



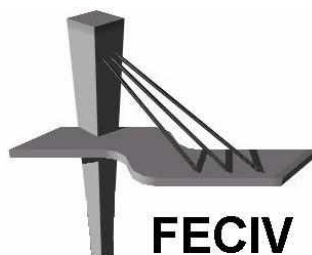
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CORRELAÇÃO DE VALORES DE TENACIDADE DO
CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO OBTIDOS
PELA ASTM C1609:2012 E EN 14651:2007

JULIETE RIBEIRO DA SILVA

UBERLÂNDIA, 21 DE NOVEMBRO DE 2018



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



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



Juliete Ribeiro da Silva

**CORRELAÇÃO DE VALORES DE TENACIDADE DO
CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO
OBTIDOS PELA ASTM C1609:2012 E EN 14651:2007**

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

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos

Uberlândia, 21 de novembro de 2018

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

S586c
2018 Silva, Juliete Ribeiro da, 1992-
Correlação de valores de tenacidade do concreto reforçado com
fibras de aço obtidos pela ASTM C1609:2012 E EN 14651:2007
[recurso eletrônico] / Juliete Ribeiro da Silva. - 2018.

Orientador: Antonio Carlos dos Santos.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.313>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. 2. Concreto. 3. Materiais compostos. 4. Fibras
de metal. I. Santos, Antonio Carlos dos, 1968-, (Orient.) II. Universidade
Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil. III. Título.

CDU: 624

Maria Salete de Freitas Pinheiro - CRB6/1262



ATA

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

ATA Nº: 229/2018

CANDIDATO: Juliete Ribeiro da Silva **Nº. Matrícula:** 11622ECV005

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos

TÍTULO: “Correlação dos valores de tenacidade do concreto reforçado com as fibras de aço obtidos pela ASTM C1609: 2012 e EN 14651: 2007”.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Estruturas e Construção Civil

LINHA DE PESQUISA: Estruturas

PROJETO DE PESQUISA: Correlação dos valores de tenacidade do concreto reforçado com as fibras de aço obtidos pela ASTM C1609: 2012 e EN 14651: 2007

DATA DA DEFESA: 21 de novembro de 2018

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

HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO: 14:30h - 17:20h

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 PPGE, assim composta pelos professores doutores: **Andrielli Moraes de Oliveira – EECA/UFG; Antônio de Paulo Peruzzi – FECIV/UFU e Antonio Carlos dos Santos – FECIV/UFU**, orientador da candidata. Ressalta-se que os Professores Antonio Carlos dos Santos e Andrielli Moraes de Oliveira participaram da banca via webconferência desde as respectivas cidades de Ottawa/ON e Goiânia/GO e a discente e o Prof. Antônio de Paulo Peruzzi participaram in loco.

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

Membros titulares:

Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos – FECIV/UFU

Prof.^a Dr.^a Andrielli Moraes de Oliveira – EECA/UFG

Uberlândia, 13 de novembro de 2018.



Documento assinado eletronicamente por **Antonio de Paulo Peruzzi, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/11/2018, às 16:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andrielli Moraes de Oliveira, Usuário Externo**, em 30/11/2018, às 08:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antônio Carlos dos Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/11/2018, às 12:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0871166** e o código CRC **A95A2080**.

A minha mãe Lia e aos meus irmãos Marcelo e Renato que, com muito carinho, apoio e incentivo, não medem esforços para o meu crescimento profissional.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me permitir realizar tantos sonhos nesta existência.

Aos professores do PPGE/UFU, em especial ao Antonio Carlos dos Santos por me orientar com sabedoria e competência.

Aos membros da banca examinadora, Prof.^a Andrielli Oliveira e Prof. Antônio de Paulo Peruzzi, que tão gentilmente aceitaram participar e colaborar com esta dissertação.

À Prof. Núbia da Faculdade de Engenharia Mecânica pela ajuda na realização de parte do programa experimental.

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

Aos meus amigos por todo apoio e incentivo durante esses anos, em especial Valter Montes, Alessandra Campos, Mariana Caroline, Andréia Carneiro, Daniel Valério, Leonardo Marques, Fernanda Duarte e Aline Zanqueta.

Aos amigos que conquistei na PPGE/UFU em especial Marco Aurélio Tomaz, Lorena Silva, Paulo Victor, Lara Peres, Raphael Fonseca, Luana Borges, e Mohammed Arif, que foram bons companheiros no dia a dia desta jornada.

Ao escritório Grandelli Projetos e Engenharia, em especial ao Eng. Dener Antônio por todo apoio, incentivo e amizade.

À minha mãe Lia, irmãos Marcelo e Renato deixo um agradecimento especial pelo apoio incondicional ao longo de toda a minha formação educacional. Essa conquista é por vocês!

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

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Civil, que forneceram o apoio necessário à realização da pesquisa.

À FAPEMIG pelo indispensável apoio financeiro.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação, o meu sincero agradecimento.

Silva, J. R. **Correlação dos valores de tenacidade do concreto reforçado com as fibras de aço obtidos pela ASTM C1609: 2012 e EN 14651: 2007**. 118p. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

RESUMO

O objetivo deste trabalho consiste em analisar experimentalmente a medida de tenacidade de amostras de concreto reforçado com fibras de aço, conforme as recomendações das normas internacionais ASTM C1609:2012 e EN 14651:2007 e então comparar tais metodologias. Deseja-se também, avaliar a influência da resistência à compressão e o teor de fibras na medida de tenacidade. Foram utilizadas duas matrizes de concreto com resistência à compressão de 20 MPa (C20) e 40 MPa (C40), sem fibras e com três dosagens de fibras correspondentes a 30 kg/m³, 40 kg/m³ e 50 kg/m³. Para a avaliação da tenacidade foram moldados 48 corpos de prova prismáticos e 64 corpos de prova cilíndricos para a caracterização do compósito por meio de ensaios de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral. Após a realização dos ensaios e análise dos resultados, verifica-se como esperado que as fibras de aço conferem ao concreto um aumento na tenacidade à tração na flexão. Os resultados indicam que o aumento da medida de tenacidade do CRFA foi maior quando se aumentou o teor de fibras no compósito, se comparado à alteração na resistência à compressão da matriz cimentícia. Além disso, em comparação aos resultados obtidos por tais ensaios observa-se maiores medidas de tenacidade para o método proposto pela ASTM C1609:2012, entretanto os valores encontrados pela norma EN 14651:2007 apresentaram menor desvio padrão. Tal comportamento é explicado pois a formação da primeira fissura ocorre na região do plano de entalhe, reduzindo a dissipação de energia no corpo de prova. Por fim, conclui-se que existe uma correlação entre os métodos de aproximadamente 0,50 e 0,36 para a classe de resistência C20 e C40, respectivamente. Sendo que esta é fortemente dependente do volume de fibras adicionado.

Palavras-chave: Materiais Compósitos. Concreto Reforçado com Fibras de aço. Métodos de ensaio. Tenacidade. Correlação.

Silva, J. R. **Correlation of toughness values of concrete strengthened with steel fibers obtained by ASTM C1609: 2012 e EN 14651: 2007**. 118p. MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2018.

ABSTRACT

The objective of this work is to experimentally analyze the toughness measurement of steel reinforced concrete samples according to the recommendations of international standards ASTM C1609:2012 and EN 14651:2007 and then compare such methodologies. It is also desired to evaluate the influence of the compressive strength and the fiber content in the toughness measurement. Two concrete matrices with compressive strength of 20 MPa (C20) and 40 MPa (C40) were used, without fibers and with three dosages of fibers corresponding to 30 kg/m³, 40 kg/m³ and 50 kg/m³. For the evaluation of the tenacity, 48 prismatic specimens and 64 cylindrical specimens were molded for the characterization of the composite by means of tests of compressive strength and tensile strength by diametrical compression. After the tests and results analysis, it is expected that the steel fibers give the concrete an increase in tensile strength in flexion. The results indicate that the increase of the CRFA toughness measure was higher when the fiber content in the composite was increased, when compared to the change in the compressive strength of the cementitious matrix. In addition, in comparison to the results obtained by these tests, greater measures of toughness are observed for the method proposed by ASTM C1609:2012, however the values found by standard EN 14651:2007 presented lower standard deviation. Such behavior is explained because the formation of the first crack occurs in the region of the notch plane, reducing energy dissipation in the specimen. Finally, it is concluded that there is a correlation between the methods of approximately 0.50 and 0.36 for the resistance class C20 and C40, respectively. This is strongly dependent on the volume of fibers added.

Keywords: Composite Materials. Reinforced Concrete with Steel Fibers. Test Methods. Toughness. Correlation.

ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

cm	- Centímetro
m	- Metro
mm	- Milímetro
min	- Minuto
kg	- Quilograma
MPa	- Megapascal
N	- Newton
g	- Grama
GPa	- Gigapascal

SIGLAS

ACI	- American Concrete Institute
AENOR	- <i>Asociación Española de Normalización y Certificación</i>
ARS	- Resistência Residual Média
ASTM	- <i>American Society For Testing Materials</i>
CMOD	- <i>Crack Mouth Opening Displacement</i>
CRF	- Concreto Reforçado Com Fibras
CRFA	- Concreto Reforçado Com Fibras De Aço
CS	- Concreto Simples
CP	- Corpo de Prova
EN	- <i>European Committee for Standardization</i>
EBS	- Ensaio Barcelona Simplificado
EFNARC	- <i>European Federation of National Associations Representing for Concrete</i>
Feciv	- Faculdade de Engenharia Civil
FIB	- <i>Fédération Internationale Du Béton</i>

FT	- Fator de tenacidade
IBRACON	- Instituto Brasileiro do Concreto
JSCE	- <i>Japan Society of Civil Engineers</i>
LVDT	- <i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MOR	- Módulo de ruptura
TCOD	- <i>Total Circumferential Opening Displacement</i>
UFU	- Universidade Federal de Uberlândia

SÍMBOLOS

a	- Comprimento de uma fenda superficial ou metade do comprimento de uma fissura interna.
b	- Largura do corpo de prova
b	- Largura da seção transversal com falha
CV	- Coeficiente de variação
D	- Diâmetro do corpo de prova
d	- Diâmetro da fibra.
d_{cp}	- Diâmetro do corpo de prova
E_M	- Módulo de elasticidade médio
f_c	- Resistência à compressão
f_{cm}	- Resistência a compressão média
F_c	- Força de compressão máxima
FH	- Força Horizontal
FM	- Força da máquina
FT	- Fator de tenacidade
FV	- Força Vertical
F_j	- Carga correspondente ao CMODj
F_L	- Carga correspondente ao LOP
$f_{R,j}$	- Resistência residual à tração do CRF
$f_{R,1k}$	- Resistência residual característica para abertura de fissura de 0,50 mm
$f_{R,3k}$	- Resistência residual característica para abertura de fissura de 2,50 mm
f_T	- Resistência à tração por compressão diametral
F_T	- Força de ruptura

h	- Altura do corpo de prova
h	- Altura da seção transversal com falha.
h_{sp}	- Distância entre a ponta do entalhe e a face superior do corpo de prova.
L	- Vão de ensaio
l	- Comprimento da fibra
l_c	- Comprimento crítico
l_{cp}	- Comprimento do corpo de prova
MOR	- Módulo de ruptura
$M_{SOLICIT}$	- Momento solicitante (refere-se ao momento devido ao carregamento que a estrutura está submetida);
M_{SD}	- Momento solicitante de cálculo;
M_U	- Momento resistente devido ao uso do CRF;
M_{RESIST}	- Momento resistente devido a utilização da armadura;
P	- Carga máxima obtida
$P_{média}$	- Carga residual média
S_d	- Desvio padrão
V_f	- Volume de fibras
x_{ext}	- Valores extremos da amostra
x_i	- Valores medidos
x_m	- Média
XX	- Resistência média à compressão
YY	- Dosagem de fibra
λ	- Fator de forma
τ_c	- Tensão de escoamento ao cisalhamento da matriz ou resistência de ligação entre fibra e matriz
σ_m	- Tensão máxima na ponta da fissura
σ_0	- Tensão de tração nominal
σ_f	- Limite de escoamento à tração ou resistência máxima
ρ_t	- Raio de curvatura da ponta da fenda
σ	- Desvio padrão (erro na medida);
k	- Número de fatores experimentais presentes no planejamento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de classificação dos materiais compósitos	24
Figura 2 – Principais tipos de fibras de aço e seções mais utilizadas.....	26
Figura 3- (A) CRF com compatibilidade dimensional e (B) CRF sem compatibilidade.....	28
Figura 4 - Diagrama de tensão x deformação para diferentes comprimentos de fibra: (a) $l < l_c$, (b) $l = l_c$ e (c) $l > l_c$	29
Figura 5 – Curva de Força x Deflexão para diferentes volumes de fibras: (A) $V_f < V_c$; (B) $V_f > V_c$ e (C) $V_f = V_c$;.....	30
Figura 6 – Arranjos possíveis das fibras nos compósitos.....	31
Figura 7 – (a) Concreto sem fibras, (b) concreto com fibras.....	32
Figura 8 – Formas de atuação da fibra durante a fissuração do concreto.....	34
Figura 9 – Aumento da resistência à tração em ensaios de compressão diametral de CRF	36
Figura 10 - Representação esquemática do comportamento tensão-deformação em tração para materiais frágeis e dúcteis carregados até a fratura	37
Figura 11 – (a) Sistema open-loop, (b) sistema closed-loop	38
Figura 12 - Curvas carga-deslocamento vertical obtidas com sistemas open-loop e closed-loop	39
Figura 13 - Esquema de ensaio de punção em placas quadradas, prescrito pela Efnarc (1996)	44
Figura 14 – (a) Ensaio de punção; (b) Placa após o ensaio de punção, conforme recomendações da Efnarc (1996)	44
Figura 15 - Ensaio de punção: (a) ensaio Barcelona; (b) ensaio Barcelona Simplificado	45
Figura 16 - Configuração do ensaio de abertura por encunhamento;.....	46
Figura 17- Ensaio de encunhamento de concreto reforçado com fibras de aço	47
Figura 18 – Ensaio de flexão, segundo a norma JSCE-SF4:1984	48
Figura 19 - Esquema de ensaio de flexão segundo a norma JSCE-SF4:1984.....	49

Figura 20 - Critério da JSCE-SF4: 1984 para a determinação da medida de tenacidade	49
Figura 21 – (a) Ensaio de tração à flexão segundo a ASTM C1609:2012	52
Figura 22 - Esquema de ensaio de tração à flexão segundo a ASTM C1609:2012	52
Figura 23 – a) Ensaio e b) esquema de ensaio de flexão em corpo de prova entalhado utilizando o controle CMOD, segundo a EN 14651:2007.....	54
Figura 24 – Local de entalhe no corpo de prova	55
Figura 25 - Curva de Carga por CMOD	56
Figura 26 - Geometria e dimensões da fibra de aço utilizada	62
Figura 27 - Fibra metálica utilizada.....	62
Figura 28 - Procedimento de moldagem dos corpos de prova prismáticos	64
Figura 29 - Etapas de produção dos corpos de prova prismáticos.....	65
Figura 30 – Realização do ensaio de compressão	66
Figura 31 – (a) Realização do ensaio de compressão diametral, (b) CS 40 e CRF 40/40 após o ensaio de compressão diametral	67
Figura 32 - Marcação do corpo de prova.....	68
Figura 33 – (a) borracha para fixação de LVDT em dispositivo YOKE; (b) Fixação de borracha no dispositivo YOKE	69
Figura 34 – (a) Ensaio de tração à flexão segundo a ASTM 1609; (b) Corpo de prova após ensaio de tração à flexão segundo a ASTM 1609	69
Figura 35 – Realização do entalhe conforme recomendações da norma EN 14651:2007	71
Figura 36- Corpo de prova após o procedimento de entalhe prescrito pela EN 14651: 2007	71
Figura 37 – Ensaio de tração à flexão segundo recomendações da EN 14651:2007	72
Figura 38 – Curvas de força por deslocamento vertical obtidas a partir do ensaio de tração à flexão conforme recomendações da norma ASTM 1609: 2012, para os traços: (a) CRF 20/30, (b) CRF20/40, (c) CRF 20/50.....	83
Figura 39 – Curvas de força por deslocamento vertical obtidas a partir do ensaio de tração à flexão conforme recomendações da norma ASTM 1609:2012, para os traços: (a) CRF 40/30, (b) CRF40/40, (c) CRF 40/50.....	84
Figura 40 – Curvas de força por deslocamento vertical de espécies com a mesma matriz cimentícia de resistência e com variação do teor de fibras, obtidas por meio do ensaio prescrito pela ASTM C1609: (a) Matriz cimentícia de 20MPa e (b) Matriz cimentícia de 40 MPa.....	85

Figura 41 - Curvas de força por deslocamento vertical, com variação a resistência e mesmo volume de fibras, obtidas por meio do ensaio prescrito pela ASTM C1609: (a) volume de fibras 30 kg/m ³ , (b) volume de fibras 40 kg/m ³ e (c) volume de 50 kg/m ³ ..	86
Figura 42 - Variação da medida de tenacidade ao aumentar o volume de fibras.....	87
Figura 43 - Variação da tenacidade ao aumentar a classe de resistência à compressão.	87
Figura 44 - Representação gráfica dos efeitos gerados pela variação da resistência à compressão e volume de fibras na medida de tenacidade (volume de fibras de 30 kg/m ³ para 40 kg/m ³).....	88
Figura 45 - Representação gráfica dos efeitos gerados pela variação da resistência à compressão e volume de fibras na medida de tenacidade (volume de fibras de 30 kg/m ³ para 40 kg/m ³).....	89
Figura 46 - Representação gráfica dos efeitos gerados pela variação da resistência à compressão e volume de fibras na medida de tenacidade (volume de fibras de 30 kg/m ³ para 50 kg/m ³).....	90
Figura 47 - Curvas de força por CMOD obtidas a partir do ensaio de tração à flexão conforme recomendações da norma EN 14651, para os traços: (a) CRF 20/30, (b) CRF 20/40, (c) CRF 20/50	92
Figura 48 - Curvas de força por CMOD obtidas a partir do ensaio de tração à flexão conforme recomendações da norma EN 14651, para os traços: (a) CRF 40/30, (b) CRF 40/40 e (c) CRF 40/50.....	93
Figura 49 - Curvas de força por CMOD, variando o volume de fibras, obtidas por meio do ensaio prescrito pela EN 14651: (a) Matriz cimentícia de 20MPa e (b) Matriz cimentícia de 40 MPa	95
Figura 50 - Curvas de força por CMOD, variando a resistência da matriz, obtidas por meio do ensaio prescrito pela EN 14651: (a) volume de fibras 30 kg/m ³ , (b) volume de fibras 40 kg/m ³ e (c) volume de 50 kg/m ³	96
Figura 51- Variação da medida de tenacidade ao aumentar o volume de fibras (EN)...	97
Figura 52 - Variação da tenacidade ao aumentar a classe de resistência à compressão.	97
Figura 53 - Representação gráfica dos efeitos gerados pela variação da resistência à compressão e volume de fibras na medida de tenacidade (volume de fibras de 30 kg/m ³ para 40 kg/m ³).....	98
Figura 54 - Representação gráfica dos efeitos gerados pela variação da resistência à compressão e volume de fibras na medida de tenacidade (volume de fibras de 40 kg/m ³ para 50 kg/m ³).....	99

Figura 55 - Representação gráfica dos efeitos gerados pela variação da resistência à compressão e volume de fibras na medida de tenacidade (volume de fibras de 30 kg/m ³ para 50 kg/m ³).....	100
Figura 56 – Correlação entre os valores de tenacidade obtidos pelos ensaios prescritos nas normas EN 14651: 2007 e ASTM C1609: 2012 até o deslocamento vertical de 3 mm	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibra e matrizes.....	25
Tabela 2 - Resultados experimentais de ensaios de flexão em CRFA	40
Tabela 3 - Tenacidade à flexão para corpos de prova com largura variável	40
Tabela 4 - Incremento de velocidade de carregamento	53
Tabela 5 - Correlação entre CMOD e δ	57
Tabela 6 - Classes para as resistências residuais f_R , $3k/f_R$, $1k$	58
Tabela 7 - Quantitativo de corpos de prova moldados para realização de ensaios	60
Tabela 8 - Caracterização do agregado miúdo	61
Tabela 9 - Caracterização do agregado graúdo	61
Tabela 10 - Características do aditivo MasterGlenium 3400	62
Tabela 11 - Composição dos traços utilizados	63
Tabela 13 – Fatores e níveis analisados	75
Tabela 14 – Matriz de planejamento para análise dos efeitos na medida de tenacidade devido ao aumento da resistência à compressão e aumento do volume de fibras (de 30 kg/m ³ para 40 kg/m ³)	76
Tabela 15 - Matriz de planejamento para análise dos efeitos na medida de tenacidade devido ao aumento da resistência à compressão e aumento do volume de fibras (de 40 kg/m ³ para 50 kg/m ³)	76
Tabela 16 - Matriz de planejamento para análise dos efeitos na medida de tenacidade devido ao aumento da resistência à compressão e aumento do volume de fibras (de 30 kg/m ³ para 50 kg/m ³)	76
Tabela 17 – Resistência à compressão média aos 28 dias e aos 60 dias	78
Tabela 18 – Comparação da resistência à compressão obtida pelos traços de concreto reforçado com fibras de aço em relação ao concreto simples	78
Tabela 19 – Resistência à tração por compressão diametral média aos 60 dias.....	79
Tabela 20 - Comparação da resistência à tração por compressão diametral obtida pelos traços de concreto reforçado com fibras de aço em relação ao concreto simples	80

Tabela 21 – Módulo de elasticidade médio aos 28 e 60 dias de diferentes dosagens de concreto simples e concreto reforçado com fibras de aço	81
Tabela 22 - Comparação do módulo de elasticidade obtido pelos traços de concreto reforçado com fibras de aço em relação ao concreto simples	81
Tabela 23 - Valores de tenacidade obtidos até o deslocamento vertical de 3 mm para a matriz CRF 20	82
Tabela 24 - Valores de tenacidade obtidos até o deslocamento vertical de 3 mm para a matriz CRF 40	84
Tabela 25 – Efeitos devido a variação da resistência à compressão e o teor de fibras na medida de tenacidade (Volume de fibras de 30 kg/m ³ pra 40 kg/m ³)	88
Tabela 26 – Efeitos devido a variação da resistência à compressão e o teor de fibras na medida de tenacidade (Volume de fibras de 40 kg/m ³ pra 50 kg/m ³)	89
Tabela 27– Efeitos devido a variação da resistência à compressão e o teor de fibras na medida de tenacidade (Volume de fibras de 30 kg/m ³ pra 50 kg/m ³)	90
Tabela 28 - Valores de medida de tenacidade obtidas no ensaio de tração à flexão conforme recomendações da norma EN 14651: 2007, até a abertura de fissura de 4 mm para a matriz CRF 20.....	91
Tabela 29 - Valores de medida de tenacidade obtidas no ensaio de tração à flexão conforme recomendações da norma EN 14651: 2007, até a abertura de fissura de 4 mm para a matriz CRF 40.....	93
Tabela 30 - Efeitos devido a variação da resistência à compressão e o teor de fibras na medida de tenacidade (Volume de fibras de 30 kg/m ³ pra 40 kg/m ³)	98
Tabela 31 - Efeitos devido a variação da resistência à compressão e o teor de fibras na medida de tenacidade (Volume de fibras de 40 kg/m ³ pra 50 kg/m ³)	99
Tabela 32- Efeitos devido a variação da resistência à compressão e o teor de fibras na medida de tenacidade (Volume de fibras de 30 kg/m ³ pra 50 kg/m ³)	99
Tabela 33 – Correção entre os valores de tenacidade obtidos pelos ensaios prescritos pela EN 14651:2007 e ASTM C1609:2012	101

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação das fibras de aço.....	27
Quadro 2 - Notação utilizada para diferentes traços de concreto	58
Quadro 3 - Velocidade de carregamento conforme a ASTM C1609: 2012	68
Quadro 4 - Velocidade de carregamento conforme as recomendações da EN 14651: 2007	71
Quadro 5 - Resumo de execução dos ensaios ASTM C1609:2012 e EN 14651:2007...	72

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	20
INTRODUÇÃO	20
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	20
1.2 OBJETIVO GERAL	22
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	22
CAPÍTULO 2	23
CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS	23
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS	23
2.2 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS	24
2.2.1 A estrutura e as propriedades da fibra de aço	26
2.2.3 Interação fibra-matriz	32
2.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CRFA	34
2.3.1 Módulo de elasticidade	34
2.3.2 Resistência à compressão	34
2.3.3 Resistência à tração	35
2.3.4 Tenacidade	36
2.3.5 Fatores que interferem na avaliação de medida de tenacidade	37
2.3.7.5 Resistência da matriz	41
CAPÍTULO 3	43
MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS	43
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	43
3.2 ENSAIOS POR PUNÇÃO	43
3.2.1 Método Efnarc (1996)	43

3.2.2 Método AENOR UNE 83515: 2010	45
3.3 ENSAIO DE ENCUNHAMENTO	46
3.4 ENSAIOS EM PRISMAS	47
3.4.1 JSCE-SF4:1984 – Método de ensaio de resistência e tenacidade à flexão de concreto reforçado com fibras metálicas.....	48
3.4.2 ASTM C1609:2012 – Método de ensaio padrão de desempenho à flexão de concreto reforçado com fibras.....	51
3.4.3 EN 14651: 2007 – Método de ensaio para concreto reforçado com fibras metálicas – determinação da resistência à tração por flexão (limite de proporcionalidade (LOP) e resistência residual).....	54
CAPÍTULO 4.....	59
PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS.....	59
4.1 INTRODUÇÃO.....	59
4.2 MATERIAIS	60
4.2.1 Cimento	60
4.2.2 Agregados.....	60
4.2.4 Fibra de aço	61
4.2.5 Aditivo.....	62
4.3 DOSAGEM DO CONCRETO	62
4.4 PRODUÇÃO, MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA.....	63
4.5.1 Ensaio de resistência à compressão.....	65
4.5.3 Ensaio de tenacidade segundo ASTM C1609:2012.....	68
4.5.4 Ensaio de tenacidade segundo EN 14651: 2007	70
4.5.5 Resumo de execução do programa experimental.....	73
4.6 DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS	74
4.7 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	74
CAPÍTULO 5.....	77
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	77
5.1 INTRODUÇÃO.....	77
5.2 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	77
5.3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	79
5.4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE	81
5.5.1 Ensaio de tração à flexão ASTM C1619:2012.....	82
5.5.2 Ensaio de tração à flexão EN 14651:2007	91

5.8.3 Análise comparativa entre o ensaio proposto pela ASTM 14651:2012 e o ensaio recomendado pela EN 14651:2007	100
CAPÍTULO 6	103
Conclusão	103
6.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
APÊNDICE A	112
RESULTADOS: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	112
APÊNDICE B	113
RESULTADOS: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	113
APÊNDICE C	114
RESULTADOS: MÓDULO DE ELASTICIDADE	114
APÊNDICE D	115
RESULTADOS: TENACIDADE (ASTM 1609:2012)	115
APÊNDICE E	116
RESULTADOS: TENACIDADE (EN 14651: 2007)	116
APÊNDICE F	117
DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADA COM FIBRAS DE AÇO	117

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O concreto é o material estrutural mais utilizado no mundo. Medeiros (2012), Figueiredo (2011), Mehta e Monteiro (2008) afirmam que tal material apresenta uma série de características que lhe garantem este posto, como: ótima durabilidade, boa resistência à compressão, ao fogo e à água, boa plasticidade quando fresco e baixo custo de seus constituintes e mão de obra. Entretanto, o concreto simples apresenta comportamento frágil, com rápida propagação de fissuras e ruptura com pequenas deformações. Neste contexto, novas tecnologias surgiram para melhorar seu comportamento, como adição de reforços contínuos (barras) e descontínuos (fibras). Dentre os tipos de reforços, as fibras têm tido papel de destaque nos últimos anos, sendo objeto de muitas pesquisas.

Existem vários tipos de fibras utilizadas para reforço de matrizes cimentícias, com vários formatos, tamanhos, modo de produção e tipo de material que as originou. Tais fibras podem ser classificadas em dois tipos: microfibras e macrofibras. Segundo Efnarc (2002), as microfibras são utilizadas para combater a segregação e a retração à secagem do concreto e as macrofibras para aprimorar as características mecânicas, como a tenacidade. O presente trabalho aborda a adição de macrofibras de aço no concreto.

A fibra de aço é menos eficiente para resistir esforços de tração em relação às armaduras, devido à sua descontinuidade. Entretanto, em determinadas taxas de fibras sua atuação como obstáculo ao desenvolvimento de fissuras pode ser maior. Quando distribuídas aleatoriamente as fibras atuam como ponte de transferência de tensões pelas fissuras e retardam a velocidade de propagação destas, conferindo ao material resistência residual e aumento da tenacidade.

Para a utilização do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), de maneira eficiente e econômica, é necessário a avaliação de tal comportamento. Algumas propriedades como resistência à compressão e módulo de elasticidade podem ser mensuradas por ensaios utilizados em concreto simples (SALVADOR, 2013). Já a tenacidade deve ser determinada por ensaios específicos (BENTUR; MINDESS, 2007).

Não existem normas brasileiras para a avaliação do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras. Neste contexto, é necessário a utilização de ensaios alternativos

ou normas internacionais, como a ASTM C1609:2012, a JSCE-SF4:1984 e a EN 14651:2007. Ambas as normas citadas baseiam-se em ensaios de flexão de prismas para a determinação da medida de tenacidade e resistência residual, entretanto apresentam diferentes níveis de dificuldade de operação.

O ensaio proposto pela JSCE-SF4: 1984 é o mais utilizado no Brasil e de execução mais simples. Já o ensaio ASTM C1609:2012 apresenta resultados com menor dispersão que o anterior, mas exige o uso de equipamento dotado de sistema fechado de controle de deslocamento. O ensaio proposto pela norma EN 14651:2007 é um dos mais promissores, pois o mesmo é base do *Fib Model Code (2010) da Federation Internationale du Beton (FIB)*, que contempla o dimensionamento de estruturas utilizando concreto reforçado com fibras. Este assunto foi discutido recentemente na prática recomendada: Projeto de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibras (2016) do comitê IBRACON/ABECE. Além disso, em tal método a formação da primeira fissura ocorre na região do plano de entalhe, reduzindo a dissipação de energia no corpo de prova. Logo, a absorção energética é atribuída diretamente à fratura ao longo desse plano (PRISCO, 2010). Neste contexto pode-se dizer que o método apresenta menor variabilidade de resultado.

Com o intuito de correlacionar os valores de tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço por meio das normas internacionais EN 14651:2007 e ASTM C1609:2012 foi realizado um estudo experimental com flexão de corpos de prova com e sem entalhe.

Vale ressaltar que este trabalho integra um grupo de pesquisas coordenado pelo professor Dr. Antonio Carlos dos Santos da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, sobre o concreto reforçado com fibras. Precedeu 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 fibras (PEREIRA, 2017);
- Análise de imagens para determinação da quantidade de fibras presentes no concreto (RIBEIRO, 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 (DIAS, 2018).

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho é comparar os valores de tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço obtidos por meio das normas internacionais ASTM C1609:2012 e EN 14651:2007.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliação do efeito da adição de diferentes teores de fibras de aço na medida de tenacidade;
- Avaliação da influência da resistência à compressão característica da matriz cimentícia na medida de tenacidade;
- Correlacionar os resultados obtidos pelos dois métodos.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é constituído de 6 capítulos, organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 1: Considerações iniciais sobre o tema e objetivos da pesquisa;
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre o concreto reforçado com fibras;
- Capítulo 3: Revisão bibliográfica sobre os métodos de avaliação da tenacidade do Concreto Reforçado com Fibras;
- Capítulo 4: Programa experimental, com a descrição dos materiais utilizados;
- Capítulo 5: Apresentação e análise dos resultados;
- Capítulo 6: Conclusão.

CAPÍTULO 2

CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

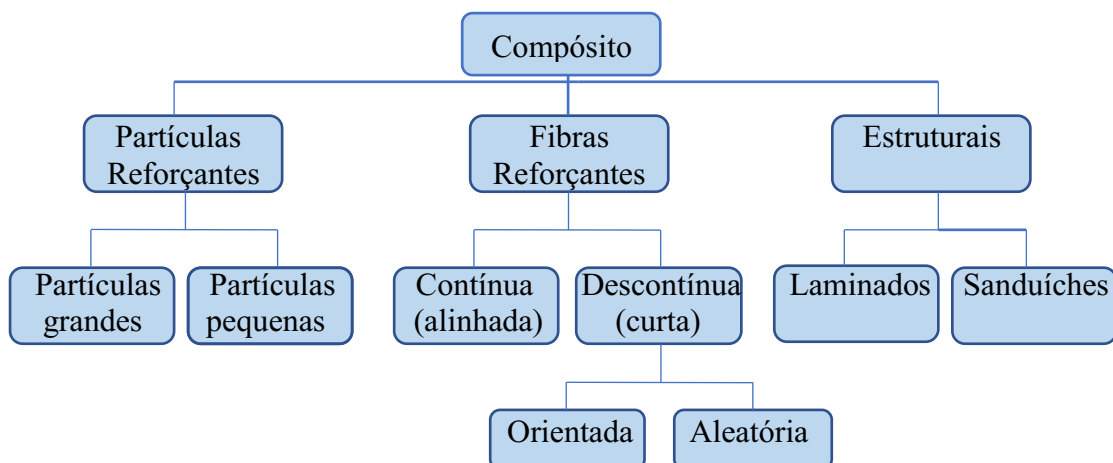
Os materiais compósitos podem ser definidos como aqueles formados pela combinação de dois ou mais materiais com diferentes composições e formas distintas que quando unidos alcançam propriedades específicas de forma que o material final resultante dessa união apresente a melhor combinação das propriedades de suas fases (VASILIEV, 2017; SILVA, 2014; CALLISTER Jr., 2012; PADILHA, 1997).

Apesar de agirem em conjunto, tais componentes não se dissolvem completamente entre si, ou seja, eles mantêm suas características e apresentam uma interface entre eles em nível microscópico e/ou macroscópico. Segundo Callister (2002), os materiais compósitos podem ser formados por duas ou mais fases, nas quais podem ser de origem polimérica, metálica ou cerâmica.

Aqueles formados por apenas duas fases são compostos basicamente pela fase de matriz e outra constituída por materiais dispersos (reforço), sendo que a matriz envolve o reforço a fim de melhorar suas propriedades mecânicas. A fase menos resistente é constituída pela matriz; a outra fase, chamada de reforço, é descontínua, dura e resistente. Para Tita (1999), a matriz possui como função a transmissão de esforços para o reforço, e este por sua vez deve suportar os esforços transmitidos.

Em função da diversa variedade de materiais compósitos com diferentes tipos de matrizes e reforços, Callister (2002) classifica os materiais compósitos em: compósitos reforçados por partículas, compósitos reforçados por fibras e compósitos estruturais (Figura 1).

Figura 1 - Esquema de classificação dos materiais compósitos



Fonte: Adaptado de Callister (2002).

2.2 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

Como dito anteriormente, o concreto é o material compósito mais utilizado na construção civil, pois apresenta diversas características atrativas, como boa resistência à compressão e ao fogo, relação satisfatória entre custo e durabilidade, excelente resistência à água e boa consistência plástica quando fresco, possibilitando a moldagem em várias formas (MEDEIROS, 2012; FIGUEIREDO, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2008). Entretanto, o concreto simples apresenta comportamento frágil, com rápida propagação de fissuras e ruptura com pequenas deformações (MEDEIROS, 2012; BENTUR; MINDESS, 2007).

Para determinadas finalidades é necessário seu reforço com o objetivo de minimizar suas limitações. O reforço utilizado pode ser contínuo (barras de aço) e descontínuo (fibras), conforme Bentur; Mindess (2007). No primeiro caso trata-se de concreto armado (CA) e no segundo de concreto reforçado com fibras (CRF).

O CRF refere-se ao concreto simples com adições de fibras durante seu processo de produção. As fibras são distribuídas de maneira aleatória e uniforme ao concreto. Podem possuir diferentes formatos, dimensões e ser fabricadas a partir de vários materiais, como: aço, vidro, materiais naturais, entre outros. Para Bentur e Mindess (2007) estas se diferenciam consideravelmente uma das outras no que se refere à eficácia, custo e propriedades mecânicas, na Tabela 1 estas são representadas. Segundo Mehta e Monteiro (2008) dentre todas as fibras, a fibra de aço é a mais utilizada como reforço de matrizes cimentícias.

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

Tipo de fibra	Diâmetro (µm)	Peso específico (g/cm³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Alongamento na ruptura (%)
Aço	5 – 500	7,84	200	0,5 – 2,0	0,5 – 3,5
Vidro	9 – 15	2,6	70 – 80	2 – 4	2 – 3,5
Polipropileno	20 – 200	0,9	5 – 77	0,5 – 0,75	8,0
Aramida (Kevlar)	10	1,45	65 – 133	3,6	2,1 – 4,0
Carbono	9	1,9	230	2,6	1,0
Polietileno	-	0,95	0,3	$0,7 \times 10^{-3}$	10
Sisal	10 – 50	1,5	-	0,8	3,0
Matriz de cimento (comparação)	-	2,5	10 – 45	$3,7 \times 10^3$	0,02

Fonte: Bentur e Mindess, (2007).

A boa aderência entre fibras e matriz contribui para o aumento do desempenho do compósito. Após a fissuração do concreto a matriz cimentícia transfere as tensões para as fibras por aderência e essas por sua vez transferem-nas entre as fissuras, diminuindo a velocidade de propagação e expansão destas, portanto conferem ao compósito resistência residual. Além disso, as fibras proporcionam um aumento expressivo da capacidade de absorção de energia, assim o compósito passa a apresentar comportamento pseudo-dúctil (FIGUEIREDO, 2011; NAAMAN, 2008).

Segundo Figueiredo (2011) e Barros (2009), em comparação ao CA, o CRF apresenta algumas vantagens econômicas e técnicas, como: redução da mão de obra, tempo e custo em relação ao processo tradicional em que a armadura carece de prévia montagem, aumento da ductilidade e capacidade de absorção de energia, aumento da resistência às ações dinâmicas, resistência à fadiga e resistência ao impacto.

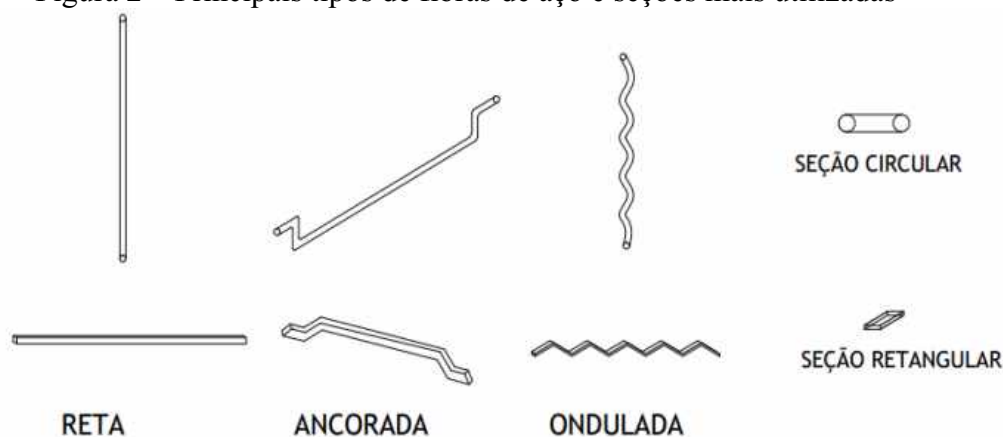
Para Rizzuti e Bencardino (2014) a adição de fibras não influencia significativamente a resistência à compressão do concreto, mas conferem tenacidade ao material ao passo que se é aumentada a proporção de fibras. Entretanto, elevado volume de fibras pode comprometer a trabalhabilidade da mistura, durabilidade e o desempenho do compósito.

As propriedades mecânicas do CRF são influenciadas diretamente pela sua microestrutura. Neste contexto, para o conhecimento do comportamento do material, é necessário a análise da fibra utilizada e da interface fibra-matriz (BENTUR E MINDESS, 2007).

2.2.1 A estrutura e as propriedades da fibra de aço

As fibras de aço são filamentos de pequeno diâmetro com uma variada diversidade de formatos e comprimentos de seção transversal (Figura 2), que apresentam alto módulo de elasticidade e elevada resistência mecânica (FIGUEIREDO, 2008; SANTOS, 2003). Sua função é absorver os esforços provenientes da matriz. A Figura 2 apresenta os tipos de fibras de aço mais utilizadas e seções mais comuns.

Figura 2 – Principais tipos de fibras de aço e seções mais utilizadas



Fonte: Naaman, (2003).

Para a fabricação de fibras de aço, os tipos de aço mais utilizados são o aço carbono e o aço liga, sendo o segundo usado em estruturas marítimas ou refratárias. O diâmetro das fibras de aço pode variar em 0,10 mm a 1,0 mm e comprimento em 5 mm a 65 mm. As fibras de aço possuem módulo de elasticidade entre 200 a 210 GPa, tensão de tração de 345 a 2100 MPa e deformação durante a ruptura entre 0,5% a 3,5%. Para facilitar seu manuseio podem vir coladas por cola solúvel em feixes de 10 a 30 fibras, que dissolve durante o processo de mistura do concreto (LOPES, 2005).

Para avaliar o desempenho das fibras de aço a partir de sua geometria utiliza-se o parâmetro teórico, chamado fator de forma (λ), expresso pela Equação 1. Segundo Naaman (2003) tal fator é definido pela razão entre o comprimento e diâmetro da fibra em questão. Geralmente quanto maior for (λ), maior será a capacidade portante do concreto após a fissuração. Segundo o ACI 318M-11 (2011), (λ) não deve ser superior a 100 e menor que 50.








$$\lambda = \frac{l}{d} \quad (1)$$

Em que: l = comprimento da fibra; d = diâmetro da fibra.

A norma brasileira ABNT NBR 15530: 2007, regulamenta o uso de fibras de aço a partir da sua classificação em relação ao seu formato e tipo de material que as originou (Quadro 1). Em relação a conformação geométrica a norma classifica as fibras de aço em três tipos básicos de fibras: fibra de aço com ancoragem nas extremidades (Tipo A), fibra de aço corrugada (Tipo C) e fibra de aço reta (Tipo R).

Para Figueiredo (2008) a configuração geométrica associada a cada um dos tipos de fibras prescritos pela norma não considera o formato da seção transversal e sim o perfil da fibra, sendo o primeiro dependente do tipo de aço utilizado na produção desta. Em relação ao tipo de aço que origina as fibras, a norma ABNT NBR 15530: 2007 prevê três classes: fibra oriunda de arame trefilado a frio (Classe I), fibra proveniente de chapa laminada cortada a frio (Classe II) e fibra obtida a partir de arame trefilado e escarificado (Classe III).

Quadro 1 - Classificação das fibras de aço

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

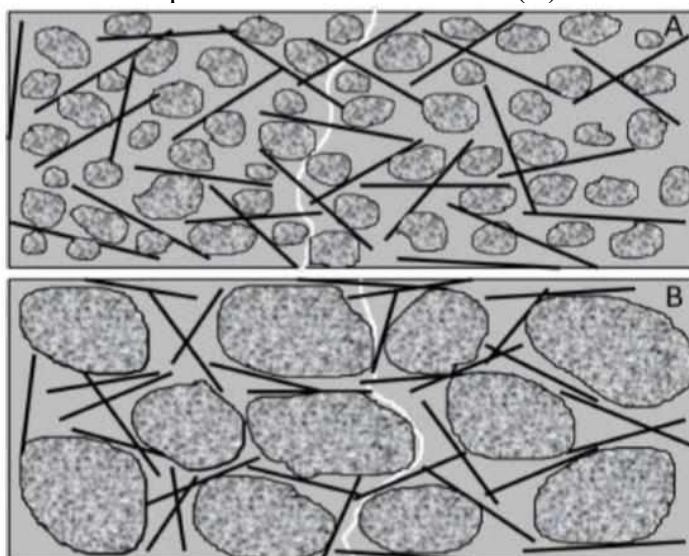
d = largura ou diâmetro da fibra, a depender da seção transversal; e = espessura da fibra, w = altura da fibra retangular, L= comprimento da fibra.

Fonte: Figueiredo *et al.* (2008).

De acordo com o ACI 544.1R: 1996, para serem utilizadas como reforço de concreto, as fibras devem ser pequenas o suficiente para que possam ser misturadas e dispersas aleatoriamente no concreto fresco por procedimentos usuais. Cada fibra deve ser envolvida completamente pela matriz, assim é recomendado que o diâmetro máximo do agregado gráudo não seja superior a metade do comprimento da fibra utilizada (CHEN, 1995).

Ao passo que se aumenta a dimensão máxima do agregado gráudo em relação ao comprimento da fibra a eficiência desta como ponte de transferência de tensões é reduzida. Isso ocorre, pois a propagação da fissura acontece na região de interface entre pasta e agregado gráudo (Figura 3).

Figura 3- (A) CRF com compatibilidade dimensional e (B) CRF sem compatibilidade



Fonte: Figueiredo, (2011).

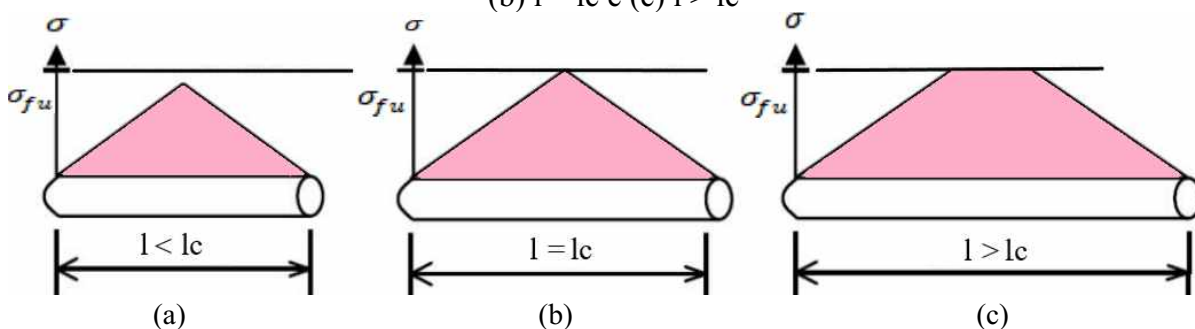
A eficácia da adição de fibras em matrizes cimentícias é dependente da transferência de tensões da matriz para as fibras, ou seja, quanto maior a tensão transferida para as fibras, maior a eficiência do compósito formado (BASTOS, 1999). As características da fibra utilizada influenciam diretamente o grau de tensão que estas conseguem transferir pelas fissuras, tais como: comprimento crítico (l_c), volume e orientação no concreto (LOPES 2005; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.2.2.1 Comprimento crítico (l_c)

O conceito de comprimento crítico é explicado pela distribuição de tensão entre fibra e matriz. A transferência de tensão da matriz para a fibra aumenta linearmente dos extremos para o centro da fibra, neste contexto Figueiredo (2000) afirma que l_c consiste no comprimento

necessário para que a tensão máxima submetida na fibra pela matriz seja igual a tensão de cisalhamento entre elas. Para Bentur e Mindess (2007) l_c equivale ao comprimento mínimo necessário para que a ruptura da fibra ocorra antes que seja arrancada. A Figura 4 apresenta as possíveis situações de distribuição de tensão na fibra de acordo com o comprimento crítico, onde l é o comprimento da fibra.

Figura 4 - Diagrama de tensão x deformação para diferentes comprimentos de fibra: (a) $l < l_c$, (b) $l = l_c$ e (c) $l > l_c$



Fonte: Adaptado de Bentur e Mindess, (2007).

Quando a fibra possui comprimento menor que o crítico (Figura 4a), a carga de arrancamento proporcionada pelo comprimento de embutimento na matriz não é suficiente para produzir uma tensão superior que a resistência da fibra. Com o aumento da deformação e consequentemente da abertura da fissura, a fibra que está atuando como ponte de transferência de tensões através da fissura será arrancada do lado de seu menor comprimento de embutimento. Tal comportamento é apresentado em concreto de baixa e média resistência reforçado com fibras de aço (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012; FIGUEIREDO, 2011). A Figura 4b) ilustra o diagrama tensão x deformação de uma fibra com $l = l_c$, nesta situação a carga máxima é atingida na seção média da fibra.

Quando a matriz cimentícia possui elevada resistência ou a fibra utilizada possui menor resistência, a aderência entre fibra-matriz é melhorada, assim ocorre a ruptura de algumas das fibras, pois a tensão necessária para a ruptura na interface é menor que a tensão de ruptura da fibra. Conclui-se que quanto maior o comprimento da fibra, maior seu embutimento e maior a capacidade portante pós-fissuração (Figura 4c). Entretanto, grandes comprimentos de fibra podem diminuir a trabalhabilidade e resistência residual do compósito, já que sua ruptura ocorre no início da fissuração da matriz (FIGUEIREDO, 2011).

O comprimento crítico é calculado a partir da Equação 2.

$$L_c = \frac{\sigma_{fu}}{2\tau_c} \quad (2)$$

Em que:

σ_f = limite de escoamento à tração ou resistência máxima;

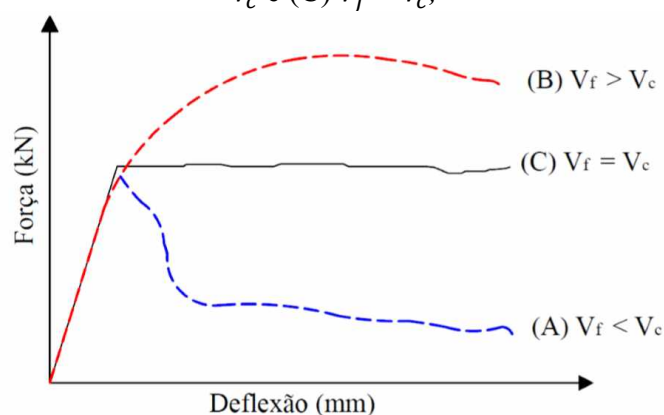
τ_c = tensão de escoamento ao cisalhamento da matriz ou resistência de ligação entre fibra e matriz.

*Nota: adotar o menor valor para cada termo

2.2.2.2 Volume das fibras

O volume crítico das fibras (V_c) no concreto consiste no volume de fibras (V_f) necessário para manter capacidade portante do CRF após a fissuração da matriz (JOHNSTON, 2001). Para $V_f < V_c$ após a fissuração ocorre queda brusca da capacidade portante do compósito. Já $V_f > V_c$ a capacidade portante após a fissuração da matriz passa a ser superior. Tal comportamento é ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Curva de Força x Deflexão para diferentes volumes de fibras: (A) $V_f < V_c$; (B) $V_f > V_c$ e (C) $V_f = V_c$;



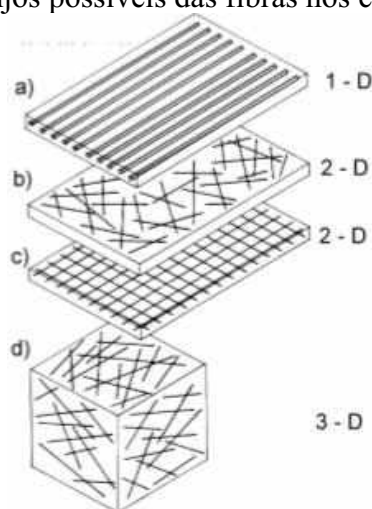
Fonte: Figueiredo, (2000).

Mehta e Monteiro (2008) classificam o volume de fibras presente no CRF de acordo com sua fração volumétrica em três classes: fração baixa (menor que 1%), fração média (entre 1 e 2%) e fração alta (maior que 2%) de fibras. A fração baixa e média de fibras são mais utilizadas comumente devido ao alto custo da utilização das fibras, no qual a primeira é aplicada com a finalidade de reduzir a fissuração por retração e a segunda para aumentar o módulo de ruptura, a tenacidade à fratura e a resistência ao impacto do concreto.

2.2.2.3 Orientação das fibras

Segundo Bastos (1999), as fibras podem ser arranjadas de formas diferentes nos compósitos em função de sua geometria e dispersão na matriz. Os três modelos possíveis de arranjo são: unidimensional (1D), bidimensional (2D) e tridimensional (3D), podendo ser longas e contínuas (Figura 6 a, c) ou discretas e curtas (Figura 6 b, d).

Figura 6 – Arranjos possíveis das fibras nos compósitos



Fonte: Bentur e Mindess, (2007).

No CRF geralmente são utilizadas fibras discretas e curtas que tendem a se orientar de forma dispersa e não uniforme. Para Quinino (2015), é impossível certificar que a orientação e distribuição das fibras ocorra de maneira uniforme e aleatória, já que há como comprovar uma discrepância em valores medidos e resultados de ensaios já realizados. A distribuição das fibras é dependente do processo de mistura, lançamento e adensamento do concreto (BERNARDI, 2003).

O adensamento do CRF em mesa vibratória tende a provocar um alinhamento das fibras no plano horizontal, já a vibração interna da mistura causa menor influência na orientação das fibras (BENTUR; MINDESS, 2007). Para Oliveira Júnior (2012), esse alinhamento pode ser evitado quando é utilizado fibras com comprimentos de duas a três vezes menores que a menor dimensão do corpo de prova.

O alimento que gera maior desempenho para as fibras se dá quando a direção do esforço se apresenta alinhado com a posição da fibra e a o pior desempenho quando a fibra está posicionada perpendicularmente ao esforço (BENTUR; MINDESS, 2007; CARVALHO, 2012).

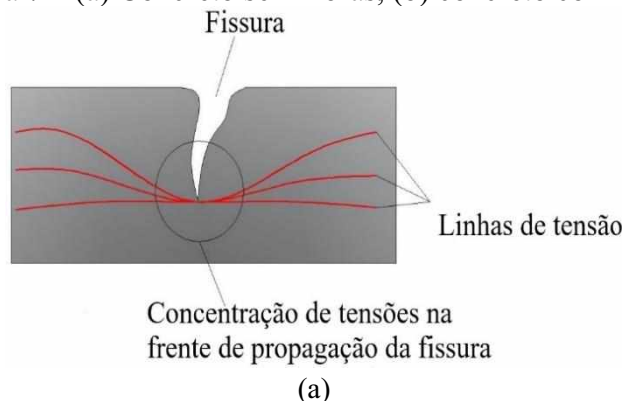
2.2.3 Interação fibra-matriz

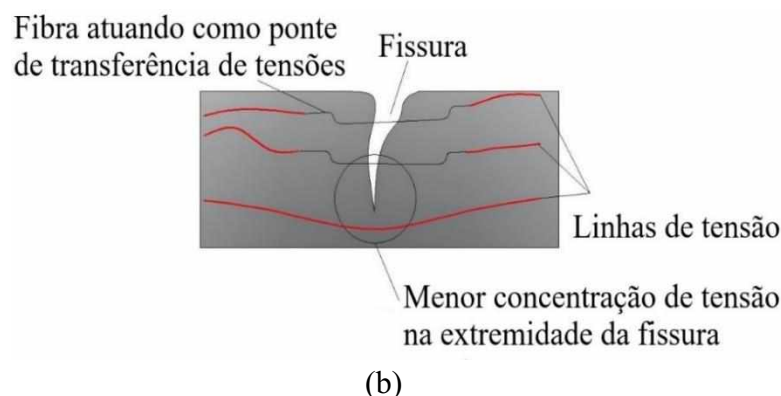
A interface entre fibras e matriz nos compósitos cimentícios é chamada de zona de transição, onde a microestrutura da matriz é consideravelmente diferente da matriz além da interface. A natureza e o tamanho da zona de transição são dependentes do tipo de fibra e do processo de produção, e podem variar com o tempo. As características de tal superfície são decisivas no comportamento mecânico dos compósitos e na aderência entre a fibra e a matriz. Nas proximidades da fibra, a matriz apresenta alta porosidade em relação as demais partes do compósito, resultando em uma zona de transição fraca e, portanto, na propagação preferencial de fissuras ao longo da interface (BASTOS, 1999; BENTUR; MINDESS, 2007).

Os esforços são transmitidos da matriz para as fibras, onde estas se deformam em conjunto até a ruptura da matriz, ou seja, até que as fibras consigam resistir à força absorvida. Caso o volume de fibras seja maior que o V_c há um ganho de resistência residual, devido a necessidade de uma maior energia necessária para o arrancamento das fibras da matriz, evitando a ruptura abrupta (AZEVEDO, 1999).

Em concretos simples as fissuras atuam como barreiras de tensões concentrando-as em suas extremidades e quando a resistência da matriz é superada pela tensão abre-se a primeira fissura no concreto (Figura 7a), este rompe inesperadamente, caracterizando um comportamento frágil (FIGUEIREDO, 2000).

Figura 7 – (a) Concreto sem fibras, (b) concreto com fibras





Fonte: Autora, (2018).

Como o concreto possui características de material frágil com baixa capacidade de deformação, o reforço de fibras curtas distribuídas aleatoriamente pode minimizar algumas de suas limitações. Em nível macro, as fibras inibem o crescimento das fissuras e, após as microfissuras se tornarem macrofissuras, as fibras proporcionam mecanismos que retardam a sua propagação instável, proporcionando ganho de resistência residual, dureza e ductilidade (BENTUR E MINDESS, 2007).

As fibras quando adicionadas ao concreto atuam como uma ponte de transferência de tensões por meio das fissuras, reduzindo a concentração de tensões nas extremidades e consequentemente a velocidade da propagação das fissuras no concreto (Figura 7b). Assim, o compósito formado deixa de ter o aspecto frágil e obtém capacidade portante após o início da fissuração (FIGUEIREDO, 2000). Para Pasa (2007), tal comportamento é possível devido a dois aspectos: aderência e diferença de rigidez entre as fibras e a matriz.

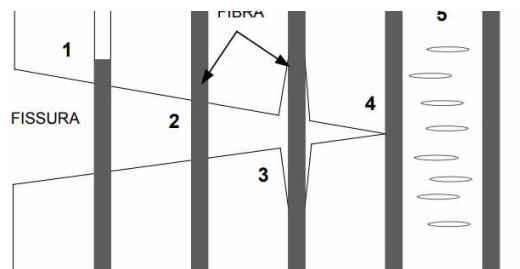
Segundo Nunes (2006), a adição de fibras ao concreto aumenta a energia necessária para ruptura, a partir de quatro maneiras:

- descolamento das fibras, a partir da propagação das fissuras na interface fibra-matriz;
- as fibras atuam como ponte de transferência de tensões, ao passo que são arrancadas da matriz;
- as fibras interceptam as fissuras, reduzindo a velocidade de propagação destas a partir de seu “grampeamento”;
- aumento da tensão necessária para iniciação da fissuração, criando o “efeito pinça”.

A Figura 8 apresenta as diferentes formas possíveis de atuação da fibra durante a fissuração do concreto.

Figura 8 – Formas de atuação da fibra durante a fissuração do concreto

- 1) Arrancamento da fibra
- 2) Ponte de tensões
- 3) Descolamento da fibra
- 4) Interceptação da fissura
- 5) Efeito “pinça”



Fonte: Adaptado de Nunes (2006).

2.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CRFA

2.3.1 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do CRFA é calculado a partir da soma dos módulos da matriz e fibra, multiplicados pelos seus respectivos volumes (SALVADOR, 2013). Neste contexto, pode-se dizer que o módulo de elasticidade não é influenciado pela adição de fibras, pois, como o volume de fibras é pequeno em relação ao volume da matriz, o módulo do compósito é dependente do da matriz. Figueiredo (2011) conclui que quanto maior o módulo de elasticidade da matriz, maior será a proporção necessária de fibras para fornecer ao CRFA o comportamento elastoplástico perfeito.

2.3.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão é considerada uma das propriedades mais importantes do concreto, o que demonstra claramente o seu nível de garantia de qualidade (BEHFARNIA; KHADEMI, 2017). Neste contexto, as primeiras pesquisas sobre CRFA consideraram que a resistência à compressão do concreto poderia ser aumentada com a adição de fibras que combatessem a propagação de fissuras. Entretanto, experimentalmente observou-se que o volume de fibras que pode ser adicionado efetivamente é muito pequeno não conseguindo combater a formação das fissuras. Deste modo, a adição de fibras não altera consideravelmente a resistência à compressão do concreto, e sim a medida de tenacidade (Mehta; Monteiro, 2008).

Segundo ensaios realizadas por Góis e Barboza (2015), a adição de fibras de aço ao concreto proporcionou um aumento médio de 17,9% na resistência à compressão em dosagem de 0,8 % de fibras por volume de concreto (V_f), quando comparado com o concreto sem fibras.

Arif (2014), obteve para traços com V_f de 0,38% e 0,77%, ganhos de F_c de 14% e 18%, respectivamente. Para um V_f de 1,5% foram observados acréscimos que variam entre 0% e 15% na F_c do CRFA (ACI 544.1R, 2009).

De acordo com Bentur e Mindess (2007) e Mehta e Monteiro (2014) volumes inferiores a 2% de fibras de aço adicionados ao concreto não proporcionam ganhos significativos na resistência à compressão. Para Carvalho (2012) o desempenho do compósito em termos de resistência à compressão só é otimizado quando altas taxas de fibra são adicionadas.

Segundo Slater, Moni e Alam (2012), não ocorre incremento de resistência à compressão ao passo que se aumenta o volume de fibras, pois F_c é mais dependente das características da matriz e das fibras, bem como da interface entre elas.

Além do teor de fibras a F_c também é influenciada pelo fator de forma, segundo Góis e Barboza (2015), para mesma fração volumétrica de fibra o fator de forma mais elevado tende a apresentar melhores resultados. Fibras mais longas aumentam levemente a resistência à compressão em relação ao uso de fibras menores (MEHTA; MONTEIRO, 2008; GARCEZ, 2005; FIGUEIREDO, 2000).

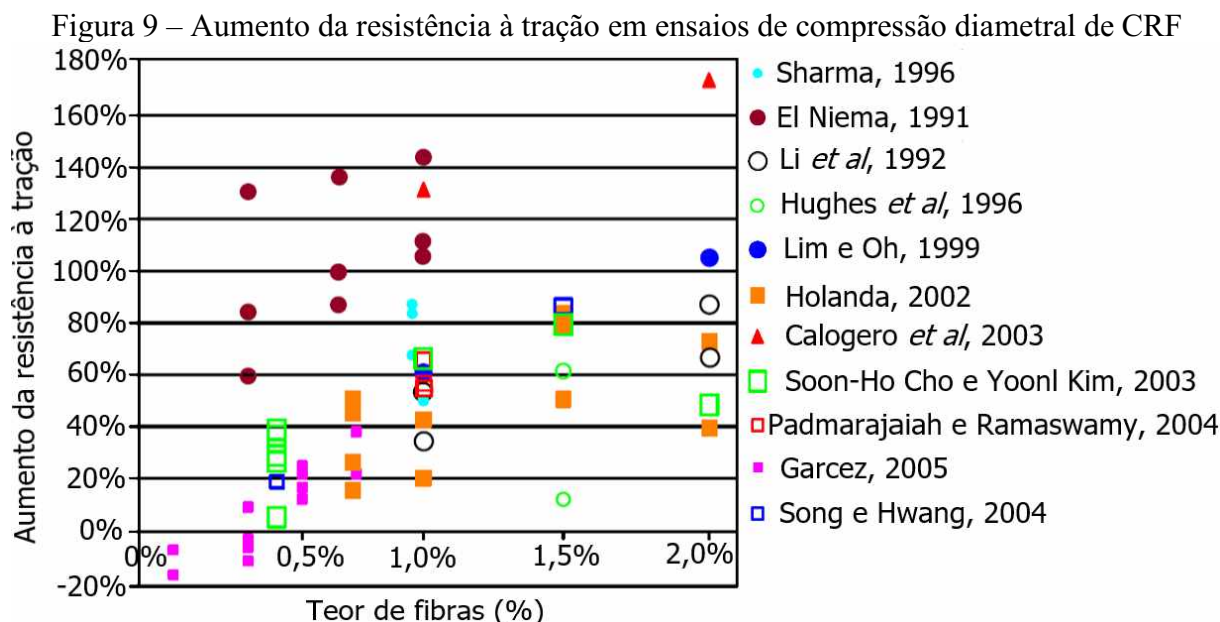
A orientação das fibras no concreto também pode afetar o desempenho mecânico do compósito. Para fibras orientadas paralelamente à direção da força aplicada Mechtcherine e Jun (2008) concluíram que a resistência à compressão é reduzida levemente, mas não é afetada a capacidade de deformação do compósito.

2.3.3 Resistência à tração

Quando submetido a ensaio de tração o compósito pode exibir dois comportamentos diferentes. O primeiro conhecido por *strain-softening*, que consiste na perda gradual da capacidade portante da matriz após a abertura da primeira fissura. Já o segundo, *strain-hardening*, o compósito exibe um aumento de sua capacidade resistente após a fissuração da matriz, tal comportamento ocorre devido a formação de múltiplas fissuras até a obtenção da tensão máxima pós-fissuração. Após este trecho o compósito apresenta novamente o comportamento *strain-softening* (NAAMAN, 2003).

A resistência à tração do concreto pode ser obtida a partir de três metodologias diferentes: tração na flexão, tração direta e tração indireta por compressão diametral. Para cada ensaio pode-se obter resultados diferentes. No CRF há outros fatores que podem influenciar os resultados da resistência à tração, são eles: o comprimento, a orientação e o volume de fibras utilizadas.

Pasa (2007), afirma que a resistência à tração por compressão diametral aumenta a partir da adição de diferentes proporções de fibras ao concreto, como mostra os resultados encontrados por vários pesquisadores apresentados na Figura 9.

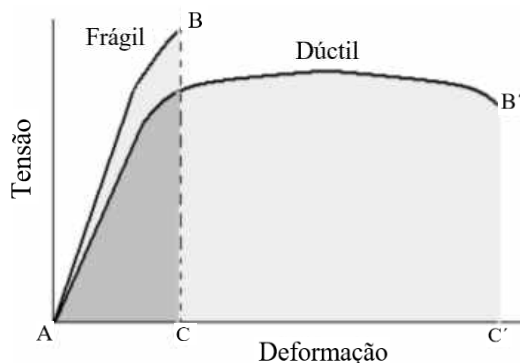


2.3.4 Tenacidade

Um dos principais objetivos da adição de fibras no concreto é aumentar a tenacidade do material. Segundo Figueiredo (2011), tenacidade, para o concreto reforçado com fibras, consiste na capacidade de absorção de energia pelo compósito quando carregado, abrangendo a energia absorvida antes e depois da fissuração da matriz, quando as fibras passam a atuar de maneira mais efetiva. Para ACI 544.1R (1996), a tenacidade é definida como a energia total absorvida antes da ruptura completa do corpo de prova. De acordo com Lobão (2005), a tenacidade consiste na capacidade de deformação do compósito após a aparição da primeira fissura.

Segundo Callister Jr. (2002) um material é considerado tenaz, quando apresenta ductilidade e resistência. Além do mais, geralmente os materiais dúcteis apresentam medida de tenacidade superior que os materiais frágeis (Figura 10). Isso ocorre, pois, apesar de materiais frágeis apresentarem maior limite de escoamento e resistência à tração eles apresentam pequena ductilidade, devido a menor capacidade de absorção energia antes da ruptura.

Figura 10 - Representação esquemática do comportamento tensão-deformação em tração para materiais frágeis e dúcteis carregados até a fratura



Fonte: Adaptado de Callister Jr. (2002).

Em materiais cerâmicos, como concreto, também aplica-se o conceito de tenacidade à fratura. De acordo com Callister (2002), tenacidade à fratura consiste na capacidade de o material com presença de fissura resistir à fratura frágil ou dúctil. A fratura dúctil ocorre quando o ponto de ruptura do material é precedido de deformação plástica e fratura frágil, quando o material não se deforma plasticamente antes da ruptura.

Para Lobão (2005) a adição de fibras ao concreto aumenta consideravelmente a medida de tenacidade do compósito. As pesquisas realizadas por Farias et al. (2006) indicam um aumento de 9 a 10 vezes nas deformações últimas do concreto reforçado com fibras em comparação com o concreto convencional.

A avaliação da medida de tenacidade pode ser influenciada por vários fatores, como: tipo de máquina e método de ensaio, tamanho e geometria do corpo de prova, teor e espaçamento das fibras, resistência das fibras e resistência da matriz utilizada. Tais variáveis intervenientes serão discutidas no próximo item.

2.3.5 Fatores que interferem na avaliação de medida de tenacidade

2.3.5.1 Tipo de máquina de ensaio

Para a realização de ensaios de tenacidade é necessário o fornecimento das variáveis de entrada para o sistema e este fornece como resultado as variáveis de saída. A primeira é dependente das características geométricas do corpo de prova e da velocidade de aplicação de carga. Em ensaios que corpos de prova prismáticos são submetidos a esforço de tração à flexão as variáveis de saída obtidas podem ser apresentadas de duas maneiras:

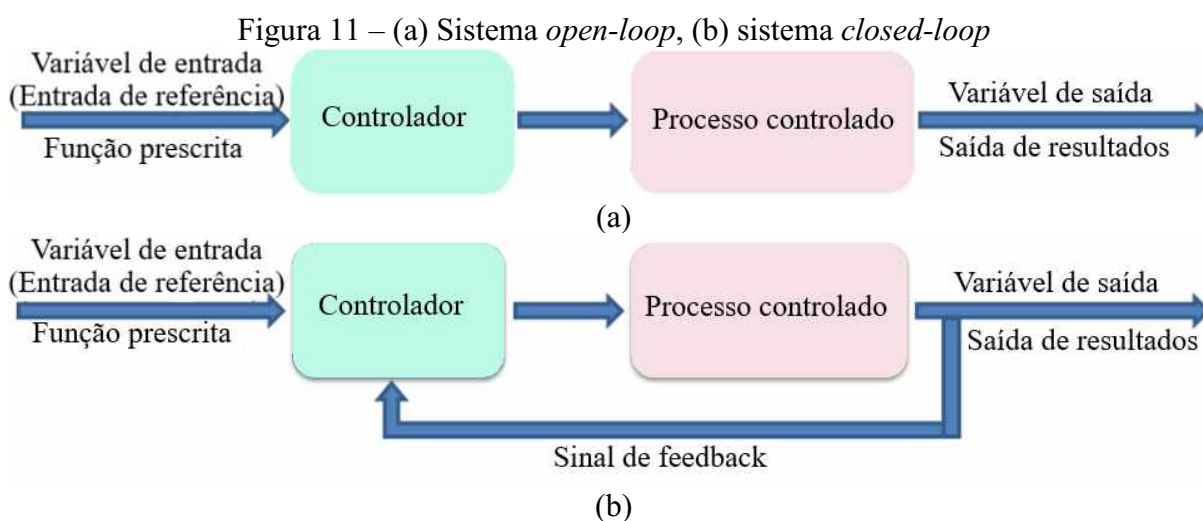
- curva de carga por deslocamento;

- curva de carga por abertura da boca da fissura (CMOD).

O equipamento de ensaio armazena energia durante o procedimento de carregamento. Quando ocorre alguma irregularidade de ensaio, fissuração ou pico de carga, tal energia é parcialmente dissipada e absorvida pelo corpo de prova. Este, por sua vez, diminui sua capacidade portante e sofre uma ruptura instável, transferindo as tensões presentes na matriz para as fibras. Tal liberação de energia gera uma zona de instabilidade na curva de carga por deflexão que pode afetar em menor ou maior grau a avaliação da medida de tenacidade (VILLARES, 2001). Esta zona de instabilidade pode ser identificada em curvas de carga por deflexão no trecho pós-pico.

O tipo de sistema operacional da máquina utilizada para o controle de tenacidade do CRF influencia consideravelmente os resultados encontrados. Para Guettu *et al.* (1996) o controle operacional de um equipamento pode ser classificado em: sistema aberto (*open-loop*) e sistema fechado (*closed-loop*), tais sistemas diferenciam-se pelo uso da variável de saída do sistema pelo processo de controle.

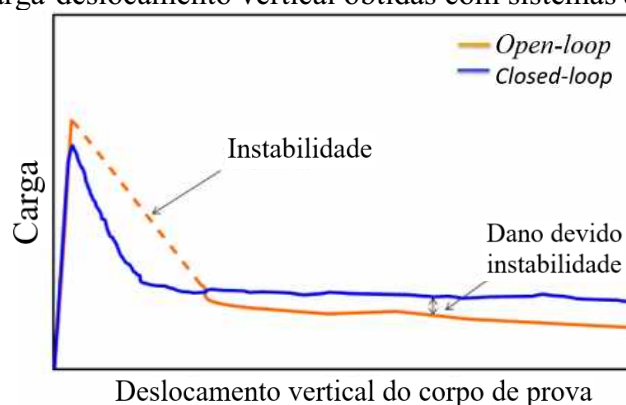
Em equipamentos *open-loop* a variável de saída não pode ser controlada e o processo depende apenas da variável de entrada no sistema (Figura 11), geralmente as variáveis que podem ser controladas neste são a velocidade de deslocamento do pistão e a carga aplicada ao corpo de prova. Tais variáveis não influenciam consideravelmente o comportamento do corpo de prova. Já os sistemas *closed-loop* são mais sofisticados e permitem que a variável de saída seja monitorada diretamente pelo controlador, ou seja, o sistema modifica adequadamente a variável de entrada até a obtenção da resposta pretendida (Guettu *et al.* 1996).



Fonte: Adaptado de Islam, (2012).

Sistemas *open-loop* são muito utilizados em laboratórios de controle tecnológico devido ao seu menor custo. Contudo, para determinação de resultados confiáveis o equipamento deve apresentar elevada rigidez, evitando assim que a energia dissipada pelo equipamento, durante a ruptura do corpo de prova, não seja absorvida pelo mesmo e consequentemente a instabilidade pós-pico seja minimizada. A Figura 12 apresenta curvas de carga por deslocamento vertical obtidas com sistemas *open-loop* e *closed-loop*.

Figura 12 - Curvas carga-deslocamento vertical obtidas com sistemas *open-loop* e *closed-loop*



Fonte: Adaptado de Banthia e Dubey (1999).

2.3.7.2 Tamanho e geometria do corpo de prova

Metodologias de caracterização do CRF que utilizam corpos de prova prismáticos submetidos a esforços de tração à flexão são mais simples de conduzir e apresentam uma boa capacidade de replicar situações práticas em relação aos ensaios de tração direta. Contudo, as dimensões e a geometria do corpo de prova podem influenciar em menor ou maior grau os resultados obtidos nesses ensaios (GOPALARATNAM; GETTU, 1995).

Para Villares (2001) a distribuição das tensões é modificada pela relação entre largura, altura e vão do corpo de prova, influenciando no resultado do ensaio. Tal influência é apresentada na curva força por deflexão, pois quanto maior as dimensões da seção transversal, maior será a absorção energética e consequentemente a medida de tenacidade (ASTM C1609:2010; VILLARES, 2001; JSCE-SF4:1984). Ainda segundo Villares (2001), quando a relação entre vão e altura é alta o corpo de prova pode ser submetido à esforços de torção durante o ensaio, portanto seus resultados podem ser afetados.

Corpos de prova com as mesmas dimensões e vãos de carregamento diferentes foram ensaiados segundo a norma JSCE-SF4:1984 por Chen (1995) e os resultados de resistência à flexão obtidos apresentaram pequenas variações (Tabela 2). Entretanto, corpos de prova com

vãos constantes e variação na largura ou altura podem apresentar variação significativa nos resultados. Como pode ser comprovado a partir dos resultados obtidos por Villares (2001) ao ensaiar corpos de prova com altura e vão constante e largura variável, onde os resultados encontrados apresentaram alta discrepância (Tabela 3).

Tabela 2 - Resultados experimentais de ensaios de flexão em CRFA

Dimensões CP (mm)	$f_{equ.,fi}$ (MPa)	Dimensões CP (mm)	$f_{equ.,fi}$ (MPa)
25:100:300	2,0	25:75:300	1,9
50:100:300	2,0	50:75:300	2,8
75:100:300	2,4	75:75:300	2,7
100:100:300	3,4	100:75:300	2,9

Fonte: Adaptado de CHEN (1995).

Tabela 3 - Tenacidade à flexão para corpos de prova com largura variável

Teor de fibra (kg/m³)	Dimensão dos corpos 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: Adaptado de Villares (2001).

2.3.7.3 Teor e espaçamento das fibras

O efeito do comprimento da fibra pode ser analisado em termos de transferência de tensão, por meio de um parâmetro denominado de comprimento crítico (l_c), que pode ser definido como o comprimento mínimo que a fibra deve ter para que ela desenvolva uma tensão igual a sua resistência à ruptura. O comprimento de fibra deve ser suficiente para que ela esteja em condições de promover um efeito de ponte entre os agregados, impedindo assim o desenvolvimento de fissuras. Um aumento no comprimento da fibra significa um aumento na área superficial da interface fibra-matriz, isto é, uma maior superfície de ancoragem de cada fibra, sendo necessária uma maior força de arrancamento, e, portanto, mais energia durante o processo de ruptura do compósito (VILLARES, 2001).

Fibras com melhores características de ancoragem, por exemplo, fibras com ancoragem mecânica ou com relações de aspecto altas, fornecem maiores valores de tenacidade do que fibras lisas e retas, com a mesma concentração de volume (BENTUR e MINDESS, 1990).

2.3.7.4 Resistência das fibras

Quando as condições de fratura são estabelecidas na ponta de uma falha crítica existente em um material, a fissuração é iniciada (BANTHIA; DUBEY, 1999). No estágio de pós-fissuração do concreto reforçado com fibras ocorre a transferência das tensões da matriz para as fibras. Neste contexto, segundo Figueiredo (2011), quanto maior a resistência das fibras, maior será a capacidade de resistir às tensões transferidas a elas.

À medida em que se aumenta a quantidade de fibras, menor será a tensão que cada fibra deve resistir sozinha, portanto, menor a probabilidade de sua ruptura. Neste sentido, pode-se dizer que altos teores de material fibroso no concreto podem compensar a baixa resistência do material. Como mencionado anteriormente a resistência mecânica das fibras é inversamente proporcional ao seu volume crítico e diretamente proporcional ao aumento de seu comprimento, respectivamente (FIGUEIREDO, 2011).

2.3.7.5 Resistência da matriz

Matrizes cimentícias com elevada resistência mecânica são propícias a apresentarem menores medidas de tenacidade em relação às matrizes com resistência inferior, tal fato ocorre devido a sua composição, pois concretos de alto desempenho possuem adições de sílica ativa e outras pozolanas, essas adições conferem ao compósito uma interface fibra-matriz menos porosa (GOLDMAN; BENTUR, 1993). A diminuição da porosidade aumenta a aderência entre fibra e matriz, levando as fibras a romperem antes de deslizarem. O gasto energético para que ocorra a ruptura da fibra é menor do que o necessário para o seu arrancamento, portanto menor a medida de tenacidade (FIGUEIREDO, 2000). Neste contexto, quanto maior o módulo de elasticidade da matriz maior será o volume crítico de fibras necessário para fornecer ao compósito o comportamento elastoplástico (FIGUEIREDO, 2011).

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).

CAPÍTULO 3

MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para a utilização do concreto reforçado por fibras de maneira eficiente e econômica é necessário a avaliação de seu comportamento. Algumas propriedades como resistência à compressão e módulo de elasticidade podem ser mensuradas por ensaios utilizados em concreto simples, ou seja, sem fibras (SALVADOR, 2013). Já a tenacidade deve ser determinada por ensaios específicos. (BENTUR; MINDESS, 2007). Como o uso do concreto reforçado por fibras está fortemente fundamentado na interação entre fibra e matriz, surgiu um grande número de ensaios com diferentes configurações de carregamento que procuram mensurar tal comportamento.

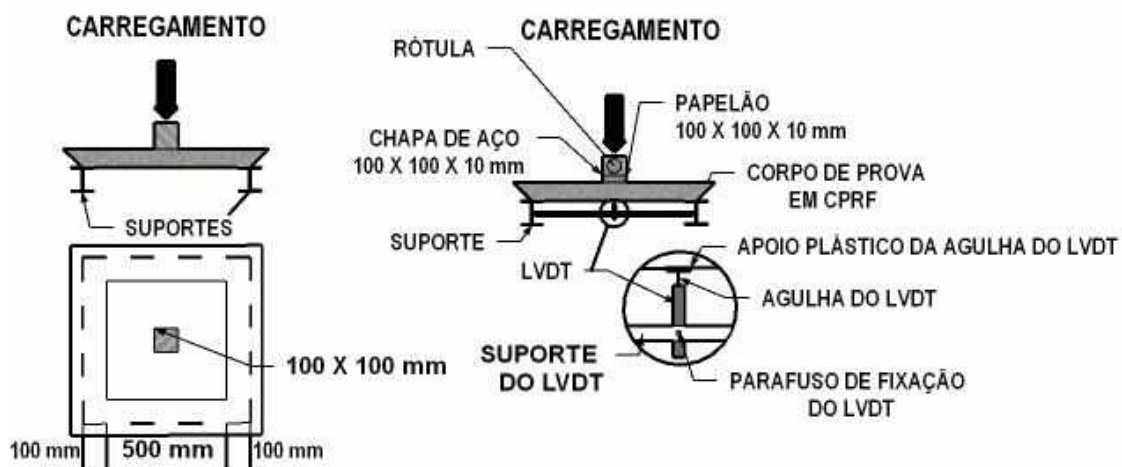
Este capítulo apresenta os principais métodos de avaliação do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras.

3.2 ENSAIOS POR PUNÇÃO

3.2.1 Método Efnarc (1996)

A *European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures* (Efnarc) (1996) propôs o primeiro método de ensaio que permite a caracterização comparativa da tenacidade do CRFA e o concreto reforçado com tela metálica (GOLAPARATNAM; GETTU, 1995). O ensaio consiste no puncionamento de placas quadradas com 100 mm de espessura, 600 mm de lado e 500 mm de vão. As placas devem ser apoiadas em seus quatro lados em superfícies quadradas com largura de 100 mm (Figura 13 e Figura 14).

Figura 13 - Esquema de ensaio de punção em placas quadradas, prescrito pela Efnarc (1996)



Fonte: Autora, (2018).

O ensaio é finalizado quando o centro da placa atinge a deflexão de 25 mm, e a curva de carga por deflexão é registrada. A tenacidade equivale à área sob a curva de energia absorvida por deflexão que é traçada a partir da curva carga por deflexão obtida por meio do ensaio.

Figura 14 – (a) Ensaio de punção; (b) Placa após o ensaio de punção, conforme recomendações da Efnarc (1996)



(a) (b)
Fonte: Adaptado de Figueiredo (2008).

A metodologia proposta pela Efnarc (1996) apresenta como vantagem a determinação da tenacidade em algumas aplicações práticas, como lajes sobre solos e revestimento de túneis em rocha (FIGUEIREDO, 2000; GOLAPARATNAM; GETTU, 1995). Entretanto, tal método apresenta limitações, como massa elevada do corpo de prova (aproximadamente 100 kg) em relação a outras metodologias de ensaio.

3.2.2 Método AENOR UNE 83515: 2010

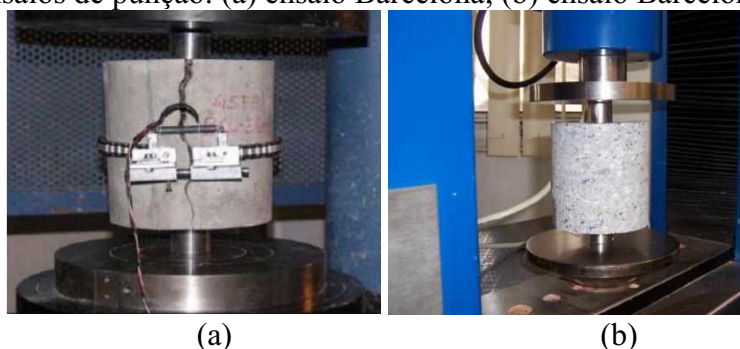
Também conhecido como Ensaio Barcelona, o método proposto pela AENOR UNE 83515: 2010 possui como objetivo a avaliação do comportamento pós-fissuração do CRF, a partir da determinação da tenacidade, resistência residual à tração e resistência à fissuração.

Os corpos de prova utilizados podem ser moldados ou extraídos, mas devem ser cilíndricos com diâmetro igual à sua altura. Para corpos de prova moldados o diâmetro mínimo deve ser 150 mm e para os extraídos 100 mm. O ensaio consiste na aplicação de carga no corpo de prova por meio de discos em sua face superior e inferior com velocidade de 0,5 mm/min, então faz-se a medida do aumento do perímetro do corpo de prova.

Quando o objetivo é avaliar estruturas já executadas o ensaio Barcelona se torna uma boa alternativa, já que permite a extração de testemunhos. Vale ressaltar que o método proposto pela AENOR UNE 83515:2010 utiliza corpos de prova cilíndricos com dimensões bem menores que os outros ensaios.

Para a leitura do aumento do perímetro circunferencial ou *Total Circunferential Opening* (TCOD), é utilizado o extensômetro de circunferência. Tal equipamento é encontrado em poucos laboratórios devido ao seu alto custo (PUJADAS, 2013). Neste contexto pode-se dizer que o Ensaio Barcelona apresenta como limitação a necessidade da utilização de equipamento que carece de alto investimento.

A fim de sanar essa limitação o ensaio Barcelona Simplificado (EBS) foi proposto. A diferença entre os dois métodos é a variável de leitura, em que no ensaio Barcelona mede-se o aumento do perímetro do corpo de prova e no EBS é realizada a leitura do deslocamento vertical da prensa utilizada. A prensa não precisa apresentar sistema *closed-loop*, portanto, o EBS pode ser realizado em boa parte dos laboratórios. A Figura 15 apresenta a configuração do ensaio Barcelona (a) e o ensaio Barcelona Simplificado (b).
Figura 15 - Ensaios de punção: (a) ensaio Barcelona; (b) ensaio Barcelona Simplificado

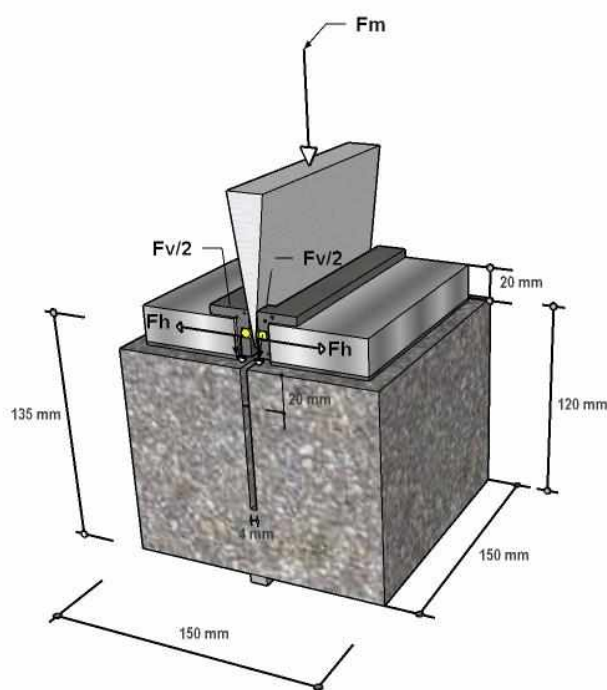


Fonte: Adaptado de Toaldo, Monte e Figueiredo, (2013).

3.3 ENSAIO DE ENCUNHAMENTO

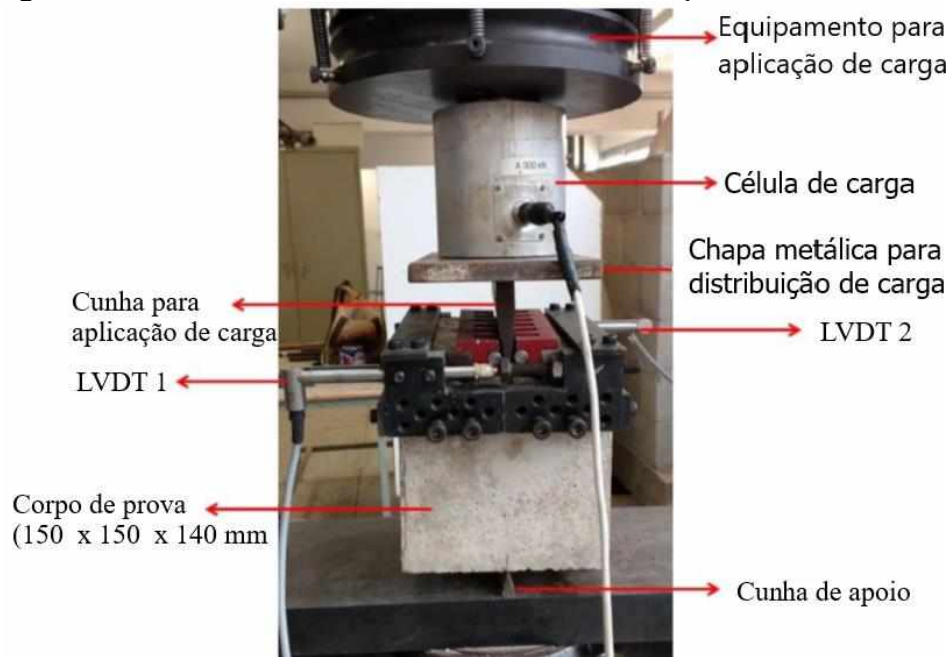
Os corpos de prova utilizados possuem dimensões de 150 mm x 150 mm x 140 mm e entalhe no centro da face superior com altura de 20 mm e espessura menor que 4 mm. Tal entalhe pode ser realizado durante a moldagem com auxílio de formas ou após a cura com serra de corte. O procedimento de montagem do ensaio consiste no posicionamento do corpo de prova em suporte linear estreito e as peças de transmissão são introduzidas no entalhe. Posteriormente a cunha é colocada sobre as peças de transmissão. A Figura 16 ilustra a configuração do ensaio de abertura por encunhamento e a Figura 17 apresenta o ensaio realizado por Dias, Silva e Santos, (2018).

Figura 16 - Configuração do ensaio de abertura por encunhamento;



Fonte: Autora, (2018).

Figura 17- Ensaio de encunhamento de concreto reforçado com fibras de aço



Fonte: Adaptado de Dias, Silva e Santos (2018).

O ensaio inicia-se com a aplicação de força vertical de compressão (F_M) no centro da cunha com velocidade constante de 0,5 mm/min. Tal força divide-se vetorialmente em força horizontal (F_H) e em uma menor força vertical (F_V) (Figura 16), por meio da cunha. F_H e F_V são dependentes do ângulo entre cunha e peças de transmissão. Ângulos inferiores a 15° não geram interferências significativas nos resultados (TSCHEGG *et al.*, 2015).

3.4 ENSAIOS EM PRISMAS

Segundo Figueiredo (2011), o método mais utilizado para controle do desempenho do CRF é a partir de ensaios de flexão de prismas com deformação controlada, por meio das quais são obtidas a tenacidade e a resistência residual após a fissuração do compósito. Em ensaios de flexão o compósito também pode apresentar os seguintes comportamentos: *deflection-softening* e *deflection-hardening*. No primeiro caso a carga resistida pelo material pós-fissuração da matriz é menor do que a carga de pico obtida no ensaio, tal comportamento é acompanhado de apenas uma fissura. Já o segundo, após a ruptura da matriz a carga resistida pelo compósito é maior do que a carga necessária para romper a matriz. Tal comportamento é acompanhado por múltiplas fissuras (NAAMAN, 2003).

Existem várias metodologias normatizadas para tais avaliações utilizando sistema fechado ou aberto. As normas mais utilizadas são: a JSCE-SF4:1984, ASTM C1399:2010, ASTM C1609:2012 e a EN 14651:2007.

3.4.1 JSCE-SF4:1984 – Método de ensaio de resistência e tenacidade à flexão de concreto reforçado com fibras metálicas

De acordo com Figueiredo (2011), o método mais utilizado para a obtenção da medida de tenacidade no Brasil e de concepção mais simples é o prescrito pela norma JSCE-SF4:1984. A metodologia de ensaio consiste na flexão de corpos de prova prismáticos por meio de quatro cutelos com o uso de *Linear Variable Differential Transformers* (LVDT) para a medida do deslocamento vertical no meio do vão, acoplado ao aparato de fixação YOKE. Trata-se de um sistema de controle *open-loop*, onde a velocidade de deslocamento do equipamento é mantida constante e a velocidade de deslocamento do pistão da prensa varia entre 0,15 e 0,50 mm por minuto.

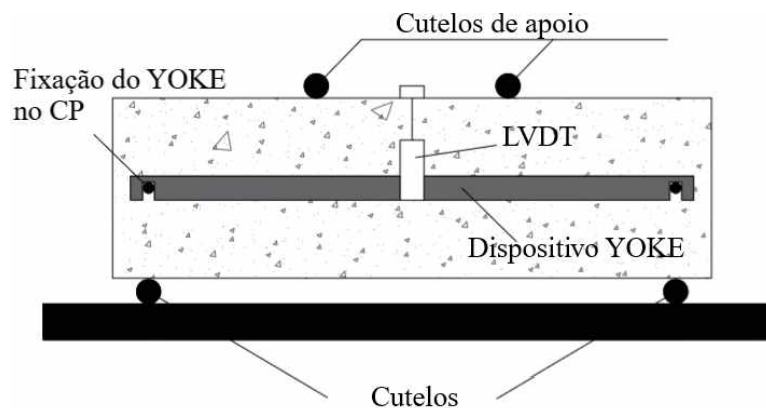
A Figura 18 ilustra o ensaio de flexão de corpo de prova prismático, segundo recomendações na norma JSCE-SF4:1984 e a Figura 19 o esquema de ensaio do mesmo.

Figura 18 – Ensaio de flexão, segundo a norma JSCE-SF4:1984



Fonte: Adaptado de Monte, Toaldo e Figueiredo (2014).

Figura 19 - Esquema de ensaio de flexão segundo a norma JSCE-SF4:1984

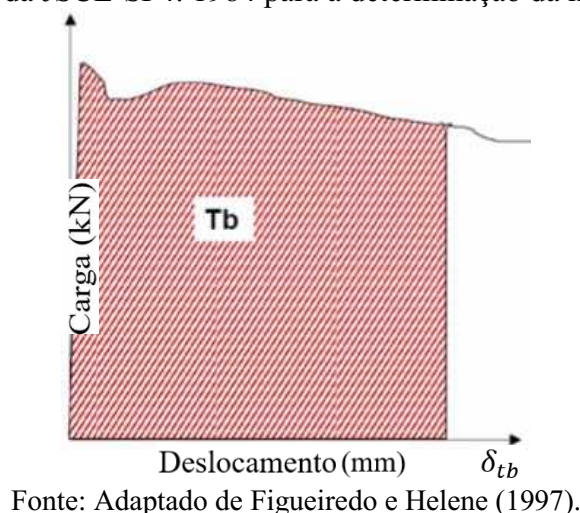


Fonte: Autora, (2018).

Os corpos de prova podem ser moldados ou extraídos com dimensões de 100 mm x 100 mm x 350 mm ou de 150 mm x 150 mm x 500 mm com vão de 300 mm ou de 450 mm, respectivamente. Tais dimensões são determinadas a partir do comprimento da fibra utilizada, onde o comprimento desta deve ser no mínimo três vezes menor que a menor dimensão do prisma a ser ensaiado.

Segundo JSCE-SF4: 1984, a tenacidade do CRF (T_b) pode ser determinada pela área sob a curva força por deflexão obtida durante o ensaio de tração na flexão com limite de deflexão (δ_{tb}) igual ao comprimento do vão/150 (Figura 20). A partir da curva obtida também podem ser calculados o fator de tenacidade (FT) e módulo de ruptura (MOR), que segundo a ACI 554.1R: 2002, consiste na maior tensão obtida durante o ensaio de resistência à tração na flexão do CRF.

Figura 20 - Critério da JSCE-SF4: 1984 para a determinação da medida de tenacidade



Fonte: Adaptado de Figueiredo e Helene (1997).

Os valores de tenacidade, MOR e FT devem ser obtidos pela média dos resultados encontrados no ensaio, onde são necessários quatro corpos de prova para a realização deste. De acordo com JSCE-SF4 (1984), MOR e FT são calculados por meio das Equações 4 e 5, respectivamente e expressos em MPa.

$$\text{MOR} = P \frac{L}{bh^2} \quad (4)$$

$$\text{FT} = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \cdot \frac{L}{bh^2} \quad (5)$$

Em que:

P = carga máxima obtida em kgf ou N;

L = vão, expresso em cm ou mm;

b = largura da seção transversal com falha em cm ou mm;

h = altura da seção transversal com falha em cm ou mm.

T_b = área sob a curva carga por deslocamento até a deflexão de $L/150$.

A JSCE-SF4:1984 recomenda que a carga seja aplicada nos corpos de prova sem impacto, em que tal carregamento não ultrapasse $1/5$ da capacidade total da máquina teste. Durante o ensaio as faces laterais da amostra moldada devem ser consideradas como superfícies superior e inferior, sendo posicionada no meio da largura dos suportes. Em caso de flexão, além da carga máxima, o carregamento deve ser executado de forma a manter a taxa de deflexão aproximadamente constante. Em caso de falha da amostra fora do terço médio da extensão na superfície, os resultados devem ser descartados.

Como dito anteriormente o sistema utilizado nesta metodologia é do tipo *open-loop*, desse modo o ensaio pode sofrer instabilidade pós-pico, tal comportamento pode ser identificado pelo acréscimo da separação entre pontos no gráfico de carga por deslocamento. Para minimizar o efeito da instabilidade pós-pico é necessário o uso de equipamento com pórtico de elevada rigidez (GUETTU *et al.*, 1996). Entretanto, segundo Natajara (2000) e Islam (2002), tal instabilidade não é um problema para o método JSCE, já que a deflexão final $L/150$ está distante da curva para ser afetada pela instabilidade na parte inicial.

Natajara (2000) cita que o método apresentado pela norma japonesa apresenta algumas limitações, como:

- dependência da geometria dos corpos de prova para o cálculo de FT, onde a correlação exata do desempenho do CRF é dificultada;

- a deflexão última de $L/150$ é criticada muitas vezes por ser muito maior do que os limites aceitáveis de deflexão/manutenção;
- o comportamento imediatamente após a primeira fissura não é levado em consideração para o cálculo de FT, onde tal comportamento pode ser importante em muitas aplicações;
- a norma japonesa não distingue o comportamento pré-pico e pós-pico do material, onde é utilizada a área total sob a curva para o cálculo de FT.

3.4.2 ASTM C1609:2012 – Método de ensaio padrão de desempenho à flexão de concreto reforçado com fibras

A norma ASTM C1609:2012 é uma variação da norma JSCE-SF4:1984, em que propõe a flexão de corpos de prova prismáticos sob quatro cutelos. O grande diferencial entre os métodos é a utilização de sistema *closed-loop*. Segundo Guettu *et al.* (1996), sistemas *closed-loop* apresentam maior estabilidade e precisão nos resultados, pois controlam diretamente a deformação do corpo de prova carregado.

Os corpos de prova devem apresentar dimensões de 100 mm x 100 mm x 350 mm ou 150 mm x 150 mm x 500 mm com vão de 300 mm e 400 mm, respectivamente. Variações de dimensões podem ser adotadas, desde que o comprimento do corpo de prova seja no mínimo 50 mm maior que três vezes altura da seção transversal e não inferior a 350 mm. A aplicação de carga deve ser realizada perpendicularmente a direção de moldagem.

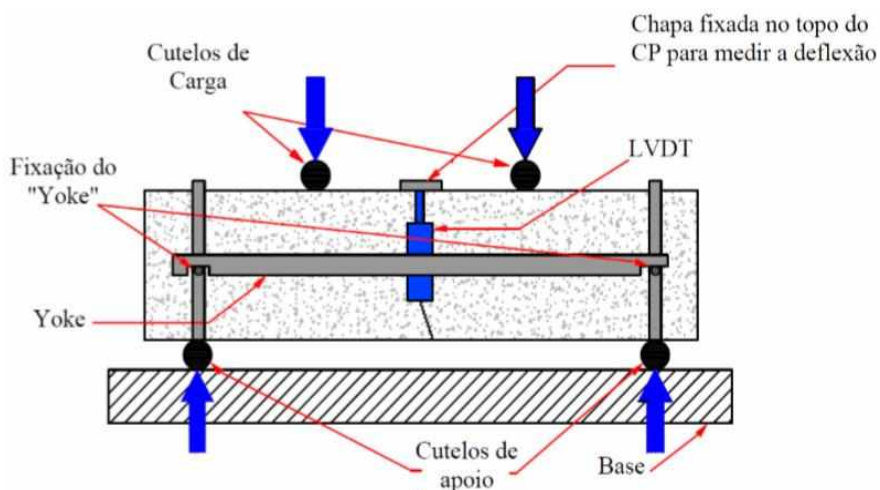
Para obter-se a medida de deslocamento vertical do corpo de prova são utilizados LVDTs, que são posicionados no dispositivo de fixação Yoke, que é acoplado ao corpo de prova. As Figuras 21 e 22 ilustram o ensaio e o esquema de ensaio de tração à flexão segundo recomendações da norma ASTM 1609:2012.

Figura 21 – (a) Ensaio de tração à flexão segundo a ASTM C1609:2012



Fonte: Autora, (2018).

Figura 22 - Esquema de ensaio de tração à flexão segundo a ASTM C1609:2012



Fonte: Arif, (2013).

De acordo com a ASTM C1609:2012 a máquina de teste deve ser operada de forma que a velocidade de deflexão aumente conforme a Tabela 4. Para a deflexão além de $L/900$ e até a deflexão do ponto final, é permitida uma maior taxa de aumento da deflexão devido à ausência de instabilidade, tratando-se de segmento pós-fissuração. Ao aumentar a taxa de carga, a taxa de aumento da deflexão deve ser aumentada em incrementos não superiores a 0,05 mm/min.

Tabela 4 - Incremento de velocidade de carregamento

Dimensão de corpo de prova	Velocidade inicial até L/900 de deflexão	Velocidade secundária (L/900 – L/150) de deflexão
100 x 100 x 350 mm	0,025 – 0,075 mm/min	0,050 – 0,200 mm/min
150 x 150 x 500 mm	0,035 – 0,100 mm/min	0,050 – 0,300 mm/min

Fonte: ASTM C1609:2012.

A análise da curva de deslocamento por deflexão é analisada por meio da determinação das cargas residuais $P_{d,L/600}$ e $P_{d,L/150}$, utilizadas para o cálculo das resistências residuais $f_{d,L/600}$ e $f_{d,L/150}$, quando a deflexão for L/600 e L/150, respectivamente. Onde a primeira deflexão está relacionada ao estado limite de serviço e a última ao estado limite último. A tenacidade concedida pela adição de fibras ao concreto pode ser estimada pela integral ou área sob a curva força por deslocamento entre os pontos 0 e L/150. As resistências residuais são calculadas pelas Equações 8 e 9.

$$f_{d,L/150} = P_{d,L/150} \cdot \frac{L}{b \cdot d^2} \quad (8)$$

$$f_{d,L/600} = P_{d,L/600} \cdot \frac{L}{b \cdot d^2} \quad (9)$$

Em que:

f = resistência residual quando o deslocamento vertical do corpo de prova for L/600 ou L/150 em (MPa);

P = carga residual para o corpo de prova quando o deslocamento vertical for L/600 ou L/150; L = vão do ensaio (mm);

b = largura do corpo de prova (mm);

h = altura do corpo de prova (mm).

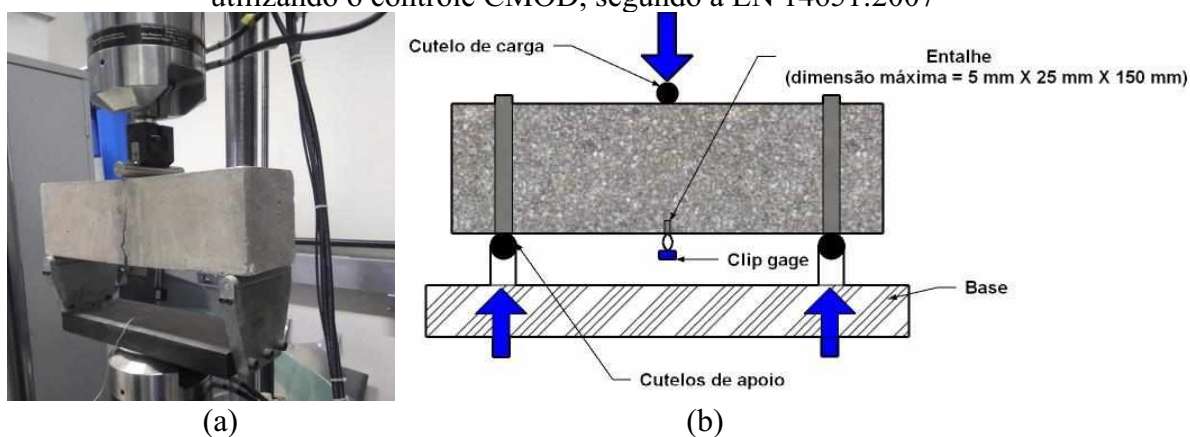
A metodologia apresentada pela norma confere resultados adequados para compósitos com comportamento *strain-softening*, com presença de uma única fissura. Entretanto para compósitos com múltiplas fissuras com comportamento *strain-hardening* não resulta resultados reais da força de pico, já que há queda na curva de força por deflexão. Quando o compósito apresenta comportamento elastoplástico ou *strain-hardening* a resistência a primeira fissura não é encontrada na parte inicial da curva carga por deflexão (ISLAM, 2012).

3.4.3 EN 14651:2007 – Método de ensaio para concreto reforçado com fibras metálicas – determinação da resistência à tração por flexão (limite de proporcionalidade (LOP) e resistência residual)

A norma EN 14651:2007 determina as propriedades mecânicas do CRF por meio de ensaio de flexão em três pontos em corpos de prova prismáticos com presença de entalhe. O controle do ensaio é do tipo *closed-loop*, portanto é necessário o uso de máquina servo controladora. Para Dattatreya, Harush e Neelamegan (2007), a metodologia proposta pela norma europeia é satisfatória para análise do comportamento do compósito e desempenho das fibras, pois possibilita mensurar a tenacidade do CRF, caracterizar as fibras utilizadas como reforço e ainda quantificar a resistência à fratura do material.

O procedimento de ensaio pode ser realizado a partir da aferição da abertura da boca da fissura (CMOD) ou pela leitura da deflexão (δ). No primeiro método a abertura do entalhe é controlada por meio do acessório (*Clipe Gage*), que é instalado ao longo do eixo longitudinal no meio da largura do corpo de prova onde se encontra o entalhe (Figura 23). Já no segundo, a variável de controle é a deformação, onde um transdutor de deslocamento é montado em uma estrutura rígida (Yoke) e fixada ao corpo de prova a meia altura nos suportes.

Figura 23 – a) Ensaio e b) esquema de ensaio de flexão em corpo de prova entalhado utilizando o controle CMOD, segundo a EN 14651:2007

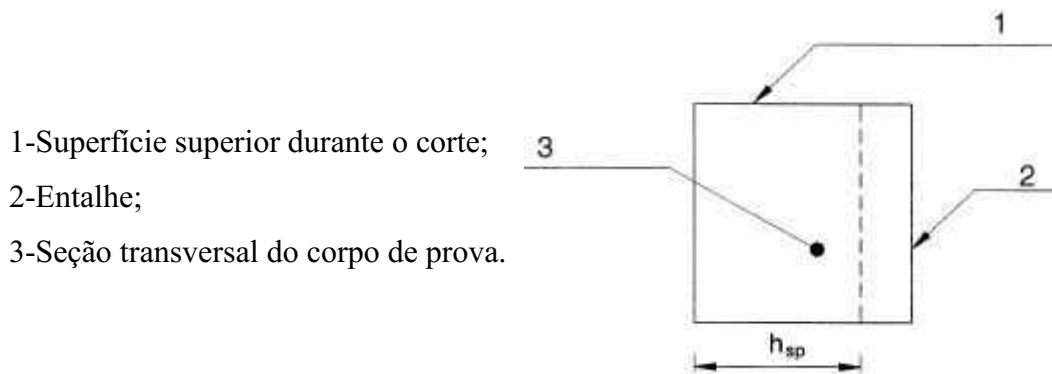


Fonte: Autora, (2018).

O tamanho dos agregados e fibras metálicas utilizados devem ser inferiores a 32 mm e 60 mm, respectivamente. Os corpos de prova devem apresentar dimensões de 150 mm de largura e profundidade, e comprimento (L) entre $550 \text{ mm} \leq L \leq 700 \text{ mm}$. O local

do entalhe deve ser realizado conforme a Figura 24 com espessura e profundidade menores que 5 mm e 25 mm, respectivamente.

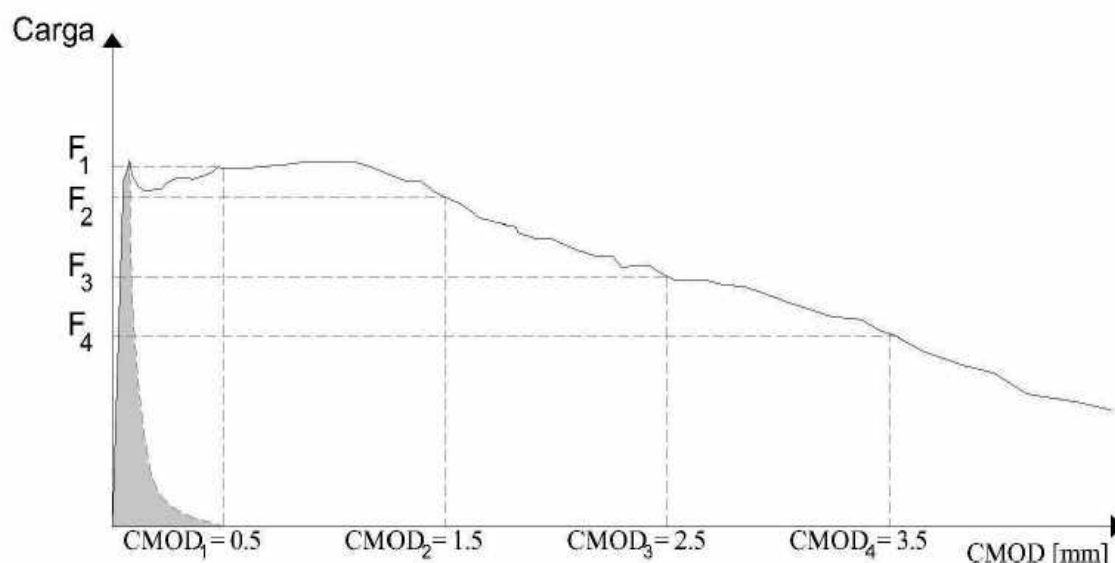
Figura 24 – Local de entalhe no corpo de prova



Fonte: EN 14651:2007.

Assim como ASTM C1609:2012 a EN 14651:2007 indica que o ensaio seja realizado em dois trechos de velocidade, a máquina deve ser operada inicialmente de modo que CMOD aumente a uma taxa constante de 0,05 mm/min. Quando CMOD = 0,1 mm, a máquina deve ser operada de modo que CMOD aumente a uma taxa constante de 0,2 mm/min. Os valores de carga e CMOD correspondentes devem ser registrados a uma taxa não inferior a 5 Hz durante os dois minutos iniciais de teste e posteriormente tal taxa pode ser reduzida para até 1 Hz. O ensaio é finalizado com um valor CMOD não inferior a 4 mm. Deve-se averiguar instabilidade no ensaio caso a carga mínima no intervalo entre CMODFL e CMOD = 0,5 mm seja menor que 30% da carga equivalente ao CMOD = 0,5 mm. Os testes em que a fissuração se inicia fora do entalhe devem ser rejeitados. A Figura 25 ilustra o caráter da curva carga por CMOD obtido durante o ensaio de flexão.

Figura 25 - Curva de Carga por CMOD



Fonte: EN 14651:2007.

Quando a variável de controle é o aumento da taxa de deslocamento vertical, o mesmo procedimento deve ser aplicado, sob condição que os valores encontrados de CMOD sejam correlacionados com parâmetros de deslocamento vertical a partir da Equação (10), proposta pela EN 14651:2007.

$$\delta = 0,85 \times \text{CMOD} + 0,04 \quad (10)$$

Em que:

δ = deslocamento vertical, em mm;

CMOD valor de CMOD, em mm, distância entre o fundo do corpo-de-prova até a linha de medição ($y=0$)

*Nota: se a linha de medição estiver a uma distância y abaixo da parte inferior do corpo de prova, o valor de CMOD deve ser derivado a partir do valor medido CMOD_y , utilizando a expressão:

$$\text{CMOD} = \text{CMOD}_y \cdot \frac{h}{h + y} \quad (11)$$

Em que:

h = altura total do corpo de prova.

As curvas de carregamento por CMOD também podem ser transformadas em curvas de carregamento por deflexão mediante o uso dos valores apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Correlação entre CMOD e δ

CMOD (mm)	δ (mm)
0,05	0,08
0,1	0,13
0,2	0,21
0,5	0,47
1,5	1,32
2,5	2,17
3,5	3,02
4,0	3,44

Fonte: EN 14651:2007.

A partir da curva Carga por CMOD (Figura 25) as resistências residuais à tração são obtidas (Equação 12):

$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2} \quad (12)$$

Em que:

$f_{R,j}$ = resistência residual à tração do CRF (N/mm²);

F_j = carga correspondente ao CMODj (N);

l = vão de ensaio do corpo de prova (mm);

b = largura do corpo de prova (mm);

h_{sp} = distância entre a ponta do entalhe e a face superior do corpo de prova (mm).

Limite de proporcionalidade: o LOP é determinado pela Equação 13.

$$f_{ct,L}^f = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2} \quad (13)$$

Em que:

$F_{ct,L}$ = LOP (N/mm²);

F_L = carga correspondente ao LOP, em N (FL é o valor da carga máxima no intervalo de 0,05mm);

Para critério de dimensionamento as resistências residuais 0,5 mm e 2,5 mm foram adotadas como resistências no estado limite de serviço (fr,3) e estado limite último (fr,1), respectivamente. Onde a performance do CRF pode ser estimada a partir da comparação do desempenho do compósito no estado limite último e de serviço. Tal comparação é realizada pela razão fr,3/fr,1, onde se as Equações (14) e (15) forem atendidas as fibras

metálicas podem substituir parcialmente ou totalmente as barras ou telas de aço no concreto (EN 14651:2007).

$$f_{R,1k}/f_{Lk} \geq 0,4 \quad (14)$$

$$f_{R,3k}/f_{R,1k} \geq 0,5 \quad (15)$$

Em que:

f_{Lk} = resistência nominal característica do concreto (MPa);

$f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$ = resistências residuais características para abertura de fissura de 0,50 mm e 2,50 mm respectivamente (MPa).

A critério de simplificação durante o dimensionamento o valor $f_{R,1k}$ pode ser definido pelas seguintes cargas de resistência: 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0 e 8,0 MPa. Onde a razão pode ser representada pelas letras a, b, c e d, apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Classes para as resistências residuais $f_{R,3k}/f_{R,1k}$

Letra	Condição
a	$0,50 \leq f_{R,3k}/f_{R,1k} \leq 0,80$
b	$0,80 \leq f_{R,3k}/f_{R,1k} \leq 1,1$
c	$1,1 \leq f_{R,3k}/f_{R,1k} \leq 1,4$
d	$1,4 \leq f_{R,3k}/f_{R,1k}$

Fonte: *fib*, (2010).

Segundo Shah, Kuder e Mu (2004) a medida de tenacidade por meio da curva carga por CMOD é mais confiável do que a de carga por deflexão, pois a partir dela é possível correlacionar as propriedades fundamentais da fratura. Outro diferencial do método é que a presença de entalhe faz com que a fissura se localize muito perto do plano entalhe. Não ocorrem deformações lineares nas outras regiões dos corpos de prova, portanto toda energia dissipada pode ser atribuída à abertura da fissura (GIACCIO; TOBES; ZERBINO, 2008), os dados obtidos tendem a apresentar menor dispersão e os resultados podem ser atrelados ao dimensionamento de CRF (*fib* 2010).

No Apêndice F é apresentado o dimensionamento de uma viga de concreto armado reforçada com três diferentes teores de fibras de aço.

CAPÍTULO 4

PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo aborda os procedimentos experimentais adotados para a determinação da medida de tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço. O objetivo geral desta pesquisa é comparar as metodologias propostas pelas normas ASTM C1609:2012 e EN 14651:2007. Para isso, foram utilizadas 2 matrizes de concreto (resistências médias à compressão de 20 e 40 MPa) simples (sem fibras) e reforçadas com fibras de aço em três dosagens diferentes (30, 40 e 50 kg/m³), resultando em 8 composições distintas. Para facilitar a visualização das diferentes composições de concreto foi criada a notação apresentada no Quadro 2.

Quadro 2 Notação utilizada para diferentes traços de concreto

CS XX	CS: Concreto simples
	XX: Resistência média à compressão (MPa)
CRF XX/YY	CRF: Concreto reforçado com fibras
	XX: Resistência média à compressão (MPa)
	YY: Dosagem de fibra (Kg/m ³)

Fonte: Autora, (2018).

A Tabela 7 apresenta a quantidade de corpos de prova moldados para a realização dos ensaios de caracterização (resistência à compressão, resistência à tração diametral e módulo de elasticidade) e de ensaios de tração à flexão segundo as normas ASTM C1609:2012 e EN 14651:2007. Vale destacar que para a realização de ensaios de caracterização, foram ensaiados: 3 corpos de prova à compressão aos 28 dias e aos 60 dias e 2 corpos de prova à tração por compressão diametral aos 60 dias.

Tabela 7 - Quantitativo de corpos de prova moldados para realização de ensaios

Características dos traços	Número de corpos de prova para cada tipo de ensaio		
	Caracterização	ASTM C1609:2012	EN 14651:2007
CS 20	8	3	3
CRF 20/30	8	3	3
CRF 20/40	8	3	3
CRF 20/50	8	3	3
CS 40	8	3	3
CRF 40/30	8	3	3
CRF 40/40	8	3	3
CRF 40/50	8	3	3

Fonte: Autora, (2018).

A produção do concreto, moldagem e cura dos corpos de prova foram realizadas no Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (Feciv/UFU). A moldagem dos corpos de prova cilíndricos foi realizada de acordo com as recomendações da norma ABNT NBR 5738:2016 e a dos prismáticos, conforme as normas ASTM C1609:2012 e EN 14651:2007. Os materiais utilizados são descritos nos próximos tópicos. Vale ressaltar que o programa experimental proposto considera a adoção de dosagens já estudadas na Feciv/UFU por Vitor (2017) e Pereira (2017).

4.2 MATERIAIS

4.2.1 Cimento

Para a produção do concreto foi utilizado o cimento Portland CP IV 32 RS. A massa específica do cimento foi determinada segundo recomendações da ABNT NBR 16605: 2017. O resultado obtido foi 2,90 g/cm³.

4.2.2 Agregados

Foi usada como agregado miúdo areia lavada de rio retirada na região do Triângulo Mineiro do tipo fina e média. As caracterizações de ambos os tipos foram realizadas conforme as respectivas recomendações normativas e seus resultados apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Caracterização do agregado miúdo

Ensaio	Areia fina	Areia média	Normas utilizadas
Massa específica (g/cm ³)	2,6	2,94	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)	1,2	1,2	ABNT NBR NM 248: 2003
Módulo de finura	1,43	1,42	ABNT NBR NM 248: 2003

Fonte: Autora, (2018).

Como agregado graúdo foi empregado pedra britada de rocha basáltica com dimensões máximas ($D_{máx}$) de 12,5 mm e 19 mm. A caracterização de tais materiais bem como as recomendações normativas utilizadas são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Caracterização do agregado graúdo

Ensaio	Brita 0	Brita 1	Normas utilizadas
Massa específica (g/cm ³)	2,66	2,78	ABNT NBR NM 53: 2009
Massa unitária no estado compactado (g/cm ³)	1,53	1,49	ABNT NBR NM 45: 2006
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	1,65	1,64	ABNT NBR NM 45: 2006
Dimensão máxima (mm)	12,5	19	ABNT NBR NM 248: 2003
Módulo de finura	2,4	3,04	ABNT NBR NM 248: 2003

Fonte: Autora, (2018).

Tanto os agregados graúdos, como os miúdos apresentaram massa específica e granulometria semelhantes aos agregados utilizados por Pereira (2017) e Vitor (2017). A vista disso não foi necessário a correção do traço.

4.2.4 Fibra de aço

Segundo o catálogo do fabricante, a fibra utilizada é titulada como DRAMIX 65/60 RN. Produzida a partir de fios de aço trefilado apresenta ancoragem nas extremidades e seção transversal circular com diâmetro e comprimento médio de 0,90 mm e 60 mm, respectivamente.

Como visto na seção 2.2.2, a ABNT NBR 15530:2007 classifica as fibras de aço de acordo com seu formato e tipo de material proveniente. Neste contexto a fibra utilizada nesta pesquisa é classificada como de seção circular do tipo A e classe 1. As Figuras 26 e 27, ilustram a geometria e dimensões da fibra de aço utilizada.

Figura 26 - Geometria e dimensões da fibra de aço utilizada



Figura 27 - Fibra metálica utilizada



Fonte: Autora, (2018).

4.2.5 Aditivo

Com o objetivo de obter a trabalhabilidade adequada para moldagem dos corpos de prova e não afetar o tempo de pega foi utilizado o aditivo superplastificante MasterGlenium 3400NV fornecido pela BASF S.A. Suas características são apresentadas na Tabela 10, segundo o catálogo do fabricante.

Tabela 10 - Características do aditivo MasterGlenium 3400

Dados técnicos	Características
Base química	Éter Policarboxílico
Aspecto	Líquido castanho
Densidade (g/cm ³)	1,06
pH	08 – 10
Teor de sólidos (%)	42,5 a 46,5

Fonte: Catálogo do fabricante, (2018).

4.3 DOSAGEM DO CONCRETO

Como dito anteriormente os traços de concreto utilizados possuem como referência estudos de dosagem já realizados anteriormente na Feciv/UFU por Vitor (2017) e Pereira (2017), e estão apresentados na Tabela 11. A partir das dosagens de concreto sem fibras

apresentados na Tabela 12, foram dosados os traços para os concretos reforçados por fibras de aço com o consumo de fibras de 30 kg/m³, 40 kg/m³ e 50 kg/m³, ou 0,37 %, 0,50 % e 0,64 % em volume, respectivamente.

Tabela 11 - Composição dos traços utilizados

Materiais	C20	C40
Cimento CP IV 40 RS (kg/m ³)	315,99	459,27
Agregado miúdo – módulo de finura 1,24 (kg/m ³)	290,71	257,19
Agregado miúdo – módulo de finura 1,63 (kg/m ³)	543,5	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 hiperplastificante	0,86	2,34
Traço	1:2,64:3,36:0,66	1:1,6:2,4:0,4

Fonte: Adaptado de Pereira (2017).

4.4 PRODUÇÃO, MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Após a separação e pesagem dos materiais a produção do concreto de todos os traços ocorreu conforme a seguinte sequência:

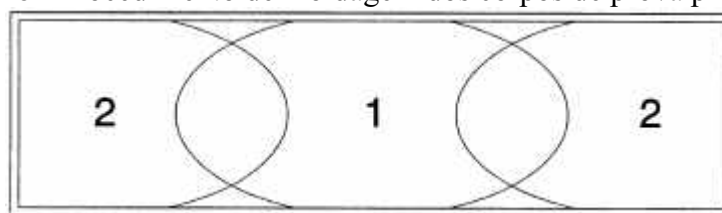
- inicialmente foi realizada a imprimação da betoneira para reduzir a perda de água e finos na mistura;
- após o descarte do material proveniente da imprimação foram adicionados a betoneira: agregado graúdo, cimento e metade da água de amassamento. Tais materiais permaneceram em mistura durante 1 minuto;
- em seguida, a areia e o restante da água com aditivo diluído foram colocados na betoneira e misturados por mais 1 minuto;
- por fim, para os traços com presença de fibra, foram adicionadas as fibras de aço lentamente a fim de evitar a formação de “ouriços”. Após a adição de todos os materiais a mistura permaneceu por mais 5 min.

Para os ensaios referentes as normas ASTM 1609:2012 e EN 14651:2007 foram utilizadas formas metálicas de seção transversal 150 mm × 150 mm e comprimento de 500 mm. E para os ensaios de caracterização formas metálicas cilíndricas com diâmetro e altura de

100 mm e 200 mm, respectivamente. Ambas as formas foram previamente untadas com óleo desmoldante para então serem preenchidas.

A moldagem dos corpos de prova prismáticos foi iniciada no terço médio das formas e, em sequência, foram preenchidos os outros terços. Segundo a norma EN 14651:2007 o tamanho do incremento 1 deve ser o dobro do incremento 2 (Figura 28). O adensamento de todos os corpos de prova foi realizado em mesa vibratória e ocorreu em duas etapas, a primeira com a forma preenchida em aproximadamente 90% de sua altura e na segunda até a cobertura do molde após a compactação. O tempo de vibração adotado foi de aproximadamente 10 segundos.

Figura 28 - Procedimento de moldagem dos corpos de prova prismáticos



Fonte: EN 14651: 2007.

Após o acabamento, os corpos de prova foram identificados e estocados em câmara úmida. Os corpos de prova cilíndricos permaneceram por 24 horas, conforme as recomendações da norma ABNT 5738: 2016 e os prismáticos durante 48 horas como prescrito na EN 14651: 2007 e ASTM 1609: 2012, para então serem retirados dos moldes. Finalmente, após a desforma, os corpos de prova permaneceram em tanques com água e cal até a realização dos ensaios. As etapas de produção são ilustradas na Figura 29.

Figura 29 - Etapas de produção dos corpos de prova prismáticos



Fonte: Autora, (2018)

4.5 ENSAIOS REALIZADOS

4.5.1 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado, conforme as recomendações da norma ABNT NBR 5739: 2018. Para cada dosagem de concreto, três corpos de prova foram ensaiados em 28 dias e três corpos de prova aos 60 dias de cura, totalizando em 40 corpos de prova ensaiados quanto a resistência à compressão com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

Inicialmente os pratos da máquina de ensaio foram limpos e, em seguida, procedeu-se com o posicionamento do corpo de prova no prato inferior para então o carregamento com velocidade contínua de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. O ensaio de compressão do corpo de prova de concreto reforçado com fibra de aço é apresentado na Figura 30.

Figura 30 – Realização do ensaio de compressão



Fonte: Autora, (2018).

Ao fim do procedimento de ensaio a resistência à compressão de cada corpo de prova foi calculada (Equação 16).

$$f_c = \frac{4 \cdot F_c}{\pi \cdot D^2} \quad (16)$$

Em que:

f_c = resistência à compressão (MPa);

F_c = força de compressão máxima (N);

D = diâmetro do corpo de prova (mm).

4.5.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração foi realizado segundo recomendações da norma ABNT NBR 7222 – Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos (2011) na máquina de ensaio servo eletromecânica Instron.

Inicialmente o corpo de prova foi posicionado no centro dos pratos da máquina de ensaio ao longo de sua geratriz, de forma que ficasse em repouso. Entre o corpo de prova e a máquina de ensaio foram colocadas duas tiras de chapa dura de fibra de madeira com espessura aproximada de 3,5 mm (Figura 31-a). Após o posicionamento do corpo de prova o carregamento de compressão foi aplicado constantemente a uma velocidade de $0,05 \pm 0,02$ MPa/s até a ruptura do mesmo (Figura 31-b).

Figura 31 – (a) Realização do ensaio de compressão diametral, (b) CS 40 e CRF 40/40 após o ensaio de compressão diametral



(a)



(b)

Fonte: Autora, (2018).

Por fim, a resistência à tração dos corpos de prova ensaiados foi calculada a partir da Equação 17.

$$f_T = \frac{2 \cdot F_{cr}}{\pi \cdot d_{cp} \cdot l_{cp}} \quad (17)$$

Em que:

f_T = resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F_T = força de ruptura (N);

d_{cp} = diâmetro do corpo de prova (mm);

l_{cp} = comprimento do corpo de prova (mm).

4.5.3 Ensaio de tenacidade segundo ASTM C1609:2012

Aos 60 dias de idade foram ensaiados no Laboratório de Estruturas e Materiais da Feciv/UFU, três corpos de prova de cada traço segundo a norma ASTM C1609:2012, totalizando em vinte quatro corpos de prova com dimensões de 150 mm x 150 mm x 500 mm.

Inicialmente os corpos de prova foram retirados da cura submersa, identificados de acordo com o sentido da moldagem e girados 90° em torno de seu eixo longitudinal, de modo que a aplicação da carga pudesse ser realizada no plano perpendicular ao sentido de moldagem do corpo de prova.

Devido a possíveis irregularidades de formato nas extremidades foi desconsiderado 25 mm de extensão em cada extremidade dos corpos de prova, portanto o vão de ensaio foi alterado para 450 mm. Para facilitar a montagem do dispositivo de fixação Yoke e centralização do apoio com a célula de carga foram utilizadas placas de madeira de 25 mm e 150 mm (Figura 32) para a marcação das espécies a serem ensaiadas.

Figura 32 - Marcação do corpo de prova



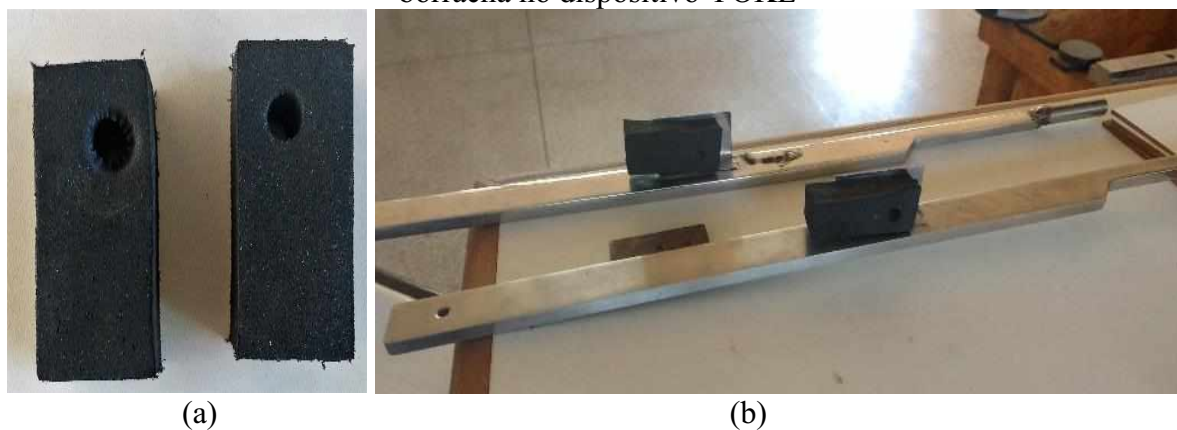
Fonte: Autora, (2018).

Com o objetivo de aumentar a fixação entre LVDTs e o dispositivo Yoke, foram colocados previamente placas de borracha com cola resistente em tal aparato (Figura 33). Utilizou-se dispositivo Yoke de aço inoxidável em forma de chapa com espessura e comprimento de 8 mm e 500 mm, respectivamente.

Após a preparação do corpo de prova e do dispositivo Yoke, este último foi montado no corpo de prova nos apoios previamente demarcados. Tal montagem visou assegurar que um dos lados se mantivesse fixo permitindo a movimentação vertical na outra extremidade, para isso

um dos lados foi fixado com parafuso e porca borboleta. Posteriormente, os LVDTs foram fixados no aparato na seção central da face lateral do corpo de prova.

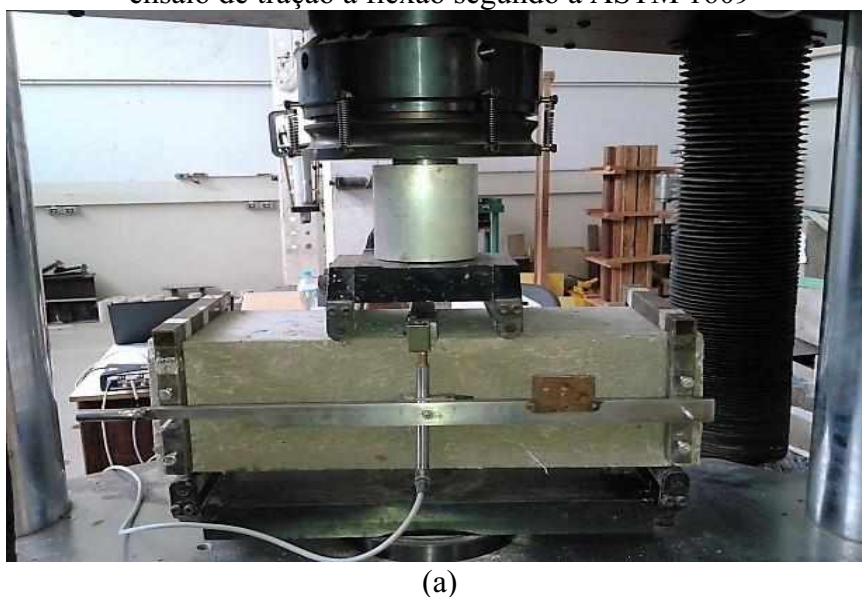
Figura 33 – (a) borracha para fixação de LVDT em dispositivo YOKE; (b) Fixação de borracha no dispositivo YOKE



Fonte: Autora, (2018).

Por fim o corpo de prova a ser ensaiado foi colocado sobre os cutelos da máquina servo hidráulica Instron HDX Models com capacidade de 1000 kN e submetido ao ensaio de tração à flexão (Figura 34-a) até a sua ruptura (Figura 34-b). O controle durante a realização do teste de tração à flexão foi feito pelo LVDT externo. Foram colocados dois LVDTs na região central de cada face lateral do corpo de prova, conforme a Figura 34 (a). O transdutor utilizado tem base de medida de 100 mm e precisão de 0,0001 mm. A velocidade de carregamento foi dividida em duas etapas (Quadro 3).

Figura 34 – (a) Ensaio de tração à flexão segundo a ASTM 1609; (b) Corpo de prova após ensaio de tração à flexão segundo a ASTM 1609





(b)

Fonte: Autora, (2018).

Quadro 3 - Velocidade de carregamento conforme a ASTM C1609:2012

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

Fonte: Autora, (2018)

4.5.4 Ensaio de tenacidade segundo EN 14651:2007

Este procedimento experimental prescreve ensaios de tração à flexão em corpos de prova prismáticos, cujas dimensões são 150 mm x 150 mm x 550 mm, com vão de ensaio de 500 mm. Entretanto, devido à padronização brasileira de ensaios de tração à flexão optou por utilizar corpos de prova com dimensões de 150 mm x 150 mm x 500 mm, sendo ensaiados com vão de 450 mm, dado que estas eram as medidas disponíveis para formas e vãos dos cutelos. Assim os valores foram corrigidos.

Foram ensaiados três corpos de prova de concreto reforçado com fibras de aço para cada traço, totalizando em 18 corpos de prova ensaiados. Tais espécies foram retiradas da cura submersa e entalhados no Laboratório de Estruturas e Construção da Feciv/UFU.

Conforme recomendações da norma EN 14651:2007 o entalhe foi realizado no meio do eixo longitudinal do corpo de prova com máquina de corte, com espessura média e profundidade de 5 mm e 25 mm, respectivamente. A Figura 35 e 36 ilustram o procedimento

de entalhe utilizando máquina de corte. Após o procedimento de corte, os corpos de prova serão devolvidos ao tanque e permanecerão em cura submersa até a hora do ensaio.

Figura 35 – Realização do entalhe conforme recomendações da norma EN 14651:2007



Fonte: Autora, (2018).

Figura 36- Corpo de prova após o procedimento de entalhe prescrito pela EN 14651: 2007



Fonte: Autora, (2018).

Os ensaios de tração à flexão conforme prescrições da norma EN 14651: 2007 foram realizados no Laboratório de Mecânica da Fratura da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (Femec/UFU). Para tal procedimento, foi utilizada a máquina MTS eletromecânica e servo hidráulica, com capacidade de 100 kN à compressão.

O controle do ensaio foi realizado por meio do acessório *Clip gage*, com sensibilidade de 0,0001 mm e base de medida de abertura de 250 mm, sendo este posicionado no entalhe, região central da face inferior do corpo de prova. A Figura 37 ilustra o ensaio de tração à flexão do concreto reforçado com fibras de aço.

Figura 37 – Ensaio de tração à flexão segundo recomendações da EN 14651:2007



Fonte: Autora, (2018).

Conforme recomendações da norma EN 14651:2007 a velocidade de carregamento foi dividida em duas etapas segundo a abertura de fissuras durante o ensaio. (Quadro 4).

Quadro 4 - Velocidade de carregamento conforme as recomendações da EN 14651:2007

Norma	Velocidade inicial até 0,5 mm de abertura de fissura	Velocidade secundária de 0,50 mm a 4,0 mm de abertura de fissura
EN 14651	0,05 mm/min	0,20 mm/min

Fonte: Autora, (2018).

4.5.5 Resumo de execução do programa experimental

Quadro 5 – Resumo de execução dos ensaios ASTM C1609: 2012 e EN 14651: 2007

Resumo de execução		
Variáveis	ASTM C1609	EN 14651
Tamanho e geometria do corpo de prova	150 mm x 150 mm x 500 mm	150 mm x 150 mm x 500 mm
Produção dos corpos de prova	Moldagem	Moldagem
Moldagem do corpo de prova	Início no terço médio da forma	Início no terço médio da forma
Compactação	Mesa vibratória	Mesa vibratória
Cura	Submersa	Submersa
Entalhe	Não	Sim (5 mm de espessura x 25 mm de altura x 150 mm de largura), é necessário máquina de corte e mão de obra especializada para realizar o corte
Tipo de sistema operacional da máquina utilizada	<i>Closed loop</i>	<i>Closed loop</i>
Variáveis de entrada	Frequência, taxa de carregamento e geometria do corpo de prova	Frequência, taxa de carregamento e geometria do corpo de prova
Vão do corpo de prova	450 mm	500 mm (Devido as formas disponíveis foi utilizado o vão de 450 mm)

Variáveis	ASTM C1609	EN 14651
Dispositivo de medição	LVDT	<i>Clip gage</i>
Localização do dispositivo de medição	No centro da face lateral do corpo de prova fixado pelo YOKE	Fixado no centro do entalhe na face inferior do corpo de prova
Máquina para realização do ensaio	Máquina servo controle (eletrohidráulica ou eletromecânica)	Máquina servo controle (eletrohidráulica ou eletromecânica)
Tempo de ensaio	15 min (aplicação do YOKE) + 2 min (ajuste dos cutelos) + 26 min (tempo de ensaio) = 43 min	2 minutos (aplicação <i>clip gage</i>) + 2 min + 23 min = 27 min
Tipo de ensaio	Tração à flexão em 4 pontos	Tração à flexão em 3 pontos
Desvio padrão máximo encontrado	2,49 N.m	16,75 N.m

Fonte: Autora, (2018).

4.6 DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS

As variáveis independentes desta pesquisa são:

- Volume de fibra de aço (30 kg/m³, 40 kg/m³ e 50 kg/m³);
- Classe resistência característica à compressão (C20 e C40).

As variáveis dependentes são:

- ASTM C1609;
- EN 14651.

4.7 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A fim de avaliar a influência das variáveis sobre os resultados encontrados, faz-se necessário determinar os seguintes parâmetros:

a) Efeito principal (EP): diferença média encontrada na variável de resposta quando o nível do fator de controle é alterado, tal fator é expresso pela Equação 18.

$$EP = 2 \frac{\sum X^+ - \sum X^-}{b^a} \quad (18)$$

Em que,

X^+ e X^- = média dos efeitos individuais das medidas resultantes dos testes realizados com fator de controle, (+) e (-) correspondem ao maior e o menor nível;

b^a = número total de experimentos do planejamento.

b) Efeito de interação é determinado pela metade da diferença entre a variável de resposta obtida devido à interação entre os fatores analisados.

c) Estimativa do erro experimental, consiste no erro entre as variáveis de resposta. Tal fator pode ser determinado pela Equação 19.

$$S(e f e i t o) = \frac{\sigma}{\sqrt{2^{k-1}n}} \quad (19)$$

Em que,

σ = desvio padrão (erro na medida);

k = número de fatores experimentais presentes no planejamento.

A Tabela 13 apresenta os fatores e níveis analisados nesta pesquisa.

Tabela 12 – Fatores e níveis analisados

Fator	Nível
Resistência característica à compressão (MPa)	20
	40
	30
Volume de fibras (kg/m³)	40
	50

Fonte: Autora, (2018).

Após a determinação dos fatores e níveis a serem analisados, adotou-se o planejamento fatorial 2^2 . Tal planejamento possibilita a avaliação de dois fatores com níveis diferentes. Neste contexto as Tabelas 13, 14 e 15 foram utilizadas como matrizes de planejamento para a análise da medida de tenacidade.

Tabela 13 – Matriz de planejamento para análise dos efeitos na medida de tenacidade devido ao aumento da resistência à compressão e aumento do volume de fibras (de 30 kg/m³ para 40 kg/m³)

Ensaio	Resistência à compressão característica (fck)	Volume de fibras (kg/m ³)	Variável de resposta: Tenacidade média (N.m)
1	C20	30	\bar{x}_a
2	C40	30	\bar{x}_b
3	C20	40	\bar{x}_c
4	C40	40	\bar{x}_d

Fonte: Autora: (2018).

Tabela 14 - Matriz de planejamento para análise dos efeitos na medida de tenacidade devido ao aumento da resistência à compressão e aumento do volume de fibras (de 40 kg/m³ para 50 kg/m³)

Ensaio	Resistência à compressão característica (fck)	Volume de fibras (kg/m ³)	Variável de resposta: Tenacidade média (N.m)
1	C20	40	\bar{x}_a
2	C40	40	\bar{x}_b
3	C20	50	\bar{x}_c
4	C40	50	\bar{x}_d

Fonte: Autora, (2018).

Tabela 15 - Matriz de planejamento para análise dos efeitos na medida de tenacidade devido ao aumento da resistência à compressão e aumento do volume de fibras (de 30 kg/m³ para 50 kg/m³)

Ensaio	Resistência à compressão característica (fck)	Volume de fibras (kg/m ³)	Variável de resposta: Tenacidade média (N.m)
1	C20	30	\bar{x}_a
2	C40	30	\bar{x}_b
3	C20	50	\bar{x}_c
4	C40	50	\bar{x}_d

Fonte: Autora, (2018).

Os efeitos principais para a resistência à compressão (E_{fck}) e o volume de fibras adicionado (E_{Vf}), são determinados por meio das Equações 20 e 21. E o efeito de interação entre a resistência à compressão e o teor de fibras pela Equação 22.

$$E_{fck} = \frac{(\bar{x}_b - \bar{x}_a) + (\bar{x}_d - \bar{x}_c)}{2} \quad (20)$$

$$E_{Vf} = \frac{(\bar{x}_c - \bar{x}_a) + (\bar{x}_d - \bar{x}_b)}{2} \quad (21)$$

$$EI = \frac{(\bar{x}_a + \bar{x}_d)}{2} - \frac{(\bar{x}_b - \bar{x}_c)}{2} \quad (22)$$

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Inicialmente, este capítulo apresenta as análises realizadas referentes à resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade para os corpos de prova cilíndricos de concreto simples e com adição de fibras aos 28 dias e 60 dias. Posteriormente são apresentadas e analisadas as curvas de força por deslocamento vertical para os corpos de prova prismáticos ensaiados, conforme recomendações da norma ASTM C1609: 2012 até a deflexão de 3mm. E para os corpos de prova prismáticos ensaiados de acordo com a norma EN 14651: 2007 são apresentadas curvas de força por CMOD, até a abertura de 4 mm do entalhe. Por fim, são apresentadas as medidas de tenacidade obtidas para cada traço.

A fim de verificar se algum dos valores medidos em todos os ensaios é divergente dos demais e excede a tendência dominante, o critério *Chauvenet* foi aplicado.

5.2 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Tabela 16 apresenta os valores de resistência à compressão média (f_{cm}), determinados conforme recomendações da ABNT NBR 5739: 2018, desvio padrão (S_d) e coeficiente de variação (CV), para os ensaios de compressão realizados nos corpos de prova cilíndricos com as idades de 28 dias e 60 dias.

Tabela 16 – Resistência à compressão média 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 (%)
CS 20	21,04	2,89	13,62	27,07	2,28	8,41
CRF 20/30	24,98	1,71	6,83	29,05	1,19	4,10
CRF 20/40	29,39	1,03	3,50	33,45	2,28	6,82
CRF 20/50	30,54	1,52	4,96	34,61	3,87	11,19
CS 40	40,60	2,88	7,09	43,08	0,54	1,24
CRF 40/30	42,06	3,36	7,99	45,32	1,78	3,93
CRF 40/40	46,29	0,41	0,89	44,13	2,82	6,38
CRF 40/50	41,78	0,45	1,08	44,48	0,23	0,53

Fonte: Autora, (2018).

Em análise à Tabela 16 observa-se que a média dos resultados aos 28 dias e as dos traços de referência atendem aos valores esperados e o desvio padrão de ambos os traços obtiveram valores inferiores ao limite do controle de 4 MPa, recomendado pela norma NBR ABNT 12655: 2015 em função do controle rigoroso no preparo do concreto (condição A).

A fim de verificar a influência na adição de fibras na resistência à compressão do concreto a Tabela 17 apresenta o acréscimo/ redução e percentual de tal medida em relação ao concreto de referência (concreto simples).

Tabela 17 – Comparação da resistência à compressão obtida pelos traços de concreto reforçado com fibras de aço em relação ao concreto simples

Dosagem	Resistência à compressão média aos 28 dias		Resistência à compressão média aos 60 dias	
	Acréscimo/redução (MPa)	Percentual (%)	Acréscimo/redução (MPa)	Percentual (%)
CS 20	-	-	-	-
CRF 20/30	+3,94	+18,73	+1,99	+7,33
CRF 20/40	+8,36	+39,72	+6,39	+23,59
CRF 20/50	+9,50	+45,16	+7,54	+27,86
CS 40	-	-	-	-
CRF 40/30	+1,46	+3,60	+2,24	+5,20
CRF 40/40	+5,69	+14,01	+1,05	+2,44
CRF 40/50	+1,18	+2,91	+1,40	+3,25

Fonte: Autora, (2018).

A partir dos resultados expostos na Tabela 17, foi possível identificar que, para o aumento no volume de fibras, as dosagens obtiveram um pequeno acréscimo de resistência à compressão em relação aos traços de referência (sem fibras). Em relação ao traço CS 20 observa-se um acréscimo de resistência à compressão a medida que se aumentou o volume de fibras, onde o traço que apresentou maior percentual de aumento foi o traço CRF20/50, com 45,16%.

Em relação ao incremento de resistência à compressão dos 28 dias para os 60 dias de idade todos os traços apresentaram, exceto o traço CRF 40/40. Em que, aos 28 dias, apresentou resistência média de 46,29 MPa e aos 60 dias 44,13 MPa, ou seja, ocorreu redução em tal medida. Entretanto, em análise ao desvio padrão calculado, conclui-se que o valor se encontra em um intervalo válido.

5.3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A Tabela 18 apresenta os valores de resistência à tração por compressão diametral média (f_{ctm}), determinados conforme recomendações da ABNT NBR 7222: 2011, desvio padrão (S_d) e coeficiente de variação (CV), para os ensaios de tração realizados nos corpos de prova cilíndricos com 60 dias de idade.

Tabela 18 – Resistência à tração por compressão diametral média aos 60 dias

Dosagem	Resistência à tração por compressão diametral média aos 60 dias		
	f_{ctm} (MPa)	S_d (MPa)	CV
CS 20	3,05	0,05	1,64
CRF 20/30	3,84	0,17	4,32
CRF 20/40	3,07	-	-
CRF 20/50	3,67	1,04	28,31
CS 40	4,61	0,36	7,71
CRF 40/30	6,24	0,95	15,19
CRF 40/40	7,73	0,65	8,46
CRF 40/50	6,08	0,39	6,45

Fonte: Autora, (2018).

Na Tabela 19 é exposto o acréscimo ou redução da resistência à tração diametral, bem como a diferença percentual dos traços com adição de fibras, em relação ao traço de referência.

Tabela 19 - Comparação da resistência à tração por compressão diametral obtida pelos traços de concreto reforçado com fibras de aço em relação ao concreto simples

Dosagem	Resistência à tração média aos 60 dias	
	Aumento/redução (MPa)	Percentual (%)
CS 20	-	-
CRF 20/30	+0,79	+25,95
CRF 20/40	+0,03	+0,86
CRF 20/50	+0,63	+20,53
CS 40	-	-
CRF 40/30	+1,63	+35,46
CRF 40/40	+3,12	+67,80
CRF 40/50	+1,47	+31,98

Fonte: Autora, (2018).

Em análise as Tabela 18 e 19, observou-se um incremento da resistência à tração por compressão diametral dos traços reforçados com fibra em relação aos traços de referência. Entretanto, o ganho não foi crescente em relação ao aumento do volume de fibras. O traço que obteve maior percentual de acréscimo de resistência à tração foi o CRF 40/40, com 67,80% e o menor percentual foi obtido pelo traço CRF 20/40, com 0,86%. O traço CRF 20/40 apresentou baixa homogeneidade, com presença de “ouriços” de concretagem em alguns corpos de prova. Assim, apenas um valor de resistência pôde ser obtido com confiabilidade.

Ainda sobre a Tabela 19, nota-se que os ganhos de resistência média à tração por compressão diametral da matriz da classe C40 foram superiores que a classe C20. Tal comportamento pode ser explicado pois matrizes cimentícias com maior resistência à compressão conferem maior aderência na interface fibra-matriz e consequentemente a transferência das solicitações da matriz para as fibras é mais eficiente.

5.4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os valores de módulo de elasticidade médio foram estimados segundo recomendações da norma ABNT NBR 6118:2014, por meio dos valores de resistência à compressão aos 28 dias e aos 60 dias. A Tabela 20 apresenta os valores de módulo de elasticidade (E_m), desvio padrão (S_d) e coeficiente de variação (CV).

Tabela 20 – Módulo de elasticidade médio aos 28 e 60 dias de diferentes dosagens de concreto simples e concreto reforçado com fibras de aço

Dosagem	Módulo de elasticidade aos 28 dias			Módulo de elasticidade aos 60 dias		
	E_m (GPa)	S_d (GPa)	CV (%)	E_m (GP)	S_d (GP)	CV(%)
CS 20	30,75	2,10	6,84	34,93	1,47	4,21
CRF 20/30	33,56	1,15	3,42	36,21	0,74	2,05
CRF 20/40	36,43	0,64	1,75	38,84	1,33	3,41
CRF 20/50	37,12	0,92	2,48	39,53	1,54	3,91
CS 40	41,24	1,58	3,82	44,11	0,29	0,65
CRF 40/30	41,77	1,82	4,35	45,23	0,89	1,96
CRF 40/40	45,72	0,20	0,44	44,63	1,06	2,38
CRF 40/50	43,44	0,23	0,54	44,82	0,13	0,29

Fonte: Autora, (2018).

Para os traços com adição de fibras é exposto na Tabela 21 o acréscimo ou a redução do módulo de elasticidade e diferença percentual de tal medida em relação ao concreto de referência (concreto simples).

Tabela 21 - Comparação do módulo de elasticidade obtido pelos traços de concreto reforçado com fibras de aço em relação ao concreto simples

Dosagem	Módulo de elasticidade médio aos 28 dias		Módulo de elasticidade médio aos 60 dias	
	Acréscimo/redução (GPa)	Percentual (%)	Acréscimo/redução (GPa)	Percentual (%)
CS 20	-	-	-	-
CRF 20/30	+2,81	+9,15	+1,28	+3,67
CRF 20/40	+5,68	+18,46	+3,91	+11,21
CRF 20/50	+6,37	+20,73	+4,60	+13,17
CS 40	-	-	-	-
CRF 40/30	+0,52	+1,27	+1,12	+2,55
CRF 40/40	+4,48	+10,86	+0,52	+1,18
CRF 40/50	+2,19	+5,32	+0,71	+1,61

Fonte: Autora, (2018).

Conforme dito no item 2.3.1 o módulo de elasticidade do CRF é determinado pela soma dos módulos da fibra e da matriz multiplicadas pelos seus volumes, respectivamente. E como o volume das fibras é pequeno em relação ao volume da matriz, pode-se dizer que a matriz é a fase que mais influencia o módulo de elasticidade. Dessa forma, verifica-se na Tabela 20 e 21 que a alteração na resistência da matriz gera um aumento mais significativo no módulo de elasticidade do que a adição de fibras.

5.5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DE TENACIDADE

A medida de tenacidade foi determinada por meio do ensaio de tração à flexão segundo recomendações da norma ASTM C1609:2012 e pelo ensaio de tração à flexão proposto pela norma EN 14651:2007. Os valores obtidos em tais ensaios são apresentados e analisados a seguir.

5.5.1 Ensaio de tração à flexão ASTM C1619:2012

O ensaio de tração à flexão prescrito pela norma americana ASTM C1609:2012 foi realizado no laboratório de estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia. Os dados foram adquiridos por sensores externos, utilizando célula de carga e LVDTs (Linear Variable Differential Transformer). Com o auxílio do software *Grapher*® foram plotadas curvas de força por deslocamento vertical e a tenacidade pôde ser determinada a partir do cálculo da área de tais curvas. A Tabela 22 apresenta os valores de tenacidade, juntamente com os respectivos desvios padrões e coeficientes de variação, obtidos para a matriz cimentícia CRF 20.

Tabela 22 - Valores de tenacidade obtidos até o deslocamento vertical de 3 mm para a matriz CRF 20

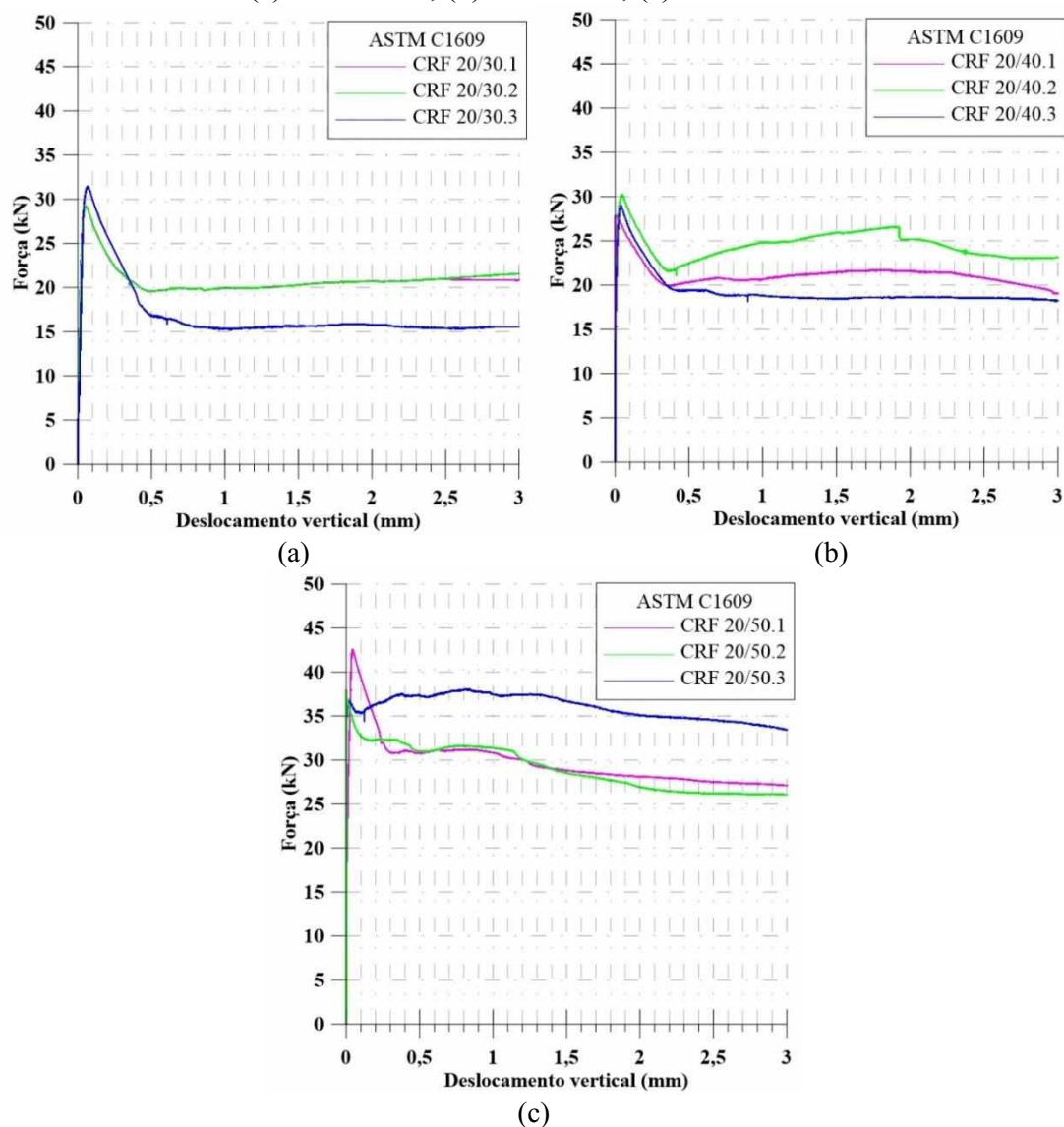
Dosagem	Tenacidade (N.m)					
	Corpos de prova			x_m (N.m)	S_d (N.m)	CV (%)
	CP-1	CP-2	CP-3			
CRF 20/30	69,34	69,81	54,49	64,55	8,71	13,50
CRF 20/40	64,16	87,62	64,21	72,00	13,53	18,80
CRF 20/50	95,43	114,71	88,27	99,47	13,68	13,75

Fonte: Autora, (2018).

A Figura 38(a-c) expõe o comportamento das curvas de força por deslocamento vertical das séries CRF 20/30, CRF 20/40 e CRF 20/50.

Figura 38 – Curvas de força por deslocamento vertical obtidas a partir do ensaio de tração à flexão conforme recomendações da norma ASTM 1609: 2012, para os traços:

(a) CRF 20/30, (b) CRF20/40, (c) CRF 20/50



Fonte: Autora, (2018).

A Tabela 23 apresenta os valores de tenacidade, juntamente com os respectivos desvios padrões e coeficientes de variação, obtidos para a matriz cimentícia CRF 40. E a Figura 39(a-c) expõem as curvas referentes aos traços: CRF 40/30, CRF 40/40 e CRF 40/50

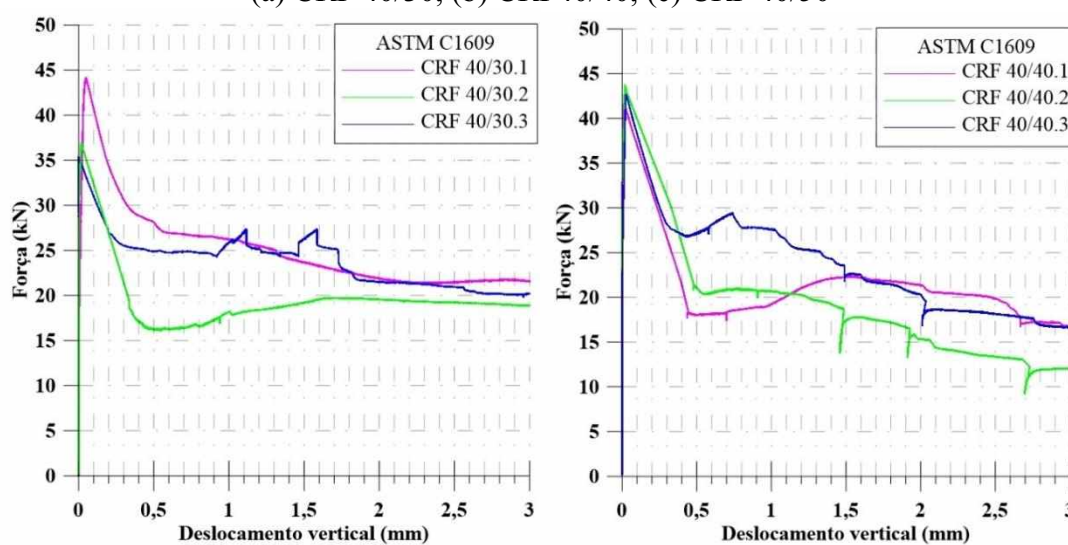
Tabela 23 - Valores de tenacidade obtidos até o deslocamento vertical de 3 mm para a matriz CRF 40

Dosagem	Corpos de prova			x_m (N.m)	S_d (N.m)	CV (%)
	CP-1	CP-2	CP-3			
CRF 40/30	78,50	72,22	65,26	71,99	6,62	9,20
CRF 40/40	66,04	63,10	75,97	68,37	6,74	9,86
CRF 40/50	116,04	136,09	102,82	118,32	16,75	14,16

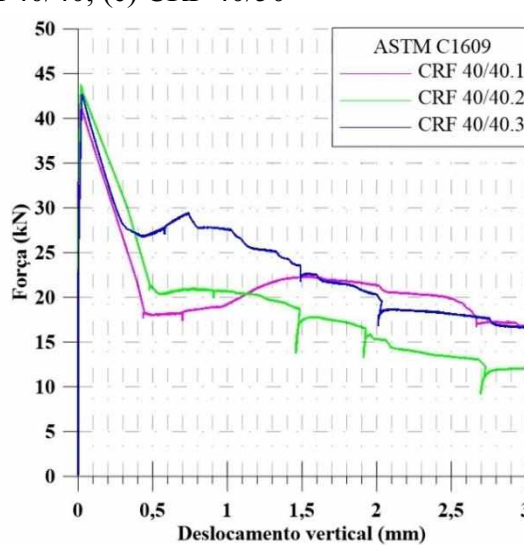
Fonte: Autora, (2018).

Figura 39 – Curvas de força por deslocamento vertical obtidas a partir do ensaio de tração à flexão conforme recomendações da norma ASTM 1609:2012, para os traços:

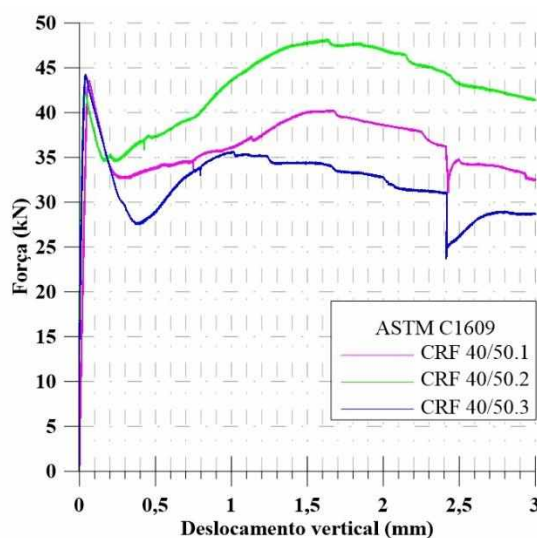
(a) CRF 40/30, (b) CRF40/40, (c) CRF 40/50



(a)



(b)



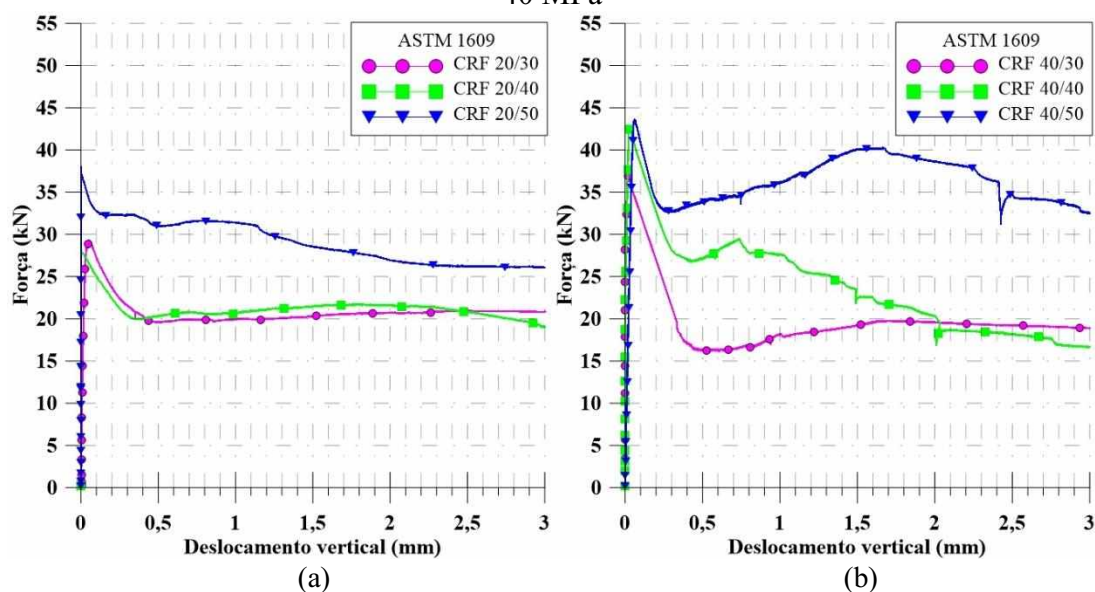
(c)

Fonte: Autora, (2018).

Segundo os princípios do critério de *Chauvenet* os resultados obtidos de uma determinada amostra devem estar distribuídos aleatoriamente em torno de um valor médio (SALVADOR, 2012). Em análise das curvas apresentadas nas Figuras 38 e 39, e dos valores de desvio padrão das Tabelas 22 e 23, pode-se dizer que houve coerência entre os resultados obtidos pelo ensaio de tração à flexão prescrito na norma ASTM C1609:2012, conferindo indícios de repetitividade. Além disso, os valores dos coeficientes de variação encontrados apresentam similaridade e estão próximos ao limite de 16,0% estabelecido pela mesma, com exceção do traço CRF 20/40 que apresentou coeficiente de variação superior.

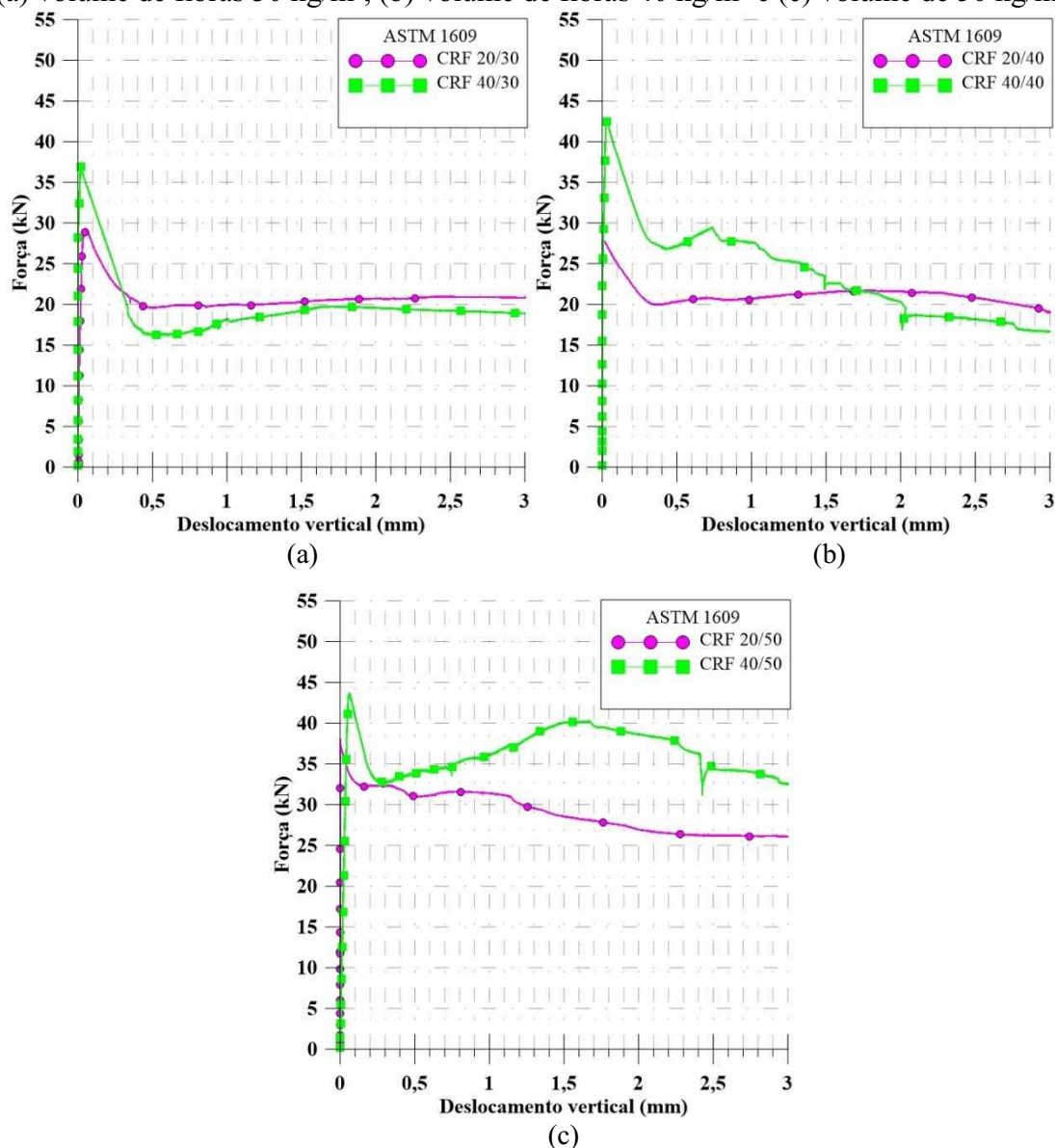
A fim de verificar a influência da resistência à compressão da matriz cimentícia e o teor das fibras na medida de tenacidade do compósito estudado, determinou-se a curva que melhor representa cada uma das dosagens e plotou-se em um mesmo gráfico. A Figura 40 exibe as curvas de força por deslocamento vertical, quando ocorre a variação do volume de fibras e a resistência da matriz é mantida. Já a Figura 41 expõe o comportamento das curvas de força por deslocamento vertical quando o volume de fibras é fixado e a resistência da matriz cimentícia alterada.

Figura 40 – Curvas de força por deslocamento vertical de espécies com a mesma matriz cimentícia de resistência e com variação do teor de fibras, obtidas por meio do ensaio prescrito pela ASTM C1609: (a) Matriz cimentícia de 20MPa e (b) Matriz cimentícia de 40 MPa



Fonte: Autora, (2018).

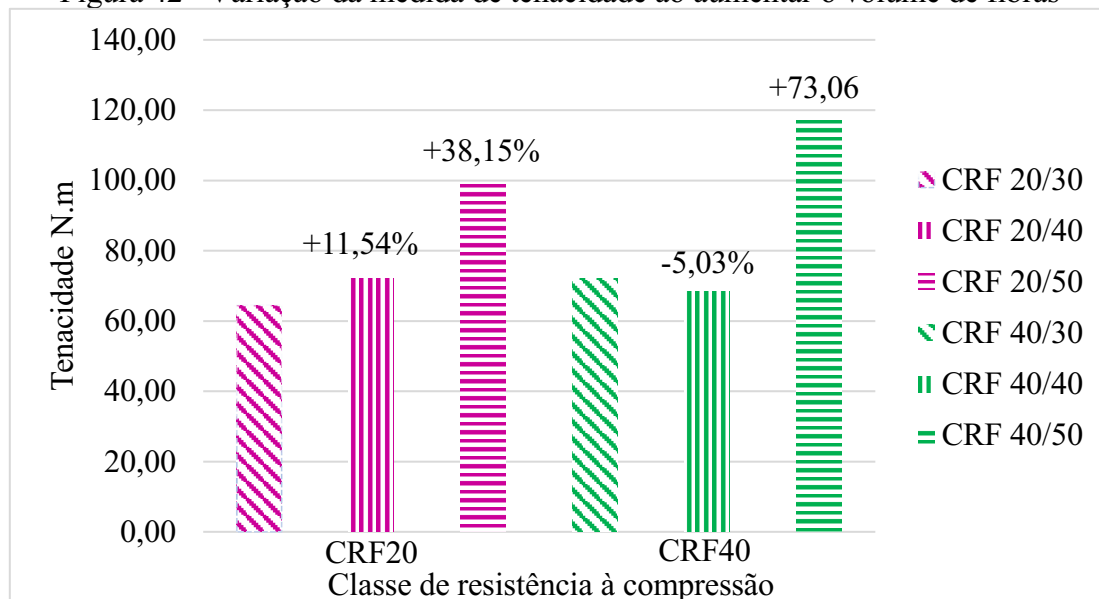
Figura 41 - Curvas de força por deslocamento vertical, com variação a resistência e mesmo volume de fibras, obtidas por meio do ensaio prescrito pela ASTM C1609: (a) volume de fibras 30 kg/m³, (b) volume de fibras 40 kg/m³ e (c) volume de 50 kg/m³



Fonte: Autora (2018).

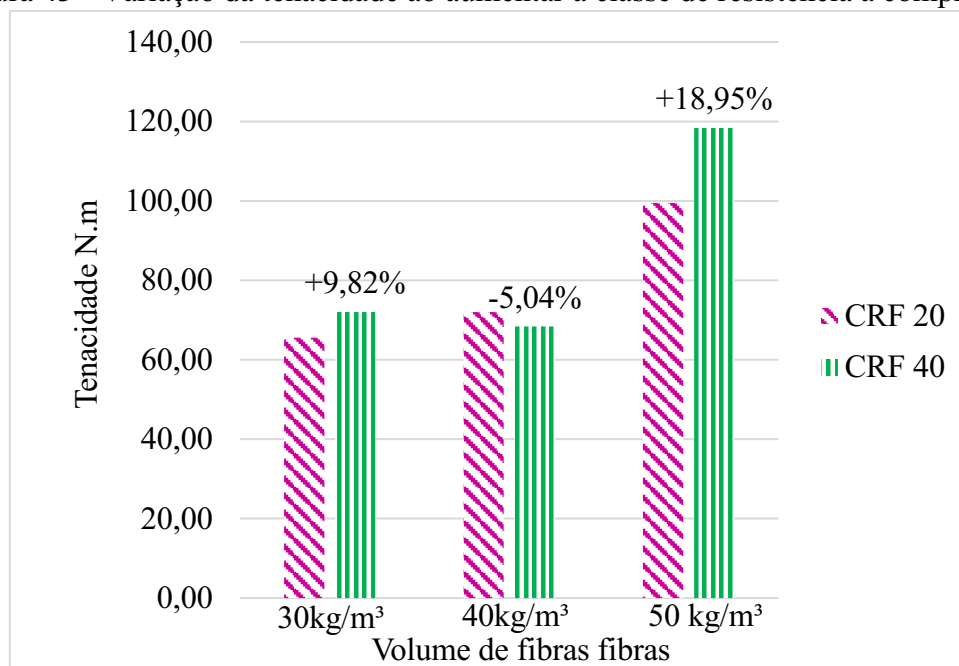
As Figuras 42 e 43 exibem graficamente a variação na medida de tenacidade quando se varia o volume de fibras adicionadas e quando a resistência à compressão da matriz cimentícia é alterada, respectivamente.

Figura 42 - Variação da medida de tenacidade ao aumentar o volume de fibras



Fonte: Autora, (2018).

Figura 43 - Variação da tenacidade ao aumentar a classe de resistência à compressão



Fonte: Autora, (2018).

Como esperado as Figuras 42 e 43 demonstram que o acréscimo da medida de tenacidade é mais significativo quando se aumenta o teor de fibras, do que quando ocorre o aumento da resistência à compressão da matriz cimentícia. Além disso percebe-se que ocorre uma redução da tenacidade no traço CRF 40/40 em relação ao traço CRF 40/30, divergindo aos demais comportamentos, onde a tenacidade aumenta à medida que o

volume de fibras é aumentado. Entretanto, verifica-se que as medidas encontradas para ambos os traços se encontram num mesmo intervalo de valores.

Com base no planejamento experimental descrito no item 4.8, os efeitos devido à variação do volume de fibras e resistência à compressão na medida tenacidade foram determinados e apresentados nas Tabelas 24, 25 e 26.

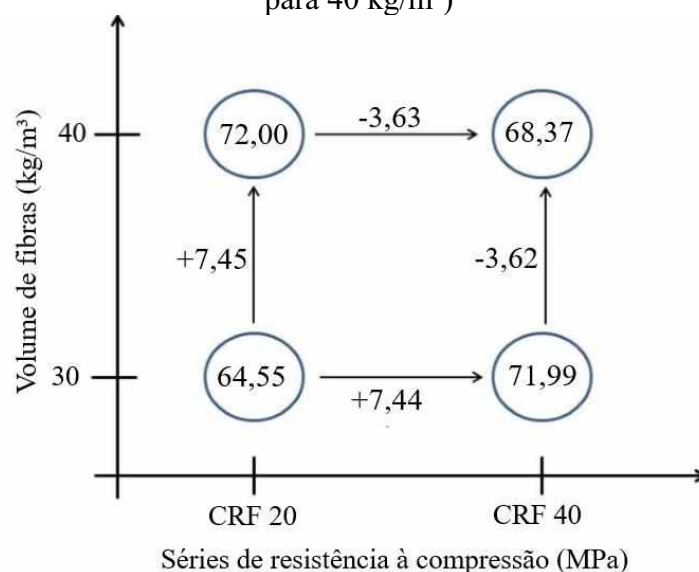
Os efeitos da variação da resistência à compressão da matriz cimentícia e alteração do volume de fibras de 30 kg/m³ para 40 kg/m³ são apresentados na Tabela 24 e Figura 44.

Tabela 24 – Efeitos devido a variação da resistência à compressão e o teor de fibras na medida de tenacidade (Volume de fibras de 30 kg/m³ pra 40 kg/m³)

Efeitos principais	Valores (kN.mm)
Efeito do teor de fibras na tenacidade quando o volume aumenta de 30 kg/m ³ para 40 kg/m ³	1,91
Efeito da resistência à compressão na tenacidade, quando alterada a série CRF 20 para CRF 40	1,91
Efeito de interação entre a resistência e as fibras	66,46

Fonte: Autora, (2018).

Figura 44 - Representação gráfica dos efeitos gerados pela variação da resistência à compressão e volume de fibras na medida de tenacidade (volume de fibras de 30 kg/m³ para 40 kg/m³)



Fonte: Autora, (2018).

A partir da Tabela 24 e Figura 44, nota-se uma pequena alteração na medida de tenacidade quando a classe de resistência é alterada e/ou o volume de fibras é aumentado de 30 kg/m³ para 40 kg/m³. Em consideração ao desvio padrão tais valores podem estar no mesmo intervalo.

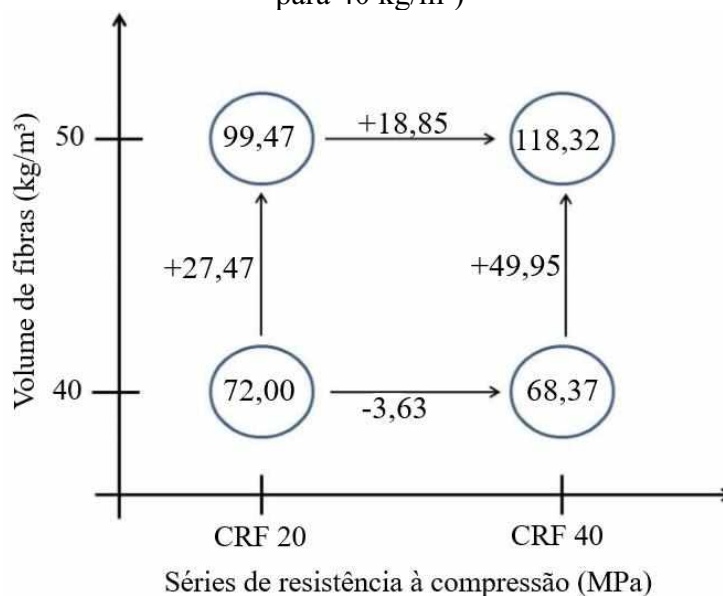
Os efeitos na medida de tenacidade quando ocorre a variação da classe de resistência e aumento do volume de fibras de 40 kg/m³ para 50 kg/m³ são apresentados na Tabela 25 e ilustrados graficamente na Figura 45.

Tabela 25 – Efeitos devido a variação da resistência à compressão e o teor de fibras na medida de tenacidade (Volume de fibras de 40 kg/m³ pra 50 kg/m³)

Efeitos principais	Valores (N.m)
Efeito do teor de fibras na tenacidade quando o volume aumenta de 40 kg/m ³ para 50 kg/m ³	38,71
Efeito da resistência à compressão na tenacidade, quando alterada a série CRF 20 para CRF 40	7,61
Efeito de interação entre a resistência e as fibras	110,70

Fonte: Autora, (2018).

Figura 45 - Representação gráfica dos efeitos gerados pela variação da resistência à compressão e volume de fibras na medida de tenacidade (volume de fibras de 30 kg/m³ para 40 kg/m³)



Fonte: Autora, (2018).

Em análise a Tabela 25, pode-se dizer que ao aumentar o volume de fibras adicionado de 40 kg/m³ para 50 kg/m³ gera um maior acréscimo na medida de tenacidade do que aumentar a classe de resistência característica. Para o volume de 50 kg/m³ de fibras e alteração da classe de resistência da classe CRF 20 para CRF 40 causou redução na tenacidade média. Entretanto em consideração ao desvio padrão, os valores de tenacidade podem estar no mesmo intervalo.

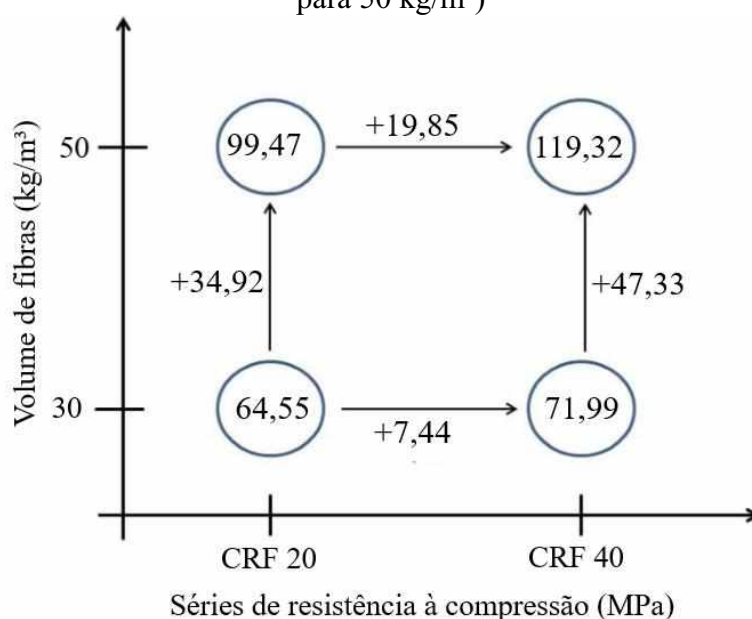
Por fim, os efeitos devido a variação da resistência à compressão e aumento do volume de fibras de 30 kg/m³ para 50 kg/m³ são apresentados na Tabela 26 e Figura 46.

Tabela 26– Efeitos devido a variação da resistência à compressão e o teor de fibras na medida de tenacidade (Volume de fibras de 30 kg/m³ pra 50 kg/m³)

Efeitos principais	Valores (N.m)
Efeito do teor de fibras na tenacidade quando o volume aumenta de 30 kg/m ³ para 50 kg/m ³	40,62
Efeito da resistência à compressão na tenacidade, quando alterada a série CRF 20 para CRF 40	13,15
Efeito de interação entre a resistência e as fibras	105,17

Fonte: Autora, (2018).

Figura 46 - Representação gráfica dos efeitos gerados pela variação da resistência à compressão e volume de fibras na medida de tenacidade (volume de fibras de 30 kg/m³ para 50 kg/m³)



Fonte: Autora, (2018).

Em análise a Tabela 26 pode-se afirmar que a medida de tenacidade média apresenta um maior acréscimo quando ocorre a variação do volume de fibras de 30 kg/m³ para 50 kg/m³, do que a alteração da classe de resistência de CRF 20 para CRF 40.

5.8.2 Ensaio de tração à flexão EN 14651:2007

O ensaio de tração à flexão prescrito pela norma EN 14651:2007 foi realizado no laboratório de estruturas da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. Foram ensaiados 18 corpos de prova de concreto reforçado com fibra de aço até a abertura de fissura (CMOD) de 4 mm. A partir dos resultados coletados pode-se plotar com o auxílio do software *Grapher*® curvas de força por CMOD para cada corpo de prova ensaiado e as medidas de tenacidade foram determinadas. Devido à instabilidade, seguida de vibrações durante o ensaio e aplicação do critério de *Chauvenet* alguns corpos de prova foram descartados.

A Tabela 27 exhibe os valores de tenacidade, juntamente com os respectivos desvios padrões e coeficientes de variação, obtidos para a matriz cimentícia CRF 20.

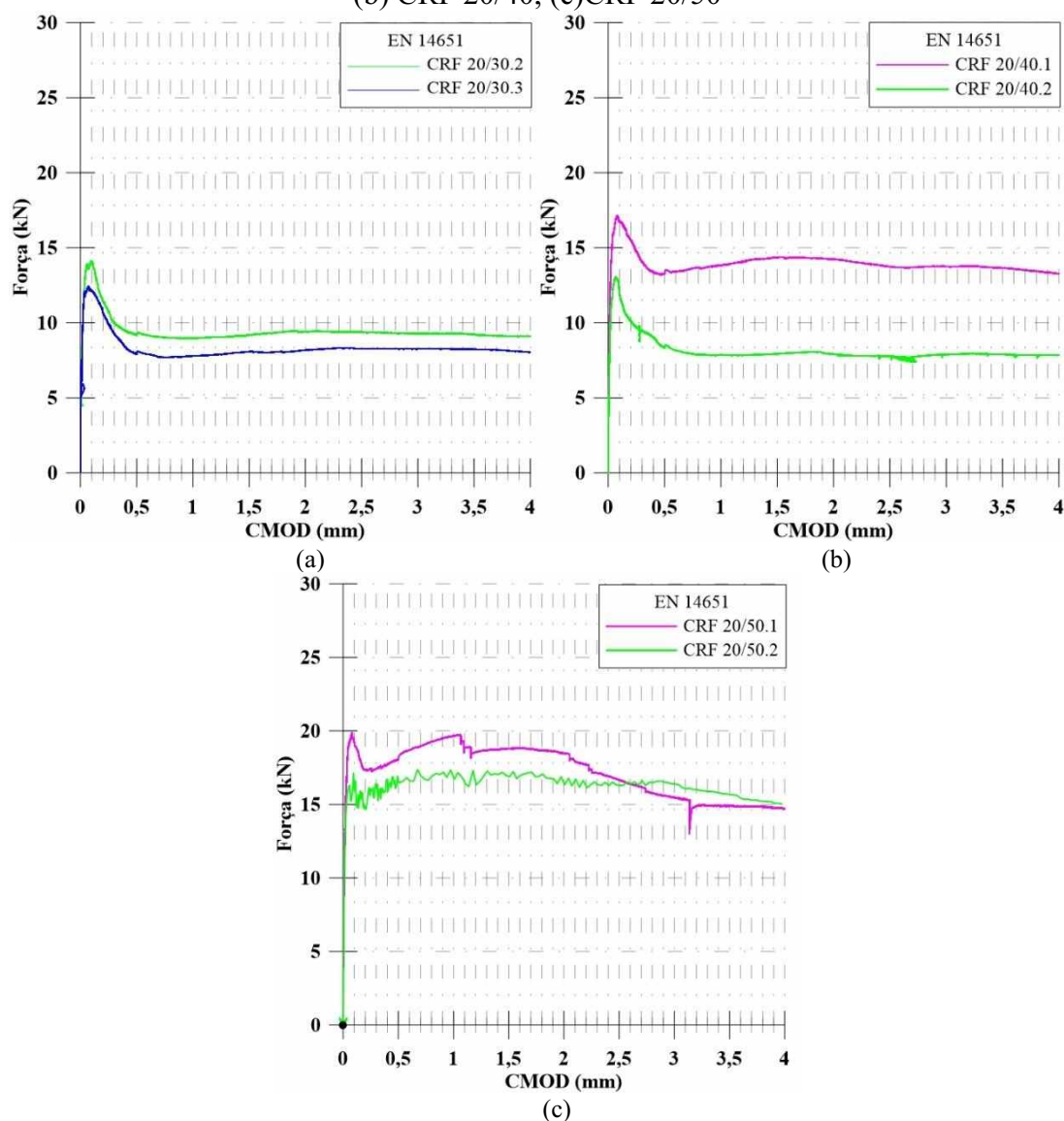
Tabela 27 - Valores de medida de tenacidade obtidas no ensaio de tração à flexão conforme recomendações da norma EN 14651: 2007, até a abertura de fissura de 4 mm para a matriz CRF 20

Tenacidade (N.m)						
Dosagem	Corpos de prova			x_m (N.m)	S_d (N.m)	CV (%)
	CP.1	CP.2	CP.3			
CRF20/30	-	40,23	35,98	38,11	3,01	7,89
CRF20/40	59,33	53,87	55,79	54,83	2,77	5,06
CRF20/50	74,13	64,79	-	69,46	6,60	9,51

Fonte: Autora, (2018).

A Figura 47(a-c) expõe o comportamento das curvas de força por CMOD das séries CRF 20/30, CRF 20/40 e CRF 20/50.

Figura 47 - Curvas de força por CMOD obtidas a partir do ensaio de tração à flexão conforme recomendações da norma EN 14651, para os traços: (a) CRF 20/30, (b) CRF 20/40, (c) CRF 20/50



Fonte: Autora, (2018).

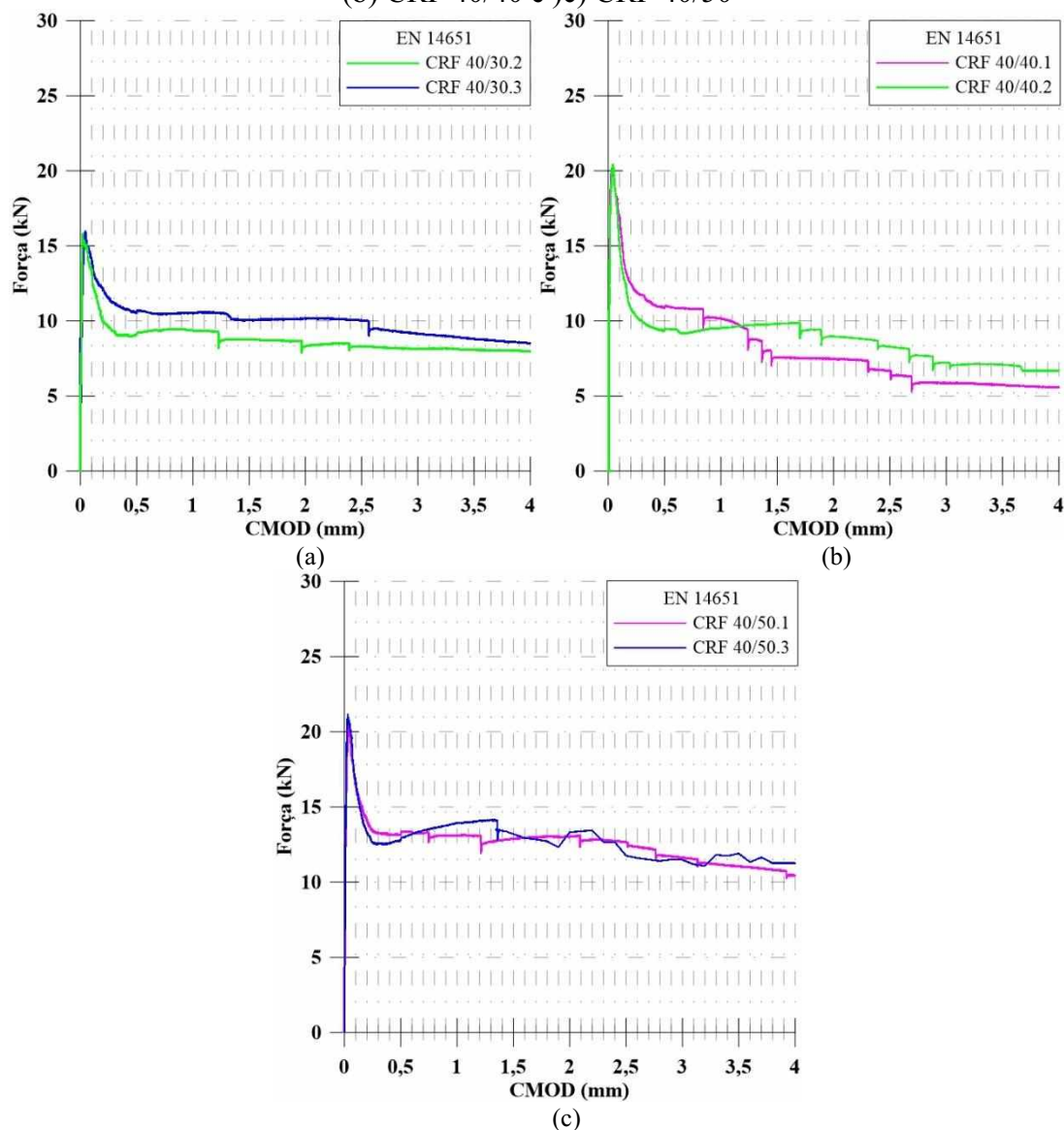
A Tabela 28 apresenta os valores de tenacidade, juntamente com os respectivos desvios padrões e coeficientes de variação, obtidos para a matriz cimentícia CRF 40. E a Figura 48(a-c) expõe as curvas referentes aos traços: CRF 40/30, CRF 40/40 e CRF 40/50.

Tabela 28 - Valores de medida de tenacidade obtidas no ensaio de tração à flexão conforme recomendações da norma EN 14651: 2007, até a abertura de fissura de 4 mm para a matriz CRF 40

Dosagem	Corpos de prova			x_m (N.m)	S_d (N.m)	CV (%)
	CP.1	CP.2	CP.3			
CRF40/30	35,90	37,51	-	36,71	1,13	3,09
CRF40/40	37,90	39,80	-	38,85	1,34	3,45
CRF40/50	-	42	43,79	43,14	0,92	2,14

Fonte: Autora, (2018).

Figura 48 - Curvas de força por CMOD obtidas a partir do ensaio de tração à flexão conforme recomendações da norma EN 14651, para os traços: (a) CRF 40/30, (b) CRF 40/40 e c) CRF 40/50



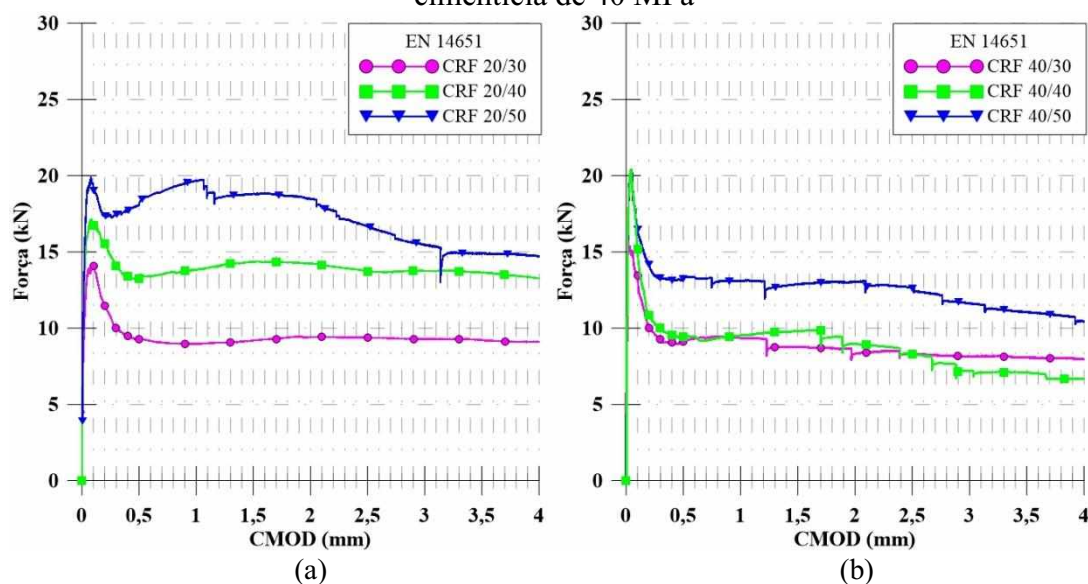
Fonte: Autora, (2018).

Apesar de se tratar de um procedimento normatizado, a norma EN 14651: 2007 não se refere a medida de tenacidade do CRF, impossibilitando a validação dos resultados por meio desta. Neste contexto, pode-se dizer que os valores de medida de tenacidade são válidos apresentando repetitividade, já que os coeficientes de variação obtidos foram inferiores à 16%, valor especificado na norma ASTM 1609: 2012. Além disso percebe-se uma menor dispersão de resultados em relação ao ensaio anterior.

Em análise as Tabelas 27 e 28 pode-se afirmar que para os traços ensaiados, a tenacidade apresentou um acréscimo à medida que se aumentou o teor de fibras de aço. Tal incremento é mais relevante na matriz cimentícia CRF 20. Além disso, pode-se dizer que alteração da classe de resistência de 20 MPa para 40 MPa gerou uma redução na medida de tenacidade. Pode-se dizer que o comprimento crítico das fibras foi atingido com maior facilidade com a alteração da matriz cimentícia de 20 MPa para 40 MPa, e consequentemente a medida de tenacidade foi menor. Tal comportamento também foi observado por Figueiredo (1997) ao comparar o efeito de duas matrizes de concreto com resistência diferentes reforçadas com o mesmo tipo de fibra de aço, como descrito no item 2.3.7.5.

A fim de verificar a influência da resistência à compressão da matriz cimentícia e o teor das fibras na medida de tenacidade do compósito estudado, determinou-se a curva que melhor representa cada uma das dosagens e plotou-se em um mesmo gráfico. A Figura 49 exhibe as curvas de força por CMOD, quando ocorre a variação do volume de fibras e a resistência da matriz é mantida.

Figura 49 - Curvas de força por CMOD, variando o volume de fibras, obtidas por meio do ensaio prescrito pela EN 14651: (a) Matriz cimentícia de 20MPa e (b) Matriz cimentícia de 40 MPa



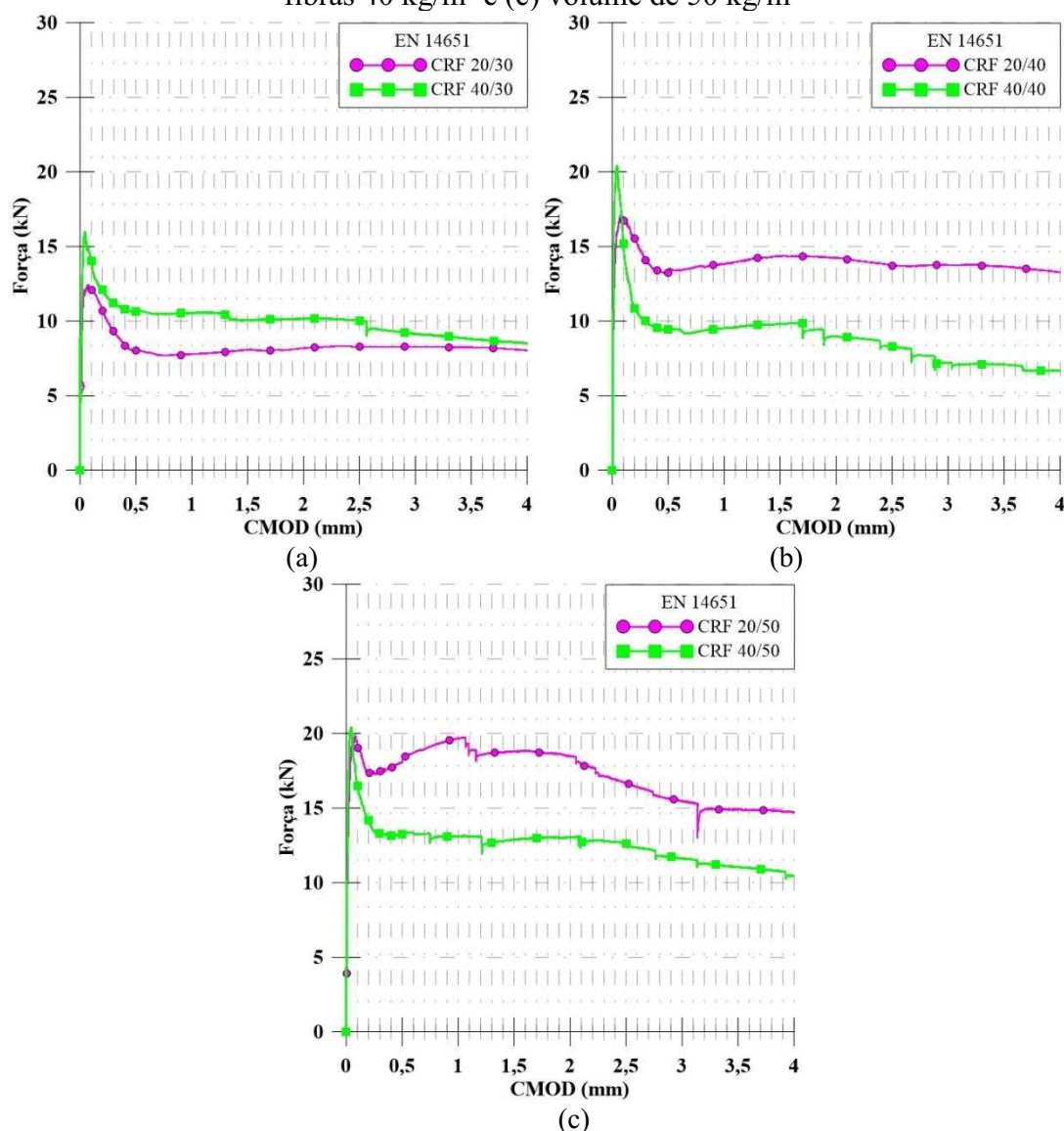
Fonte: Autora, (2018).

Em análise a Figura 49(a) e Tabela 27 observa-se o aumento da medida de tenacidade e força de pico com o acréscimo do volume de fibras de aço. Além disso nota-se na dosagem CRF 20/50 comportamento *strain-hardening* à tração, ou seja, a σ_{pc} (tensão máxima pós fissuração) obtida é maior que a σ_{cc} (tensão de fissuração).

Como descrito anteriormente as medidas de tenacidade obtidas para os traços com matrizes de 40 MPa apresentaram menores valores de tenacidade do que as dosagens das matrizes com resistência de 20 MPa. Também vale destacar que o comportamento das curvas apresentadas na Figura 49(b) apresentam apenas comportamento *strain-softening*, em que a σ_{pc} (tensão máxima pós fissuração) obtida é menor que a σ_{cc} (tensão de fissuração).

A Figura 50 expõem o comportamento das curvas de força por CMOD quando o volume de fibras é fixado e a resistência da matriz cimentícia alterada.

Figura 50 - Curvas de força por CMOD, variando a resistência da matriz, obtidas por meio do ensaio prescrito pela EN 14651: (a) volume de fibras 30 kg/m³, (b) volume de fibras 40 kg/m³ e (c) volume de 50 kg/m³

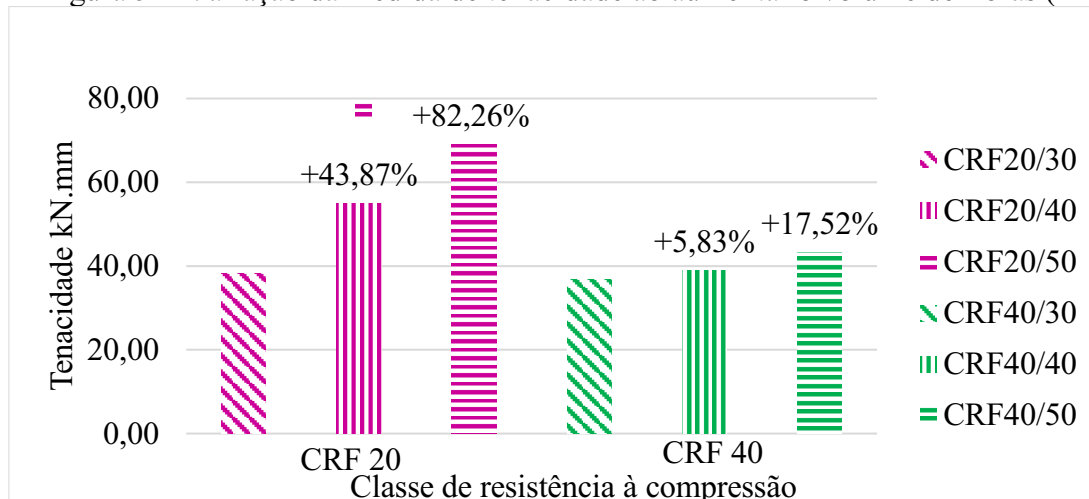


Fonte: Autora (2018).

Sobre a Figura 50 pode-se afirmar que quanto maior a resistência da matriz, maior a carga de pico e maior a queda de carga após a fissuração. Vale ressaltar que, a resistência residual pós fissuração é inferior daquela apresentada pela matriz com menor resistência, indicando que ocorreu um maior número de fibras rompidas durante o processo de transferência de tensões da matriz para as fibras durante a fissuração do CRF. Entretanto, este comportamento não pode ser considerado como uma regra geral, pois o ensaio anterior foi análogo, ou seja, a medida de tenacidade aumentou com o aumento da resistência da matriz.

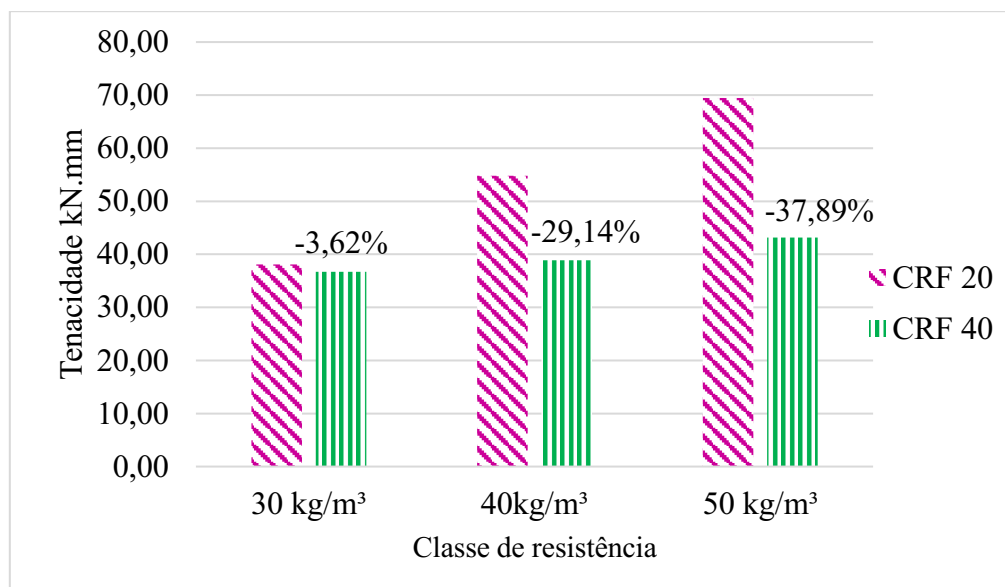
Com o intuito de expor graficamente a influência do volume de fibras adicionado e da resistência à compressão da matriz na medida de tenacidade as Figuras 51 e 52 são apresentadas.

Figura 51- Variação da medida de tenacidade ao aumentar o volume de fibras (EN)



Fonte: Autora, (2018).

Figura 52 - Variação da tenacidade ao aumentar a classe de resistência à compressão



Fonte: Autora, (2018).

Constata-se que o aumento do volume de fibras eleva a medida de tenacidade, tendo um efeito mais significativo na matriz de resistência à compressão inferior. Em que o aumento de 30 kg/m³ de fibra para 40 kg/m³ gera um acréscimo de 43,87% na medida de tenacidade e o aumento de 30 kg/m³ para 50 kg/m³ gera um aumento de 82,26%. Já para a matriz com resistência à compressão superior a variação é de apenas 5,83% e

17,52% quando o volume de fibras adicionado é estendido de 30kg/m³ para 40 kg/m³ e de 30kg/m³ para 50kg/m³, respectivamente.

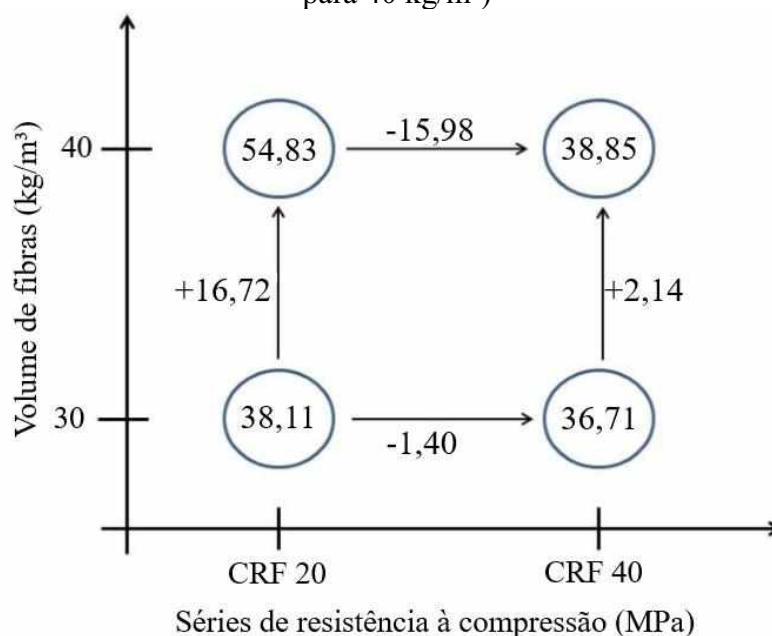
A fim de quantificar os efeitos devido a variação da resistência à compressão e o volume fibras na medida de tenacidade as Tabelas 29, 30 e 31 e as Figuras 53, 54 e 55 são expostas.

Tabela 29 - Efeitos devido a variação da resistência à compressão e o teor de fibras na medida de tenacidade (Volume de fibras de 30 kg/m³ pra 40 kg/m³)

Efeitos principais	Valores (N.m)
Efeito do teor de fibras na tenacidade quando o volume aumenta de 30 kg/m ³ para 40 kg/m ³	9,43
Efeito da resistência à compressão na tenacidade, quando alterada a série CRF 20 para CRF 40	-8,69
Efeito de interação entre a resistência e as fibras	47,54

Fonte: Autora, (2018).

Figura 53 - Representação gráfica dos efeitos gerados pela variação da resistência à compressão e volume de fibras na medida de tenacidade (volume de fibras de 30 kg/m³ para 40 kg/m³)

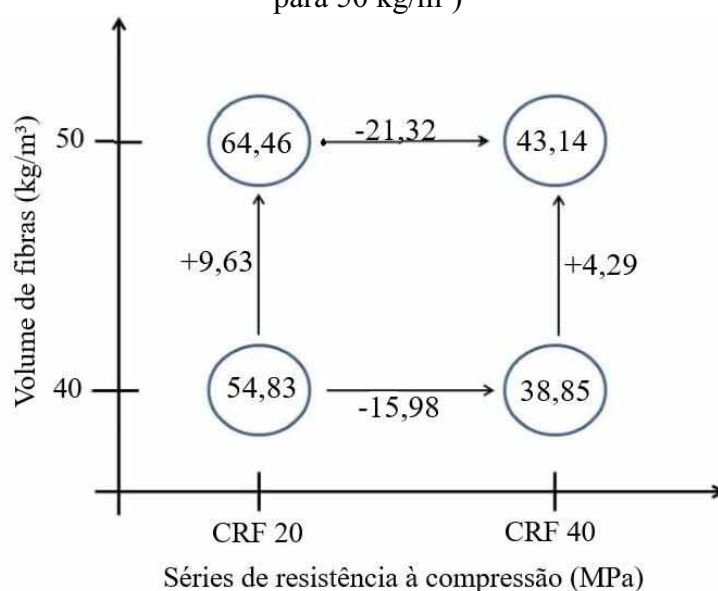


Fonte: Autora, (2018).

Tabela 30 - Efeitos devido a variação da resistência à compressão e o teor de fibras na medida de tenacidade (Volume de fibras de 40 kg/m³ pra 50 kg/m³)

Efeitos principais	Valores (N.m)
Efeito do teor de fibras na tenacidade quando o volume aumenta de 40 kg/m ³ para 50 kg/m ³	9,46
Efeito da resistência à compressão na tenacidade, quando alterada a série CRF 20 para CRF 40	-21,15
Efeito de interação entre a resistência e as fibras	64,29

Fonte: Autora, (2018).

Figura 54 - Representação gráfica dos efeitos gerados pela variação da resistência à compressão e volume de fibras na medida de tenacidade (volume de fibras de 40 kg/m³ para 50 kg/m³)

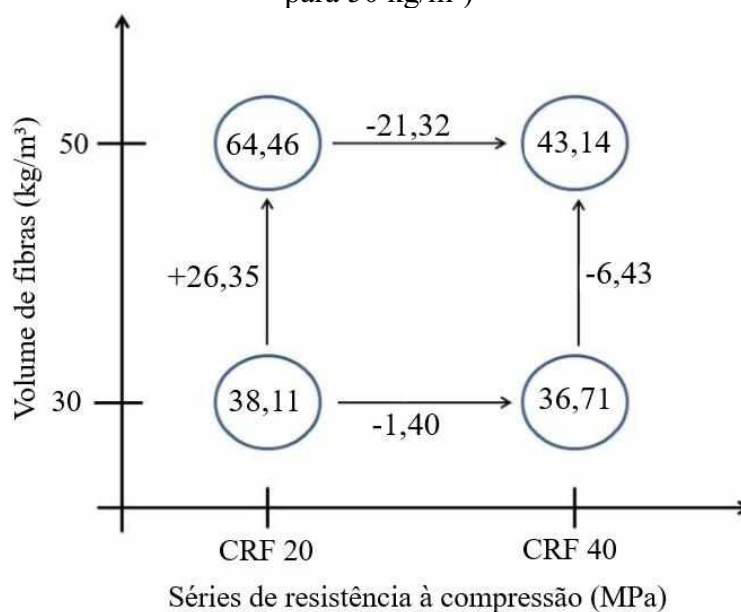
Fonte: Autora, (2018).

Tabela 31- Efeitos devido a variação da resistência à compressão e o teor de fibras na medida de tenacidade (Volume de fibras de 30 kg/m³ pra 50 kg/m³)

Efeitos principais	Valores (N.m)
Efeito do teor de fibras na tenacidade quando o volume aumenta de 30 kg/m ³ para 50 kg/m ³	18,89
Efeito da resistência à compressão na tenacidade, quando alterada a série CRF 20 para CRF 40	-13,86
Efeito de interação entre a resistência e as fibras	57,00

Fonte: Autora, (2018).

Figura 55 - Representação gráfica dos efeitos gerados pela variação da resistência à compressão e volume de fibras na medida de tenacidade (volume de fibras de 30 kg/m³ para 50 kg/m³)



Fonte: Autora, (2018).

Como constatado anteriormente e em análise as Tabelas 29, 30 e 31 e as Figuras 53, 54 e 55 expostas, reafirma-se que para o ensaio de tração à flexão conforme recomendações da norma EN 14651: 2007, observou-se redução na medida de tenacidade ao aumentar a resistência à compressão da matriz. Além disso, em função dos resultados obtidos afirma-se que o aumento do volume de fibras adicionadas gera um aumento na medida de tenacidade. A dosagem que obteve maior medida de tenacidade foi o CRF 20/50, ou seja, o concreto com matriz cimentícia com resistência característica de compressão de 20 MPa e teor 0,64% de fibras de aço.

5.8.3 Análise comparativa entre o ensaio proposto pela ASTM 14651:2012 e o ensaio recomendado pela EN 14651:2007

A fim de estabelecer uma relação entre os valores de tenacidade obtidos e como as variáveis de controle dos dois testes realizados são diferentes, os valores de CMOD foram correlacionados com parâmetros de deslocamento vertical a partir da Equação 10, descrita no item 3.4.4. A partir da correlação entre tais variáveis, plotou-se curvas de força por deslocamento vertical e as medidas de tenacidade foram obtidas a partir do cálculo da área sob tais curvas até o deslocamento vertical de 3 mm.

A Tabela 32 apresenta os valores de tenacidade média obtidos pelos ensaios propostos pelas normas EN 14651:2007 e ASTM 1609:2012 até o deslocamento vertical de 3 mm. Além disso, são expostos os valores de desvio padrão, coeficiente de variação e a correlação entre os valores de tenacidade obtidos pelos dois métodos.

Tabela 32 – Correção entre os valores de tenacidade obtidos pelos ensaios prescritos pela EN 14651:2007 e ASTM C1609:2012

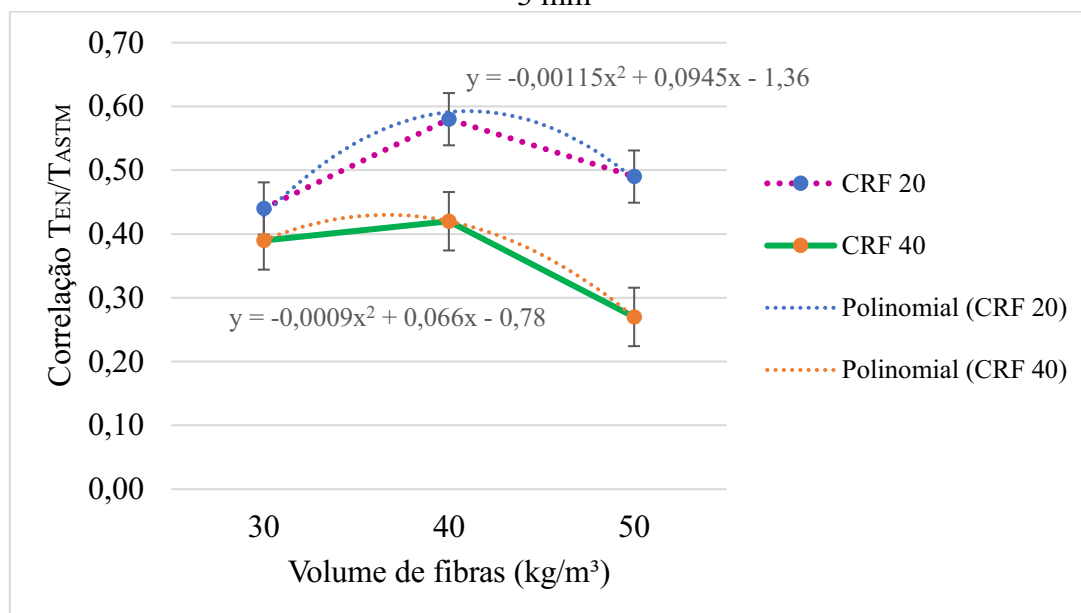
Dosagem	EN 14651			ASTM 1609			Correlação T_{EN}/T_{ASTM}
	Xm (N.m)	Sd (N.m)	Cv (%)	Xm (N.m)	Sd (N.m)	Cv (%)	
CRF 20/30	28,28	2,32	8,20	64,55	8,71	13,50	0,44
CRF 20/40	41,68	1,76	4,22	72,00	13,53	18,80	0,58
CRF 20/50	48,45	2,56	5,28	99,47	13,68	13,75	0,49
CRF 40/30	28,34	0,23	0,81	71,99	6,68	9,20	0,39
CRF 40/40	28,91	0,92	3,18	68,37	6,47	9,86	0,42
CRF 40/50	31,62	2,49	7,87	118,32	16,75	14,60	0,27

Fonte: Autora, (2018).

As medidas de tenacidade à flexão até 3 mm de deslocamento vertical dos corpos de prova ensaiados conforme recomendações da norma EN 14651:2007 são inferiores em relação aos valores obtidos por meio da norma ASTM C1609:2012, devido a presença do entalhe. Tal comportamento também foi observado por Arif, (2014) ao comparar tais ensaios.

A Figura 56 apresenta graficamente a correlação entre os valores de tenacidade obtidos pelos ensaios recomendados pelas normas EN 14651:2007 e ASTM C1609:2012 até o deslocamento vertical de 3 mm.

Figura 56 – Correlação entre os valores de tenacidade obtidos pelos ensaios prescritos nas normas EN 14651: 2007 e ASTM C1609: 2012 até o deslocamento vertical de 3 mm



Fonte: Autora, (2018).

Como dito anteriormente os valores de tenacidade obtidos pelo ensaio proposto pela ASTM C1609:2012 apresentaram acréscimo quando se aumentou a resistência à compressão característica da matriz cimentícia de 20 MPa para 40 MPa, com exceção ao traço CRF 40/40. Tal comportamento é arbitrário ao obtido pelo ensaio proposto pela EN 14651:2007 onde a medida de tenacidade foi reduzida quando a resistência à compressão característica da matriz foi alterada. Neste contexto podemos observar na Figura 56 maiores valores de correlação para os traços com matrizes cimentícias de 20 MPa (CRF 20).

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

A partir dos resultados descritos no capítulo 5, os seguintes pontos podem ser concluídos:

- Os resultados referentes à resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade apresentaram similaridade a outros autores, pois a adição de fibras não apresenta incrementos significativos. Por sua vez, quando se aumenta apenas a resistência do concreto observa-se um ganho na resistência compressão, tração e módulo de elasticidade;
- No ensaio ASTM 1609:2012 nota-se uma pequena alteração na medida de tenacidade quando a classe de resistência é alterada e/ou o volume de fibras é aumentado de 30 kg/m³ para 40 kg/m³. Entretanto quando o teor de fibras é alterado de 30 kg/m³ para 50 kg/m³ a medida de tenacidade apresenta ganhos de 38,15% para o concreto com resistência à compressão de 20 MPa e 73,06% para o concreto de 40 MPa. Já quando o volume de fibras foi fixado e ocorreu a alteração do concreto verificou-se um aumento na tenacidade média de 9,82% para 30 kg/m³ de fibras, redução de 5,04% para 40 kg/m³ de fibras e aumento de 18,95% para 50 kg/m³ de fibras;
- Sobre o método EN 14651: 2007 verifica-se aumento na medida de tenacidade e força de pico com o acréscimo do volume de fibras de aço. Tendo um efeito mais significativo no concreto de resistência à compressão inferior. Em que o aumento de 30 kg/m³ de fibra para 40 kg/m³ gera um acréscimo de 43,87% na medida de

tenacidade e o aumento de 30 kg/m³ para 50 kg/m³ gera um aumento de 82,26%. Já para o concreto com resistência à compressão superior a variação é de apenas 5,83% e 17,52% quando o volume de fibras adicionado é estendido de 30kg/m³ para 40 kg/m³ e de 30 kg/m³ para 50 kg/m³, respectivamente.

- A configuração proposta pela ASTM 1609:2012 apresentou maiores valores de tenacidade em comparação ao ensaio EN 14651:2007. Entretanto os resultados obtidos pelo segundo método apresentaram menor desvio padrão;
- Existe uma correlação entre os métodos de aproximadamente 0,50 e 0,36 para a classe de resistência C20 e C40, respectivamente. Sendo que esta é fortemente dependente do volume de fibras adicionado.
- Para ambos os métodos a influência da resistência à compressão na tenacidade é menor quando comparada com a influência do volume de fibras. Visto que o segundo fator influi de maneira favorável, pois um número maior de fibras pode interceptar a fissura e melhorar a capacidade portante do compósito na etapa de pós-fissuração.

6.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Determinação do volume crítico de fibras para as dosagens utilizadas nesse estudo;
- Comparação desses resultados com a tenacidade determinada por outros procedimentos, por exemplo, Ensaio de encunhamento e Barcelona teste simplificado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AENOR. **UNE 83515**: Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona. Espanha: 2010.

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

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

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

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

_____. **NBR 16605**: Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: 2017.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: 2018.

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

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

_____. **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: 2009.

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

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.

AZEVEDO, A. P. **Resistência e ductilidade das ligações laje-pilar em lajes-cogumelo de concreto de alta resistência armado com fibras de aço e armadura transversal de pinos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, 1999.

BANTHIA, Nemkumar; DUBEY, Ashish. Measurement of flexural toughness of fiber-reinforced concrete using a novel technique – part 1: assessment and calibration. **Materials Journal**, v. 96, n. 6, p. 651-656, 1999.

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

BASTOS, P. S. S. **Análise experimental de dormentes de concreto protendido reforçados com fibras de aço.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

BEHFARNIA, K.; KHADEMI, F. A comprehensive study on the concrete compressive strength estimation using artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system. **Iran University of Science & Technology**, v. 7, n. 1, p. 71-80, 2017.

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

BERNARDI, Stefania Tesi. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CALDAS, A.; FIGUEIREDO, A. D.; BITTENCOURT, T. N. Propriedades do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA): comparação entre métodos de medida. **Anais. In: V SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO.** São Paulo: 7 a 10 jun. 2003.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2002.

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

CARVALHO, E. **Estudo da variabilidade da tenacidade de concretos reforçados com fibras de aço por meio de ensaios à flexão em prismas moldados e extraídos.**

2012. 171f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

CHEN, L. Comparative toughness testing of fiber reinforced concrete. **Special Publication**, v. 155, p. 41-76, 1995.

DATTATREYA, J.; HARISH, K.; NEELAMEGAN, M. Effect of latex and fibber addition on mechanical and durability. Properties of sintered fly ash lighthweighth aggregate concrete mixtures. In: **Proceedings of 12th International Congress on Polymers in Concrete**, Chuncheon, Korea. 2007. p. 113-121.

DE FARIAS FILHO, João; TOLEDO FILHO, Romildo D.; LIMA, Paulo RL. Efeito da argila calcinada sobre a durabilidade de argamassas reforçadas com fibras curtas de sisal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 14, n. 10, 2010.

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** - Uberlândia. 2018. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

DI PRISCO, M.; PLIZZARI, G.; VANDEWALLE, L. Fibre reinforced concrete: new design perspectives. **Materials and structures**, v. 42, n. 9, p. 1261-1281, 2009.
<https://doi.org/10.1617/s11527-009-9529-4>

DUARTE, J. B. **Inteligência artificial aplicada no controle de qualidade em linhas de produção**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia, 2013.

EFNARC. European Specification for Sprayed Concrete. Specification and guidelines for self-compacting concrete. In: **EFNARC**. 2002

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

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

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

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

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

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

FIGUEIREDO, A. D. MORAD, F. A., CARVALHO, J. L. C. Aspectos do 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.

FIGUEIREDO, A. D., HELENE, P. R. L. Controle da tenacidade do concreto com fibras de aço. In: 39ª Reunião do IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 1997, **Anais. São Paulo**, v.1, p. 357 – 372, 1997.

GARCEZ, E. O. A. **Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibra de aço submetidos a cargas de impacto**. 2005. 113f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GETTU, Ravindra et al. Testing of concrete under closed-loop control. **Advanced Cement Based Materials**, v. 3, n. 2, p. 54-71, 1996.

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

GÓIS, F. A. P. **Avaliação experimental do comportamento de concreto fluido reforçado com fibras de aço: Influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto**. 2010. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

GOLDMAN, A.; BENTUR, A. The influence of microfillers on enhancement of concrete strength. **Cement and concrete research**, v. 23, n. 4, p. 962-972, 1993.
[https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90050-J](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90050-J)

GOPALARATNAM, Vellore S.; GETTU, Ravindra. On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concretes. **Cement and concrete composites**, v. 17, n. 3, p. 239-254, 1995.
[https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)99506-O](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)99506-O)

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

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

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.

LOBÃO, Laurindo Mauricio Menezes. **Taxa de Armadura Longitudinal de Tração Mínima em Vigas de Concreto de Resistência Normal com Fibras de Aço**. 2005. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado. 109 p. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.

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

MECHTCHERINE, V.; JUN, P. Behaviour of strain hardening cement-based composites in tension and compression. In: **Proceedings of the seventh RILEM international symposium on fibre reinforced concrete: design and applications (BEFIB 2008)**. RILEM Publications, Chennai, India: 2008. p. 471-481.

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

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 751 p.

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

MONTE, R; TOALDO, G. S.; FIGUEIREDO, A. D. Avaliação da tenacidade de concretos reforçados com fibras através de ensaios com sistema aberto. **Matéria**, v. 19, p. 132-149, 2014.
<https://doi.org/10.1590/S1517-70762014000200008>

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.

NATARAJA, M.C., et al. Toughness characterization of steel fiber-reinforced concrete by JSCE approach, **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 593-597, 2000.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00212-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00212-X)

NUNES, N. L. **Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos**. 2006. Tese de Doutorado – Escola politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

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

PADILHA, F.A. **Materiais de Engenharia**. Microestrutura e Propriedades. 1. ed. São Paulo: Hemus, 1997.

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

PEREIRA, Marina da Mota. **Avaliação da eficiência do ensaio Barcelona simplificado para a determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras**. 2017. 159p. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

PRISCO, M., et al., “Fiber reinforced concrete in the new fib Model Code”, In: 3rd fib International Congress, Washington, p. 1-12, 2010.

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

RIBEIRO, B. M. **Análise de imagens para determinação da quantidade de fibras presentes no concreto**. 2018. 215 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

RIZZUTI, Lidia; BENCARDINO, Francesco. Effects of fibre volume fraction on the compressive and flexural experimental behaviour of SFRC. **Contemporary Engineering Sciences**, v. 7, n. 8, p. 379-390, 2014.

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.

SANTOS, A. C. **Ensaio para análise da interface entre o concreto e o polímero reforçado com fibras**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil, 2003.

SHAH, SP; KUDER, KG; MU, B. Compósitos à base de cimento reforçados com fibras: uma odisseia de quarenta anos. In: **6º Simpósio Internacional RILEM sobre Concretos Reforçados com Fibra**. Publicações RILEM SARL, 2004. p. 3-30.

SILVA, H. P. **Comportamento mecânico de compósitos de fibra de vidro/epoxy nanoreforçados**. Tese (doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Coimbra, 2014.

SLATER, Emma; MONI, Moniruzzaman; ALAM, M. Shahria. Predicting the shear strength of steel fiber reinforced concrete beams. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 423-436, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.042>

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.

TITA, V. **Análise dinâmica teórica e experimental de vigas fabricadas a partir de materiais compósitos poliméricos reforçados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Brasil, 1999.

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.; SCHNEEMAYER, A.; MERTA, I.; RIEDER, K. A. Energy dissipation capacity of fibre reinforced concrete under biaxial tension – compression load. Part I: Test equipment and work of fracture. **Cemente&Concrete Composites**. v. 62, p. 95-203, 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.07.002>

VASILIEV, Valery V. **Mechanics of composite structures**. Routledge, 2017.

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.

QUININO, UCM. **Investigação Experimental das Propriedades Mecânicas de Compósitos de Concreto Com Adições Híbridas de Fibras**. 2015. Porto Alegre, 243 f. 2015. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

APÊNDICE A

RESULTADOS: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Dosagem	Compressão aos 28 dias (MPa)				Compressão aos 60 dias (MPa)			
	CP I	CP II	Xm	Sd	CP I	CP II	Xm	Sd
CS 20	18,17	23,9	21,035	2,87	24,79	29,34	27,07	2,28
CRF 20/30	23,27	26,68	24,975	1,71	30,24	27,86	29,05	1,19
CRF 20/40	30,42	28,36	29,39	1,03	35,73	31,17	33,45	2,28
CRF20/50	29,02	32,05	30,535	1,52	32,26	36,86	34,61	2,30
CS 40	40,6	34,84	37,72	2,88	40,01	46,15	43,08	3,07
CRF 40/30	35,34	42,06	38,7	3,36	43,54	47,1	45,32	1,78
CRF 40/40	45,88	46,7	46,29	0,41	42,03	46,23	44,13	2,10
CRF 40/50	42,23	41,33	41,78	0,45	45,46	46,44	44,48	0,49

APÊNDICE B

RESULTADOS: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Dosagem	Tração por compressão diametral aos 60 dias (MPa)				
	CP I	CP II	CP III	Xm	Sd
CS 20	3,07	3,10	2,98	3,07	0,05
CRF 20/30	3,84	3,63	4,04	3,84	0,14
CRF 20/40	3,07	3,07	3,07	3,07	0,00
CRF20/50	2,65	5,10	3,27	3,27	0,95
CS 40	4,61	4,17	5,04	4,61	0,29
CRF 40/30	6,88	4,90	6,94	6,88	0,89
CRF 40/40	6,91	7,77	8,51	7,77	0,55
CRF 40/50	5,60	6,56	6,08	6,08	0,32

APÊNDICE C

RESULTADOS: MÓDULO DE ELASTICIDADE

Dosagem	Módulo de elasticidade aos 28 dias (GPa)				Módulo de elasticidade aos 60 dias (GPa)			
	CP I	CP II	Xm	Sd	CP I	CP II	Xm	Sd
CS 20	28,64	32,85	30,745	2,11	33,46	36,4	27,07	1,47
CRF 20/30	32,42	34,71	33,565	1,15	36,95	35,47	29,05	0,74
CRF 20/40	37,06	35,79	36,425	0,64	40,17	37,52	33,45	1,33
CRF20/50	36,2	38,04	37,12	0,92	26,41	23,32	34,61	1,55
CS 40	42,82	39,67	41,245	1,58	42,51	41,93	43,08	0,29
CRF 40/30	39,95	43,58	41,765	1,82	44,34	46,12	45,32	0,89
CRF 40/40	45,52	45,92	45,72	0,20	43,57	45,69	44,13	1,06
CRF 40/50	43,67	43,2	43,435	0,23	41,13	41,39	44,48	0,13

APÊNDICE D

RESULTADOS: TENACIDADE (ASTM 1609:2012)

Dosagem	Tenacidade (MPa)					
	Corpos de prova			Xm (N.m)	Sd (N.m)	Cv (%)
	CP 1	CP 2	CP 3			
CRF 20/30	69,34	69,81	54,49	64,55	8,71	13,50
CRF 20/40	64,16	87,62	64,21	72,00	13,53	18,80
CRF 20/50	95,43	114,71	88,27	99,47	13,68	13,75
CRF 40/30	78,50	72,22	65,26	71,99	6,62	9,20
CRF 40/40	66,04	63,10	75,97	68,37	6,74	9,86
CRF 40/50	116,04	136,09	102,82	118,32	16,75	14,16

APÊNDICE E

RESULTADOS: TENACIDADE (EN 14651: 2007)

Tenacidade (kN.mm) para CMOD (4mm)						
Dosagem	Corpos de prova			Xm	Sd	CV
	CP 1	CP 2	CP .3	(N.m)	(N.m)	(%)
CRF20/30	-	40,23	35,98	38,11	3,01	7,89
CRF20/40	59,33	53,87	55,79	54,83	2,77	5,06
CRF20/50	74,13	64,79	-	69,46	6,60	9,51
CRF40/30	35,90	37,51	-	36,71	1,13	3,09
CRF40/40	37,90	39,80	-	38,85	1,34	3,45
CRF40/50	-	42,00	43,79	43,14	0,92	2,14

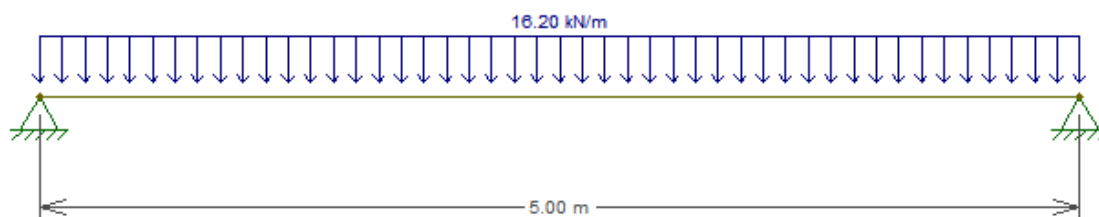
Tenacidade (kN.mm) para deflexão (3mm)					
Dosagem	CP.1	CP.2	CP.3	Xm	Sd
CRF20/30		29,92	26,64	28,28	2,32
CRF20/40	44,47	40,97	42,38	41,68	1,76
CRF20/50	52,07	48,45	-	48,45	2,56
CRF40/30	28,01	28,34	-	28,34	0,23
CRF40/40	29,56	28,26	-	28,91	0,92
CRF40/50	-	29,86	33,38	31,62	2,49

APÊNDICE F

DIMENSIONAMENTO DE VIGA DE CONCRETO ARMADO REFORÇADA COM FIBRAS DE AÇO

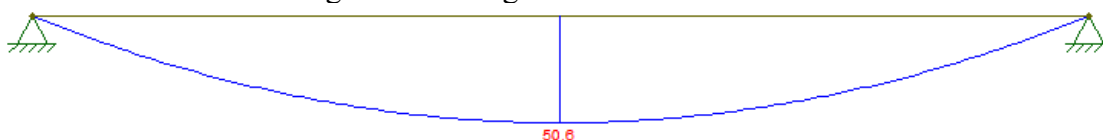
Para a análise foi considerada uma viga de concreto armado biapoada submetida à flexão e com as seguintes dimensões: 16 cm de base, 50 cm de altura e 500 cm de vão. O esquema estático e diagrama de momento fletor são apresentados nas Figuras F1 e F2.

Figura F1 – Esquema estático



Fonte: Ftool, (2018).

Figura F2 – Diagrama de momento fletor



Fonte: Ftool, (2018).

Segundo o *fib Mode Code* (2010) a contribuição referente a adição de fibras ao concreto armado se dá por meio da somatória entre o momento resistente devido ao uso do CRF (M_U) e o momento resistente devido a utilização da armadura (M_{RESIST}). Tal relação é apresentada na Equação 1 a seguir.

$$M_{SOLICIT} = M_{SD} = M_U + M_{RESIST} \quad (1)$$

Em que,

$M_{SOLICIT}$ = Momento solicitante (refere-se ao momento devido ao carregamento que a estrutura está submetida);

M_{SD} = Momento solicitante de cálculo;

M_U = Momento resistente devido ao uso do CRF;

M_{RESIST} = Momento resistente devido a utilização da armadura

O momento resistente devido ao uso do CRF (M_U) depende da resistência residual à tração direta do CRF que é determinado através da Equação 2. Segundo o *fib* Model Code (2010) tal parcela também pode ser determinada a partir da compatibilização da resistência à tração residual no estado limite último (f_{Ftu}) por meio da resistência residual (f_{R3}), que é determinada a partir do ensaio de tração na flexão prescrito pela norma EN 14651: 2007 (Equação 3).

$$M_U = \frac{f_{Ftu} \cdot b \cdot h_{sp}^2}{2} \quad (2)$$

$$M_U = \frac{f_{R3} \cdot b \cdot h_{sp}^2}{6} \quad (3)$$

Em que,

f_{Ftu} = Resistência à tração residual no estado limite último, em MPa;

b = Base da viga, em mm;

h_{sp} = Altura da viga, em mm.

A partir dos resultados de f_{R3} obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão conforme recomendações da EN 14651:2007 pôde-se determinar o momento resistente devido ao uso do CRF (M_U) para todos os volumes de fibras estudados nesta pesquisa por meio da Equação 20. A Tabela F1 apresenta o resumo dos resultados obtidos, bem como a área de aço (A_s) obtida em cada dosagem.

Tabela F1 – Dimensionamento da viga

Dosagem	M_U (kN.cm)	M_{RESIST} (kN.cm)	M_{SD} (kN.cm)	A_s (cm ²)
CS 20	-	5060	5060,00	4,39
CRF 20/30	1934,67	5060	3125,33	3,14
CRF 20/40	2662,50	5060	2397,50	2,36
CRF 20/50	3091,74	5060	1968,26	1,97