABNT NBR NM 52: 2009
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	1,39	1,38	ABNT NBR NM 45: 2006
Dimensão máxima (mm)	1,20	1,20	ABNT NBR NM 248: 2003
Módulo de finura	1,43	1,42	ABNT NBR NM 248: 2003

Fonte: AUTOR, 2017

Figura 26: Curva granulométrica para caracterização do agregado miúdo: a) areia fina e b) areia média



Fonte: AUTOR, 2017

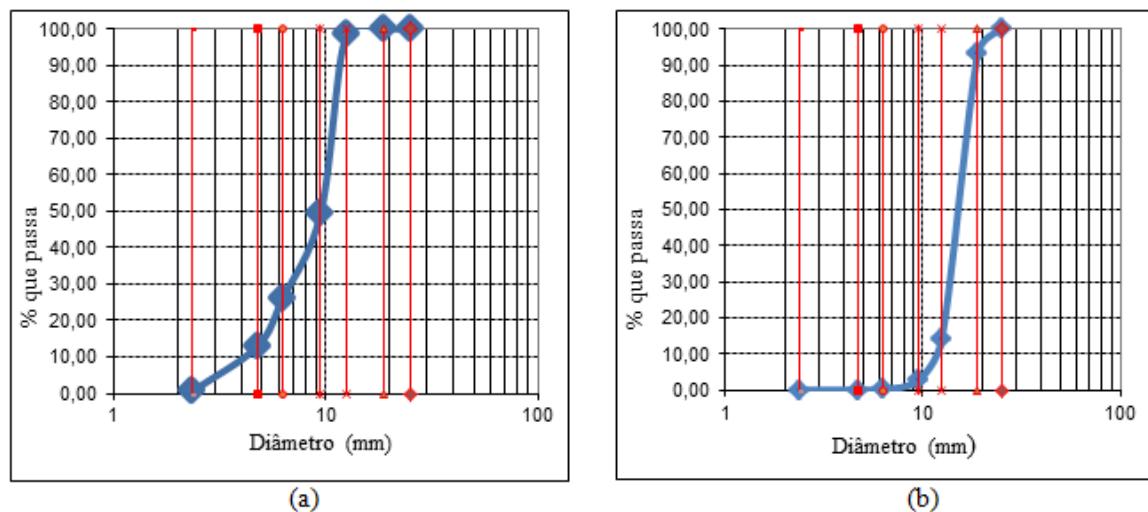
Como agregado graúdo, utilizou-se pedra britada de rocha basáltica com dimensões máximas ($D_{máx}$) de 12,5 mm e 19 mm. As normas ABNT NBR NM 45 (2006), ABNT NBR NM 53 – Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água (2009) e ABNT NBR NM 248 (2003) foram utilizadas para caracterizar o agregado graúdo e que os resultados obtidos estão dispostos na tabela 13 e na figura 27.

Tabela 13: Caracterização do agregado graúdo ($d_{máx} = 12,5$ mm)

Ensaios realizados	Brita 0	Brita 1	Métodos de ensaio
Massa específica (g/cm^3)	2,66	2,78	ABNT NBR NM 53: 2009
Massa unitária no estado solto (g/cm^3)	1,53	1,49	ABNT NBR NM 45: 2006
Massa unitária no estado compactado (g/cm^3)	1,65	1,64	ABNT NBR NM 45: 2006
Dimensão máxima	12,50	19,00	ABNT NBR NM 248: 2003
Módulo de finura	2,40	3,04	ABNT NBR NM 248: 2003

Fonte: AUTOR, 2017

Figura 27: Curva granulométrica para caracterização do agregado graúdo: a) brita 0 e b) brita 1



Fonte: AUTOR, 2017

Os agregados miúdos e graúdos apresentaram granulometria e massa específica semelhantes aos agregados utilizados no estudo de dosagem feito por Vitor (2017). Portanto, puderam ser usados sem a necessidade de alteração ou correção do traço.

5.3.3 Aditivo

O aditivo hiperplastificante (superplastificante II) MasterGlenium® 3400 disponibilizado pela BASF S.A. 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 4.

Tabela 14: Característica do aditivo hiperplastificante empregado

Dados técnicos	Características
Base química	Éter Policarboxílico
Aspecto	Líquido castanho
Densidade (g/cm³)	1,090 a 1,130
pH	8 – 10
Teor de sólidos (%)	42,5 a 46,5

Fonte: CATÁLOGO DO FABRICANTE, 2017.

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 e fornecidas pela Belgo Bekaert Arames Ltda (figura 28). 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 29.

Figura 28: Geometria e dimensões da fibra de aço empregada



Fonte: CATÁLOGO DO FABRICANTE, 2017.

Figura 29: Fibra de aço de seção circular Tipo A e classe I



Fonte: Autor, 2017

5.4 DOSAGEM DO CONCRETO

A tabela 15 apresenta as composições (consumo de materiais por m³ de concreto) de cada série adotada.

Tabela 15: Dosagem dos materiais a serem utilizados

Material	Série C20	Série C40
Cimento CP IV 40 RS (kg/m ³)	315,99	459,27
Agregado miúdo – módulo de finura 1,43 (kg/m ³)	290,71	257,19
Agregado miúdo – módulo de finura 1,42 (kg/m ³)	543,50	477,64
Agregado graúdo – dimensão máxima 12,5 mm	265,43	275,56
Agregado graúdo – dimensão máxima 19 mm	796,28	826,69
Água	208,55	183,71
Aditivo MasterGlenium® 3400 (ml)	0,86	2,34
Traço unitário	1,00 : 2,64 : 3,36 : 0,66	1,00 : 1,60 : 2,40 : 0,40

Fonte: AUTOR, 2017

Por meio dessas dosagens da literatura para o concreto sem fibras das séries C20 e C40, foram dosados os traços para os CRFs com o consumo de fibras de aço variando entre 30 kg/m³, 40 kg/m³ e 50 kg/m³, ou 0,37 %, 0,50 % e 0,64 % em volume, respectivamente.

5.5 PRODUÇÃO, MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Primeiramente, todos os materiais foram separados e tiveram suas massas registradas. 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 betonada;
- 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 II diluído em água e mistura durante 2 minutos;
- d) adição da fibra de aço à mistura de maneira lenta e mistura durante 5 minutos.

Para a 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. Os moldes metálicos prismáticos padronizados com dimensões de 150 mm x 150 x 500 mm foram utilizados para moldagem dos corpos de prova do ensaio à flexão ASTM C1609 (2012) e dividido em cubos de dimensões 150 mm x 150 mm x 140 mm para o ensaio de abertura por encunhamento, conforme exposto na figura 30.

Figura 30: Forma metálica dividida em cubos para moldagem dos corpos de provas para teste por encunhamento



Fonte: AUTOR, 2017

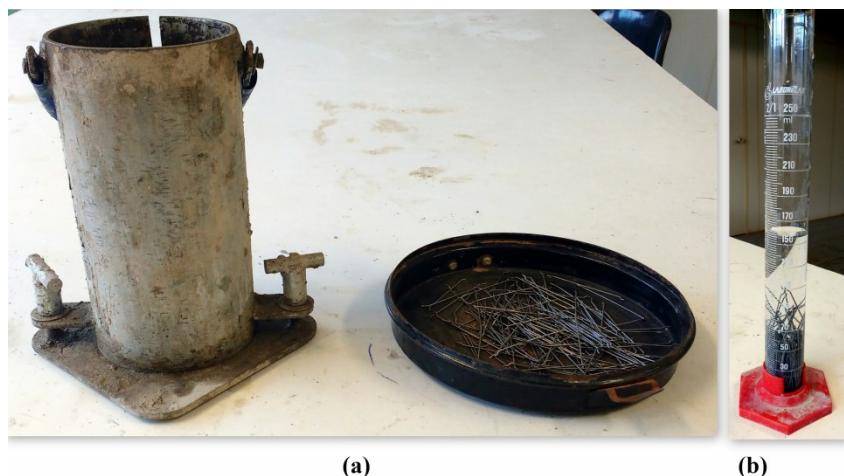
Antes da moldagem, imprimou-se todos os moldes com óleo desmoldante. Em seguida, as formas usadas para a moldagem foram preenchidas e o concreto adensado com mesa vibratória por aproximadamente 10 segundos.

Após serem retirados das formas, os corpos de prova foram levados para um tanque com água saturada de cal para realização de cura submersa até a data de testes.

Para uma simples conferência do teor de fibras presente nos corpos de prova, moldou-se uma forma cilíndrica ($d = 100 \text{ mm}$ e $h = 200 \text{ mm}$), de volume conhecido, com CRFA com taxa de fibra de 30 kg/m^3 ou 0,37% do volume. Após a moldagem, lavou-se todo o material em uma peneira para que recolhesse apenas as fibras de aço.

Estimou-se o volume das fibras recolhidas numa proveta graduada com água, conforme a figura 31.

Figura 31: Teste para conferência do teor de fibras: a) forma cilíndrica e fibras recolhidas após lavagem do material; b) determinação do volume das fibras por proveta graduada.



Fonte: AUTOR, 2017

- Volume da forma cilíndrica: $1,57 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
- Volume de fibras de aço: $6,00 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
- Massa de fibras de aço: $52 \times 10^{-3} \text{ kg}$

Logo, o teor de fibras obtido nesse teste foi:

$$\begin{aligned} &\text{- em massa: } (52 \times 10^{-3}) / (1,57 \times 10^{-3}) = 33,12 \text{ kg/m}^3 \\ &\text{- em volume: } (6,00 \times 10^{-6}) / (1,57 \times 10^{-3}) \times 100 = 0,38 \% \end{aligned}$$

Portanto, a dosagem utilizada para a produção do CRFA resultou no teor de fibras desejado para esse estudo.

5.6 MÉTODOS DE ENSAIO

Os traços sem fibras serão executados a fim de avaliar apenas seu comportamento mecânico no que diz respeito à caracterização dos concretos. Já os traços com fibras serão ensaiados também à tenacidade por meio do ensaio de abertura por encunhamento e do ensaio à flexão (ASTM).

Os ensaios pilotos realizados foram exclusivamente para testes e adequações de equipamentos e procedimentos. Portanto, os resultados obtidos não puderam ser validados e, por isso, não serão apresentados nesse trabalho.

A seguir, serão apresentados os procedimentos de todos os ensaios realizados, sejam os de caracterização ou os de avaliação da tenacidade.

5.6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (f_{Cm})

Anteriormente à realização do ensaio, as faces dos corpos de prova foram preparadas por retífica, figura 32, conforme a ABNT NBR 5738 (2016). O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme as prescrições da ABNT NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (2007).

Figura 32: Retificação dos corpos de prova para os testes de resistência à compressão do CRFA



Fonte: AUTOR, 2017

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 foram 28 dias e aproximadamente 60 dias, correspondente a idade de teste para determinação da tenacidade adotada nesse trabalho. A Máquina Universal Instron HDX Models com capacidade de 1000 kN foi utilizada para a execução desses ensaios Figura 33.

Figura 33: Teste de resistência à compressão em corpos de prova cilíndrico realizado no laboratório de estruturas da FECIV-UFU



Fonte: AUTOR, 2017

Após a preparação das faces dos corpos de prova, essas faces e os pratos da máquina de ensaio devem ser limpos e secos. Em seguida, o corpo de prova deve ser posicionado no centro do prato inferior e o carregamento de ensaio deverá ocorrer de forma contínua e sem choques, a uma velocidade constante de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. O carregamento cessa no instante em que ocorre a ruptura do corpo de prova, indicada por uma queda abrupta na força aplicada.

Após a realização do ensaio, a resistência à compressão é calculada por meio da Equação 02.

$$f_c = \frac{4 \times F_{cr}}{\pi \times D^2} \quad (\text{Equação 02})$$

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

5.6.2 Módulo de elasticidade (E_{ci})

Para esse estudo, o módulo de elasticidade (E_{ci}) foi estimado conforme a NBR 6118, 2014, pela equação 03.

$$E_{ci} = \alpha_E \times 5600 \times \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{Equação 03})$$

Em que:

E_{ci} = módulo de elasticidade do concreto

α_E = 1,2 para basalto e diabásio; 1,0 para granito e gnaisse; 0,9 para calcário e 0,7 para arenito.

F_{ck} = resistência característica à compressão do concreto

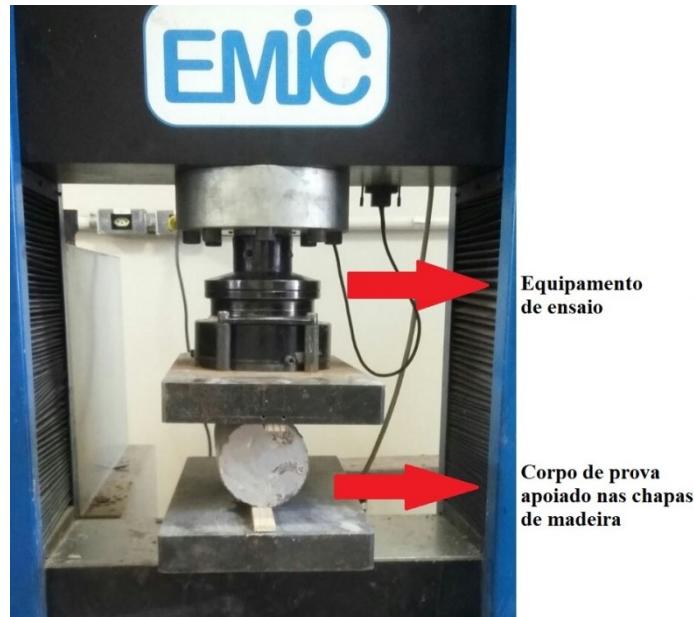
5.6.3 Resistência à tração por compressão diametral

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. Esse ensaio é normatizado pela ABNT NBR 7222 – Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos (2011).

O procedimento de ensaio consiste 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 de madeira devem ser colocadas entre os pratos da máquina e os corpos de prova. A Figura ilustra a configuração do ensaio.

Figura 34 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: AUTOR, 2017

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 foi obtida pela Equação 04.

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \times F_{cr}}{\pi \times D \times l_{cp}} \quad (\text{Equação 04})$$

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

5.6.4 Tenacidade por meio do ensaio de abertura por encunhamento

Nessa pesquisa, o ensaio patenteado por Tschegg foi realizado para avaliar a tenacidade de seis traços distintos de concreto reforçado com fibras de aço, sendo que para cada traço foram ensaiados três corpos de prova. Dessa forma, um total de 24 corpos de prova foi ensaiado, após 60 dias da concretagem.

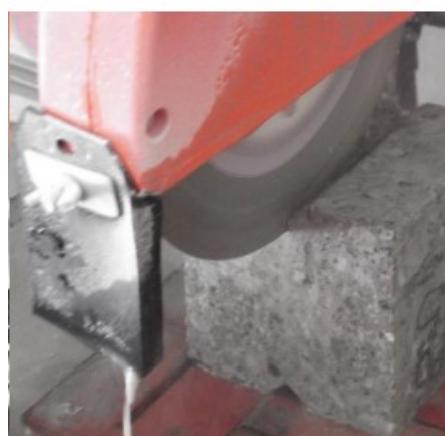
Os corpos de prova foram moldados em formato cúbico maciço, conforme figura 35, com dimensões de 150 x 150 x 140 mm. Posteriormente foi realizado, por meio de uma serra elétrica circular com disco de corte, o entalhe de 20 mm (medido com um paquímetro), atendendo as recomendações de Tschegg et al. (2015), semelhante ao realizado por Borges (2017), na figura 36.

Figura 35: Corpo de prova cúbico com dimensões de 150 x 150 x 140 mm para ensaio por encunhamento



Fonte: AUTOR, 2017

Figura 36: Execução de entalhe de 20 mm no corpo de prova



Fonte: BORGES, 2017

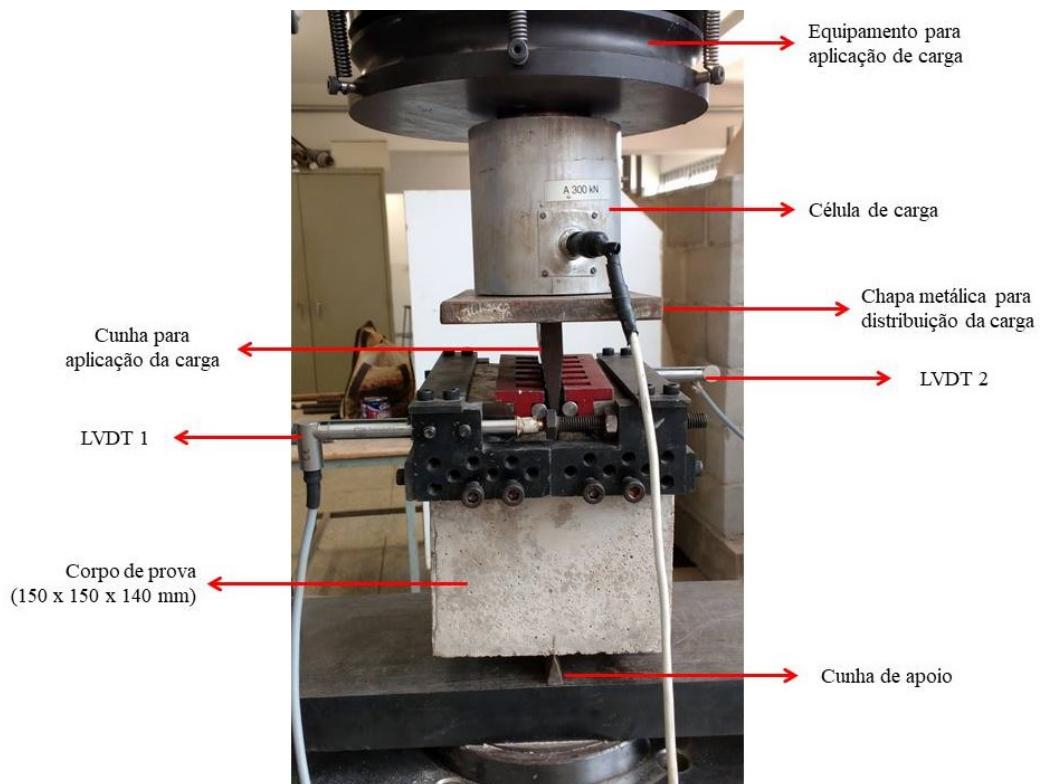
Para a realização dos ensaios, utilizou-se a máquina Máquina Universal Instron HDX Models com capacidade de 1000 kN da FECIV/UFU. Já a aquisição de dados foi realizada, utilizando o programa computacional Catman Easy por meio do equipamento QuantumX.

Todos os corpos de prova foram girados a 90º antes do teste, para não serem ensaiados na mesma direção que foram moldados e evitar uma possível influência nos resultados pela direção preferencial das fibras durante a moldagem.

Mensurou-se o deslocamento horizontal por dois LVDTs de 10 mm posicionados na horizontal por meio de um suporte metálico na altura da linha de aplicação de carga (figura 37). Os aparelhos do ensaio foram adquiridos pelo Prof. Antônio Carlos dos Santos, para essa pesquisa.

Com os valores medidos, obteve-se a média do deslocamento horizontal sofrido pelo corpo de prova. Para a obtenção dos valores de carga aplicada, uma célula de carga com capacidade de 300 kN foi posicionada sobre a cunha. A velocidade de carregamento, por sua vez, foi de 0,5 mm/min conforme prescrito por Tschegg et al. (2015).

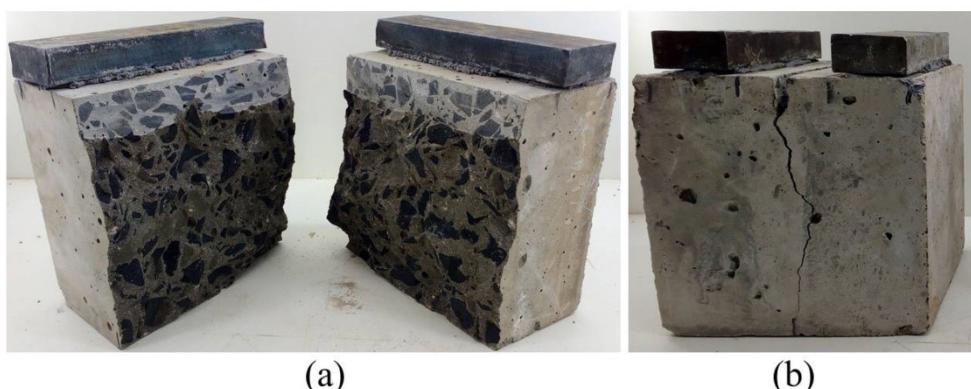
Figura 37: Equipamento e configuração do ensaio de abertura por encunhamento, realizado na FECIV-UFU



Fonte: AUTOR, 2017

Tschegg *et al.* (2015) apresenta como critério de parada de teste a abertura de fissura na ordem de 3,5 mm. Na Figura 38 tem-se o corpo de prova cúbico após realização do teste de tenacidade por encunhamento.

Figura 38: Corpos de provas após o ensaio de abertura por encunhamento: a) sem fibras e b) com fibras



Fonte: AUTOR, 2017

Observou-se a completa ruptura do corpos de prova do concreto sem fibra, antes da fissura chegar aos 3,5 mm de abertura.

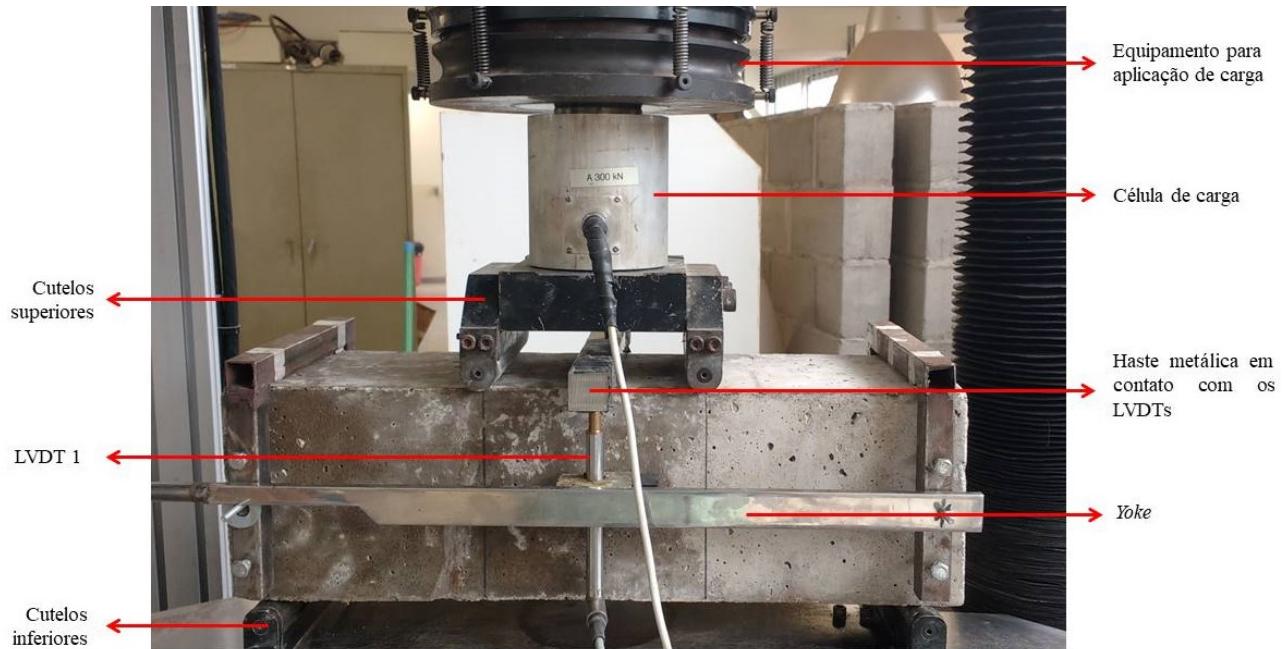
5.6.5 Tenacidade à flexão segundo a ASTM C1609

Realizaram-se os testes de tenacidade à flexão conforme recomendação da norma ASTM C1609 (2012), aos 60 dias de idade dos corpos de prova, na máquina Universal da Instron HDX Models com capacidade de 1000 kN.

Foram ensaiados 3 corpos de prova prismáticos com fibras com dimensões de 150 x 150 x 500 mm para cada traço. Todos os corpos de prova foram girados a 90º antes do teste, para não serem ensaiados na mesma direção que foram moldados e evitar uma possível influência nos resultados pela direção preferencial das fibras durante a moldagem.

O controle durante a realização do teste de tenacidade à flexão foi feito pelo LVDT externo. Foram colocados dois LVDTs na região central de cada face lateral do corpo de prova, conforme Figura 39. O transdutor utilizado tem base de medida de 100 m e precisão de 0,0001 mm.

Figura 39: Equipamento e configuração do ensaio da ASTM, realizado na FECIV-UFU



Fonte: AUTOR, 2017

Segundo ASTM C1609 (2012), as velocidades de ensaio são divididas em duas fases e definidas até deflexões específicas. Para esse estudo foram adotadas as velocidades da tabela 16.

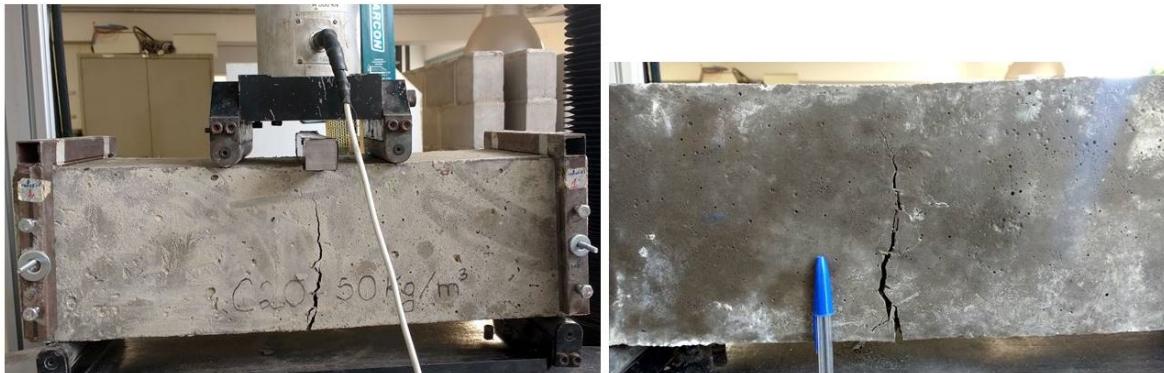
Tabela 16: Velocidade de carregamento de acordo com a ASTM C1609

Norma	Velocidade inicial até $L/900 = 0,5$ mm de deflexão	Velocidade secundária de $L/900$ a $L/150$ (0,5 mm a 3,0 mm) de deflexão
ASTM C1609	0,05 mm/min	0,10 mm/min

Fonte: AUTOR, 2017

ASTM C1609 (2012) apresenta como critério de parada de teste a deflexão na ordem de $L/150$, ou seja, 3,0 mm. Na figura 40 tem-se o corpo de prova prismático após realização do teste de tenacidade à flexão..

Figura 40: Corpos de provas do CRFA após o ensaio de tenacidade à flexão ASTM C1609 (2012)



Fonte: AUTOR, 2017

Após a abertura da fissura, é possível observar a interação das fibras com a matriz de concreto. É exatamente essa ligação que reforça a matriz e reduz a abertura de fissura.

5.7 CRITÉRIO DE CHAUVENET

O critério de Chauvenet é um procedimento consistente para rejeição de resultados que escapam de uma definida tendência dominante (eliminação de valores inadequados). Seu princípio é de que os resultados obtidos devem estar aleatoriamente distribuídos e torno de um valor médio (Salvador, 2012).

Para aplicar este critério a fim e eliminar valores duvidosos, em primeiro lugar, calculam-se o desvio médio e o desvio padrão do conjunto de dados medidos, conforme as equações:

$$\text{Desvio absoluto médio} = |\bar{d}_i| = \frac{1}{n} \sum_i^n |d_i| = \frac{1}{n} \sum_i^n |x_i - x_m| \quad (\text{Equação 05})$$

$$\text{Desvio padrão} = \sigma = \left[\frac{1}{n-1} \sum (x_i - x_m)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{Equação 06})$$

O procedimento pode ser repetido caso seja necessário. Para aplicá-lo, calcula-se o valor médio, x_m , e o desvio padrão, σ , com todas as medições. Então, confere-se o valor de cada medida, x_i , calculando-se ΔR , conforme as equações:

$$\Delta R = \frac{|x_i - x_m|}{\sigma} \quad (\text{Equação 07})$$

$$\Delta R_0 = \frac{|x_{susp} - x_m|}{\sigma} \quad (\text{Equação 08})$$

O valor em análise é rejeitado quando $\Delta R > \Delta R_0$. Após a eliminação de amostras duvidosas, devem ser calculadas a nova média e o desvio padrão para a apresentação e análise finais dos dados. O desvio de cada um dos pontos é comparado com o desvio padrão, conforme a tabela 17, para assim, eliminarem-se as observações suspeitas.

Tabela 17: Critério de Chauvenet para eliminação de valor medido

Número de leituras N	Razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão $ d_{il} /\sigma$	Número de leituras n	Razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão $ d_{il} /\sigma$
3	1,38	20	2,24
4	1,54	21	2,26
5	1,65	22	2,28
6	1,73	23	2,30
7	1,80	24	2,31
8	1,85	25	2,33
9	1,91	26	2,35
10	1,96	27	2,36
11	1,99	28	2,37
12	2,03	29	2,38
13	2,06	30	2,39
14	2,10	50	2,57
15	2,13	100	2,81
16	2,16	300	3,14
17	2,18	500	3,29
18	2,20	1000	3,48
19	2,22		

Fonte: Salvador (2012)

5.8 PLANEJAMENTO E ANÁLISE EXPERIMENTAL

Após a realização de testes experimentais, faz-se necessária a avaliação da influência das variáveis sobre os resultados encontrados. O planejamento e a análise fatorial permitem encontrar os seguintes parâmetros (BARROS NETO *et al.*, 2001):

- efeito principal: diferença média encontrada na variável de resposta quando o nível do fator de controle analisado sofre alteração:

$$EP = 2 \times \frac{(\Sigma x^+ - \Sigma x^-)}{b^a} \quad (\text{Equação 09})$$

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

- 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 10:

$$S(\text{efeito}) = \frac{\sigma}{\sqrt{2^{k-1}}} \quad (\text{Equação 10})$$

Em que σ é o erro na medida (desvio padrão) e k é o número de fatores experimentais no planejamento fatorial. Esse estudo possui os fatores e níveis descritos na tabela 18.

Tabela 18: Fatores e níveis analisados

Fator	Nível
Resistência característica à compressão (MPa)	20
	40
Teor de Fibras (%)	0,37
	0,50
	0,64

Fonte: AUTOR , 2017

Determinado os fatores e níveis, adotou-se o planejamento fatorial 2^2 para possibilitar a análise dos dados. Esse planejamento consiste em testar e avaliar dois fatores com níveis distintos cada. Portanto para a análise dos dados de tenacidade, as tabelas 19, 20 e 21 foram utilizadas como matrizes de planejamento.

Tabela 19: 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 0,37 % para 0,50 %)

Ensaio	Resistência característica à compressão (f_{ck})	Teor de fibras (TC)	Variável de resposta: Tenacidade média (N.m)
1	C20	0,37%	\bar{x}_a
2	C40	0,37%	\bar{x}_b
3	C20	0,50%	\bar{x}_c
4	C40	0,50%	\bar{x}_d

Fonte: AUTOR, 2017

Tabela 20: 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 (TC)	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: AUTOR, 2017

Tabela 21: 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 0,37 % para 0,64 %)

Ensaio	Resistência característica à compressão (f_{ck})	Teor de fibras (TC)	Variável de resposta: Tenacidade média (N.m)
1	C20	0,37%	\bar{x}_a
2	C40	0,37%	\bar{x}_b
3	C20	0,64%	\bar{x}_c
4	C40	0,64%	\bar{x}_d

Fonte: AUTOR, 2017

Obtêm-se os valores dos efeitos principais para a resistência à compressão (E_{fck}) e o teor de fibras (E_{TF}), a partir dessas matrizes de planejamento e dos valores médios variáveis de resposta (x), empregando as equações 20 e 21.

$$E_{fck} = \frac{(\bar{x}_b - \bar{x}_a) + (\bar{x}_d - \bar{x}_c)}{2} \quad (\text{Equação 11})$$

$$E_{TF} = \frac{(\bar{x}_c - \bar{x}_a) + (\bar{x}_d - \bar{x}_b)}{2} \quad (\text{Equação 12})$$

Por fim, o efeito de interação (EI) entre a resistência à compressão e o teor de fibras é encontrado por meio da equação 13.

$$EI = \frac{(\bar{x}_a + \bar{x}_d)}{2} - \frac{(\bar{x}_b + \bar{x}_c)}{2} \quad (\text{Equação 13})$$

CAPÍTULO 6

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 INTRODUÇÃO

Esse capítulo apresenta os resultados dos ensaios realizados para caracterização do comportamento mecânico do material compósito CRFA. São analisados os resultados dos testes de resistência à compressão aos 28 e 60 dias, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. São apresentados também os dados e curvas obtidos pelos ensaio de tenacidade à flexão ASTM C1609 (2012) e por abertura por encunhamento, patenteado por Tschegg et al. (2015).

Todos os valores foram verificados pelo critério de Chauvenet para que fossem eliminados os dados discrepantes dos demais.

6.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Na tabela 22 são discriminados os valores de resistência à compressão média (f_{cm}), determinada conforme a ABNT NBR 5739:2007, desvio padrão (S_d) e coeficiente de variação (CV), para os ensaios realizados aos 28 dias e aos 60 dias após a moldagem.

Tabela 22: Resistência à compressão aos 28 dias e aos 60 dias

Dosagem	Resistência à compressão aos 28 dias			Resistência à compressão aos 60 dias		
	f_{cm} (MPa)	S_d (MPa)	CV (%)	f_{cm} (MPa)	S_d (MPa)	CV (%)
C20 – 0,00 % (Traço I – ref.)	21,04	2,86	13,62	27,07	2,28	8,41
C20 – 0,37 % (Traço II)	24,98	1,71	6,83	29,05	1,19	4,10
C20 – 0,50 % (Traço III)	29,39	1,03	3,50	33,45	2,28	6,82
C20 – 0,64 % (Traço IV)	30,54	1,52	4,96	34,61	3,87	11,19
C40 – 0,00 % (Traço V-ref.)	40,60	2,88	7,09	43,08	0,54	1,24
C40 – 0,37 % (Traço VI)	42,06	3,36	7,99	45,32	1,78	3,93
C40 – 0,50 % (Traço VII)	46,29	0,41	0,89	44,13	2,82	6,38
C40 – 0,64 % (Traço VIII)	41,78	0,45	1,08	44,48	0,23	0,53

Fonte: AUTOR, 2017

A tabela 23 apresenta o aumento da resistência à compressão, bem como a diferença percentual de cada dosagem do CRFA em relação ao concreto referência (sem fibras).

Tabela 23: Ganho na resistência à compressão das amostras com fibras em relação às amostras sem fibras

Dosagem	Resistência à compressão aos 28 dias		Resistência à compressão aos 60 dias	
	Aumento/redução nos valores (MPa)	Percentual (%)	Aumento/redução nos valores (MPa)	Percentual (%)
C20 – 0,00 % (Traço I – ref.)	-	-	-	-
C20 – 0,37 % (Traço II)	+3,94	+18,73	+1,99	+7,33
C20 – 0,50 % (Traço III)	+8,36	+39,72	+6,39	+23,59
C20 – 0,64 % (Traço IV)	+9,50	+45,16	+7,54	+27,86
C40 – 0,00 % (Traço V- ref.)	-	-	-	-
C40 – 0,37 % (Traço VI)	+1,46	+3,60	+2,24	+5,20
C40 – 0,50 % (Traço VII)	+5,69	+14,01	+1,05	+2,44
C40 – 0,64 % (Traço VIII)	+1,18	+2,91	+1,40	+3,25

Fonte: AUTOR, 2017

De maneira geral observou-se um aumento da resistência à compressão das amostras com fibras, em relação ao concreto de referência (sem fibras). O traço IV (C20 – 0,64%) foi o que apresentou maior aumento percentual em relação ao concreto de referência. Por outro lado, o que apresentou menor aumento percentual foi o traço VIII (C40 – 0,64%).

A média dos resultados aos 28 dias atende à média desejada para cada traço e o desvio padrão dos resultados está dentro do limite do controle da norma NBR ABNT 12655 (2006) adotado em função do controle no preparo do concreto, de modo que o desvio padrão não deve passar de 4 MPa.

Todas as dosagens apresentaram aumento da f_{cm} dos 28 dias para os 60 dias de moldagem, com exceção do traço VII. Aos 28 dias, a resistência à compressão média foi de 46,29 MPa e reduziu, aos 60 dias, para 44,13 MPa. No entanto, observando o desvio padrão, que demonstra a dispersão dos resultados, em torno do valor médio, este valor encontra-se num intervalo válido.

No Apêndice A são apresentados os valores de todos os corpos de prova do teste para determinação da resistência à compressão do compósito.

6.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Na tabela 24 são discriminados os valores de resistência à tração por compressão diametral (f_{ctm}), determinada conforme a ABNT NBR 7222:2010, desvio padrão (S_d) e coeficiente de variação para os ensaios realizados aos 28 dias e aos 60 dias após a moldagem.

Tabela 24: Resistência à tração por compressão diametral aos 60 dias

Dosagem	Resistência à tração aos 60 dias		
	f_{ctm} (MPa)	S_d (MPa)	CV (%)
C20 – 0,00 % (Traço I – ref.)	3,05	0,05	1,64
C20 – 0,37 % (Traço II)	3,84	0,17	4,32
C20 – 0,50 % (Traço III)	3,07	-	-
C20 – 0,64 % (Traço IV)	3,67	1,04	28,31
C40 – 0,00 % (Traço V – ref.)	4,61	0,36	7,71
C40 – 0,37 % (Traço VI)	6,24	0,95	15,19
C40 – 0,50 % (Traço VII)	7,73	0,65	8,46
C40 – 0,64 % (Traço VIII)	6,08	0,39	6,45

Fonte: AUTOR, 2017

Para o traço III houve perda dos corpos de provas durante a cura e apenas um valor de resistência à tração foi obtido com confiabilidade.

A tabela 25 apresenta o aumento da resistência à tração, bem como a diferença percentual de cada dosagem do CRFA, em relação ao concreto referência (sem fibras).

Tabela 25: Ganho na resistência à tração das amostras com fibras em relação às amostras sem fibras

Dosagem	Resistência à tração aos 60 dias	
	Aumento/redução nos valores (MPa)	Percentual (%)
C20 – 0,00 % (Traço I - ref.)	-	-
C20 – 0,37 % (Traço II)	+0,79	+25,95
C20 – 0,50 % (Traço III)	+0,03	+0,86
C20 – 0,64 % (Traço IV)	+0,63	+20,53
 C40 – 0,00 % (Traço V - ref)	-	-
C40 – 0,37 % (Traço VI)	+1,63	+35,46
C40 – 0,50 % (Traço VII)	+3,12	+67,80
C40 – 0,64 % (Traço VIII)	+1,47	+31,98

Fonte: AUTOR, 2017

De maneira geral observou-se um aumento da resistência à tração por compressão diametral das amostras com fibras, em relação ao concreto de referência (sem fibras). Entretanto, o ganho de resistência não foi crescente conforme o aumento do volume de fibras. O traço VII (C40 – 0,50%) foi o que apresentou maior aumento percentual em relação ao concreto de referência. Por outro lado, o que apresentou menor aumento percentual foi o traço III (C20 – 50%).

Por meio da tabela 25, observa-se que os ganhos na resistência média à tração por compressão diametral para a série C40 foram maiores que para a série C20. Isso justifica-se, pois conforme estudo realizado por Figueiredo, Mourad e Carvalho (2000), a maior resistência à compressão da matriz do concreto confere maior aderência entre matriz e as fibras de aço. Portanto, as solicitações impostas ao compósito são transferidas às fibras de maneira mais eficaz.

No Apêndice B são apresentados os valores de todos os corpos de prova do teste para determinação da resistência à tração por compressão diametral do compósito.

6.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE (E_{ci})

Na tabela 26 são discriminados os valores de módulo de elasticidade médio (E_m), estimados conforme a ABNT NBR 6118:2014, por meio do valor da resistência à

compressão (f_c), desvio padrão (S_d) e coeficiente de variação (CV), para os ensaios realizados aos 28 dias e aos 60 dias após a moldagem.

Tabela 26: Módulo de Elasticidade médio do concreto reforçado com fibras para 28 dias e 60 dias

Dosagem	Módulo de elasticidade aos 28 dias			Módulo de elasticidade aos 60 dias		
	E_m (GPa)	S_d (GPa)	CV (%)	E_m (GPa)	S_d (GPa)	CV (%)
C20 – 0,00 % (Traço I - ref.)	30,75	2,10	6,84	34,93	1,47	4,21
C20 – 0,37 % (Traço II)	33,56	1,15	3,42	36,21	0,74	2,05
C20 – 0,50 % (Traço III)	36,43	0,64	1,75	38,84	1,33	3,41
C20 – 0,64 % (Traço IV)	37,12	0,92	2,48	39,53	1,54	3,91
C40 – 0,00 % (Traço V - ref.)	41,24	1,58	3,82	44,11	0,29	0,65
C40 – 0,37 % (Traço VI)	41,77	1,82	4,35	45,23	0,89	1,96
C40 – 0,50 % (Traço VII)	45,72	0,20	0,44	44,63	1,06	2,38
C40 – 0,64 % (Traço VIII)	43,44	0,23	0,54	44,82	0,13	0,29

Fonte: AUTOR, 2017

A tabela 27 apresenta o aumento ou a redução do módulo de elasticidade, bem como a diferença percentual de cada dosagem do CRFA, em relação ao concreto referência (sem fibras).

Tabela 27: Ganhos do módulo de elasticidade das amostras com fibras em relação às amostras sem fibras

Dosagem	Módulo de elasticidade aos 28 dias		Módulo de elasticidade aos 60 dias	
	Aumento/redução nos valores (GPa)	Percentual (%)	Aumento/redução nos valores (GPa)	Percentual (%)
C20 – 0,00 % (Traço I - ref.)	-	-	-	-
C20 – 0,37 % (Traço II)	+2,81	+9,15	+1,28	+3,67
C20 – 0,50 % (Traço III)	+5,68	+18,46	+3,91	+11,21
C20 – 0,64 % (Traço IV)	+6,37	+20,73	+4,60	+13,17
C40 – 0,00 % (Traço V- ref)	-	-	-	-
C40 – 0,37 % (Traço VI)	+0,52	+1,27	+1,12	+2,55
C40 – 0,50 % (Traço VII)	+4,48	+10,86	+0,52	+1,18
C40 – 0,64 % (Traço VIII)	+2,19	+5,32	+0,71	+1,61

Fonte: AUTOR, 2017

Com os resultados obtidos, conclui-se que o módulo de elasticidade aos 28 dias e aos 240 dias foi relativamente superior para os concretos com fibras.

O material compósito é constituído, em volume, principalmente pela fase matriz, de modo que essa fase interfere mais significativamente no módulo de elasticidade. Dessa forma, nota-se que a alteração na resistência da matriz gera um aumento mais significativo no módulo de elasticidade que a adição de fibras.

No Apêndice C são apresentados os valores de todos os corpos de prova do teste para determinação do módulo de elasticidade do compósito.

6.5 TENACIDADE DO CONCRETO COM FIBRAS

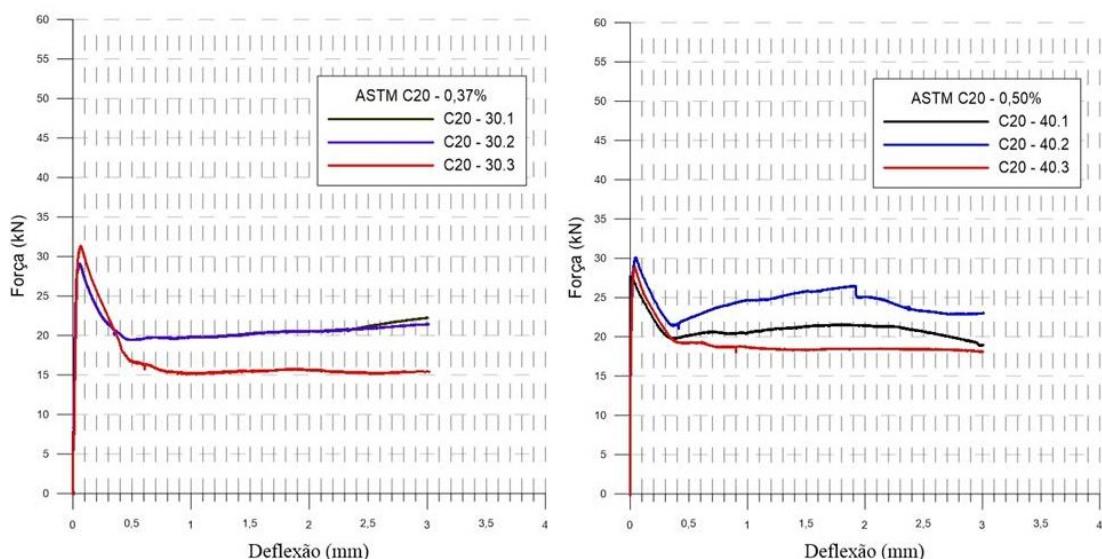
A tenacidade do compósito foi determinada por dois testes distintos: à flexão da ASTM C1609 (2012) e de abertura por encunhamento (TSCHEGG *et al*, 2015), todos realizados no laboratório de estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

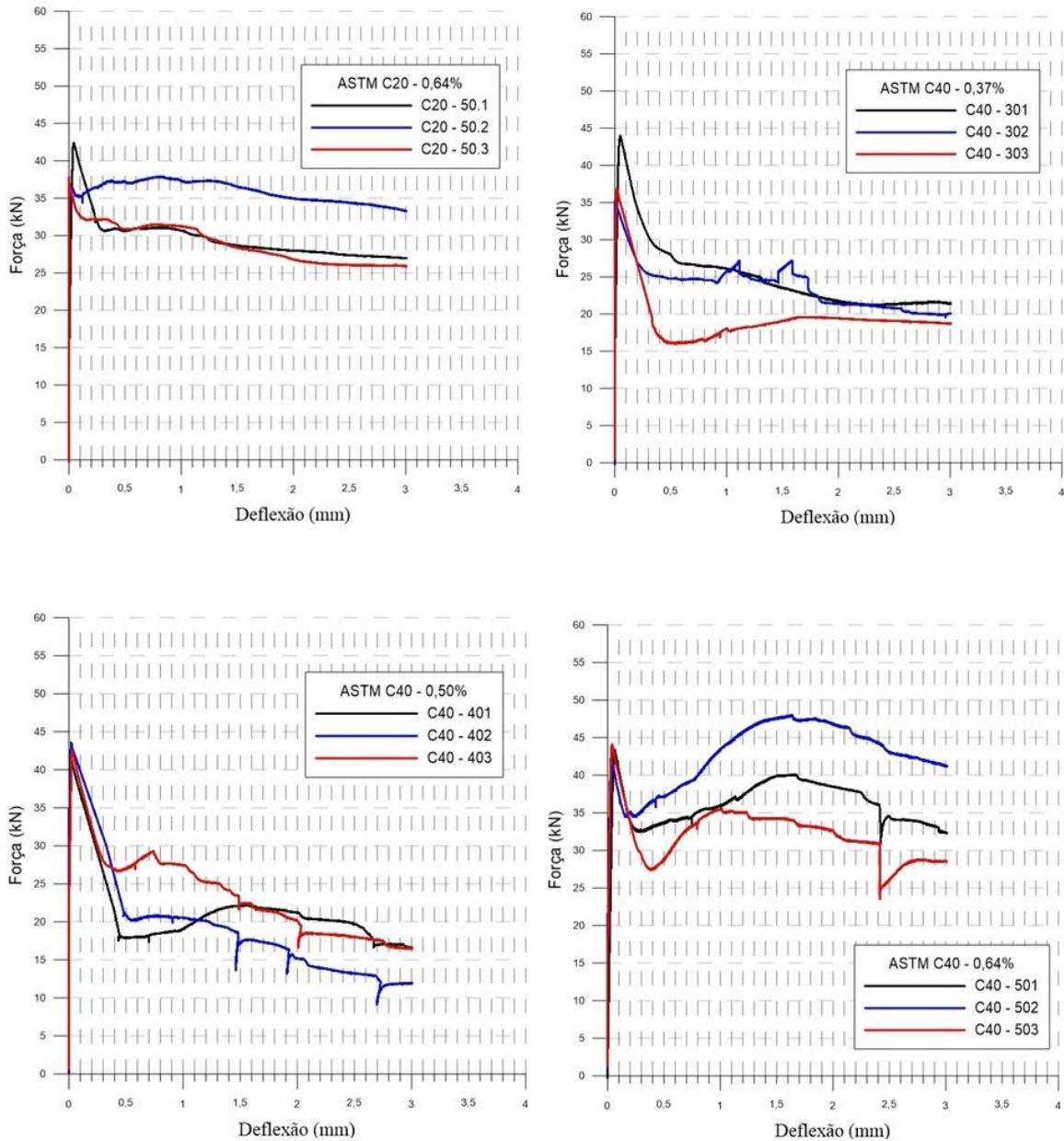
A seguir serão apresentados e analisados os valores obtidos nesses testes.

6.5.1 Ensaio tenacidade à flexão ASTM C1609 (2012)

Na figura 41 são apresentadas as curvas de carga *versus* deflexão, obtidas pelo ensaio à flexão da ASTM C1609 (2012). Os dados foram adquiridos por sensores externos, utilizando célula de carga e LVDTs (Linear Variable Differential Transformer).

Figura 41: Curvas carga versus deflexão obtidas pelo ensaio de tenacidade à flexão realizado na FECIV-UFU





Fonte: AUTOR, 2017

A partir da curva carga *versus* deflexão, obteve-se a tenacidade de cada dosagem ao calcular a área sob as curvas. A tabela 28 exibe os resultados de cada tenacidade e os respectivos desvios padrões (S_d) e coeficientes de variação (CV), após aplicar o critério de *Chauvenet*.

Tabela 28: Valores de Tenacidade obtidos pelo ensaio à flexão ASTM C1609

Dosagem	Tenacidade à flexão segundo a ASTM C1609		
	$T_{média}$ (N.m)	S_d (N.m)	CV (%)
C20 – 0,00 % (Traço I – ref.)	-	-	-
C20 – 0,37 % (Traço II)	66,80	8,80	13,17
C20 – 0,50 % (Traço III)	72,16	11,09	15,37
C20 – 0,64 % (Traço IV)	99,67	11,17	11,21
C40 – 0,00 % (Traço V – ref.)	-	-	-
C40 – 0,37 % (Traço VI)	72,13	5,42	7,51
C40 – 0,50 % (Traço VII)	68,45	5,53	8,08
C40 – 0,64 % (Traço VIII)	118,59	13,72	11,57

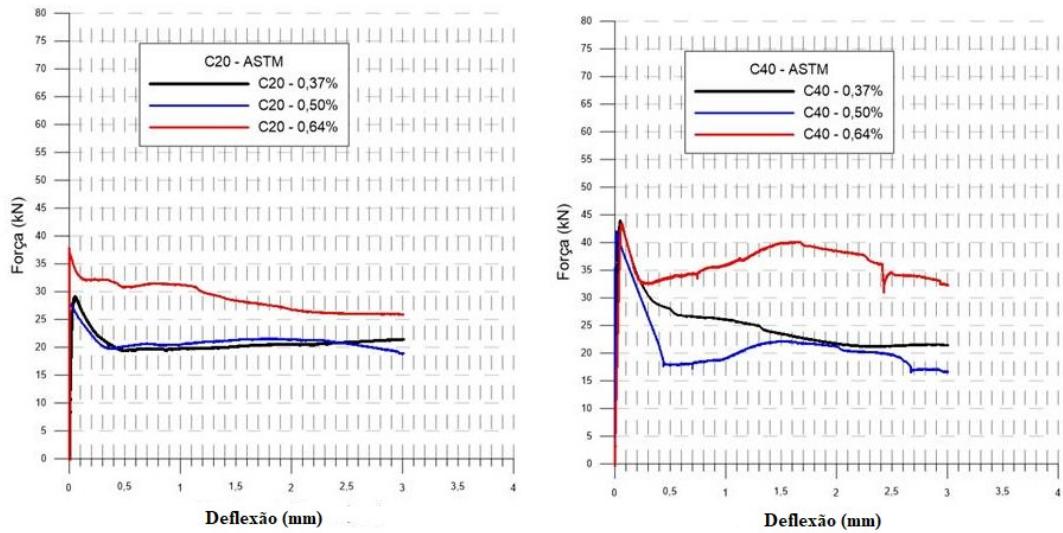
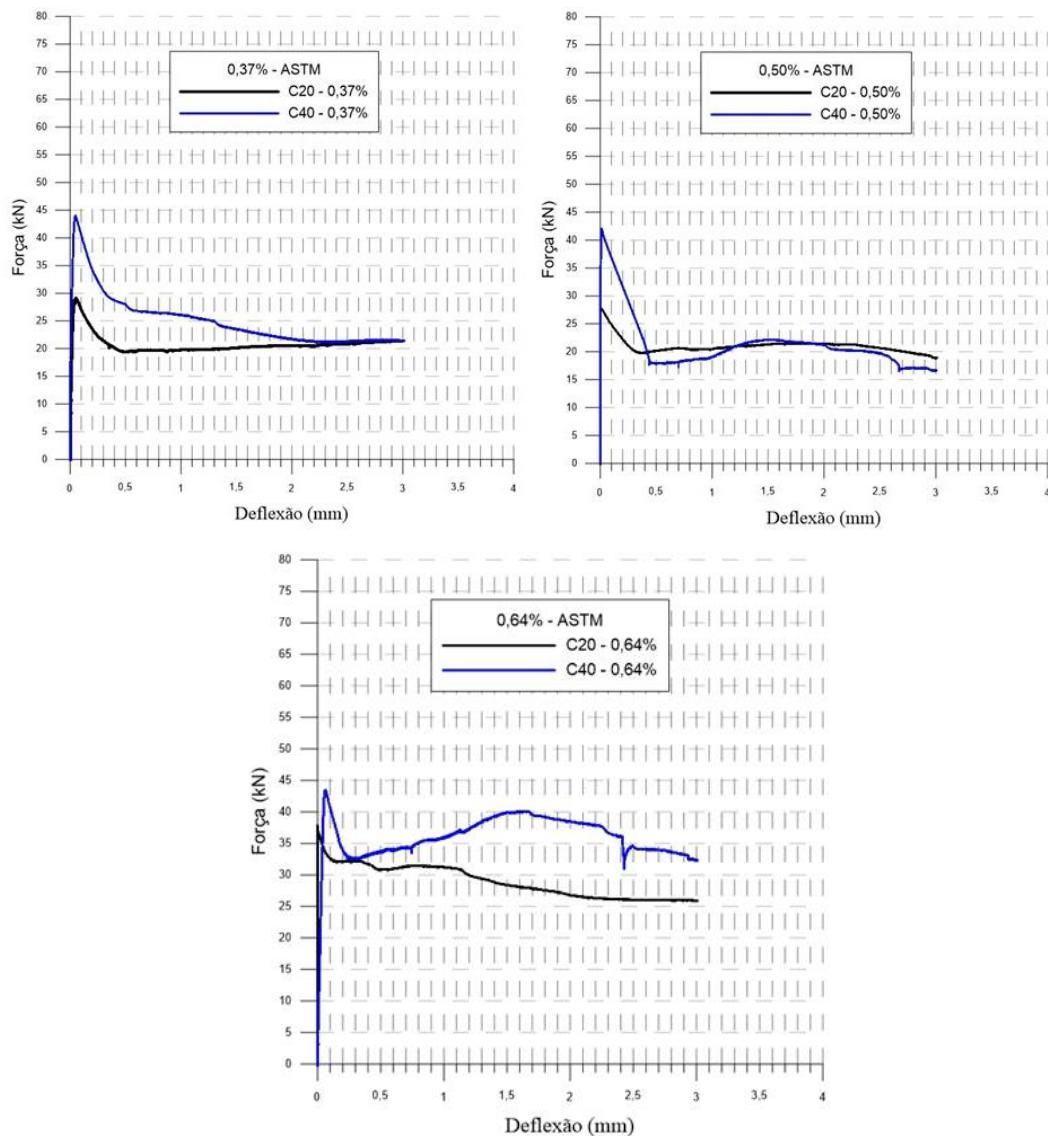
Fonte: AUTOR, 2017

Para qualquer análise de dados, um parâmetro a ser definido é a repetitividade , ou seja, a variabilidade de determinado instrumento ou teste. De tal sorte que, a repetitividade representa a capacidade do teste de fornecer respostas bem próximas, sob as mesmas condições e por repetidas vezes.

Diante das curvas da figura 41 e dos valores de desvio padrão da tabela 28, pode-se dizer que houve coerência entre os resultados obtidos pelo ensaio de desempenho à flexão ASTM C1609, conferindo indícios de repetitividade. Além disso, os valores dos coeficientes de variação encontrados apresentam similaridade e estão próximos ao limite de 16% estabelecido pela ASTM C1609:2012.

Com o objetivo de comparar a influência da resistência à compressão da matriz e o teor de fibras na tenacidade do compósito, determinou-se a curva que melhor representa cada uma das dosagens e plotou-se num mesmo gráfico alterando às variáveis.

A figura 42 indica as curvas carga *versus* deflexão, quando aumenta-se o teor de fibras e mantém a resistência da matriz. Por sua vez, a figura 43 indicam as curvas carga *versus* deflexão, quando aumenta-se a resistência da matriz e mantém o teor de fibras.

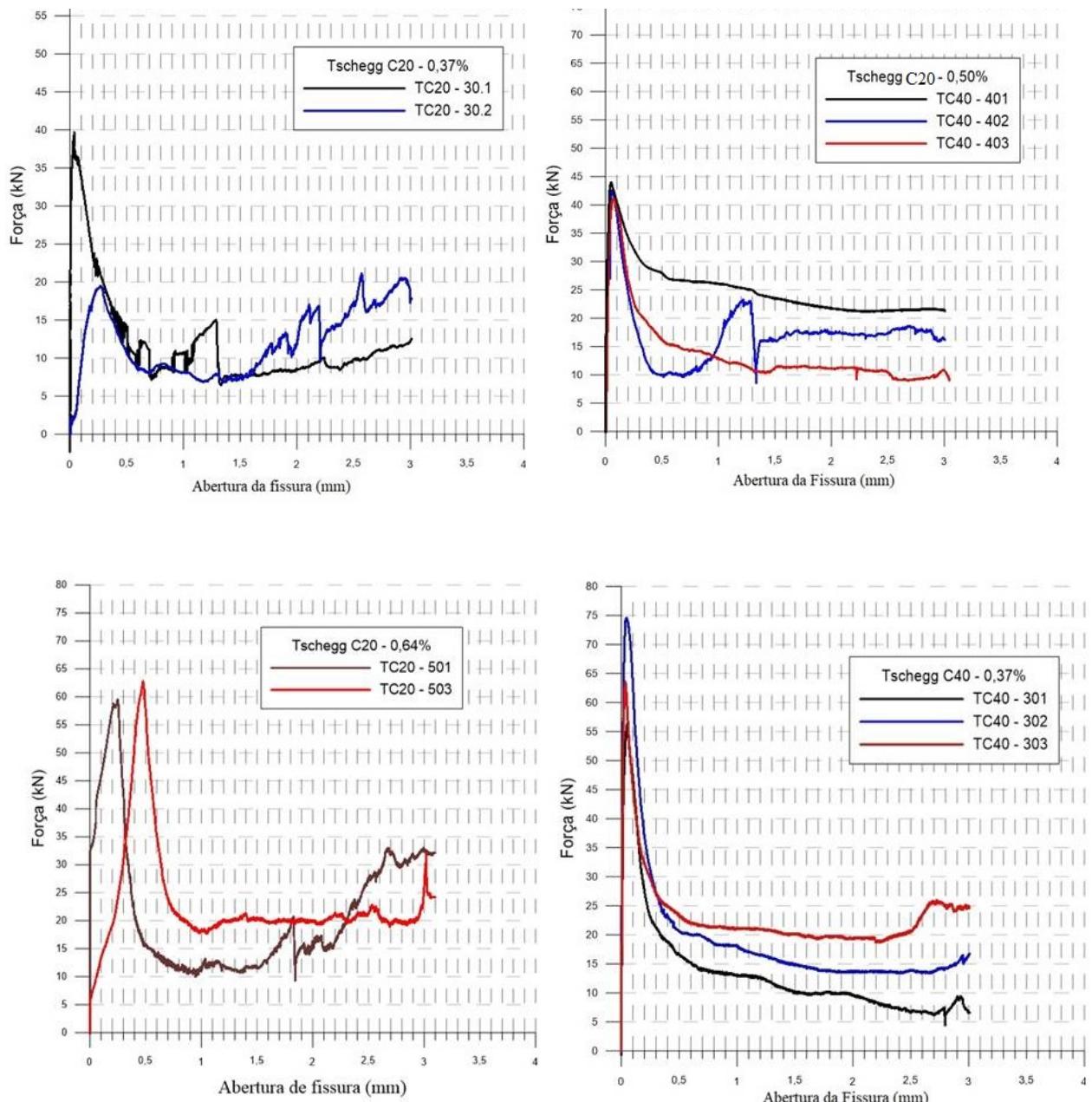
Figura 42: Curvas carga *versus* deflexão, variando o teor de fibras, para o ensaio à flexão ASTM C1609Figura 43: Curvas carga *versus* deflexão, variando a resistência da matriz, para o ensaio à flexão ASTM C1609

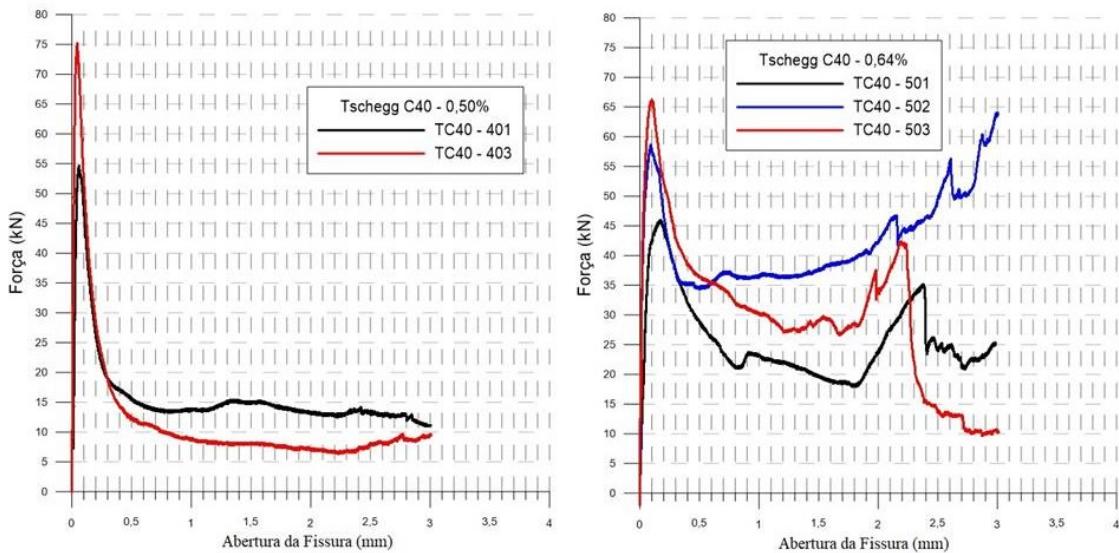
No Apêndice D são apresentados os valores de todos os corpos de prova do teste para determinação da tenacidade pelo método da ASTM.

6.5.2 Ensaio de abertura por encunhamento

Assim como para os resultados encontrados pela norma americana, as curvas carga *versus* abertura de fissuras foram traçadas para o teste de abertura por encunhamento. As curvas são apresentadas na figura 44.

Figura 44: Curvas carga versus deflexão obtidas pelo ensaio de abertura por encunhamento realizado na FECIV-UFG





Fonte: AUTOR, 2017

Os corpos de prova do traço IV (C20 – 0,64%) com 50 kg/m³ de fibras, apresentaram maiores valores de carga de pico ou carga da primeira fissura, para ambos os ensaios, destoando dos demais.

Acredita-se que isso ocorreu por alguma eventualidade durante a produção do concreto com essa dosagem, uma vez que, os ensaios foram realizados com os mesmos critérios e equipamentos. E mesmo testados em dias diferentes, apresentaram esse comportamento atípico.

Por se tratar de um procedimento de ensaio não normatizado, encontramos na literatura diferentes critérios de parada do ensaio. Borges (2017) em sua pesquisa com concretos com baixos teores de fibra de aço, utilizando o ensaio de compressão de corpo de prova com duplo corte em cunha, calcula a tenacidade até uma abertura de fissura de 2,5 mm. Tscheegg (2015), por sua vez, recomenda uma abertura de fissuras de 3,5 mm.

Como deseja-se comparar o ensaio por encunhamento com o ensaio à flexão e, este é analisado até uma deflexão de 3 mm, também obteve-se a tenacidade considerando a curva carga *versus* abertura de fissura até 3mm.

A partir da curva carga *versus* deflexão, obteve-se a tenacidade de cada dosagem ao calcular a área sob as curvas. As tabelas 29, 30 e 31 exibem os resultados de cada tenacidade e os respectivos desvios padrões (S_d) e coeficientes de variação (CV), após aplicar o critério de *Chauvenet*.

Tabela 29: Valores de Tenacidade obtidos pelo ensaio de abertura por encunhamento ($w = 2,5$)

Dosagem	Tenacidade por encunhamento ($\rho = 2,5$)		
	$T_{média}$ (N.m)	S_d (N.m)	CV (%)
C20 – 0,00 % (Traço I – ref.)	-	-	-
C20 – 0,37 % (Traço II)	36,24	5,82	16,06
C20 – 0,50 % (Traço III)	43,64	1,28	2,93
C20 – 0,64 % (Traço IV)	89,33	0,47	0,53
C40 – 0,00 % (Traço V – ref.)	-	-	-
C40 – 0,37 % (Traço VI)	52,65	8,88	16,87
C40 – 0,50 % (Traço VII)	49,97	11,09	22,19
C40 – 0,64 % (Traço VIII)	86,50	1,60	1,85

Fonte: AUTOR, 2017

Tabela 30: Valores de Tenacidade obtidos pelo ensaio de abertura por encunhamento ($w = 3,0$)

Dosagem	Tenacidade por encunhamento ($\rho = 3,0$)		
	$T_{média}$ (N.m)	S_d (N.m)	CV (%)
C20 – 0,00 % (Traço I – ref.)	-	-	-
C20 – 0,37 % (Traço II)	43,76	3,91	8,92
C20 – 0,50 % (Traço III)	46,96	6,48	13,80
C20 – 0,64 % (Traço IV)	108,59	0,41	0,38
C40 – 0,00 % (Traço V – ref.)	-	-	-
C40 – 0,37 % (Traço VI)	60,50	12,38	20,46
C40 – 0,50 % (Traço VII)	56,89	13,11	23,04
C40 – 0,64 % (Traço VIII)	96,83	2,70	2,78

Fonte: AUTOR, 2017

Tabela 31: Valores de Tenacidade obtidos pelo ensaio de abertura por encunhamento ($w = 3,5$)

Dosagem	Tenacidade por encunhamento ($p = 3,5$)		
	$T_{média}$ (N.m)	S_d (N.m)	CV (%)
C20 – 0,00 % (Traço I – ref.)	-	-	-
C20 – 0,37 % (Traço II)	50,92	2,45	4,80
C20 – 0,50 % (Traço III)	54,27	6,24	11,50
C20 – 0,64 % (Traço IV)	116,85	17,94	15,35
C40 – 0,00 % (Traço V – ref.)	-	-	-
C40 – 0,37 % (Traço VI)	70,03	17,11	24,42
C40 – 0,50 % (Traço VII)	63,60	12,76	20,06
C40 – 0,64 % (Traço VIII)	128,60	31,65	24,61

Fonte: AUTOR, 2017

Diante das curvas da figura 44 e dos valores de desvio padrão das tabelas 29, 30 e 31, pode-se dizer que também houve coerência entre os resultados obtidos pelo ensaio de abertura por encunhamento, conferindo indícios de repetitividade.

Observa-se valores de desvio padrão e coeficiente de variação mais elevados, em relação à ASTM C1609. No entanto, os valores estão similares aos encontrados por Pereira (2017) em corpos de prova com mesma dosagem, obtidos pelo Barcelona Teste Simplificado.

Tschegg *et al* (2015) observou também que uma dispersão muito maior nas curvas de carga *versus* CMOD (abertura de fissura) ocorreu nos corpos de prova de concreto reforçado com fibra de aço do que com espécimes de concreto reforçado de fibra macro sintética.

Analogamente ao realizado com o ensaio à flexão da ASTM, com o objetivo de comparar a influência da resistência à compressão da matriz e o teor de fibras na tenacidade do compósito, determinou-se a curva que melhor representa cada uma das dosagens e plotou-se num mesmo gráfico alterando às variáveis.

A figura 45 indica as curvas carga *versus* deflexão, quando aumenta-se o teor de fibras e mantém a resistência da matriz. Por sua vez, a figura 46 indica as curvas carga *versus* deflexão, quando aumenta-se a resistência da matriz e mantém o teor de fibras.

Figura 45: Curvas carga versus deflexão, variando o teor de fibras, para o ensaio de encunhamento

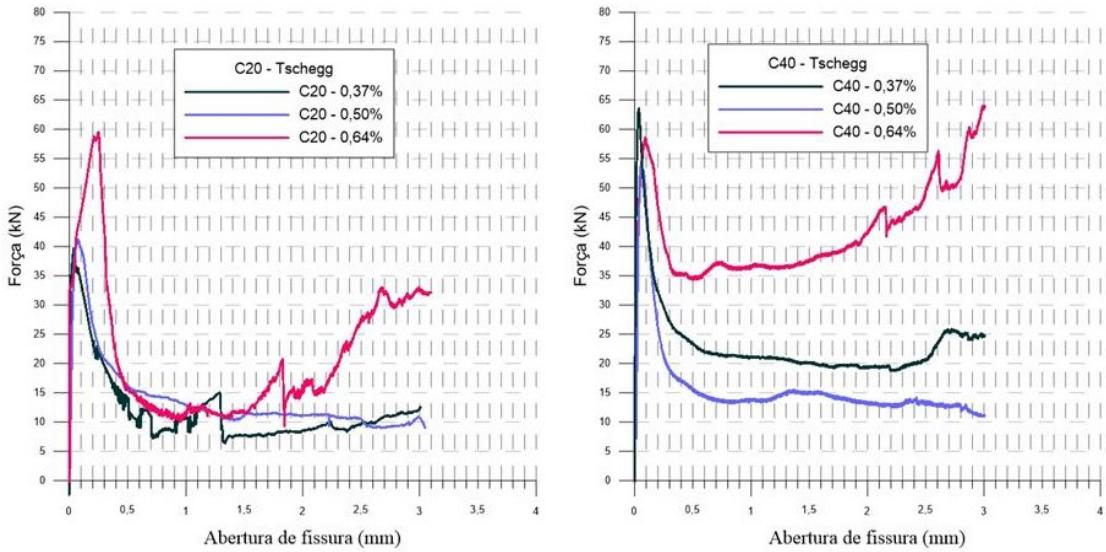
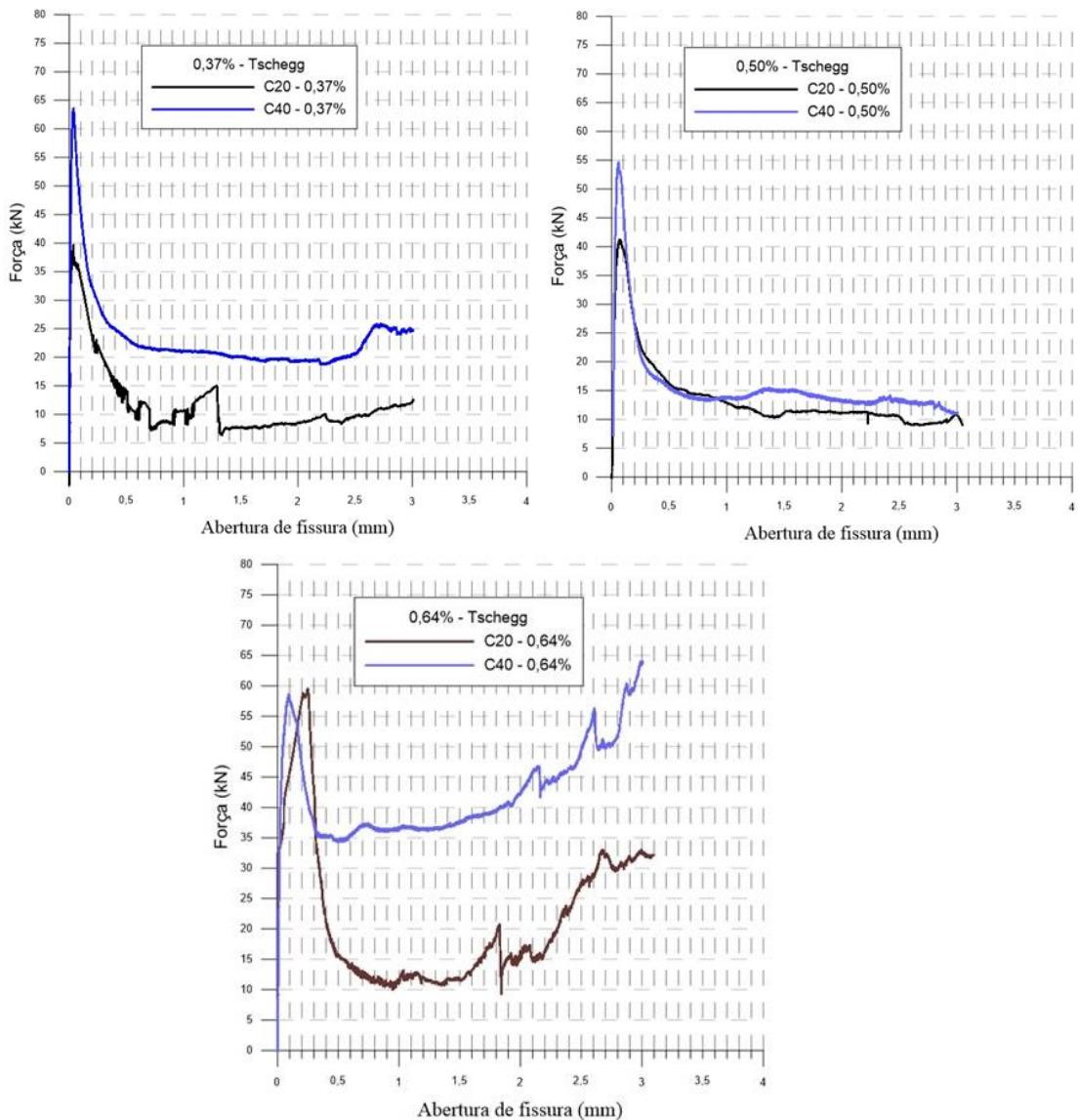


Figura 46: Curvas carga versus deflexão, variando a resistência da fibra, para o ensaio de encunhamento



No Apêndice E são apresentados os valores de todos os corpos de prova do teste para determinação da tenacidade pelo método da abertura por encunhamento.

6.5.3. Análise comparativa entre o ensaio à flexão e o ensaio de abertura por encunhamento

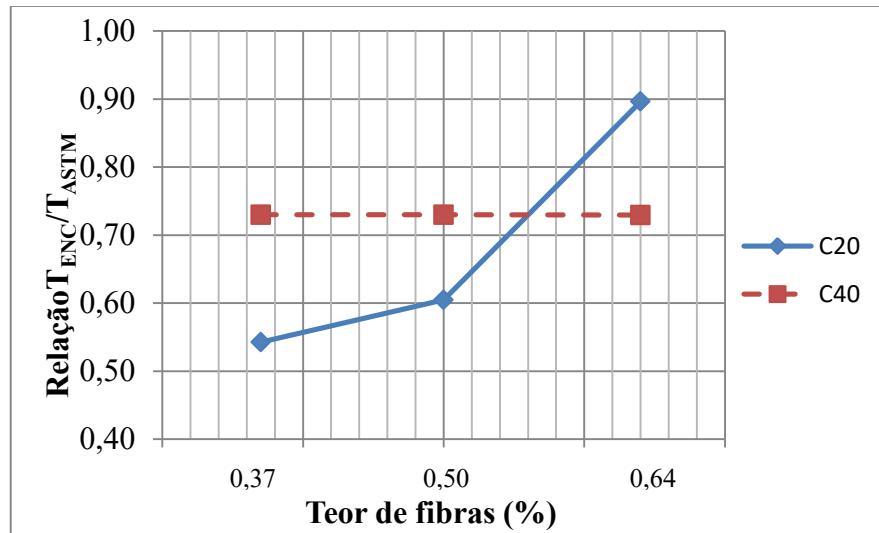
Nas tabelas 32, 33 e 34 e nas figuras 47, 48 e 49 são expostas as correlações entre as tenacidades obtidas entre os dois testes propostos nesse estudo, bem como os respectivos desvios padrões e coeficientes de variação. A correlação entre os ensaios foi realizada, considerando as três aberturas de fissuras ($w = 2,5$ mm, $w = 3,0$ mm e $w = 3,5$ mm), utilizadas para o cálculo da tenacidade pelo método do encunhamento.

Tabela 32: Correlação entre os valores de tenacidade obtidos pelos testes realizados na FECIV – UFU
(Abertura de fissura = 2,5 mm)

Dosagem	ASTM C1609			Encunhamento (w = 2,5)			Relação T_{ENC}/T_{ASTM}
	$T_{média}$ (N.m)	S_d (N.m)	CV (%)	$T_{média}$ (N.m)	S_d (N.m)	CV (%)	
C20 – 0,00 % (Traço I - ref.)	-	-	-	-	-	-	-
C20 – 0,37 % (Traço II)	66,80	8,80	13,17	36,24	5,82	16,06	0,54
C20 – 0,50 % (Traço III)	72,16	11,09	15,37	43,64	1,28	2,93	0,60
C20 – 0,64 % (Traço IV)	99,67	11,17	11,21	89,33	0,47	0,53	0,90
C40 – 0,00 % (Traço V- ref.)	-	-	-	-	-	-	-
C40 – 0,37 % (Traço VI)	72,13	5,42	7,51	52,65	8,88	16,87	0,73
C40 – 0,50 % (Traço VII)	68,45	5,53	8,08	49,97	11,09	22,19	0,73
C40 – 0,64 % (Traço VIII)	118,59	13,72	11,57	86,50	1,60	1,85	0,73

Fonte: AUTOR, 2017

Figura 47: Correlação entre os valores de tenacidade obtidos pelos testes realizados na FECIV – UFU
(Abertura de fissura = 2,5 mm)



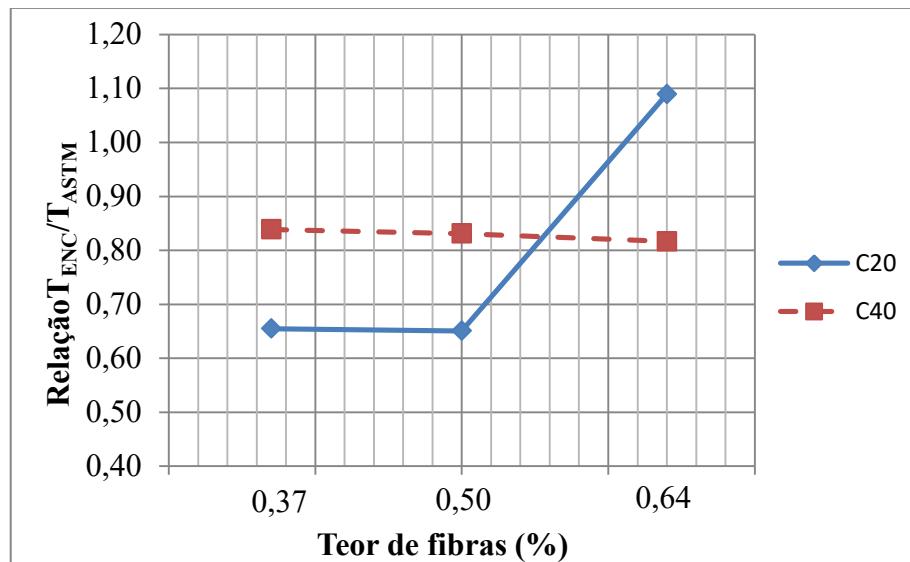
Fonte: AUTOR, 2017

Tabela 33: Correlação entre os valores de tenacidade obtidos pelos testes realizados na FECIV – UFU
(Abertura de fissura = 3,0 mm)

Dosagem	ASTM C1609			Encunhamento ($\rho = 3,0$)			Relação T_{ENC}/T_{ASTM}
	$T_{média}$ (N.m)	S_d (N.m)	CV (%)	$T_{média}$ (N.m)	S_d (N.m)	CV (%)	
C20 – 0,00 % (Traço I - ref.)	-	-	-	-	-	-	-
C20 – 0,37 % (Traço II)	66,80	8,80	13,17	43,76	3,91	8,92	0,65
C20 – 0,50 % (Traço III)	72,16	11,09	15,37	46,96	6,48	13,80	0,65
C20 – 0,64 % (Traço IV)	99,67	11,17	11,21	108,59	0,41	0,38	1,09
C40 – 0,00 % (Traço V- ref.)	-	-	-	-	-	-	-
C40 – 0,37 % (Traço VI)	72,13	5,42	7,51	60,50	12,38	20,46	0,84
C40 – 0,50 % (Traço VII)	68,45	5,53	8,08	56,89	13,11	23,04	0,83
C40 – 0,64 % (Traço VIII)	118,59	13,72	11,57	96,83	2,70	2,78	0,82

Fonte: AUTOR, 2017

Figura 48; Correlação entre os valores de tenacidade obtidos pelos testes realizados na FECIV – UFU
(Abertura de fissura = 3,0 mm)



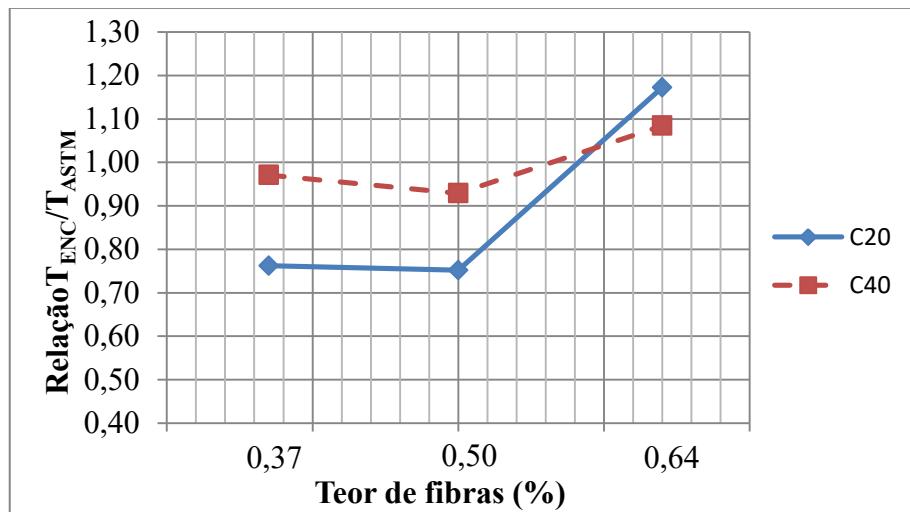
Fonte: AUTOR, 2017

Tabela 34: Correlação entre os valores de tenacidade obtidos pelos testes realizados na FECIV – UFU
(Abertura de fissura = 3,5 mm)

Dosagem	ASTM C1609			Encunhamento ($\rho = 3,5$)			Relação T_{ENC}/T_{ASTM}
	$T_{média}$ (N.m)	S_d (N.m)	CV (%)	$T_{média}$ (N.m)	S_d (N.m)	CV (%)	
C20 – 0,00 % (Traço I - ref.)	-	-	-	-	-	-	-
C20 – 0,37 % (Traço II)	66,80	8,80	13,17	50,92	2,45	4,80	0,76
C20 – 0,50 % (Traço III)	72,16	11,09	15,37	54,27	6,24	11,50	0,75
C20 – 0,64 % (Traço IV)	99,67	11,17	11,21	116,85	17,94	15,35	1,17
C40 – 0,00 % (Traço - ref.)	-	-	-	-	-	-	-
C40 – 0,37 % (Traço VI)	72,13	5,42	7,51	70,03	17,11	24,42	0,97
C40 – 0,50 % (Traço VII)	68,45	5,53	8,08	63,60	12,76	20,06	0,93
C40 – 0,64 % (Traço VIII)	118,59	13,72	11,57	128,60	31,65	24,61	1,08

Fonte: AUTOR, 2017

Figura 49: Correlação entre os valores de tenacidade obtidos pelos testes realizados na FECIV – UFU
(Abertura de fissura = 3,5 mm)



Fonte: AUTOR, 2017

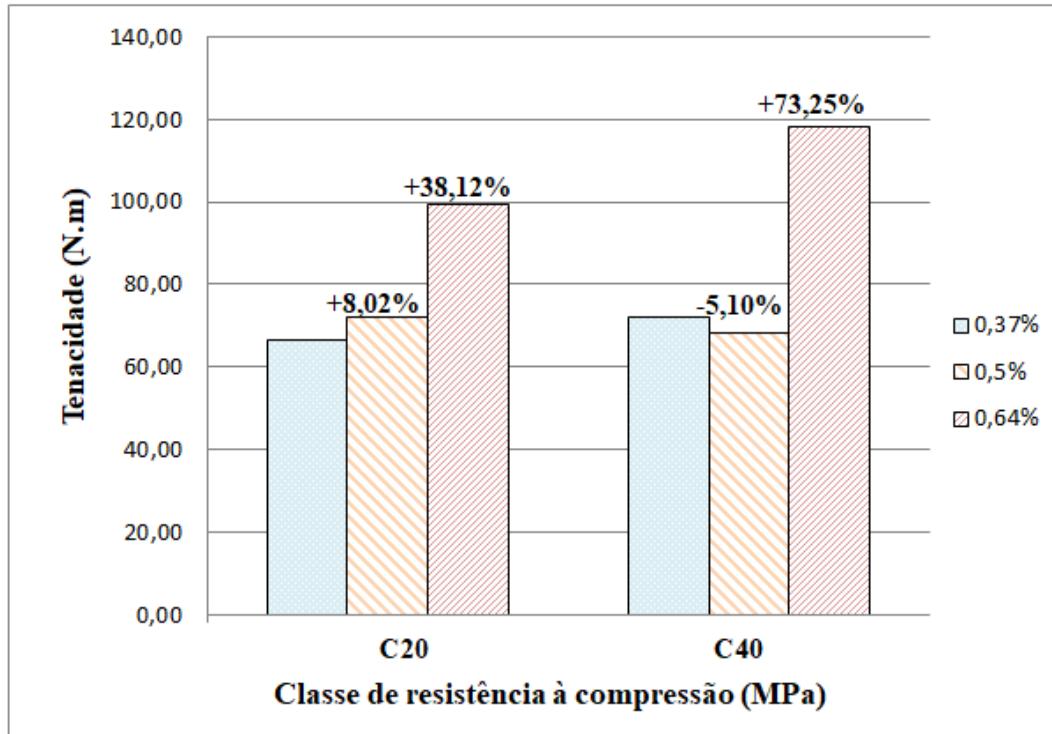
Por meio das figuras 47, 48 e 49, fica claro o comportamento discordante dos valores da dosagem IV (C20 – 0,64%), já citado nesse capítulo. Além disso, à medida que se aumenta o teor de fibra, tanto para a classe C20 quanto para a C40, observa-se uma tendência do CRFA ter um comportamento *strain-hardening* à tração, ou seja, a σ_{pc} (tensão máxima pós fissuração) ser maior que a σ_{cc} (tensão de fissuração).

Os valores da correlação entre o ensaio à tração e por encunhamento apresentam ordem de grandeza semelhante aos estudos realizados por Borges (2017), que compara a tenacidade obtida pelo ensaio de compressão com duplo corte em cunha e o método JSCE-SF4.

6.5.4 Análise fatorial: Ensaio à flexão ASTM C1609

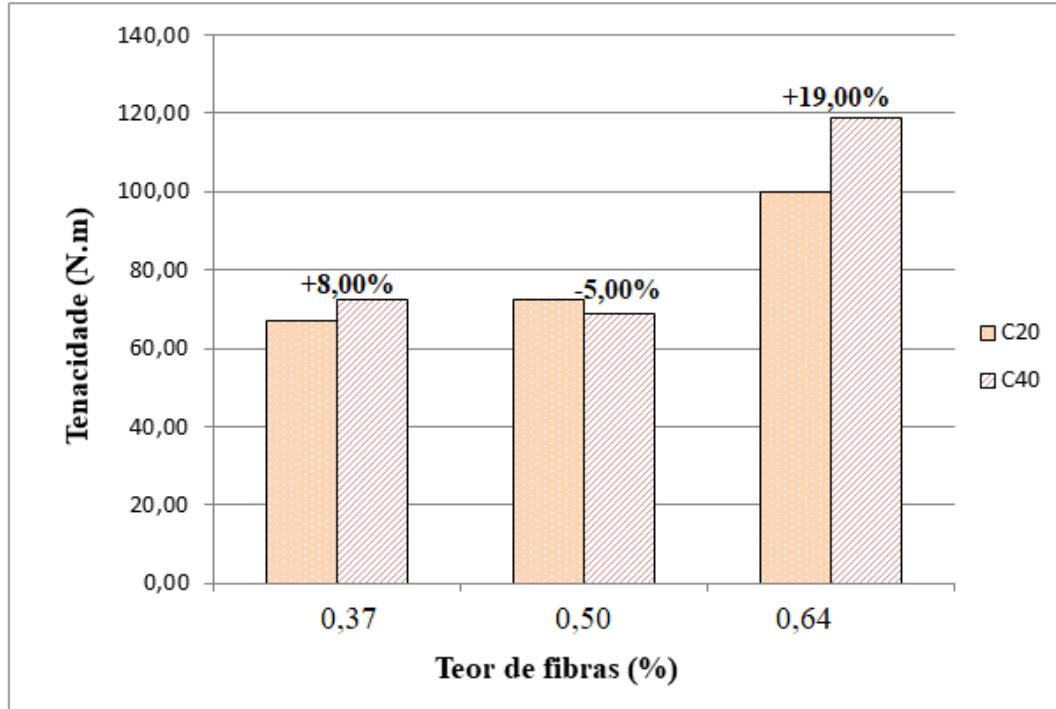
Tendo apresentado os valores obtidos pelo ensaio à flexão, as figuras 5Figura 0 e 51 expõem graficamente a interferência do teor de fibras e da resistência à compressão na tenacidade.

Figura 50: Variação na tenacidade ao aumentar o teor de fibras, segundo a ASTM



Fonte: AUTOR, 2017

Figura 51: Variação na tenacidade ao aumentar a classe de resistência, segundo a ASTM



Fonte: AUTOR, 2017

Quando se aumenta o teor de fibras, há um aumento percentual na tenacidade mais significativo, que aumentar a resistência à compressão característica.

Analizando as figuras 50 e 51, percebe-se uma queda no valor da tenacidade na dosagem C40 – 0,5% (40 kg/m^3) em relação à dosagem C40 – 0,37% (30 kg/m^3), contrariando os demais comportamentos, onde a tenacidade aumentaria com o acréscimo de fibras. No entanto, ao analisar o desvio padrão, verifica-se que as tenacidades, das duas dosagens, encontram-se num mesmo intervalo de valores.

A partir dos valores médios de tenacidade e das diretrizes de planejamento fatorial, indicadas na metodologia capítulo 5, calculou-se os efeitos devido à variação do teor de fibras e da resistência à compressão na tenacidade. Os efeitos estão dispostos nas tabelas 35, 36 e 37, e são graficamente representados nas figuras 52, 53 e 54.

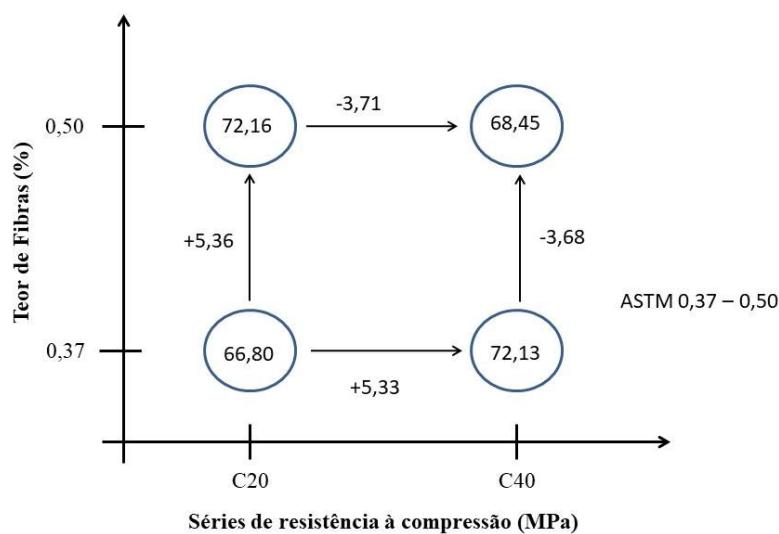
Primeiramente, têm-se os efeitos gerados na tenacidade ao variar as séries de resistência à compressão e ao aumentar o teor de fibras de 0,37 % para 0,50 %, na tabela 35 e na figura 52.

Tabela 35: Efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,37% para 0,50%)

Efeitos principais	Valores (N.m)
Efeito do teor de fibras na tenacidade, quando o teor aumenta de 0,37% para 0,50%	0,84
Efeito da resistência à compressão na tenacidade, quando alterada a série de C20 para C40	0,81
Efeito de interação entre a resistência e o teor de fibras	67,64

Fonte: AUTOR, 2017

Figura 52: Representação gráfica dos efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,37% para 0,50%)



Fonte: AUTOR, 2017

Pode-se afirmar que para as dosagens da figura 52, houve baixa alteração na tenacidade ao aumentar o teor de fibras ou a classe de resistência. Considerando o desvio padrão, os valores de tenacidade podem estar no mesmo intervalo.

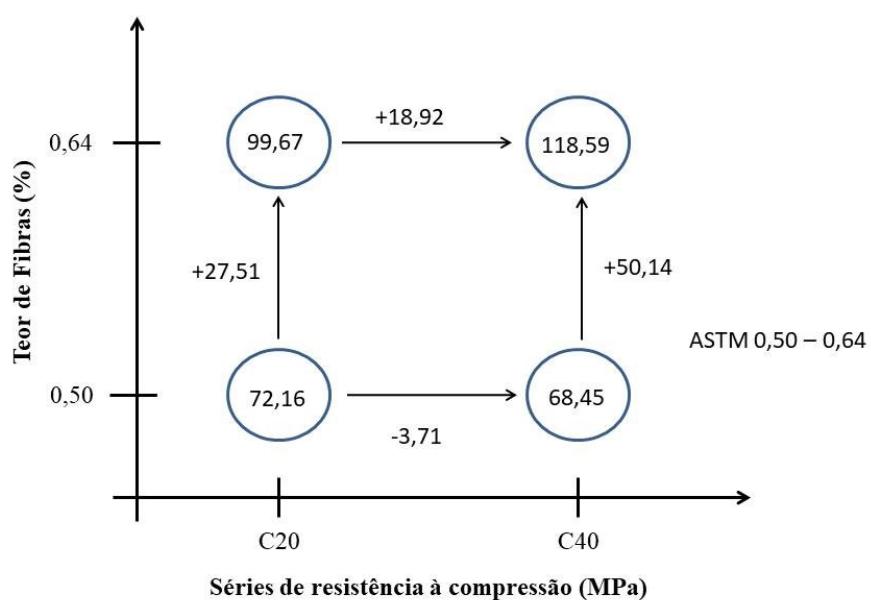
Têm-se os efeitos gerados na tenacidade ao variar as séries de resistência à compressão e ao aumentar o teor de fibras de 0,50 % para 0,64 %, na tabela 36 e na figura 53.

Tabela 36: Efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,50% para 0,64%)

Efeitos principais	Valores (N.m)
Efeito do teor de fibras na tenacidade, quando o teor aumenta de 0,50% para 0,64%	38,82
Efeito da resistência à compressão na tenacidade, quando alterada a série de C20 para C40	7,61
Efeito de interação entre a resistência e o teor de fibras	110,98

Fonte: AUTOR, 2017

Figura 533: Representação gráfica dos efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,50% para 0,64%)



Fonte: AUTOR, 2017

Pode-se afirmar que variando o teor de fibras de 0,50 % para 0,64 %, há um acréscimo mais significativo na tenacidade do que aumentar a classe de resistência à tração.

Para o teor de fibra de 0,64 %, houve um acréscimo de tenacidade quando também variou-se a classe de resistência à compressão de C20 para C40. Para o teor de fibra de 0,50%, a alteração da classe C20 para C40 causou redução na tenacidade média. No entanto, considerando o desvio padrão, os valores de tenacidade podem estar no mesmo intervalo.

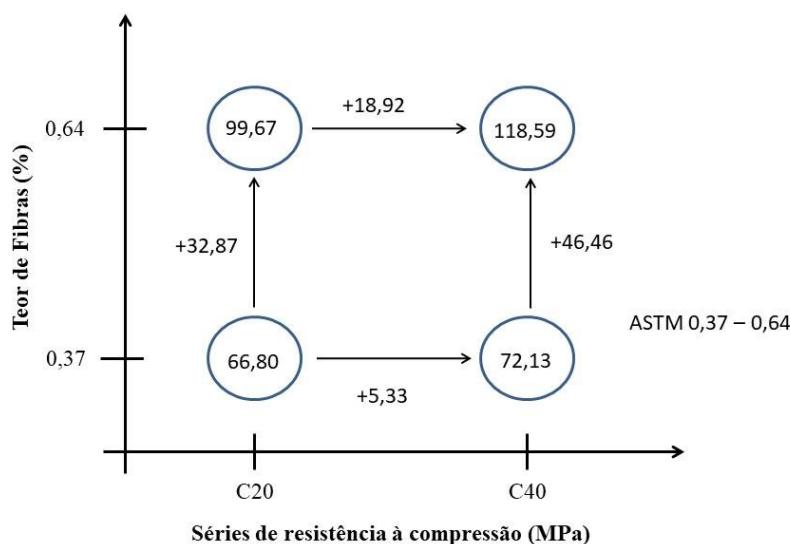
Por fim, têm-se os efeitos gerados na tenacidade ao variar as séries de resistência à compressão e ao aumentar o teor de fibras de 0,37 % para 0,64 %, na tabela 37 e na figura 54.

Tabela 37: Efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,37% para 0,64%)

Efeitos principais	Valores (N.m)
Efeito do teor de fibras na tenacidade, quando o teor aumenta de 0,37% para 0,64%	39,66
Efeito da resistência à compressão na tenacidade, quando alterada a série de C20 para C40	12,13
Efeito de interação entre a resistência e o teor de fibras	106,47

Fonte: AUTOR, 2017

Figura 54: Representação gráfica dos efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,37% para 0,64%)



Fonte: AUTOR, 2017

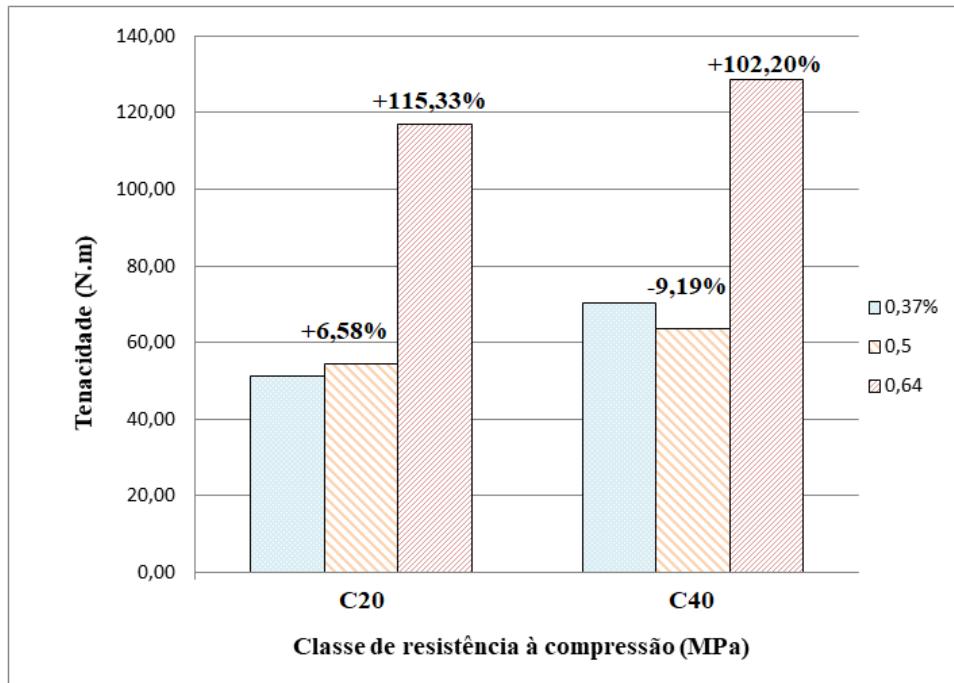
Pode-se afirmar que variando o teor de fibras de 0,37 % para 0,64 %, há um acréscimo mais significativo na tenacidade, do que aumentar a classe de resistência à tração. O maior valor de tenacidade verificado foi para a dosagem C40 – 0,64 % (50 kg/m³).

6.5.5 Análise factorial: Ensaio de abertura por encunhamento

Analogamente aos valores obtidos pelo ensaio à flexão, as figuras 55 e 56 expõem graficamente a interferência do teor de fibras e da resistência à compressão na tenacidade, segundo o teste de abertura por encunhamento.

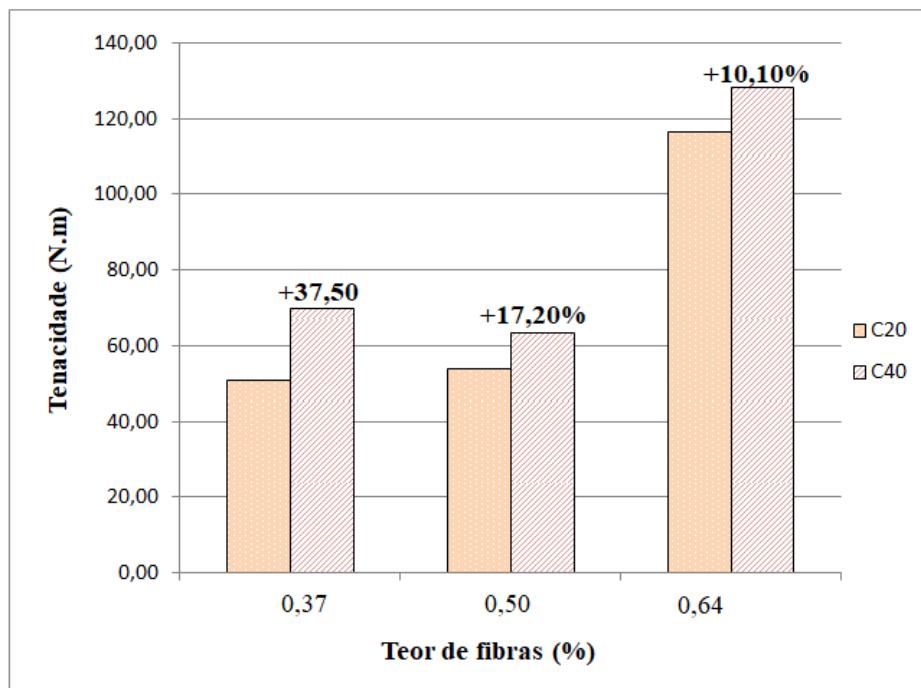
Como verificou-se no item 6.7.3, os valores de tenacidade calculados pelo método da abertura por encunhamento até a fissura atingir 3,5 mm são os mais próximos dos obtidos pelo método à flexão da ASTM C1609. Por isso, a análise a seguir utilizará apenas esses dados.

Figura 55: Variação na tenacidade ao aumentar o teor de fibras, segundo o teste por encunhamento



Fonte: AUTOR, 2017

Figura 56: Variação na tenacidade ao aumentar a classe de resistência, segundo o teste por encunhamento



Fonte: AUTOR, 2017

Assim como para o teste da ASTM, analisando a figura 58, percebe-se uma queda no valor da tenacidade na dosagem C40 – 0,5% (40 kg/m^3) em relação à dosagem C40 – 0,37% (30 kg/m^3), contrariando os demais comportamentos, onde a tenacidade aumentaria com o acréscimo de fibras. No entanto, ao analisar o desvio padrão, verifica-se que as tenacidades das duas dosagens encontram-se num mesmo intervalo de valores.

A partir dos valores médios de tenacidade e das diretrizes de planejamento fatorial, indicadas no inicio do capítulo 6, semelhante ao que se realizou com os dados obtidos pela ASTM C1609, calculou-se os efeitos devidos à variação do teor de fibras e da resistência à compressão na tenacidade. Os efeitos estão dispostos nas tabelas 38, 39 e 40, e são graficamente representados nas figuras 57, 58 e 59.

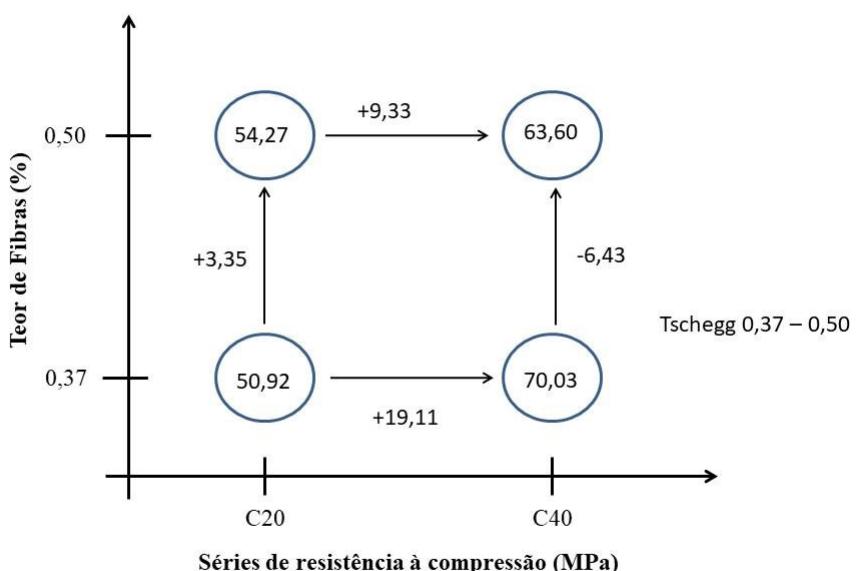
Primeiramente, têm-se os efeitos gerados na tenacidade ao variar as séries de resistência à compressão e ao aumentar o teor de fibras de 0,37 % para 0,50 %, na tabela 38 e na figura 57.

Tabela 38: Efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,37% para 0,50%)

Efeitos principais	Valores (N.m)
Efeito do teor de fibras na tenacidade, quando o teor aumenta de 0,37% para 0,50%	-1,54
Efeito da resistência à compressão na tenacidade, quando alterada a série de C20 para C40	14,23
Efeito de interação entre a resistência e o teor de fibras	49,37

Fonte: AUTOR, 2017

Figura 57: Representação gráfica dos efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,37% para 0,50%)



Fonte: AUTOR, 2017

Pode-se afirmar que para as dosagens da figura 57, houve baixa alteração na tenacidade ao aumentar o teor de fibras. Ao aumentar a classe de C20 para C40, o concreto com teor de fibras de 0,37 %, teve aumento de tenacidade. Diferente do resultado encontrado na ASTM C1609, ao aumentar a classe de resistência à compressão para corpos de prova com 0,50 % de fibras, a tenacidade também aumentou. Mas, da mesma forma, observando-se o desvio padrão, ambos pertencem ao mesmo intervalo.

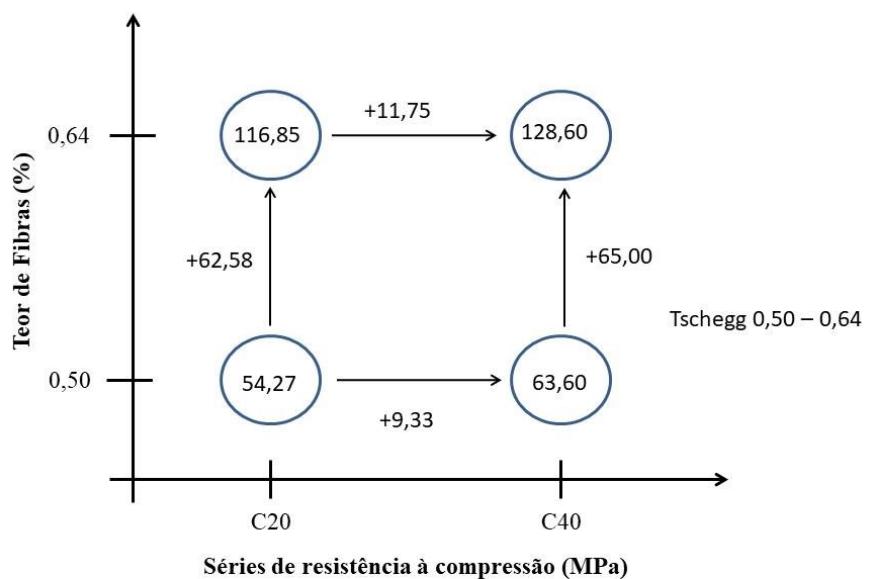
Têm-se os efeitos gerados na tenacidade ao variar as séries de resistência à compressão e ao aumentar o teor de fibras de 0,50 % para 0,64 %, na tabela 39 e na figura 58.

Tabela 39: Efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,50% para 0,64%)

Efeitos principais	Valores (N.m)
Efeito do teor de fibras na tenacidade, quando o teor aumenta de 0,50% para 0,64%	63,79
Efeito da resistência à compressão na tenacidade, quando alterada a série de C20 para C40	10,54
Efeito de interação entre a resistência e o teor de fibras	118,06

Fonte: AUTOR, 2017

Figura 58: Representação gráfica dos efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,50% para 0,64%)



Fonte: AUTOR, 2017

Pode-se afirmar que variando o teor de fibras de 0,50 % para 0,64 %, há um acréscimo mais significativo na tenacidade, do que aumentar a classe de resistência à tração.

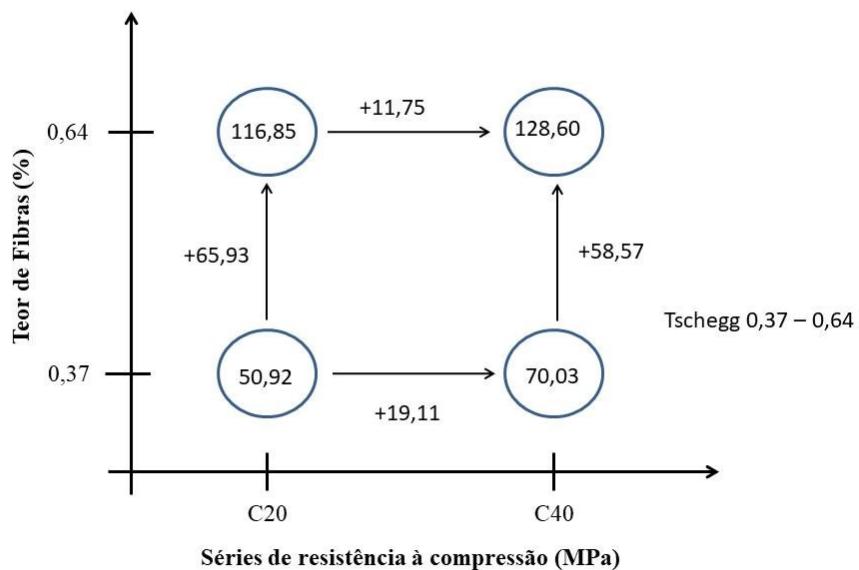
Por fim, têm-se os efeitos gerados na tenacidade ao variar as séries de resistência à compressão e ao aumentar o teor de fibras de 0,37 % para 0,64 %, na tabela 40 e na figura 59.

Tabela 40: Efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,37% para 0,64%)

Efeitos principais	Valores (N.m)
Efeito do teor de fibras na tenacidade, quando o teor aumenta de 0,37% para 0,64%	62,25
Efeito da resistência à compressão na tenacidade, quando alterada a série de C20 para C40	15,43
Efeito de interação entre a resistência e o teor de fibras	113,16

Fonte: AUTOR, 2017

Figura 59: Representação gráfica dos efeitos devido à variação da resistência à compressão e do teor de fibras na tenacidade (Teor de fibras de 0,37% para 0,64%)



Fonte: AUTOR, 2017

Como nas outras análises, variando-se o teor de fibras de 0,37 % para 0,64 %, há um acréscimo mais significativo na tenacidade, do que aumentando a classe de resistência à tração. O maior valor de tenacidade verificado foi para a dosagem C40 – 0,64 % (50 kg/m^3).

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSÃO

O objetivo principal desta pesquisa foi a investigação experimental do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras, com foco na tenacidade e estabelecer uma correlação entre o ensaio à tração ASTM C1609 (2012) e de abertura por enchimento (TSCHEGG, 2015). Verificou-se também, a influência do teor de fibras de aço nas propriedades mecânicas do CRFA. Os resultados dessa pesquisa foram qualitativos (observações das curvas) e quantitativos (valores obtidos por meio dos testes realizados). Assim sendo, com os resultados analisados no capítulo 6, conclui-se:

A adição de fibras de aço promoveu ganhos na resistência à compressão, resistência à tração e módulo de tenacidade do concreto, em relação ao concreto sem fibras. O ganho mais significativo foi para a resistência à tração por compressão diametral do CRFA. Isso se justifica pela diminuição da propagação de fissuras, uma vez que as fibras servem como pontes de transferência de tensões pelas fissuras e aumentam a ductilidade.

A influência do teor de fibras na tenacidade à flexão é maior que a influência da resistência à compressão do concreto. O aumento de teor de fibras é favorável, pois uma quantidade maior de fibras interceptará a fissura formada, melhorando a capacidade de absorção de energia pós-fissuração do compósito.

O método ASTM C1609 obteve o maior ganho de tenacidade à flexão (50,14 N.m) quando o teor de fibra foi alterado de 0,50 % para 0,64 %, para a classe de resistência C40. Por outro lado, o maior aumento de tenacidade (18,92 N.m) quando a classe de concreto foi alterada de C20 para C40 foi para teor de fibra de 0,64 %.

Da mesma forma, o método de abertura por encunhamento obteve o maior ganho de tenacidade à flexão (65,93 N.m) quando o teor de fibra foi alterado de 0,37 % para 0,64%, para a classe de resistência C20. E o maior aumento de tenacidade (19,11 N.m) que ocorreu quando a classe de concreto foi alterada de C20 para C40 foi para teor de fibra de 0,37 %.

Observou-se que o acréscimo de tenacidade mais significativo ocorre quando há aumento no teor de fibras, se comparado com o aumento da resistência à compressão da matriz. Identificou-se também o início do comportamento *strain hardening* à tração do compósito dosado com 0,64% (50 kg/m^3) de fibras, tanto para o procedimento de ensaio da ASTM C1609, quanto para o ensaio de encunhamento por abertura de fissura.

Os valores de tenacidade obtidos pelo ensaio de abertura por encunhamento mais próximos aos obtidos pelo ensaio à flexão ASTM C1609 foram os calculados considerando a abertura de fissura até 3,5 mm.

Os valores de tenacidade à tração do ensaio de abertura por encunhamento apresentaram maior coeficiente de variação. No entanto, por não se tratar de uma metodologia de ensaio normatizada, não há um valor de referência ou limite na literatura técnica. O coeficiente de variação no ensaio ASTM C1609 não ultrapassou o limite estipulado de 16%.

Para a preparação dos corpos de prova cúbicos, prescritos pelo método de abertura por encunhamento, houve dificuldade na realização do entalhe que exige precisão em suas dimensões e corte para posicionamento correto da cunha. Outra dificuldade foi no posicionamento e equilíbrio do próprio corpo de prova entre as cunhas e célula de carga antes da aplicação de carga do teste.

No entanto, de maneira geral, o teste proposto por Tschegg (2015) apresenta-se como uma boa alternativa de controle tecnológico do concreto reforçado com fibras. Pois, apresenta indicativos de reproduzibilidade e coerência, quando comparado com o consagrado teste ASTM C1609 (2012), dimensões reduzidas dos corpos de prova e facilidade de implementação, uma vez que, não utiliza máquina de ensaio com sistema fechado (*closed loop*).

7.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Comparação dos resultados encontrados de abertura de fissura nesse estudo, por LVDTs, com os obtidos por um *Clip gage*.
- Comparação desses resultados com a tenacidade determinada por outros procedimentos, por exemplo, EN 1461 e Barcelona teste simplificado.
- Determinação do volume crítico de fibras para as dosagens utilizadas nesse estudo.
- Verificação dos valores de tenacidade obtidos pelo ensaio de abertura por encunhamento em concretos com teores de fibras acima do crítico, ou seja, com comportamento *strain hardening*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

ALMEIDA, M.O DE. **Estudo da tenacidade e proposta de nova configuração do estudo de flexão em placas para os concretos reforçados com fibras de aço.** 192p. Dissertação (Mestrado) - Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318M-11: **Building Code Requirements for Structural Concrete.** Michigan, USA, 2011.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete (ACI 544-4R-88).** In: Manual of concrete Practice. Detroit, Michigan, v. 85. 1988.

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.

ARAÚZ, A. C. **Resistência ao cisalhamento de vigas em concreto armado reforçada com fibras de aço.** 2002. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

ARAÚZ, A. C. **Resistência ao cisalhamento de vigas em concreto armado reforçada com fibras de aço.** 2002. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

ARIF, M. A. **Avaliação da medida de tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço.** 2014. 155 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

- ASLANI, F.; Nejadi, S. **Bond characteristics of steel fibre reinforced self-compacting concrete.** Can. J. Civ. Eng., v. 39, p. 834-848, 2012. <https://doi.org/10.1139/l2012-069>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova, Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **ACI 544.4R:** Design considerations for steel fiber reinforced concrete. ACI Committee 544. Detroit, USA, 1988. Reapproved 2009.
- _____. **NBR 15530:** Fibras de aço para concreto – Especificação, Rio de Janeiro, 2007.
- _____. **NBR 15530:** Fibras de aço para concreto – Especificação, Rio de Janeiro, 2007.
- _____. **NBR 5739:** Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2007.
- _____. **NBR 7222:** Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2011.
- _____. **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 NM 23:** Cimento Portland – Determinação da massa específica, Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios, Rio de Janeiro, 2006.
- _____. **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.
- BALAGURU, P. N., SHAH, S. P. **Fiber-Reinforced Cement Composites.** McGraw-Hill International Editions, 1992.
- BARROS NETO, B.; Scarminio, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos:** pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. 401 p. 2^a ed. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2001.
- BARTOS, P. S **Review paper: Bond in fibre reinforced cements and concretes.** The [https://doi.org/10.1016/0262-5075\(81\)90049-X](https://doi.org/10.1016/0262-5075(81)90049-X)
- BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites.** London and New York: Modern Concrete Technology Series, 601 p. 2 ed. 2007.
- BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites.** United Kingdom. Elsevier, 1990.
- 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.
- 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.
- BORGES, L.A.C. **Ensaio de compressão de corpo de prova com duplo corte em cunha na avaliação de concretos com baixos teores de fibra de aço.** 2017. 146 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

BRANDT, A.M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite Structures*, v. 86, p. 3-9, 2008.<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.006>

CALLISTER JUNIOR, W.D; RETHWISCH; D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 8^a ed., 2012. 817 p.

COLOMBO, M.; DI PRISCO, M.; MAZZOLENI, L. **Glass fiber reinforced concrete at high temperatures**. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM, 7, 2008, Chennai, India. Proceedings. PRO 60. Fiber Reinforced Concrete: Design and Applications. Chennai, India: Ravindra Gettu, 2008. p. 115-124.

DANIEL, M. I.; ISHAI, O. **Engineering mechanics of composite materials**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2006.

DATTATREYA, J. K.; HARISH, K. V.; NEELAMEGAN, M. **Investigation of flexural toughness and fracture energy of high and ultra high performance fiber reinforced concrete**. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM, 7, 2008, Chennai, India. Proceedings. PRO 60. Fiber Reinforced Concrete: Design and Applications. Chennai, India: Ravindra Gettu, 2008. p. 231-242.

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

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Model Code 2010: First Complete Draft**. v. 1, Switzerland, 2010.

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.

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

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.

GOPALARATNAM, V. S.; GETTU, R. **On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concretes**. In: Cement & Concrete Composites, 1995. v.17, n. 3, p. 239 – 254. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)99506-O](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)99506-O)

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

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, 2016, 39p.

ISLAM. S. T. **Study of Some 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.

JOHNSTON, D. C. **Fiber-Reinforced Cements and Concrete. Advances in Concrete technology.** International Center for Sustainable development of Cement and Concrete. v. 1. Canada: Ontario, Ottawa, 2001.

KÖKSAL, F.; ALTUN, F.; YIGIT, I.; SAHIN, Y. **Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes.** Construction and Building Materials, n. 22, p. 1874-1880, 2008.

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

LI, V.C. **Performance driven design of fiber reinforced cementitious composites.** In: SWAMY, R. N. Fourth Rilem International Symposium on Fibre Reinforced Cement and Concrete. RILEM Symposium FRC 92. Proceedings. 1992.

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.

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.

MARAR, K.; EREN, O.; YITMEN, I. Compression specific toughness of normal strength steel fiber reinforced concrete (NSSFRC) and high strength steel fiber reinforced concrete (HSSFRC). Materials Research, São Carlos, v. 14, n. 2, p. 239-247, may. 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 751 p.

METHA, P.K E MONTEIRO, P.J.M., Concreto: estruturas, propriedades e materiais, Editora PINI, São Paulo, 1994, pág 434 a 446.

MINDESS, S. Fibre reinforced concrete: challenges and prospects. In: Second University-Industry Workshop on Fiber Reinforced Concrete and Other Advanced Materials. Toronto, Canada, 1995. Proceedings. p.1-12.

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. DE. Avaliação da tenacidade de concretos reforçados com fibras através de ensaios com sistema aberto. Revista Matéria, v. 19, n. 2, pp. 132-149, 2014

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; REINHARDT, H.W. High Performance Fiber Reinforced Cement Composites . 1^a ed. USA: E & FN SPON, 1995.

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

OLIVEIRA JUNIOR, L. A. **Ligaçāo 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.

PARMENTIER, B.; VANDEWALLE, L.; RICKSTAL, V. Evaluation of the scatter of the postpeak behavior of fiber reinforced concrete in bending: A step towards reliability. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM, 7, 2008, Chennai, India. Proceedings. PRO 60. Fiber Reinforced Concrete: Design and Applications. Chennai, India: Ravindra Gettu, 2008. p. 133-144.

PEREIRA, M. M. **Análise comparativa da medida de tenacidade por meio do ensaio por encunhamento e do Barcelona simplificado.** 2017. Qualificação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

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.

POLAKOWSKI, N.H.; RIPLING, E.J. Strength and structure of engineering materials. USA. Prentice-Hall, Inc. 1966.

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.

RILEM TC 162. Final recommendation of RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – ζ - ϵ design method. Materials and Structures. Vol. 36. October 2003. Pp. 560-657.

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.; 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.

SALVADOR. R. P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras.** Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

di Prisco, M.; FERRARA, L.; LAMPERTI, M. G. L. **Double edge wedge splitting (DEWS) na indirect tension test to identify post-cracking behaviour of fibre reinforced cementitious composites.** Material ans Structures, 2013. 26 p.

SEVERI, A. A.. **Estudo dos gradientes térmicos em pavimentos de concreto de cimento portland no ambiente tropical.** 2002. Tese (doutorado). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

SORANAKOM, C.; MOBASHER, B. **Correlation of tensile na flexural responses of strain softening and strain hardening cement composites.** Cement & Concrete Composites, v. 30, pp. 465-477, 2008

SILVA, F. A.; MOBASHER, B; TOLEDO FILHO, R. D. **Recent advances in high performance (sisal) fiber cement composites.** In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM, 7, 2008, Chennai, India. Proceedings. PRO 60. Fiber Reinforced Concrete: Design and Applications. Chennai, India: Ravindra Gettu, 2008. p. 105-114.

SONG, P. S; HWANG, S. **Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete.** Construction and Building Materials, v. 18, p. 669-673, 2004.

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

SUKONTASUKKUL, P. **Tensile behaviour of hybrid fibre-reinforced concrete.** Advances in Cement Research, v. 16, n. 3, pp 115-122, jul.2004

TAMAKI, L. **Reforço de fibra.** Revista Téchne, São Paulo, Edição 170, mai. 2011. Disponível em: < <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/170/artigo287841-1.aspx>>. Acesso em: 06 ago. 2015.

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.; ELSER, M; STANZL-TSCHEGG, S. E. Biaxial Fracture Tests on Concrete – Development and Experience. **Cement & Concrete Composites**, v. 17, p. 57-75, 1995a.

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. **Cement & Concrete Composites**. v. 62, p. 95-203, 2015.

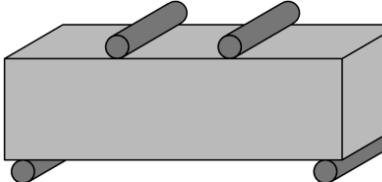
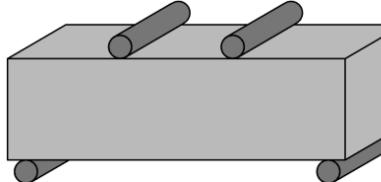
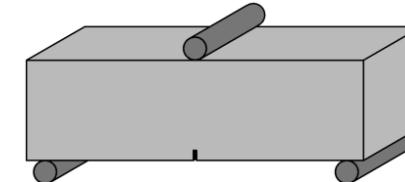
VILLARES, A. M. O. **Influência da largura do corpo-de-prova na medida da tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço.** 2001. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

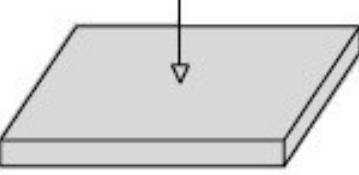
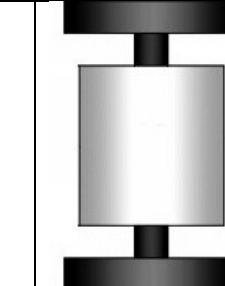
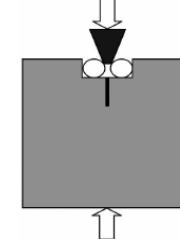
VITOR, P. C. P. **Resistência ao cisalhamento de vigas de concreto armado sem armadura transversal reforçadas com fibras de aço.** 2017. 224 f. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

ZHANG, P.; ZHAO, Y.; LI, Q.; WANG, P.; ZHANG, T.. **Flexural toughness of steel fiber reinforced high performance concrete containing nano-Sio2 and fly ash.** The Scientific World Journal, april. 2014.

ANEXO A

SÍNTESE DOS PRINCIPAIS MÉTODOS DE ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE

Método de ensaio	JSCE-SF4 (1984)	ASTM C1609 (2012)	EN 14651 (2007)
Esquema de ensaio			
Tipo de controle de ensaio	<i>Open loop</i>	Closed loop	Closed loop
Equipamento de controle da máquina	LVDT	LVDT	LVDT 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 150 mm x 150 mm x 500 mm	100 mm x 100 mm x 350 mm 150 mm x 150 mm x 500 mm	150 mm x 150 mm x 550 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)	—

Método de ensaio	EFNARC (1996)	AENOR UNE 83515 (2010)	Método da cunha - WST (1986)
Tipo de controle de ensaio			
	<i>Open loop</i>	<i>Open loop</i>	<i>Open loop</i>
Equipamento de controle da máquina	LVDT	LVDT	LVDT
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; SALUDES, 2006.

APÊNDICE A

RESULTADOS DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO

	Compressão aos 28 dias				Compressão aos 60 dias			
	CP I	CP II	Media	D.P.	CP I	CP II	Media	D.P.
C20 - 0	18,17	23,90	21,04	2,86	24,79	29,34	27,07	2,28
C20 - 30	23,27	26,68	24,98	1,71	30,24	27,86	29,05	1,19
C20 - 40	30,42	28,36	29,39	1,03	35,73	31,17	33,45	2,28
C20 - 50	29,02	32,05	30,54	1,52	32,36	36,86	34,61	1,70
C40 - 0	40,60	34,84	37,72	2,88	40,01	46,15	43,08	0,54
C40 - 30	35,34	42,06	38,70	3,36	43,54	47,10	45,32	1,78
C40 - 40	45,88	46,70	46,29	0,41	42,03	46,23	44,13	2,10
C40 - 50	42,23	41,33	41,78	0,45	45,46	46,44	44,48	0,23

Unidade: MPa

APÊNDICE B

RESULTADOS DAS RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

	CP 1	CP 2	CP 3	Media	D.P.
C20 - 0	3,07	3,10	2,98	3,05	0,05
C20 - 30	3,842	3,634	4,04	3,84	0,17
C20 - 40	3,074	3,074	3,074	3,07	0,00
C20 - 50	2,65	5,1	3,27	3,67	1,04
C40 - 0	4,61	4,17	5,04	4,61	0,36
C40 - 30	6,88	4,9	6,94	6,24	0,95
C40 - 40	6,91	7,77	8,51	7,73	0,65
C50 - 50	5,6	6,56	6,08	6,08	0,39

Unidade: MPa

APÊNDICE C

RESULTADOS DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE

	Módulo de elasticidade aos 28 dias				Módulo de elasticidade aos 60 dias			
	Ec 1	Ec 2	Ecm	D.P	Ec 1	Ec 2	Ecm	D.P
C20 - 0	28,64	32,85	30,75	2,10	33,46	36,40	34,93	1,47
C20 - 30	32,42	34,71	33,56	1,15	36,95	35,47	36,21	0,74
C20 - 40	37,06	35,79	36,43	0,64	40,17	37,52	38,84	1,33
C20 - 50	36,20	38,04	37,12	0,92	26,41	23,32	39,53	1,54
C40 - 0	42,82	39,67	41,24	1,58	42,51	41,93	44,11	0,29
C40 - 30	39,95	43,58	41,77	1,82	44,34	46,12	45,23	0,89
C40 - 40	45,52	45,92	45,72	0,20	43,57	45,69	44,63	1,06
C50 - 50	43,67	43,20	43,44	0,23	41,13	41,39	44,82	0,13

Unidade: GPa

APÊNDICE D

RESULTADOS DE TENACIDADE PELO MÉTODO DA ASTM C1609

	ASTM					
	$\rho = 3,0$					
	CP-01	CP-02	CP-03	Média	D.P.	C.V.
C20 - 0	0,39	0,69	1,04	0,71	0,27	37,59
C20 - 30	75,63	69,99	54,79	66,80	8,80	13,17
C20 - 40	64,32	87,85	64,31	72,16	11,09	15,37
C20 - 50	95,63	114,91	88,46	99,67	11,17	11,21
C40 - 0	1,51	3,74	5,81	3,69	1,76	47,63
C40 - 30	78,65	72,35	65,39	72,13	5,42	7,51
C40 - 40	66,09	63,18	76,09	68,45	5,53	8,08
C40 - 50	116,30	136,43	103,05	118,59	13,72	11,57

Unidade: N.m

Aplicação do critério de Chauvenet:

Xi - X			r		
-0,32	-0,02	0,33	-1,19	-0,06	1,25
8,83	3,19	-12,01	1,00	0,36	-1,36
-7,84	15,69	-7,85	-0,71	1,41	-0,71
-4,04	15,24	-11,21	-0,36	1,36	-1,00
-2,18	0,05	2,12	-1,24	0,03	1,21
6,52	0,22	-6,74	1,20	0,04	-1,24
-2,36	-5,27	7,64	-0,43	-0,95	1,38
-2,29	17,84	-15,54	-0,17	1,30	-1,13

APÊNDICE E

RESULTADOS DE TENACIDADE PELO MÉTODO DA ABERTURA POR ENCUNHAMENTO

	$\rho = 2,5$					
	CP-01	CP-02	CP-03	Média	D.P.	C.V.
C20 - 0	23,81	6,58	-	15,20	8,62	56,70
C20 - 30	42,06	30,42	-	36,24	5,82	16,06
C20 - 40	31,50	44,92	42,36	39,59	5,82	14,69
C20 - 50	88,86	62,27	89,80	80,31	12,76	15,89
C40 - 0	24,72	27,34	27,22	26,43	1,21	4,57
C40 - 30	40,69	55,30	61,95	52,65	8,88	16,87
C40 - 40	61,05	-	38,88	49,97	11,09	22,19
C40 - 50	84,90	113,50	88,10	95,50	12,79	13,40

Unidade: N.m

Aplicação do critério de Chauvenet:

$X_i - \bar{X}$			r		
8,62	-8,62	-	1,00	-1,00	-
5,82	-5,82	-	1,00	-1,00	-
-8,09	5,33	2,77	-1,39	0,92	0,48
8,55	-18,04	9,49	0,67	-1,41	0,74
-1,71	0,91	0,79	-1,41	0,76	0,66
-11,96	2,65	9,30	-1,35	0,30	1,05
11,09	-	-11,09	1,00	-	-1,00
-10,60	18,00	-7,40	-0,83	1,41	-0,58

	$\rho = 3,0$					
	CP-01	CP-02	CP-03	Média	D.P.	C.V.
C20 - 0	24,98	7,88	-	16,43	8,55	52,04
C20 - 30	47,66	39,85	-	43,76	3,91	8,92
C20 - 40	38,24	53,76	48,89	46,96	6,48	13,80
C20 - 50	108,17	75,55	109,00	97,57	15,58	15,96
C40 - 0	24,72	28,47	27,22	26,80	1,56	5,82
C40 - 30	44,37	62,66	74,46	60,50	12,38	20,46
C40 - 40	69,99	-	43,78	56,89	13,11	23,04
C40 - 50	99,52	141,81	94,13	111,82	21,32	19,07

Unidade: N.m

Aplicação do critério de Chauvenet:

Xi - X			r		
8,55	-8,55	-	1,00	-1,00	-
3,91	-3,90	-	1,00	-1,00	-
-8,72	6,80	1,93	-1,35	1,05	0,30
10,60	-22,02	11,43	0,68	-1,41	0,73
-2,08	1,67	0,42	-1,34	1,07	0,27
-16,13	2,16	13,96	-1,30	0,17	1,13
13,11	-	-13,11	1,00	-	-1,00
-12,30	29,99	-17,69	-0,58	1,41	-0,83

$\rho = 3,5$					
CP-01	CP-02	CP-03	Média	D.P.	C.V.
25,25	9,61	-	17,43	7,82	44,87
53,36	48,47	-	50,92	2,45	4,80
46,34	61,59	54,87	54,27	6,24	11,50
131,21	91,56	127,78	116,85	17,94	15,35
24,72	29,43	27,22	27,12	1,92	7,09
47,85	72,77	89,48	70,03	17,11	24,42
76,36	-	50,84	63,60	12,76	20,06
114,46	172,45	98,89	128,60	31,65	24,61

Unidade: N.m

Aplicação do critério de Chauvenet:

$X_i - \bar{X}$			r		
7,82	-7,82	-	1,00	-1,00	-
2,45	-2,45	-	1,00	-1,00	-
-7,93	7,32	0,60	-1,27	1,17	0,10
14,36	-25,29	10,93	0,80	-1,41	0,61
-2,40	2,31	0,10	-1,25	1,20	0,05
-22,18	2,74	19,45	-1,30	0,16	1,14
12,76	-	-12,76	1,00	-	-1,00
-14,14	43,85	-29,71	-0,45	1,39	-0,94