



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS



Dissertação de Mestrado

Paulo Roberto Ribeiro Soares Junior

**Compósito cimentício de alto desempenho
reforçado por fibras de aço submetido à variação
controlada de temperatura**

BELO HORIZONTE

2019



Paulo Roberto Ribeiro Soares Junior

**Compósito cimentício de alto desempenho
reforçado por fibras de aço submetido à variação
controlada de temperatura**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Ciência e Desenvolvimento de Materiais

Linha de Pesquisa: Seleção, Processamento e Caracterização

Orientador: Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra

Belo Horizonte

2019

S676c Soares Junior, Paulo Roberto Ribeiro.
Compósito cimentício de alto desempenho reforçado por fibras de aço submetido à variação controlada de temperatura / Paulo Roberto Ribeiro Soares Junior. – 2019.
177 f. : il.
Orientador: Augusto Cesar da Silva Bezerra

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2019.
Bibliografia.

1. Concreto de alto desempenho. 2. Concreto reforçado com fibras. 3. Tratamento térmico. 4. Materiais compósitos de fibras. 5. Deformações e tensões. I. Bezerra, Augusto Cesar da Silva. II. Título.

CDD: 620.136



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

“Compósito cimentício de alto desempenho reforçado por fibras de aço submetido à variação controlada de temperatura”

Autor: Paulo Roberto Ribeiro Soares Junior

A Banca Examinadora foi composta pelos membros abaixo:

Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais (POSMAT)

Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais (POSMAT)

Prof. Dra. Aline Silva Magalhães
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)
Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT)

Belo Horizonte, 27 de fevereiro de 2019.



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
“COMPÓSITO CIMENTÍCIO DE ALTO DESEMPENHO
REFORÇADO POR FIBRAS DE AÇO SUBMETIDO À
VARIAÇÃO CONTROLADA DE TEMPERATURA”

Autor: Paulo Roberto Ribeiro Soares Júnior

Orientador: Prof. Dr. Augusto César da Silva Bezerra

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Augusto César da Silva Bezerra (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof.ª Dr.ª Elaine Carballo Siqueira Corrêa
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof.ª Dr.ª Aline Silva Magalhães
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)

Belo Horizonte, 27 de Fevereiro de 2019.

Dedico este trabalho à minha família,
aos meus pais Paulo e Nadir,
às minhas irmãs Ana e Janaina,
à minha sobrinha Yasmim,
porque sem eles eu não chegaria até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e saúde que me foram concedidos, para ter garra e força de passar por mais um desafio.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Augusto Bezerra, que sempre acreditou em mim, que se tornou um amigo, conselheiro e espelho de vida.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, pela oportunidade de realizar meu tão sonhado mestrado e iniciar carreira acadêmica, que sempre foi meu sonho e objetivo de vida.

Agradeço à Profa. Dra. Elaine Carballo pelo apoio, sugestões e acesso ao laboratório de Metalografia do DEMAT, sempre disposta a colaborar da melhor forma possível.

Agradeço aos meus pais pelo amor incondicional e presença constante em todos os momentos.

Agradeço à minha irmã Ana Cláudia, que sempre me incentivou e me apresentou o CEFET-MG, que agora sinto como minha casa.

Agradeço à minha irmã Janaina pela ajuda na Análise Estatística, pelas diversas horas de trabalho, inclusive madrugadas a dentro.

Agradeço à minha sobrinha Yasmim pelo incentivo, sempre linda comigo.

Agradeço aos bons amigos que fiz no laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Materiais do Departamento de Engenharia de Transportes, pela ajuda, companheirismo e troca de informações, em especial ao Richard, que muito me ajudou na parte experimental.

Agradeço aos amigos do grupo de pesquisa Materiais Inovadores Sustentáveis (MIS) pelo aprendizado mútuo, em especial ao João Trajano e Priscila, os quais serviram de inspiração ao trabalhar com fibras.

Agradeço à Maccaferri pelo fornecimento das fibras de aço e à Tecnosil pela doação de sílica ativa e aditivo superplastificante.

Agradeço a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para o presente trabalho.

Paulo Roberto Ribeiro Soares Junior

RESUMO

O presente trabalho avaliou o comportamento mecânico de compósitos cimentícios de alto desempenho reforçados com fibras (CCADRF), antes e após tratamento térmico. Para isso, foram moldados corpos de prova reforçados com 1%, 3% e 5% de fibras de aço em volume, utilizando a metodologia de calda infiltrada, após dispersão do reforço nos moldes. A concentração das fibras se deu na região sujeita à tração durante solicitações da flexão. Após a cura de 7, 14 e 28 dias, todos os exemplares foram ensaiados à flexão, sendo que a metade passou por tratamento térmico a 250°C, com aquecimento gradativo em forno elétrico. Foi observado que a exposição à temperaturas em torno de 250°C melhora o desempenho mecânico do CCADRF com a distribuição de fibras proposta. O compósito reforçado com 5% de fibras submetido a tratamento térmico apresentou resistência na flexão entre sete a oito vezes maior se comparado ao grupo controle sem reforço e sem aquecimento. Os resultados da análise estatística revelaram que o aumento da idade, o acréscimo do teor de fibras e a aplicação do tratamento térmico contribuíram para o aumento da resistência mecânica, tenacidade e deflexão. O ensaio de *pull-out* revelou que a ligação fibra-matriz é coesa e confirmou a influência do tratamento térmico no mecanismo de adesão fibra-matriz. As imagens obtidas por microscopia óptica e eletrônica de varredura ajudaram no entendimento da interface fibra-matriz, exibindo a superfície de ligação entre os elementos do compósito, e confirmou que o tratamento térmico promove alteração da superfície das fibras de aço. Os perfis de fissuração não exibiram um padrão definido e apresentaram delineamentos distintos, com distorções e tendência à inclinação, conforme o teor de fibras aumenta.

Palavras-chave: compósito cimentício de alto desempenho reforçado com fibras (CCADRF); distribuição de fibras; tratamento térmico; comportamento à flexão; interface fibra-matriz.

ABSTRACT

The present work evaluated mechanical behavior of high-performance fiber reinforcement cementitious composites (HPFRCC), before and after thermal treatment. For this, reinforced specimens with 1%, 3% and 5% steel fibers by volume were molded, using the methodology of infiltrated slurry, after dispersion of the reinforcement in the molds. The concentration of fibers occurred in region subjected to traction during bending stresses. After curing at 7, 14 and 28 days, all specimens were bending tested, with half being heat treated at 250 °C and with gradual heating in an electric oven. It has been observed that exposure to temperatures around 250 °C improves mechanical performance of HPFRCC with the proposed fiber distribution. The composite reinforced with 5% of fibers, submitted to thermal treatment, showed bending resistance between seven and eight times greater when compared to the control group without reinforcement and without heating. The results of statistical analysis revealed that increase in age, increase in fiber content and the application of heat treatment contributed to increase in strength, toughness and deflection. The pull-out assay revealed that fiber-matrix bond is cohesive and confirmed influence of heat treatment on fiber-matrix bonding mechanism. The images obtained by optical and scanning electron microscopy helped to understand the fiber-matrix interface, showing bonding surface between composite elements, and confirmed that heat treatment promotes a change in the surface of steel fibers. The cracking profiles did not exhibit a defined pattern and presented distinct designs with distortions and inclination tendencies as the fiber content increases.

Key words: high performance fiber reinforced cementitious composite (HPFRCC); fiber distribution; thermal attack; bending behavior; fiber-matrix interface.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática das combinações entre matriz e reforço, bem como indicação dos compósitos cimentícios.....	7
Figura 2 – Perfis típicos de fibras de aço usadas em concreto.	8
Figura 3 – Energia absorvida pelo compósito em função do fator de forma (L/D) para o ensaio de flexão.	9
Figura 4 – Mecanismo de transferência de tensões em compósitos cimentícios reforçados por fibras.....	10
Figura 5 – Configuração esquemática da distribuição de tensões ao longo de uma fibra de aço.....	11
Figura 6 – Mecanismo de absorção de energia.	11
Figura 7 – Comportamento do CCRF quando submetido ao ensaio de flexão.	12
Figura 8 – Estruturas típicas onde são necessários compósitos cimentícios de alto desempenho.....	14
Figura 9 – Diâmetro médio das partículas dos constituintes no UHPFRCC.....	16
Figura 10 – Propriedades microestruturais do concreto convencional, concreto de alto desempenho e UHPFRCC.	17
Figura 11 – Comportamento à flexão de CCRF.	19
Figura 12 – Resultados para testes de flexão com resistência média da matriz.	19
Figura 13 – Dois métodos de lançamento; (a) lançamento de compósito pelo centro e (b) lançamento de compósito na extremidade.....	20
Figura 14 – Imagens binárias transformadas da orientação e dispersão de fibras no centro da viga de UHPFRCC com (a) lançamento pela extremidade e (b) lançamento pelo centro.....	20
Figura 15 – Métodos de lançamento de concreto; (a) em uma das extremidades e (b) em vários locais ao longo do molde.	21

Figura 16 – Curvas tensão de flexão média <i>versus</i> deflexão normalizada para vigas submetidas a carregamento quase-estático.....	21
Figura 17 – Método de moldagem de corpos de provas SIFCON.....	22
Figura 18 – Exemplar de SIFCON após a moldagem.	23
Figura 19 – Comportamento à flexão do concreto convencional, CRF e SIFCON....	24
Figura 20 – Curva típica para o ensaio de extração de fibra ou <i>pull-out</i> , com respectivos estágios.....	25
Figura 21 – Relação tensão deformação para compósitos cimentícios submetidos à variação de temperatura.....	27
Figura 22 – Esforços atuantes em uma viga biapoiada submetida a flexão simples.	30
Figura 23 – Distribuição da tensão de flexão em uma seção transversal.....	30
Figura 24 – Viga prismática carregada a quatro pontos e campos de tensão determinados por meio da técnica de fotoelasticidade.....	32
Figura 25 – Esquema do ensaio de flexão quatro pontos, disposição dos suportes e pontos de aplicação de cargas.....	33
Figura 26 – Perfil de fissuração de vigas submetidas ao ensaio de flexão e ruptura por cisalhamento.	34
Figura 27 – Mapa do perfil de fissuração para vigas de SIFCON, com diferentes conteúdos de fibras.....	35
Figura 28 – Exemplo de fibra de aço com ancoragem nas extremidades.....	37
Figura 29 – Sílica ativa utilizada como adição mineral.....	38
Figura 30 – Organograma dos experimentos realizados.....	40
Figura 31 – Moldes prismáticos (vigas) contendo fibras ao fundo.....	41
Figura 32 – Nomenclatura adotada para os exemplares de compósito cimentício. ..	42

Figura 33 – Termopares acoplados aos corpos de prova e conversor de temperatura.	43
Figura 34 – Variação da temperatura ambiente e no interior do forno, durante o ensaio de tratamento térmico.....	43
Figura 35 – Variação da temperatura para vigas durante ensaio de tratamento térmico.	44
Figura 36 – Equipamento utilizado no ensaio de flexão de vigas.....	45
Figura 37 – Variáveis adotadas no experimento e avaliadas na análise estatística. .	47
Figura 38 – Fluxograma das etapas da análise estatística.....	47
Figura 39 – Aparato de ensaio para extração de fibra.	50
Figura 40 – Fibras preparadas para moldagem, ensaio de <i>pull-out</i>	51
Figura 41 – Amostras com seções polidas para investigação da interface fibra-matriz.	51
Figura 42 – Amostras após embutimento e preparo da seção.....	52
Figura 43 – Curvas tensão-deformação sem adição de fibras e 7 dias.....	54
Figura 44 – Curvas tensão-deformação com 1% de fibras e 7 dias	54
Figura 45 – Valores tensão-deslocamento com 3% de fibras e 7 dias.....	55
Figura 46 – Valores tensão-deslocamento com 5% de fibras e 7 dias.....	55
Figura 47 – Curvas tensão-deformação das vigas sem adição de fibras e 28 dias...56	
Figura 48 – Curvas tensão-deformação das vigas com 1% de fibras e 28 dias	56
Figura 49 – Curvas tensão-deformação das vigas com 3% de fibras e 28 dias	56
Figura 50 – Curvas tensão-deformação das vigas com 5% de fibras e 28 dias	57
Figura 51 – Curvas tensão-deformação das vigas sem adição de fibras e 56 dias...57	
Figura 52 – Curvas tensão-deformação das vigas com 1% de fibras e 56 dias	58

Figura 53 – Curvas tensão-deformação das vigas com 3% de fibras e 56 dias	58
Figura 54 – Curvas tensão-deformação das vigas com 5% de fibras e 56 dias	58
Figura 55 – Resistência média na flexão para 7 dias.	60
Figura 56 – Resistência média na flexão para 28 dias.	61
Figura 57 – Resistência média na flexão para 56 dias.	61
Figura 58 – Tenacidade média para 7 dias.	64
Figura 59 – Tenacidade média para 28 dias.	64
Figura 60 – Tenacidade média para 56 dias.	65
Figura 61 – Deflexão média para 7 dias.	66
Figura 62 – Deflexão média para 28 dias.	67
Figura 63 – Deflexão média para 56 dias.	67
Figura 64 – Gráfico <i>boxplot</i> da resistência em função da idade.	72
Figura 65 – Gráfico <i>box plot</i> da tenacidade em função da idade.	72
Figura 66 – Gráfico <i>box plot</i> da deflexão em função da idade.	73
Figura 67 – Gráfico <i>box plot</i> da resistência em função do teor de fibras.	74
Figura 68 – Gráfico <i>box plot</i> da tenacidade em função do teor de fibras.	74
Figura 69 – Gráfico <i>box plot</i> da deflexão em função do teor de fibras.	75
Figura 70 – Gráfico <i>box plot</i> da resistência em função do tratamento térmico.	76
Figura 71 – Gráfico <i>box plot</i> da tenacidade em função do tratamento térmico.	76
Figura 72 – Gráfico <i>box plot</i> da deflexão em função do tratamento térmico.	77
Figura 73 – Comportamento da resistência em função da idade.	80
Figura 74 – Comportamento da tenacidade em função da idade.	80
Figura 75 – Comportamento da deflexão em função da idade.	81

Figura 76 – Comportamento da resistência em função do teor de fibras.	81
Figura 77 – Comportamento da tenacidade em função do teor de fibras.	82
Figura 78 – Comportamento da deflexão em função do teor de fibras.	82
Figura 79 – Comportamento da resistência em função do tratamento térmico.	83
Figura 80 – Comportamento da tenacidade em função do tratamento térmico.	83
Figura 81 – Comportamento da deflexão em função do tratamento térmico.	84
Figura 82 – Comportamento da resistência em função da idade, levando em conta o tratamento térmico.	84
Figura 83 – Comportamento da tenacidade em função da idade, levando em conta o tratamento térmico.	85
Figura 84 – Comportamento da deflexão em função da idade, levando em conta o tratamento térmico.	85
Figura 85 – Comportamento da resistência em função do teor de fibras, levando em conta o tratamento térmico.	86
Figura 86 – Comportamento da tenacidade em função do teor de fibras, levando em conta o tratamento térmico.	86
Figura 87 – Comportamento da deflexão em função do teor de fibras, levando em conta o tratamento térmico.	87
Figura 88 – Curva carga <i>versus</i> deslocamento para <i>pull-out</i> de fibra única, corpo de prova “ARCP1”, sem tratamento térmico.	88
Figura 89 – Curva carga <i>versus</i> deslocamento para <i>pull-out</i> de fibra única, corpo de prova “ARCP2”, sem tratamento térmico.	89
Figura 90 – Curva carga <i>versus</i> deslocamento para <i>pull-out</i> de fibra única, corpo de prova “ARTCP1”, com tratamento térmico.	89
Figura 91 – Curva carga <i>versus</i> deslocamento para <i>pull-out</i> de fibra única, corpo de prova “ARTCP2”, com tratamento térmico.	90

Figura 92 – Carga máxima <i>pull-out</i> , para exemplares com e sem tratamento térmico.	91
Figura 93 – Energia de <i>pull-out</i> , para exemplares com e sem tratamento térmico. ..	91
Figura 94 – Resistência à compressão da matriz cimentícia.....	92
Figura 95 – Imagens do compósito fraturado, logo após ensaio de flexão, com destaque para as fibras expostas.....	93
Figura 96 – Superfície das fibras <i>in natura</i>	94
Figura 97 – Superfície das fibras após flexão	95
Figura 98 – Superfície das fibras com tratamento térmico, após flexão	96
Figura 99 – Imagens da superfície das fibras, obtidas por MEV, após flexão	97
Figura 100 – Imagens de microscopia óptica das fibras <i>in natura</i>	98
Figura 101 – Imagens de microscopia óptica das fibras, após ensaio de flexão.....	99
Figura 102 – Imagens das fibras com tratamento térmico, após flexão.	99
Figura 103 – Amostra durante ensaio de microdureza Vickers.....	100
Figura 104 – Interface fibra-matriz sem tratamento térmico.....	102
Figura 105 – Interface fibra-matriz com tratamento térmico.....	103
Figura 106 – Interface fibra-matriz com tratamento térmico precedente ao polimento das amostras.....	104
Figura 107 – Imagens do compósito fraturado, obtidas por MEV.....	105
Figura 108 – Organograma para a influência do tratamento térmico no desempenho mecânico de CCADRF.	107
Figura 109 – Corpos de prova sem tratamento térmico, após ensaio de flexão.....	108
Figura 110 – Corpos de prova após tratamento térmico e ensaio de flexão	109
Figura 111 – Modelo adotado para o padrão de fissuração das vigas.	110

Figura 112 – Padrão de fissuras para corpos de prova sem fibras.	110
Figura 113 – Padrão de fissuras para corpos de prova com 1% de fibras.	111
Figura 114 – Padrão de fissuras para corpos de prova com 3% de fibras.	111
Figura 115 – Padrão de fissuras para corpos de prova com 5% de fibras.	112
Figura 116 – Fatores influentes para o colapso da viga e padrão de fissuras.....	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Métodos para avaliar a tenacidade de CCRF.....	13
Tabela 2 – Proporção de mistura para UHPFRCC.....	17
Tabela 3 – Resumo das propriedades mecânicas de vários tipos de concreto.....	18
Tabela 4 – Caracterização química e física do Cimento Portland de Alta Resistência Inicial – CPV ARI.....	36
Tabela 5 – Características das fibras de aço.....	37
Tabela 6 – Caracterização química da sílica ativa.....	38
Tabela 7 – Características do aditivo Silicon.....	39
Tabela 8 – Características da água fornecida pela COPOSA.....	39
Tabela 9 – Proporção em massa dos constituintes utilizados.....	41
Tabela 10 – Média, desvio padrão e intervalo de confiança para as variáveis resposta originais, em relação à idade.....	70
Tabela 11 – Média, desvio padrão e intervalo de confiança para as variáveis resposta originais, em relação ao teor de fibras.....	70
Tabela 12 – Média, desvio padrão e intervalo de confiança para as variáveis resposta originais, em relação ao tratamento térmico.....	71
Tabela 13 – Coeficiente de correlação entre as variáveis resposta.....	77
Tabela 14 – Resultados da análise de variância multivariada (MANOVA).....	78
Tabela 15 – Resultados da análise de variância univariada (ANOVA).....	79
Tabela 16 – Valores para microdureza Vickers das fibras de aço.....	101

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ASTM – American Society for Testing and Materials.
- CCADRF – Compósito cimentício de alto desempenho reforçado com fibras.
- CCRF – Compósito cimentício reforçado por fibras.
- CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
- CPR – Concreto de pós reativos.
- CRF – Concreto reforçado com fibras.
- FA – Fibras de aço.
- LVDT – Transformador diferencial variável linear (*linear variable differential transformer*).
- HPC – Concreto de alto desempenho (*high performance concrete*).
- ITZ – Zona de transição interfacial (*interfacial transition zone*).
- MEV – Microscopia eletrônica de varredura.
- MO – Microscopia óptica.
- NC – Concreto normal (*normal concrete*).
- SA – Sílica ativa.
- SCC – Concreto auto adensável (*self-compacting concrete*).
- SIFCON – Concreto contendo fibras com calda infiltrada (*slurry infiltrated fiber concrete*).
- T – Tratamento térmico.
- UHPC – Concreto de ultra alto desempenho (*ultra high performance concrete*).
- UHPRFC – Concreto de ultra alto desempenho reforçado por fibras, (*ultra high performance fiber reinforced concrete*).
- UHPFRCC – Compósito cimentício de ultra alto desempenho reforçado por fibras (*ultra high performance fiber reinforced cementitious composites*).

LISTA DE SÍMBOLOS

° – graus
°C – graus Celsius
% – por cento
a/c – fator água cimento
b – largura
c – comprimento
cm² – centímetro quadrado
cm³ – centímetro cúbico
D – diâmetro
d – distância entre apoios de suporte
d_f – diâmetro da fibra
GPa – giga Pascal
g – grama
H – espessura
h – altura
I – momento de inércia
kg – quilograma
L – comprimento; distância entre apoios; litro
l_f – comprimento da fibra
M – momento fletor
MPa – mega Pascal
m² – metro quadrado
m³ – metro cúbico
mg – miligrama
min – minuto
mm – milímetro
P – carga
Q – força cortante
V_f – fração volumetria de fibras
µm – micrômetro
λ – fator de forma ou índice de esbeltez

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS.....	5
2.1 Objetivo geral	5
2.2 Objetivos específicos.....	5
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3.1 Compósitos cimentícios.....	6
3.2 Compósito cimentício reforçado com fibras.....	7
3.2.1 Fibras	8
3.2.2 Interação fibra-matriz.....	9
3.2.3 Resistência à flexão	11
3.2.4 Tenacidade.....	13
3.3 Compósito cimentício de alto desempenho reforçado por fibras	14
3.3.1 Materiais, dosagens e condições de cura	15
3.3.2 Propriedades mecânicas	17
3.3.3 Concreto contendo fibras com calda infiltrada (SIFCON).....	21
3.3.4 Extração de fibra ou <i>pull-out</i>	24
3.4 Comportamento térmico	26
3.4.1 Propriedades mecânicas e relação tensão-deformação.....	26
3.4.2 Propriedades físicas e químicas.....	27
3.5 Comportamento mecânico na flexão e padrão de fissuração.....	28
4 MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1 Materiais.....	36
4.1.1 Aglomerante	36
4.1.2 Agregado miúdo	36

4.1.3 Fibras	37
4.1.4 Adição mineral.....	37
4.1.5 Aditivo.....	38
4.1.6 Água.....	39
4.2 Métodos.....	39
4.2.1 Moldagem dos corpos de prova	40
4.2.2 Tratamento térmico por aquecimento controlado	42
4.2.3 Caracterização mecânica do compósito cimentício.....	44
4.2.4 Tenacidade.....	46
4.2.5 Análise estatística.....	46
4.2.6 Extração de fibra ou <i>pull-out</i>	49
4.2.7 Resistência mecânica da matriz cimentícia.....	51
4.2.8 Investigação microestrutural.....	51
4.2.9 Caracterização das fibras de aço	52
4.2.10 Comportamento mecânico e perfil de fissuração.....	52
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.1 Comportamento mecânico na flexão para 7 dias	54
5.2 Comportamento mecânico na flexão para 28 dias	55
5.3 Comportamento mecânico na flexão para 56 dias	57
5.4 Parâmetros do comportamento mecânico.....	59
5.4.1 Resistência residual na flexão.....	59
5.4.2 Tenacidade residual	63
5.4.3 Deflexão residual.....	66
5.5 Avaliação estatística e correlação entre as variáveis	69
5.6 Extração de fibra (pull-out)	87
5.7 Resistência mecânica da matriz cimentícia.....	92

5.8 Investigação microestrutural e avaliação da interface fibra-matriz	92
5.8.1 Fibras de aço.....	93
5.8.2 Matriz cimentícia e interface fibra-matriz	101
5.9 Estudo do incremento de desempenho mecânico com o tratamento térmico ...	106
5.10 Estudo do perfil de fissuração e correlação com o comportamento mecânico	108
6 CONCLUSÕES	115
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118
APÊNDICES	127
APÊNDICE A – CURVAS DE CARGA <i>VERSUS</i> DEFLEXÃO E CÁLCULO DOS VALORES DE TENACIDADE.....	128
APÊNDICE B – RESUMO VALORES DE TENACIDADE	165
APÊNDICE C – BANCO DE DADOS E RESULTADOS DO TRATAMENTO ESTATÍSTICO.....	167

1 INTRODUÇÃO

A resistência mecânica à compressão do concreto usado em edifícios e estruturas aumentou consideravelmente nas últimas décadas, de aproximados 40 MPa em 1980 até 150 MPa ou mais em algumas estruturas (SCRIVENER e KIRKPATRICK, 2008). Durabilidade, resistência a ambientes específicos, tenacidade e baixa porosidade, são exemplos de outras propriedades cada vez mais abordadas em pesquisas com o intuito de implementar concretos que atendam desempenhos exigentes. Nesse sentido, os concretos são classificados como concretos de alto desempenho, em inglês *high performance concrete* (HPC), quando suas propriedades são otimizadas de tal forma a ser superior àquelas obtidas por métodos convencionais e concretos de ultra-alto desempenho, em inglês *ultra high performance concrete* (UHPC), quando as propriedades são consideravelmente melhoradas (MEHTA e MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2015).

As fibras utilizadas como reforço em compósitos cimentícios são aplicadas há muitos anos, apresentam um contínuo aprimoramento (ZOLLO, 1997; BRANDT, 2008) e podem ser dos mais diversos materiais, como aço, polímero, vidro, carbono, entre outros, atuando como reforço da matriz (NAAMAN, 2003; CUROSU et al., 2017; ROTH et al., 2010; HE et al., 2017). Para concretos de ultra alto desempenho essa adição resulta em um composto com propriedades bastante otimizadas, que incluem resistência à tração e compressão, módulo de elasticidade, resistência à fissuração, tenacidade, retração e expansão térmica, dando origem aos compósitos cimentícios ou concretos de ultra alto desempenho reforçados por fibras, em inglês *ultra high performance fiber reinforced cementitious composites* ou *ultra high performance fiber reinforced concrete* (UHPFRCC ou UHPFRC). Algumas características particulares dos UHPFRCC são a resistência mecânica extremamente alta, uso de finos em sua constituição e baixa relação água-aglomerante, o que leva à possibilidade de produzir estruturas mais esbeltas e conseqüentemente redução significativa do peso (WILLE, KIM e NAAMAN, 2011; WILLE, EL-TAWIL e NAAMAN, 2014; YOO e BANTHIA, 2016).

Os concretos com calda infiltrada contendo fibras, em inglês *slurry infiltrated fibered concrete* (SIFCON) representam uma classe específica dos UHPFRCC onde as fibras

são dispostas no molde e depois uma calda cimentícia é despejada a fim de preencher os espaços restantes, formando assim um compósito denso com alto teor de fibras (LANKARD, 1984; FARNAM, et al., 2010; MEHTA e MONTEIRO, 2014). Os SIFCON diferem dos concretos convencionais principalmente por possuir uma fração de fibras em volume muito maior e matriz constituída por partículas muito finas. O compósito resultante possui excelentes propriedades simultâneas de resistência mecânica e pseudo-ductilidade (NAAMAN e HOMRICH, 1989; NAAMAN, OTTER e NAJM, 1992). As quantidades de fibras nos concretos reforçados convencionais variam de 1-3% em volume, enquanto no SIFCON as frações giram em torno de 5-30%. Em termos de propriedades mecânicas, as resistências à compressão, tração, cisalhamento e flexão são superiores, além de apresentar elevados valores de tenacidade (TUYAN, 2012; BALAJI e THIRUGNANAM, 2018). Com relação à aplicação prática, os SIFCON são empregados em diversas ocasiões como pavimentos, reparos e reforços, em estruturas que são expostas a cargas de impacto (TUYAN, 2012), obras de fortalecimento e estruturas militares resistentes à explosão, perfuração e balística (SCHNEIDER, 1992), estruturas resistentes a abalos sísmicos (NAAMAN, WIGHT e ABDU, 1987; WOOD, 2000), plataformas para reparo aeroespacial e blindagem de contenção nuclear (ELAVARASI, 2017).

As estruturas podem ser repentinamente tomadas por ações eventuais que submetem os materiais construtivos a temperaturas elevadas, como incêndios e explosões. Por isso, existe a necessidade de estudar os compósitos cimentícios em altas temperaturas (BEGLARIGALE et al., 2016). A meso e microestrutura do concreto são afetadas fortemente pelas altas temperaturas, o que gera redução drástica de sua capacidade resistente, podendo ocorrer inclusive fragmentação e desprendimento de material. Durante o aquecimento ocorre evaporação da água (livre, absorvida fisicamente, quimicamente ligada e capilar), novos produtos se formam, outros são seriamente degradados e a estrutura de poros é afetada com aumento considerável da porosidade. Tensões térmicas são introduzidas no concreto, o que causam microfissuras na matriz de cimento e na zona de transição interfacial, que se propagam por toda a estrutura à medida que a temperatura aumenta (GEORGALI e TSAKIRIDIS, 2006; PENG e HUANG, 2008; FARES et al., 2010). As propriedades mecânicas são influenciadas pela condição térmica desfavorável, de modo que as

resistências à compressão, flexão, tração na flexão e módulo de elasticidades são todos comprometidos e seguem uma tendência de queda com o aumento da temperatura (ARIOZ, 2007; SO et al., 2014). De modo geral, a incorporação de fibras ao concreto melhora seu comportamento às temperaturas elevadas, sendo que as mais utilizadas são de polipropileno e aço. A adição de fibras de polipropileno não interfere de forma significativa na resistência residual e módulo de elasticidade, entretanto implica no aumento expressivo da resistência à fragmentação devido à liberação de pressão de vapor d'água. As fibras de aço podem atuar de forma a melhorar as propriedades mecânicas, principalmente as resistências residuais, e também a resistência à fragmentação (ZHENG, LI e WANG, 2012; MA, 2015; ABDALLAH, FAN e CASHELL, 2017). Estudos atuais abordam o tema e contribuem para prever o comportamento dos concretos submetidos à altas temperaturas (CUI et al., 2018; NOVAK e KOHOUTKOVA, 2018; LIU e TAN, 2018; RUANO et al., 2018; PENG et al., 2018).

As fibras como reforço para CCRF são normalmente distribuídas de modo aleatório e em todas as direções ao longo da matriz cimentícia, para que o compósito tenha um comportamento isotrópico e constituição homogênea. Além de outros fatores, a real distribuição e orientação das fibras é influenciada pelo método de lançamento, fluidez da matriz, características das fibras (comprimento, diâmetro e forma), fração volumétrica e forma do molde (KANG et al., 2011; SVEC et al., 2014; NGUYEN et al., 2014). YOO *et al.* (2016) concluiu que uma melhor orientação e distribuição de fibras resulta em maior resistência à flexão, capacidade de deformação e tenacidade, além de perceber que o comprimento das fibras influencia o grau de dispersão e a quantidade de fibras por área unitária. SONG *et al.* (2018) inferiu que o método de lançamento e a forma de moldagem influenciam nas propriedades mecânicas como resistência a compressão e flexão. ZHANG *et al.* (2018) concluiu que o comportamento pós-fissuração está intimamente relacionado com o teor e distribuição de fibras, o que afeta positivamente o desempenho do compósito, ou seja, melhor distribuição de fibras resulta em melhor desempenho. MÍNGUEZ *et al.* (2018) concluiu que existe uma forte correlação entre o comportamento mecânico, quando submetido ao ensaio de tração na flexão, e os parâmetros geométricos das fibras (orientação, fração volumétrica e relação geométrica). Devido a relevância do tema e necessidade

de estudos, diversas outras pesquisas foram desenvolvidas com o mesmo intuito de correlacionar a distribuição e orientação de fibras com as propriedades e desempenho do CCRF (BOULEKBACHE et al., 2010; FERRARA, OZYURT e DI PRISCO, 2011; WILLE e PARRA-MONTESINOS, 2012; BLANCO et al., 2015; PLAGUÉ, DESMETTRE e CHARRON, 2017).

Diversos trabalhos abordam a distribuição de fibras de forma aleatória na matriz cimentícia, outros o tratamento térmico por imersão em ambiente aquecido. Entretanto, o tratamento térmico em CCADRF com maior concentração de fibras ao longo da região sujeita à tração, ainda são temas carentes de exploração no meio científico. Dessa forma, o objetivo desse estudo é ampliar a compreensão do comportamento mecânico à flexão de compósitos cimentícios reforçados por fibras de aço com calda infiltrada, após tratamento térmico, quando as fibras são dispostas na região mais solicitada pelos esforços de tração. Para tanto, foi realizada fundamentação teórica, bem como análise e discussão de resultados de testes recentes. Esse entendimento é necessário para melhor prever as propriedades mecânicas do CCADRF e facilitar o seu potencial de uso nas estruturas em serviço.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi analisar o comportamento mecânico de CCADRF com distribuição de fibras diferenciada, antes e após tratamento térmico.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o desempenho mecânico de CCADRF por meio do ensaio de flexão, antes e após tratamento térmico, com uso de vigas em modelo reduzido;
- Avaliar a influência da idade, do teor de fibras e do tratamento térmico, no comportamento da resistência na flexão, tenacidade e deflexão, por intermédio de análise estatística;
- Avaliar a ligação fibra-matriz por meio do ensaio de *pull-out*;
- Estudar a interface fibra-matriz por meio de microscopia digital e microscopia eletrônica de varredura;
- Estudar os perfis de fissuração resultantes dos ensaios de flexão, correlacionando-os ao comportamento mecânico;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

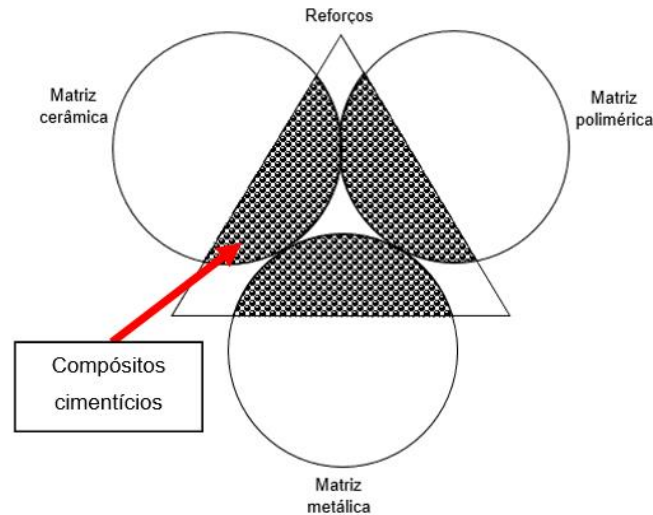
3.1 Compósitos cimentícios

Os materiais sólidos comumente são classificados como metálicos, cerâmicos ou poliméricos, sendo que cada um deles possui características particulares. Quando associados um ou mais materiais, originam-se os compósitos com propriedades sinérgicas entre seus constituintes, resultando em características especiais. De modo geral, para se conseguir esse efeito conjunto é necessária uma matriz contínua que aglutina o reforço, normalmente filamentos ou fibras extremamente resistentes. Muitas vezes os compósitos estão associados à tecnologia de ponta como satélites, aeronaves, biomateriais, pontes, telescópios, geradores eólicos, entretanto a origem dessa classe remota há muitos e muitos anos, tendo em vista que a madeira, ossos e músculos são exemplos de eficientes compósitos naturais (PARDINI e LEVY NETO, 2016).

Os compósitos cimentícios, por sua vez, representam todos aqueles materiais nos quais uma matriz cimentícia é reforçada por outros constituintes. Exemplos clássicos são o concreto armado, o concreto reforçado por fibras, o concreto polimérico, etc., nos quais são introduzidos reforços a fim de originar propriedades específicas. O próprio concreto em si já faz parte da classe dos compósitos, uma vez que é uma estrutura constituída por diversas outras (cimento, areia, brita, adições e aditivos). Como os materiais utilizados no concreto possui natureza cerâmica, então pode-se dizer que os compósitos cimentícios possuem matriz cerâmica. Os reforços utilizados são distintos e podem ser poliméricos, aço, carbono, fibra de vidro, etc. A figura 1 represente as combinações entre matriz e reforços, bem como identifica os compósitos cimentícios (CALLISTER e RETHWISCH, 2013; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

No presente trabalho adotou-se o termo compósitos por ser mais abrangente e representar melhor o material em estudo. Assim, as terminologias entre concretos e compósitos cimentícios aqui se mesclam, lembrando que os concretos apresentam em sua constituição agregados graúdos como pedrisco, brita, ou ainda outro que possua granulometria superior.

Figura 1 – Representação esquemática das combinações entre matriz e reforço, bem como indicação dos compósitos cimentícios.



Fonte: Adaptado de Pardini e Levy Neto (2016).

3.2 Compósito cimentício reforçado com fibras

O concreto reforçado por fibras (CRF) é um material compósito no qual fibras curtas são inseridas ao longo da matriz cimentícia, atuando assim como reforço. Por isso, pode também ser chamado de compósito cimentício reforçado com fibras (CCRF). As propriedades do CCRF são influenciadas por diversos fatores entre eles a geometria, fator de forma, teor, orientação e distribuição de fibras, resistência mecânica e dimensões máximas dos agregados da matriz, interface fibra-matriz e dimensões, geometria e metodologia de ensaio dos corpos de prova. O comportamento mecânico está relacionada à compressão, tração direta uniaxial, tração indireta por compressão diametral, tração indireta por flexão, corte e torção, fadiga, impacto, abrasão e fluência, enquanto o comportamento químico e físico é inferido por fenômenos como retração, durabilidade, gelo-degelo, carbonatação, corrosão das fibras e exposição ao fogo (SARZALEJO et al., 2009). Neste trabalho, optou-se por expor apenas aquelas propriedades mais importantes e que possuem relação estreita com a metodologia proposta.

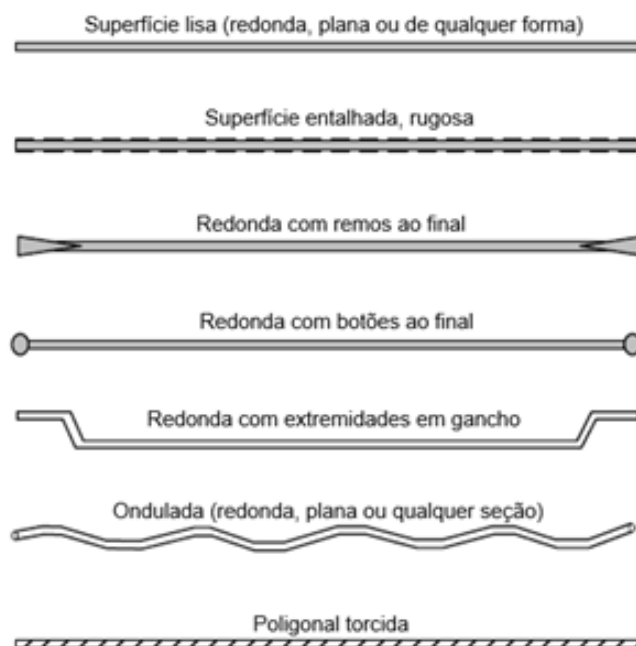
3.2.1 Fibras

Segundo NAAMAN (2003) as fibras utilizadas como reforço para concreto podem ser classificadas de diferentes maneiras:

- De acordo com o material da fibra: orgânico natural (celulose, sisal, bambu, etc.), mineral natural (amianto, lã de rocha) ou industrializadas (aço, titânio, vidro, carbono, polímeros ou sintéticos).
- Segundo suas propriedades físicas e químicas: densidade, rugosidade superficial, estabilidade química, não reatividade com a matriz de cimento, resistência ao fogo ou inflamabilidade, etc.
- Conforme suas propriedades mecânicas: resistência à tração, modulo de elasticidade, rigidez, ductilidade, alongamento até a falha, propriedade de adesão superficial, etc.

As fibras de aço podem apresentar superfície lisa ou corrugada, formas retilíneas ou com ancoragem nas extremidades e são caracterizadas geometricamente pela forma, pelo comprimento (L) e pelo seu diâmetro (D). A figura 2 mostra os perfis típicos para fibras de aço.

Figura 2 – Perfis típicos de fibras de aço usadas em concreto.



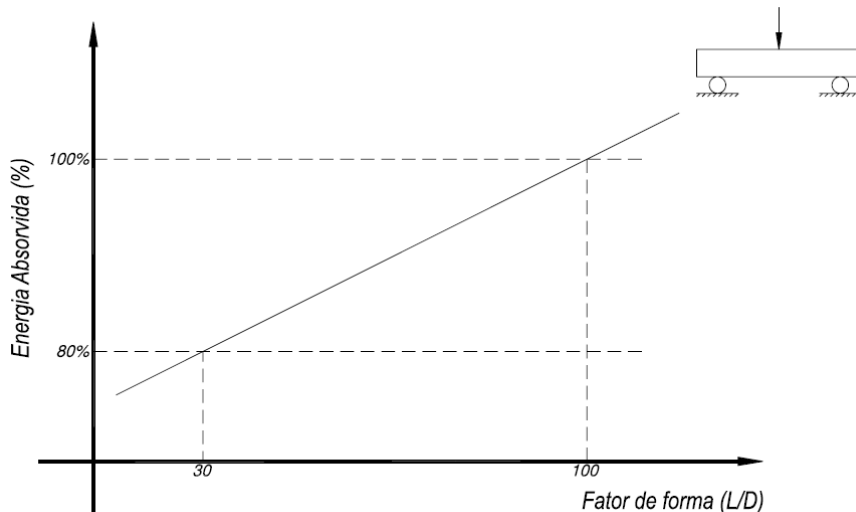
Fonte: Adaptado de Naaman (2003).

Uma relação importante entre o comprimento e o diâmetro é o fator de forma ou índice de esbeltez (λ), que representa a esbeltez da fibra, dado por:

$$\lambda = \frac{L}{D}$$

Para um mesmo comprimento, quanto maior o fator de forma, menor será o diâmetro e conseqüentemente a fibra será mais esbelta. A figura 3 mostra que o fator de forma está intimamente relacionado com a tenacidade ou energia absorvida pelo compósito, à medida que a variação entre as propriedades ocorre de forma conjunta com uma relação diretamente proporcional (SARZALEJO et al., 2009).

Figura 3 – Energia absorvida pelo compósito em função do fator de forma (L/D) para o ensaio de flexão.



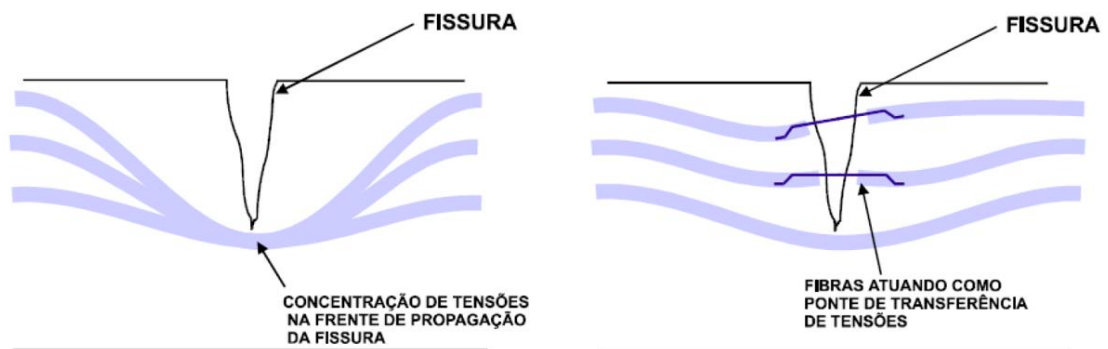
Fonte: Sarzalejo et al. (2009).

3.2.2 Interação fibra-matriz

O comportamento diferenciado do CCRF é resultado da interação entre fibras e matriz cimentícia. As fissuras no compósito podem proporcionar uma barreira para a propagação de tensões de tração, que são indicadas pelas linhas de tensão, conforme figura 4. O desvio das linhas de tensão irá causar concentrações de tensões nas extremidades da fissura, que ao ultrapassar o valor de tensão crítica, haverá a ruptura do material. Quando a fissura atinge um comprimento crítico geralmente se tem a ruptura abrupta do material (comportamento frágil), dessa forma não possui nenhuma resistência mecânica residual. Ao utilizar fibras que apresentam resistência mecânica

e módulo de elasticidade ideais em composição adequada, as fibras atuam como meio de transferência de tensões pelas fissuras, evitando assim concentrações de tensões e possíveis rupturas. Dessa forma, o compósito passa a ter um comportamento pseudo-dúctil ou não frágil, promovendo uma menor fissuração (ZOLLO, 1997; BRANDT, 2008; FIGUEIREDO, 2011)

Figura 4 – Mecanismo de transferência de tensões em compósitos cimentícios reforçados por fibras.

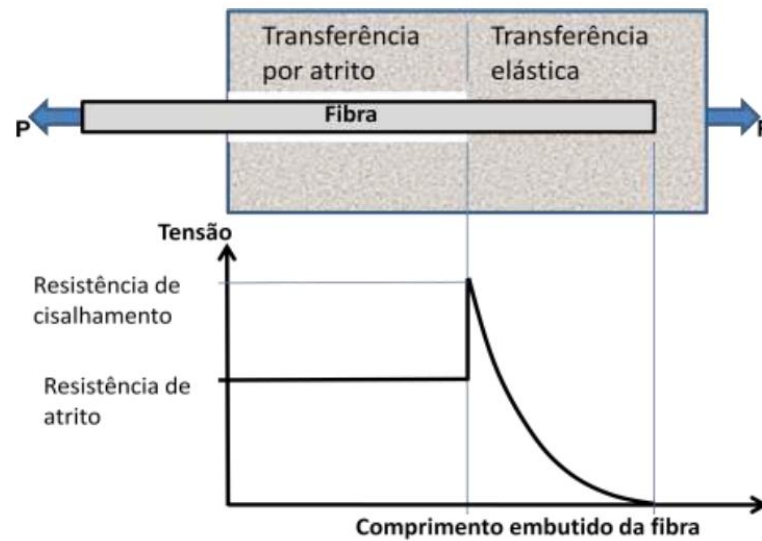


Fonte: Adaptado de Nunes, Tanesi e Figueiredo (1997).

O deslocamento da fibra provoca seu escorregamento a partir da borda da fissura, que levará ao arrancamento da fibra. A tensão de atrito é regular ao longo da fibra, ao mesmo tempo que a tensão de cisalhamento elástico mantém uma distribuição intrínseca aos materiais em contato, de acordo com o esquema apresentado na figura 5. Conforme a fibra é arrancada da matriz durante o carregamento, ocorre o aumento da transferência de tensão por atrito em relação à elástica, o comprimento embutido diminui e a carga P resistida pela fibra reduz significativamente (BENTUR e MINDESS, 1990; FIGUEIREDO, 2011).

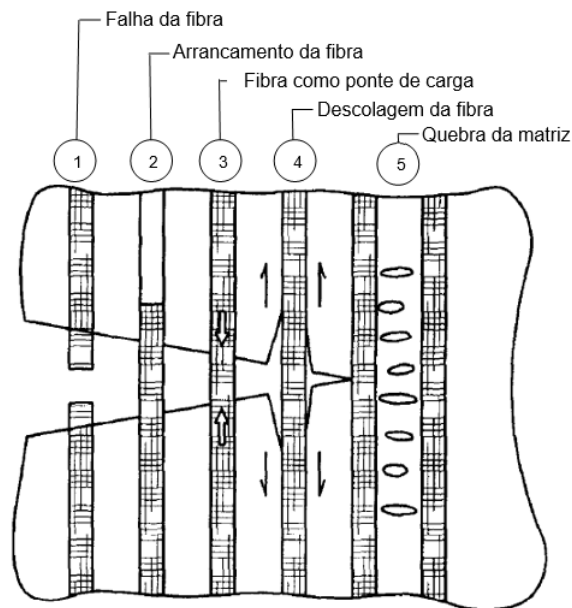
Segundo ZOLLO (1996) o mecanismo de absorção de energia durante as deformações impostas ao CCRF é compreendido por cinco etapas, que podem ocorrer em conjunto ao longo do compósito (figura 6), sendo elas a falha da fibra, o arrancamento da fibra, a fibra como ponte de carga, a descolagem da fibra e a quebra da matriz. Todos esses processos geram absorção de energia e contribuem para o comportamento pseudo-ductilidade e elevada tenacidade.

Figura 5 – Configuração esquemática da distribuição de tensões ao longo de uma fibra de aço.



Fonte: Bentur e Mindess (1990).

Figura 6 – Mecanismo de absorção de energia.



Fonte: Adaptado de Zollo (1996).

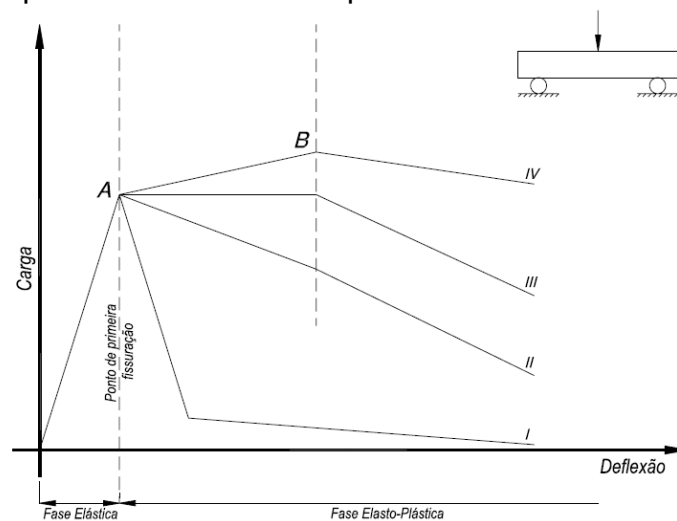
3.2.3 Resistência à flexão

A resistência à flexão apresenta maior influência da adição de fibras se comparado à tração direta ou compressão. Deste modo, é importante conhecer o comportamento do CCRF submetido a esforços de flexão (BENTUR e MINDESS, 1990).

As curvas de carga *versus* deflexão ou carga *versus* abertura de fissura ilustram o comportamento ou graus de ductilidade e tenacidade adquiridos pelo CCRF submetido ao ensaio de flexão, conforme figura 7. Essa tendência se dá pelas características mecânicas, geométricas e fração volumétrica das fibras (SARZALEJO et al., 2009).

A atuação de cargas moderadas e inferiores em relação à ruptura do compósito provoca um comportamento elástico no material, o que faz com que não ocorra fissuração no corpo de prova ao longo do ensaio de flexão, que independem da qualidade, quantidade ou presença de fibras. Entretanto, comportamentos variados são observados quando se dá continuidade ao ensaio, à medida que se eleva a carga a partir do ponto A (ponto de primeira fissuração). A curva I representa um comportamento frágil de um compósito sem reforço, onde a capacidade portante cai rapidamente. A tendência do CCRF de absorver certa quantidade de energia durante as deformações é observado na curva II, onde o colapso acontece de maneira gradual (comportamento suavizado ou *strain-softening*). A curva III é característica de um material dúctil, que possui capacidade de suportar um deslocamento sob carga constante antes do colapso, que ocorre de maneira lenta (comportamento plástico). Por fim, a curva IV representa um comportamento enrijecido (ou *strain-hardening*), isto é, o compósito possui a propriedade de resistir a cargas maiores durante extensas deformações, além do ponto de primeira fissuração e antes do ponto de carga máxima (SARZALEJO et al., 2009).

Figura 7 – Comportamento do CCRF quando submetido ao ensaio de flexão.



Fonte: Sarzalejo et al. (2009).

3.2.4 Tenacidade

Segundo Metha e Monteiro (2014), a maior vantagem do CRF são os ganhos de tenacidade à flexão, que representa a energia total absorvida até a ruptura durante ensaio à flexão. Existem vários métodos disponíveis para avaliar a tenacidade dos CCRF, algumas normalizadas outras eminentemente experimentais. A tabela 1 aborda os principais métodos utilizados e respectivas normas. De modo geral, esses métodos utilizam ensaio à flexão e corpos de prova prismáticos. A tenacidade é calculada utilizando a área abaixo da curva carga *versus* deformação e adoção de pontos notáveis (carga, deformação) na mesma curva. Cada norma adota pontos notáveis diferentes e possui limites de deformações distintos para as análises.

Tabela 1 – Métodos para avaliar a tenacidade de CCRF.

Norma ou recomendação	Forma do CP	Dimensões do CP	Parâmetros analisados	Avaliação da tenacidade
Norma americana ASTM C1550 (<i>American Society for Testing and Materials</i>)	Painel circular	D = 800 H = 75	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Relação entre a energia absorvida para valores solicitados da deflexão central
Norma japonesa JSCE SF-4 (<i>Japan Society of Civil Engineers</i>)	Prisma	b = 100 ou 150 h = 100 ou 150 L = 300 ou 450 c = 380 ou 500	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Energia absorvida até uma deflexão equivalente a L/150. Fator de tenacidade para uma deflexão equivalente a L/150
Norma Europeia EFNARC (<i>European Federation of Producers and Applicators of specialist Products for Structures</i>)	Prisma	b = 125 h = 75 L = 450 c = 600	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Resistência residual para valores de deflexão de 0,5mm a 4mm
	Placa	b = 600 h = 100 L = 500 x 500 c = 600	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Energia absorvida até uma deflexão de 25mm
FIB 2010 (<i>Fédération Internationale Du Béton</i>)	Prisma	b = 150 h = 150 L = 500 c = 550	Carga x Abertura de fissura medida no meio do vão	Limite de proporcionalidade (LOP), Resistências residuais para valores de abertura de fissura de 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 mm
ASTM C1609 (<i>American Society for Testing and Materials</i>)	Prisma	b = 150 h = 150 L = 450 c = 500	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Resistência de pico, resistências residuais para valores de deflexão de L/600 e L/150

D = diâmetro; H = espessura; b = largura; h = altura; L = distância entre apoios; c = comprimento

Fonte: Adaptado de Arif (2014).

De acordo com Arif (2014), a medida da tenacidade é influenciada por vários fatores, inerentes à condição do ensaio realizado. Os principais fatores são: tipo da máquina de ensaio (*open loop* ou *closed loop*), tamanho e geometria do corpo de prova, resistência das fibras, resistência da matriz, teor de fibras, espaçamento das fibras, configuração de ensaio, taxa de carregamento, produção dos corpos de prova (moldagem), configuração de carga (concentrada ou linear), temperatura durante o ensaio, tipo de controle de carga e deslocamento (força, deflexão, abertura de fissura), tipo de equipamento de medição (LVDT - transformador diferencial variável linear; *Clip Gage*) e localização de dispositivo de medição da deflexão.

3.3 Compósito cimentício de alto desempenho reforçado por fibras

Os concretos ou compósitos cimentícios de alto desempenho reforçados por fibras (CCADRF) possuem propriedades mecânicas melhoradas, como resistência mecânica extremamente alta, se comparado ao concreto convencional, o que favorece a produção de estruturas mais esbeltas, conforme figura 8 (RUSSELL, 1999; YOO e BANTHIA, 2016; SINGH et al., 2017; FANTILLI et al., 2018).

Figura 8 – Estruturas típicas onde são necessários compósitos cimentícios de alto desempenho.



Fonte: Adaptado de Naaman (2011).

Segundo Metha e Monteiro (2014), os compósitos cimentícios de ultra alto desempenho reforçados por fibras (UHPFRCC) representam uma nova geração de compósitos cimentícios, nos quais a resistência mecânica, tenacidade e durabilidade são consideravelmente melhoradas. O SIFCON (*slurry infiltrated fibered concrete*)

constitui um UHPFRCC e possui potencial para novas aplicações. Além disso, Naaman (2011) sugere que não existe um consenso entre os pesquisadores quanto ao limite de resistência ou durabilidade que faz uma matriz de cimento ter “ultra alto desempenho” e diz ser razoável permitir um alcance mais amplo para o tema.

Yoo e Banthia (2016) revisaram o estado-da-arte do UHPFRCC e abordaram seus antecedentes históricos. O desenvolvimento das pastas de cimento iniciou-se na década de 1970, sendo obtida uma pasta com resistência à compressão de aproximadamente 240 MPa, à temperatura de 25°C e após 180 dias da moldagem (YUDENFREUND, ODLER e BRUNAUER, 1972). Em contrapartida, na mesma década, obteve-se uma pasta de cimento com quase zero de porosidade e uma resistência à compressão aproximadamente de 510 MPa, com cura a quente a 250°C e pressão de 50MPa (ROY, GOUDA e BOBROWSKY, 1972). No início dos anos 80 com o desenvolvimento de materiais pozolânicos e aditivos superplastificantes foram desenvolvidos dois tipos de concretos de ultra alta resistência e baixa porosidade. O concreto densificado com partículas pequenas mostrou resistência à compressão na faixa de 120 a 270 MPa, resultado da densificação da matriz cimentícia com uso de partículas ultrafinas e baixo teor de água-cimento. As pastas sem defeitos de macro têm por objetivo remover falhas macroscópicas durante a preparação, deste modo as pastas obtiveram resistência à compressão maior que 200 MPa e resistência à flexão variando de 60 a 70 MPa (BACHE, 1981; BIRCHALL, HOWARD e KENDALL, 1981). Em meados da década de 1990 o concreto de pós reativos (CPR), precursor do CUADRF, foi desenvolvido a fim de obter resistência ultra alta da matriz cimentícia, sendo que o tamanho dos materiais granulares foi otimizado. Além disso, foram utilizadas fibras curtas de aço para melhorar a dureza da matriz (comprimento de 13mm, diâmetro de 0,15mm e 1,5 - 3% em volume) e utilizada cura térmica sob pressão (CHEYREZY, MARET e FROUIN, 1995; RICHARD e CHEYREZY, 1995).

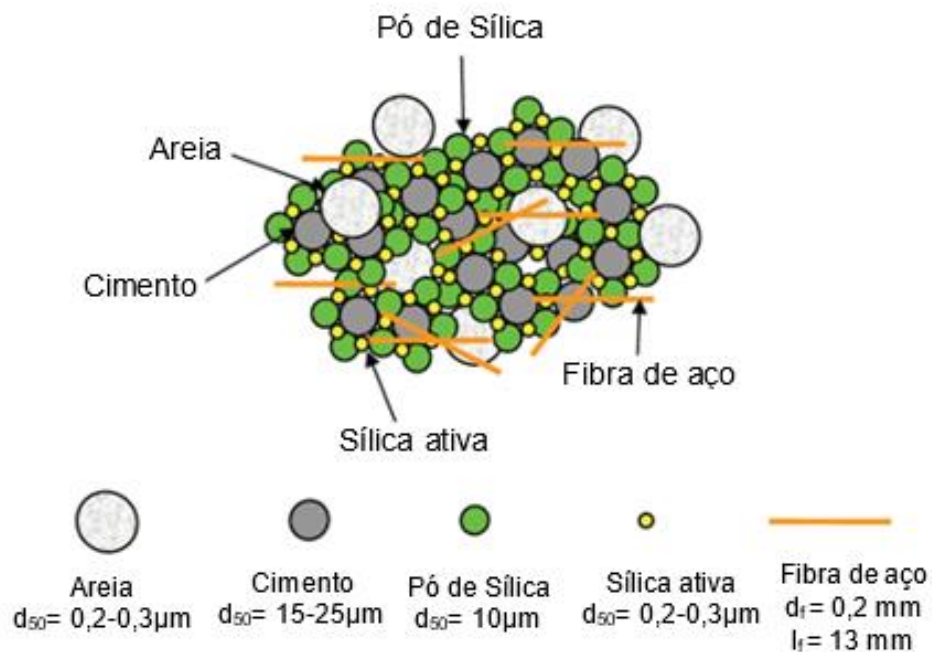
3.3.1 Materiais, dosagens e condições de cura

De modo geral, o UHPFRCC possui características com frações de elevado volume de fibras de aço (cerca de 2% ou mais em função do volume), uso de baixa relação água-aglomerante (normalmente em torno de 0,2), com misturas finas e tratamento térmico a 90°C durante a cura. É composto principalmente por cimento, sílica ativa,

pó de enchimento (fíler), fibras de aço e superplastificante. (RICHARD e CHEYREZY, 1995; YOO e BANTHIA, 2016).

A figura 9 mostra os tamanhos médios das partículas dos componentes utilizados no UHPFRCC, enquanto a figura 10 identifica as microestruturas correspondentes ao concreto convencional, concreto de alto desempenho e UHPFRCC. Os tamanhos dos componentes foram determinados com base na teoria da densidade de empacotamento e nos resultados de experimentos relacionados com o efeito do tamanho das partículas dos ingredientes no processo reológico e mecânico (RICHARD e CHEYREZY, 1995; YOO, 2014). Além disso, Yoo (2014) sugere uma proporção otimizada de mistura, em peso de cimento, conforme tabela 2.

Figura 9 – Diâmetro médio das partículas dos constituintes no UHPFRCC.

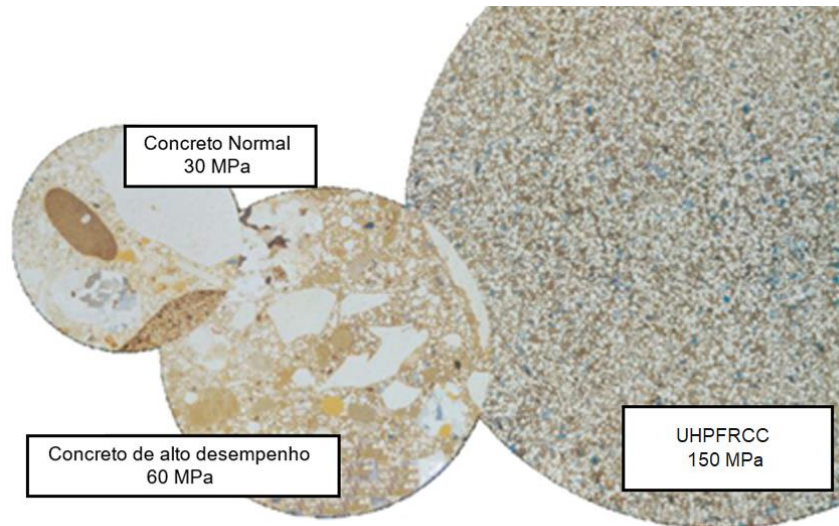


Fonte: Adaptado de Yoo (2014).

Uma maneira simples de obter resistência à compressão elevada foi proposta por Wille et. al. (2011), sem qualquer tratamento térmico ou pressão aplicados durante a cura, usando materiais disponíveis comercialmente. Destaca-se que a resistência à compressão está diretamente relacionada ao fator água-cimento e propôs uma relação areia-cimento ótima de 1,4 quando se utiliza um tamanho máximo de grão de 0,8 mm, uma quantidade ótima de sílica ativa (em torno de 25% em peso de cimento), redutor de água de alta amplitude (variando de 1,4 a 2,4 % em peso de cimento) e

uma fração ótima de água-cimento (de cerca de 0,22). Deste modo obteve-se um UHPFRCC altamente dúctil, sem a necessidade de qualquer tipo de tratamento adicional.

Figura 10 – Propriedades microestruturais do concreto convencional, concreto de alto desempenho e UHPFRCC.



Fonte: Adaptado de Yoo (2014).

Tabela 2 – Proporção de mistura para UHPFRCC.

Materiais e proporções						
Cimento : água : areia : sílica ativa : pó de sílica : superplastificante : fibra de aço						
1 : 0.25 : 1.1 : 0.25 : 0.3 : 0.016 : 2%						

Fonte: Adaptado de Yoo (2014).

3.3.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas do UHPFRCC endurecido como resistência à compressão, flexão, tração, cisalhamento e arrancamento de fibras são altamente influenciáveis por diversos fatores, sendo eles o tipo de materiais cimentícios, condições de cura, agregado graúdo e aditivos, orientação das fibras, tamanho do corpo-de-prova, taxa de carregamento, geometria, comprimento e volume das fibras (SCHMIDT e FEHLING, 2005; JSCE, 2006).

Segundo Yoo (2014) o UHPFRCC fornece resistência mecânica e módulo de elasticidade substancialmente mais elevados do que o concreto convencional ou o CRF, conforme tabela 3. A resistência à compressão é 8 vezes maior se comparado ao concreto convencional e cerca de 5 vezes maior do que o CRF. A resistência à flexão é aquela que apresenta maior diferença, aproximadamente 15 vezes maior do que o concreto convencional e 5 vezes mais resistente se comparado ao CRF. Além disso, apresenta modo de falha dúctil.

Tabela 3 – Resumo das propriedades mecânicas de vários tipos de concreto.

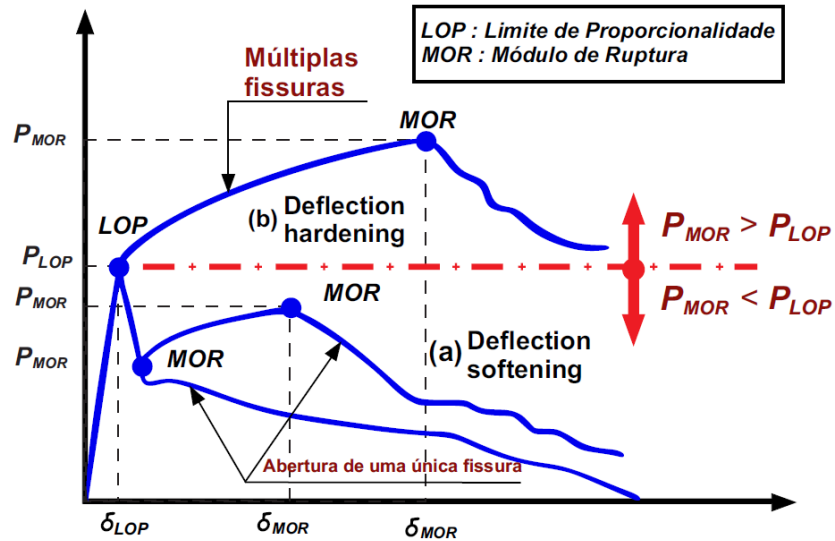
Propriedades	Concreto Convencional	CRF	UHPFRCC
Resistência à compressão	21-28 MPa	30-50 MPa	150-220 MPa
Resistência à flexão	1-3 MPa	5-15 MPa	35-50 MPa
Resistência à tração	2-3 MPa	4-8 MPa	8-16 MPa
Módulo de elasticidade	21-35 GPa	30-40 GPa	45-55 GPa
Coefficiente de Poisson	0,17-0,22	0,17-0,22	0,14-0,22
Falha	Frágil	Quase-frágil	Dúctil

Fonte: Adaptado de Yoo (2014).

Segundo Kim, Naaman e El-Tawil (2008), o comportamento à flexão dos compósitos cimentícios reforçados por fibras (CCRF) geralmente é classificado como *deflection-softening* (comportamento suavizado) ou *deflection-hardening* (comportamento enrijecido), conforme as curvas (a) e (b) da figura 11. Um comportamento de *deflection-hardening* gera uma maior capacidade de carga após a primeira fissura, se comparado ao concreto convencional ou ao compósito cimentício que apresenta comportamento suavizado. O ponto de primeira fissuração é definido como aquele onde a não linearidade na curva carga-deflexão se torna evidente. Este ponto é chamado de limite de proporcionalidade (LOP) de acordo com a ASTM C 1018-97. O módulo de ruptura (MOR) é definido como o ponto em que o comportamento suavizado começa a ocorrer após o ponto LOP.

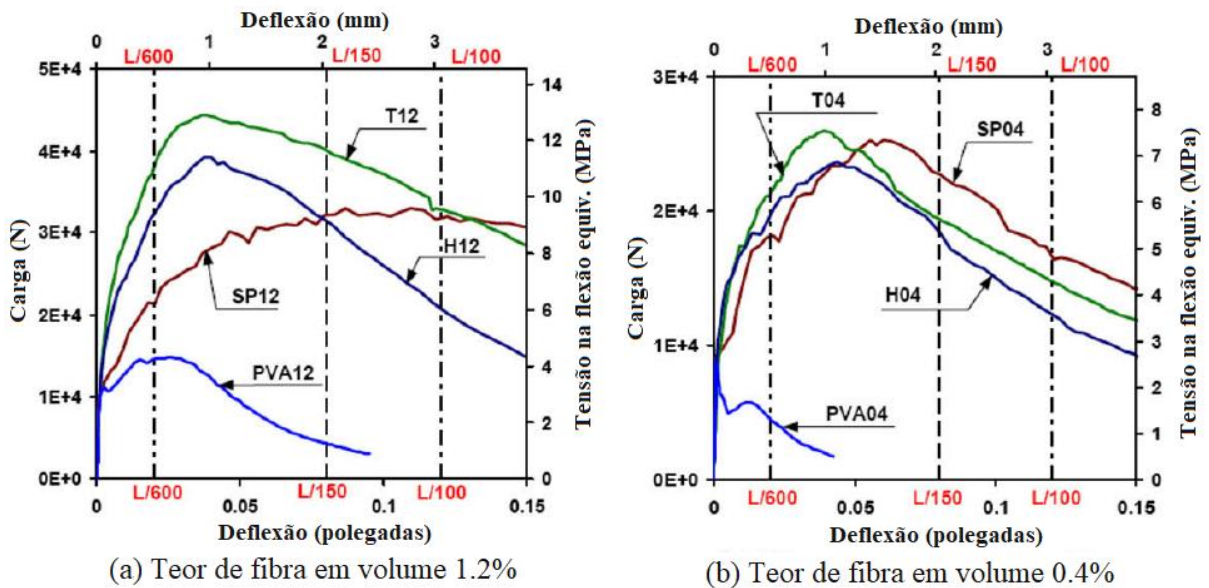
A figura 12 ilustra resultados obtidos por Kim, Naaman e El-Tawil (2008) para ensaio de flexão. Foram utilizadas vigas com quatro tipos diferentes de fibras, contendo (a) 1,2 % e (b) 0,4 % de fibras em função do volume (T – fibra de aço Torex®; H – fibra de aço ancorada de alta resistência; SP – fibra polimérica Spectra®; PVA – fibra polimérica de PVA).

Figura 11 – Comportamento à flexão de CCRF.



Fonte: Adaptado de Kim, Naaman e El-Tawil (2008).

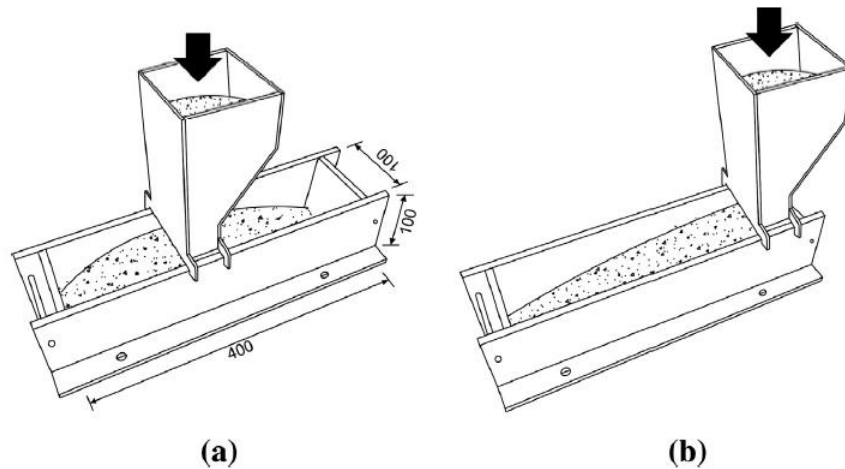
Figura 12 – Resultados para testes de flexão com resistência média da matriz.



Fonte: Adaptado de Kim, Naaman e El-Tawil (2008).

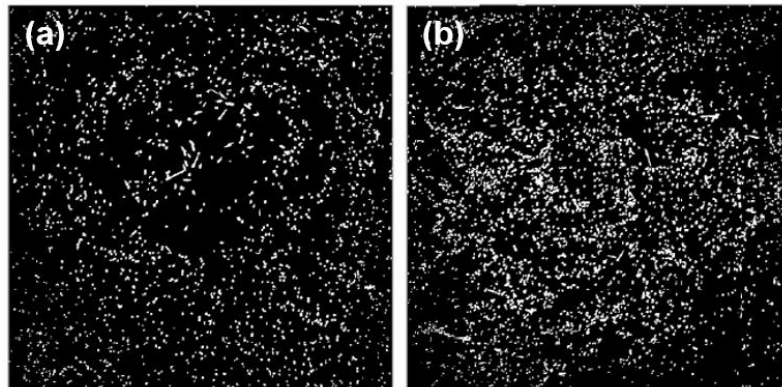
A distribuição e orientação das fibras afeta de forma decisiva o comportamento mecânico dos CCRF. As figuras 14-a e 14-b mostram as distribuições de fibras em uma seção transversal de uma viga, por meio de imagens binárias, e correspondem aos métodos de lançamento representados na figura 13-a e 13-b, respectivamente.

Figura 13 – Dois métodos de lançamento; (a) lançamento de compósito pelo centro e (b) lançamento de compósito na extremidade.



Fonte: Adaptado de Yoo, Kang e Yoon (2014).

Figura 14 – Imagens binárias transformadas da orientação e dispersão de fibras no centro da viga de UHPFRCC com (a) lançamento pela extremidade e (b) lançamento pelo centro.

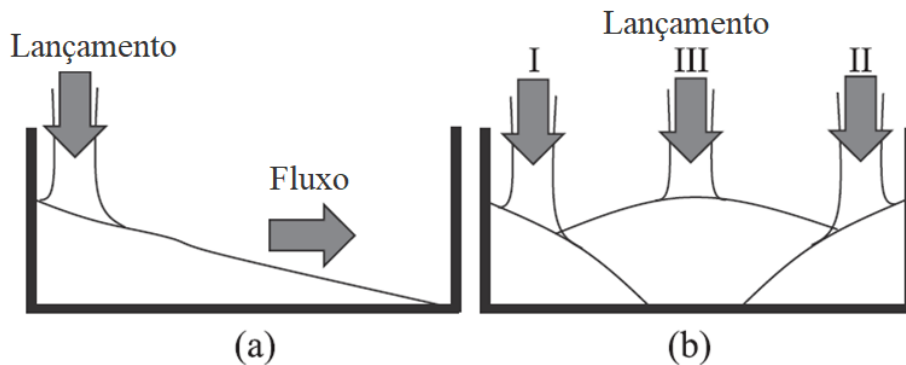


Fonte: Adaptado de Yoo, Kang e Yoon (2014).

Yoo *et al.* (2016) investigou a orientação de fibras ao longo da matriz cimentícia de UHPFRCC e correlacionou os resultados ao comportamento à flexão. Foram utilizados dois métodos de lançamento do compósito nos moldes, a fim de se obter diferentes distribuições de fibras. O primeiro (figura 15-a) consiste em lançar o compósito em uma das extremidades e deixá-lo fluir ao longo do molde. No segundo (figura 15-b), o concreto foi lançado por etapas, previamente nas extremidades do molde e por fim no centro. Foram utilizados dois tamanhos de moldes para o estudo, grande (L) e médio (M). A figura 16 mostra as curvas para o ensaio de flexão das vigas L1 (tamanho grande, método 1), L2 (tamanho grande, método 2), M1 (tamanho médio, método 1) e M2 (tamanho médio, método 2). Observa-se que, para o mesmo tamanho

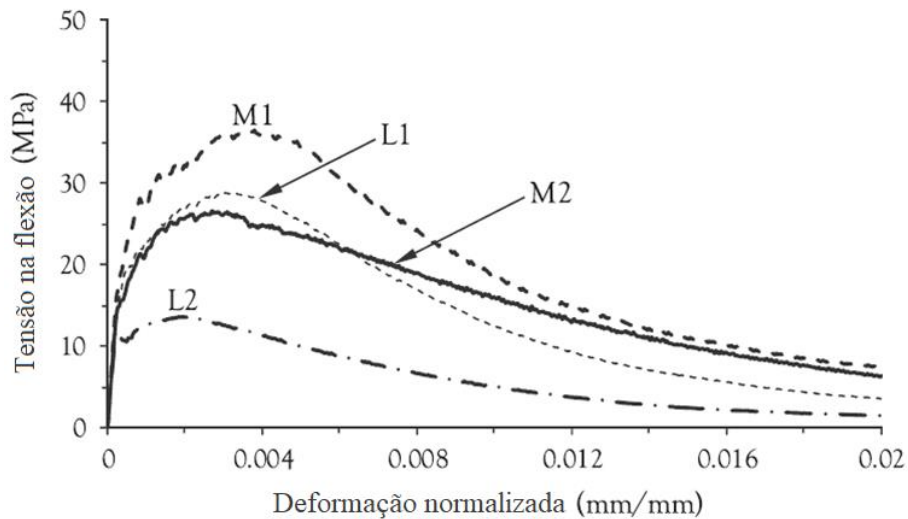
de corpo de prova, maiores resistências à flexão foram obtidas com uso do primeiro método de lançamento, consequência do melhor alinhamento de fibras na direção da carga de tração e um maior número de fibras por unidade de área. Além disso, o uso de moldes menores proporciona melhor orientação das fibras, levando a um maior número de fibras por unidade de área, independentemente do método de lançamento.

Figura 15 – Métodos de lançamento de concreto; (a) em uma das extremidades e (b) em vários locais ao longo do molde.



Fonte: Adaptado de Yoo *et al.* (2016).

Figura 16 – Curvas tensão de flexão média *versus* deflexão normalizada para vigas submetidas a carregamento quase-estático.



Fonte: Adaptado de Yoo *et al.* (2016).

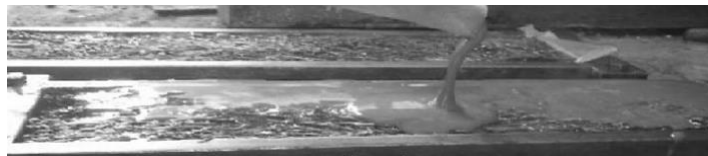
3.3.3 Concreto contendo fibras com calda infiltrada (SIFCON)

O *slurry infiltrated fibered concrete* (SIFCON) ou concreto contendo fibras com calda infiltrada foi desenvolvido na década de 1980, com a incorporação de grandes

quantidades de fibras de aço em compósitos a base de cimento (LANKARD, 1984; NAAMAN e HOMRICH, 1989).

Segundo Wood (2000), o SIFCON é semelhante ao concreto reforçado por fibras (CRF), pois possui uma matriz cimentícia e fibras discretas ao longo de toda sua estrutura. A fração de volume de fibras ou porcentagem volumétrica de fibras (V_f) do CRF tradicional é limitada pela capacidade de misturar efetivamente as fibras no concreto fresco. Isso limita o volume de fibras entre 1% a 3%, dependendo do tipo de fibra utilizada e da trabalhabilidade necessária da mistura. Entretanto, o SIFCON é produzido com fração de fibras cerca de 5% a 30%. O método de produção do SIFCON é diferenciado do convencional. Primeiramente as fibras são adicionadas nos moldes com uma distribuição aleatória e em seguida uma argamassa fluida é despejada para penetrar através da rede de fibras, conforme figura 17 (LANKARD, 1984).

Figura 17 – Método de moldagem de corpos de provas SIFCON.



Fonte: Adaptado de Beglarigale *et al.* (2016).

No SIFCON a argamassa de preenchimento deve ser fina o suficiente para infiltrar na malha de fibras e preencher os vazios existentes. Dessa forma, o agregado miúdo utilizado, normalmente areia, deve ter uma dimensão máxima compatível e sugere-se o uso de grãos com no máximo 150 μm . É importante nesse método utilizar o adensamento mecânico por meio de mesa vibratória para ajudar na distribuição da argamassa. O volume de fibra depende do tipo de fibra (comprimento, diâmetro e fator de forma) e do esforço de adensamento utilizado. Fibras menores ou mais curtas compactam mais densamente que fibras mais longas e maiores volumes de fibras podem ser alcançados com o acréscimo do tempo vibração no adensamento (WOOD, 2000; GILANI, 2007). A figura 18 representa um corpo de prova de SIFCON onde a argamassa não infiltrou por completo e também pode-se observar a densa rede de fibras. De acordo com Farnam *et al.* (2010) o SIFCON é um compósito cimentício especial de alto desempenho, que possui elevados teores de fibras e propriedades

mecânicas distintas, como alta ductilidade, resistência à tração elevada e matriz cimentícia de alta resistência. Com relação às propriedades mecânicas, Tuyan e Yazici (2012) esclarecem que o SIFCON é um material compósito de alta performance, que possui resistência à compressão, à tração, ao cisalhamento e à flexão superiores, com excelentes valores de absorção de energia.

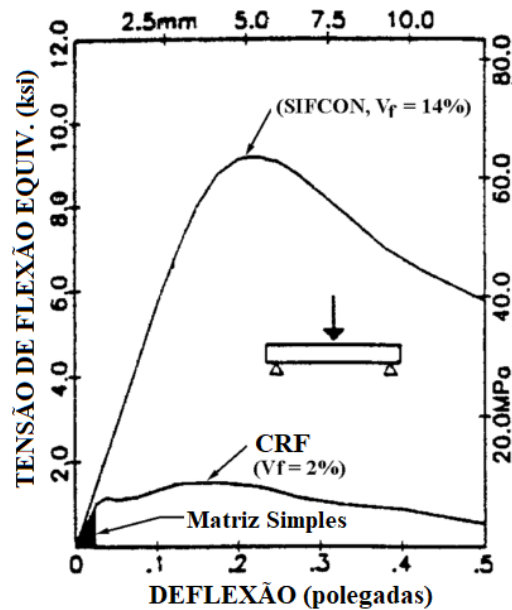
Figura 18 – Exemplar de SIFCON após a moldagem.



Fonte: Gilani (2007).

Naaman, Wight e Abdou (1987) avaliaram o comportamento do SIFCON submetido a ensaios de flexão três pontos e concluíram que os valores de tensão máxima são bem maiores do que aqueles obtidos para o concreto reforçado com fibras tradicional (figura 19). O SIFCON atingiu aproximados 60 MPa na flexão, enquanto o CRF permaneceu em torno de 10 MPa. Ficou evidente que o compósito absorveu muito mais energia durante as deformações, fato este comprovado pela área abaixo da curva tensão *versus* deflexão, possuindo assim ótimos níveis de tenacidade.

Figura 19 – Comportamento à flexão do concreto convencional, CRF e SIFCON.



Fonte: Adaptado de Naaman, Wight e Abdou (1987).

As fibras utilizadas normalmente são de aço, mas outros materiais podem ser empregados. A matriz é uma argamassa de cimento, contendo sílica ativa ou outra adição mineral. A utilização de superplastificante é recomendada, a fim de melhorar a trabalhabilidade e conferir um efeito de “calda” à mistura (WOOD, 2000; GILANI, 2007). Beglarigale *et al.* (2016) sugere uma relação água - materiais cimentícios de 0,30; sílica ativa - cimento de 0,20; e areia - materiais cimentícios de 1,23.

3.3.4 Extração de fibra ou *pull-out*

Diversas tentativas são realizadas no sentido de avaliar a interação fibra-matriz e estimar essa ligação por meio de investigações experimentais. Um dos métodos mais utilizados é a extração de fibra única ou *pull-out* (WON, LEE e LEE, 2015; ISLA, RUANO e LUCCIONI, 2015; BEGLARIGALE e YAZICI, 2015; NIEUWOUDT e BOSHOFF, 2017; DENG *et al.*, 2017; ABDALLAH, FAN e CASHELL, 2018; CHUN e YOO, 2019; HOU *et al.*, 2019).

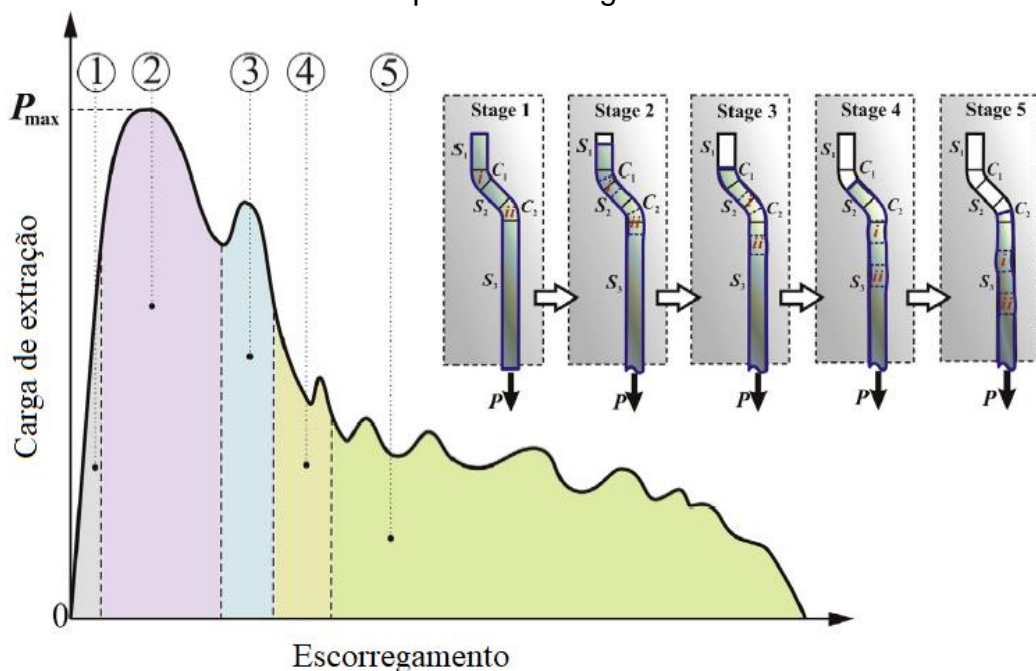
A metodologia consiste em extrair uma única fibra da matriz em estudo, medindo de forma contínua a carga utilizada e o deslocamento. O resultado desse ensaio é representado por meio da curva carga *versus* deslocamento, de forma que cada tipo de fibra gera uma curva característica. A figura 20 mostra a curva de *pull-out* para fibra com extremidade em gancho e os respectivos estágios de extração de fibra. Segundo

Deng *et al.* (2018), cada estágio representa uma condição específica e pode ser relacionado à curva de *pull-out*, conforme a seguir:

Estágio 1: Estágio elástico, onde a ligação fibra-matriz é parcialmente rompida. Esse estágio considera a parte elástica e a porção não linear da curva, antes que a fibra perca a ligação com a matriz e inicie o movimento de extração. Os dutos curvos (C_1 e C_2) coincidem com os seguimentos iniciais (i e ii) do gancho. Essa componente representa apenas a menor parte de toda a extração de fibra.

Estágio 2: Estágio da primeira deformação plástica. Após a fibra ter perdido completamente a ligação, os dutos i e ii começam a entrar nos dutos retos S_2 e S_3 , respectivamente, e os segmentos da fibra nos dutos retilíneos S_1 e S_2 começam a entrar nos dutos curvos. Assim, esses seguimentos da fibra são progressivamente submetidos a flexões e deformações plásticas, levando a um aumento substancial da carga de extração. A carga máxima de extração é sempre alcançada quando o deslizamento está entre 0,5mm e 1,5mm.

Figura 20 – Curva típica para o ensaio de extração de fibra ou *pull-out*, com respectivos estágios.



Fonte: Adaptado de Deng *et al.* (2018).

Estágio 3: Segundo estágio de deformação plástica. Após alcançar o valor máximo, a carga de extração cai para um determinado valor até o segmento i entrar no duto

original do seguimento ii, onde é forçado a dobrar ao contrário da sua forma original, e nesse estágio, a carga de extração atinge o segundo pico mais alto.

Estágio 4: Estágio híbrido de deformação e deslizamento. No estágio 4, ocorre um decréscimo moderado na carga de extração, atribuído à entrada do segmento i no duto reto S_3 . A resistência à extração é composta pelo atrito ao longo do duto S_3 e da deformação plástica decrescente, onde qualquer uma das duas componentes contribui quase que igualmente.

Estágio 5: Estágio de deslizamento por atrito. Quando todas as partes de gancho viajam pelo duto S_3 , é detectada uma resistência residual produzida pela força de atrito sem mais deformação plástica da fibra de aço. A oscilação da carga de extração é resultado do endireitamento incompleto do gancho. Quando os segmentos deformados i e ii saem completamente do duto reto S_3 a carga de extração reduz rapidamente para zero.

3.4 Comportamento térmico

O CCRF é sensível aos diferentes gradientes térmicos, a partir da temperatura ambiente (em torno de 20 °C) até elevados níveis de energia térmica (por volta de 1000 °C). Segundo Ma *et al.* (2015), o aumento de temperatura causa diversas mudanças nas propriedades mecânicas do concreto (resistência à compressão, flexão, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade), nas relações tensão-deformação e nas propriedades físicas e químicas dos compósitos cimentícios.

3.4.1 Propriedades mecânicas e relação tensão-deformação

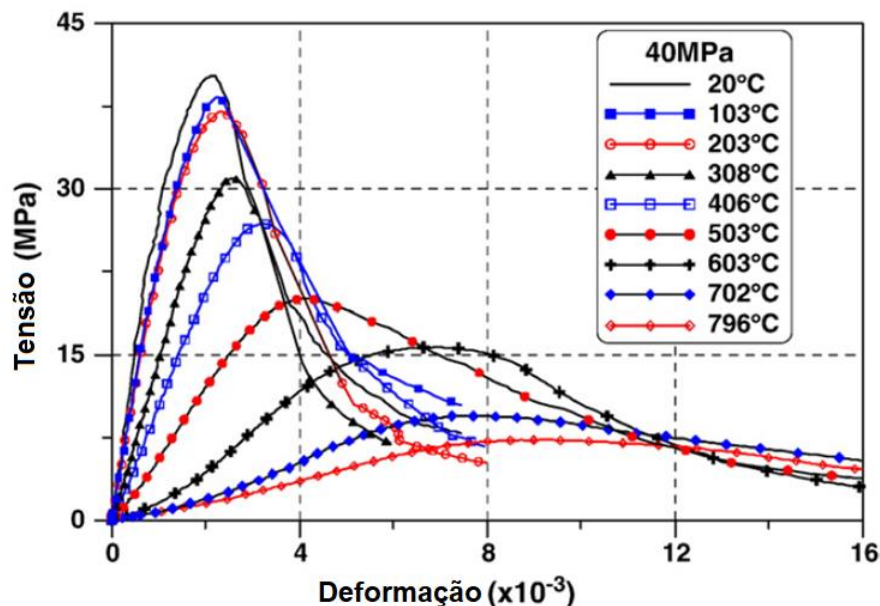
De modo geral, a resistência à compressão dos compósitos cimentícios diminui quando submetido à elevadas temperaturas. A partir da temperatura ambiente até 300 °C a resistência à compressão se mantém constante ou aumenta ligeiramente, de 300 °C até 800 °C a resistência à compressão diminui drasticamente e de 800 °C até temperaturas mais elevadas quase toda a resistência à compressão foi perdida. Semelhante à resistência à compressão, as resistências à flexão, tração na compressão diametral e módulo de elasticidade diminuem com o aumento da

temperatura, entretanto a uma taxa quase linear. As curvas tensão-deformação se tornam mais planas e a tensão de pico de desloca para baixo e para a direita, conforme figura 21 (POON, SHUI e LAM, 2004; CHANG *et al.*, 2006; TAI, PAN e KUNG, 2011).

3.4.2 Propriedades físicas e químicas

A elevação da temperatura promove mudanças físicas e químicas na estrutura dos compósitos cimentícios, que são responsáveis pelas alterações nas propriedades mecânicas (MA *et al.*, 2015). Por volta de 105 °C os produtos de hidratação do cimento perdem completamente a água livre e água fisicamente absorvida e começam a perder sua água quimicamente ligada. A água capilar é perdida completamente a 400 °C. Até 300 °C a hidratação dos grãos de cimento não hidratados é melhorada devido a uma condição de autoclavagem interna, como resultado da temperatura e evaporação da água. Essa condição é particularmente verdadeira para os concretos de alto desempenho, pois uma matriz mais densa e baixa permeabilidade resistem ao fluxo de umidade (SAAD *et al.*, 1996; HAGER, 2013).

Figura 21 – Relação tensão deformação para compósitos cimentícios submetidos à variação de temperatura.



Fonte: Adaptado de Chang *et al.* (2006).

Os produtos AFt e AFm (trissulfato e monossulfato de cálcio hidratado), são desidratados a 110 - 150 °C. Acima de 350 °C o hidróxido de cálcio se decompõe em

cal e água ou se converte em C – S – H (silicato de cálcio hidratado). As estruturas C – S – H começam a se decompor em torno de 560 °C, se decompõe em β -C₂S (beta-silicato dicálcico) por volta de 600 - 700 °C e se decompõe completamente a 800 °C. Entre 580 - 900 °C ocorre a descarbonatação de carbonatos presentes (LIN W-M, LIN TD e POWERS-COUCHE, 1996; PENG *et al.*, 2008; IBRAHIM, HAMID e TAHA, 2012)

Como resultado da evaporação da água e mudanças químicas dos produtos de hidratação, a elevação da temperatura aumenta a porosidade e o tamanho dos poros do compósito cimentício. Uma estrutura porosa mais grosseira é o principal fator responsável pela redução das propriedades mecânicas (VODAK *et al.*, 2004; MENDES *et al.*, 2012).

Até 200 °C não são observadas microfissuras na matriz de cimento endurecida, nem mesmo na zona de transição interfacial (ITZ). Quando a temperatura se eleva para 400 °C, microfissuras na matriz de cimento e na ITZ começam a se propagar e sua intensidade aumenta com a temperatura. Considera-se que as diferentes tensões térmicas para a matriz de cimento endurecida e agregados resultam no desenvolvimento de microfissuras à alta temperatura. Em temperaturas muito altas acima de 1000 °C ocorre a sinterização do compósito e as características do material não são mais verdadeiras (LI *et al.*, 1999; FU *et al.*, 2004; WANG; WU e WANG, 2005; ARIQZ, 2007).

Por volta de 570 °C os agregados silicosos transformam a fase α em fase β , causando expansão do compósito. A desintegração de agregados calcários ocorre acima de 600°C (LIN W-M, LIN TD e POWERS-COUCHE, 1996; MA *et al.*, 2015).

3.5 Comportamento mecânico na flexão e padrão de fissuração

Os ensaios que avaliam o comportamento mecânico dos compósitos cimentícios em sua maior parte são destrutivos e as cargas aplicadas ao material resultam em tensões interna significativas. São essas tensões que “caminham” ao longo do elemento objeto de estudo e provocam deformações, imperfeições e até falha do material. Apensar de existir uma série de normas que padronizam os ensaios que facilitam a execução de estudos, é importante conhecer os fundamentos que regem o comportamento mecânico, principalmente no que se refere à flexão objeto de estudo.

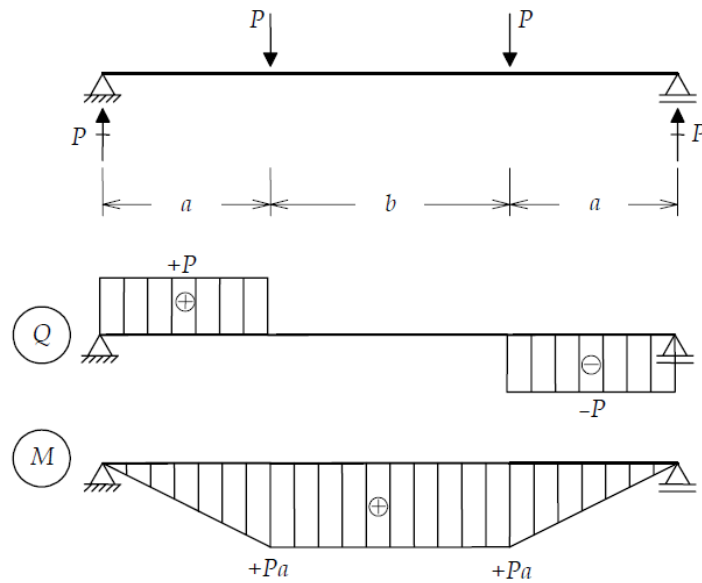
De acordo com Hibbeler (2010) existem quatro tipos de cargas ou esforços resultantes que submetem um determinado corpo a um estado geral de tensão: força normal, força de cisalhamento, momento de torção ou toque e momento fletor. As cargas podem atuar em conjunto ou sozinhas, de forma que para cada configuração existe um estado de tensões específico.

Segundo Martha (2010) a flexão em barras ou vigas pode ser classificada em três tipos, dependendo do estado de tensões atuante:

- Flexão pura: quando o único esforço interno é o momento fletor. Nesse caso, tanto o esforço normal como o cortante são nulos.
- Flexão simples: no caso em que o esforço normal é nulo. Assim, na seção de uma barra onde ocorre flexão simples, estão presentes os esforços momento fletor e força cortante.
- Flexão composta: quando a flexão está acompanhada de esforços normais não nulos. Dessa forma, esforços normais, cortante e momento fletor estão presentes. Esse tipo de flexão é muito comum em pórticos.

A figura 22 representa uma viga biapoiada onde atuam duas cargas coplanares de intensidade P , que estão equidistantes dos apoios. Logo abaixo da viga estão os diagramas de força cortante “ Q ” e momento fletor “ M ”. Fica evidente que na região central do vão de comprimento “ b ” não atua força cortante e o momento fletor é constante, o que gera flexão pura. Em contrapartida, nas extremidades de dimensão “ a ” o esforço cortante é constante igual a P e o momento fletor varia de forma linear, resultando em flexão simples.

Figura 22 – Esforços atuantes em uma viga biapoiada submetida a flexão simples.

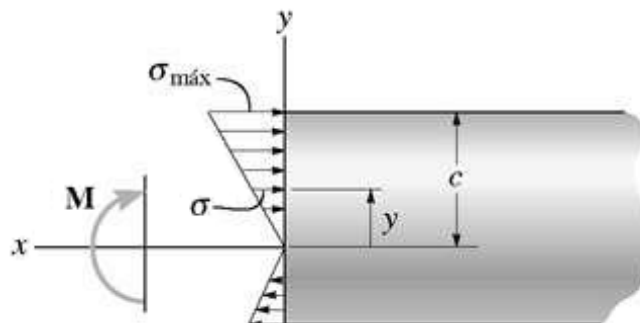


P = força; Q = diagrama de força cortante; M = diagrama de momento fletor

Fonte: Adaptado de Martha (2010).

Conforme mencionado, as cargas impostas aos materiais sólidos geram esforços internos e conseqüentemente um estado geral de tensão. Analisando a seção transversal de uma viga sujeita à flexão e considerando que o material se comporta de maneira linear elástica, observa-se que existe uma distribuição de tensões (σ) na área de seção transversal, induzida pela presença do momento fletor atuante. Nesse caso, a tensão varia de zero no eixo neutro (eixo x) até um valor máximo ($\sigma_{m\acute{a}x}$) à distância " c " mais afastada do eixo neutro, conforme figura 23 (Hibbeler, 2010).

Figura 23 – Distribuição da tensão de flexão em uma seção transversal.



Fonte: Adaptado de Hibbeler (2010).

O momento interno resultante (M) em uma viga deve ser idêntico ao momento produzido pela distribuição de tensão em torno do eixo neutro. Logo, pode-se definir uma equação para o momento da seguinte forma:

$$M = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{c} \int_A y^2 dA \quad (3.5.1)$$

Na expressão acima, a integral representa o momento de inércia (I) da área da seção transversal, calculada em torno do eixo neutro. A equação 3.5.1 pode ser resolvida para $\sigma_{m\acute{a}x}$ é escrita em sua forma geral como:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{Mc}{I} \quad (3.5.2)$$

Onde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = tensão normal máxima no elemento, que ocorre em um ponto na área da seção transversal mais afastado do eixo neutro;

M = momento interno resultante, em torno do eixo neutro da seção;

I = momento de inércia da área da seção transversal, em torno do eixo neutro;

c = distância perpendicular do eixo neutro a um ponto mais afastado, onde $\sigma_{m\acute{a}x}$ atua.

A equação 3.5.2, muitas vezes denominada de “fórmula da flexão”, é utilizada para determinar a tensão normal em um elemento reto, com seção transversal simétrica em relação a um eixo, e momento aplicado perpendicularmente a esse eixo. Além do mais, informa que a tensão máxima atuante é diretamente proporcional ao momento aplicado e possui comportamento inverso ao momento de inércia da seção.

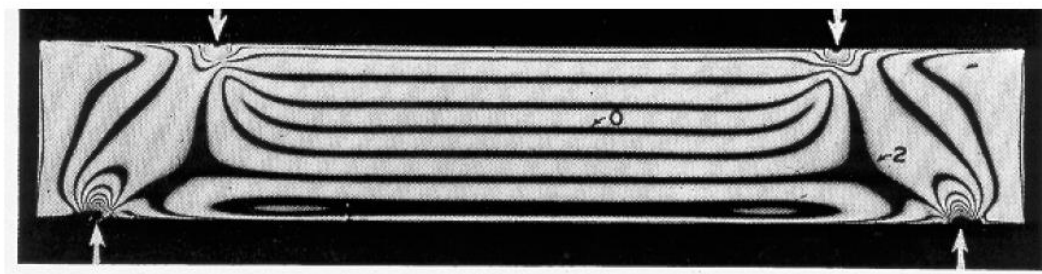
Segundo Carvalho e Duarte (2000) os ensaios de flexão consideram significativas apenas as tensões resultantes da região flexionada em estudo. Com isso, outros esforços não são avaliados e as formulações matemáticas para o cálculo da tensão, por meio da carga aplicada, traduz apenas o estado de tensões ideal. Entretanto, uma investigação mais profunda indica que existem outros componentes de tensão, como tensões de contato, tensões devido à curvatura do corpo de prova, tensões de torção e torções cisalhantes de atrito. Os ensaios mecânicos exigem contato direto entre o

elemento avaliado e os equipamentos de ensaio, resultando assim em tensões de contato. Corpos de prova que apresentam curvatura em um dos planos de carregamento exibem o comportamento de uma viga curva, o que muda suas propriedades mecânicas. A falta de paralelismo entre as faces do corpo de prova causa excentricidade no carregamento e resultam em tensões cisalhantes devido à torção. As tensões cisalhantes transversais existem sempre quando ocorre a aplicação de cargas concentradas externas durante os ensaios. Por fim, as tensões cisalhantes de atrito aparecem quando as cargas são aplicadas nas faces do corpo de prova por meio de carregamento concentrado.

A figura 24 mostra os campos de tensões atuantes em uma viga biapoiada durante ensaio de flexão carregada a 4 pontos. Importante notar a influência das tensões de contato, que perturbam a distribuições de tensões e uma região significativa. Assim, qualquer valor medido nesta região deve levar em conta este fator.

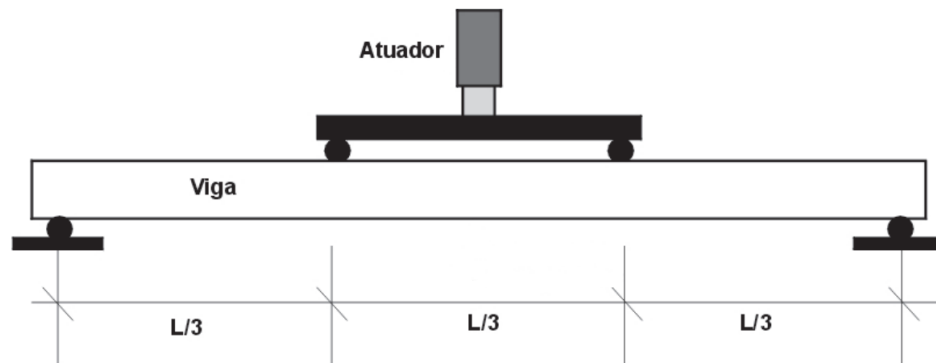
O ensaio de flexão a 4 pontos é importante quando se trata da caracterização de compósitos cimentícios. A figura 25 mostra uma representação esquemática do ensaio, que se aproxima bastante ao modelo teórico de vigas biapoiadas retratado por Martha (2010) e Hibbeler (2010). Dessa forma, as formulações do ensaio de flexão 4 pontos não consideram outras componentes de tensões atuantes no corpo de prova além daquelas provenientes da flexão, dessa forma é assumida uma condição de flexão pura.

Figura 24 – Viga prismática carregada a quatro pontos e campos de tensão determinados por meio da técnica de fotoelasticidade.



Fonte: Adaptado de Carvalho e Duarte (2000).

Figura 25 – Esquema do ensaio de flexão quatro pontos, disposição dos suportes e pontos de aplicação de cargas.



Fonte: Adaptado de Lima Jr. e Dias (2001).

Considerando um corpo de prova com seção retangular, a equação 3.5.2 pode ser desenvolvida para o caso particular da seguinte forma:

$$\sigma_{Flex.}^{4P} = \frac{Pd}{bh^2} \quad (3.5.3)$$

Onde:

$\sigma_{Flex.}^{4P}$ = campo de tensões atuantes no corpo de prova;

P = carga aplicada durante o ensaio;

d = distâncias entre apoios de suporte;

b,h = largura e altura do corpo de prova, respectivamente.

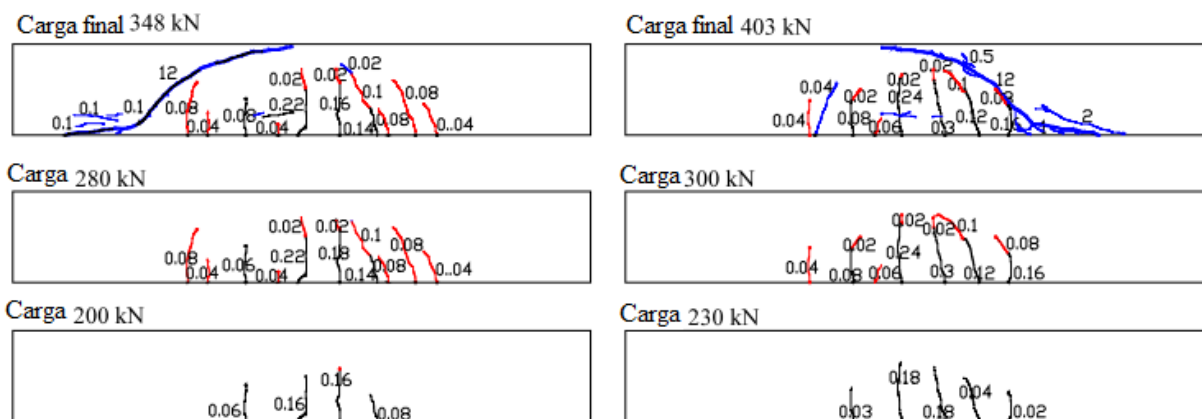
No escopo normativo, a norma brasileira ABNT NBR 12142/2010 padroniza o ensaio de resistência à tração na flexão para corpos de prova prismáticos de concreto. Por sua vez, a norma americana ASTM C1609 normaliza o ensaio de flexão a 4 pontos com o intuito de avaliar o desempenho à flexão do CRF.

Furlan e Hanai (1997), Helincks, *et al.* (2013) e Amin e Foster (2016) estudaram o carregamento em vigas de concretos reforçados e avaliaram os padrões de fissuração durante ensaio de flexão quase estático, onde a carga é aplicada lentamente. Quando existe a predominância de esforços de flexão, as fissuras causadas por este esforço são quase verticais ou levemente inclinadas, paralelas à seção transversal da viga e

normalmente ocorrem no terço médio. Ao contrário, se ocorrem esforços prioritariamente de cisalhamento, as fissuras são fortemente inclinadas e caminham em direção aos pontos de aplicação de carga ou apoios.

Hassan, Hossain e Lachemi (2010) investigaram o perfil de fissuração para vigas de concreto normal (NC) e concreto alto adensável (SCC), durante ensaio de flexão a três pontos (figura 26). À medida que a carga cresce, surgem fissuras quase verticais na região central do vão, devido aos esforços de flexão. Essas fissuras de flexão aumentam em quantidade e espessura até o colapso do elemento estrutural. As fissuras provenientes dos esforços cisalhantes surgem quando as cargas estão elevadas, possuem inclinações próximas a 45°, têm origem nos apoios e avança em direção aos pontos de aplicação de cargas.

Figura 26 – Perfil de fissuração de vigas submetidas ao ensaio de flexão e ruptura por cisalhamento.

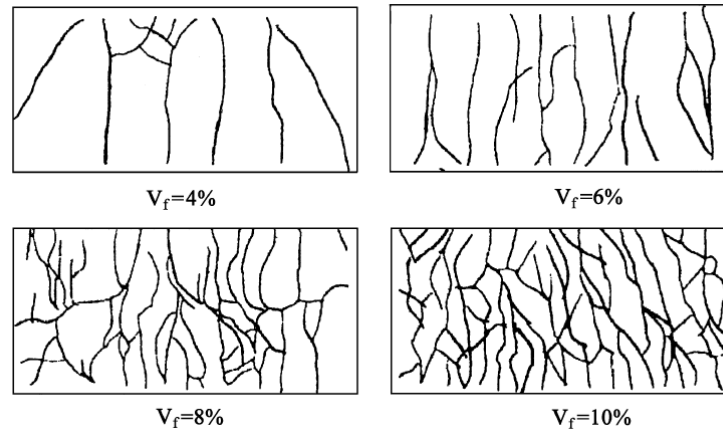


Fonte: Adaptado de Hassan, Hossain e Lachemi (2010).

O perfil de fissuração para vigas de CCRF é escasso na literatura, principalmente quando se trata do SIFCON. Yan, Wu e Zhang (2002) avaliaram o perfil de fissuração para vigas de SIFCON, com diferentes teores de fibras (Figura 27). Comparada à propagação de uma fissura principal para o CCRF, a propagação de fissuras do SIFCON apresenta o fenômeno de múltiplas fissuras irregulares e a densidade de fissuras aumenta visivelmente com o incremento do teor de fibras. Para 4% de fibras, existem fissuras retas na parte central das vigas e fissuras inclinadas na parte final das vigas. Pode ser atribuído que a tensão de tração desempenhe um papel importante na parte central, enquanto os esforços cisalhantes papel significativo nas extremidades. Para 10% de teor de fibras, a propagação de fissuras é muito confinada,

para que as fissuras se ramifiquem e se conectem umas às outras. Portanto, o padrão de fissuras se torna mais irregular e denso com o aumento do teor de fibras.

Figura 27 – Mapa do perfil de fissuração para vigas de SIFCON, com diferentes conteúdos de fibras.



Fonte: Adaptado de Yan, Wu e Zhang (2002).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Os materiais utilizados na dosagem do CCADRF foram cimento Portland, areia lavada comum, sílica ativa, superplastificante, fibras curtas de aço e água. Cada um dos constituintes será apresentado com detalhes a seguir.

4.1.1 Aglomerante

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland de alta resistência inicial CP-V ARI segundo classificação da ABNT NBR 5733/91 e tipo III segundo a ASTM C150/150M-18, do fabricante Brennand. A tabela 4 apresenta as características físicas e químicas do cimento.

Tabela 4 – Caracterização química e física do Cimento Portland de Alta Resistência Inicial – CPV ARI.

Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigências
Resíduo insolúvel – RI	ABNT NM 15/12	%	0,57	≤ 1,0
Perda ao fogo – PF	ABNT NM 18/12	%	3,75	≤ 4,5
Óxido de magnésio – MgO	ABNT NM 21/12	%	1,48	≤ 6,5
Trióxido de enxofre – SO ₃	ABNT NM 16/12	%	2,73	≤ 4,5
Anidrido Carbônico – CO ₂	ABNT NM 20/12	%	2,61	≤ 3,0
Área específica (Blaine)	ABNT NM 76/98	cm ² /g	4,507	≥ 3.000
Resíduo na peneira #200	ABNT NBR 11579/91	%	0,06	≤ 6,0
Resíduo na peneira #325	ABNT NBR 9202/85	%	0,87	–
Água de consistência normal	ABNT NM 43/03	%	30,4	–
Início de pega	ABNT NM 65/03	min	142	≥ 60
Fim de pega	ABNT NM 65/03	min	191	≤ 600
Expansibilidade a quente	ABNT NBR 11582/91	mm	0,00	≤ 5,0

Fonte: Brennand cimentos (2017).

4.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia lavada fina peneirada, fornecida em Sacos de 20kg, com o nome comercial de Pura Sílica. Possui granulometria abaixo de 4,8 mm

e tem origem nos municípios de Esmeraldas e Inhaúma, estado de Minas Gerais. Por ser uma areia lavada a quantidade de finos é reduzida.

4.1.3 Fibras

Como reforço da matriz foram utilizadas fibras curtas de aço fornecidas pela empresa Maccaferri. As fibras possuem comprimento de 50mm, diâmetro de 0.75mm, fator de forma (l/d) igual a 67 e extremidades com ancoragens, conforme figura 28. As principais propriedades das fibras são apresentadas na tabela 5.

Figura 28 – Exemplo de fibra de aço com ancoragem nas extremidades.



Fonte: Maccaferri (2017).

Tabela 5 – Características das fibras de aço.

Característica	Fibra de aço
Tipo / nomenclatura segundo o fabricante	FF3
Material	Aço baixo carbono
Método de fabricação	Conformação a frio (trefilação)
Formato da seção	Circular
Comprimento (mm)	50
Diâmetro (mm)	0.75
l/d (fator de forma)	67
Resistência à tração (limite de resistência)	1200 MPa

Fonte: Maccaferri (2017).

4.1.4 Adição mineral

A adição mineral utilizada foi sílica ativa, fornecida pela empresa TECNOSIL (figura 29). O formato das partículas é esférico, possui massa específica de 2.220 kg/m³, superfície específica igual a 20.000 m²/kg e alto teor de dióxido de silício em formato amorfo (TECNOSIL, 2018). A caracterização química é apresentada na tabela 6.

Figura 29 – Sílica ativa utilizada como adição mineral.



Fonte: Tecnosil (2018).

Tabela 6 – Caracterização química da sílica ativa.

Análise química, %	Sílica ativa
Dióxido de silício (SiO ₂)	91,04
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	0,10
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	0,70
Óxido de cálcio (CaO)	1,10
Óxido de magnésio (MgO)	1,50
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,39
Óxido de potássio (K ₂ O)	4,40
Trióxido de enxofre (SO ₃)	0,16
Perda ao fogo	0,61

Fonte: Tecnosil (2018).

4.1.5 Aditivo

Foi utilizado aditivo superplastificante Silicon ns high 400, à base de policarboxilato modificado com nanosílica estabilizada. As características do aditivo estão relacionadas na tabela 7.

O emprego de finos e o baixo fator água/cimento na dosagem do CCADRF alteram o comportamento plástico do concreto no estado fresco. O uso de superplastificante é necessário para manter a plasticidade, melhorando assim sua trabalhabilidade durante a moldagem. Existe também a necessidade de se obter consistência mais fluida para uso do método de argamassa infiltrada em fibras.

Tabela 7 – Características do aditivo Silicon.

Característica	Resultado
Aspecto	Líquido viscoso
Cor	Sienna
Homogeneidade	Homogêneo
Massa específica	1,09 g/cm ³
Teor de resíduos sólidos	47,8 %
pH	3,1
Teor de cloretos	≤ 0,15 %

Fonte: Silicon (2018).

4.1.6 Água

A água utilizada no preparo da argamassa fluida foi fornecida pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) e coletada no laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Materiais do CEFET-MG. Segundo o Relatório de Qualidade da Água (2017), a água tratada pela COPASA apresenta características conforme tabela 8.

Tabela 8 – Características da água fornecida pela COPOSA.

Parâmetro	Resultado
Cor	Incolor
Turbidez	Límpida
Temperatura	Ambiente, em torno de 25°C
pH	7,83
Cloro	1,09 mg/L
Fluoreto	0,8 mg/L

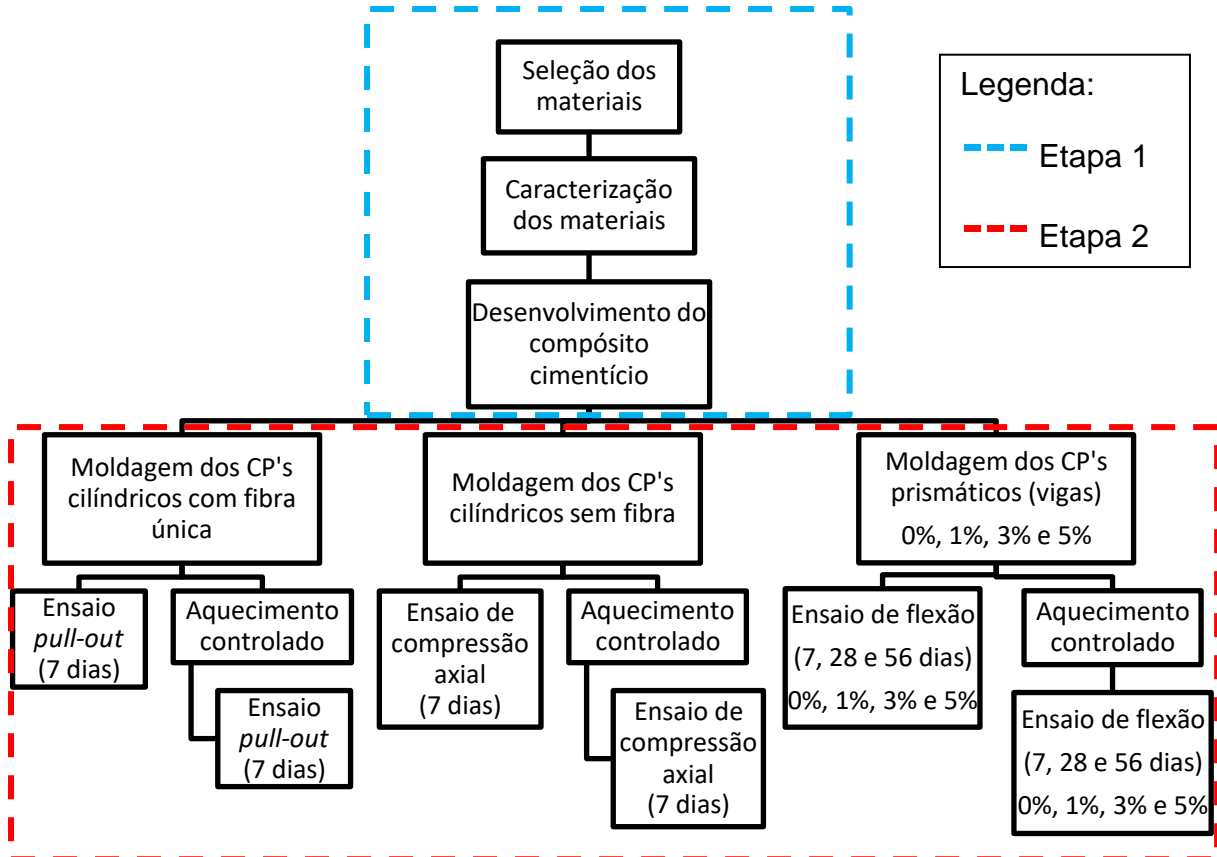
Fonte: COPASA (2018).

4.2 Métodos

A fase experimental foi dividida em duas grandes etapas. A primeira constituiu na seleção e caracterização dos materiais, bem como no desenvolvimento do compósito cimentício. Na segunda etapa foram confeccionados e ensaiados os corpos de prova prismáticos (vigas em modelo reduzido) com o objetivo de avaliar o comportamento do compósito ao longo das idades de 7, 28 e 56 dias. A distribuição de fibras foi a mesma para todos os exemplares com fibras. Também, foram ensaiados corpos de prova cilíndricos sem fibra para avaliar o desempenho da matriz cimentícia durante compressão axial e corpos de prova cilíndricos com fibra única para ensaio de *pull-*

out. Todos os ensaios foram realizados antes e após tratamento térmico. Na figura 30 é possível observar o organograma dos experimentos.

Figura 30 – Organograma dos experimentos realizados.



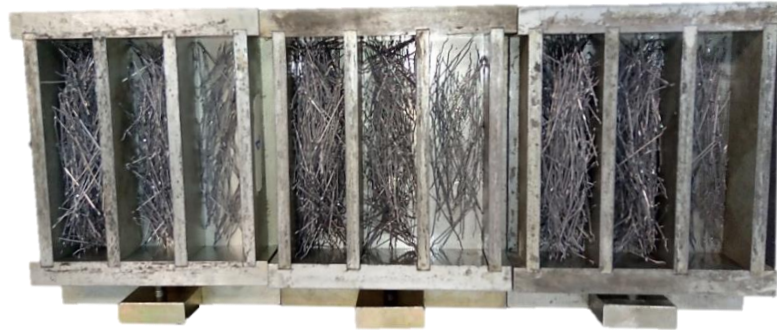
Fonte: autor (2019).

4.2.1 Moldagem dos corpos de prova

Para moldagem dos corpos de prova foi utilizado o método de argamassa infiltrada em fibras ou *slurry infiltrated fibered concrete* (SIFCON), que consiste em posicionar as fibras no molde e depois despejar uma argamassa fluida, que preenche os espaços vazios entre as fibras. Com o método adotado, as fibras permaneceram no fundo do molde, concentradas na região mais solicitada por esforços de tração.

Foi utilizado molde prismático que possui dimensões de 40 x 40 x 160 mm. As fibras foram dispostas nos moldes de acordo com as respectivas porcentagens em função do volume (1%, 3% e 5%), por fim despejada uma argamassa fluida. A figura 31 mostra os moldes prismáticos contendo as fibras de aço.

Figura 31 – Moldes prismáticos (vigas) contendo fibras ao fundo.



Fonte: próprio autor (2019).

Para produção da calda cimentícia, Beglarigale *et al.* (2016) sugere uma relação água - materiais cimentícios de 0,30; sílica ativa - cimento de 0,20; e areia - materiais cimentícios de 1,23. Assim, a dosagem foi ajustada para os insumos utilizados e apresentada na tabela 9.

Tabela 9 – Proporção em massa dos constituintes utilizados.

Traço	Proporção em massa (kg)				Fator a/c
	Aglomerante	Agregado	Sílica ativa	Aditivo	
Vigas	1,0	1,0	0,20	0,015	0,4

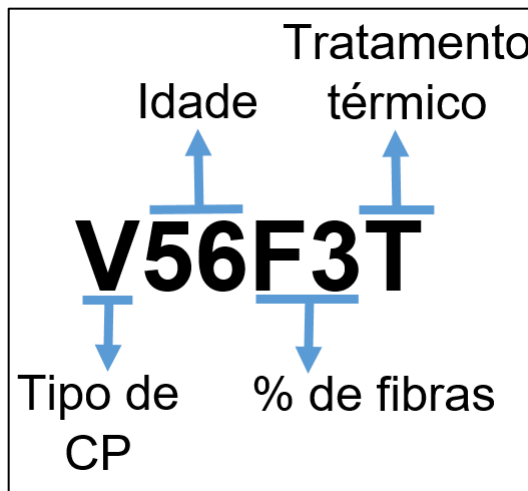
Fonte: próprio autor (2019).

Antes de utilizar como agregado, a areia foi seca em estufa por 24 horas, em temperatura aproximada de 105 °C, com o intuito de retirar completamente a umidade. Em seguida, foi adotado o processo de peneiramento, a fim de obter grãos com dimensão máxima de 1,2 mm.

Após desmoldagem com 24 horas da mistura dos materiais, os corpos de prova foram colocados em cura submersa em água potável saturada com hidróxido de cálcio, onde permaneceram até um dia antes dos ensaios. Depois da cura, os exemplares foram colocados em estufa pelo período de 24 horas, com temperatura média de 65°C, a fim de retirar a água excedente e proceder os ensaios. Encerrado o íterim na estufa, foram retirados e deixados à temperatura ambiente. Por fim, a metade dos corpos de prova foram ensaiados à flexão, enquanto a outra metade passou por tratamento térmico e subsequente ensaio mecânico.

As variáveis propostas nesse trabalho foram: percentagem de fibras (sem fibras, 1%, 3% e 5%), idade dos corpos de prova (7, 28 ou 56 dias para vigas) e condição térmica (com ou sem tratamento térmico). Dessa forma, com o intuito de diferenciar os compósitos analisados, montou-se uma nomenclatura da seguinte forma: vigas (V), idade de ensaio (7, 28 ou 56), percentagem de fibras (F0, F1, F3 e F5 para 0%, 1%, 3% e 5% de fibras, respectivamente) e presença ou não de tratamento térmico (T). Um exemplo dessa nomenclatura é identificado na figura 32.

Figura 32 – Nomenclatura adotada para os exemplares de compósito cimentício.



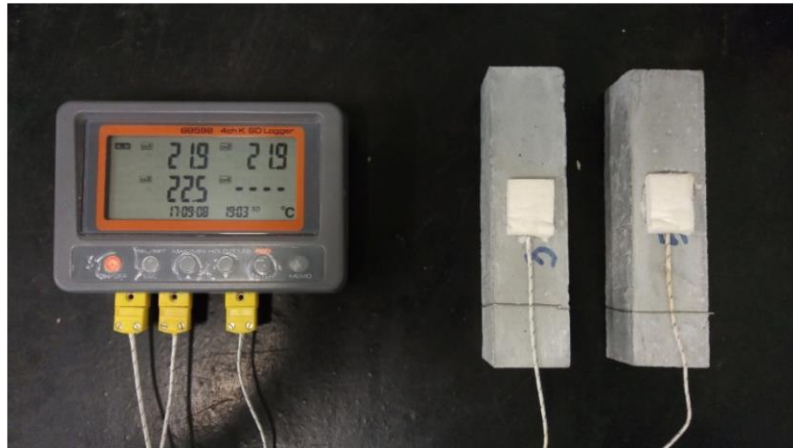
Fonte: próprio autor (2019).

4.2.2 Tratamento térmico por aquecimento controlado

O tratamento térmico (T) dos corpos de prova foi realizado em forno elétrico, com o intuito de simular uma condição controlada para variação da temperatura com o tempo. A medição da temperatura foi feita utilizando termopares acoplados aos corpos de prova uso de manta térmica de lã de vidro e cola especial. A outra extremidade do termopar estava ligada ao medidor digital, que converte o sinal elétrico em valores de temperatura, conforme figura 33.

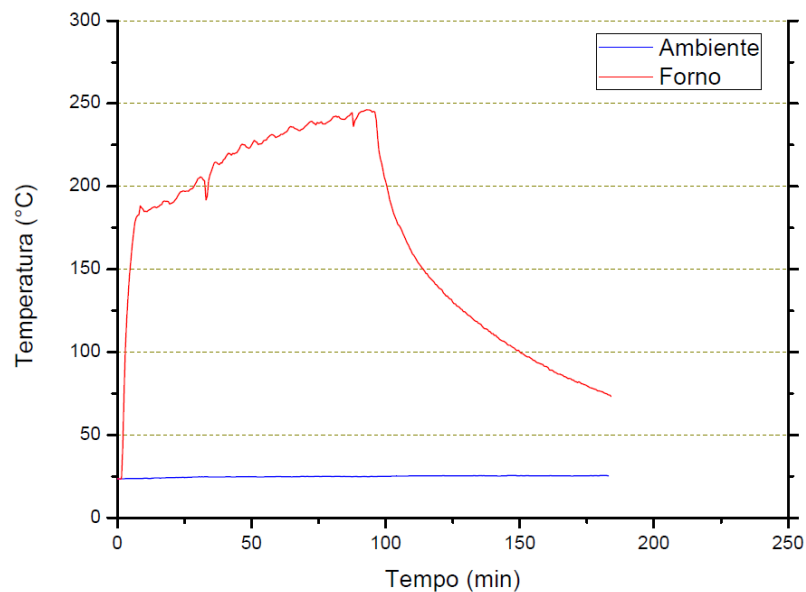
A figura 34 mostra a temperatura ambiente durante o tratamento térmico, bem como a variação da temperatura no interior do forno. Houve um rápido aquecimento do forno até aproximados 180°C, depois a temperatura aumentou lentamente até por volta de 250°C.

Figura 33 – Termopares acoplados aos corpos de prova e conversor de temperatura.



Fonte: autor (2019).

Figura 34 – Variação da temperatura ambiente e no interior do forno, durante o ensaio de tratamento térmico.

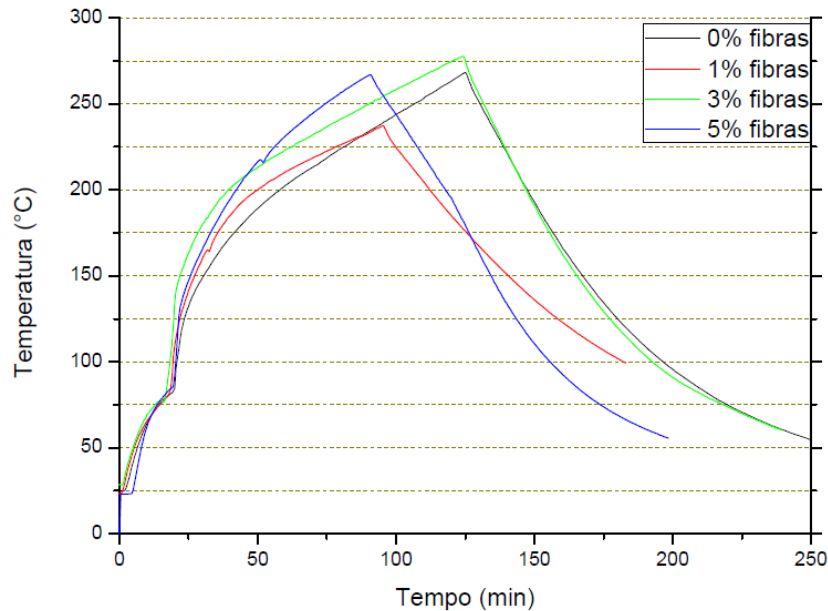


Fonte: próprio autor (2019).

Para realizar o de tratamento térmico das vigas, os corpos de prova foram inseridos no forno juntamente com sensores para medir a temperatura, assim a transmissão de calor se deu de forma igual por toda a superfície. Na figura 35 estão identificadas as curvas de aquecimento e resfriamento para as vigas, que são similares entre si, o que sugere um perfil específico para os corpos de prova prismáticos de CCRF, considerando as mesmas condições de contorno impostas. Foram ensaiados três corpos de prova para cada teor de fibras, durante um único ciclo de

aquecimento/resfriamento. Por este motivo, é possível notar pequena diferença entre as curvas. O tratamento térmico alcançou a faixa de 250°C, o que era esperado.

Figura 35 – Variação da temperatura para vigas durante ensaio de tratamento térmico.



Fonte: próprio autor (2019).

Segundo Ma et al. (2015) e Tai, Pan e Kung (2011), com aquecimento na faixa de 200°C a 300°C, as propriedades mecânicas dos concretos permanecem, entretanto, em temperaturas mais elevadas as propriedades são deterioradas. Por volta de 400°C ocorre a propagação de microfissuras na matriz, comprometendo a microestrutura. Já em 560°C, ocorre a decomposição das estruturas de silicato de cálcio hidratado (C – S – H), a porosidade aumenta ainda mais e a microestrutura se apresenta bastante fissurada, o que causa uma rápida queda da resistência. Assim, optou-se por uma temperatura próxima de 250°C, a fim de estudar as propriedades do CCADRF nessa condição específica e avaliar o incremento de resistência residual.

4.2.3 Caracterização mecânica do compósito cimentício

O ensaio de flexão de quatro pontos foi adotado para avaliar o comportamento mecânico das vigas, utilizando o equipamento universal de ensaio do fabricante EMIC, localizado no Departamento de Engenharia de Transportes do CEFET/MG, seguindo uma nova metodologia adotada para o caso específico.

O equipamento utilizado não possui aparatos específicos para o ensaio de flexão a quatro pontos, levando em conta as dimensões das vigas em modelo reduzido. Assim, foi proposto um novo arranjo experimental, adaptando os instrumentos existentes do próprio equipamento. O resultado foi um mecanismo inovador que pode ser observado na figura 36.

Figura 36 – Equipamento utilizado no ensaio de flexão de vigas.



Fonte: autor (2019).

A norma brasileira NBR12142 prevê a determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos de concreto e recomenda, entre outras diretrizes, a estrutura de aplicação de carga, o sistema de medição de forças e o dispositivo de flexão. O mecanismo proposto foge aos padrões da norma, mas, atende perfeitamente às condições de contorno do ensaio, provindo resultados consistentes.

Dessa forma, o ensaio foi realizado com os exemplares invertidos, onde o maior vão que contém a flecha está voltado para cima. A deflexão do ponto médio de cada um dos corpos de prova ocorreu para cima e foi medida de forma precisa por um transdutor LVDT (em inglês *Linear Variable Differential Transformer*), enquanto o carregamento foi medido por uma célula de carga com capacidade de 300kN.

Os valores resultantes de carga e deflexão foram captados e analisados pelo *software* TESC, também da empresa EMIC, gerando um banco de dados completo. Esses dados foram coletados e analisados, resultando nos diagramas de carga *versus* deflexão e tensão *versus* deflexão, para cada um dos exemplares.

As tensões de tração na flexão foram calculadas por meio das equações 3.5.2 e 3.5.3 (item 3.5 da Revisão Bibliográfica), levando em conta os preceitos do ensaio de flexão e considerando os esforços atuantes, conforme a seguir:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{Mc}{I} \quad \rightarrow \quad \sigma_{Flex.}^{4P} = \frac{Pd}{bh^2}$$

Onde P é a carga aplicada, d = 132 mm e b = h = 40 mm.

4.2.4 Tenacidade

A tenacidade foi calculada levando em conta a área sobre a curva carga *versus* deflexão, até uma deflexão máxima de 6 mm. A norma ASTM C1609/C1609M sugere adoção de pontos notáveis para cálculo da tenacidade quando as deflexões são iguais a L/600 e L/150, onde L é a distância entre os apoios, conforme figura 25 do item 3.5 da Revisão Bibliográfica. Kim, Naaman e El-Tawil (2008) indicam adoção do outro ponto (L/100), a fim de caracterizar por completo o comportamento de CCRF que utilizam fibras diferentes.

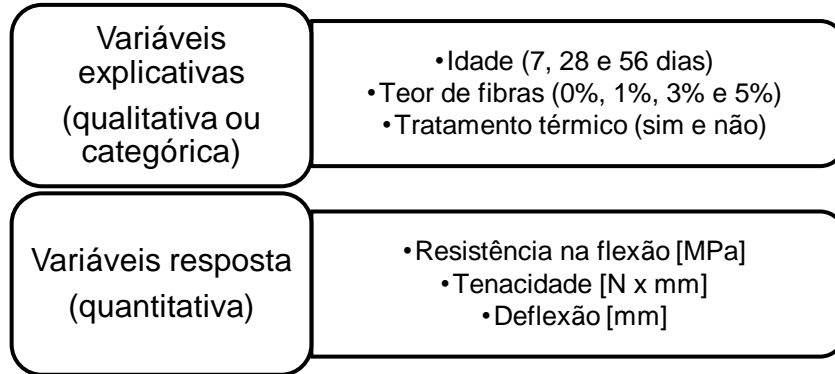
Tendo em vista as condições analisadas, as características do compósito, os diferentes teores de fibras e o prolongamento das curvas carga *versus* deflexão, foi necessário adotar outros quatro pontos notáveis onde as deflexões são iguais a L/100, L/60, L/40 e 6,00 mm. O limite de 6,00 mm foi adotado observando as curvas carga *versus* deflexão, quando o comportamento suavizado ou *deflection-softening* inicia e se estende de forma coerente ao longo das deflexões, levando em conta todos os corpos de prova avaliados. Assim, os valores de deflexão foram 0,22 mm (L/600), 0,88 mm (L/150), 1,32 mm (L/100), 2,2 mm (L/60), 3,3 mm (L/40) e 6,00 mm.

4.2.5 Análise estatística

A análise estatística foi realizada com o intuito de avaliar a significância dos dados coletados em relação às diferentes condições. Inicialmente, foi feita a identificação das variáveis envolvidas no experimento. As variáveis explicativas ou independentes são as condições impostas e pré-definidas do experimento, por este motivo também são chamadas de fontes de variação. No presente estudo englobam a idade, o teor de fibras e o tratamento térmico. Por sua vez, as variáveis resposta ou dependentes

são as características a serem estudadas, que apresentam variação quando as condições são impostas. A resistência na flexão, a tenacidade e a deflexão foram definidas como variáveis resposta. A figura 37 mostra um resumo dessas definições.

Figura 37 – Variáveis adotadas no experimento e avaliadas na análise estatística.

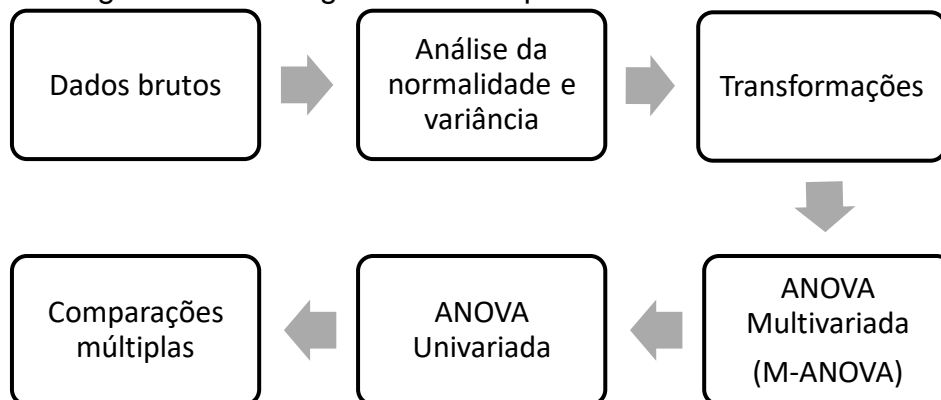


Fonte: autor (2019).

O nível de significância ou nível descritivo para tomada de decisões no presente estudo é igual a 5% (0,05), ou seja, adota-se a hipótese da igualdade quando a significância (“*p-value*” ou “valor-*p*” ou “*p*”) calculada é maior do que 5% ($p > 0,05$) e a hipótese da diferença quando menor ($p < 0,05$). Portanto, as análises possuem um intervalo de confiança de 95%.

A análise estatística foi realizada em seis etapas consecutivas, isto é, cada uma das etapas depende da precedente para ser realizada. A figura 38 mostra as etapas da análise estatística.

Figura 38 – Fluxograma das etapas da análise estatística.



Fonte: autor (2019).

Inicialmente, os dados brutos foram avaliados com relação à normalidade e variância. Para normalidade foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov (identificado por K-S). Para variância, foram utilizados os testes de Levene e de Box.

Segundo Field (2009), os pressupostos da análise de variância são: (i) independência entre as observações, (ii) amostragem aleatória, (iii) normalidade dos dados, e (iv) homogeneidade de variância. Hair (2009) reforça ainda mais a importância de satisfazer o pressuposto da homogeneidade de variância.

As transformações foram realizadas com o intuito de atingir normalidade e homogeneidade de variância, pelo menos na maioria das variáveis. Após várias tentativas, aquela que gerou os melhores resultados foi a transformação logarítmica na base 10, para melhor adequar os dados aos pressupostos da análise de variância. Os critérios do z-score e distância de Mahalanobis foram utilizados para verificar se existem observações atípicas e influentes (*outliers* e valores extremos), antes e depois das transformações.

Com as variáveis transformadas, realizou-se as análises estatísticas. Como o experimento possui três variáveis resposta quantitativas e correlacionadas, e três variáveis explicativas categóricas, foi utilizado o modelo multivariado.

A análise multivariada de variância (MANOVA) foi realizada utilizando os testes *Pillai's Trace*, *Wilk's Lambda*, *Hotelling's Trace* e *Roy's Largest Root*. Segundo Hair (2009, p.324), cada teste possui diferentes propriedades, que são adequadas para diferentes cenários, e deve-se levar em conta as violações das suposições inerentes à análise de variância (MANOVA). Como o banco de dados possui alguns desvios de normalidade e homogeneidade de variância, utilizou-se os quatro testes simultaneamente para tomada de decisões. A análise de variância univariada (ANOVA) foi realizada utilizando a razão F.

O impacto das variáveis independentes pode ser mensurado pelo tamanho relativo do efeito, que varia entre 0 e 1, sendo 0 sem efeito e 1 efeito máximo (HAIR, 2009 e FILED, 2009). O poder observado representa a probabilidade de identificar a diferença entre as condições quando realmente existem na amostra, varia entre 0 e 1 e valores acima de 0,8 são considerados satisfatórios (HAIR, 2009 e FILED, 2009).

O coeficiente de correlação foi utilizado para mediar o relacionamento linear entre as variáveis resposta, varia entre -1 e +1, sendo que -1 indica relacionamento linear negativo perfeito, 0 aponta ausência de relacionamento, e +1 assinala relacionamento positivo perfeito (FILED, 2009).

A análise de variância é um teste estatístico abrangente, isto é, testa o experimento de forma global, analisando se a manipulação experimental obteve sucesso. Informações específicas sobre a influência das condições nas variáveis resposta foram avaliadas através de testes *post-hoc* ou comparações múltiplas (FILED, 2009). O teste LSD (*Least-Significant Difference*) foi utilizado para comparar todas as diferentes combinações das condições, duas a duas.

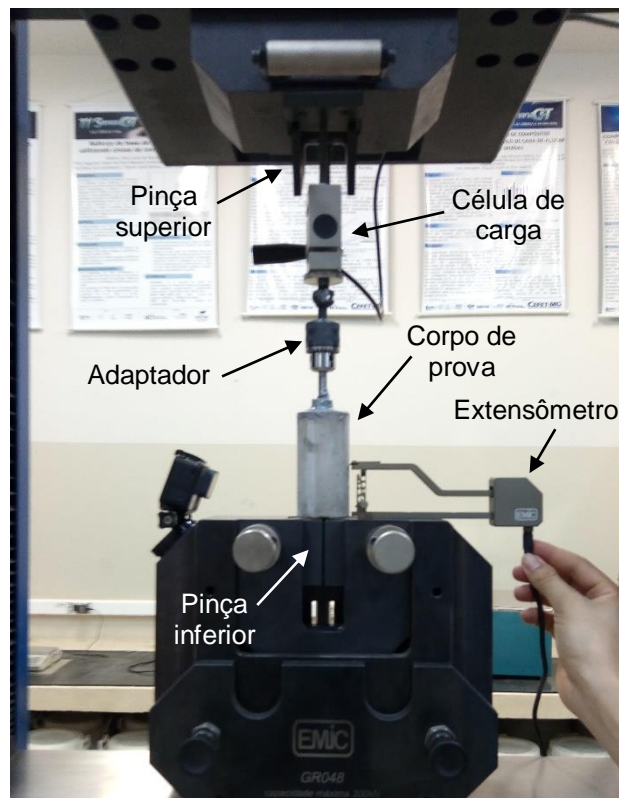
4.2.6 Extração de fibra ou *pull-out*

O ensaio de extração de fibra ou *pull-out* não possui norma correlacionada ou padrão de execução. Entretanto, alguns pontos importantes devem ser analisados, como equipamento adequado para tração da fibra, suporte para o corpo de prova e correta inserção da fibra na matriz.

Diversos pesquisadores avaliaram o comportamento de *pull-out*, por meio de diferentes aparatos, normalmente acoplados a um equipamento universal de ensaio (ISLA, RUANO e LUCCIONI, 2015; BEGLARIGALE e YAZICI, 2015; DENG *et al.*, 2017; ABDALLAH, FAN e CASHELL, 2018). O presente estudo adota um aparato específico para o ensaio de extração de fibra, acoplado a um equipamento universal de ensaio, conforme figura 39. Na parte de cima está a pinça superior que fixa uma haste acoplada à célula de carga, com capacidade de 2 t e precisão de 0,001 N. Unido à célula de carga, pela parte inferior, está um adaptador (mandril), utilizado para prender o suporte do corpo de prova. Esse suporte foi usinado e fixado ao corpo de prova com uso de adesivo epóxi de alta resistência. Na outra extremidade do corpo de prova está a fibra imersa na matriz. A pinça inferior prende a fibra e funciona como local de aplicação de carga. Durante a execução do ensaio, o corpo de prova permanece fixo, enquanto a pinça inferior movimentada. Para medir o deslocamento da fibra de forma precisa, foi utilizado extensômetro acoplado ao suporte inferior, com abertura máxima de 73 mm e precisão de 0,001 mm.

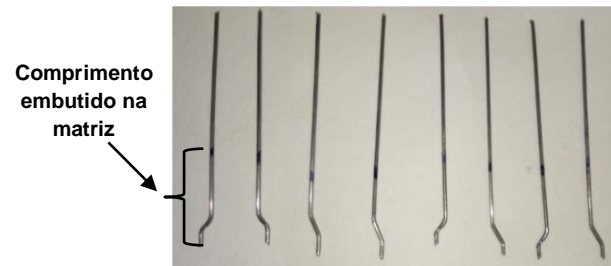
Os corpos de prova foram produzidos utilizando moldes cilíndricos com dimensões de 50 x 100 mm. As proporções de agregados, aglomerante, sílica ativa e superplastificante são idênticas às utilizadas nas vigas. O comprimento das fibras embutidas na matriz foi igual a 15 mm. Uma das extremidades em gancho foi seccionada com o intuito de facilitar o encaixe no aparato de ensaio. A outra extremidade da fibra foi embutida na matriz. Durante a moldagem, foi utilizado um gabarito, fabricado em acrílico transparente, a fim de posicionar a fibra equidistante à lateral do corpo de prova, evitar efeitos de borda, preservar a posição perpendicular da fibra em relação base do corpo de prova e preservar a coincidência com o eixo do equipamento de ensaio. A figura 40 mostra as fibras pouco antes da moldagem. A taxa de deslocamento adotada foi de 10 $\mu\text{m/s}$, em concordância com Abdallah, Fan e Cashell (2018).

Figura 39 – Aparato de ensaio para extração de fibra.



Fonte: autor (2019).

Figura 40 – Fibras preparadas para moldagem, ensaio de *pull-out*.



Fonte: autor (2019).

4.2.7 Resistência mecânica da matriz cimentícia

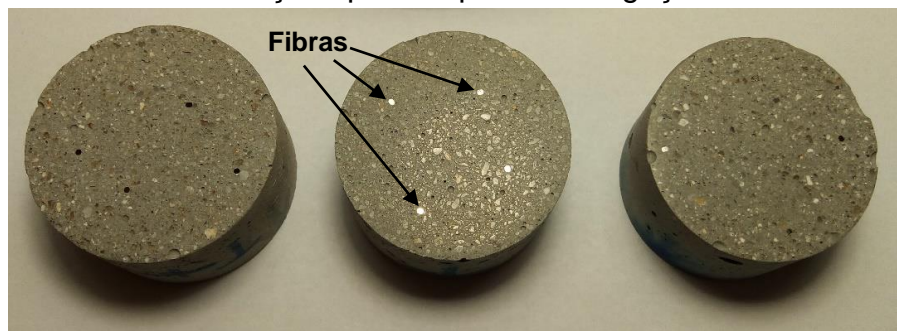
A resistência mecânica da matriz cimentícia foi avaliada pelo ensaio de compressão axial. Foram moldados seis corpos de prova cilíndricos (dimensões 50 x 100 mm), sendo que a metade foi submetida a tratamento térmico. Todos os exemplares foram ensaiados à compressão utilizando o equipamento universal de ensaio localizado no Departamento de Transportes do CEFET-MG.

4.2.8 Investigação microestrutural

O estudo em nível microestrutural foi realizado por meio de microscópio eletrônico de varredura (MEV) Hitachi, TM3000, e microscópio óptico (MO) Kontrol, IM713. As amostras analisadas via MEV foram fixadas no equipamento com uso de fita adesiva de carbono de alta condutividade e foi utilizada tensão de aceleração de 15 kV.

As superfícies das fibras foram avaliadas por meio de MEV e MO, antes e após aquecimento. A superfície fraturada foi analisada usando pequenos fragmentos dos corpos de prova após ensaio de flexão, por meio de MEV. A interface fibra-matriz foi estudada usando seções polidas, por meio de MEV e MO, com o intuito de revelar o contorno da interface, conforme figura 41.

Figura 41 – Amostras com seções polidas para investigação da interface fibra-matriz.



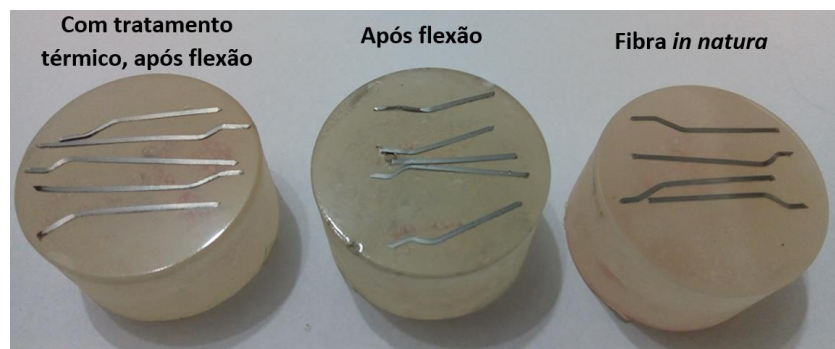
Fonte: autor (2019).

4.2.9 Caracterização das fibras de aço

As fibras de aço foram caracterizadas em três condições distintas. A primeira delas se refere à fibra *in natura*, coletada no recipiente plástico hermético para acondicionar materiais. A segunda condição representa a fibra após o ensaio de flexão, selecionada a partir do corpo de prova rompido. Por último, a terceira condição representa a fibra submetida a tratamento térmico e após ensaio de flexão, coletada junto ao corpo de prova submetido ao aquecimento controlado, após ensaio de flexão. Todas as fibras foram escolhidas de forma aleatória, com o intuito de obter uma amostra fidedigna.

Em seguida, as fibras foram divididas ao meio com uso de alicate de corte e inseridas em moldes de silicone para embutimento a frio, que foi realizado com uso de resina acrílica transparente. As amostras foram preparadas com uso de lixamento e polimento, em seguida foi feito ataque químico (reagente Nital 3%) para revelar a microestrutura do aço. A figura 42 identifica as amostras após o preparo.

Figura 42 – Amostras após embutimento e preparo da seção.



Fonte: autor (2019).

As amostras foram levadas no microscópio óptico Kontrol, IM713, a fim de obter imagens da microestrutura do aço. Por fim, as amostras foram posicionadas no microdurômetro Shimadzu, HMV, com o intuito de avaliar a microdureza Vickers das fibras de aço. O ensaio de microdureza foi realizado com aplicação de carga de 1.961 N (HV 0,2) e tempo de permanência de 15 segundos.

4.2.10 Comportamento mecânico e perfil de fissuração

O perfil de fissuração foi avaliado por meio dos corpos de prova rompidos após ensaio de flexão. Foram utilizados tanto os exemplares submetidos ao aquecimento

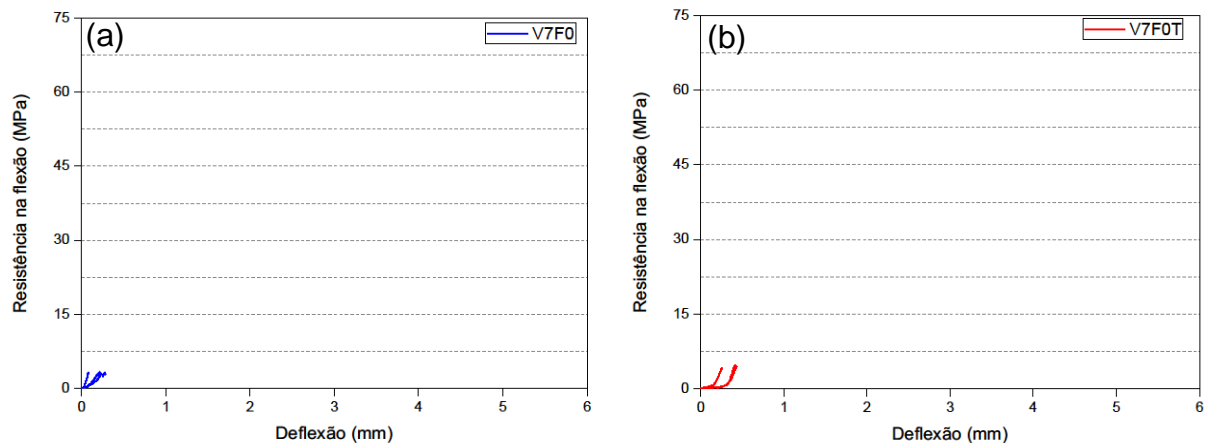
controlado, como aqueles sem tratamento térmico. Por meio de métodos gráficos, foram traçados os perfis de fissuração dos corpos de prova, para a idade de 28 dias, na forma de desenhos esquemáticos. Por fim, o perfil de fissuração foi relacionado ao comportamento mecânico, levando em conta os esforços internos atuantes.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Comportamento mecânico na flexão para 7 dias

O comportamento das vigas aos 7 dias é apresentado nas figuras 43, 44, 45 e 46, onde são representadas as curvas de resistência na flexão *versus* deflexão para cada corpo de prova. As curvas em azul representam a condição de referência sem aquecimento, enquanto aquelas com o traço vermelho os resultados após tratamento térmico. De forma geral, percebe-se que o tratamento térmico promove um acréscimo de resistência mecânica, tanto para o compósito com fibras, quanto sem fibras.

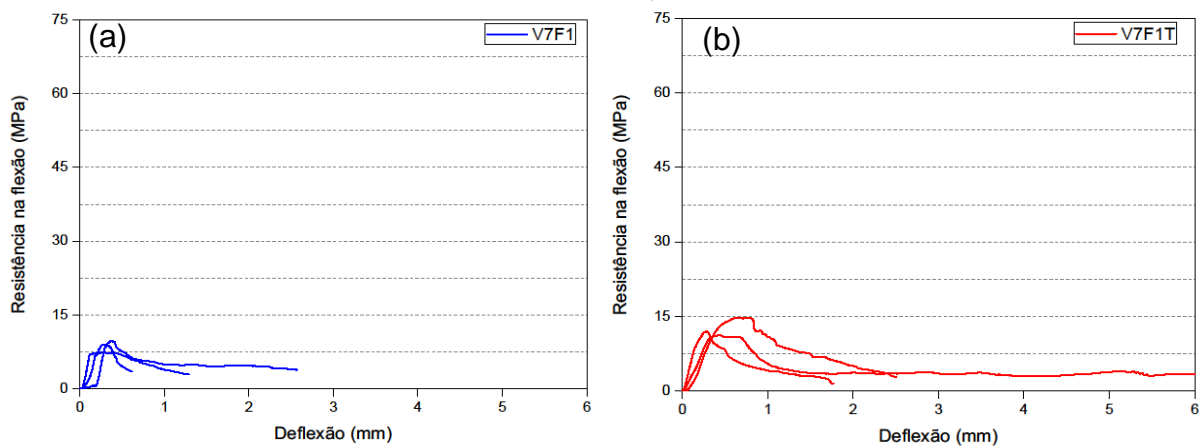
Figura 43 – Curvas tensão-deformação sem adição de fibras e 7 dias



(a) sem tratamento térmico (b) com tratamento térmico.

Fonte: autor (2019).

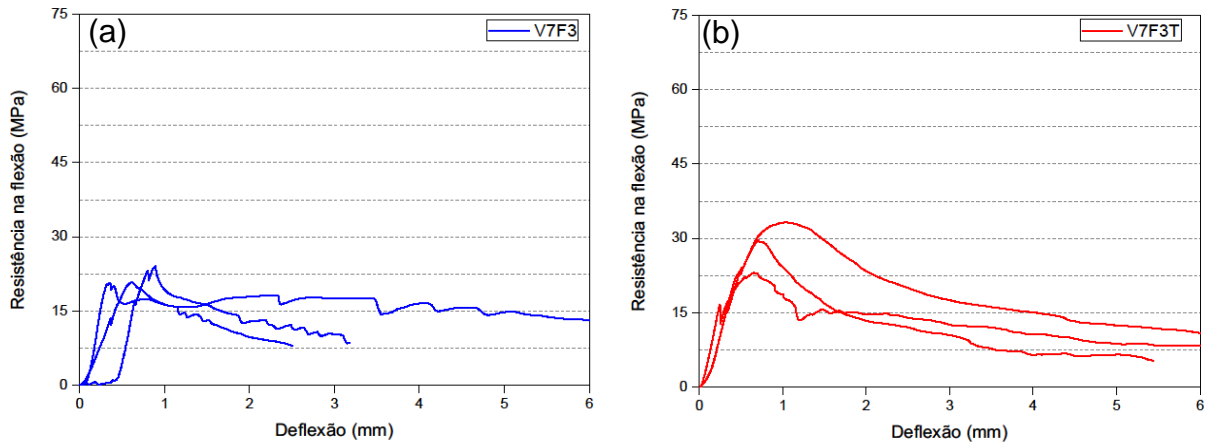
Figura 44 – Curvas tensão-deformação com 1% de fibras e 7 dias



(a) sem tratamento térmico (b) com tratamento térmico.

Fonte: autor (2019).

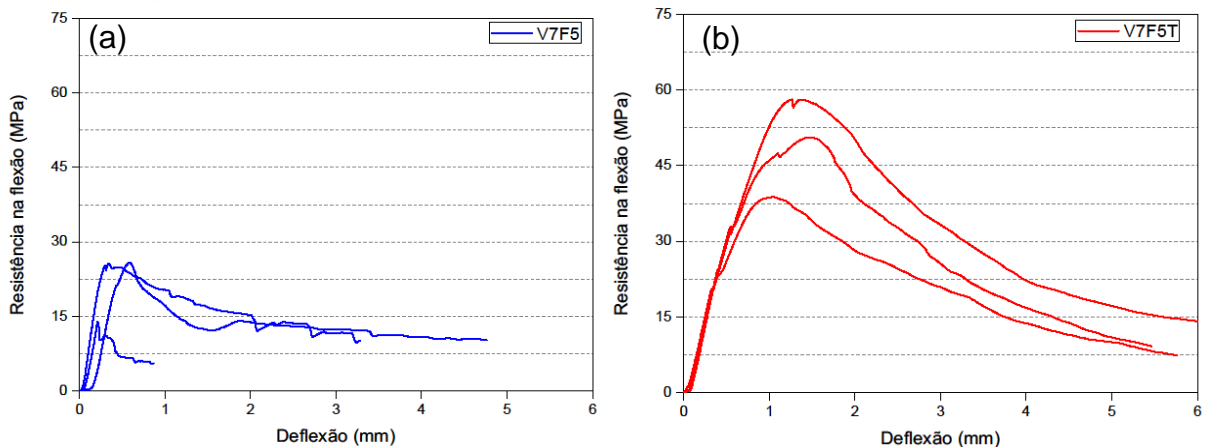
Figura 45 – Valores tensão-deslocamento com 3% de fibras e 7 dias



(a) sem tratamento térmico (b) com tratamento térmico.

Fonte: autor (2019).

Figura 46 – Valores tensão-deslocamento com 5% de fibras e 7 dias



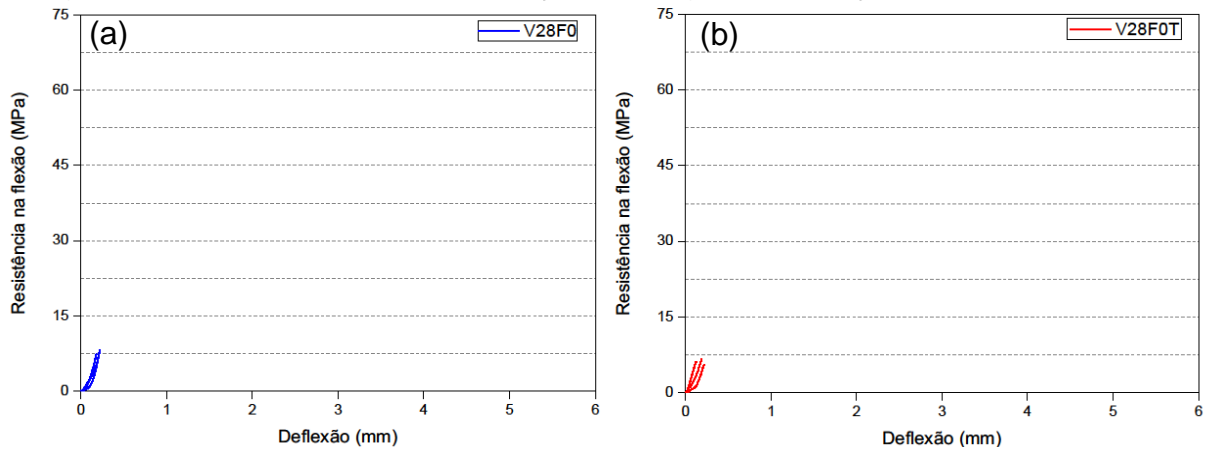
(a) sem tratamento térmico (b) com tratamento térmico.

Fonte: autor (2019).

5.2 Comportamento mecânico na flexão para 28 dias

O comportamento das vigas com 28 dias é apresentado nas figuras 47, 48, 49 e 50, também por meio de diagramas tensão *versus* deflexão. De modo geral, os resultados foram similares àqueles apresentados aos 7 dias. Aparentemente, o ganho de resistência com o tratamento térmico é maior para 7 dias (figuras 45 e 46) se comparado aos 28 dias (figuras 49 e 50).

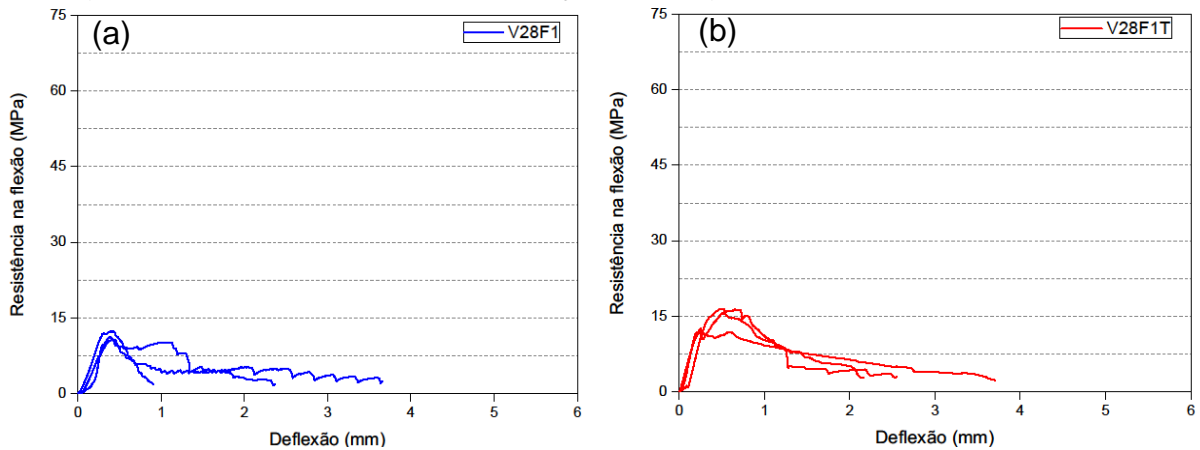
Figura 47 – Curvas tensão-deformação das vigas sem adição de fibras e 28 dias



(a) sem tratamento térmico (b) com tratamento térmico.

Fonte: autor (2019).

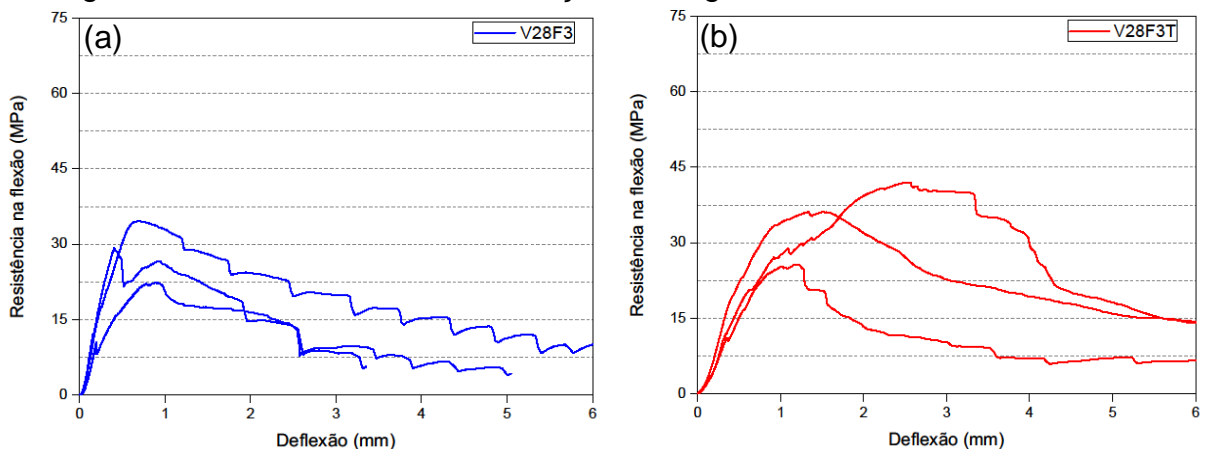
Figura 48 – Curvas tensão-deformação das vigas com 1% de fibras e 28 dias



(a) sem tratamento térmico (b) com tratamento térmico.

Fonte: autor (2019).

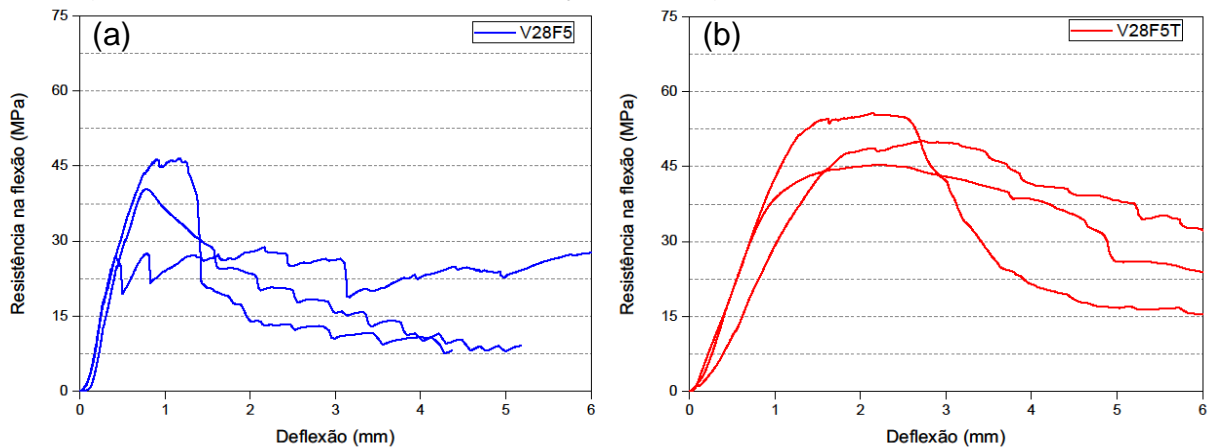
Figura 49 – Curvas tensão-deformação das vigas com 3% de fibras e 28 dias



(a) sem tratamento térmico (b) com tratamento térmico.

Fonte: autor (2019).

Figura 50 – Curvas tensão-deformação das vigas com 5% de fibras e 28 dias



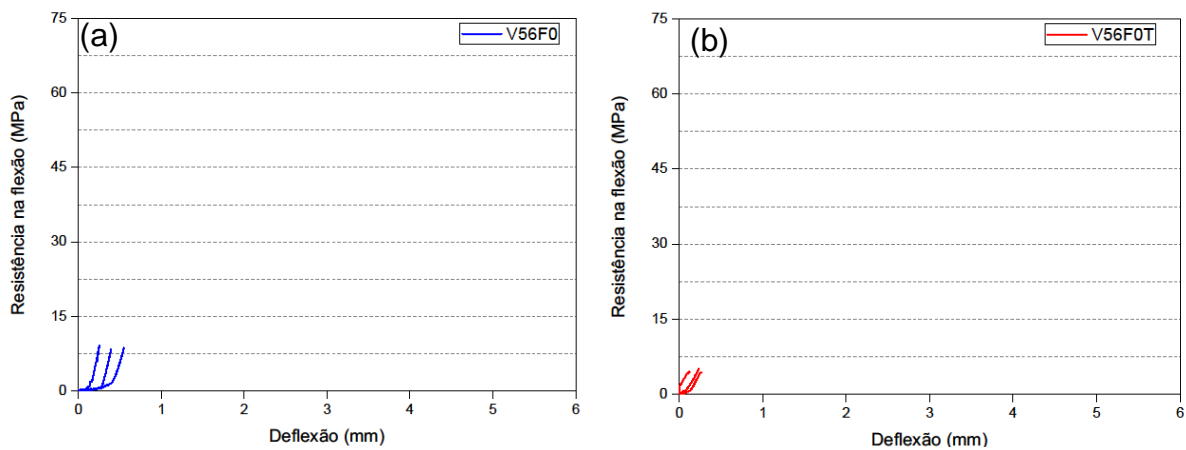
(a) sem tratamento térmico (b) com tratamento térmico.

Fonte: autor (2019).

5.3 Comportamento mecânico na flexão para 56 dias

As curvas tensão *versus* deflexão das vigas após 56 dias são apresentadas nas figuras 51, 52, 53 e 54. De modo geral, os resultados foram similares àqueles obtidos para 7 e 28 dias. Houve variação nos valores do módulo de ruptura, em virtude dos efeitos conjuntos da idade e do tempo de cura.

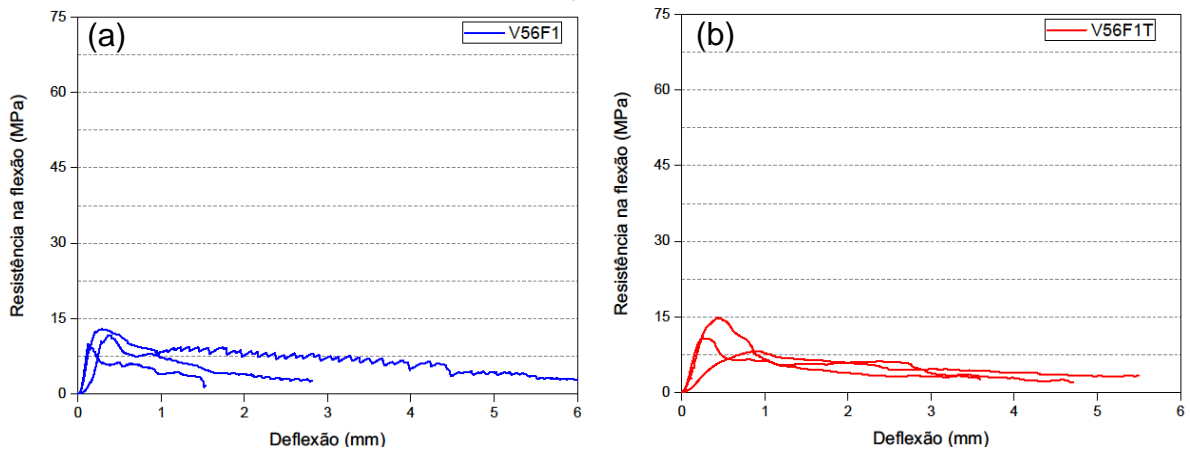
Figura 51 – Curvas tensão-deformação das vigas sem adição de fibras e 56 dias



(a) sem tratamento térmico (b) com tratamento térmico.

Fonte: autor (2019).

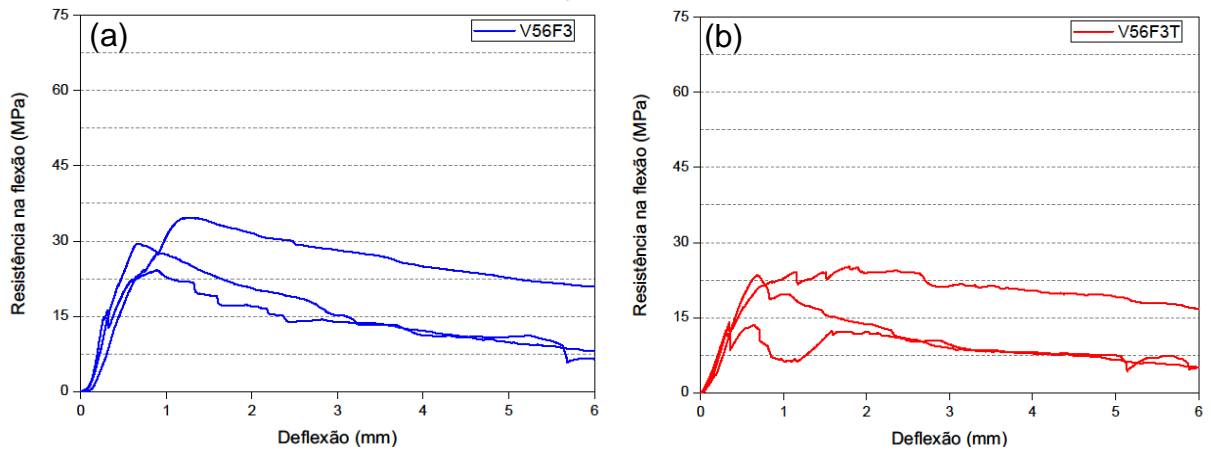
Figura 52 – Curvas tensão-deformação das vigas com 1% de fibras e 56 dias



(a) sem tratamento térmico (b) com tratamento térmico.

Fonte: autor (2019).

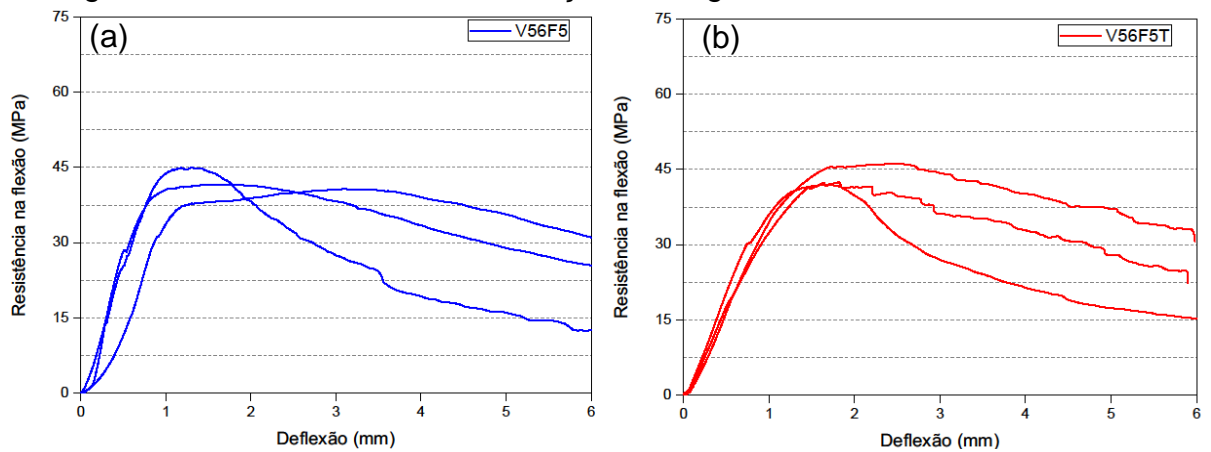
Figura 53 – Curvas tensão-deformação das vigas com 3% de fibras e 56 dias



(a) sem tratamento térmico (b) com tratamento térmico.

Fonte: autor (2019).

Figura 54 – Curvas tensão-deformação das vigas com 5% de fibras e 56 dias



(a) sem tratamento térmico (b) com tratamento térmico.

Fonte: autor (2019).

5.4 Parâmetros do comportamento mecânico

O comportamento mecânico foi avaliado por meio de três parâmetros, resistência na flexão, tenacidade e deflexão. Conforme mencionado no capítulo “Materiais e métodos”, a resistência é obtida a partir das curvas tensão *versus* deflexão, apresentadas no tópico anterior, tomando-se o valor máximo apresentado. A tenacidade e deflexão são extraídos das curvas carga *versus* deflexão, expostas com detalhes no apêndice A, levando em conta a área sobre a curva e o valor máximo de deflexão até o limite de 6,0 mm, respectivamente.

Para todas as figuras deste capítulo, cada valor representa a média de três corpos de prova ensaiados em uma mesma condição. A condição de referência sem aquecimento está identificada em azul e cada média é identificada com um quadrado. O comportamento após tratamento térmico é apresentado em vermelho e as médias com um triângulo. As linhas mostram a tendência dos dados analisados e junto de cada valor está o desvio padrão em torno da média.

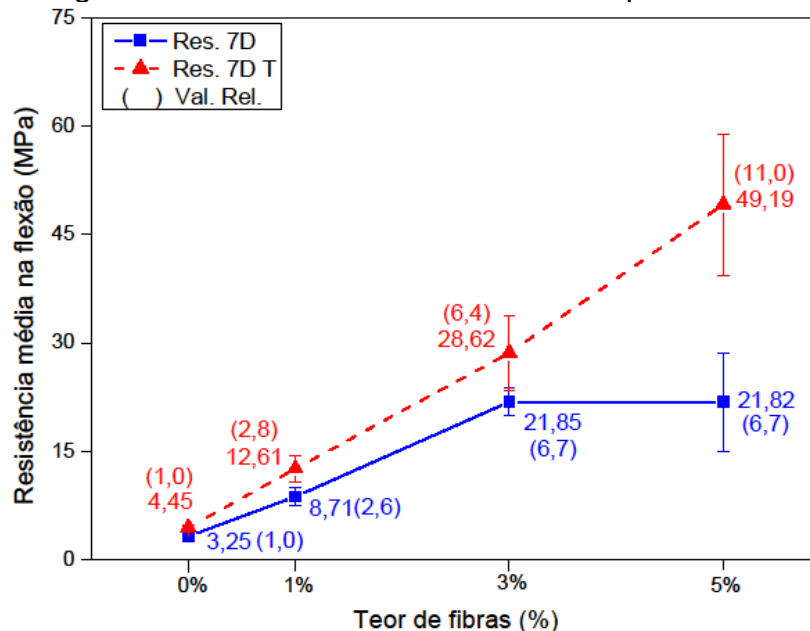
Optou-se por fixar a idade e analisar cada um dos parâmetros, seja resistência mecânica, tenacidade ou deflexão, em função do teor de fibras (0%, 1%, 3% e 5%), levando em conta também o tratamento térmico. Dessa forma, para cada idade obteve-se um gráfico diferente. Com o intuito de esclarecer o comportamento à medida que o teor de fibras aumenta, entre parênteses estão os valores relativos em comparação à referência sem fibras que possui valor unitário. Os parâmetros mecânicos são residuais para as observações em que houve tratamento térmico do compósito. Isto é, foram obtidos à temperatura ambiente, resfriados após aquecimento controlado.

5.4.1 Resistência residual na flexão

A resistência média residual na flexão é representada nas figuras 55, 56 e 57, para as idades de 7, 28 e 56 dias, respectivamente. De forma geral, existe uma tendência de aumento da resistência à media que o teor de fibras aumenta. Esse desempenho é sólido nos estudos voltados para CCRF, conforme Zollo (1997), Naaman (2003), Brandt (2008), Naaman e Reinhardt (2015) e Fantilli (2018). Então, o SIFCON seria um extremo superior, onde uma grande quantidade de fibras é adicionada nos moldes,

muitas vezes a fração máxima suportada, consoante Lankard (1984), Naaman *et al.* (1993) e Elavarasi (2017). Se comparados aos exemplares de referência, aqueles com maior aumento contêm maiores teores de fibras, ou seja, 5% de fibras. Os menores acréscimos são para os compósitos com 1%, o que indica uma forte relação entre o teor de fibras e a resistência na flexão. A resistência na flexão aos sete dias com tratamento térmico saltou de 4,45 MPa (sem fibras) para 49,19 MPa (5% de fibras), dessa forma 11,0 vezes maior. O incremento de resistência para 1% de fibras fica em torno de 1 a 2 vezes, para 3% de fibras varia de 4 a 6 vezes e para 5% oscila de 4 a 11 vezes, sempre comparado ao modelo sem fibras.

Figura 55 – Resistência média na flexão para 7 dias.

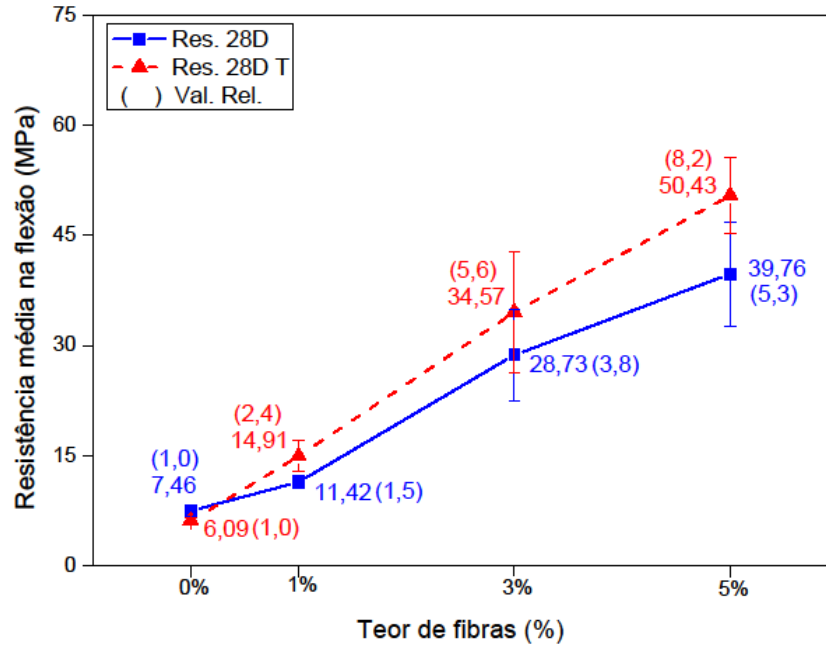


Fonte: autor (2019).

Para o modelo de referência sem fibras e sem tratamento térmico, a resistência na flexão aumentou ao longo das idades, por exemplo 3,25 MPa para 7 dias, 7,46 MPa aos 28 dias e 8,69 MPa em 56 dias, o que confirma o comportamento observado na literatura segundo Metha e Monteiro (2014), Yoo e Banthia, (2016) e Lee *et al.* (2018). Ao contrário, para o modelo com adição de fibras, a idade se mostrou pouco influente, principalmente levando em consideração a variabilidade dos dados. Entretanto, sugere-se que a idade seja benéfica à resistência mecânica dos CCRF, assim como retratado em observações prévias por Plagué, Desmettre e Charron (2017). Os maiores ganhos de resistência foram de 7 para 28 dias, o que pode ser explicado pelo aglomerante utilizado que possui alta resistência inicial (CPV ARI segundo ABNT NBR

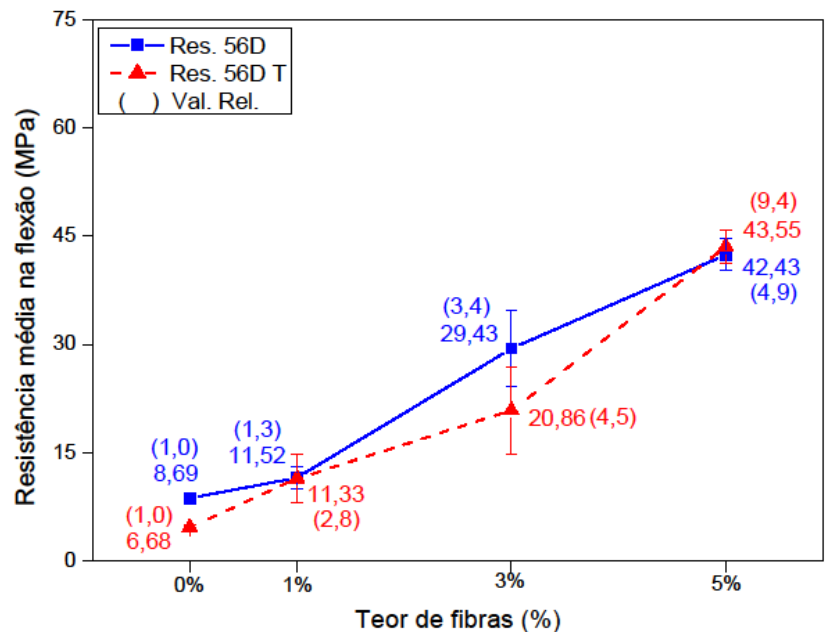
5733 e tipo III conforme ASTM C150/150M-18), que favorece as idades mais jovens. Entretanto, de 28 para 56 dias não se vê diferença significativa na resistência.

Figura 56 – Resistência média na flexão para 28 dias.



Fonte: autor (2019).

Figura 57 – Resistência média na flexão para 56 dias.



Fonte: autor (2019).

O tratamento térmico por volta de 250°C se mostrou influente na resistência à flexão quando existe a presença de fibras no compósito, consoante Ju *et al.* (2015), Beglarigale *et al.* (2016) e Abid (2018). Esse comportamento particular é retratado

com detalhes no tópico 5.9 do presente capítulo. Ao longo das idades, as curvas que representam as condições com tratamento térmico tendem a se aproximar da referência sem aquecimento. Esse fato sugere que o tratamento térmico é mais influente em idades jovens, se comparado com idades intermediárias ou avançadas. Fato distinto ocorreu para o compósito sem fibras, para o qual existe tendência de distanciamento entre os valores de resistência no decorrer das idades. Nesse caso específico, o tratamento térmico é de certa forma desfavorável à resistência na flexão, o que foi investigado por outros pesquisadores como Hager (2013), Ma *et al.* (2015) e Novak (2018).

A variabilidade dos dados, representada pelo desvio padrão, tende a aumentar em função do teor de fibras, exceto para 56 dias. Logo, os resultados obtidos com maiores teores de fibras (5%) possuem maior variabilidade. Aos 56 dias o desvio padrão foi bem maior para 3% de fibras, se comparado aos outros percentuais. A questão da variabilidade ao se trabalhar com CCRF, utilizando modelos reduzidos de vigas, foi retratada em outras pesquisas como Rambo, Silva e Toledo Filho (2014) e Monte (2015), o que também surgiu nesse estudo.

Aos 7 dias (figura 55) observa-se um comportamento destoante da resistência para a condição sem tratamento térmico com 5% de fibras. Nesse ponto, a resistência se manteve constante em torno de 21MPa, bem próxima àquela obtida para 3% de fibras. Esse fato pode ser atribuído à variabilidade dos dados, inclusive, pode ser observado na figura 46-a do tópico anterior que existe um corpo de prova que apresentou comportamento oposto aos outros dois.

A distribuição de fibras ao longo da região mais solicitada por esforços de tração resulta em elevados acréscimos de resistência na flexão. Com essa nova modalidade de distribuição do reforço, as fibras se localizam em posições preferenciais, justamente onde os esforços de tração são atuantes. Isto implica em maior contribuição das fibras para transferência de tensão entre as fissuras que se formam durante aplicação das cargas. Resultados semelhantes foram obtidos por Balaji e Thirugnanam (2018), com notáveis incrementos de resistência na flexão, quando a concentração de fibras é inserida na região tracionada do compósito.

5.4.2 Tenacidade residual

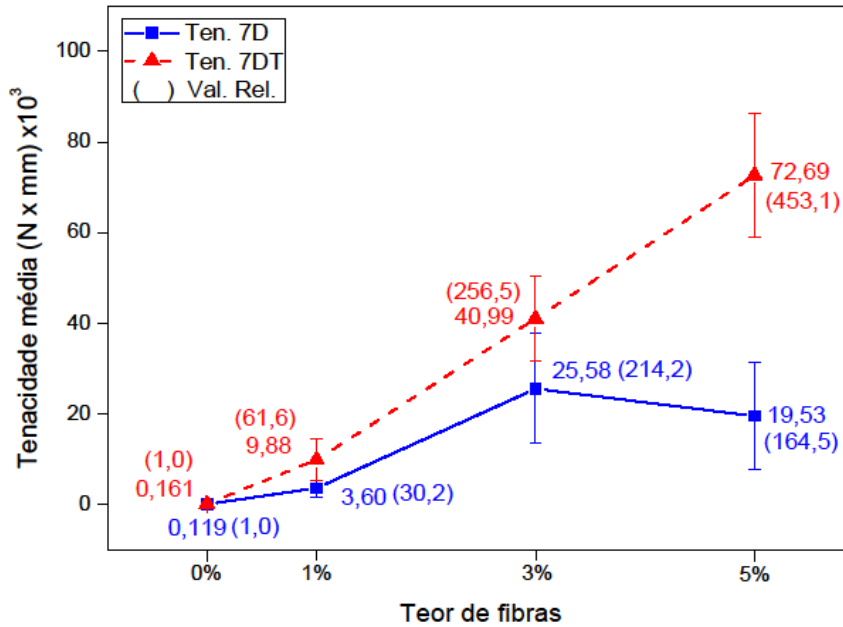
No apêndice A estão as curvas individuais de carga *versus* deflexão, para todos os corpos de prova, e as tabelas mostram os valores de tenacidade. A região *hachurada* corresponde à área abaixo das curvas e representa a tenacidade. Conforme mencionado no capítulo “Materiais e Métodos”, foram utilizados seis pontos notáveis para o cálculo da tenacidade, correspondentes às deflexões iguais a $L/600$, $L/150$, $L/100$, $L/60$, $L/40$ e $L = 6\text{mm}$. Cada um desses valores de deflexão são representados por linhas verticais traço-ponto, que delimitam áreas proporcionais às respectivas deflexões.

Ao analisar as curvas do apêndice A, percebe-se que os valores de tenacidade dependem intimamente do estágio final do ensaio, ou melhor, até onde as curvas se prolongam. Algumas vezes, o ensaio foi finalizado pelo programa de controle, que identificou alguma das premissas de “parada”. Porém, pelo visto o ensaio poderia continuar com aplicação de carga e consequentes deformações, o que resultaria em maiores valores de deflexão e tenacidade.

É obvio que os pontos notáveis de deflexão favorecem a comparação entre os valores obtidos e estabelecem um padrão para análise. As condições impostas para cada exemplar (idade, teor de fibras e tratamento térmico) influenciam de forma significativa o comportamento das curvas carga *versus* deflexão. As diferenças com relação à idade são tênues, mas podem ser observadas, por exemplo, entre as curvas características V7F3CP2 (figura A.8), V28F3CP1 (figura A.31) e V56F3CP1 (figura A.55), em ordem crescente de tenacidade. O teor de fibras é a condição que pode ser mais facilmente observada, por exemplo, entre as curvas V28F0CP1 (figura A.25), V28F1CP2 (figura A.29), V28F3CP3 (figura A.33) e V28F5CP3 (figura A.36), em ordem crescente de tenacidade. A influência do tratamento térmico foi sutil, entretanto representativa, podendo ser examinada entre as curvas V7F3CP2 (figura A.8) e V7F3TCP2 (Figura A.20), ou V28F1CP2 (figura A.29) e V28F1TCP3 (figura A.42), ou ainda V56F5CP3 (figura A.60) e V56F5TCP1 (figura A.70), nas quais o tratamento térmico favoreceu a tenacidade.

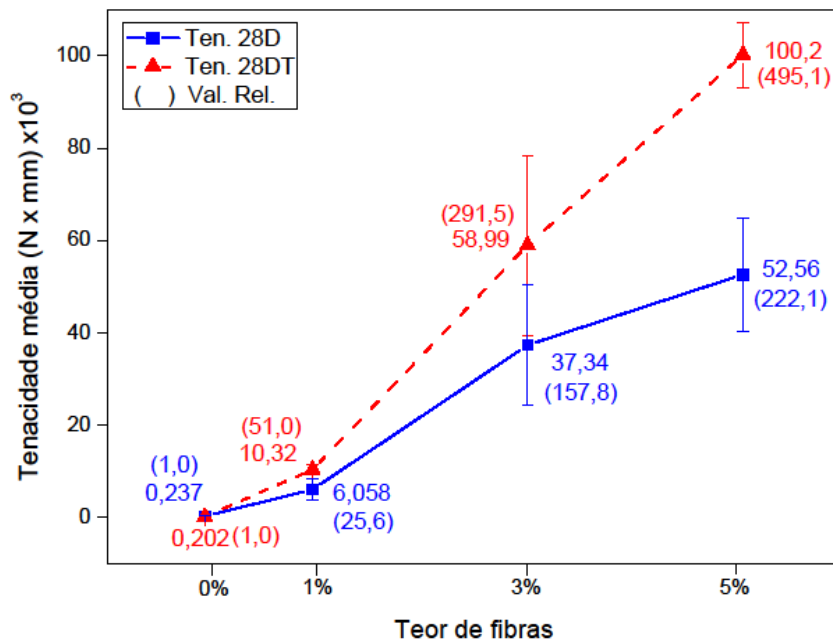
As figuras 58, 69 e 60 mostram o comportamento da tenacidade média em função do teor de fibras (0%, 1%, 3% e 5%), para as idades de 7, 28 e 56 dias, de forma semelhante àquela retratada para a resistência na flexão.

Figura 58 – Tenacidade média para 7 dias.



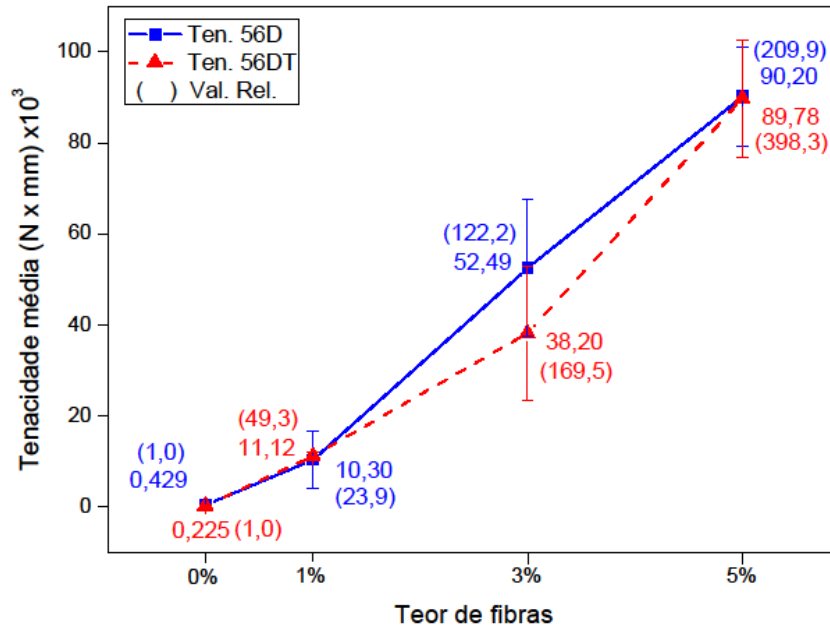
Fonte: autor (2019).

Figura 59 – Tenacidade média para 28 dias.



Fonte: autor (2019).

Figura 60 – Tenacidade média para 56 dias.



Fonte: autor (2019).

Em princípio, é observado que a tenacidade é função da resistência e da deflexão combinados. É representada matematicamente pela área sobre a curva de carga *versus* deflexão e possui sentido físico relacionado com a energia absorvida durante aplicação das cargas e consequentes deslocamentos. Logo, os valores de resistência e deflexão influenciam diretamente o comportamento da tenacidade.

Percebe-se que a tenacidade possui tendência de crescimento praticamente linear à medida que o teor de fibras avança. O melhor resultado se deu aos 28 dias, com tratamento térmico, onde a tenacidade saltou de $0,237 \times 10^3$ N x mm (0% de fibras) para $100,2 \times 10^3$ N x mm (5% de fibras), o que representa 495,1 vezes de variação entre os valores, ou seja, um excelente incremento na absorção de energia. As variações ficam em torno de 20 a 60 vezes para 1% de fibras, cerca de 100 a 300 vezes para 3% de fibras e por volta de 200 a 500 vezes para 5% de fibras. Destarte, fica evidente que o reforço por fibras melhora de forma expressiva a tenacidade do material.

A idade influencia de forma favorável a tenacidade, seja com ou sem tratamento térmico, a princípio de forma crescente entre as idades. Os aumentos significativos ocorreram de 7 para 28 dias, enquanto de 28 para 56 dias houve tendência de constância ou até decréscimo.

O tratamento térmico possui efeito benéfico na tenacidade, principalmente nas idades de 7 e 28 dias. Na idade de 56 dias, o tratamento térmico não resultou em acréscimos significativos de tenacidade, ou ainda causou redução. Observou-se tendência de aproximação dos valores com e sem tratamento térmico, evidenciando que o aquecimento é mais favorável nas idades mais jovens.

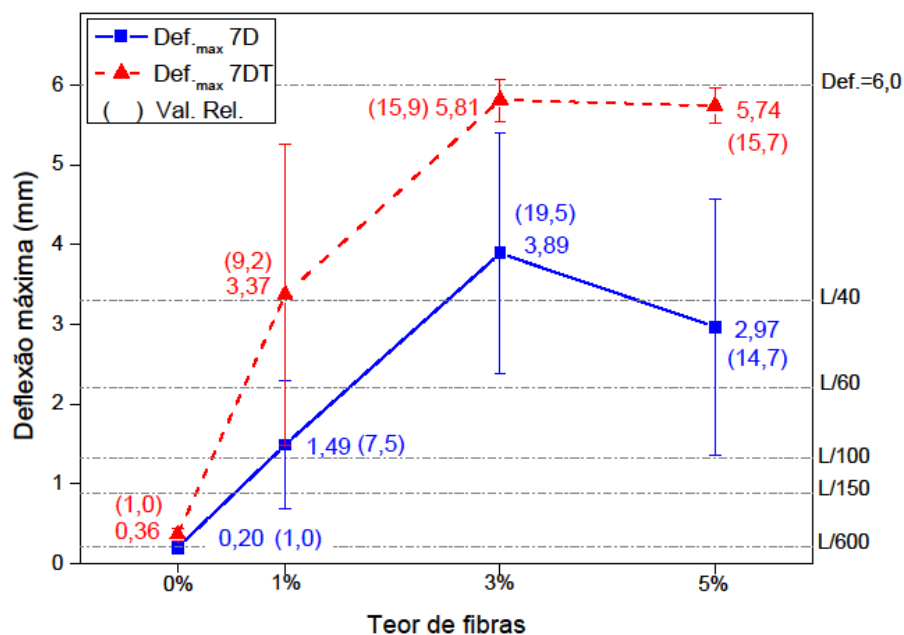
A variabilidade dos dados é semelhante àquela retratada para a resistência e mais acentuada para os teores de 3% e 5% de fibras. As condições de tratamento térmico e idade não influenciam a dispersão dos dados de forma significativa.

Em 7 dias, houve queda de tenacidade ao se avaliar os teores de 3% e 5% de fibras, comportamento análogo à resistência. A variabilidade dos dados e a existência de valores atípicos explicam esse desempenho.

5.4.3 Deflexão residual

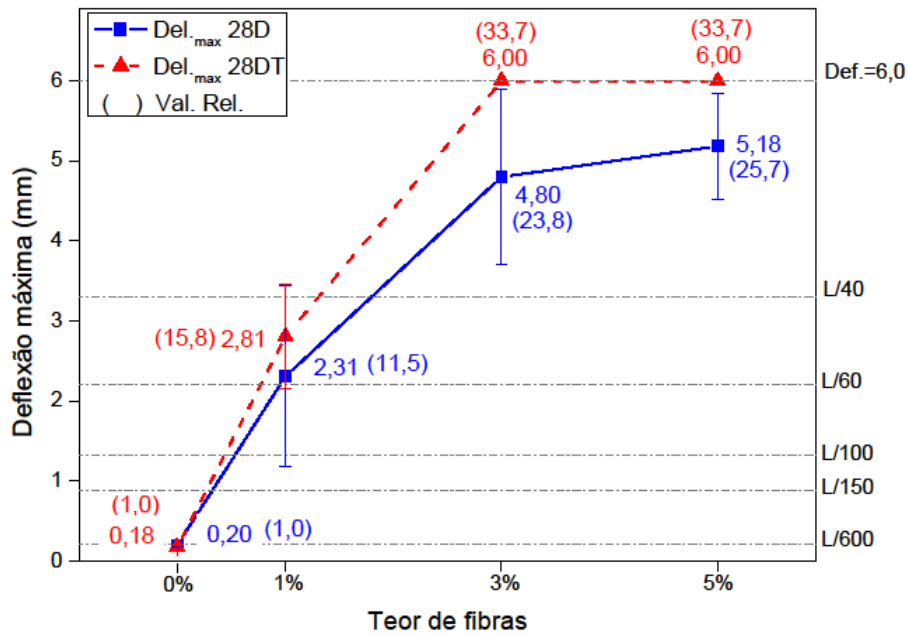
A deflexão residual média é apresentada nas figuras 61, 62 e 63, para as idades de 7, 28 e 56 dias, respectivamente, de forma semelhante àquela utilizada para a resistência na flexão. As linhas horizontais traço-ponto definem os valores de deflexão correspondentes aos pontos notáveis adotados para a tenacidade.

Figura 61 – Deflexão média para 7 dias.



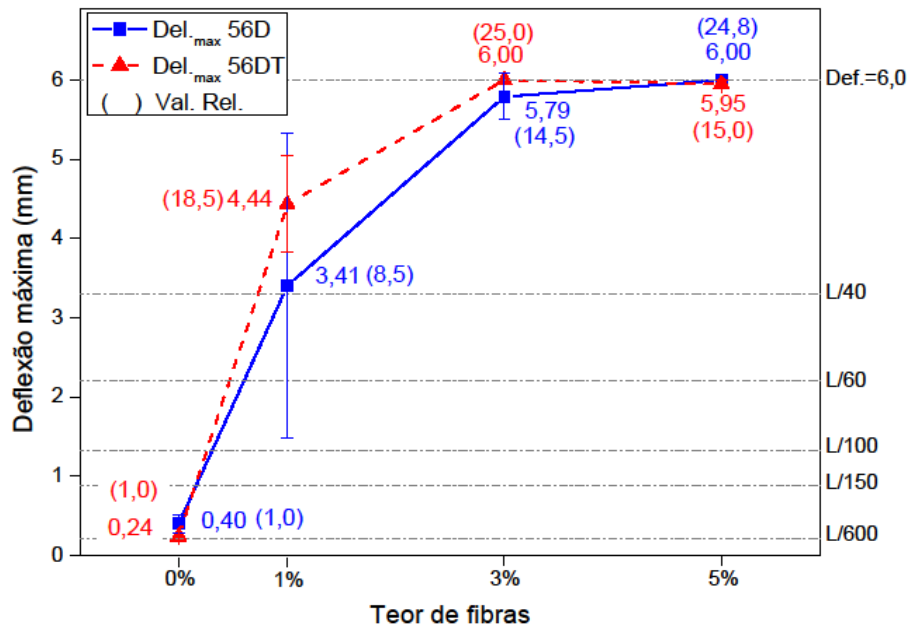
Fonte: autor (2019).

Figura 62 – Deflexão média para 28 dias.



Fonte: autor (2019).

Figura 63 – Deflexão média para 56 dias.



Fonte: autor (2019).

De modo geral, as deflexões aumentam ao longo do teor de fibras. As menores deflexões são alcançadas para o compósito de referência e as maiores para teores de fibras iguais a 5%. As linhas de tendência indicam que o comportamento se distanciou da linearidade e possivelmente se assemelha ao comportamento da função raiz quadrada ($y = a \cdot x^{1/2}$). Todavia, não é objeto desse trabalho desenvolver

métodos de interpolação ou regressão de dados. O que se tem aqui é apenas uma tendência geral de forma qualitativa e visual entre valores discretos avaliados (0%, 1%, 3% e 5%). O crescimento das deflexões é mais acentuado com 1% e 3% de fibras, enquanto para 5% os valores tendem a se estabilizar, principalmente quando não há aquecimento. A deflexão foi avaliada até o valor de 6,0 mm, o que influencia a análise. Logo, os teores de 3% e 5% tendem ao valor limite. Os maiores acréscimos de deflexão ocorrem aos 28 dias, com tratamento térmico, onde a deflexão varia de 0,18mm para 6,00mm, o que representa um fator multiplicador de 33,7 vezes.

À primeira vista, levando em conta a variabilidade dos dados, a idade não influencia de forma significativa as deflexões, tanto para o compósito de referência, como para aqueles exemplares submetidos a tratamento térmico. Entretanto, observa-se que existe tendência de crescimento dos valores, até se aproximarem do limite de 6,00mm, ao longo das idades.

O tratamento térmico também beneficia as deflexões e resulta no comportamento pseudo-dúctil mais acentuado do compósito. Esse fato pode ser avaliado tanto pelas tabelas do apêndice A, onde constam as deflexões máximas obtidas, bem como entre as figuras 45-a e 45-b, 46-a e 46-b, 49-a e 49-b, 50-a e 50-b, 54-a e 54-b, que contêm as curvas tensão *versus* deflexão. Com tratamento térmico fica visível que as curvas se prolongam no sentido do “eixo x” e que o compósito experimenta maiores deformações durante aplicação das cargas. Ou melhor, a tensão oscila de forma mais suave ao longo das deformações, mantendo uma faixa de tensões e suportando as cargas durante mais tempo. Com isso, a energia transmitida pelas cargas externas é absorvida, as tensões se acomodam e são distribuídas ao longo das fibras e matriz, impedindo o mecanismo de propagação abrupto de fissuras e consequente colapso do elemento. Esse fenômeno também está presente no compósito de referência, entretanto é mais pronunciado com o tratamento térmico.

A dispersão dos dados é ponto relevante ao se trabalhar com CCRF utilizando modelos reduzidos, conforme mencionado no item anterior e retratado por Rambo, Silva e Toledo Filho (2014) e Monte (2015). Contudo, a variabilidade dos dados de deflexão foi elevada, o que já era esperado, tendo em vista que cada um dos exemplares chegou à ruptura em um determinado ponto. Ao que tudo indica, os

valores de deflexão não são um grande problema à primeira vista, bastando ver que as deflexões não influenciam diretamente a resistência máxima alcançada e sim o efeito pseudo-dúctil do compósito. Outro ponto, ainda mais relevante, se deve ao final do ensaio de flexão em si, onde muitas vezes os compósitos não experimentaram as deformações efetivamente suportadas, ou seja, restou espaço para maiores deformações além daquelas obtidas. Ainda, foi utilizado o critério de limite de deflexões, onde a deflexão máxima foi fixada em 6,0 mm, o que definitivamente influenciou a análise, visto que muitos exemplares registraram deflexões além do limite estabelecido.

Acompanhando a tendência verificada para resistência e tenacidade, aos 7 dias houve decréscimo de deflexão, comparando os teores de fibras iguais a 3% e 5%. A variabilidade e valores atípicos explicam o comportamento.

5.5 Avaliação estatística e correlação entre as variáveis

O presente capítulo aborda o tratamento estatístico realizado nos dados coletados a partir das curvas tensão *versus* deflexão, para resistência na flexão, tenacidade e deflexão. Os dados originais utilizados na análise são apresentados na tabela C.1 do apêndice C, enquanto os dados transformados estão relacionados na tabela C.2. Todos os resultados da análise estatística foram obtidos com uso das variáveis transformadas. Os valores para cada variável resposta são apresentados com os dados originais.

As tabelas C.3 e C.4, do apêndice C, mostram as quantidades de corpos de prova utilizados no experimento, em cada uma das condições. Os exemplares foram agrupados de acordo com o objetivo da análise. Dessa forma, é possível identificar o número total de corpos de prova utilizados.

Na tabela 10, são apresentados a média e o desvio padrão para a idade. O intervalo de confiança de 95%, com limites inferior e superior, se refere à média. O valor médio para as variáveis resposta em cada condição (7, 28 e 56 dias) foram obtidos utilizando 24 corpos de prova, conforme tabelas C.3 e C.4 do apêndice C.

De modo geral, avaliando a idade, a maior resistência foi encontrada aos 28 dias (24,171 MPa) e a menor em 7 dias (18,813 MPa). Na tenacidade e na deflexão, o

maior média foi alcançada aos 56 dias (36593,250 N x mm e 4,028 mm, respectivamente) e a menor em 7 dias (21570,417 N x mm e 2,981 mm, respectivamente).

Tabela 10 – Média, desvio padrão e intervalo de confiança para as variáveis resposta originais, em relação à idade.

Variável resposta	Idade	Média	Desvio padrão	Intervalo de confiança 95%	
				Limite inferior	Limite superior
Resistência na flexão (MPa)	7 dias	18,813	14,923	17,025	20,600
	28 dias	24,171	15,980	22,383	25,959
	56 dias	21,556	14,567	19,769	23,344
Tenacidade (N x mm)	7 dias	21570,417	25479,217	16855,377	26285,456
	28 dias	33240,375	35640,055	28525,335	37955,415
	56 dias	36593,250	37351,236	31878,21	41308,29
Deflexão (mm)	7 dias	2,981	2,359	2,561	3,401
	28 dias	3,435	2,399	3,015	3,855
	56 dias	4,028	2,471	3,608	4,448

Fonte: autor (2019).

Na tabela 11 são apresentados a média e o desvio padrão para o teor de fibras. O intervalo de confiança de 95%, com limites inferior e superior, se refere à média. O valor médio para as variáveis resposta em cada condição (0%, 1%, 3% e 5%) foram obtidos utilizando 18 corpos de prova, conforme tabelas C.3 e C.4 do apêndice C.

Tabela 11 – Média, desvio padrão e intervalo de confiança para as variáveis resposta originais, em relação ao teor de fibras.

Variável resposta	Fibras	Média	Desvio padrão	Intervalo de confiança 95%	
				Limite inferior	Limite superior
Resistência na flexão (MPa)	0%	5,763	1,903	3,699	7,828
	1%	11,750	2,434	9,686	13,814
	3%	27,344	6,659	25,280	29,409
	5%	41,195	10,703	39,131	43,259
Tenacidade (N x mm)	0%	229,000	115,583	-5215,459	5673,459
	1%	8547,722	4549,157	3103,263	13992,181
	3%	42267,667	18462,767	36823,208	47712,125
Deflexão (mm)	5%	70827,667	30810,056	65383,208	76272,125
	0%	0,264	0,114	-0,221	0,749
	1%	2,971	1,636	2,486	3,456
	3%	5,383	1,137	4,898	5,868
	5%	5,307	1,337	4,822	5,792

Fonte: autor (2019).

No geral, avaliando o teor de fibras, a resistência e tenacidade apresentaram as maiores médias para 5% de fibras (41,195 MPa e 70827,667 N x mm, respectivamente) e as menores para 0% (5,763 MPa e 229 N x mm, respectivamente). Para deflexão, as maiores médias foram apresentadas para 3% e 5% (5,383 mm e 5,307, respectivamente) e a menor em 0% (0,264 mm).

Na tabela 12 são apresentados a média e o desvio padrão para o tratamento térmico. O intervalo de confiança de 95%, com limites inferior e superior, se refere à média. O valor médio para as variáveis resposta em cada condição (sem e com tratamento térmico) foram obtidos utilizando 36 corpos de prova, conforme tabelas C.3 e C.4 do apêndice C. No geral, as maiores médias foram obtidas com aplicação do tratamento térmico, para as variáveis resistência, tenacidade e deflexão (23,437 MPa, 36064,528 N x mm e 3,909 mm, respectivamente).

Tabela 12 – Média, desvio padrão e intervalo de confiança para as variáveis resposta originais, em relação ao tratamento térmico.

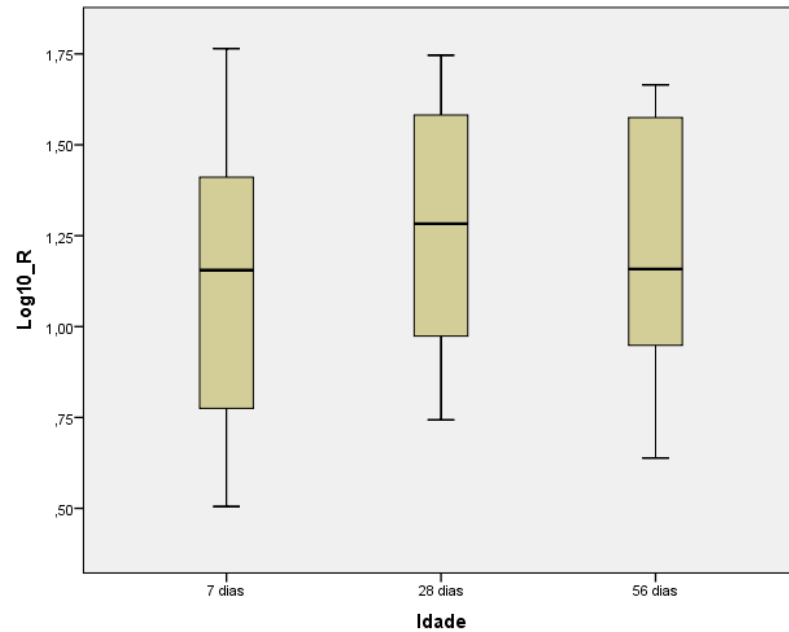
Variável resposta	Tratamento térmico	Média	Desvio padrão	Intervalo de confiança 95%	
				Limite inferior	Limite superior
Resistência na flexão (MPa)	Não	19,590	12,975	18,130	21,049
	Sim	23,437	17,029	21,977	24,896
Tenacidade (N x mm)	Não	24871,5	29005,558	21021,686	28721,314
	Sim	36064,528	36846,191	32214,714	39914,342
Deflexão (mm)	Não	3,054	2,327	2,711	3,397
	Sim	3,909	2,458	3,566	4,252

Fonte: autor (2019).

As figuras 64, 65 e 66 mostram a distribuição e variabilidade dos dados para a condição idade, por meio de gráficos tipo *boxplot*. Para a resistência, verificou-se pequenos desvios de simetria na distribuição dos dados, em 7 e 56 dias (figura 64), observado pelo deslocamento da mediana. Porém, o teste *K-S* confirmou a normalidade dos dados, com $p > 0,05$ (tabela C.5). Para a tenacidade e deflexão (figuras 65 e 66), também foram encontrados desvios de simetria, observado pelo deslocamento mais acentuado da mediana, e o teste *K-S* (tabela C.5), com $p < 0,05$, identificou que os dados não são normalmente distribuídos. As caixas dos *boxplot*, para as três idades, possuem tamanhos similares, indicando variabilidade

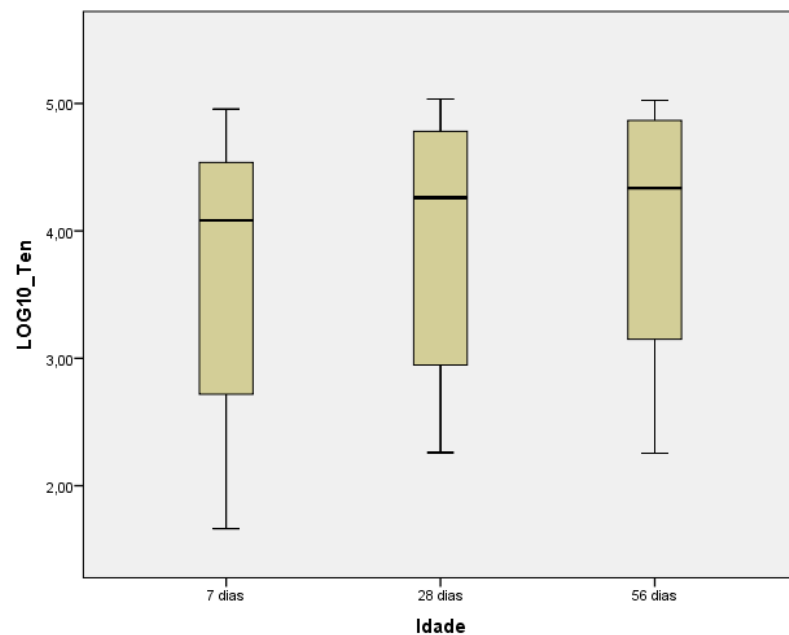
aproximadamente constante, o que é confirmado pelo teste de Levine, com $p > 0,05$ (tabela C.5). Não foram encontrados valores atípicos para a idade.

Figura 64 – Gráfico *boxplot* da resistência em função da idade.



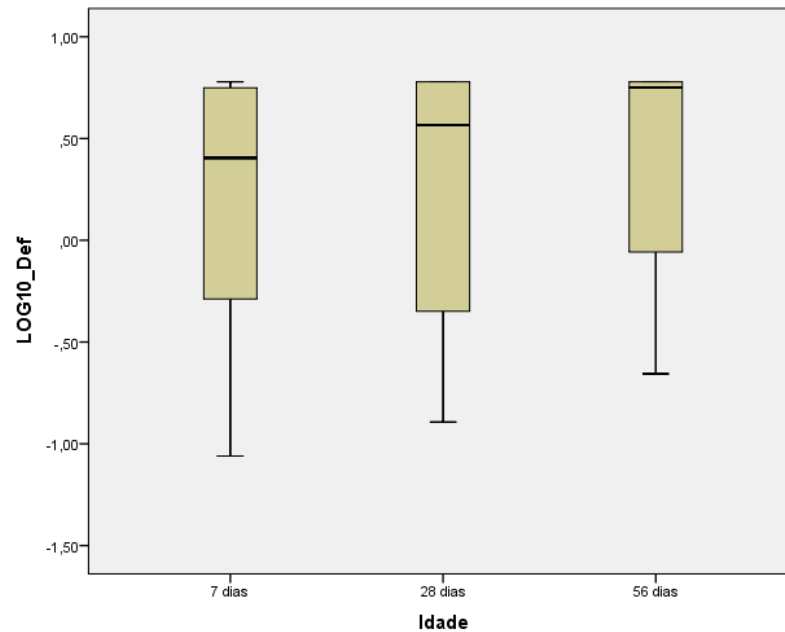
Fonte: autor (2019).

Figura 65 – Gráfico *box plot* da tenacidade em função da idade.



Fonte: autor (2019).

Figura 66 – Gráfico *box plot* da deflexão em função da idade.

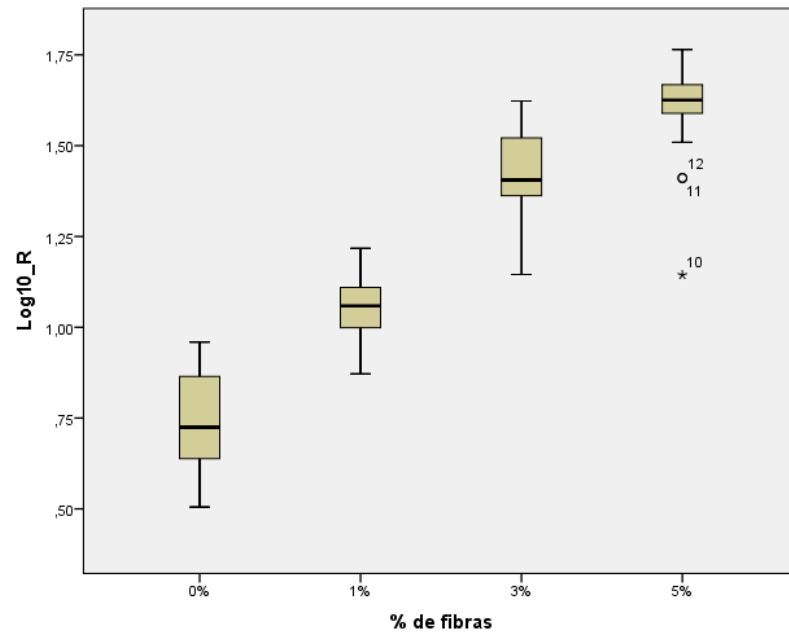


Fonte: autor (2019).

As figuras 67, 68 e 69 mostram a distribuição, variabilidade e valores atípicos, dos dados para a condição idade, por meio de gráficos tipo *boxplot*. Levando em conta a resistência (figura 67), para 0% de fibras houve um pequeno desvio de simetria e em 3% desvio acentuado, observados pelo deslocamento da mediana. O teste K-S (tabela C.6), identificou que os dados são normalmente distribuídos para 0%, 1% e 3% de fibras, com $p > 0,05$, o que não ocorreu para 5% de fibras, com $p < 0,05$. As caixas dos *boxplot* possuem tamanhos diferentes, porém próximos, confirmado pelo teste de Levine, com $p > 0,05$ (tabela C.6). Em 5% de fibras verificou-se a existência valores atípicos, mas não influentes. Verifica-se claramente a tendência crescente à medida que o teor de fibras aumenta.

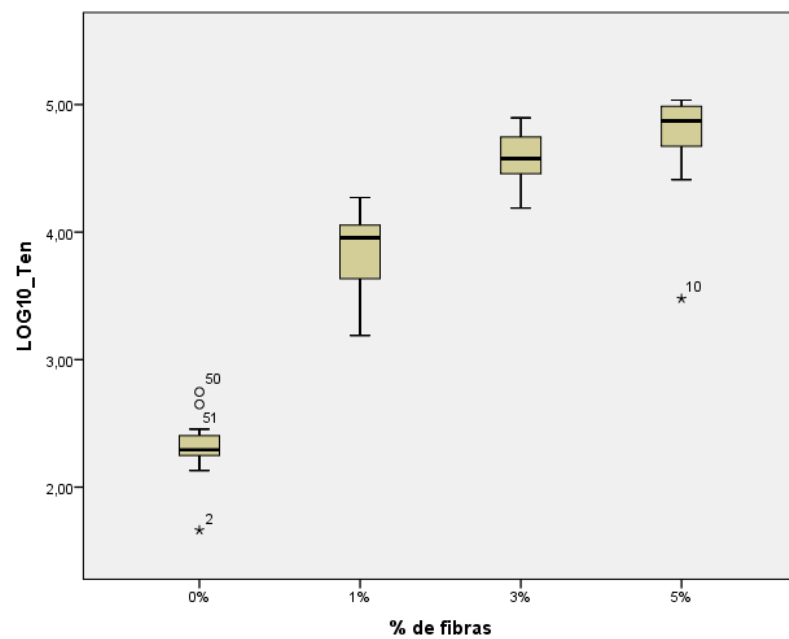
A tenacidade (figura 68), os dados possuem desvios de simetria em todos os níveis de fibras, com deslocamento da mediana. O teste K-S (tabela C.6), verificou que os dados são normalmente distribuídos para 0%, 1% e 3% de fibras, com $p > 0,05$, e para 5% de fibras não existe normalidade, com $p < 0,05$. As caixas dos *boxplot* possuem tamanhos diferentes, entretanto estatisticamente irrelevantes, confirmado pelo teste de Levine, com $p > 0,05$ (tabela C.6). Em 0% e 5% de fibras verificou-se a existência valores atípicos, todavia não são influentes. Verifica-se claramente a tendência crescente entre 0%, 1% e 3% de fibras.

Figura 67 – Gráfico *box plot* da resistência em função do teor de fibras.



Fonte: autor (2019).

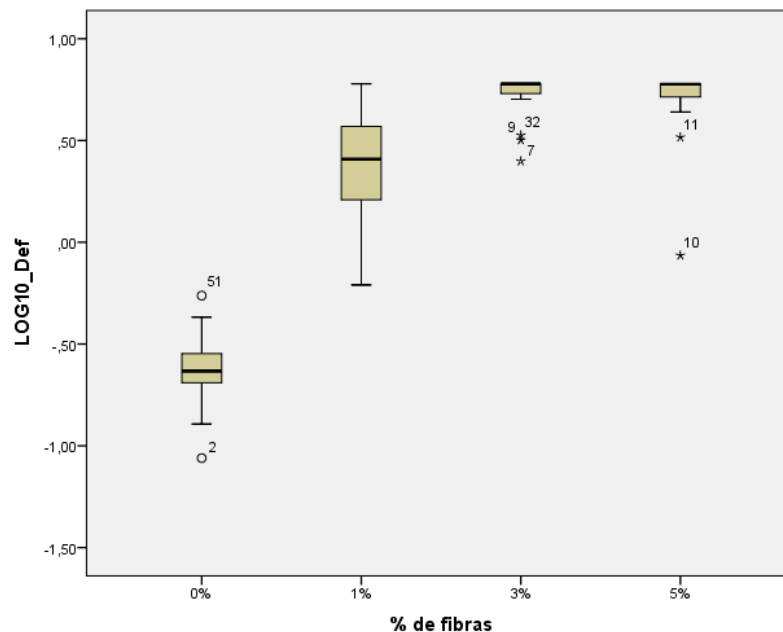
Figura 68 – Gráfico *box plot* da tenacidade em função do teor de fibras.



Fonte: autor (2019).

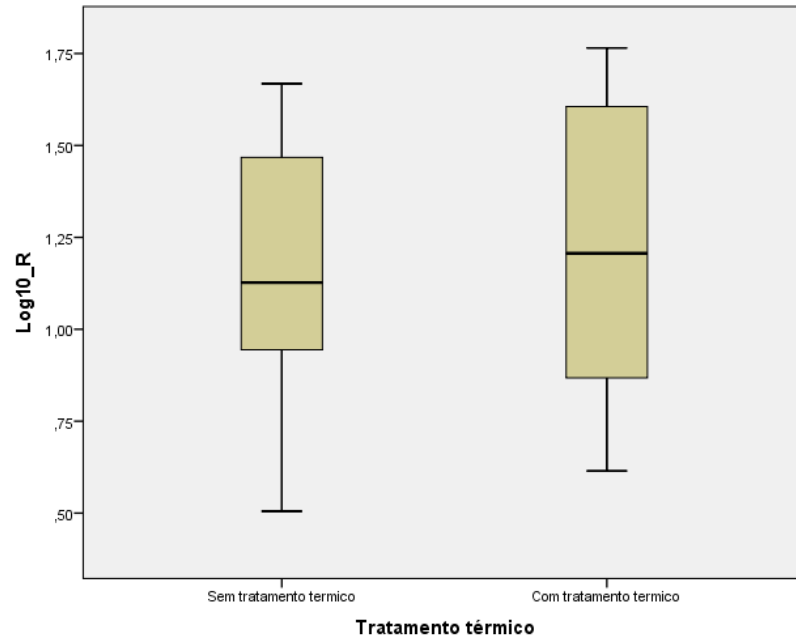
Para a deflexão (figura 69), houve acentuado desvio de simetria em 3% e 5% de fibras, percebido pelo proeminente deslocamento da mediana, e o teste K-S constatou o afastamento da normalidade, com $p < 0,05$ (tabela C.6). Com os teores de 0% e 1% de fibras, os dados apresentam simetria e normalidade, representados pela mediana aproximadamente centralizada e teste K-S com $p > 0,05$, nessa ordem (tabela C.6). O tamanho das caixas dos *boxplot* são distintos para todos os teores de fibras, indicando que a variabilidade não é constante, o que foi verificado pelo teste de Levine $p < 0,05$ (tabela C.6). Foram detectados alguns valores atípicos não influentes, exceto em 1% de fibras.

Figura 69 – Gráfico *box plot* da deflexão em função do teor de fibras.

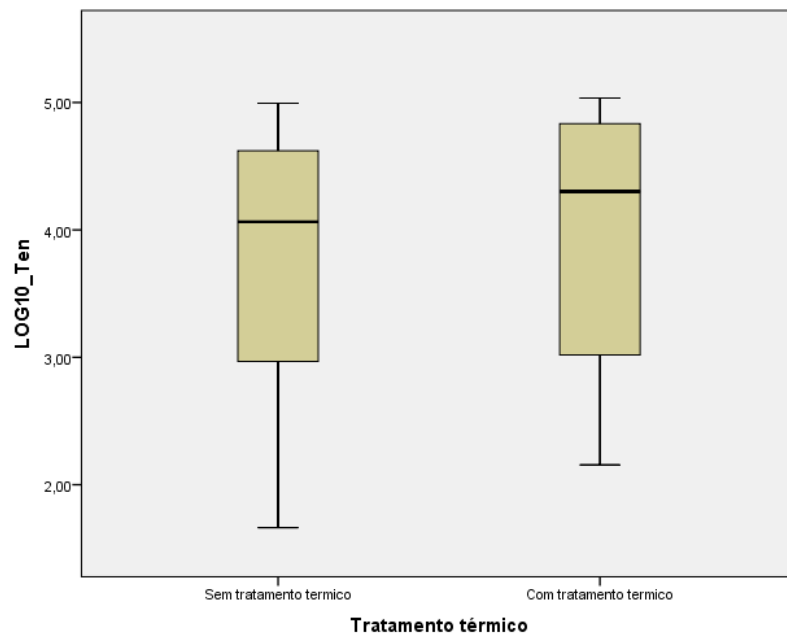


Fonte: autor (2019).

As figuras 70, 71 e 72 mostram a distribuição e variabilidade dos dados para a condição tratamento térmico, por meio de gráficos tipo *boxplot*. Em relação a resistência, tenacidade e deflexão, houve desvios de simetria, interpretado pelo deslocamento da mediana. Apenas para resistência foi identificada a normalidade dos dados, segundo teste K-S com $p > 0,05$ (tabela C.7). As caixas dos *boxplot* possuem tamanhos próximos, indicando variabilidade aproximadamente constante, indicado pelo teste de Levine com $p > 0,05$ (tabela C.7). Não foram detectados valores atípicos.

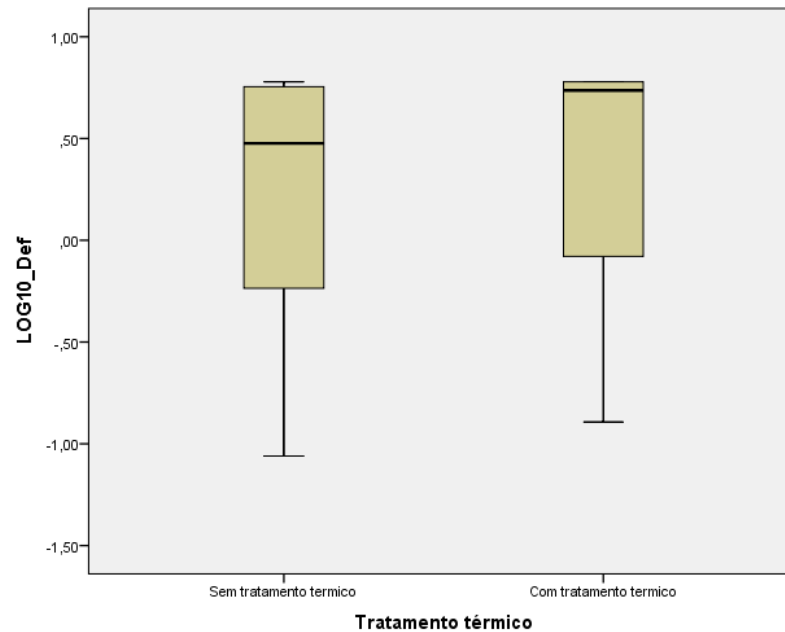
Figura 70 – Gráfico *box plot* da resistência em função do tratamento térmico.

Fonte: autor (2019).

Figura 71 – Gráfico *box plot* da tenacidade em função do tratamento térmico.

Fonte: autor (2019).

Figura 72 – Gráfico *box plot* da deflexão em função do tratamento térmico.



Fonte: autor (2019).

A tabela 13 mostra os coeficientes de correlação entre as variáveis resposta, para cada uma das condições. A tabela foi construída por meio de uma matriz quadrada (matriz 3 x 3), as linhas e colunas representam as variáveis resposta. A diagonal principal representa a correlação perfeita da variável com ela mesmo, por isso possui valor igual 1. O coeficiente de correlação mostra que o relacionamento entre as variáveis é positivo e robusto. Assim, justificando o uso da técnica de análise multivariada de variância (MANOVA).

Tabela 13 – Coeficiente de correlação entre as variáveis resposta.

Coeficiente de correlação			
Variável resposta	LOG10_R	LOG10_T	LOG10_D
LOG10_R	1,000	0,958	0,819
LOG10_T	0,958	1,000	0,911
LOG10_D	0,819	0,911	1,000

Fonte: autor (2019).

Os resultados da análise multivariada de variância (MANOVA), registrados na tabela 14, identificaram que as condições impostas tiveram efeito significativo no aumento da resistência, tenacidade e deflexão ($p < 0,05$), levando em conta a correlação entre as variáveis resposta. Isto é, a idade, o teor de fibras e o tratamento térmico modificaram positivamente a resistência, tenacidade e deflexão. O tamanho do efeito

identificou que os maiores impactos no aumento da resistência, tenacidade e deflexão, ocorreram com o acréscimo do teor de fibras, e os menores impactos ocorreram com a aplicação do tratamento térmico. O poder dos testes em detectar diferenças reais entre as variáveis foi satisfatório (maior que 80%). Mostrou ainda, a existência de interação entre as variáveis idade – tratamento térmico e fibras - tratamento térmico.

Tabela 14 – Resultados da análise de variância multivariada (MANOVA).

Análise de variância multivariada (MANOVA)				
Efeito	Teste	p-value	Tamanho do efeito	Poder
Intercept	Pillai's Trace	<u>0,000</u>	0,999	1,000
	Wilks' Lambda	<u>0,000</u>	0,999	1,000
	Hotelling's Trace	<u>0,000</u>	0,999	1,000
	Roy's Largest Root	<u>0,000</u>	0,999	1,000
Idade	Pillai's Trace	<u>0,000</u>	0,358	1,000
	Wilks' Lambda	<u>0,000</u>	0,380	1,000
	Hotelling's Trace	<u>0,000</u>	0,402	1,000
	Roy's Largest Root	<u>0,000</u>	0,526	1,000
Fibras	Pillai's Trace	<u>0,000</u>	0,554	1,000
	Wilks' Lambda	<u>0,000</u>	0,805	1,000
	Hotelling's Trace	<u>0,000</u>	0,938	1,000
	Roy's Largest Root	<u>0,000</u>	0,977	1,000
TT	Pillai's Trace	<u>0,008</u>	0,226	0,851
	Wilks' Lambda	<u>0,008</u>	0,226	0,851
	Hotelling's Trace	<u>0,008</u>	0,226	0,851
	Roy's Largest Root	<u>0,008</u>	0,226	0,851
Idade * Fibras	Pillai's Trace	0,059	0,170	0,921
	Wilks' Lambda	<u>0,044</u>	0,181	0,912
	Hotelling's Trace	<u>0,033</u>	0,193	0,944
	Roy's Largest Root	<u>0,001</u>	0,355	0,970
Idade * TT	Pillai's Trace	<u>0,000</u>	0,316	1,000
	Wilks' Lambda	<u>0,000</u>	0,356	1,000
	Hotelling's Trace	<u>0,000</u>	0,395	1,000
	Roy's Largest Root	<u>0,000</u>	0,548	1,000
Fibras * TT	Pillai's Trace	<u>0,011</u>	0,135	0,922
	Wilks' Lambda	<u>0,006</u>	0,150	0,871
	Hotelling's Trace	<u>0,003</u>	0,166	0,962
	Roy's Largest Root	<u>0,000</u>	0,350	0,991
Idade * Fibras * TT	Pillai's Trace	0,440	0,113	0,697
	Wilks' Lambda	0,414	0,119	0,670
	Hotelling's Trace	0,391	0,125	0,719
	Roy's Largest Root	0,025	0,251	0,817

Fonte: autor (2019). Nota: Os valores sublinhados são significativos.

Analisando cada uma das condições separadamente, por meio da análise univariada de variância (ANOVA), segundo tabela 15, os resultados obtidos corroboram aqueles encontrados na análise multivariada (MANOVA). Os valores-p menores que 0,05

mostram influência positiva das condições impostas. No geral, o tamanho do efeito é relevante e o poder dos testes satisfatórios.

Tabela 15 – Resultados da análise de variância univariada (ANOVA).

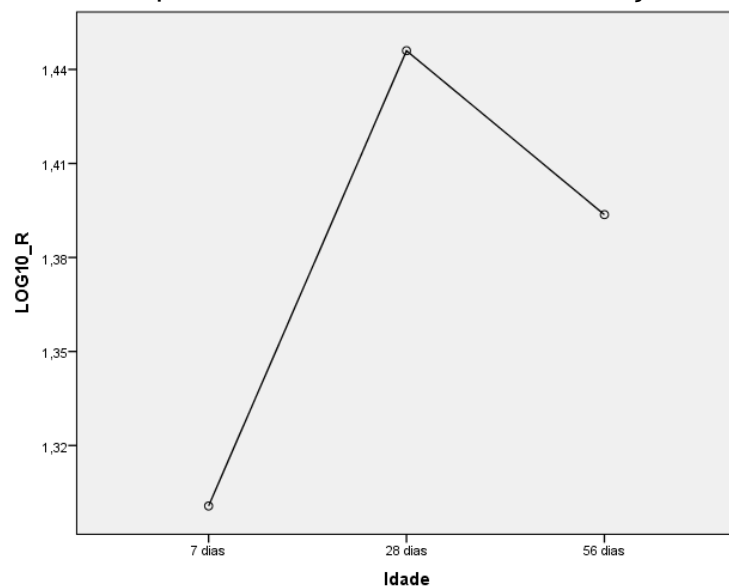
Análise de variância univariada (ANOVA)				
Efeito	Variável resposta	<i>p-value</i>	Tamanho do efeito	Poder
Modelo	LOG10_R	<u>0,000</u>	0,970	1,000
	LOG10_T	<u>0,000</u>	0,972	1,000
	LOG10_D	<u>0,000</u>	0,938	1,000
Idade	LOG10_R	<u>0,000</u>	0,495	1,000
	LOG10_T	<u>0,000</u>	0,378	0,998
	LOG10_D	<u>0,006</u>	0,191	0,839
Fibras	LOG10_R	<u>0,000</u>	0,967	1,000
	LOG10_T	<u>0,000</u>	0,970	1,000
	LOG10_D	<u>0,000</u>	0,934	1,000
TT	LOG10_R	<u>0,013</u>	0,122	0,717
	LOG10_T	<u>0,001</u>	0,192	0,912
	LOG10_D	<u>0,004</u>	0,157	0,835
Idade * Fibras	LOG10_R	<u>0,011</u>	0,283	0,884
	LOG10_T	0,603	0,087	0,272
	LOG10_D	0,405	0,116	0,373
Idade * TT	LOG10_R	<u>0,000</u>	0,508	1,000
	LOG10_T	<u>0,001</u>	0,247	0,941
	LOG10_D	<u>0,008</u>	0,181	0,814
Fibras * TT	LOG10_R	<u>0,000</u>	0,339	0,988
	LOG10_T	<u>0,028</u>	0,170	0,716
	LOG10_D	0,331	0,068	0,295
Idade * Fibras * TT	LOG10_R	0,303	0,134	0,439
	LOG10_T	0,875	0,048	0,153
	LOG10_D	0,892	0,045	0,145

Fonte: autor (2019). Nota: Os valores sublinhados são significativos.

A tabela C.12, do apêndice C, mostra as comparações múltiplas em relação à idade e as figuras 73, 74 e 75 o comportamento da resistência, tenacidade e deflexão, também em função da idade. As diferenças entre as médias das resistências em 7, 28 e 56 dias, são estatisticamente significantes, com $p < 0,05$ (tabela C.12). A maior média ocorre aos 28 dias e a menor em 7 dias (figura 73). Esperava-se que o comportamento fosse linear ao longo das idades, com a resistência aos 56 dias maior do que 28 dias. As médias possuem um intervalo de confiança com limite superior e inferior, que se sobrepõem para 28 e 56 dias. Além disso, o resultado encontrado pode estar incluído na margem de erro máximo de 5%. Assim, devido aos erros aleatórios e variabilidade dos dados, esse fenômeno é pontual e ocorreu tão somente nesta

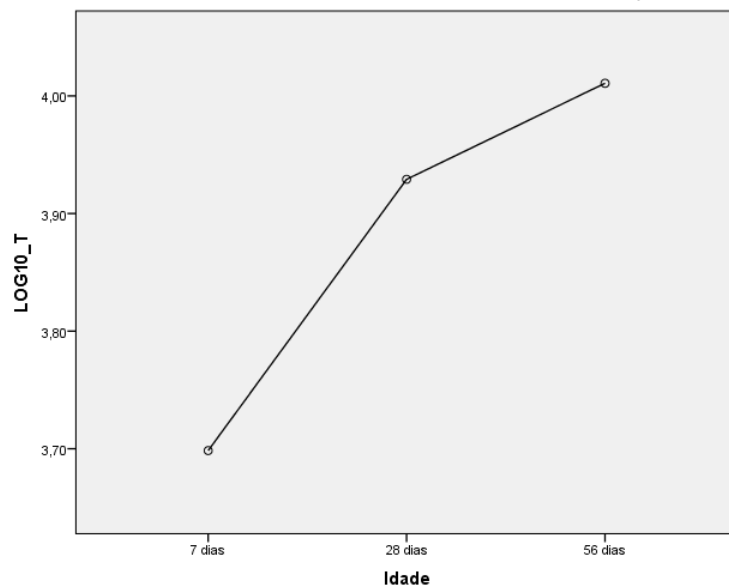
combinação (resistência com idade). Considerando a tenacidade (figura 74), verificou-se tendência crescente. Entre 7 e 28 dias, o crescimento foi acentuado e estatisticamente significativo, com $p < 0,05$ (tabela C.12). Entre 28 e 56 dias o crescimento foi menor e não significativo ($p > 0,05$). Levando em conta a deflexão (figura 75), verificou-se tendência crescente. Entre 7 e 28 dias, o crescimento foi pequeno e estatisticamente não significativo, com $p > 0,05$ (tabela C.12). Entre 28 e 56 dias o crescimento foi intenso e significativo ($p < 0,05$).

Figura 73 – Comportamento da resistência em função da idade.



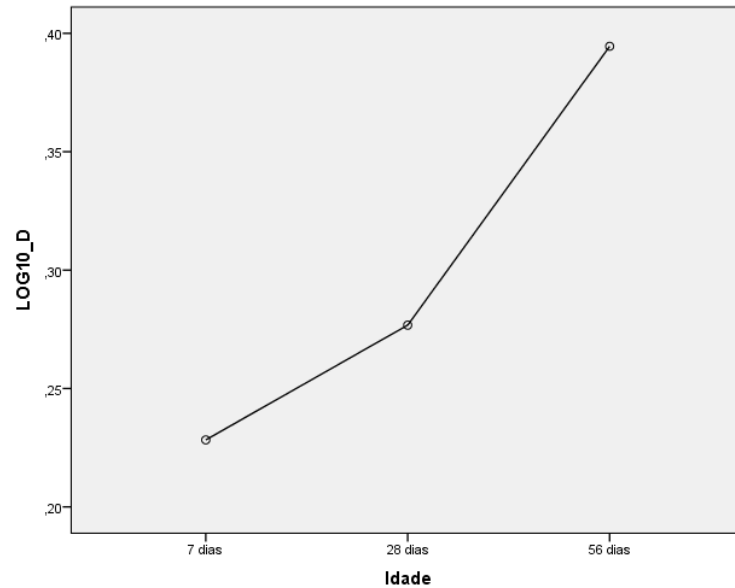
Fonte: autor (2019).

Figura 74 – Comportamento da tenacidade em função da idade.



Fonte: autor (2019).

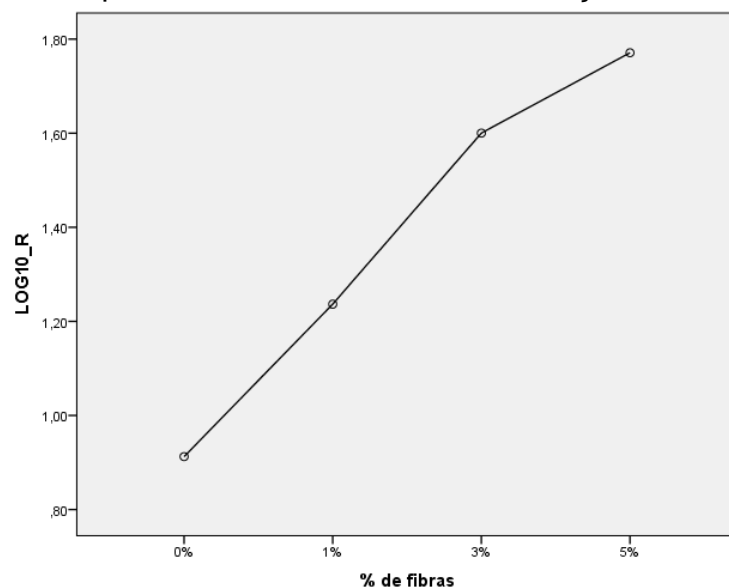
Figura 75 – Comportamento da deflexão em função da idade.



Fonte: autor (2019).

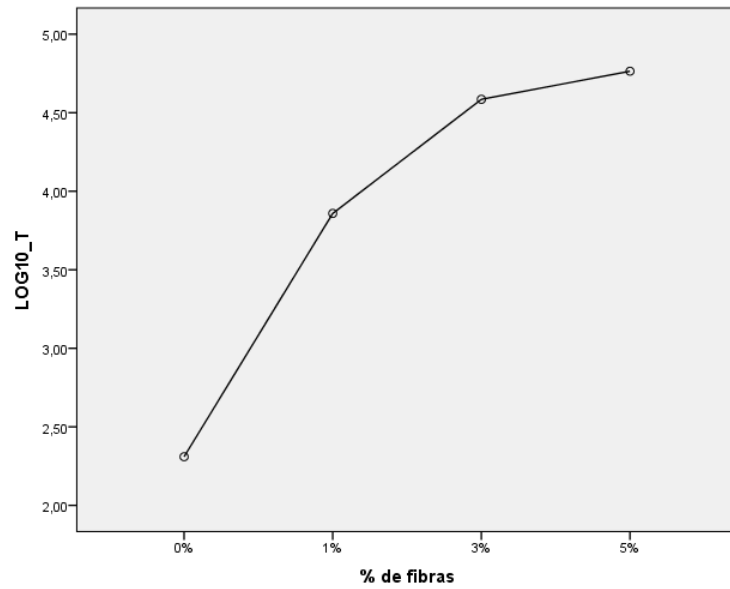
A tabela C.13, do apêndice C, mostra as comparações múltiplas em relação ao teor de fibras e as figuras 76, 77 e 78 o comportamento da resistência, tenacidade e deflexão, também em função do teor de fibras. Com acréscimo do teor de fibras, tanto a resistência, como tenacidade e deflexão, apresentaram comportamento crescente, sendo todos os incrementos estatisticamente significativos, com $p < 0,05$ (tabela C.13). A exceção ocorreu na deflexão (figura 78), entre 3% e 5%, onde não houve crescimento significativo, com $p > 0,05$.

Figura 76 – Comportamento da resistência em função do teor de fibras.



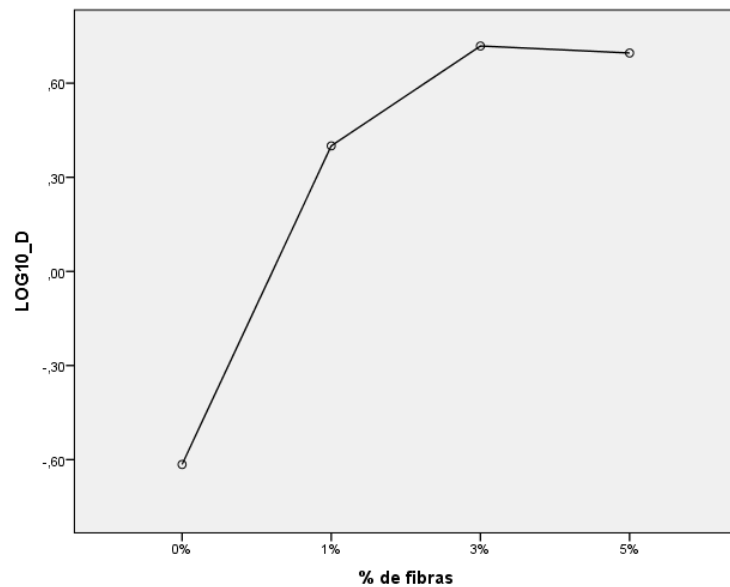
Fonte: autor (2019).

Figura 77 – Comportamento da tenacidade em função do teor de fibras.



Fonte: autor (2019).

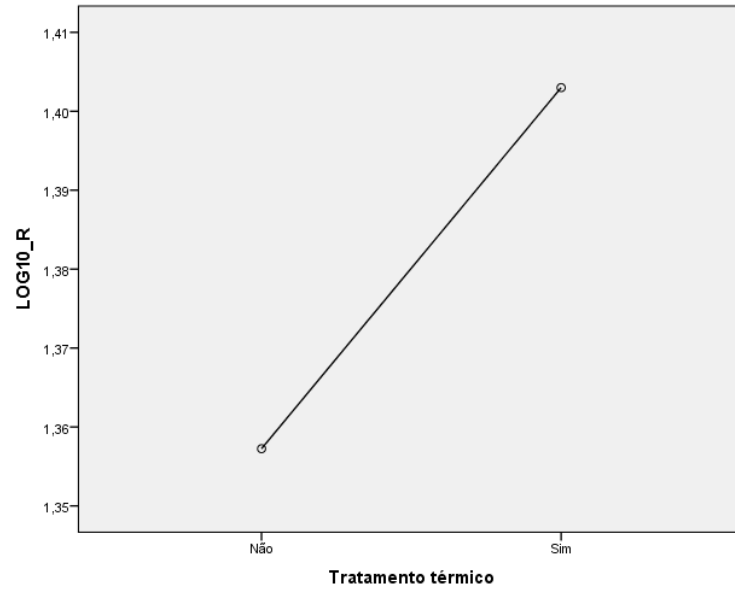
Figura 78 – Comportamento da deflexão em função do teor de fibras.



Fonte: autor (2019).

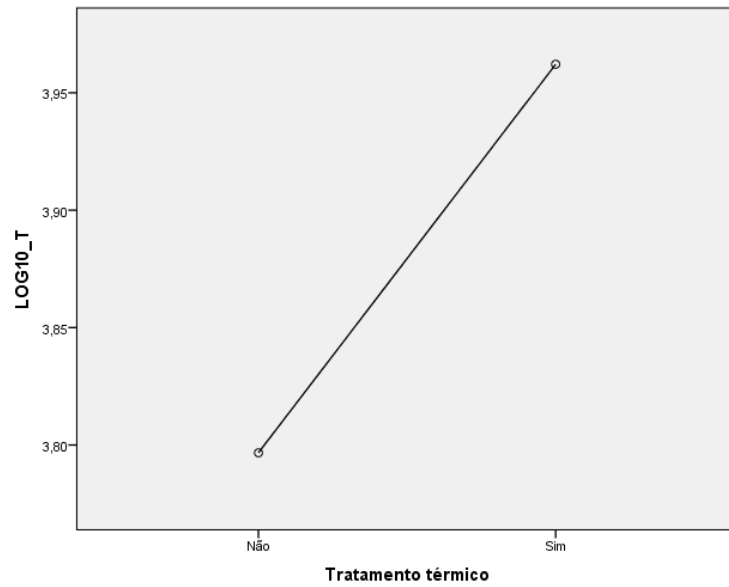
A tabela C.14, do apêndice C, mostra as comparações múltiplas em relação ao tratamento térmico e as figuras 79, 80 e 81, o comportamento da resistência, tenacidade e deflexão, também em função do tratamento térmico. A aplicação do tratamento térmico favorece, de forma significativa, o aumento da resistência, tenacidade e deflexão, sendo todos significativos, com $p < 0,05$.

Figura 79 – Comportamento da resistência em função do tratamento térmico.



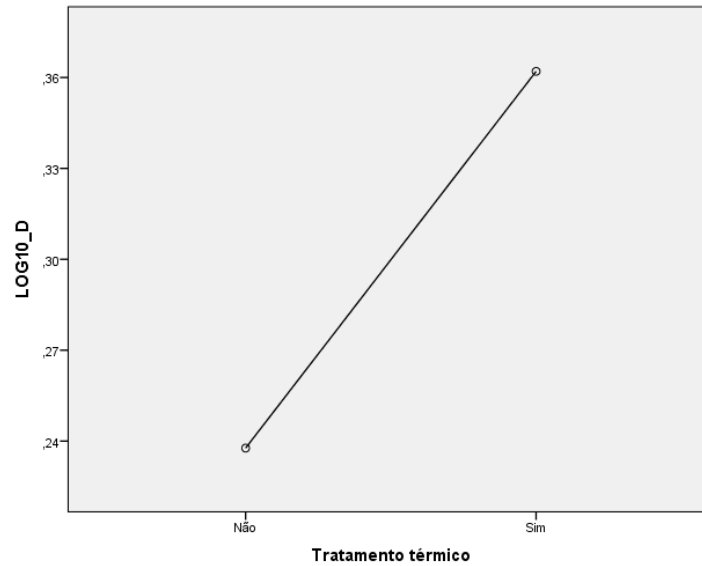
Fonte: autor (2019).

Figura 80 – Comportamento da tenacidade em função do tratamento térmico.



Fonte: autor (2019).

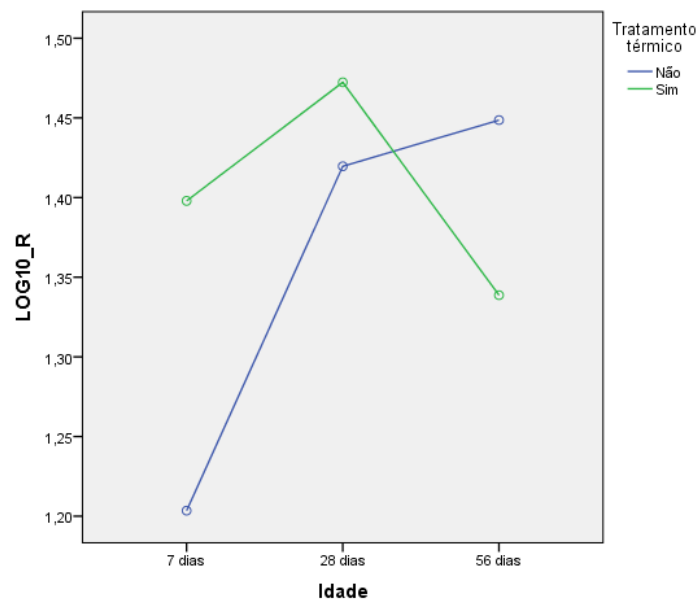
Figura 81 – Comportamento da deflexão em função do tratamento térmico.



Fonte: autor (2019).

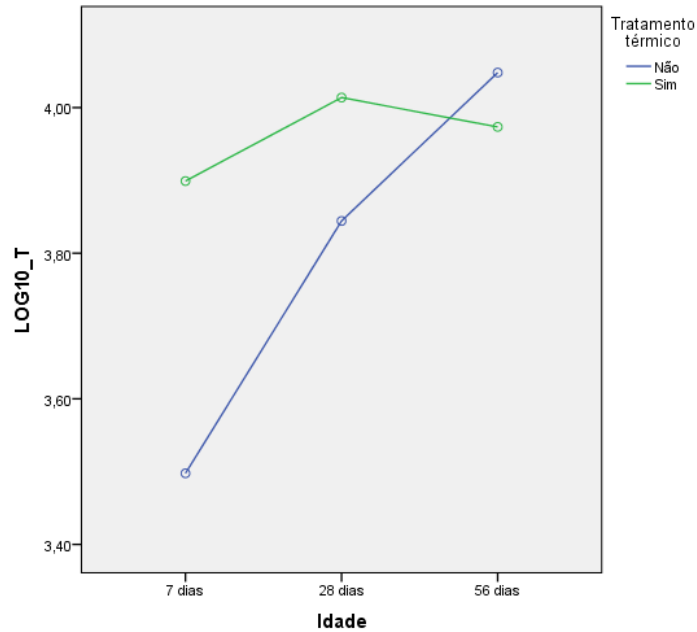
As comparações múltiplas referentes à interação entre idade e tratamento térmico são indicadas na tabela C.15, e nas figuras 82, 83 e 84 o comportamento das variáveis resposta. Levando em conta a resistência, para 7 e 56 dias, a aplicação do tratamento térmico foi influente ($p < 0,05$) e para 28 dias a diferença encontrada não foi significativa ($p > 0,05$). Para tenacidade e deflexão, o tratamento térmico produziu um aumento significativo ($p < 0,05$) apenas para 7 dias.

Figura 82 – Comportamento da resistência em função da idade, levando em conta o tratamento térmico.



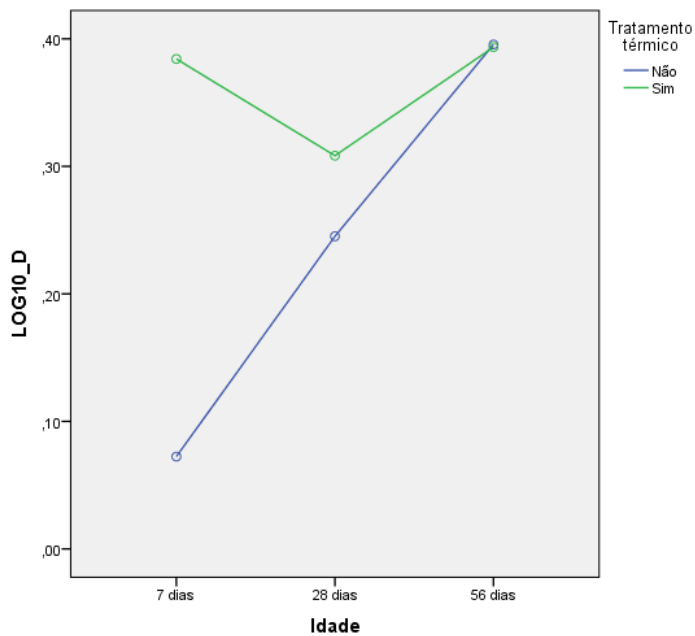
Fonte: autor (2019).

Figura 83 – Comportamento da tenacidade em função da idade, levando em conta o tratamento térmico.



Fonte: autor (2019).

Figura 84 – Comportamento da deflexão em função da idade, levando em conta o tratamento térmico.

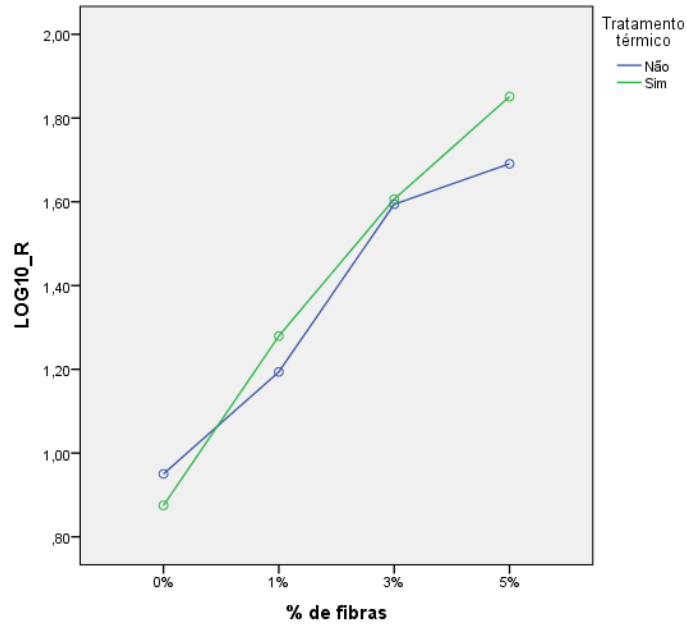


Fonte: autor (2019).

Na tabela C.16 são apresentadas as comparações múltiplas, referentes à interação entre fibras e tratamento térmico, e nas figuras 85, 86 e 87 o comportamento das variáveis resposta. No geral, a aplicação do tratamento térmico, em relação ao

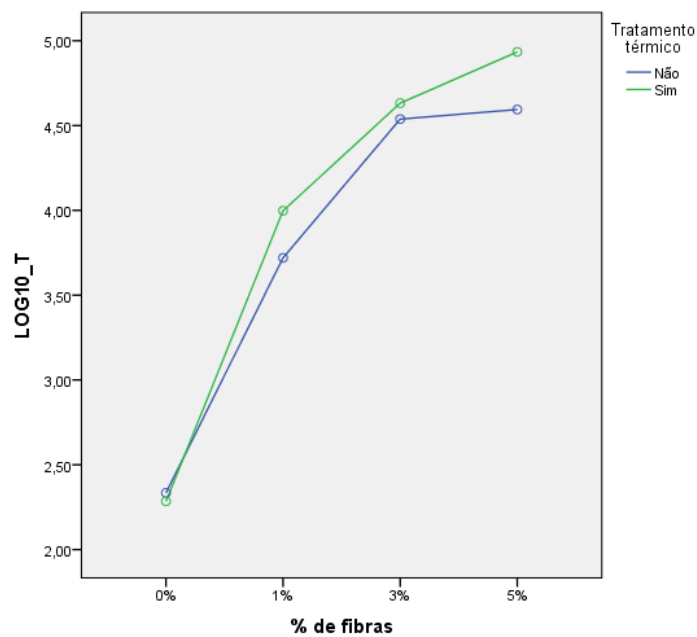
aumento do teor de fibras, resultou em acréscimos de resistência, tenacidade e deflexão, principalmente em 1% e 5% de fibras ($p < 0,05$).

Figura 85 – Comportamento da resistência em função do teor de fibras, levando em conta o tratamento térmico.



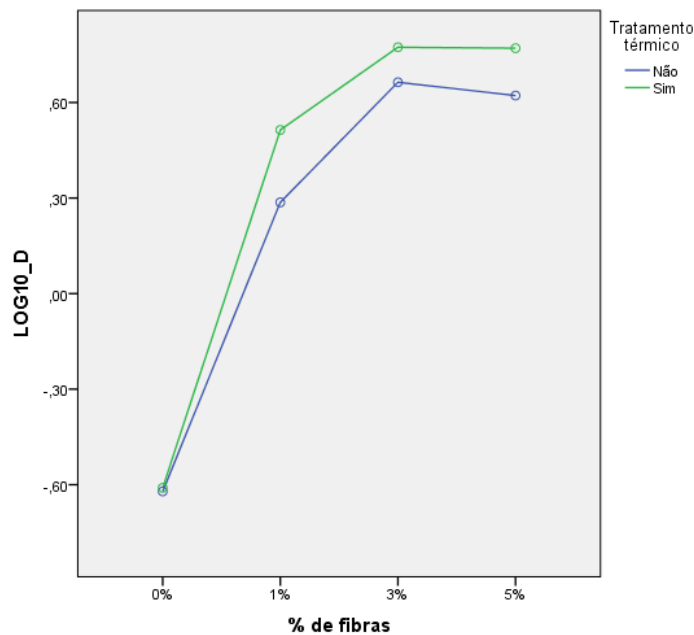
Fonte: autor (2019).

Figura 86 – Comportamento da tenacidade em função do teor de fibras, levando em conta o tratamento térmico



Fonte: autor (2019).

Figura 87 – Comportamento da deflexão em função do teor de fibras, levando em conta o tratamento térmico



Fonte: autor (2019).

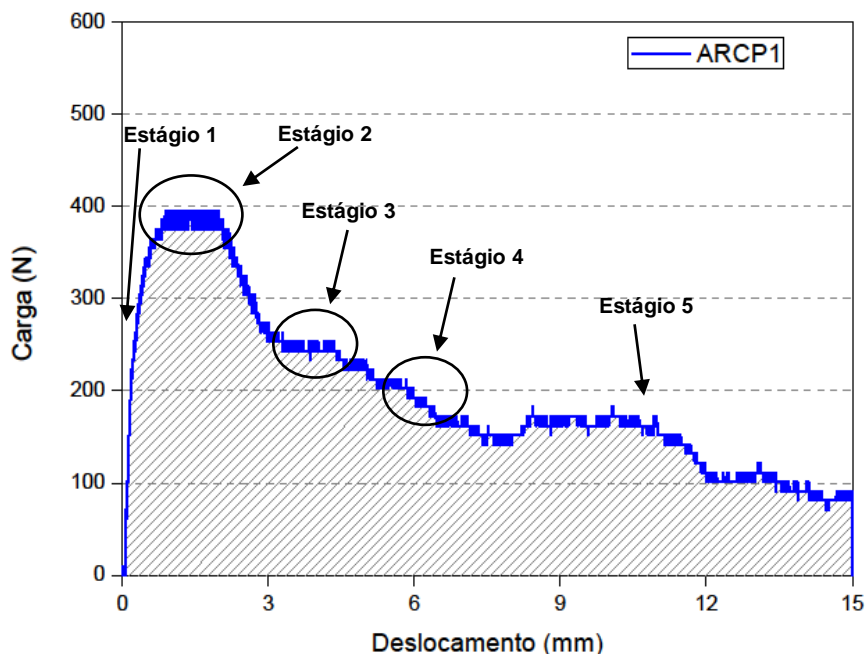
5.6 Extração de fibra (pull-out)

As figuras 88, 89, 90 e 91 retratam as curvas de carga *versus* deslocamento para o ensaio de extração de fibras ou *pull-out*, após 7 dias de cura. As figuras 88 e 89 contêm os resultados de referência sem aquecimento (curvas em azul) e as figuras 90 e 91 após tratamento térmico (curvas em vermelho). Cada figura representa o comportamento de apenas um corpo de prova. Os trechos sombreados representam as áreas sobre as curvas e o valor numérico dessa área corresponde à energia de extração de fibra. Da mesma forma que os parâmetros mecânicos, os valores apresentados são residuais, ou seja, as análises foram realizadas à temperatura ambiente, após tratamento térmico.

De modo geral, o comportamento de extração de fibras seguiu tendência similar entre os exemplares avaliados, inclusive estão de acordo com resultados preliminares, sobre o mesmo tema, encontrados por Abdallah, Fan e Cashell (2017) e Deng *et al.* (2018). A exceção ocorre para o exemplar ARTCP1 (figura 90). Os estágios de *pull-out* são indicados em cada curva, conforme item 3.3.4 e figura 20 da Revisão Bibliográfica.

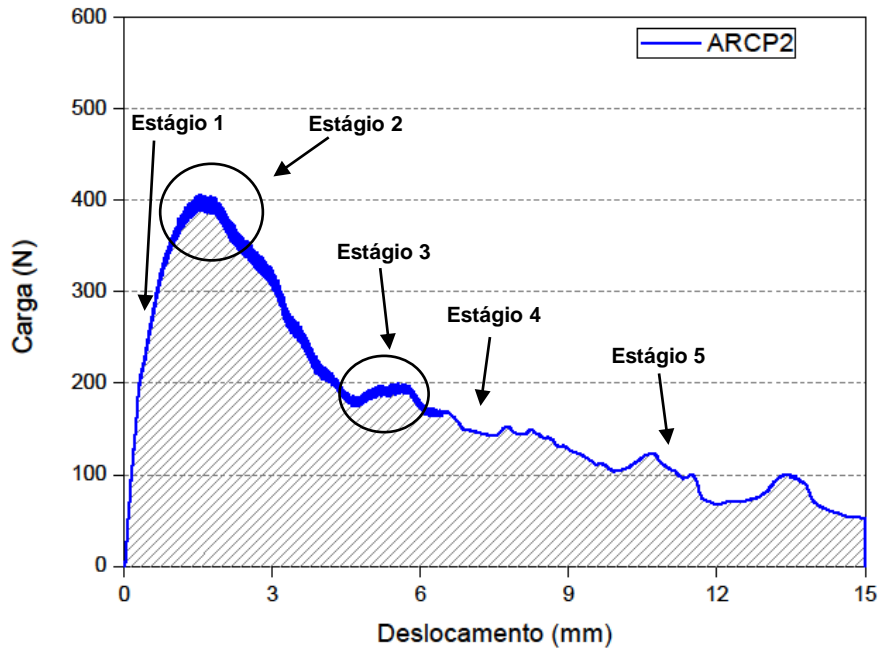
O tratamento térmico afeta o comportamento de extração da fibra. Durante o deslocamento da fibra, as cargas de extração são maiores, se comparado à referência sem aquecimento (figura 91). Também foi observado a tendência de aproximação entre os estágios 2 e 3, e o prolongamento do estágio 4, para o exemplar submetido ao aquecimento. A figura 90 mostra o desempenho do corpo de prova ARTCP1, apenas para o estágio 1 e início do estágio 2. A fibra atingiu o limite de resistência à tração (1200 MPa) e por isso rompeu sem ocorrer o mecanismo de escorregamento. Nesse caso, a ligação entre fibra-matriz foi tão intensa que a carga de *pull-out* aplicada não foi suficiente para vencer a coesão entre matriz e reforço.

Figura 88 – Curva carga *versus* deslocamento para *pull-out* de fibra única, corpo de prova “ARCP1”, sem tratamento térmico.



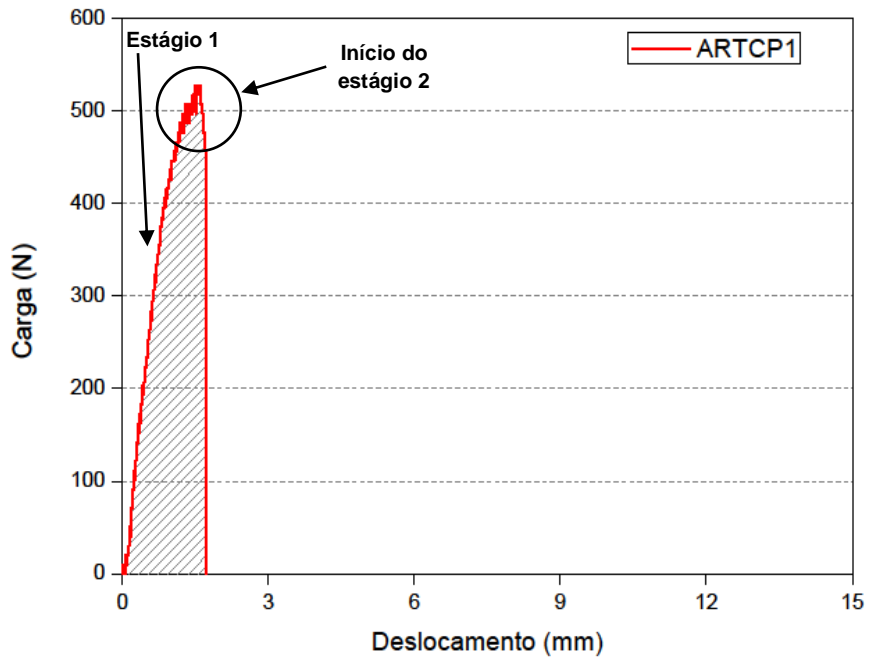
Fonte: autor (2019).

Figura 89 – Curva carga *versus* deslocamento para *pull-out* de fibra única, corpo de prova “ARCP2”, sem tratamento térmico.



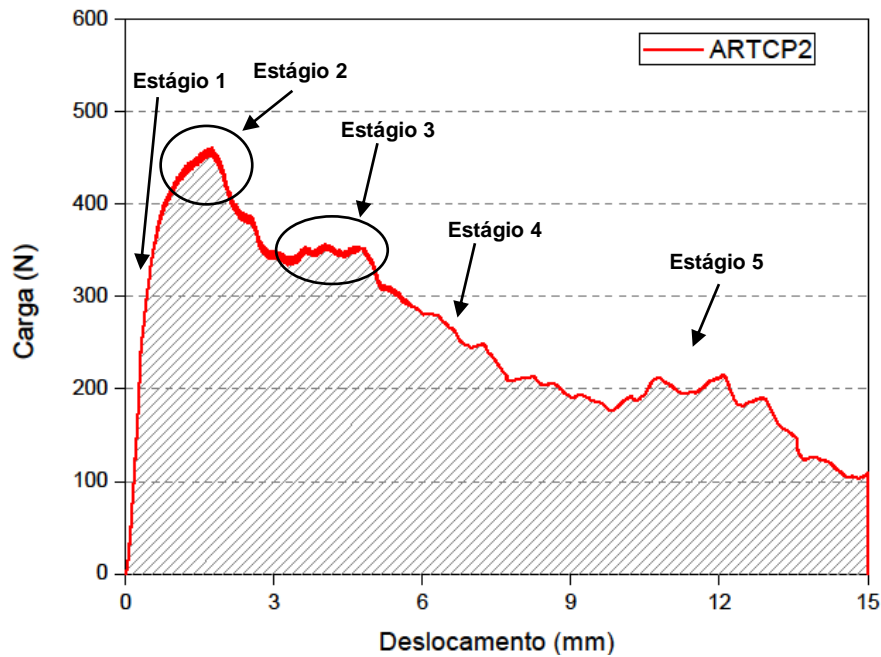
Fonte: autor (2019).

Figura 90 – Curva carga *versus* deslocamento para *pull-out* de fibra única, corpo de prova “ARTCP1”, com tratamento térmico.



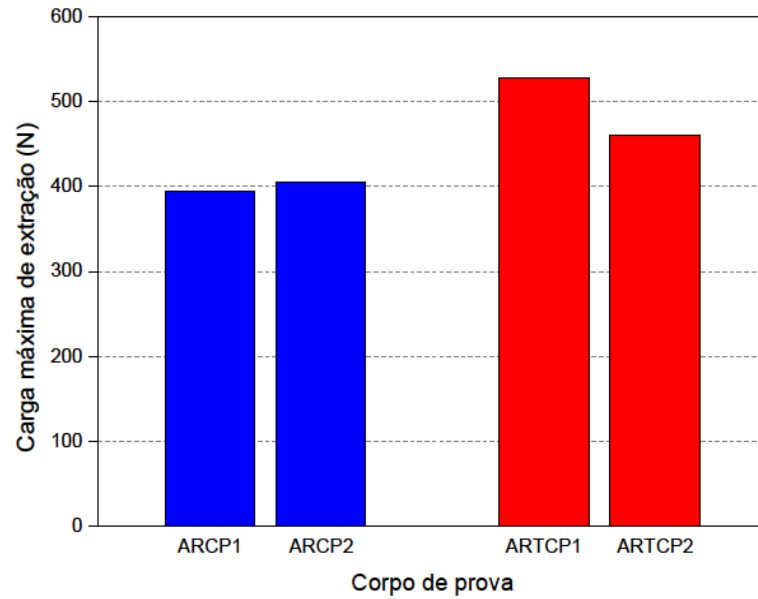
Fonte: autor (2019).

Figura 91 – Curva carga *versus* deslocamento para *pull-out* de fibra única, corpo de prova “ARTCP2”, com tratamento térmico.

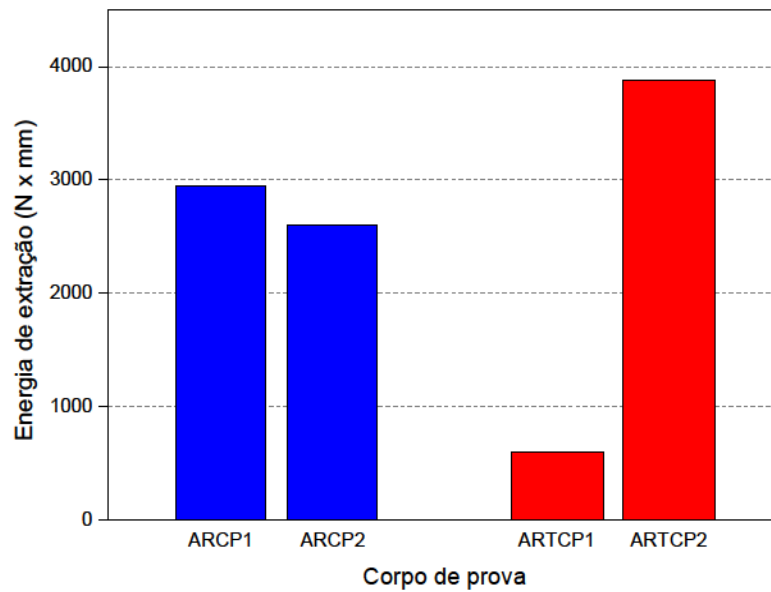


Fonte: autor (2019).

O tratamento térmico favorece tanto a carga máxima (figura 92), como a energia de extração (figura 93). Isso indica, que são necessários cargas mais elevadas e maior quantidade de energia, para vencer a coesão fibra-matriz, inclusive durante o escorregamento da fibra nos dutos da matriz. Conforme mencionado, a fibra do exemplar ARTCP1 atingiu o limite de resistência à tração, não houve mecanismo de extração e por isso a energia exigida foi pequena. Pode-se inferir ainda, que a energia de *pull-out* está muito mais relacionada com mecanismo de extração de fibra, do que com a carga máxima alcançada.

Figura 92 – Carga máxima *pull-out*, para exemplares com e sem tratamento térmico.

Fonte: autor (2019).

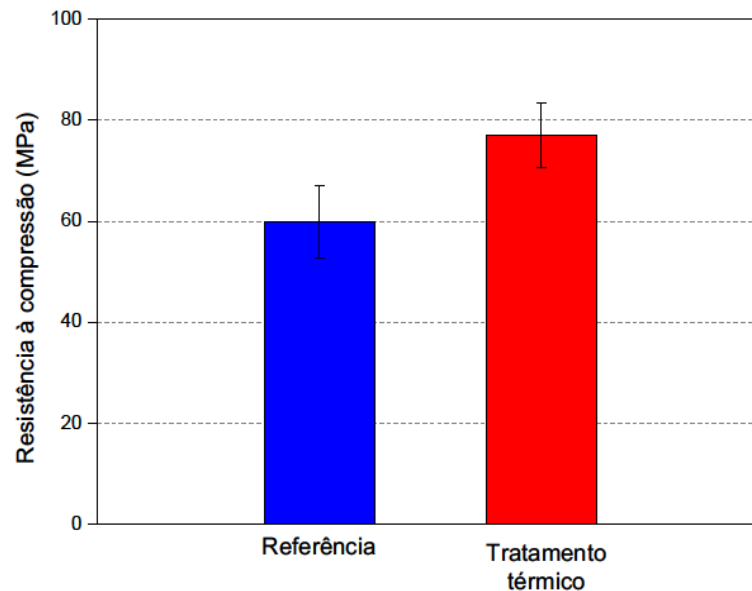
Figura 93 – Energia de *pull-out*, para exemplares com e sem tratamento térmico.

Fonte: autor (2019).

5.7 Resistência mecânica da matriz cimentícia

A resistência à compressão da matriz é apresentada na figura 94. Em primeira análise, avaliando a resistência média, percebe-se que a resistência à compressão aumentou com o tratamento térmico. Esse fato corrobora os resultados do comportamento mecânico e do ensaio de *pull-out*. Possivelmente, as reações de hidratação do cimento e adições são intensificadas com o tratamento térmico, o que resulta em uma matriz mais densa, coesa e resistente às tensões aplicadas durante ensaio de compressão axial.

Figura 94 – Resistência à compressão da matriz cimentícia.



Fonte: autor (2019).

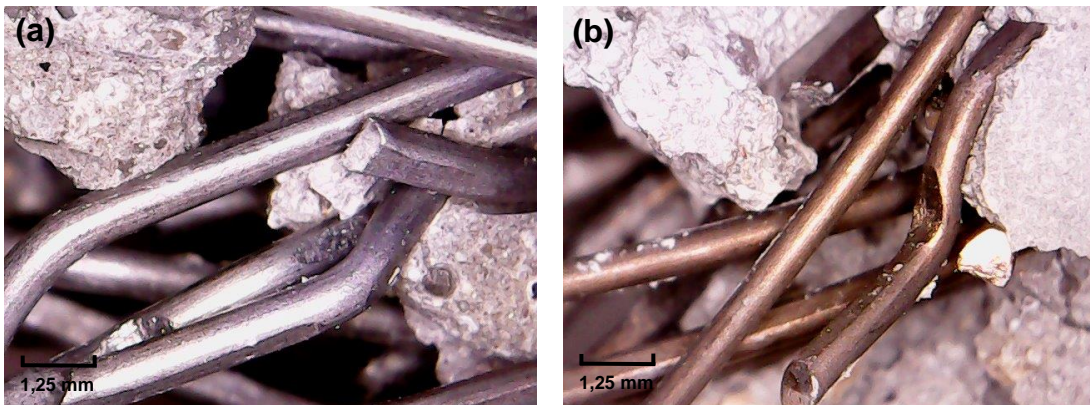
5.8 Investigação microestrutural e avaliação da interface fibra-matriz

A investigação microestrutural foi realizada com o objetivo de avaliar o compósito em termos de materiais constituintes (fibra e matriz), bem como investigar as possíveis correlações com o comportamento mecânico. A primeira observação foi feita de forma visual, após o ensaio de flexão, para os corpos de prova submetidos a tratamento térmico. Verificou-se que as fibras apresentavam mudança de coloração superficial, o que incentivou análises mais profundas. Dessa forma, o primeiro tópico abordado converge para investigar a superfície das fibras. Em um segundo momento, foi feito estudo da matriz cimentícia e interface fibra-matriz.

5.8.1 Fibras de aço

Por meio de imagens obtidas com câmera de alta resolução, é possível visualizar as fibras de aço que reforçam a matriz, após ensaio mecânico de flexão. A figura 95-a mostra as fibras após o ensaio de tração na flexão para concreto sem tratamento térmico, enquanto na figura 95-b estão as fibras depois do ensaio e após tratamento térmico. É possível observar claramente a diferença de coloração entre as fibras, o que indica alteração das camadas superficiais das fibras presentes no CCRF submetido a tratamento térmico.

Figura 95 – Imagens do compósito fraturado, logo após ensaio de flexão, com destaque para as fibras expostas



(a) sem aquecimento e (b) com tratamento térmico.

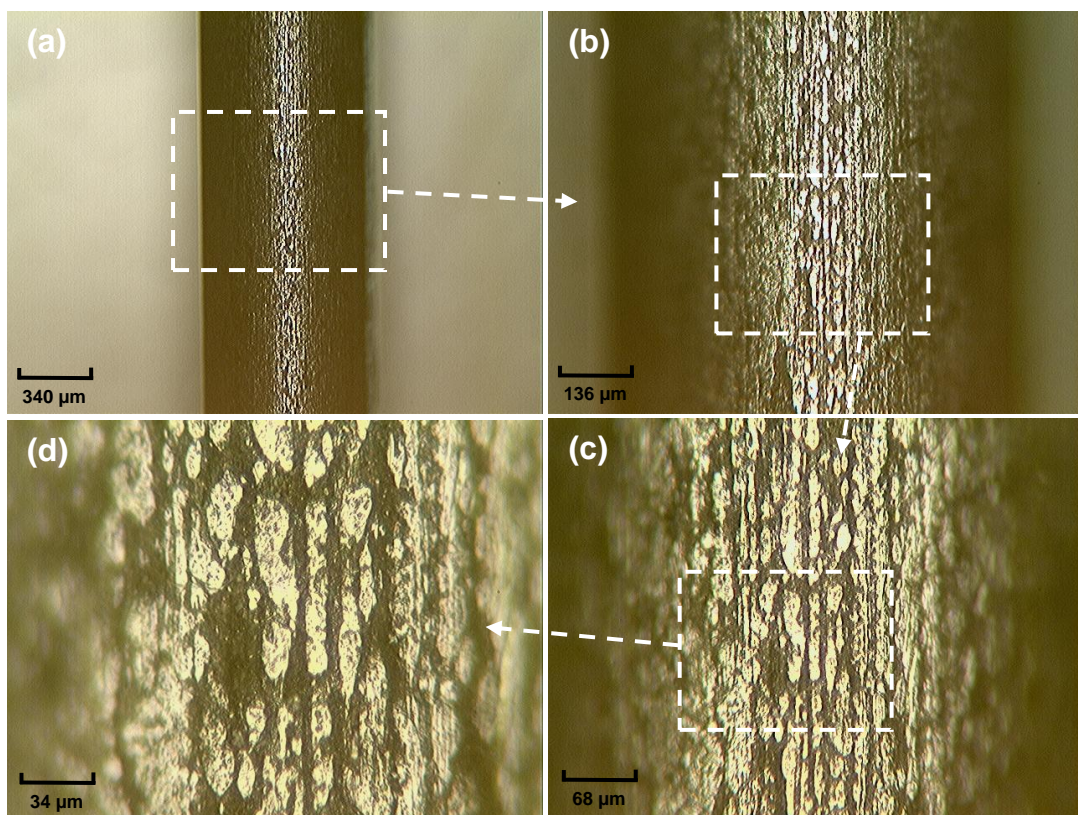
Fonte: autor (2019).

Após identificar a mudança de coloração, as fibras foram submetidas à caracterização por meio de microscopia óptica, com ampliações de 40, 100, 200 e 400 vezes. Para este ensaio foram utilizadas três fibras em diferentes condições. A primeira foi ensaiada *in natura*, uma outra após o ensaio de flexão e a terceira após tratamento térmico seguido de ensaio à flexão.

A figura 96 (a, b, c e d) mostra o aspecto superficial da fibra *in natura*, enquanto a figura 97 (a, b, c e d) expõe a superfície da fibra após ensaio de flexão. A fibra *in natura* (destaque para figuras 96-c e 96-d) possui superfície composta por dois tons de cor, um bem mais claro e outro escuro, que alternam entre si de forma aleatória e possuem direção preferencial ao longo do comprimento da fibra, característica de uma aço trefilado. Apesar dos tons alternarem, apresentam certa organização, separação

entre si e podem ser identificados de forma individual. Ao contrário, ao avaliar as figuras 97-c e 97-d, após ensaio mecânico, a superfície da fibra apresenta aspecto diferente daquela *in natura*, onde os tons não estão mais bem definidos e aparentemente mesclados entre si. Tudo indica que essa mudança se deve ao contato da superfície da fibra com a matriz cimentícia. Além disso, durante o ensaio de flexão ocorre notável interação de contato entre fibra e matriz. A interface é solicitada pelas tensões atuantes no compósito e funciona como sítio de adesão entre os constituintes, o que provoca as mudanças superficiais.

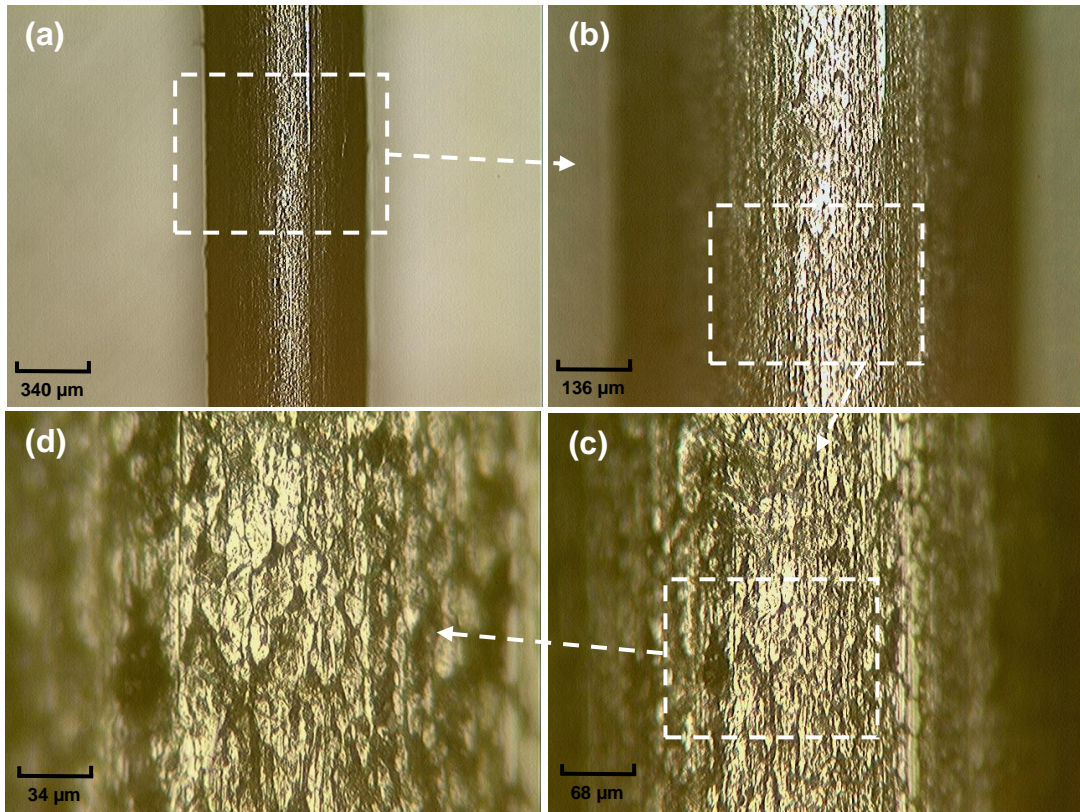
Figura 96 – Superfície das fibras *in natura*



ampliações de (a) 40 vezes, (b) 100 vezes, (c) 200 vezes e (d) 400 vezes.

Fonte: autor (2019).

Figura 97 – Superfície das fibras após flexão

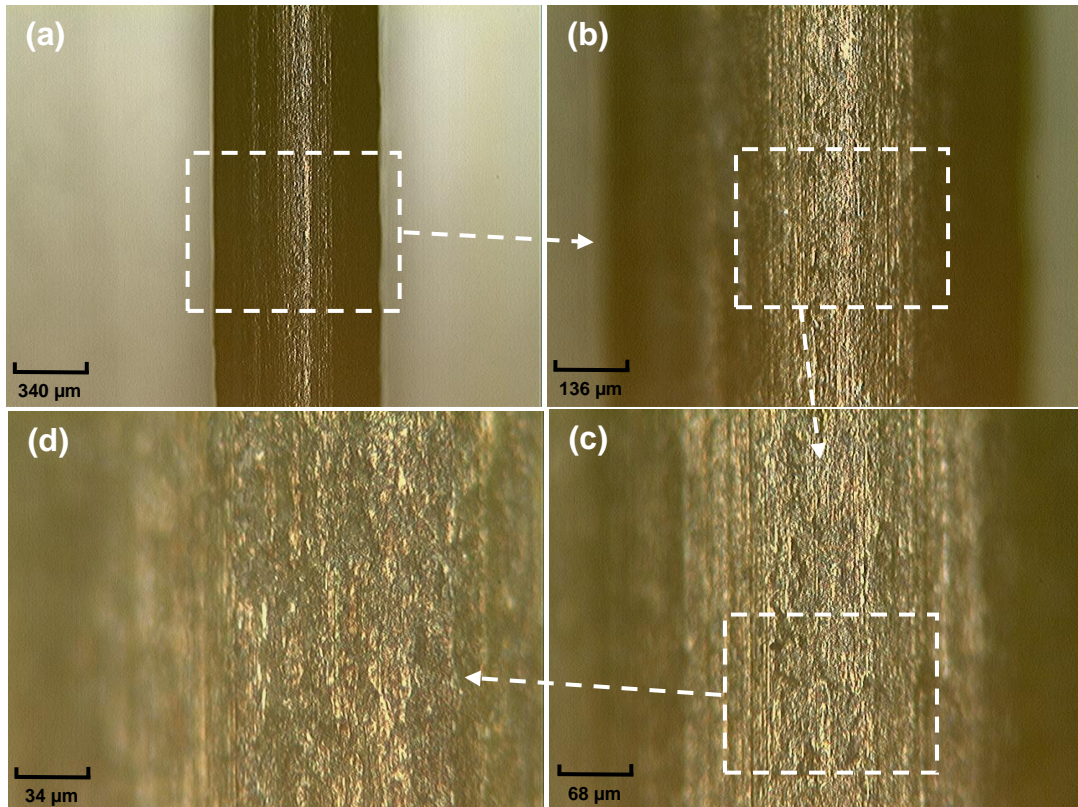


ampliações de (a) 40 vezes, (b) 100 vezes, (c) 200 vezes e (d) 400 vezes.

Fonte: autor (2019).

Comparando as figuras 96 (a, b, c e d) e 97 (a, b, c e d), não se vê muita diferença entre as condições, exceto aquelas já mencionadas. No entanto, ao avaliar a figura 98, após ensaio de flexão com tratamento térmico, a superfície da fibra é completamente diferente. A coloração é diferente, os tons se alternam entre preto, cinza e um leve “avermelhado”. Logo, o aquecimento influencia de forma decisiva o processo de mudança superficial das fibras imersas na matriz cimentícia. Beglarigale *et al.* (2016) investigou o comportamento à flexão de compósitos SIFCON submetidos à temperaturas elevadas e concluiu que o aquecimento provoca a oxidação das fibras. Ao que tudo indica, houve alterações semelhantes no presente trabalho.

Figura 98 – Superfície das fibras com tratamento térmico, após flexão

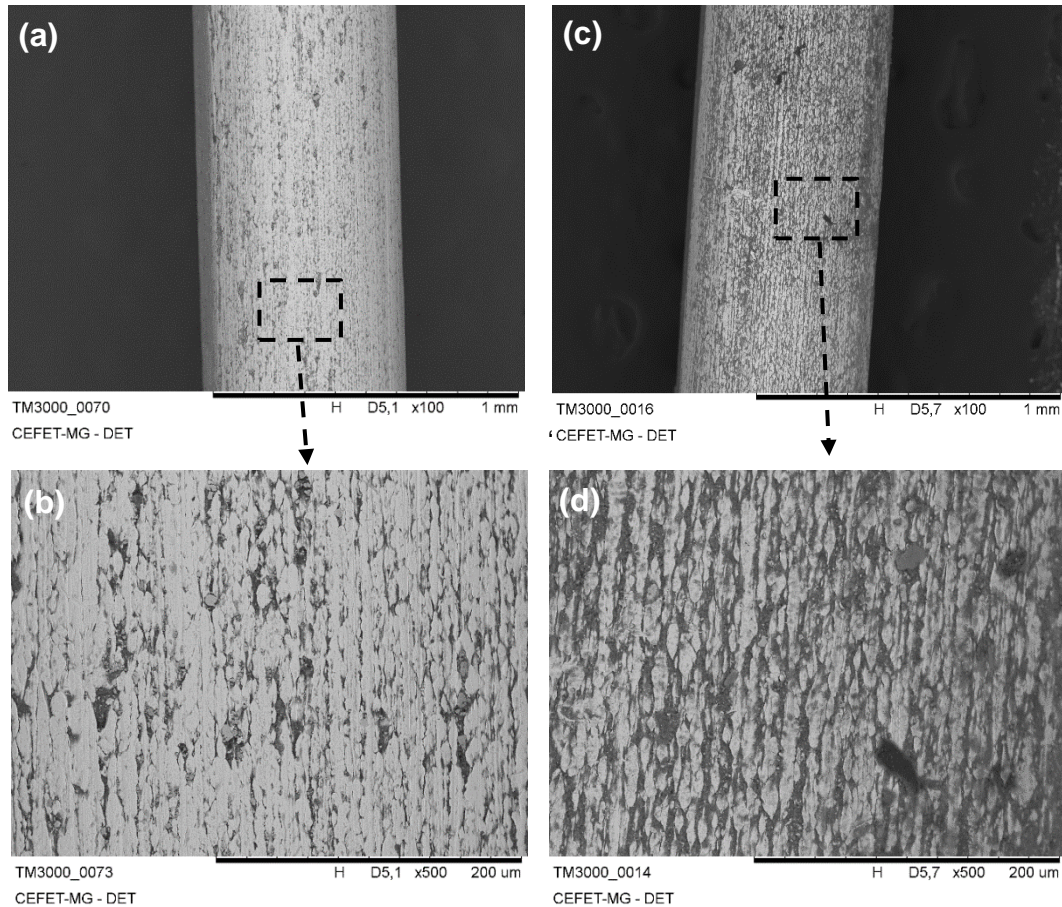


ampliações de (a) 40 vezes, (b) 100 vezes, (c) 200 vezes e (d) 400 vezes.

Fonte: autor (2019).

Com o intuito de investigar mais a fundo a superfície das fibras de aço, com e sem tratamento térmico, duas amostras foram submetidas ao ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). A primeira amostra foi selecionada a partir da fibra *in natura* (figuras 99-a e 99-b), enquanto a segunda amostra foi caracterizada após tratamento térmico, seguido de ensaio à tração (figuras 99-c e 99-d). Pode-se perceber claramente as mudanças que ocorreram mediante tratamento térmico, sugerindo, novamente, alteração superficial do material. As imagens da superfície corroboram os resultados obtidos por microscopia óptica e evidenciam alterações superficiais nas fibras quando submetidas a tratamento térmico. As figuras identificadas (99-b e 99-d) foram obtidas com maior ampliação, onde a superfície pode ser observada com detalhes.

Figura 99 – Imagens da superfície das fibras, obtidas por MEV, após flexão



(a) sem aquecimento, ampliação de 100 vezes, (b) sem aquecimento, ampliação de 500 vezes, (c) após tratamento térmico, ampliação de 100 vezes e (d) após tratamento térmico, ampliação de 500 vezes.

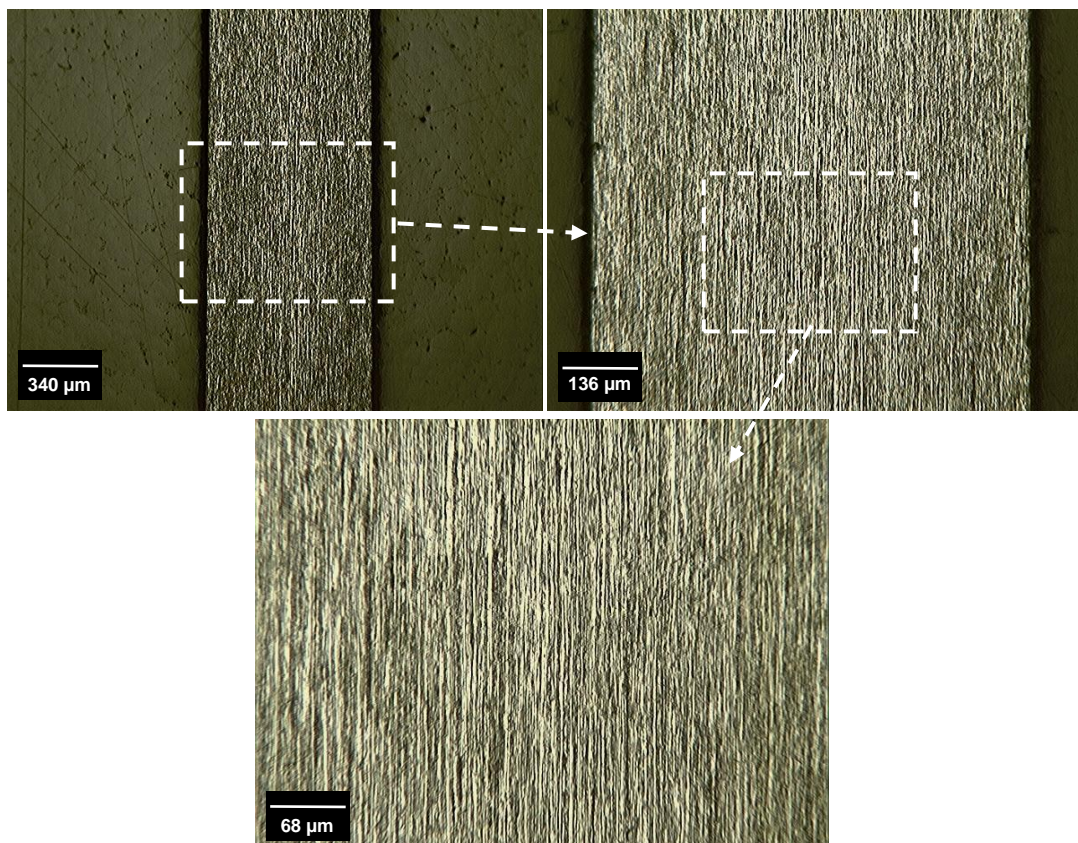
Fonte: autor (2019).

Assente às mudanças superficiais das fibras, a microestrutura também foi avaliada, com o intuito de pesquisar a influência do tratamento térmico e ensaio mecânico nas fibras como um todo. Quanto a isso, ressalta-se a diferença em relação ao exame anterior, onde foi avaliada a superfície das fibras. Nesse ponto, é avaliada a estrutura interna das fibras.

A figura 100 exibe as seções polidas de uma única fibra, após preparo da amostra e ataque químico, para a condição *in natura*. As figuras 101 e 102, mostram as fibras após ensaio de flexão sem aquecimento e depois do ensaio de flexão com tratamento térmico, respectivamente. Todas as imagens foram obtidas por microscopia óptica, nas ampliações de 40, 100 e 200 vezes. Não se observa alterações significativas na

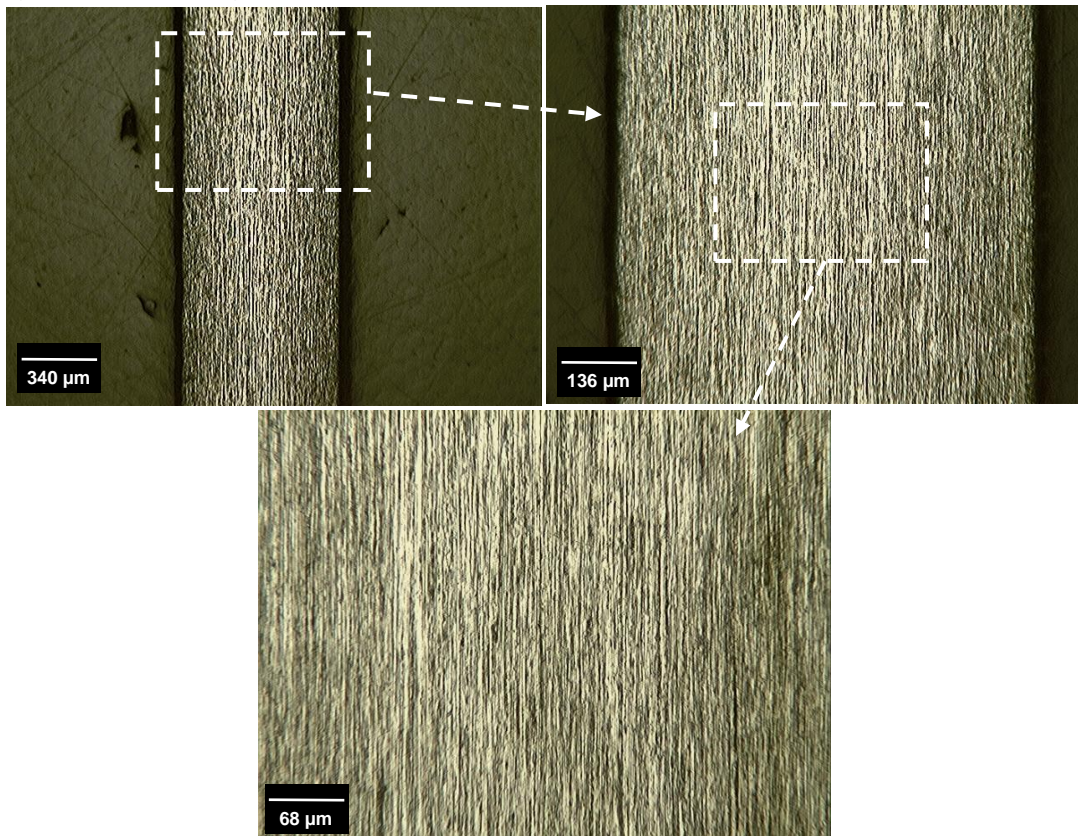
microestrutura das fibras para as condições citadas. O que se tem é a variação de fibra para fibra, uma vez que cada imagem representa uma fibra diferente. As imagens revelam grãos alongados em uma direção preferencial e presença de dois constituintes, um deles de cor clara (ferrita) e outro em tons mais escuros (perlita). Segundo Sarzalejo *et al.* (2009), as fibras do fabricante Maccaferri®, utilizadas nesse trabalho, possuem baixo teor de carbono e foram obtidas por meio do processo de trefilação a frio. Dessa forma, a microestrutura identificada nas imagens é compatível com o processo de fabricação das fibras, conforme literatura (COLPAERT, 2008). As diferenças de fulgor das imagens, umas mais claras e outras mais escuras, são resultado da edição das imagens e intensidade luminosa adotada.

Figura 100 – Imagens de microscopia óptica das fibras *in natura*.



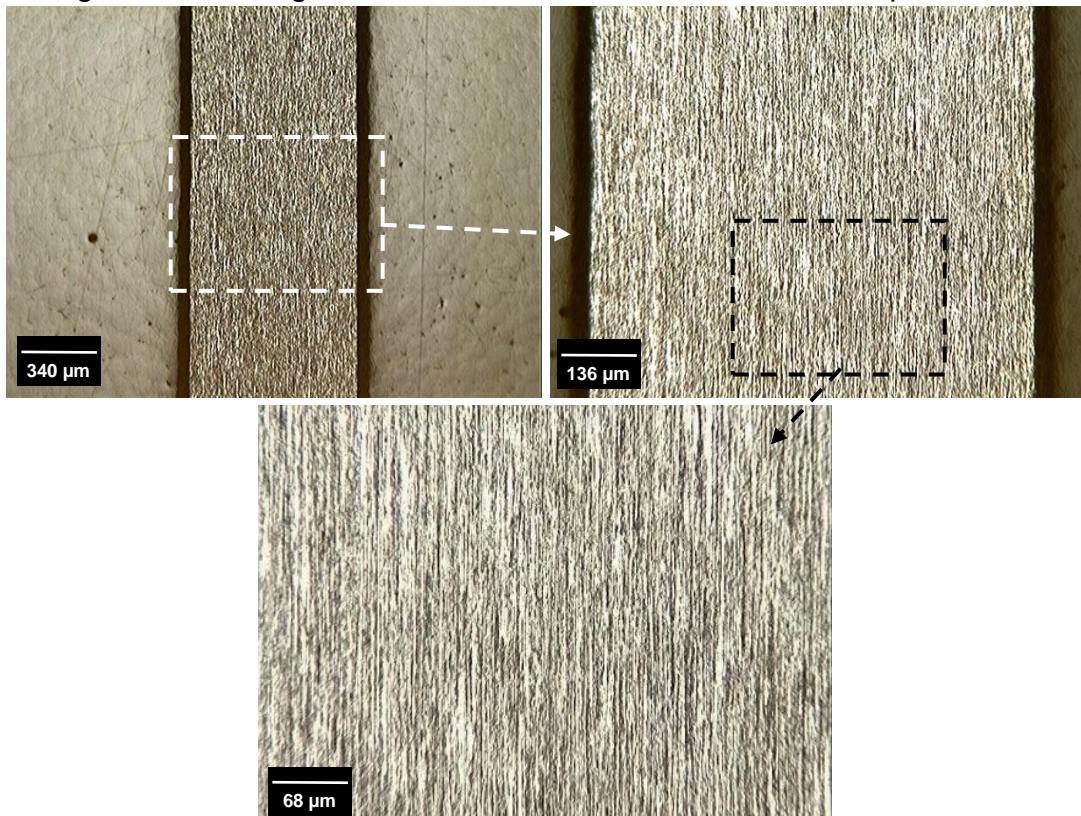
Fonte: autor (2019).

Figura 101 – Imagens de microscopia óptica das fibras, após ensaio de flexão.



Fonte: autor (2019).

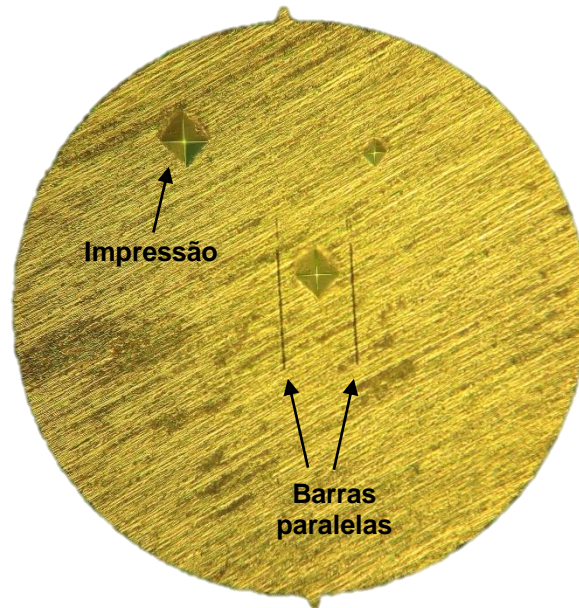
Figura 102 – Imagens das fibras com tratamento térmico, após flexão.



Fonte: autor (2019).

A figura 103 identifica uma amostra durante o ensaio de microdureza Vickers. A imagem exibe a microestrutura após ataque químico, onde existem marcações no formato piramidal, chamadas de impressões, conforme Meyers e Chawla (1999). As barras paralelas foram utilizadas para medição das diagonais das impressões, em seguida o próprio equipamento calcula a microdureza Vickers.

Figura 103 – Amostra durante ensaio de microdureza Vickers.



Fonte: autor (2019).

Os valores de microdureza Vickers são apresentados na tabela 16, para as três condições das fibras (*in natura*; flexão; flexão com tratamento térmico). Percebe-se que a microdureza média aumenta após ensaio mecânico de flexão. Esse acréscimo pode ser explicado pelas deformações plásticas impostas ao material durante o ensaio mecânico e consequente aumento da densidade de discordâncias (REED-HILL e ABBASHIAN, 1994). O aço das fibras que já estava “encruado” pelo trabalho a frio, em virtude do processo de fabricação por trefilação, foi mais uma vez deformado pelo ensaio de flexão, portanto encruado novamente, resultando em aumento das discordâncias e consequente incremento de microdureza.

O comportamento foi diferente para as fibras com tratamento térmico e flexão. A microdureza permaneceu equivalente àquela encontrada para a fibra *in natura*. A temperatura de aquecimento, em torno de 250 °C, está bem abaixo daquela necessária para o completo alívio de tensões, ou recozimento para alívio de tensões,

segundo Reed-Hill e Abbashian (1994). A energia fornecida pelo aquecimento pode ter sido suficiente para dissipar parcialmente as tensões residuais, todavia, esse mecanismo não interfere nos valores de microdureza. Portanto, o resultado está, possivelmente, associado com a amostragem. Ao escolher uma das fibras para análise, após ensaio de flexão, foi selecionada aquela que não sofreu deformações relevantes a ponto de modificar a microdureza.

Tabela 16 – Valores para microdureza Vickers das fibras de aço.

Medidas	Microdureza Vickers (HV 0,2/15)		
	Fibra I ⁽¹⁾	Fibra F ⁽²⁾	Fibra T + F ⁽³⁾
1	286	327	267
2	294	342	285
3	264	337	283
4	272	313	279
5	266	302	271
6	284	318	279
Média	275	323	277
Desvio padrão	11,04	13,78	6,37
Coeficiente de variação	0,04	0,04	0,02

Fonte: autor (2019). Notas: (1) I – fibra *in natura*; (2) F – fibra após ensaio de flexão; (3) F + T – fibra após ensaio de flexão, com tratamento térmico.

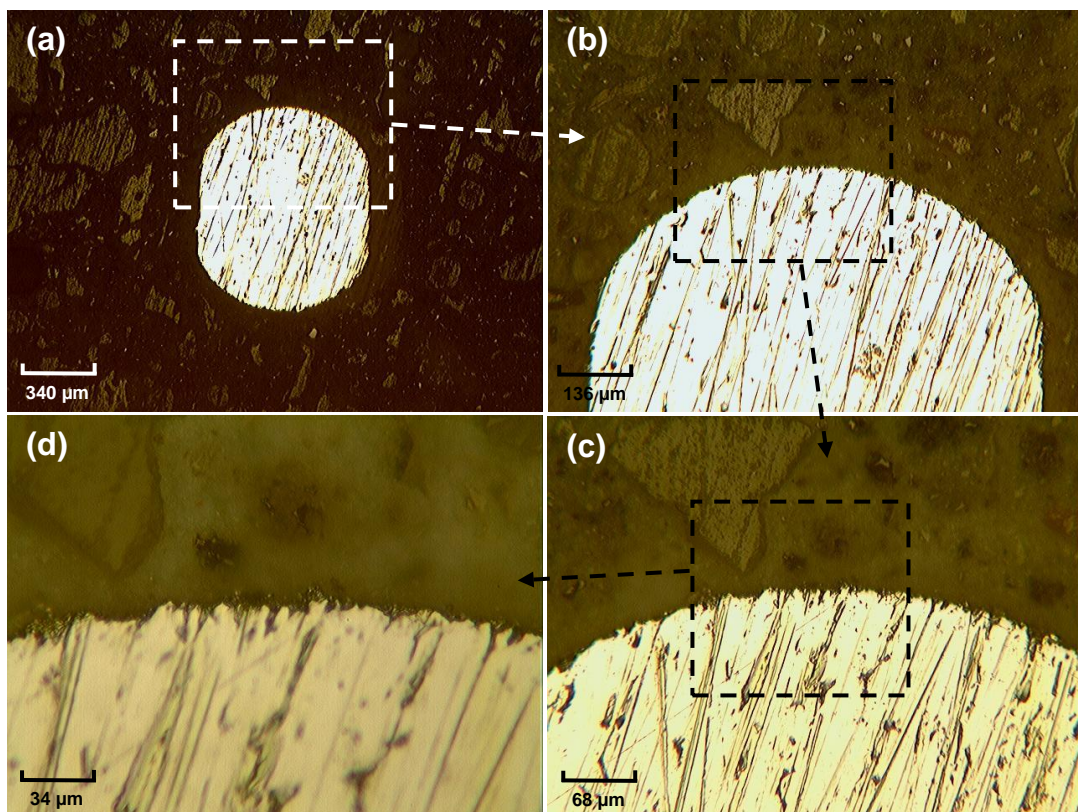
Apesar da variação na microdureza das fibras, a microestrutura ficou preservada e compatível com resultados da literatura. As alterações advindas da deformação plástica e do tratamento térmico não implicam em mudanças microestruturais. As observações referentes à microestrutura e microdureza não intervêm no incremento de desempenho mecânico após tratamento térmico. Logo, a convergência do presente estudo volta-se para aspectos relevantes da zona de transição interfacial e da matriz cimentícia.

5.8.2 Matriz cimentícia e interface fibra-matriz

As figuras 104 (a, b, c e d), 105 (a, b, c e d) e 106 (a, b, c e d) mostram as interfaces fibra-matriz, obtidas por MO. As imagens retratam a seção transversal da fibra imersa na matriz, que pode ser identificada pelo tom brilhante, símil ao amarelo, e seu contorno facilmente identificado. A região em tons mais escuros e opacos, representam a matriz cimentícia que circunda a fibra.

De forma geral, as fibras apresentam contorno contínuo, com presença de rugosidades e pequenas imperfeições, o que favorece o mecanismo de adesão com a matriz. O formato não é perfeitamente circular, como mencionado pelo fabricante (tabela 5, item 4.1.3 do capítulo “Materiais e métodos”), pois apresenta as extremidades arredondadas e o intermédio achatado. Os riscos na área da seção resultam do processo de preparo das amostras, mesmo que lixadas e polidas, não obtiveram superfície completamente lisa. Durante o polimento, pequenas partículas se desprendem da matriz e riscam a superfície do metal, resultando no aspecto identificado. A matriz apresenta constituição homogênea, com grãos de agregados em tamanhos e formatos variados, distribuídos de forma arbitrária e imersos na pasta de cimento com microsílica. Percebe-se alguns poros (figura 105-b), resultantes do processo de moldagem e adensamento. A zona de transição interfacial é íntegra, a pasta de cimento preenche completamente o contorno da fibra e são ausentes defeitos de continuidade (figuras 104-c, 105-c e 106-c).

Figura 104 – Interface fibra-matriz sem tratamento térmico.

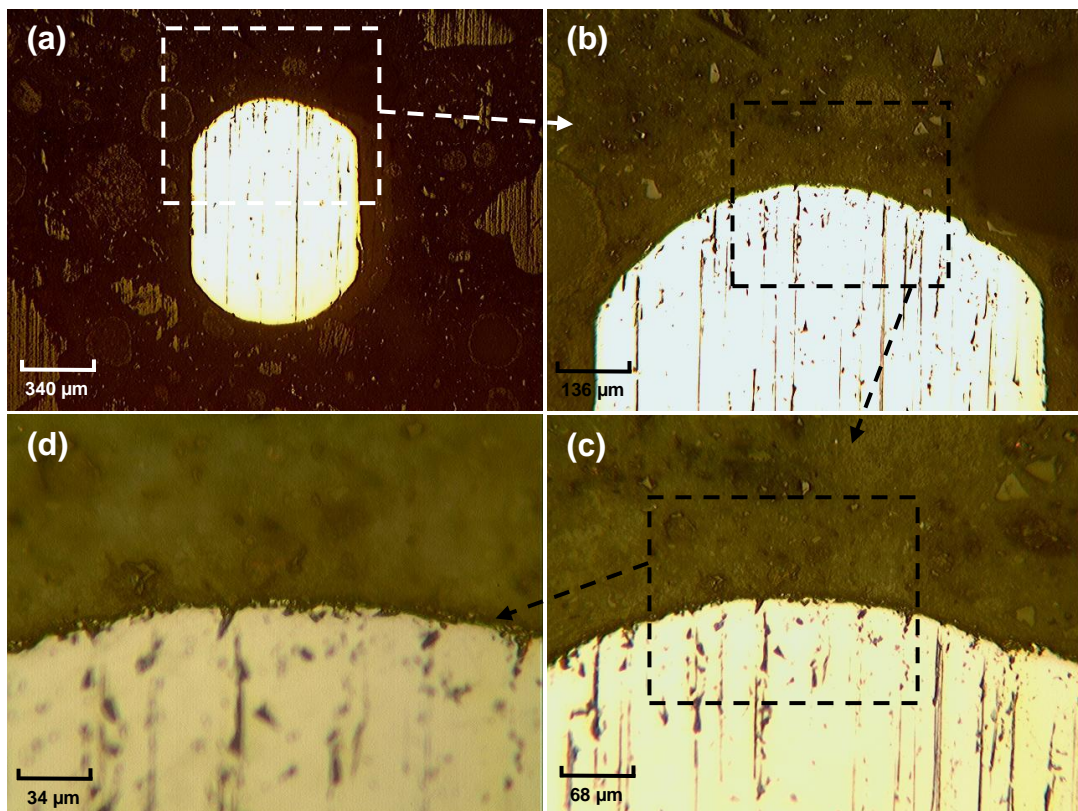


ampliações de (a) 40 vezes, (b) 100 vezes, (c) 200 vezes e (d) 400 vezes.

Fonte: autor (2019).

Quando as amostras são analisadas logo após o preparo (nivelamento, lixamento e polimento), não se vê muita diferença entre as fibras *in natura* (figura 104) e após tratamento térmico (figura 105), exceto, talvez, pelas diferenças de foco e nitidez das imagens. Levando em conta as mesmas condições do ensaio de MO, como luminosidade e lentes de aumento, a coloração das fibras é semelhante, voltada para amarelo. A diferença ocorre quando o tratamento térmico é feito após o preparo da amostra. Na figura 106, a fibra apresenta tons mais escuros, voltados para cor a cobre. Essa mudança de cor sugere alteração da superfície das fibras e corrobora os resultados encontrados pela investigação superficial. Então, o processo de preparo da amostra remove a camada superficial resultante do tratamento térmico.

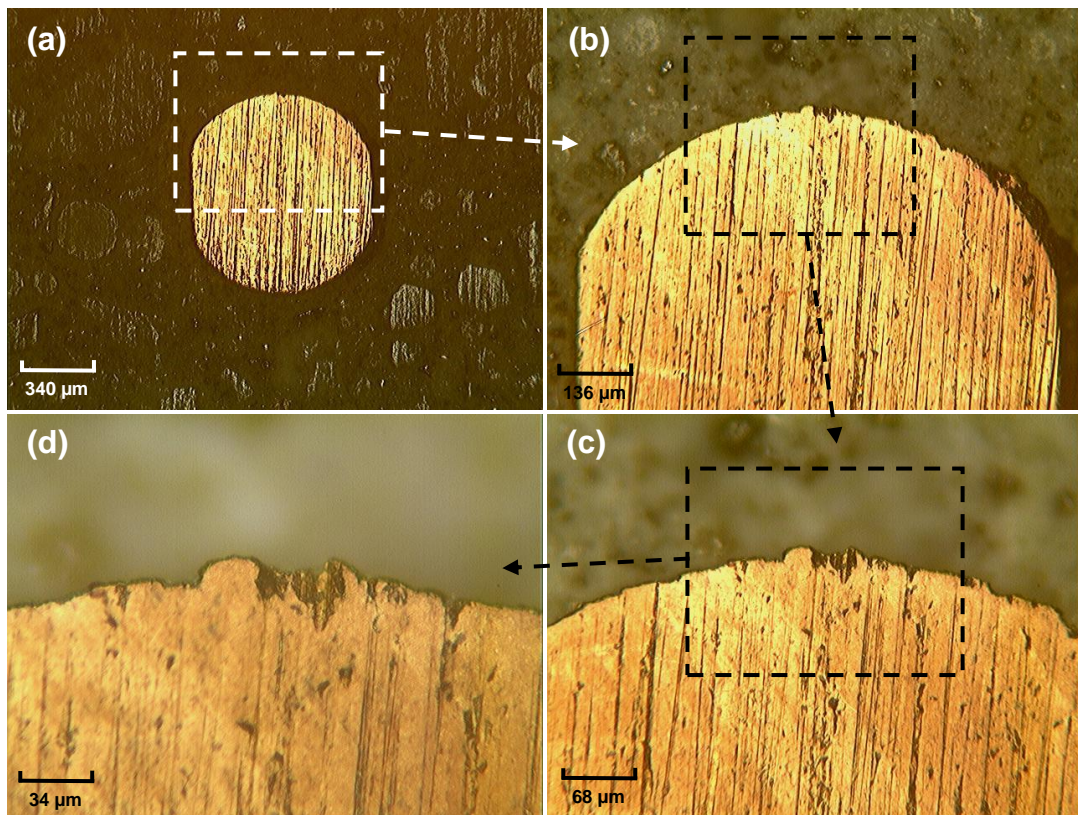
Figura 105 – Interface fibra-matriz com tratamento térmico.



ampliações de (a) 40 vezes, (b) 100 vezes, (c) 200 vezes e (d) 400 vezes.

Fonte: autor (2019).

Figura 106 – Interface fibra-matriz com tratamento térmico precedente ao polimento das amostras.



ampliações de (a) 40 vezes, (b) 100 vezes, (c) 200 vezes e (d) 400 vezes.

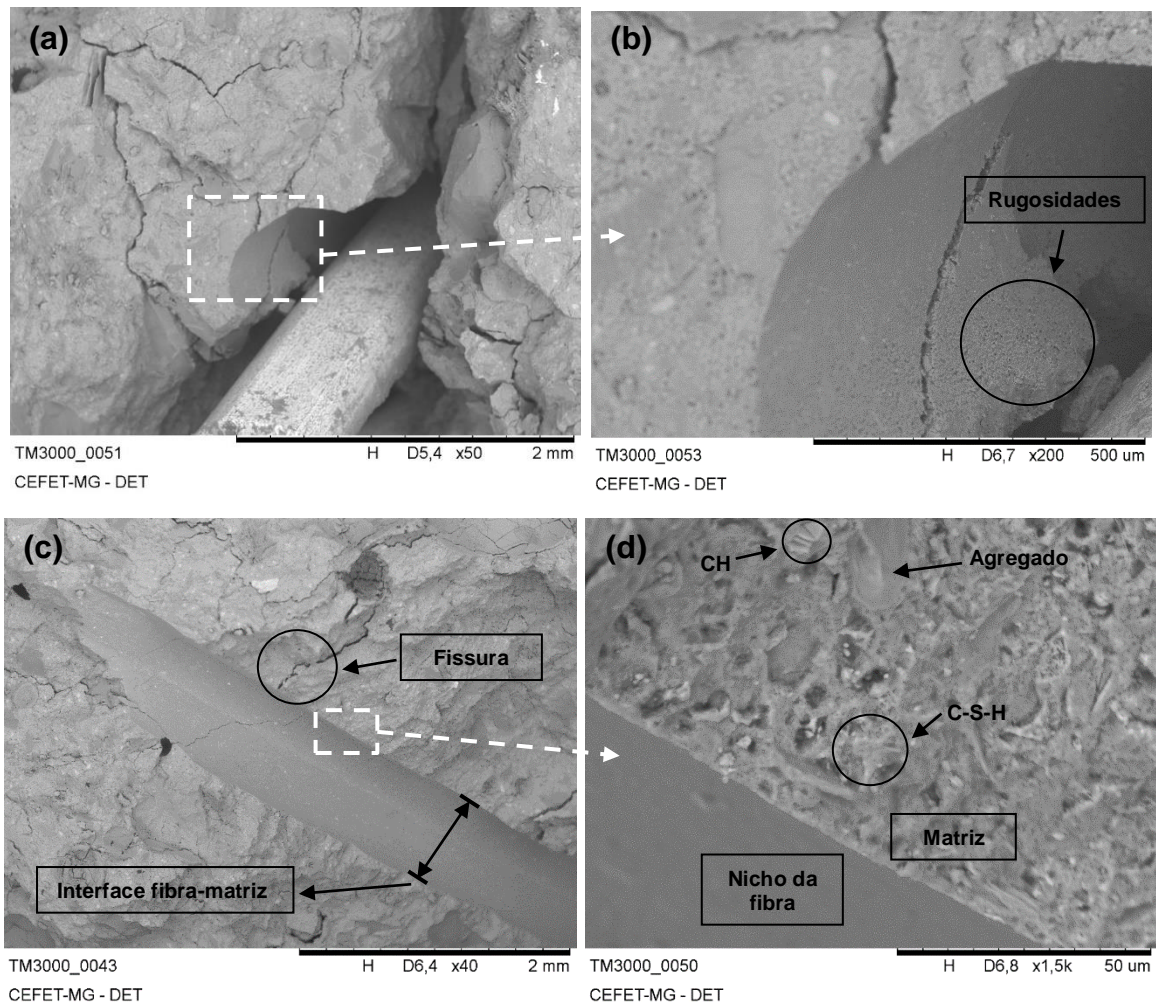
Fonte: autor (2019).

Fica evidente que ocorre mudança superficial das fibras de aço com o tratamento térmico. Entretanto, as imagens precedentes não mostram a presença de outro componente na zona de transição interfacial. Logo, essa camada superficial é tão fina, que não sobressai nas imagens de MO da seção das fibras. Também, ao nível de resolução adotado, não houve deterioração da matriz, que continuou densa e coesa após aquecimento.

A figura 107 (a, b, c e d), mostra a superfície fraturada do compósito, com diversas microfissuras ao longo da matriz. A figura 107-a ressalta a fibra de aço parcialmente acoplada à matriz, onde o mecanismo de extração foi interrompido pela ruptura da matriz. A ampliação do nicho da fibra (figura 107-b) revela a zona de transição interfacial, exibe fissuras e rugosidades da matriz. As fissuras são resultado da fratura da matriz e as rugosidades auxiliam no mecanismo de aderência. A figura 107-c mostra o sítio de suporte da fibra, com destaque para a interface fibra-matriz. A fissura

indicada não apresenta continuidade na borda inferior da interface, logo, foi impedida de se propagar pelo mecanismo de ponte de transferência de tensões. A figura 107-d mostra com detalhes a zona de transição interfacial, que se mostrou contínua e sem imperfeições. Na matriz, existe a presença de agregados e na pasta de cimento endurecida foram identificadas microestruturas típicas, como silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) em formato de redes reticulares e hidróxido de cálcio (CH) com morfologia hexagonal.

Figura 107 – Imagens do compósito fraturado, obtidas por MEV.



Fonte: autor (2019).

5.9 Estudo do incremento de desempenho mecânico com o tratamento térmico

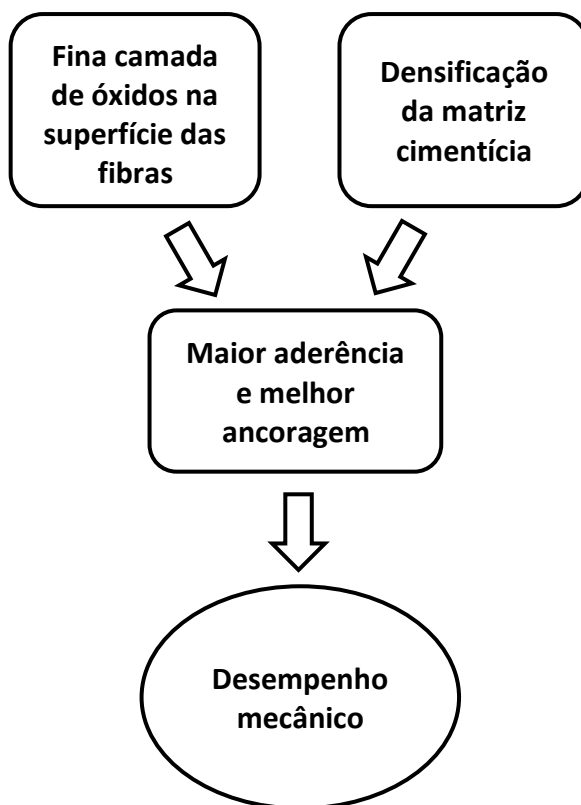
Vários indícios evidenciam o incremento de desempenho mecânico, com o tratamento térmico até 250 °C, da seguinte forma:

- (i). O estudo do comportamento mecânico, por meio das curvas tensão *versus* deflexão, mostrou que tratamento térmico favorece a resistência mecânica na flexão, a tenacidade e a deflexão, tanto em termos da idade, como para o teor de fibras.
- (ii). O tratamento estatístico comprovou a influência das condições (idade, teor de fibras e tratamento térmico) nas variáveis resposta (resistência na flexão, tenacidade e deflexão).
- (iii). O ensaio de *pull-out*, por intermédio das curvas carga *versus* deslocamento, carga máxima de extração e energia de extração, mostrou que o tratamento térmico aumenta a ligação fibra-matriz.
- (iv). O ensaio de resistência à compressão, da argamassa infiltrada sem fibras, identificou que a resistência mecânica da matriz aumenta com o tratamento térmico.

O aumento da resistência mecânica, quando compósitos cimentícios reforçados por fibras são submetidos a temperaturas em torno de 300°C, também foi encontrado em outras pesquisas. Ma et al. (2015), em seu trabalho de revisão sobre concretos submetidos a temperaturas elevadas, concluiu que, naquela faixa de temperatura, a resistência mecânica se mantém constante ou aumenta ligeiramente, o que indica um comportamento diferenciado da matriz cimentícia. Tai, Pan e Kung (2011), Zheng, Li e Wang (2012) e Beglarigale *et al.* (2016) avaliaram o comportamento de concretos reforçados por fibras de aço e identificaram que a resistência mecânica aumenta quando ocorre aquecimento até 300°C. Esse aumento de resistência é causado por mudanças químicas e físicas da matriz cimentícia. Nessa temperatura, ocorre a hidratação de partículas de cimento não hidratadas, formação de novos compostos por reações pozolânicas, alívio de tensões dos poros capilares com uma configuração mais contígua de poros e retração por secagem das estruturas de silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Dessa forma, sugere-se com este estudo que ao aquecer os corpos de prova, até temperaturas em torno de 250 °C, dois efeitos conjuntos prevalecem, conforme figura 108. O primeiro se refere à fina camada de óxidos que se forma na superfície das fibras, sem perda de área útil da seção transversal, o que favorece a adesão fibra-matriz. O segundo é representado pela densificação da matriz cimentícia causada pelo aumento da cinética das reações de hidratação do cimento e adições, que confinam ainda mais as fibras, garantem maior aderência e melhor ancoragem. O efeito sinérgico desses dois mecanismos resulta em melhor desempenho mecânico.

Figura 108 – Organograma para a influência do tratamento térmico no desempenho mecânico de CCADRF.



Fonte: autor (2019).

5.10 Estudo do perfil de fissuração e correlação com o comportamento mecânico

Conforme retratado na revisão da literatura, o perfil de fissuras que ocorre durante os ensaios de flexão é um indicativo importante para avaliar o comportamento mecânico do material em estudo. Conforme mencionado em no capítulo “Materiais e métodos”, o estudo das fissuras foi realizado apenas para a idade característica de 28 dias.

As figuras 109 e 110 mostram os corpos de prova após ensaio de flexão, para as frações de 0%, 1%, 3% e 5% de fibras. Na figura 109 estão os exemplares sem tratamento térmico, enquanto na figura 110 aqueles submetidos à variação controlada de temperatura. As fissuras resultantes do ensaio de flexão podem também serem observadas. Destaque para as fibras expostas o que sugere uma concentração de tensões ao longo da região de destaque. No que diz respeito ao aspecto visual, não se vê muita diferença entre os corpos de prova com tratamento térmico e sem tratamento, exceto pela colocação um pouco mais “esbranquiçada” devido à cura submersa em solução de hidróxido de cálcio.

Figura 109 – Corpos de prova sem tratamento térmico, após ensaio de flexão.



Fonte: autor (2019).

Figura 110 – Corpos de prova após tratamento térmico e ensaio de flexão



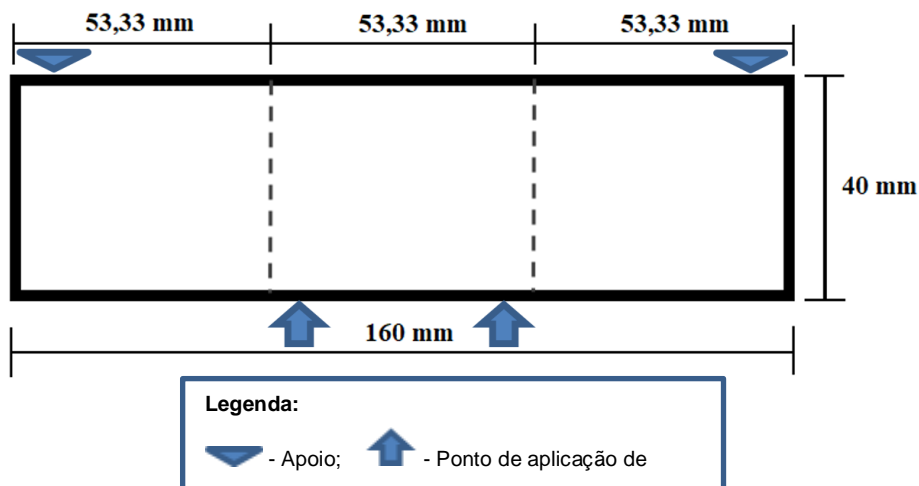
Fonte: autor (2019).

O perfil de fissuração que ocorreu na face lateral dos exemplares é apresentado de forma esquemática nas figuras 112, 113, 114 e 115, para cada um dos teores de fibras (0%, 1%, 3% e 5%), respectivamente. O tratamento térmico também foi contemplado no estudo, de forma que as fissuras dos corpos de prova submetidos a tratamento térmico estão identificadas em vermelho e sem aquecimento estão em azul. O modelo adotado para o padrão de fissuras é retratado na figura 111. As linhas tracejadas dividem o comprimento das amostras em três regiões iguais. O estudo dessas três regiões é importante, porque em cada uma delas as tensões internas atuam de formas diferentes, conforme retratado no item 3.5 da Revisão bibliográfica. São identificados também os apoios e os pontos de aplicação de cargas.

Quando não há presença de fibras, o compósito se comporta de maneira frágil e a ruptura ocorre de forma brusca (figura 112). Sendo assim, os exemplares apresentam uma única fissura praticamente vertical, que se estende por toda seção de ruptura, ou seja, o corpo de prova se partiu em dois fragmentos. As fissuras ocorrem prioritariamente no terço médio do vão onde atuam apenas esforços de flexão. O comportamento térmico não foi influente, a não ser pela tendência de desvios da

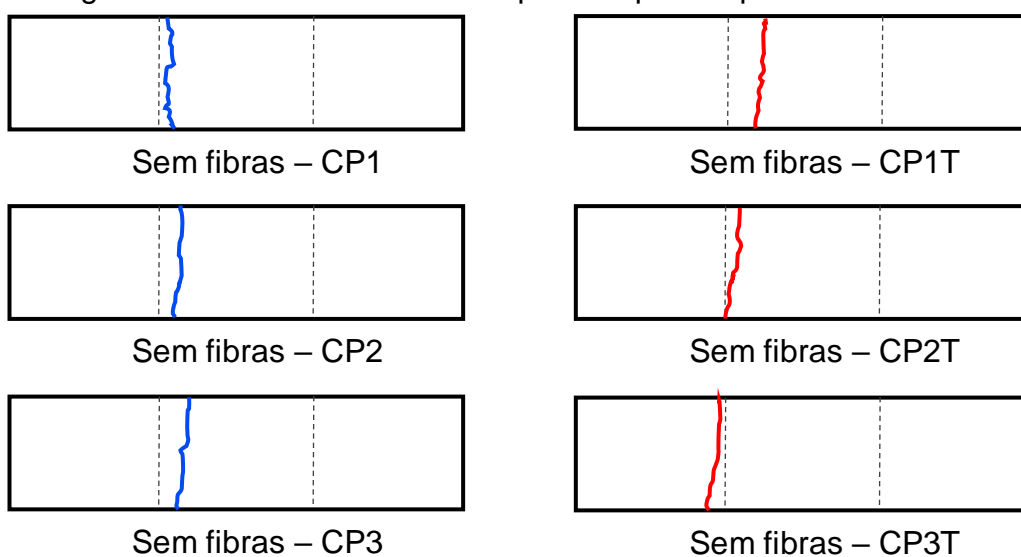
fissura única para a região fora do terço médio, representado pelo CP3T. Entretanto, esse comportamento não pode ser atribuído ao tratamento térmico e sim às condições de contorno durante o ensaio.

Figura 111 – Modelo adotado para o padrão de fissuração das vigas.



Fonte: autor (2019).

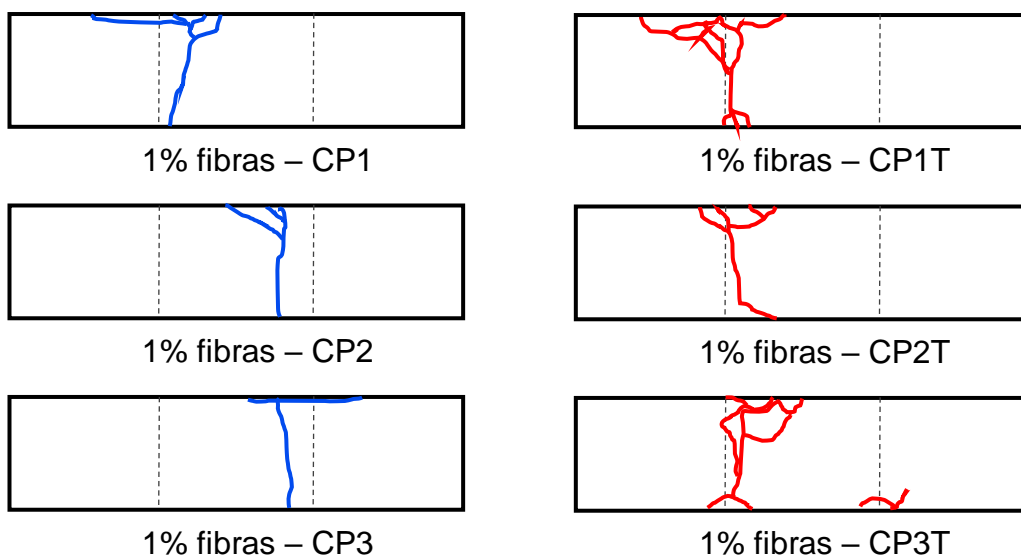
Figura 112 – Padrão de fissuras para corpos de prova sem fibras.



Fonte: autor (2019).

Com 1% de fibras (figura 113), as fissuras continuam sobretudo verticais, entretanto ocorre distorção na região superior, onde estão localizadas as fibras. Não houve um padrão definido e na região superior existe a presença de fissuras inclinadas e horizontais. Durante o teste, surgem várias fissuras na parte superior do corpo de prova (região reforçada), convergem para uma única fissura, que caminha em direção aos pontos de aplicação de carga.

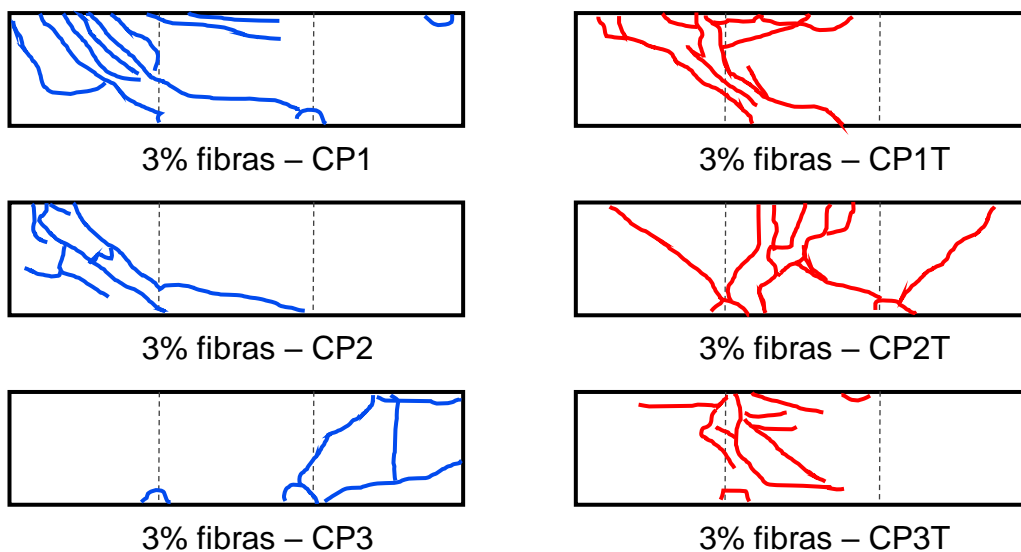
Figura 113 – Padrão de fissuras para corpos de prova com 1% de fibras.



Fonte: autor (2019).

A partir do teor de fibras igual a 3% (figura 114), ocorre mudança acentuada no perfil de fissuração. As fissuras tendem à inclinação e possuem, também, direção vertical e horizontal. Em alguns momentos, as fissuras estão concentradas nas extremidades do corpo de prova, em outros no terço médio ou em ambos. Durante o ensaio, surgem várias fissuras na parte de cima do corpo de prova, ao longo da região reforçada, e caminham em direção aos pontos de aplicação de carga, com tendência de convergir umas com as outras. As fissuras com maior espessura se estendem das faces superiores até os apoios.

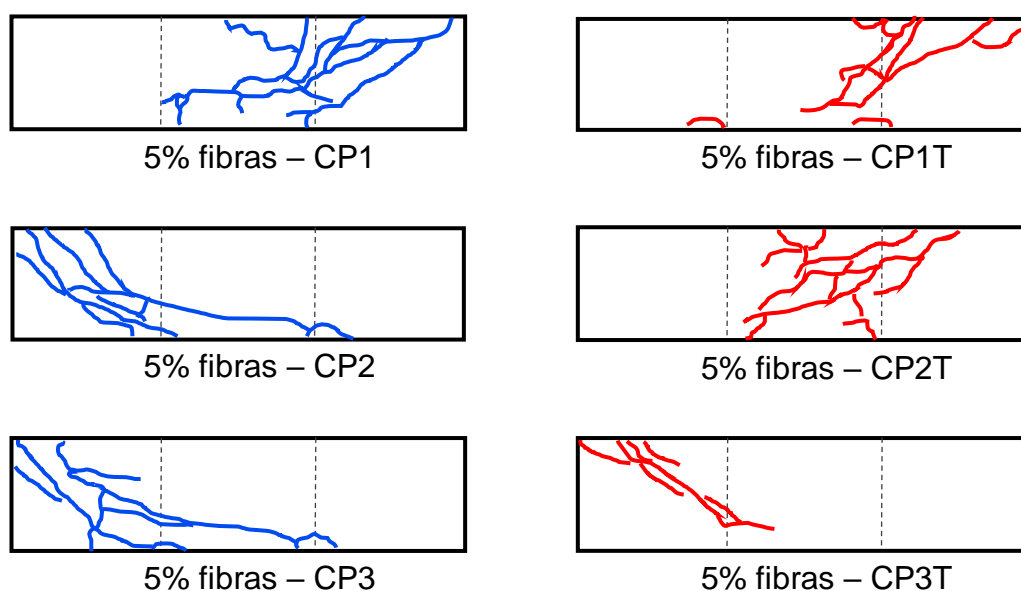
Figura 114 – Padrão de fissuras para corpos de prova com 3% de fibras.



Fonte: autor (2019).

O perfil de fissuras para 5% de fibras (figura 115) se assemelha àquele exibido pelos exemplares com 3% de fibras. Contudo, as fissuras são mais sinuosas, com acentuada tendência à inclinação. As fissuras estão concentradas no terço médio dos exemplares, nas extremidades, ou em ambos. Durante o ensaio, surgem várias fissuras na região superior do corpo de prova, onde se concentram as fibras, que se estendem ao longo da face lateral, em direção aos apoios. A tendência de convergência das fissuras se mantém, entretanto, menos expressiva. As fissuras com maiores espessuras se prolongam das faces superiores até os apoios.

Figura 115 – Padrão de fissuras para corpos de prova com 5% de fibras.



Fonte: autor (2019).

De forma geral, as fissuras são aleatórias e os perfis fogem de um padrão regular, em conformidade com Yan, Wu e Zhang (2002). A presença de fibras alterou de forma significativa o perfil de fissuração do compósito, o que já era esperado, tendo em vista comportamento mecânico peculiar dos CCRF. O aumento do teor de fibras também influencia de forma significativa o padrão das fissuras. Quanto maior o teor de fibras, maior tendência de inclinação das fissuras. Em alguns corpos de prova, foi observado a presença de leve esmagamento na região de contato com os pontos de aplicação de carga, principalmente devido à concentração de tensões e efeitos de borda.

Quatro fatores concomitantes contribuíram para o padrão de fissuração retratado:

O primeiro, está relacionado com a variação das propriedades do compósito ao longo de direções diferentes. O comportamento anisotrópico do CCRF é fator categórico nas análises e a fissuração é diferente para cada teor de fibras. O caráter anisotrópico do compósito possibilita melhor intertravamento entre fibra-matriz, e conseqüentemente resulta em um padrão de fissuração mais denso e aleatório, conforme relatado por Yan, Wu e Zhang (2002).

O segundo, está relacionado com a presença de esforços cisalhantes. Conforme mencionado na revisão da literatura, o modelo de ensaio à flexão a quatro pontos gera esforços cisalhantes, além dos esforços de flexão. O esforço cisalhante ou cortante ocorre nos terços extremos da viga, fora do terço médio, enquanto o momento máximo ocorre no meio do vão. Então, dois modelos de ruptura podem ocorrer: (i) colapso por esforço cortante, (ii) colapso por flexão ou (iii) colapso por composição de esforços. O esforço cisalhante e momento fletor aumentam com a aplicação das cargas, até o limite suportado pela viga. O colapso ocorre quando os esforços solicitantes superam a resistência do compósito. Os padrões irregulares das fissuras não permitem concluir ao certo o tipo de colapso. Entretanto, as fissuras inclinadas sugerem atuação de esforços de cisalhamento, que associado ao comportamento anisotrópico do material, contribuíram para o desempenho retratado.

O terceiro, se refere à relação comprimento da fibra e dimensões do corpo de prova. A fibra possui comprimento de 50 mm, enquanto o corpo de prova possui dimensões de 40 x 40 x 160 mm. O comprimento da fibra é maior que as duas menores dimensões do molde, o que resulta em uma direção preferencial de acomodação das fibras, isto é, tendência de alinhamento ao longo do comprimento do corpo de prova. Levando em conta os esforços na flexão, esse alinhamento é benéfico, dado que as fibras se orientam perpendicularmente às fissuras, o que auxilia no mecanismo de ponte de transferência de tensões e contribui para cargas elevadas durante ensaios de flexão.

O quarto, e não menos importante, se refere ao método de inserção de fibras. As fibras foram lançadas nos moldes de forma aleatória, o que garantiu acomodação natural das fibras, conforme método de moldagem do SIFCON (WOOD, 2000; GILANI, 2007). Entretanto, houve regiões com menor concentração de fibras, principalmente nas

extremidades das vigas, resultado do processo de moldagem. Além disso, os pontos de apoio, que geram tensões de contato e distorções localizadas, foram posicionados nas extremidades da viga, justamente onde há menor concentração de fibras. Essas regiões específicas geram pontos de fragilidade no compósito, o que pode resultar em locais propícios para propagação de fissuras.

Dessa forma, cada uma das implicações atuou de forma específica e, quando combinadas, exerceram influência significativa no comportamento do compósito (figura 116). O resultado foi, então, o padrão de fissuras analisado.

Figura 116 – Fatores influentes para o colapso da viga e padrão de fissuras.



Fonte: autor (2019).

6 CONCLUSÕES

O comportamento mecânico na flexão, antes e após tratamento térmico, de compósitos cimentícios de alto desempenho reforçados por fibras (CCADRF) foi analisado. As seguintes conclusões se destacam, sem detrimento às outras que intercorreram ao longo do trabalho:

A incorporação de fibras, distribuídas ao longo da região mais solicitada por esforços de tração, implica em acréscimo considerável da resistência na flexão. Esse comportamento se deve ao arranjo preferencial das fibras, mesmo que distribuídas de forma aleatória, que funcionam com maior eficiência na transferência de tensão entre as fissuras.

A análise estatística comprovou que o aumento da idade, o acréscimo do teor de fibras e a aplicação do tratamento térmico contribuíram para o aumento da resistência na flexão, tenacidade e deflexão.

O ensaio de *pullout* revelou que a ligação entre fibra e matriz é coesa. Inclusive, confirmou a influência do tratamento térmico no mecanismo de adesão fibra-matriz, haja vista que, após aquecimento, a carga máxima e a energia de extração aumentaram de forma notória.

A resistência à compressão da matriz cimentícia aumentou com o tratamento térmico, o que corrobora os resultados encontrados para o comportamento mecânico do compósito. O tratamento térmico intensifica as reações de hidratação do cimento e adições, o que resulta numa matriz mais coesa e conseqüente acréscimo de resistência mecânica.

O uso das técnicas de microscopia eletrônica de varredura e microscopia óptica auxiliaram no entendimento da interface fibra-matriz, bem como foi possível examinar as alterações na superfície das fibras de aço advindas do tratamento térmico.

O tratamento térmico promove acréscimo de resistência na flexão para o compósito cimentício reforçado com fibras. Esse fato é devido aos mecanismos de oxidação superficial das fibras e densificação da matriz cimentícia, que, sinérgicos, conferem melhor aderência e maior confinamento das fibras na zona de transição interfacial.

As vigas, com idades de 28 e 56 dias, sem reforço e sem aquecimento, apresentaram menor resistência na flexão quando submetidos a tratamento térmico, o que não era esperado. Entretanto, se mostrou um comportamento diferenciado do concreto de alto desempenho em estudo.

Os perfis de fissuração ajudaram a esclarecer o comportamento mecânico. Os esforços atuantes e o comportamento anisotrópico do compósito, combinados, foram decisivos para a forma de colapso das vigas em modelo reduzido. As fissuras não exibiram um padrão definido, apresentaram delineamentos distintos, com distorções e tendência à inclinação, conforme o teor de fibras aumenta.

Isto posto, o próximo tópico lista algumas sugestões para trabalhos futuros.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho sugere como pesquisas futuras os temas seguintes:

- Estudo do comportamento mecânico de CCRF, com distribuição diferenciada de fibras, submetidos à temperaturas elevadas;
- Avaliação do desempenho de CCRF, com fibras híbridas, submetidos à temperaturas elevadas.
- Estudo da correlação entre perfil de fissuração e propriedades mecânicas (resistência mecânica, tenacidade e deflexão).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLAH, Sadoon; FAN, Mizi; CASHELL, K. A. Bond-slip behaviour of steel fibres in concrete after exposure to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 542-551, 2017.

ABID, Muhammad et al. High temperature and residual properties of reactive powder concrete—A review. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 339-351, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR12142: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ARIF, Mohammed Adel. **Avaliação da medida de tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço**. Tese de Doutorado – Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

ARIOZ, Omer. Effects of elevated temperatures on properties of concrete. **Fire Safety Journal**, v. 42, n. 8, p. 516-522, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). C 1018-97. Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading). **ASTM International**, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). C1609/C1609M-12. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). **ASTM International**, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). C150/150M-18: Standard Specification for Portland Cement. **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2018

BACHE, Hans Henrik. Densified cement/ultra-fine particle based materials. In: **the second international conference on superplasticizers in concrete**, 1981.

BALAJI, S.; THIRUGNANAM, G. S. Behaviour of reinforced concrete beams with SIFCON at various locations in the beam. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 22, n. 1, p. 161-166, 2018.

BEGLARIGALE, Ahsanollah; YAZICI, Halit. Pull-out behavior of steel fiber embedded in flowable RPC and ordinary mortar. **Construction and building materials**, v. 75, p. 255-265, 2015.

BEGLARIGALE, Ahsanollah et al. Flexural performance of SIFCON composites subjected to high temperature. **Construction and Building Materials**, v. 104, p. 99-108, 2016.

BENTUR, A., MINDESS, S., **Fiber Reinforced Cementitious Composites**. Elsevier Science Publishers, 1990.

BIRCHALL, J. D.; HOWARD, A. J.; KENDALL, K. Flexural strength and porosity of cements. **Nature**, v. 289, n. 5796, p. 388, 1981.

BLANCO, A. et al. Assessment of the fibre orientation factor in SFRC slabs. **Composites Part B: Engineering**, v. 68, p. 343-354, 2015.

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

BRANDT, Andrzej M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. **Composite structures**, v. 86, n. 1-3, p. 3-9, 2008.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8ª edição. Ed. Grupo Gen-LTC, p. 817, 2013.

CARVALHO, E. A.; DUARTE, E. T. V. Ensaios de Flexão: Uma revisão dos modelos matemáticos empregados na sua análise. **Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, v. 14, São Pedro - SP, 2000.

CAVERZAN, Alessio; CADONI, Ezio; DI PRISCO, Marco. Dynamic tensile behaviour of high performance fibre reinforced cementitious composites after high temperature exposure. **Mechanics of Materials**, v. 59, p. 87-109, 2013.

CHANG, Yun-Fei et al. Residual stress–strain relationship for concrete after exposure to high temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 10, p. 1999-2005, 2006.

CHEYREZY, Marcel; MARET, Vincent; FROUIN, Laurent. Microstructural analysis of RPC (reactive powder concrete). **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1491-1500, 1995.

CHUN, Booki; YOO, Doo-Yeol. Hybrid effect of macro and micro steel fibers on the pullout and tensile behaviors of ultra-high-performance concrete. **Composites Part B: Engineering**, v. 162, p. 344-360, 2019.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Edgard Blucher, 2008.

CUI, Shengai et al. Experimental study on mechanical property and pore structure of concrete for shotcrete use in a hot-dry environment of high geothermal tunnels. **Construction and Building Materials**, v. 173, p. 124-135, 2018.

CUROSU, Iurie et al. Tensile behavior of high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC) made with high-performance polyethylene, aramid and PBO fibers. **Cement and Concrete Research**, v. 98, p. 71-81, 2017.

DENG, Fangqian et al. The pull-out behavior of straight and hooked-end steel fiber from hybrid fiber reinforced cementitious composite: Experimental study and analytical modelling. **Composite Structures**, v. 206, p. 693-712, 2018.

ELAVARASI, D. et al. Effects of slag on flexural strength of slurry infiltrated fibrous concrete. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2017. p. 012036.

FANTILLI, Alessandro P. et al. Synergy assessment in hybrid Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHP-FRC). **Cement and Concrete Composites**, v. 86, p. 19-29, 2018.

FARES, Hanaa et al. High temperature behaviour of self-consolidating concrete: microstructure and physicochemical properties. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 3, p. 488-496, 2010.

FARNAM, Y. et al. Behaviour of slurry infiltrated fibre concrete (SIFCON) under triaxial compression. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 11, p. 1571-1581, 2010.

FERRARA, Liberato; OZYURT, Nilufer; DI PRISCO, Marco. High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites: the role of “casting-flow induced” fibre orientation. **Materials and Structures**, v. 44, n. 1, p. 109-128, 2011.

FIELD, Andy. **Descobrimo a estatística usando o SPSS**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2009. 688 p.

FURLAN JR, Sydney; DE HANAI, João Bento. Shear behaviour of fiber reinforced concrete beams. **Cement and concrete composites**, v. 19, n. 4, p. 359-366, 1997.

FU, Yu-Fang et al. Experimental study of micro/macro crack development and stress-strain relations of cement-based composite materials at elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 5, p. 789-797, 2004.

GEORGALI, B.; TSAKIRIDIS, P. E. Microstructure of fire-damaged concrete. A case study. **Cement and Concrete composites**, v. 27, n. 2, p. 255-259, 2005.

GILANI, Adel Mohamed. Various durability aspects of slurry infiltrated fiber concrete. PhD. Thesis. **Middle East Technical University**, Turkey. 2007.

HAIR, Joseph F. et al. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2009. 688 p.

HAGER, Izabela. Behaviour of cement concrete at high temperature. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences**, v. 61, n. 1, p. 145-154, 2013.

HE, Shan et al. Strain hardening ultra-high performance concrete (SHUHPC) incorporating CNF-coated polyethylene fibers. **Cement and Concrete Research**, v. 98, p. 50-60, 2017.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos materiais**. Tradução: Arlete Simile Marques. Revisão técnica: Sebastião Simões da Cunha Jr. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2010. 637 p.

HOU, Xiaomeng et al. Effect of fire insulation on fire resistance of hybrid-fiber reinforced reactive powder concrete beams. **Composite Structures**, v. 209, p. 219-232, 2019.

IBRAHIM, Rahel Kh; HAMID, Roszilah; TAHA, Mohd Raihan. Fire resistance of high-volume fly ash mortars with nanosilica addition. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 779-786, 2012.

ISLA, Facundo; RUANO, Gonzalo; LUCCIONI, Bibiana. Analysis of steel fibers pull-out. Experimental study. **Construction and Building Materials**, v. 100, p. 183-193, 2015.

JSCE (JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS). Recommendations for design and construction of ultra high strength fiber reinforced concrete structures (Draft). **JSCE Guidelines for Concrete**. No. 9, 2006.

JU, Yang et al. An experimental investigation of the thermal spalling of polypropylene-fibered reactive powder concrete exposed to elevated temperatures. **Science bulletin**, v. 60, n. 23, p. 2022-2040, 2015.

KANG, Su Tae et al. The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2450-2457, 2011.

KIM, Dong; NAAMAN, Antoine E.; EL-TAWIL, Sherif. Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites. **Cement and concrete Composites**, v. 30, n. 10, p. 917-928, 2008.

LANKARD, KAR, David R. Properties, applications: Slurry infiltrated fiber concrete (SIFCON). **Concrete International**, v. 6, n. 12, p. 44-47, 1984.

LEE, Nam Kon et al. Uncovering the role of micro silica in hydration of ultra-high performance concrete (UHPC). **Cement and Concrete Research**, v. 104, p. 68-79, 2018.

LI, X. J. et al. Microstructural characteristics of HPC under different thermo-mechanical and thermo-hydraulic conditions. **Materials and Structures**, v. 32, n. 10, p. 727-733, 1999.

LIMA JR., Humberto C.; DIAS, Antonio A. Vigas mistas de madeira de reflorestamento e bamboo laminado colado: análise teórica e experimental. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.3, p.519-524, 2001.

LIN, Wei-Ming; LIN, T. D.; POWERS-COUCHE, L. J. Microstructures of fire-damaged concrete. **ACI Materials Journal**, v. 93, n. 3, p. 199-205, 1996.

LIU, Jin-Cheng; TAN, Kang Hai. Fire resistance of ultra-high performance strain hardening cementitious composite: Residual mechanical properties and spalling resistance. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, p. 62-75, 2018.

MA, Qianmin et al. Mechanical properties of concrete at high temperature - a review. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 371-383, 2015.

MEHTA, Povindar K.; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. Ed. Ibracon, p. 782, 2014.

MARTHA, Luiz. **Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos**. Elsevier Brasil, 2010.

MENDES, Alessandra et al. The influence of water absorption and porosity on the deterioration of cement paste and concrete exposed to elevated temperatures, as in a fire event. **Cement and concrete composites**, v. 34, n. 9, p. 1067-1074, 2012.

MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. **Mechanical behavior of materials**. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 680p.

MÍNGUEZ, Jesús; GONZÁLEZ, Dorys C.; VICENTE, Miguel A. Fiber geometrical parameters of fiber-reinforced high strength concrete and their influence on the residual post-peak flexural tensile strength. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 906-922, 2018.

MONTE, Renata. **Caracterização e controle do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras para tubos**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

NAAMAN, Antoine E. Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites. **Journal of advanced concrete technology**, v. 1, n. 3, p. 241-252, 2003.

NAAMAN, A. E. Half a century of progress leading to ultra-high performance fiber reinforced concrete: part 1 - overall review. In: **Proceedings of the 2nd International RILEM Conference on strain hardening cementitious composites (SHCC2-Rio)**. 2011. p. 17-26.

NAAMAN, A. E. Half a century of progress leading to ultra-high performance fiber reinforced concrete: part 1 - overall review. In: **Proceedings of the 2nd International RILEM Conference on strain hardening cementitious composites (SHCC2-Rio)**. 2011. p. 17-26.

NAAMAN, A. E. Fiber reinforced concrete: five decades of progress. In: **Proceedings of 4th Brazilian Conference on Composite Materials**. Rio de Janeiro, 2018. p. 35-56.

NAAMAN, A. E. Half a century of progress leading to ultra-high performance fiber reinforced concrete: part 2 - tensile stress-strain response. In: **Proceedings of the 2nd RILEM international conference on strain hardening cementitious composites (SHCC2-Rio)**. 2011. p. 27-36.

NAAMAN, Antoine E.; HOMRICH, Joseph R. Tensile stress-strain properties of SIFCON. **Materials Journal**, v. 86, n. 3, p. 244-251, 1989.

NAAMAN, Antoine E.; OTTER, Duane; NAJM, Husamuddin. Elastic modulus of SIFCON in tension and compression. **Materials Journal**, v. 88, n. 6, p. 603-613, 1992.

NAAMAN, A. E. et al. Non-linear analysis of RC beams using a SIFCON matrix. **Materials and structures**, v. 26, n. 9, p. 522-531, 1993.

NAAMAN, Antoine E.; WIGHT, James K.; ABDU, Hossam. SIFCON connections for seismic resistant frames. **Concrete International**, v. 9, n. 11, p. 34-39, 1987.

NAAMAN, A. E.; REINHARDT, H. W. International workshop series on high performance fiber reinforced cement composites (HPFRCC): history and evolution. In: **Proc., 7th Int. RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC7)**. RILEM Publications SARL, Stuttgart, Germany. 2015.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto. 5ª Edição**. Bookman Editora, 2015.

NIEUWOUDT, Pieter Daniel; BOSHOFF, William Peter. Time-dependent pull-out behaviour of hooked-end steel fibres in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 79, p. 133-147, 2017.

NGUYEN, Duy Liem et al. Size and geometry dependent tensile behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. **Composites Part B: Engineering**, v. 58, p. 279-292, 2014.

NOVAK, Josef; KOHOUTKOVA, Alena. Mechanical properties of concrete composites subject to elevated temperature. **Fire Safety Journal**, v. 95, p. 66-76, 2018.

PARDINI, Luiz C.; LEVY NETO, Flávio. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia. 2ª edição. Ed. Edgard Blucher. São Paulo**, 2016.

PENG, Gai-Fei et al. Combined curing as a novel approach to improve resistance of ultra-high performance concrete to explosive spalling under high temperature and its mechanical properties. **Cement and Concrete Research**, v. 109, p. 147-158, 2018.

PENG, Gai-Fei; HUANG, Zhi-Shan. Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 4, p. 593-599, 2008.

PLAGUÉ, T.; DESMETTRE, C.; CHARRON, J.-P. Influence of fiber type and fiber orientation on cracking and permeability of reinforced concrete under tensile loading. **Cement and Concrete Research**, v. 94, p. 59-70, 2017.

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 12, p. 2215-2222, 2004.

RAMBO, Dimas Alan Strauss; SILVA, Flávio; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. Mechanical behavior of hybrid steel-fiber self-consolidating concrete: materials and structural aspects. **Materials & Design (1980-2015)**, v. 54, p. 32-42, 2014.

REED-HILL, R. E.; ABBASHIAN, R. **Physical metallurgy principles**. 3rd ed. Boston: PWS Publishing Company, 1994. 926p.

RICHARD, Pierre; CHEYREZY, Marcel. Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1501-1511, 1995.

ROTH, M. J. et al. Ultra-High-Strength, Glass Fiber-Reinforced Concrete: Mechanical Behavior and Numerical Modeling. **ACI Materials Journal**, v. 107, n. 2, 2010.

ROY, Do M.; GOUDA, G. R.; BOBROWSKY, A. Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques. **Cement and Concrete Research**, v. 2, n. 3, p. 349-366, 1972.

RUANO, Gonzalo et al. Steel fibers pull-out after exposure to high temperatures and its contribution to the residual mechanical behavior of high strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 571-585, 2018.

RUSSELL, Henry G. ACI defines high-performance concrete. **Concrete international**, v. 21, n. 2, p. 56-57, 1999.

SAAD, M. et al. Effect of temperature on physical and mechanical properties of concrete containing silica fume. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 5, p. 669-675, 1996.

SARZALEJO, A. G.; ROSSI, B.; PERRI, G.; WINTERBERG, R.; ARISTEGUIETA, R. E. P. Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto. (Manual Técnico). **Maccaferri do Brasil Ltda.**, 2009.

SCHMIDT, Michael; FEHLING, Ekkehard. Ultra-high-performance concrete: research, development and application in Europe. **ACI Special publication**, v. 228, p. 51-78, 2005.

SCHNEIDER, B. Development of SIFCON through Applications. In: **High Performance Fiber Reinforced Cement Composites**. RILEM, 1992. p. 177-194.

SCRIVENER, Karen L.; KIRKPATRICK, R. James. Innovation in use and research on cementitious material. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 2, p. 128-136, 2008.

SINGH, M. et al. Experimental and numerical study of the flexural behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete beams. **Construction and Building Materials**, v. 138, p. 12-25, 2017.

SO, Hyoung-Seok et al. Properties of strength and pore structure of reactive powder concrete exposed to high temperature. **ACI Mater. J**, v. 111, n. 3, p. 335-346, 2014.

SONG, Qiulei et al. Optimization of fibre orientation and distribution for a sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC): Experiments and mechanism analysis. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 8-19, 2018.

SVEC, Oldřich et al. Influence of formwork surface on the orientation of steel fibres within self-compacting concrete and on the mechanical properties of cast structural elements. **Cement and Concrete Composites**, v. 50, p. 60-72, 2014.

TAI, Yuh-Shiou; PAN, Huang-Hsing; KUNG, Ying-Nien. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 C. **Nuclear Engineering and Design**, v. 241, n. 7, p. 2416-2424, 2011.

TUYAN, Murat; YAZICI, Halit. Pull-out behavior of single steel fiber from SIFCON matrix. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 571-577, 2012.

VODÁK, František et al. The effect of temperature on strength–porosity relationship for concrete. **Construction and building materials**, v. 18, n. 7, p. 529-534, 2004.

WANG, Xi-Shu; WU, Bi-Sheng; WANG, Qing-Yuan. Online SEM investigation of microcrack characteristics of concretes at various temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 7, p. 1385-1390, 2005.

WILLE, K.; EL-TAWIL, S.; NAAMAN, A. E. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. **Cement and Concrete Composites**, v. 48, p. 53-66, 2014.

WILLE, Kay; KIM, Dong Joo; NAAMAN, Antoine E. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents. **Materials and Structures**, v. 44, n. 3, p. 583-598, 2011.

WILLE, Kay; NAAMAN, Antoine E.; PARRA-MONTESINOS, Gustavo J. Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way. **ACI Materials Journal**, v. 108, n. 1, 2011.

WILLE, Kay; PARRA-MONTESINOS, Gustavo J. Effect of Beam Size, Casting Method, and Support Conditions on Flexural Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 109, n. 3, 2012.

WON, Jong-Pil; LEE, Jae-Ho; LEE, Su-Jin. Predicting pull-out behaviour based on the bond mechanism of arch-type steel fibre in cementitious composite. **Composite Structures**, v. 134, p. 633-644, 2015.

WOOD, B. T. Use of Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON) in Hinge Regions for Earthquake Resistant Concrete Moment Frames. Ph. D. Thesis, **Department of Civil Engineering, North Carolina State University**. 2000.

YAN, An; WU, Keru; ZHANG, Xiong. A quantitative study on the surface crack pattern of concrete with high content of steel fiber. **Cement and concrete research**, v. 32, n. 9, p. 1371-1375, 2002.

YOO, D. Y. **Performance enhancement of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete and model development for practical utilization**. PhD. Thesis. Seoul Korea University. Seoul, South Korea, 2014.

YOO, Doo-Yeol; BANTHIA, Nemkumar. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 73, p. 267-280, 2016.

YOO, Doo-Yeol; BANTHIA, N.; KANG, S.T.; YOON, Y.S. Effect of fiber orientation on the rate-dependent flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. **Composite Structures**, v. 157, p. 62-70, 2016.

YOO, Doo-Yeol; KANG, Su-Tea; YOON, Young-Soo. Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC. **Construction and Building materials**, v. 64, p. 67-81, 2014.

YUDENFREUND, Marvin; ODLER, Ivan; BRUNAUER, Stephen. Hardened portland cement pastes of low porosity I. Materials and experimental methods. **Cement and Concrete Research**, v. 2, n. 3, p. 313-330, 1972.

ZHANG, Shengli et al. Experimental and Analytical Study of the Fibre Distribution in SFRC: A Comparison between Image Processing and the Inductive Test. **Composite Structures**, 2018.

ZHENG, Wenzhong; LI, Haiyan; WANG, Ying. Compressive stress–strain relationship of steel fiber-reinforced reactive powder concrete after exposure to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 931-940, 2012.

ZOLLO, Ronald F. Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. **Cement and Concrete Composites**, v. 19, n. 2, p. 107-122, 1997.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Curvas de carga *versus* deflexão e cálculo dos valores de tenacidade

A seguir são apresentadas as curvas de carga *versus* deflexão para todos os corpos de prova estudados, bem como os valores encontrados para tenacidade, levando em consideração os valores de deflexão estabelecidos (L/600, L/150, L/100, L/60, L/40 e Delf.máx.).

Figura A.1 – Curva carga *versus* deflexão para o corpo de prova V7F0CP1.

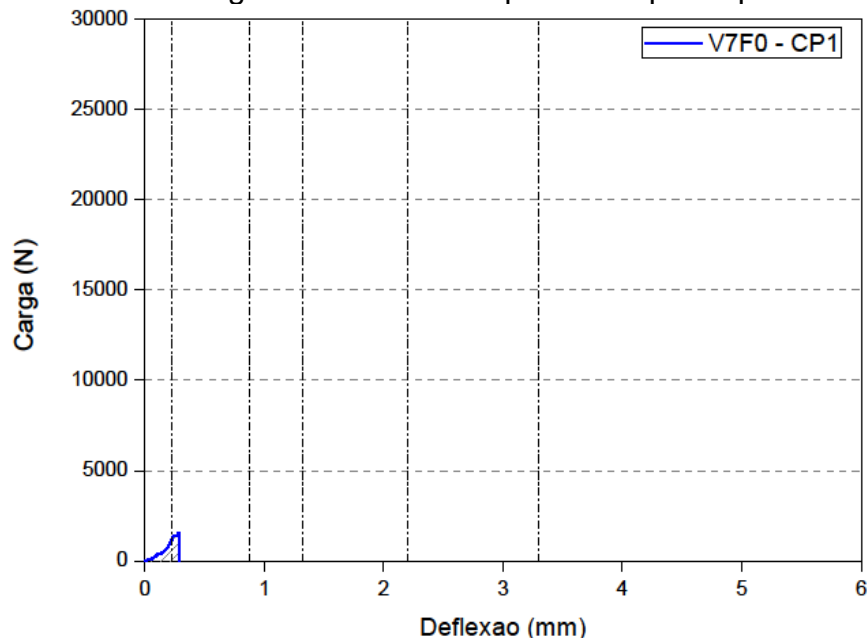
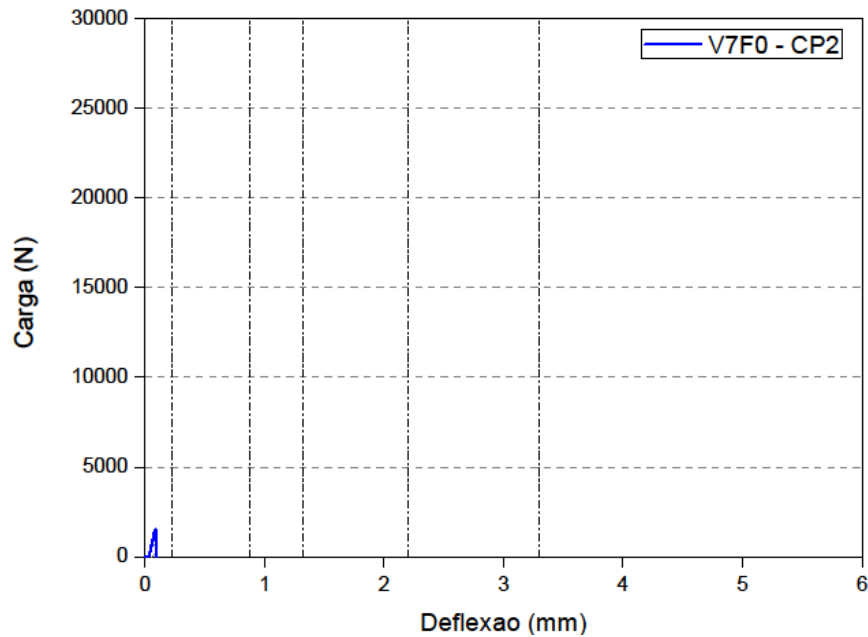


Tabela A.1 – Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F0CP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (0,284)
Ten. (Nxm)	0,084	-	-	-	-	0,177

Fonte: autor, 2019.

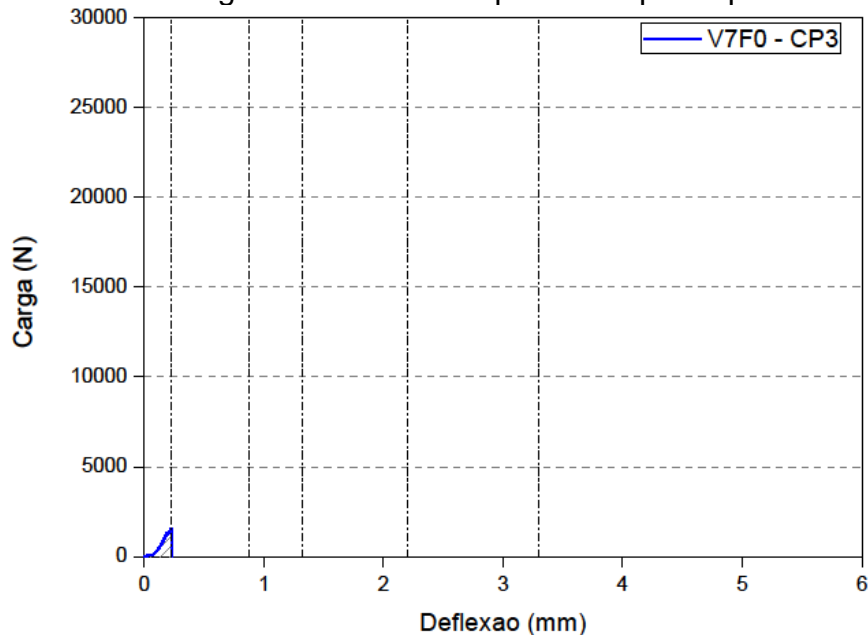
Figura A.2 - Curva carga *versus* deflexão para o corpo de prova V7F0CP2.

Fonte: autor, 2019.

Tabela A.2 – Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F0CP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (0,087)
Ten. (Nxm)	-	-	-	-	-	0,046

Fonte: autor, 2019.

Figura A.3 - Curva carga *versus* deflexão para o corpo de prova V7F0-CP3.

Fonte: autor, 2019.

Tabela A.3 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F0-CP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (0,228)
Ten. (Nxm)	0,123	-	-	-	-	0,135

Fonte: autor, 2019.

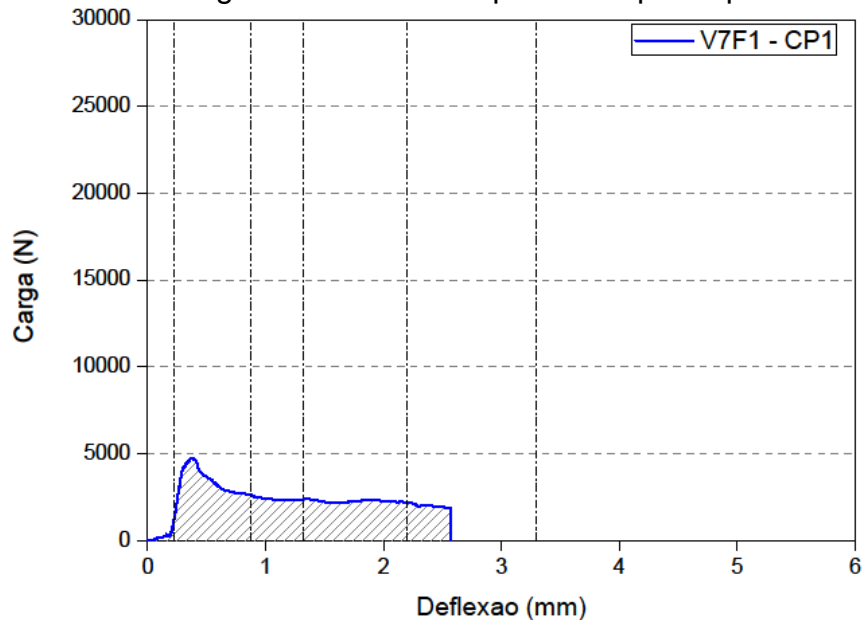
Figura A.4 - Curva carga *versus* deflexão para o corpo de prova V7F1-CP1.

Tabela A.4 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F1-CP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (2,568)
Ten. (Nxm)	0,048	2,259	3,315	5,299	-	6,035

Fonte: autor, 2019.

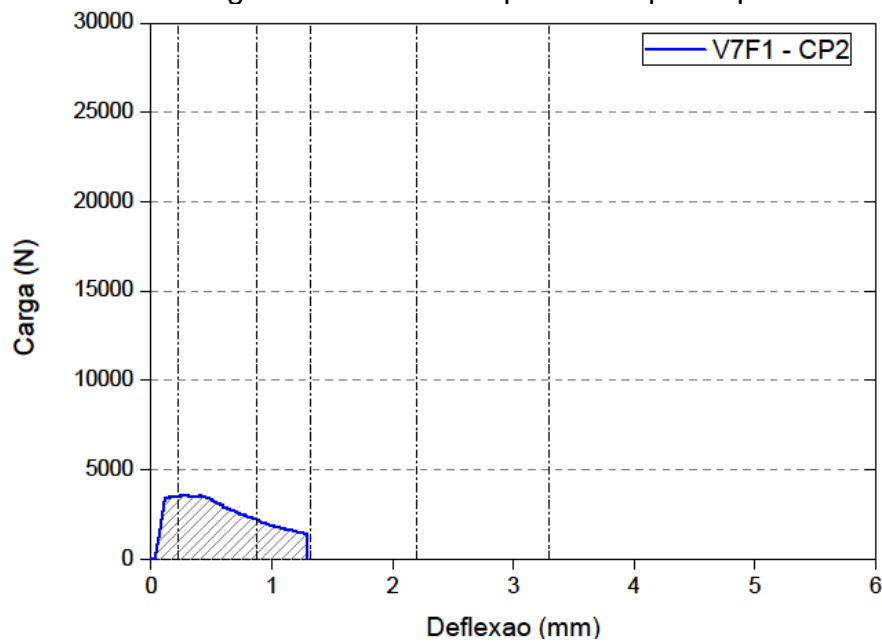
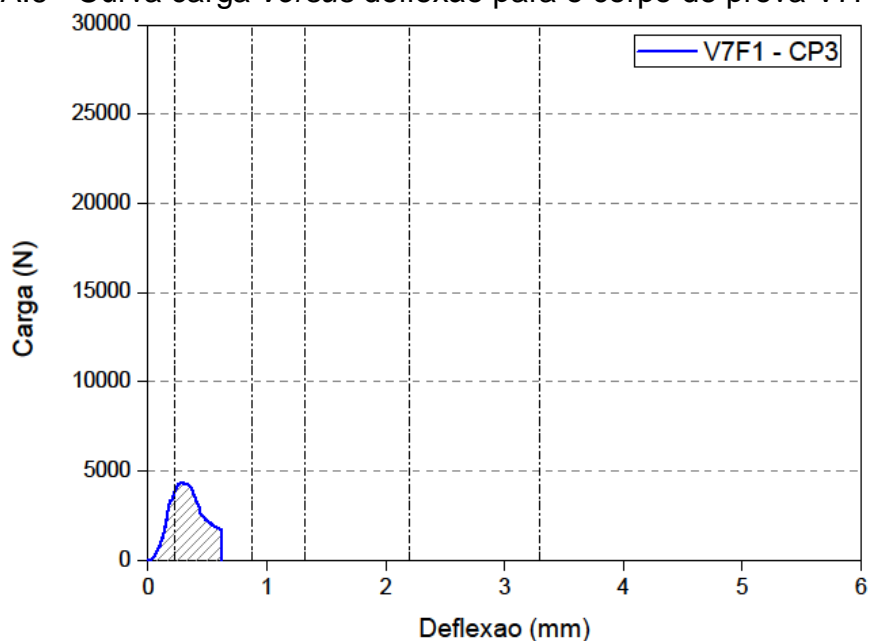
Figura A.5 - Curva carga *versus* deflexão para o corpo de prova V7F1-CP2.

Tabela A.5 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F1-CP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (1,289)
Ten. (Nxm)	0,517	2,509	-	-	-	3,227

Fonte: autor, 2019.

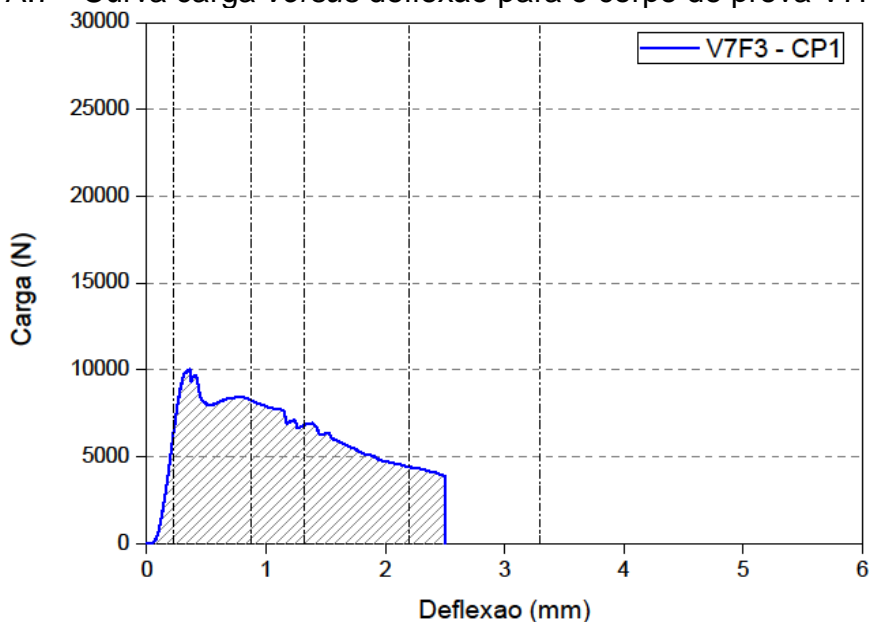
Figura A.6 - Curva carga *versus* deflexão para o corpo de prova V7F1-CP3.

Fonte: autor, 2019.

Tabela A.6 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F1-CP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (0,617)
Ten. (Nxm)	0,317	-	-	-	-	1,545

Fonte: autor, 2019.

Figura A.7 - Curva carga *versus* deflexão para o corpo de prova V7F3CP1.

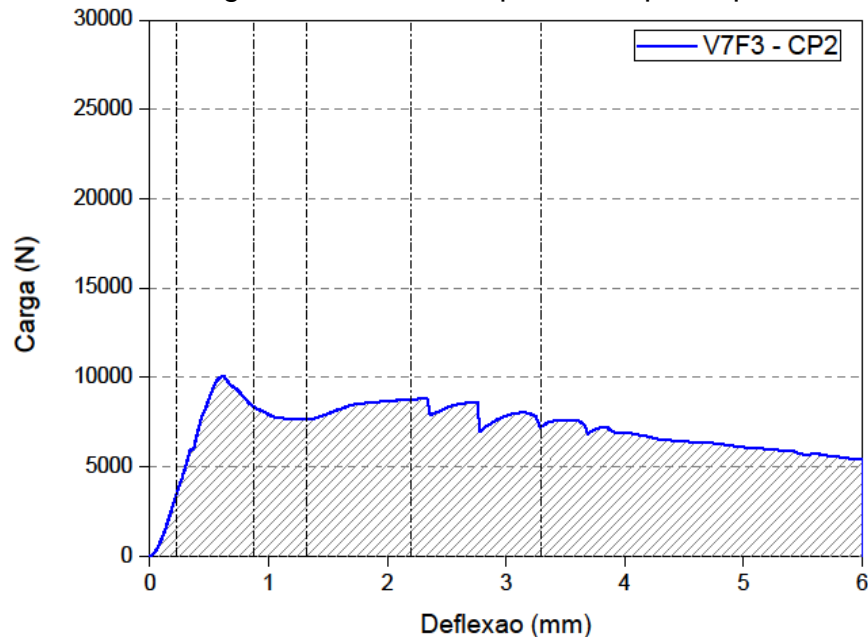
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.7 – Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F3CP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (2,502)
Ten. (Nxm)	0,402	6,039	9,334	14,178	-	15,432

Fonte: autor, 2019.

Figura A.8 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V7F3CP2.



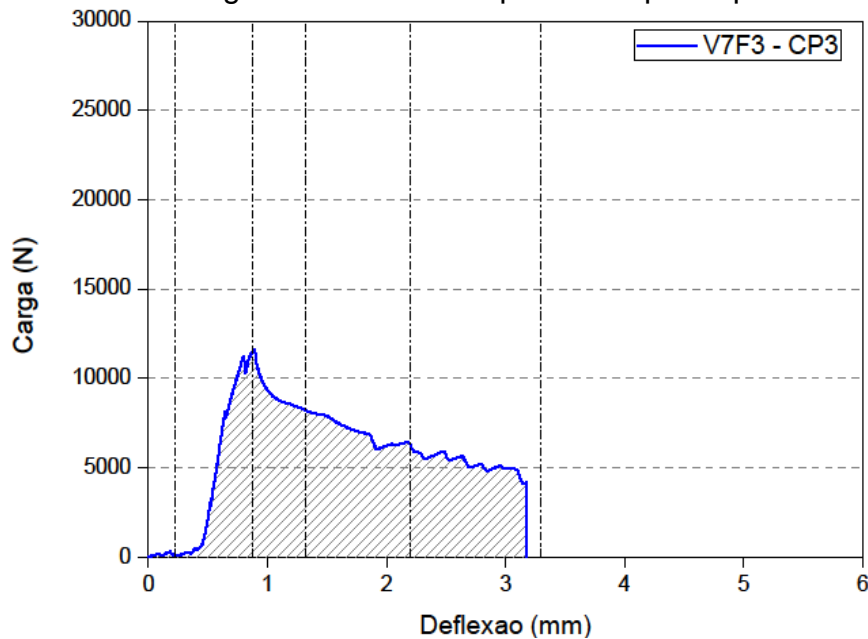
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.8 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F3CP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	0,293	5,588	9,018	16,297	25,289	42,659

Fonte: autor, 2019.

Figura A.9 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V7F3CP3.

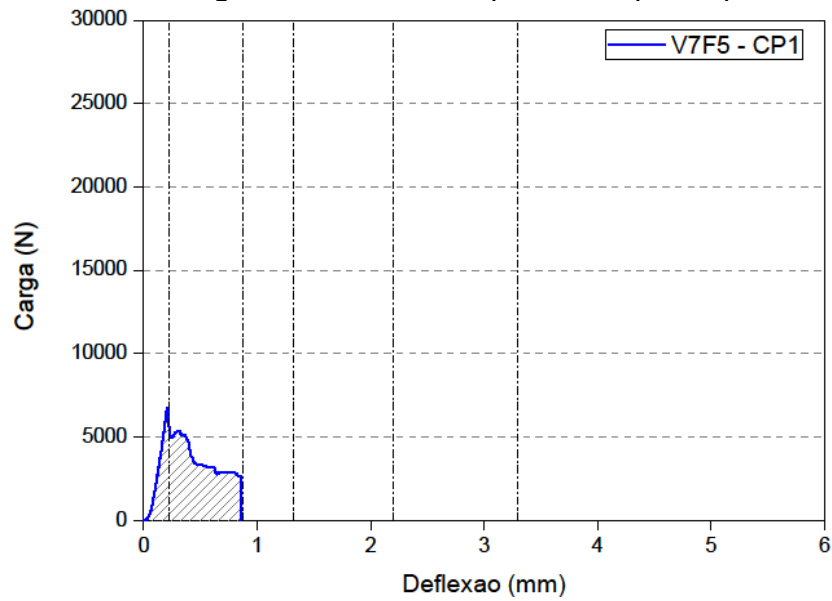


Fonte: autor, 2019.

Tabela A.9 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F3CP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (3,176)
Ten. (Nxm)	0,032	3,302	7,329	13,466	-	18,655

Fonte: autor, 2019.

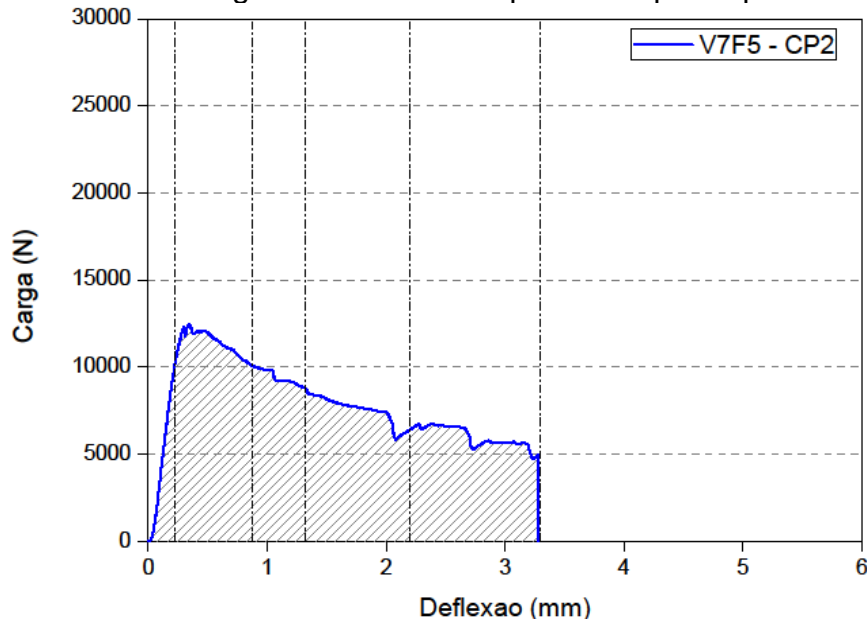
Figura A.10 - Curva carga *versus* deflexão para o corpo de prova V7F5CP1.

Fonte: autor, 2019.

Tabela A.10 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F5CP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (0,862)
Ten. (Nxm)	0,669	-	-	-	-	3,005

Fonte: autor, 2019.

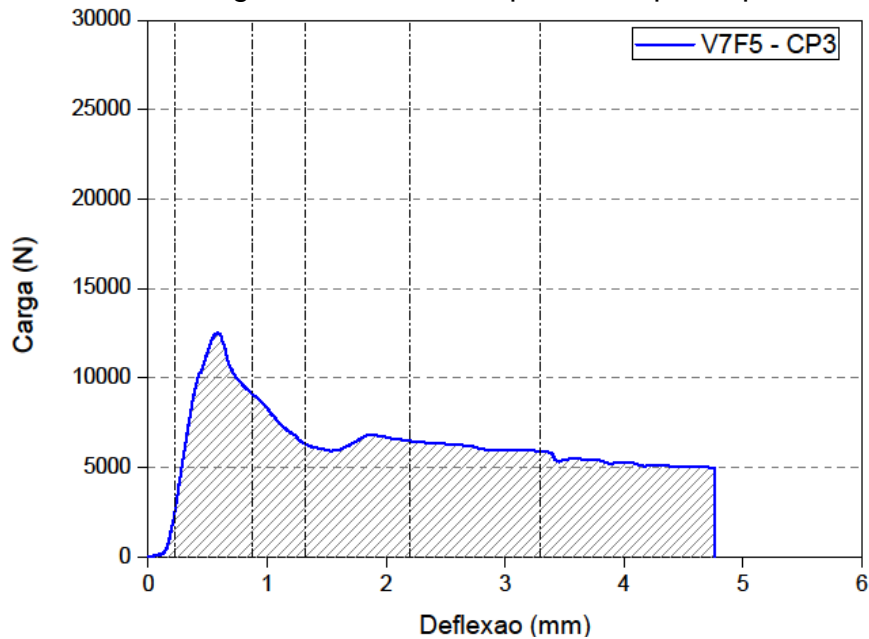
Figura A.11 - Curva carga *versus* deflexão para o corpo de prova V7F5CP2.

Fonte: autor, 2019.

Tabela A.11 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F5CP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (3,281)
Ten. (Nxm)	0,972	8,455	12,640	19,379	-	25,752

Fonte: autor, 2019.

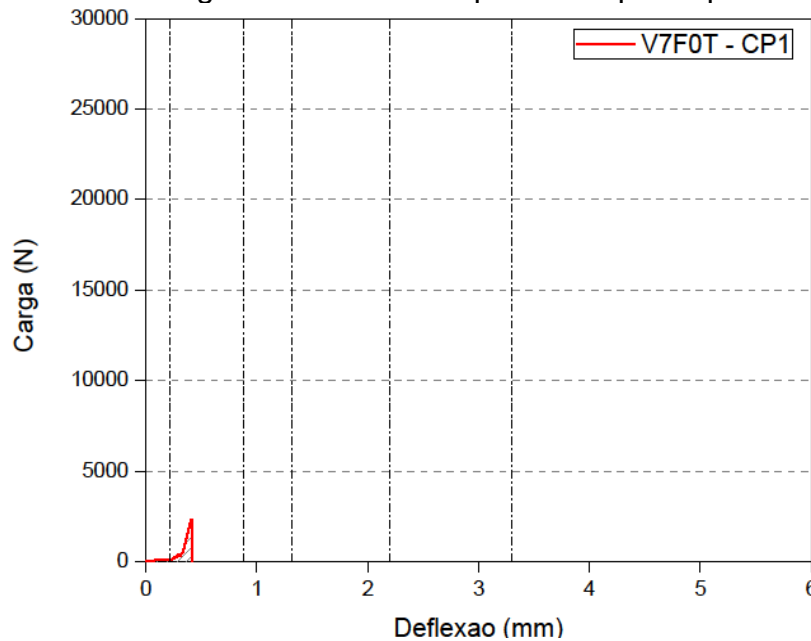
Figura A.12 - Curva carga *versus* deflexão para o corpo de prova V7F5CP3.

Fonte: autor, 2019.

Tabela A.12 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F5CP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (4,763)
Ten. (Nxm)	0,144	6,366	9,747	15,464	22,203	29,825

Fonte: autor, 2019.

Figura A.13 - Curva carga *versus* deflexão para o corpo de prova V7F0TCP1.

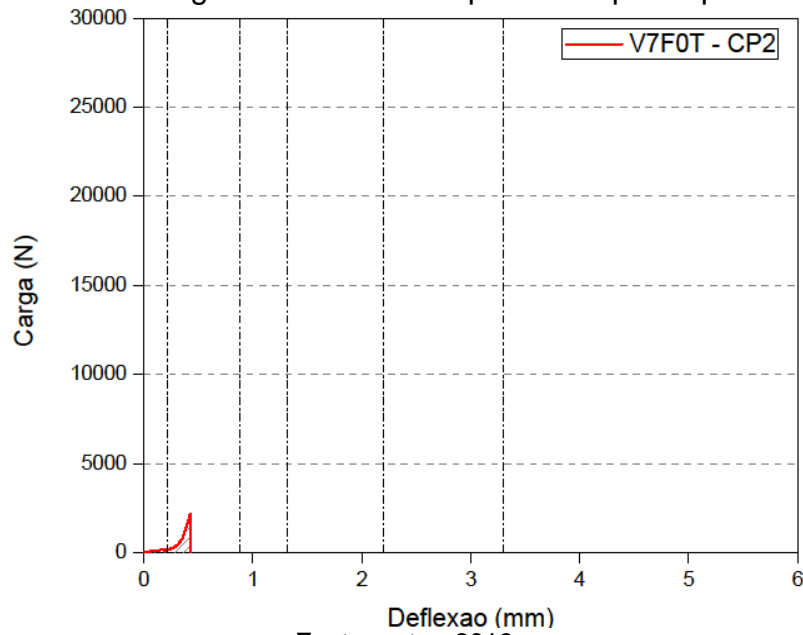
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.13 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F0TCP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (0,413)
Ten. (Nxm)	0,016	-	-	-	-	0,161

Fonte: autor, 2019.

Figura A.14 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V7F0TCP2.



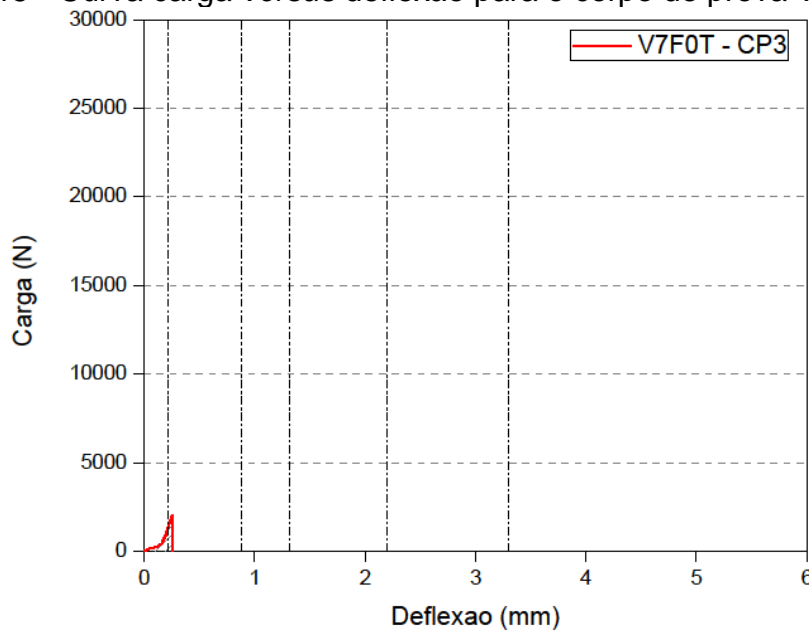
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.14 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F0TCP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (0,429)
Ten. (Nxm)	0,019	-	-	-	-	0,177

Fonte: autor, 2019.

Figura A.15 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V7F0TCP3.



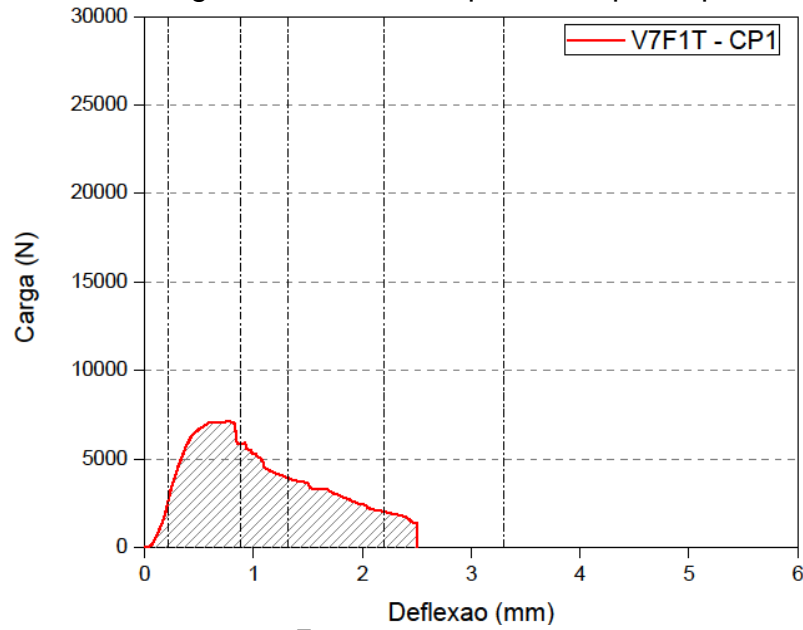
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.15 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F0TCP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (0,256)
Ten. (Nxm)	0,082	-	-	-	-	0,143

Fonte: autor, 2019.

Figura A.16 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V7F1TCP1.



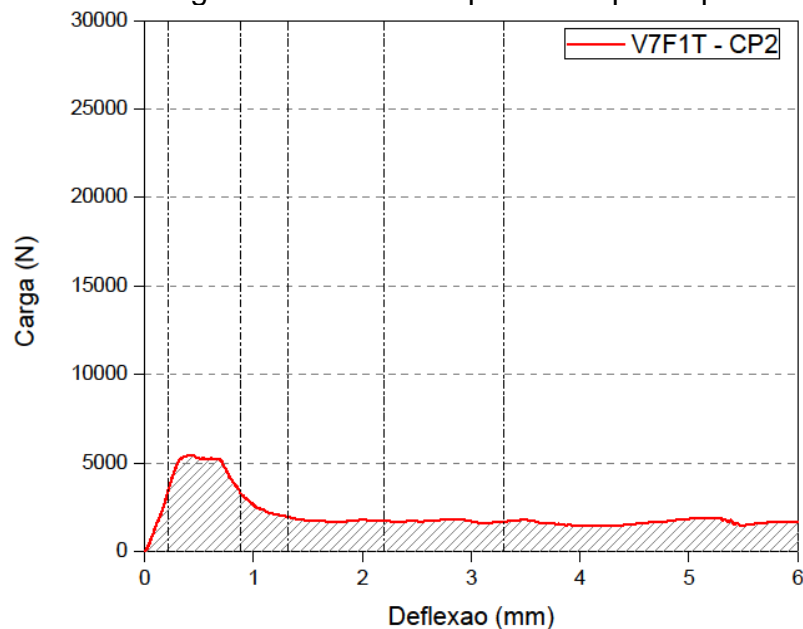
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.16 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F1TCP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (2,506)
Ten. (Nxm)	0,186	4,272	6,326	8,987	-	9,487

Fonte: autor, 2019.

Figura A.17 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V7F1TCP2.



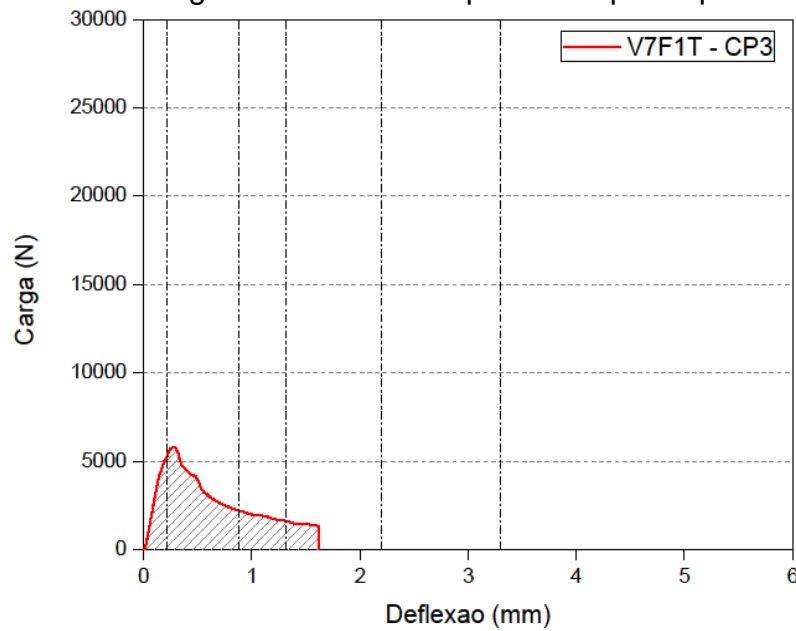
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.17 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F1TCP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	0,338	3,552	4,616	6,152	8,027	15,851

Fonte: autor, 2019.

Figura A.18 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V7F1TCP3.



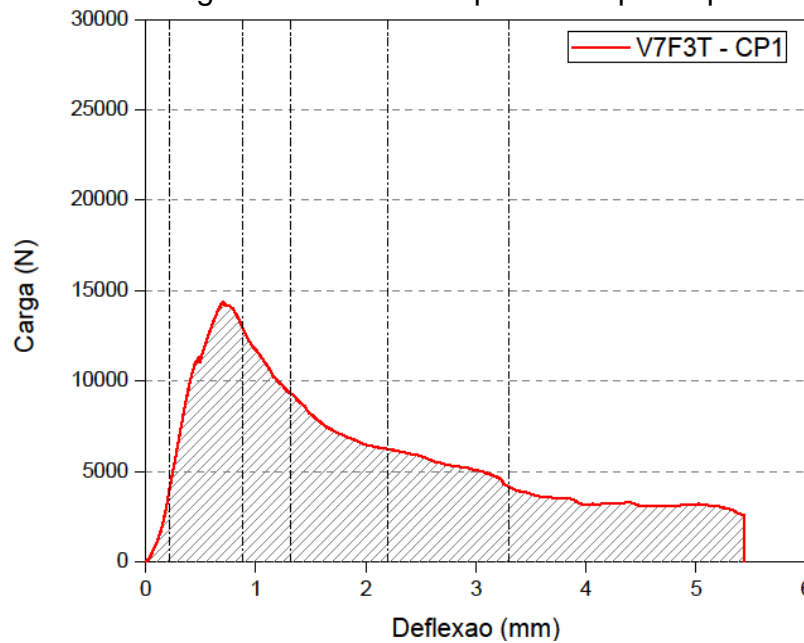
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.18 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F1TCP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (1,617)
Ten. (Nxm)	0,641	3,072	3,710	-	-	4,316

Fonte: autor, 2019.

Figura A.19 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V7F3TCP1.



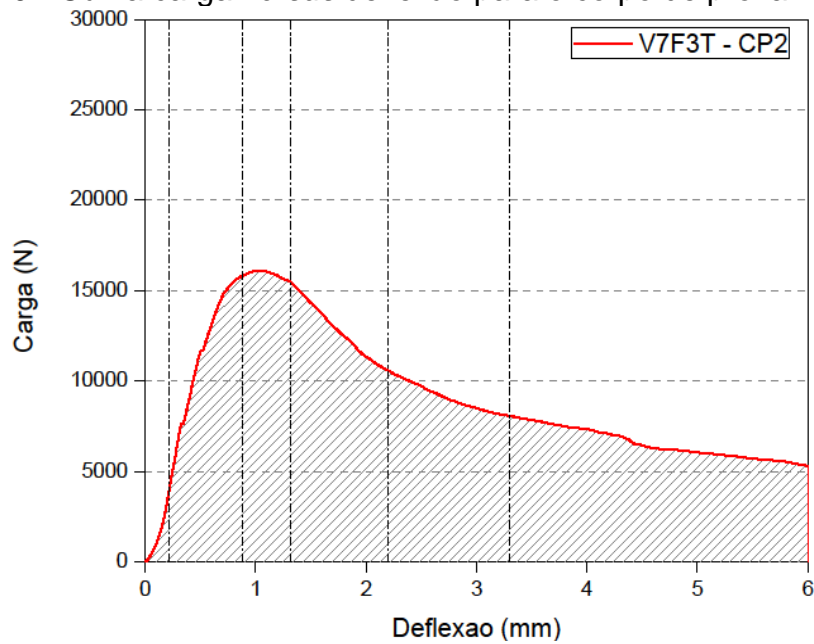
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.19 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F3TCP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (5,440)
Ten. (Nxm)	0,320	7,770	12,583	19,018	24,892	31,874

Fonte: autor, 2019.

Figura A.20 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V7F3TCP2.



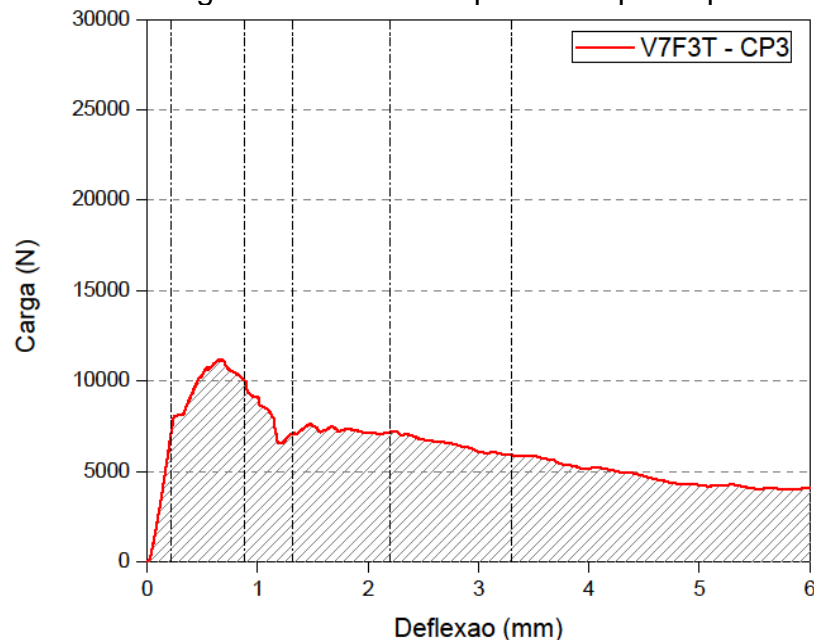
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.20 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F3TCP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	0,313	8,003	15,047	26,395	36,153	53,894

Fonte: autor, 2019.

Figura A.21 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V7F3TCP3.



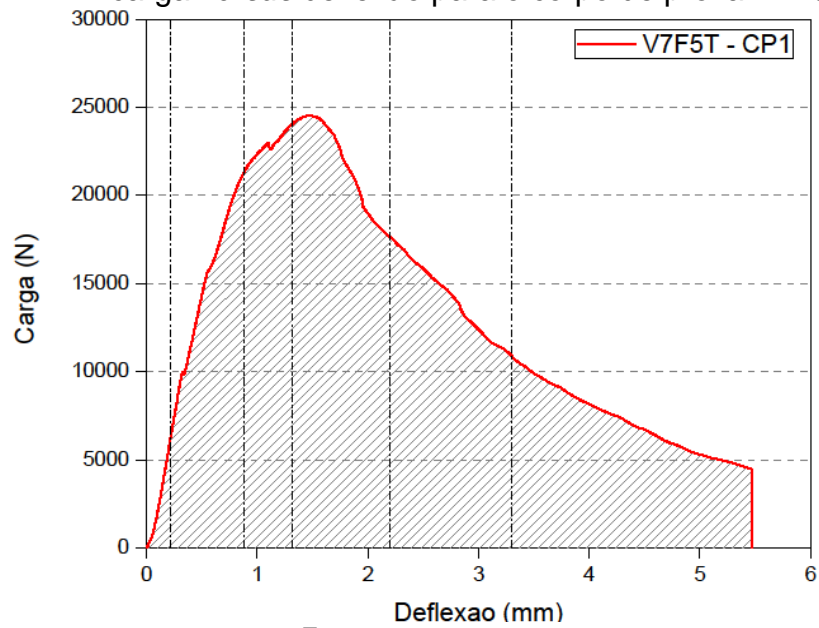
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.21 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F3TCP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	0,668	7,218	10,746	17,268	24,352	37,208

Fonte: autor, 2019.

Figura A.22 - carga versus deflexão para o corpo de prova V7F5TCP1.



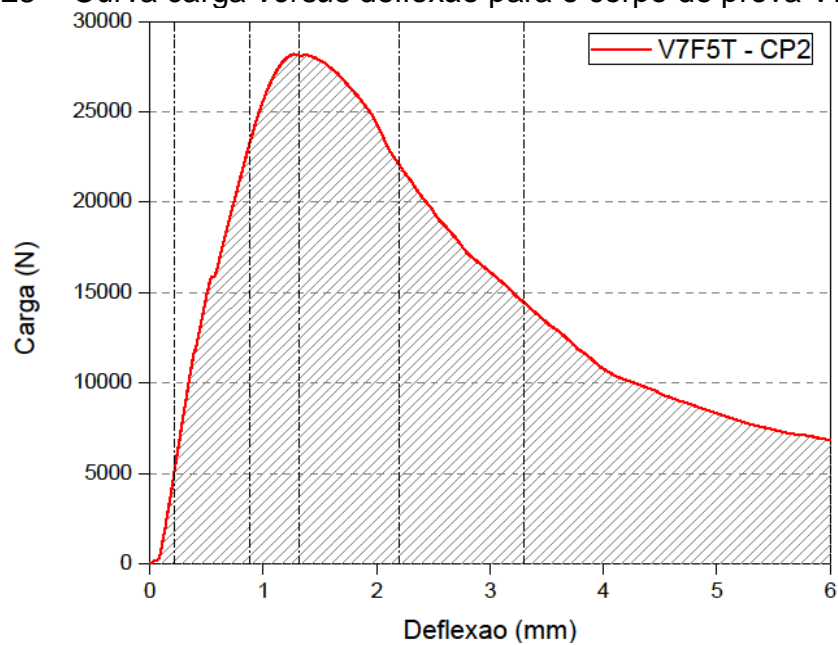
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.22 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F5TCP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (5,463)
Ten. (Nxm)	0,569	10,328	2,045	39,927	55,498	70,690

Fonte: autor, 2019.

Figura A.23 – Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V7F5TCP2.



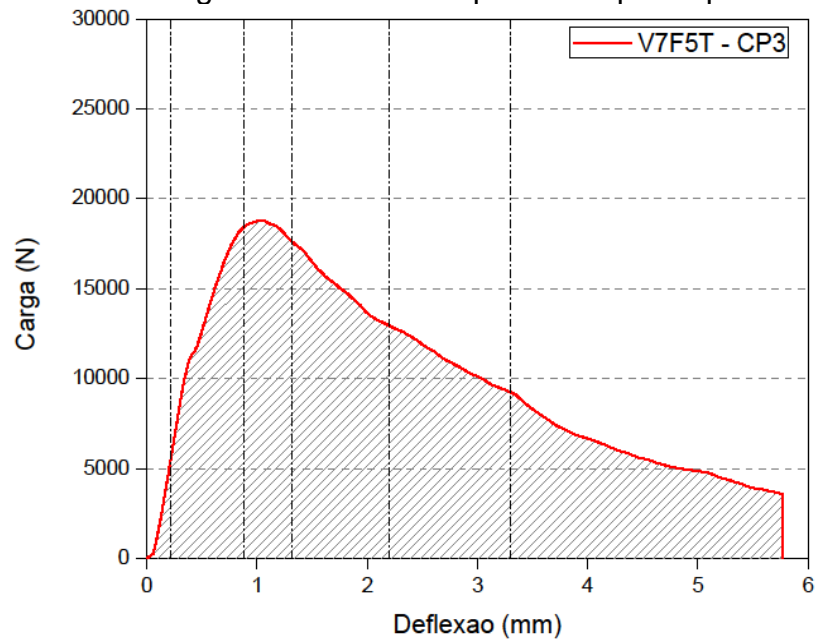
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.23 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F5TCP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	0,368	10,450	22,656	45,070	64,773	90,378

Fonte: autor, 2019.

Figura A.24 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V7F5TCP3.



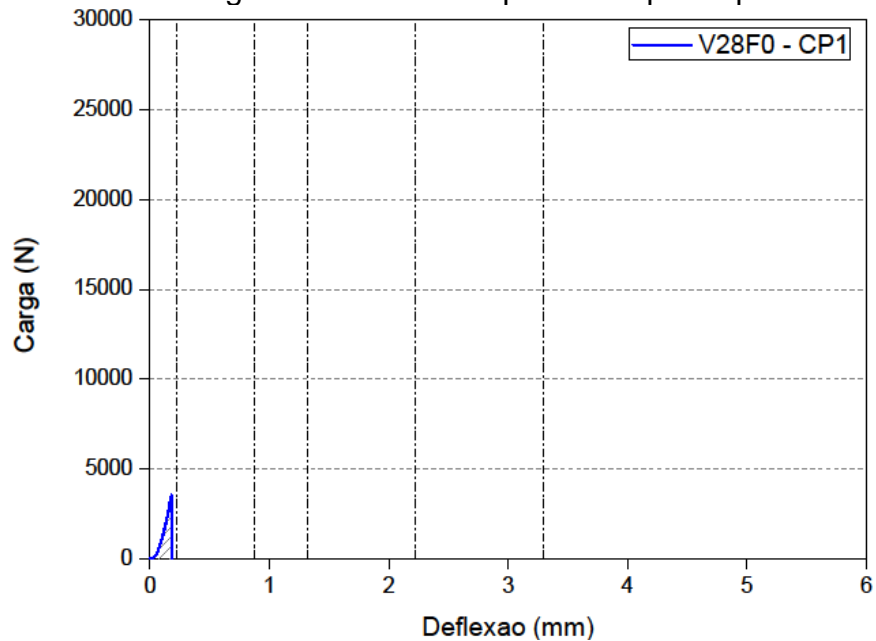
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.24 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V7F5TCP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (5,763)
Ten. (Nxm)	0,448	9,288	17,262	30,775	42,760	57,018

Fonte: autor, 2019.

Figura A.25 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V28F0CP1.



Fonte: autor, 2019.

Tabela A.25 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F0CP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (0,179)
Ten. (Nxm)	-	-	-	-	-	0,210

Fonte: autor, 2019.

Figura A.26 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V28F0CP2.

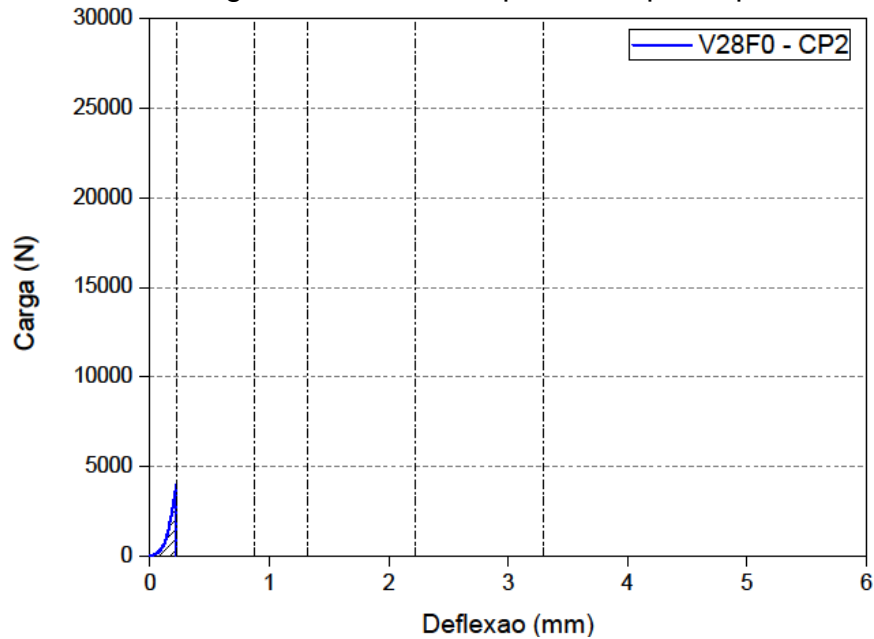


Tabela A.26 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F0CP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (0,222)
Ten. (Nxm)	0,239	-	-	-	-	0,244

Fonte: autor, 2019.

Figura A.27 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V28F0CP3.

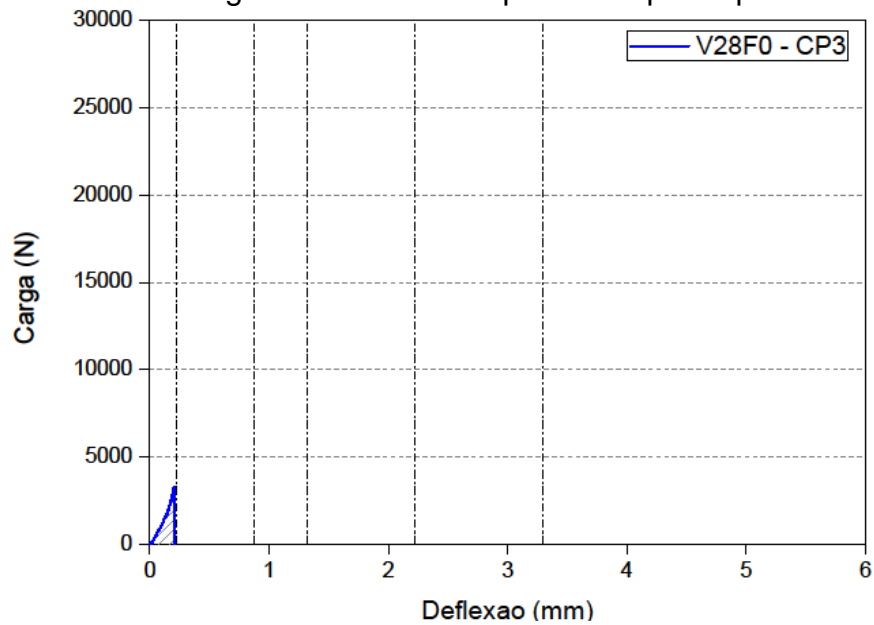


Tabela A.27 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F0CP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (0,204)
Ten. (Nxm)	-	-	-	-	-	0,256

Fonte: autor, 2019.

Figura A.28 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V28F1CP1.

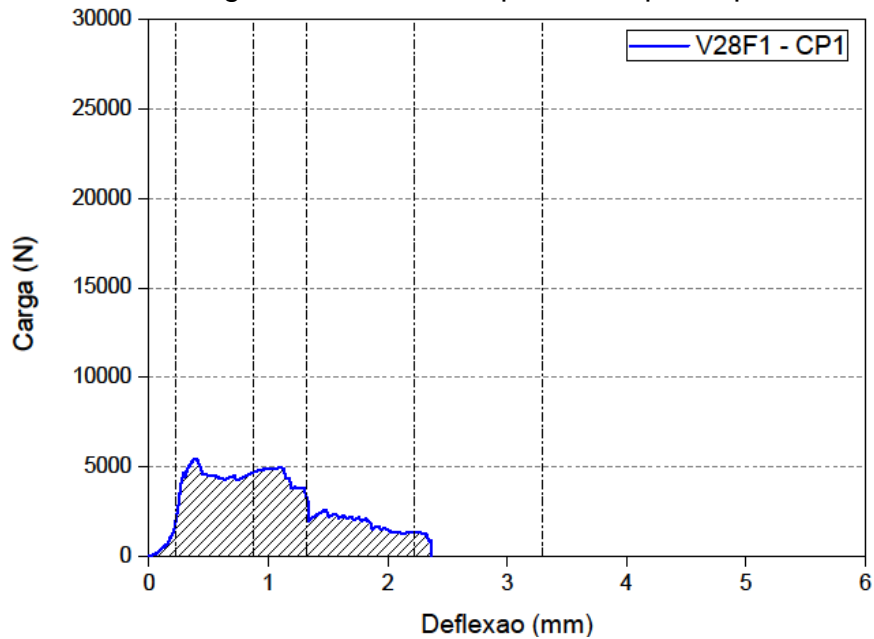


Tabela A.28 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F1CP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (2,369)
Ten. (Nxm)	0,118	3,043	5,091	6,748	-	6,950

Fonte: autor, 2019.

Figura A.29 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V28F1CP2.

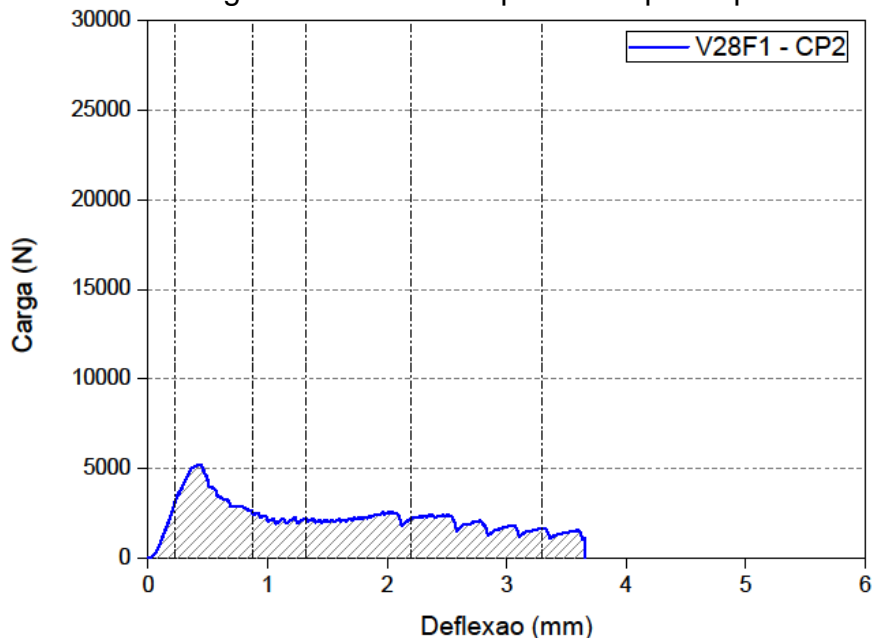
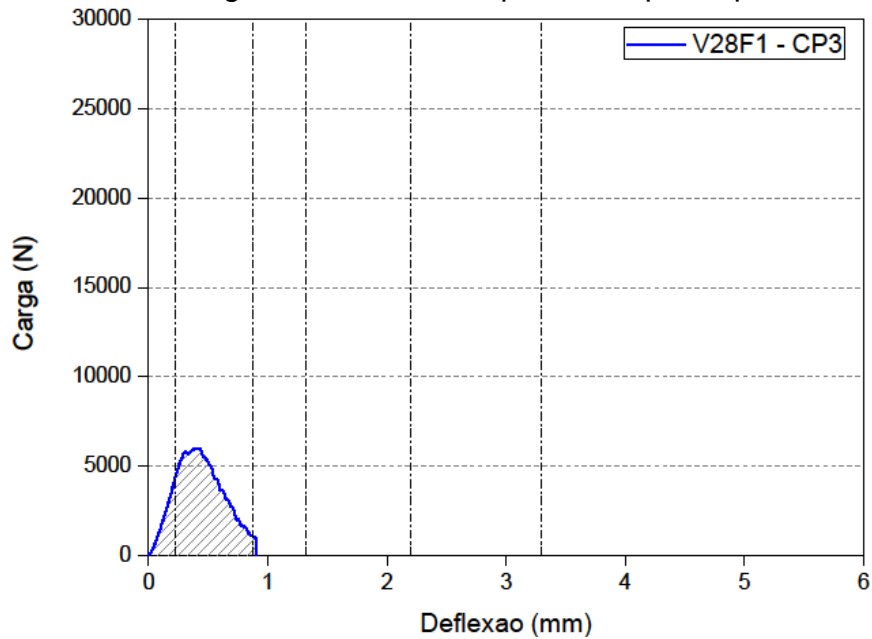


Tabela A.29 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F1CP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (3,658)
Ten. (Nxm)	0,252	2,720	3,666	5,595	7,634	8,160

Fonte: autor, 2019.

Figura A.30 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V28F1CP3.



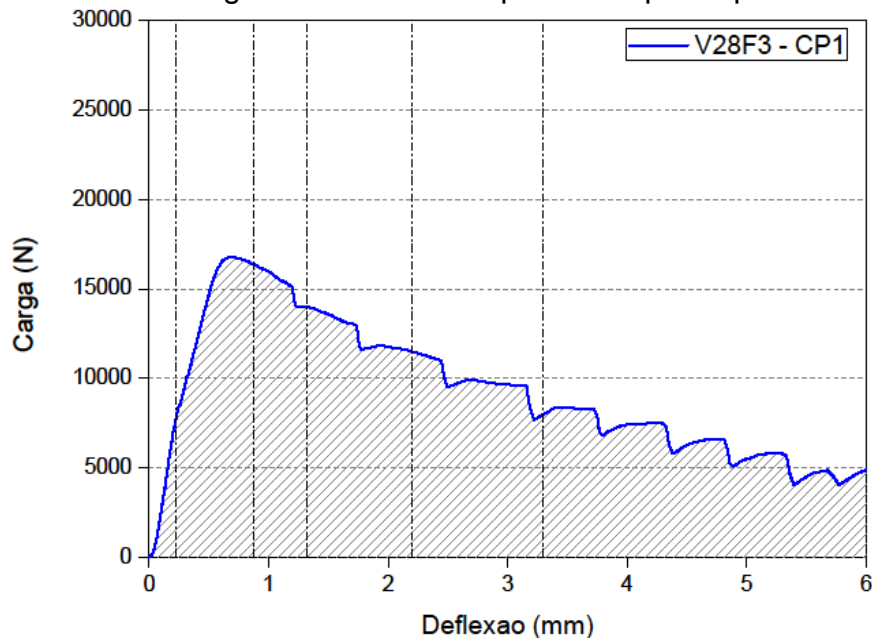
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.30 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F1CP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (0,904)
Ten. (Nxm)	0,404	3,049	-	-	-	3,064

Fonte: autor, 2019.

Figura A.31 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V28F3CP1.



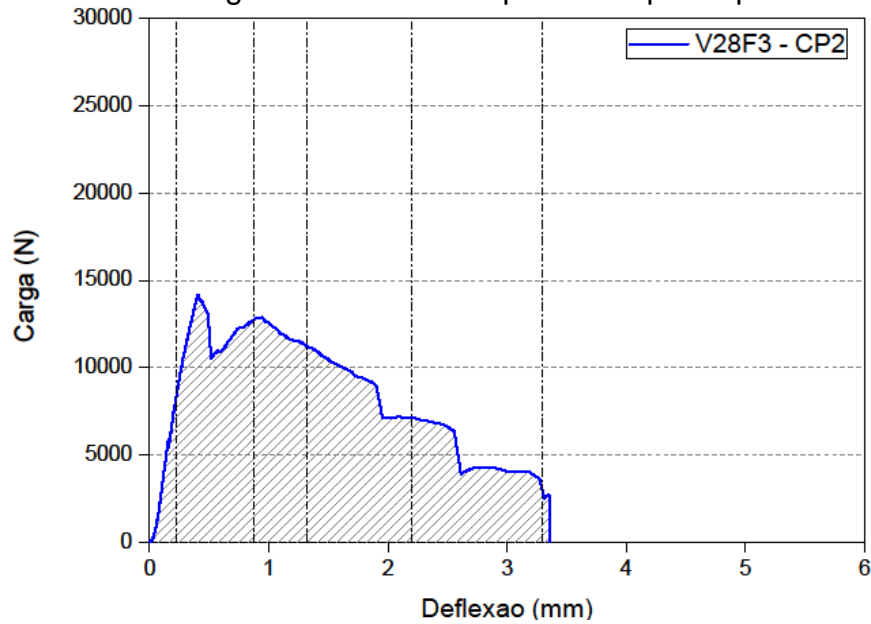
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.31 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F3CP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	10,062	16,906	27,960	38,748	55,674	10,062

Fonte: autor, 2019.

Figura A.32 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V28F3CP2.



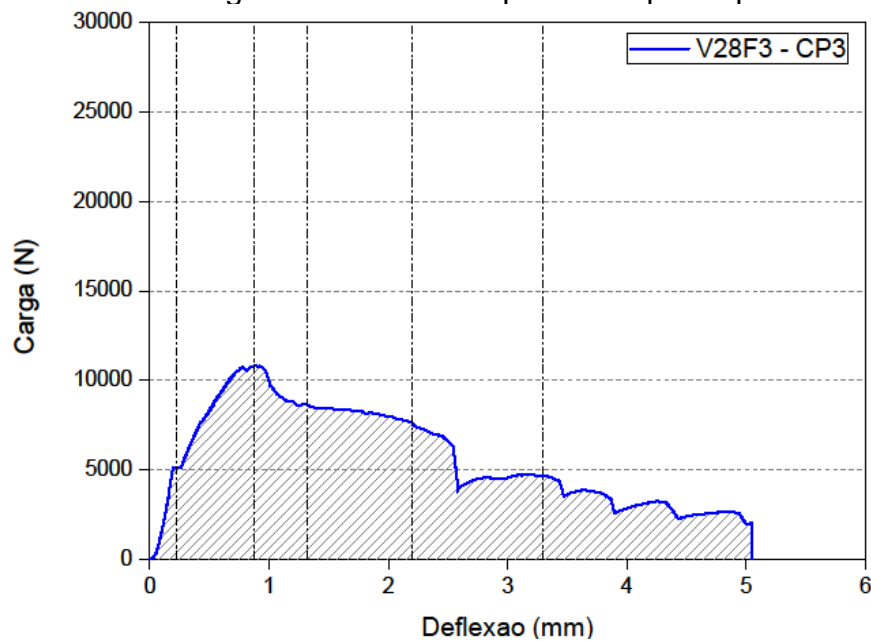
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.32 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F3CP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (3,353)
Ten. (Nxm)	0,787	8,690	13,995	22,020	27,517	27,646

Fonte: autor, 2019.

Figura A.33 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V28F3CP3.



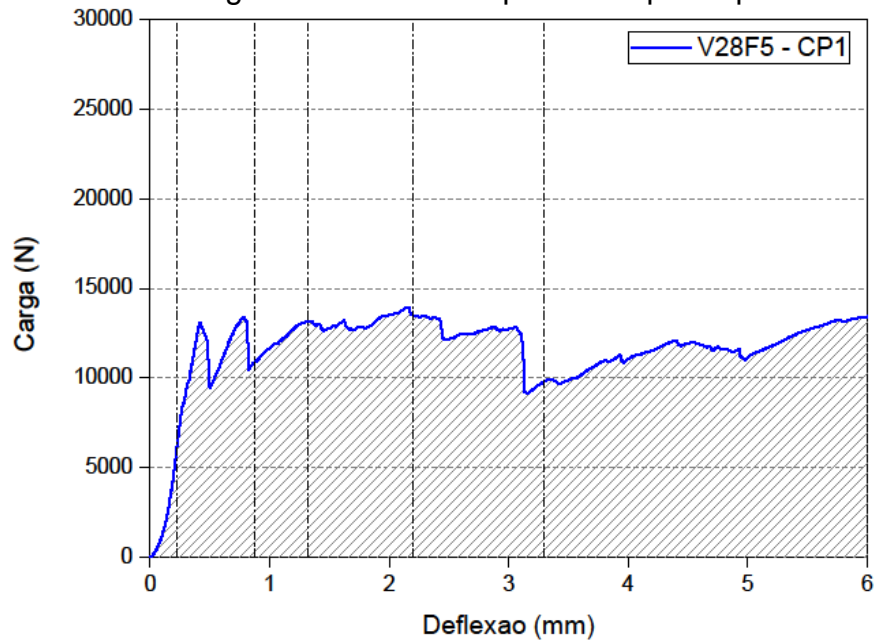
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.33 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F3CP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (5,047)
Ten. (Nxm)	0,351	6,101	10,223	17,457	23,339	28,724

Fonte: autor, 2019.

Figura A.34 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V28F5CP1.



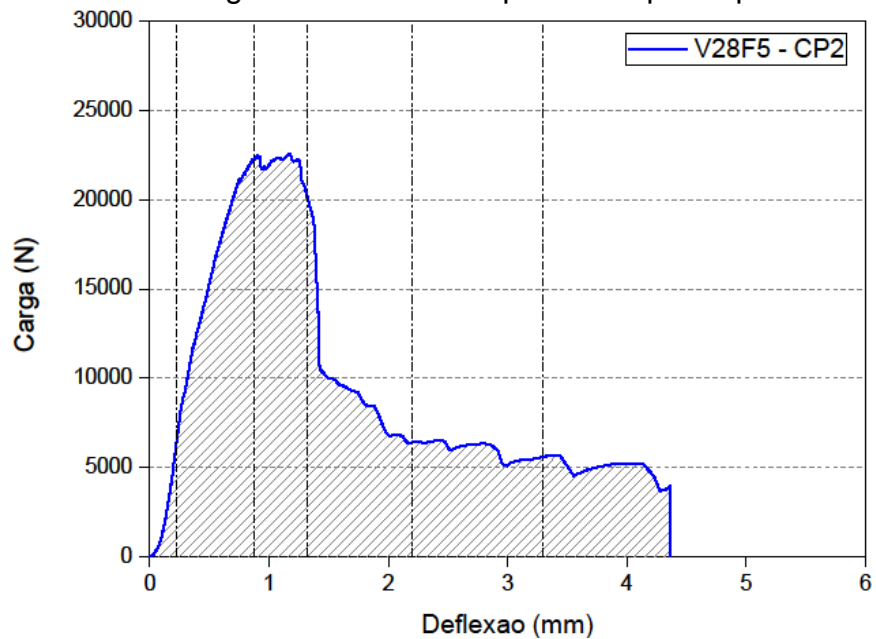
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.34 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F5CP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	0,431	7,764	13,171	24,914	38,107	69,541

Fonte: autor, 2019.

Figura A.35 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V28F5CP2.



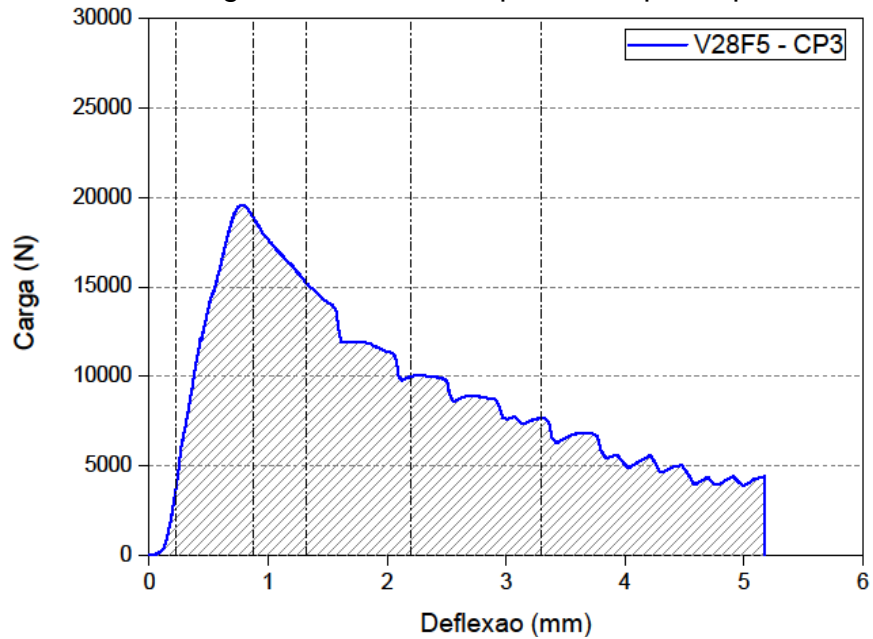
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.35 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F5CP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (4,368)
Ten. (Nxm)	0,459	11,080	20,244	29,216	35,736	40,949

Fonte: autor, 2019.

Figura A.36 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V28F5CP3.



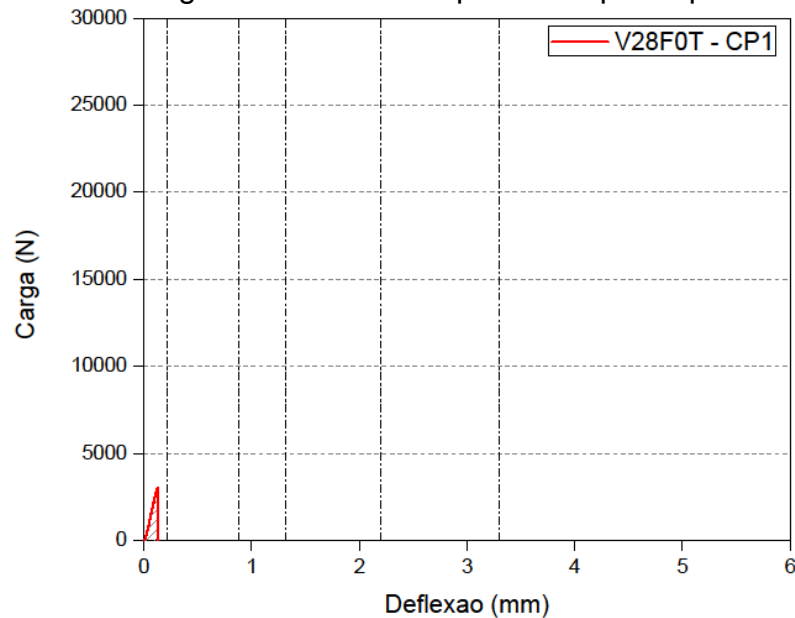
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.36 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F5CP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (5,178)
Ten. (Nxm)	0,185	9,531	16,889	27,952	37,380	47,200

Fonte: autor, 2019.

Figura A.37 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V28F0TCP1.



Fonte: autor, 2019.

Tabela A.37 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F0TCP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (0,128)
Ten. (Nxm)	-	-	-	-	-	0,182

Fonte: autor, 2019.

Figura A.38 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V28F0TCP2.

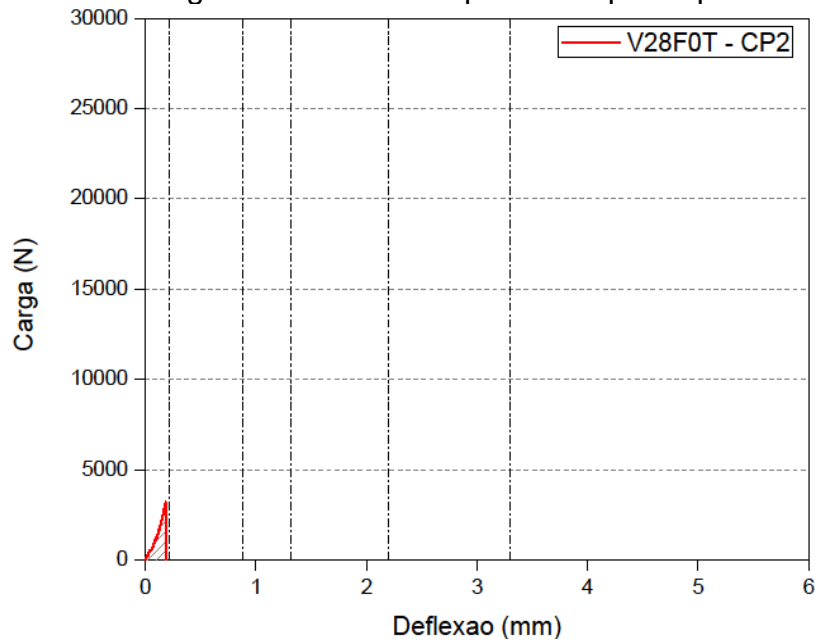


Tabela A.38 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F0TCP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (0,188)
Ten. (Nxm)	-	-	-	-	-	0,242

Fonte: autor, 2019.

Figura A.39 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V28F0TCP3.

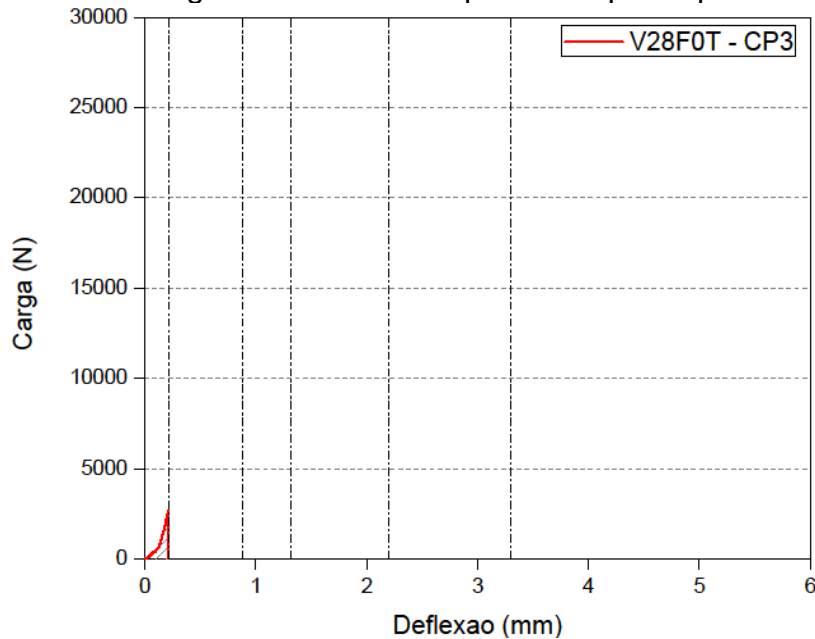
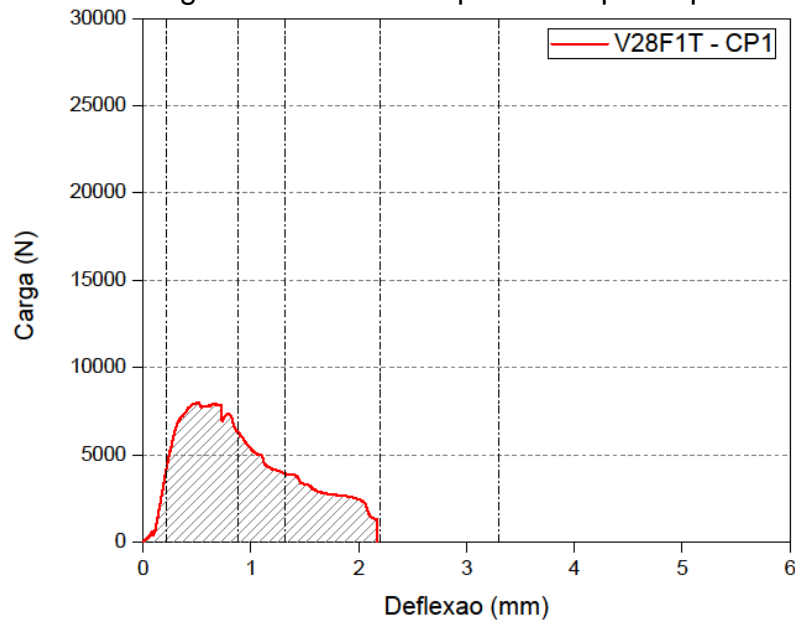


Tabela A.39 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F0TCP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (0,218)
Ten. (Nxm)	-	-	-	-	-	0,184

Fonte: autor, 2019.

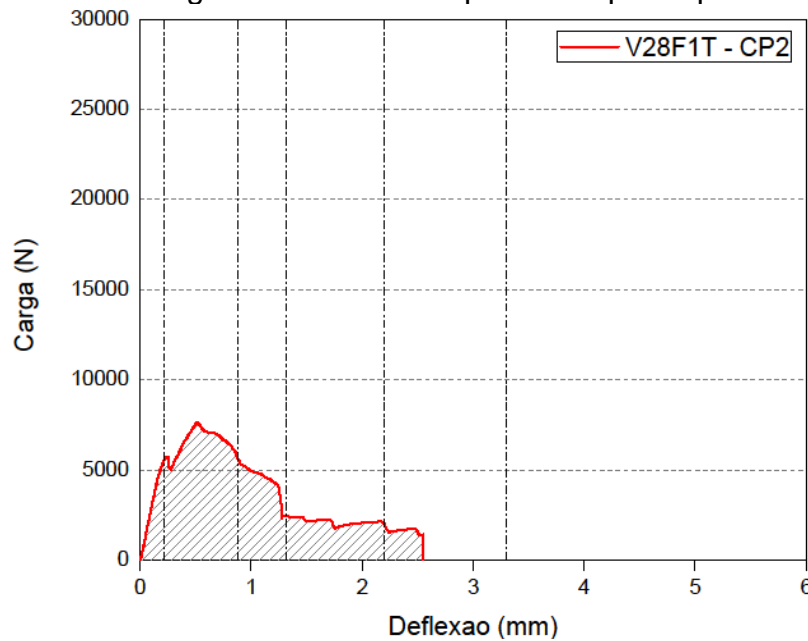
Figura A.40 - Curva carga *versus* deflexão para o corpo de prova V28F1TCP1.

Fonte: autor, 2019.

Tabela A.40 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F1TCP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (2,165)
Ten. (Nxm)	0,293	5,074	7,181	-	-	9,552

Fonte: autor, 2019.

Figura A.41 - Curva carga *versus* deflexão para o corpo de prova V28F1TCP2.

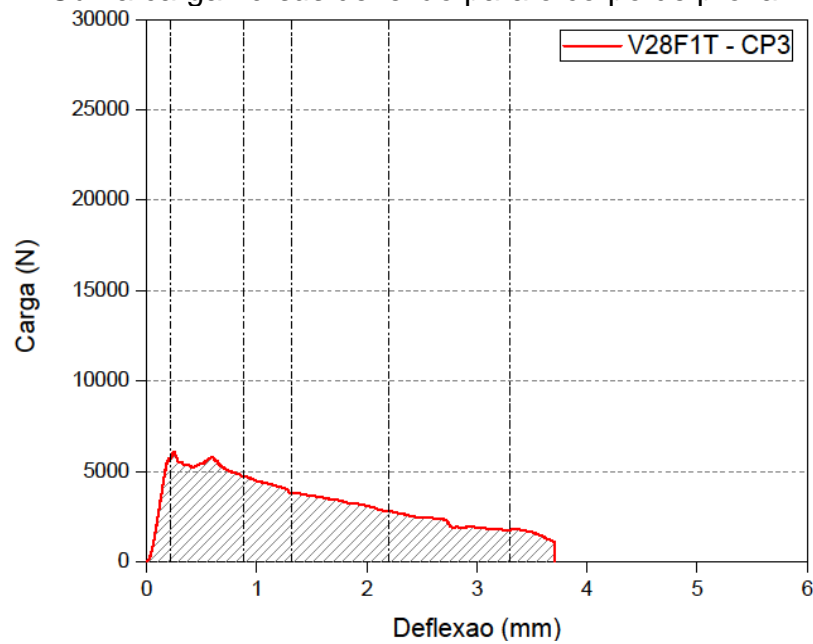
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.41 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F1TCP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (2,553)
Ten. (Nxm)	0,659	4,983	6,950	8,858	-	9,404

Fonte: autor, 2019.

Figura A.42 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V28F1TCP3.



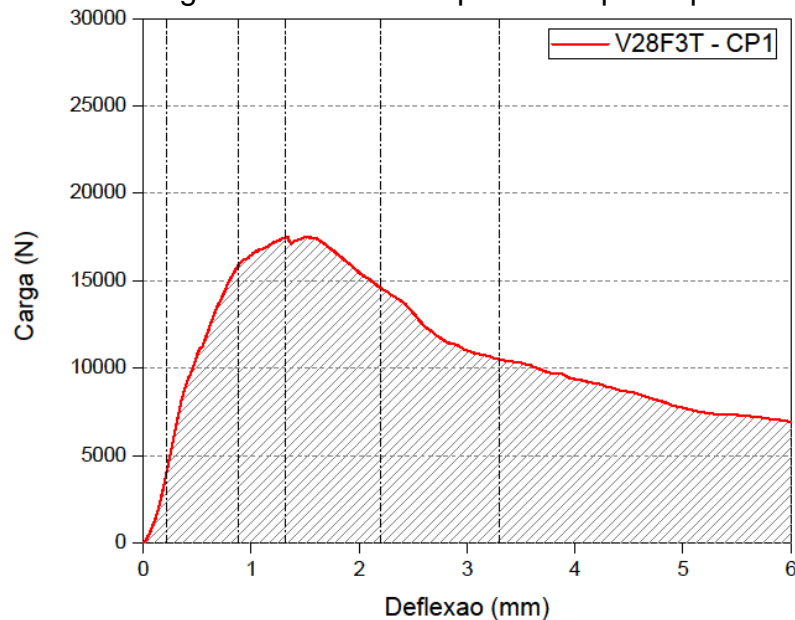
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.42 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F1TCP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (3,707)
Ten. (Nxm)	0,623	4,171	6,080	9,008	11,408	12,007

Fonte: autor, 2019.

Figura A.43 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V28F3TCP1.



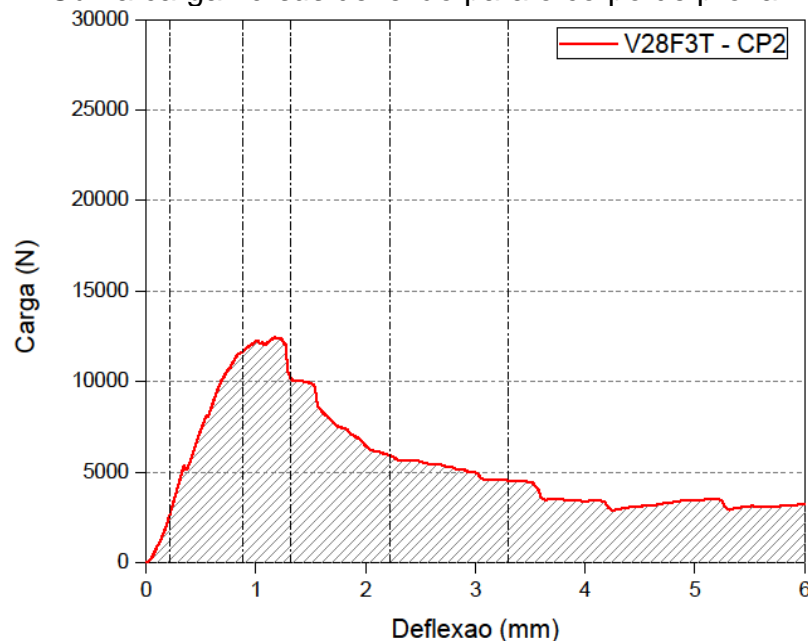
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.43 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F3TCP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	0,346	7,661	15,097	29,472	42,987	65,868

Fonte: autor, 2019.

Figura A.44 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V28F3TCP2.



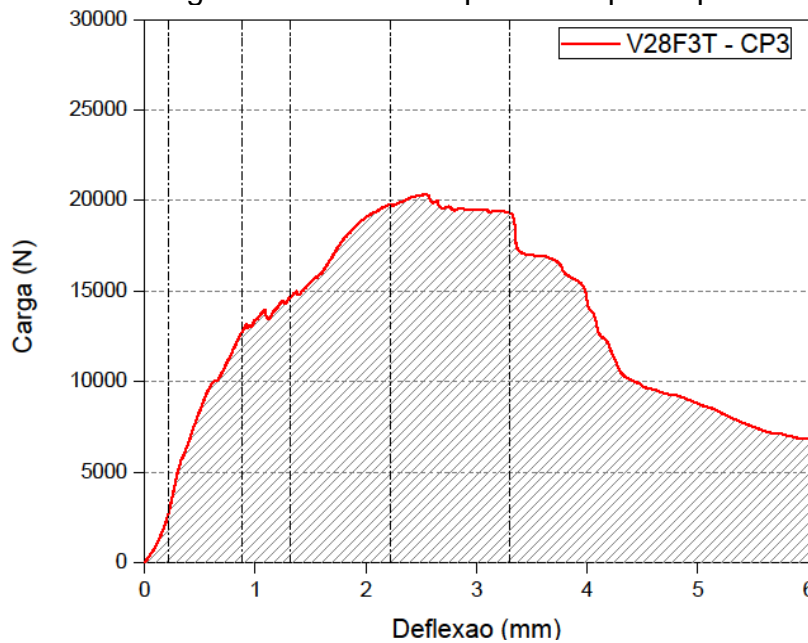
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.44 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F3TCP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	0,235	5,418	10,749	17,672	23,269	32,412

Fonte: autor, 2019.

Figura A.45 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V28F3TCP3.



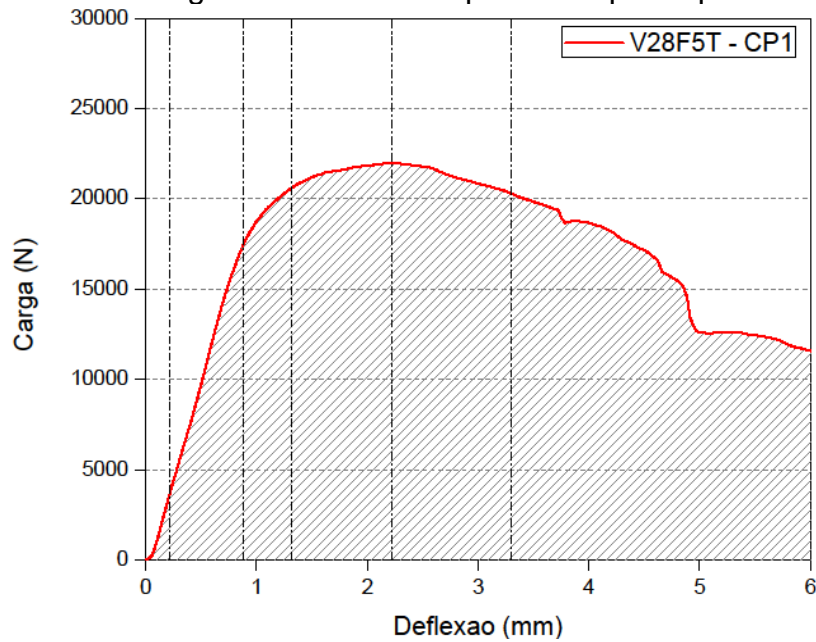
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.45 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F3TCP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	0,250	5,909	11,995	27,338	49,142	78,693

Fonte: autor, 2019.

Figura A.46 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V28F5TCP1.



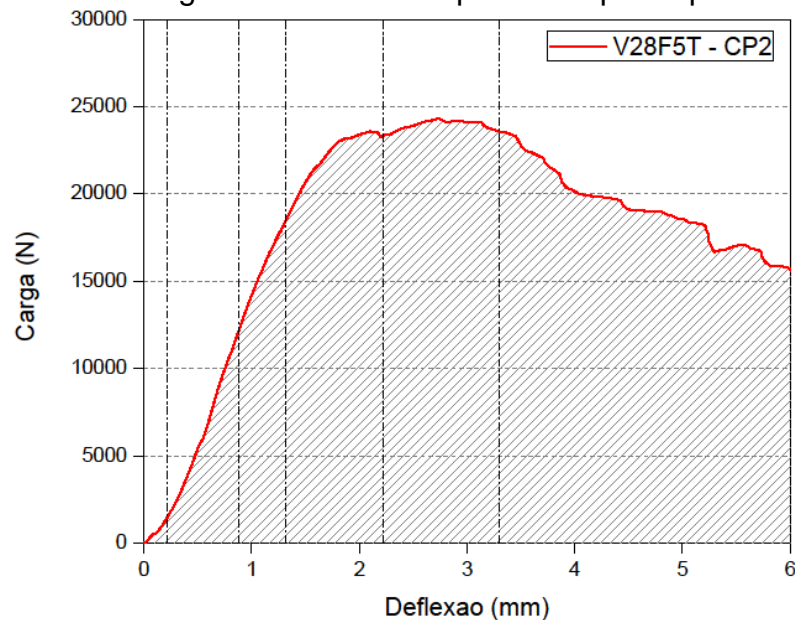
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.46 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F5TCP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	0,313	7,471	15,990	35,064	58,429	101,130

Fonte: autor, 2019.

Figura A.47 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V28F5TCP2.



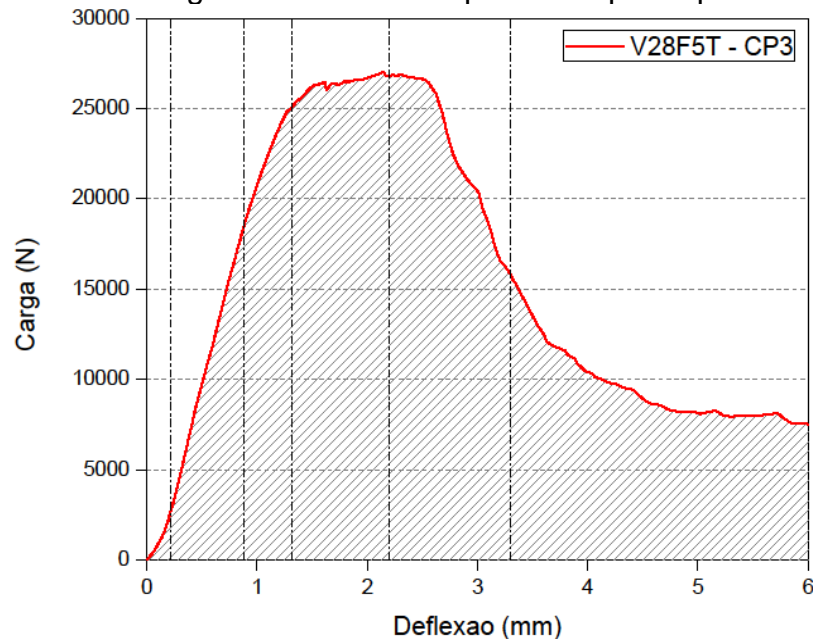
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.47 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F5TCP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	0,140	4,362	11,217	30,492	57,100	108,414

Fonte: autor, 2019.

Figura A.48 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V28F5TCP3.



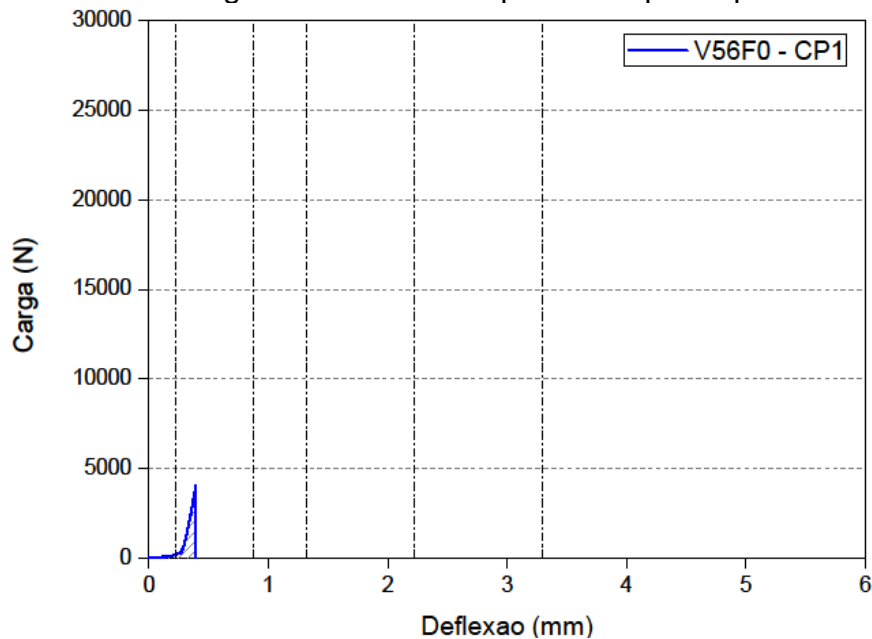
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.48 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V28F5TCP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	0,234	7,348	17,104	40,317	65,319	91,063

Fonte: autor, 2019.

Figura A.49 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V56F0CP1.



Fonte: autor, 2019.

Tabela A.49 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F0CP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (0,393)
Ten. (Nxm)	0,014	-	-	-	-	0,285

Fonte: autor, 2019.

Figura A.50 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V56F0CP2.

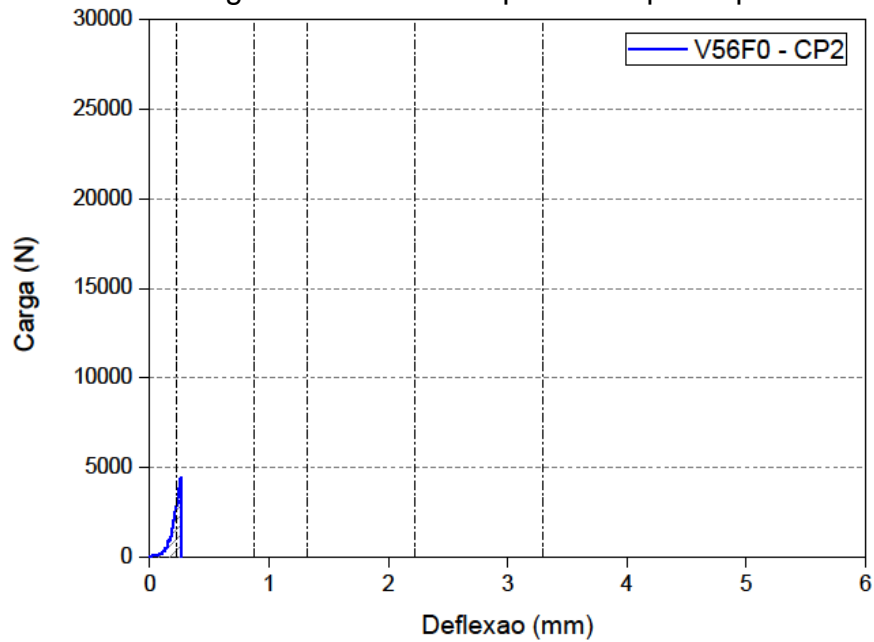


Tabela A.50 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F0CP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (0,262)
Ten. (Nxm)	0,161	-	-	-	-	0,558

Fonte: autor, 2019.

Figura A.51 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V56F0CP3.

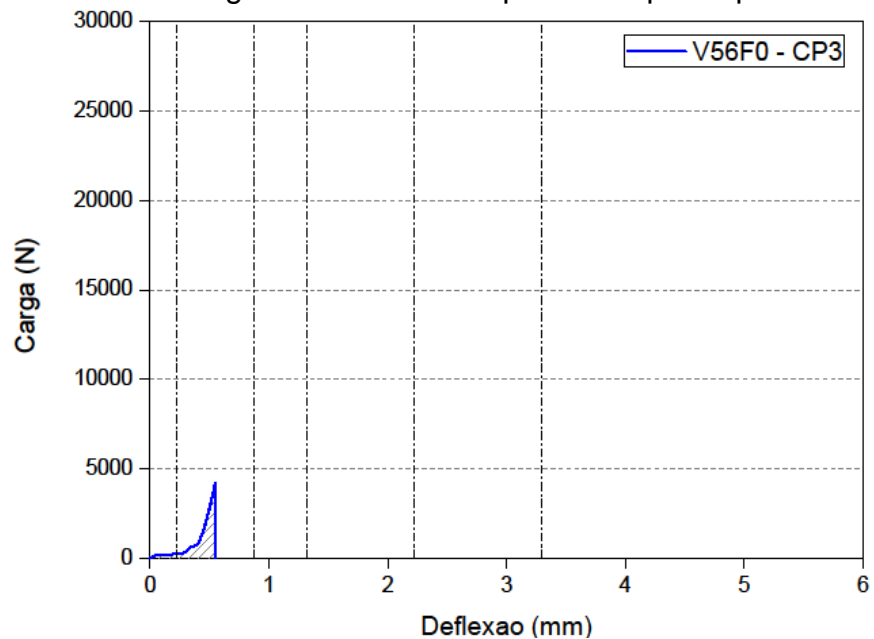
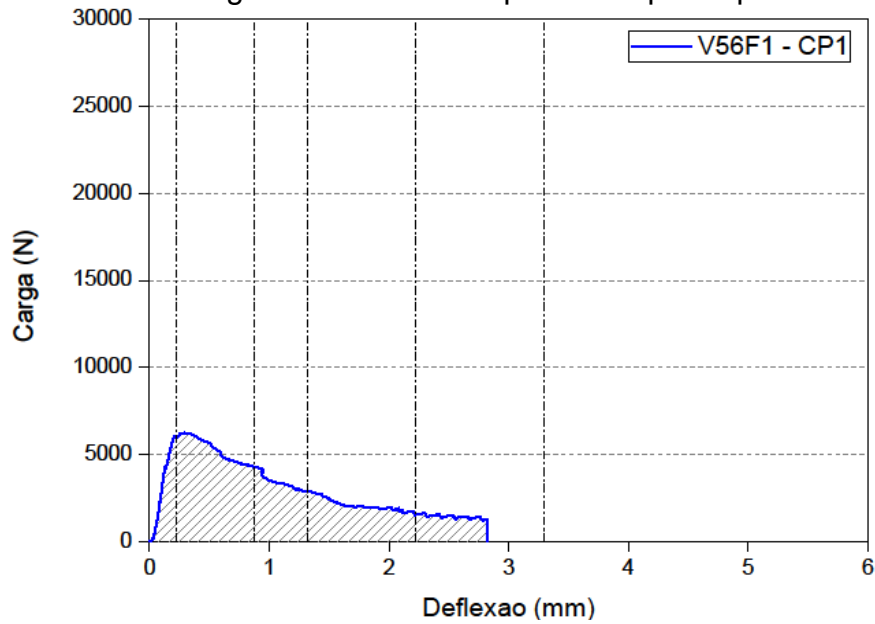


Tabela A.51 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F0CP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (0,547)
Ten. (Nxm)	0,031	-	-	-	-	0,446

Fonte: autor, 2019.

Figura A.52 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V56F1CP1.



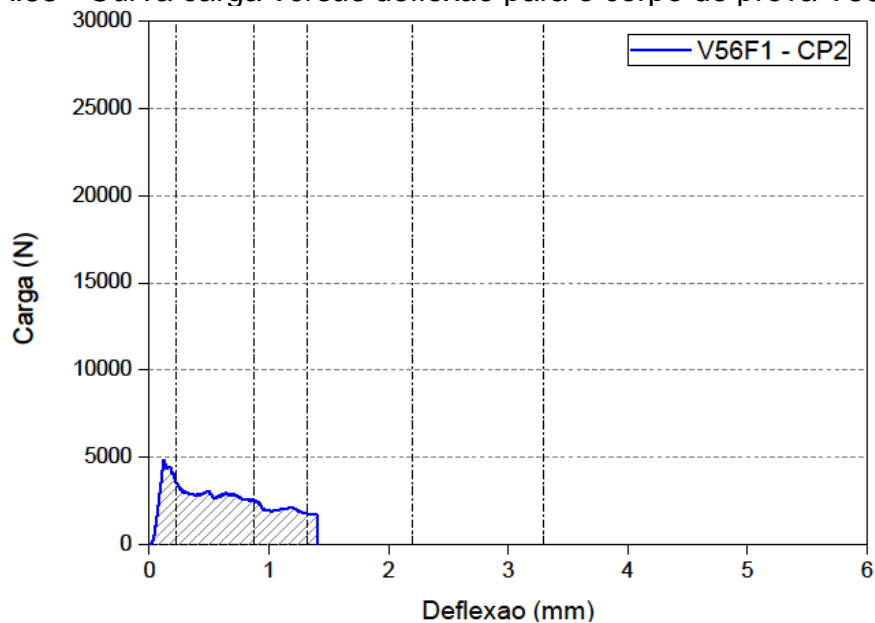
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.52 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F1CP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (2,819)
Ten. (Nxm)	0,668	4,171	5,903	7,777	-	8,660

Fonte: autor, 2019.

Figura A.53 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V56F1CP2.



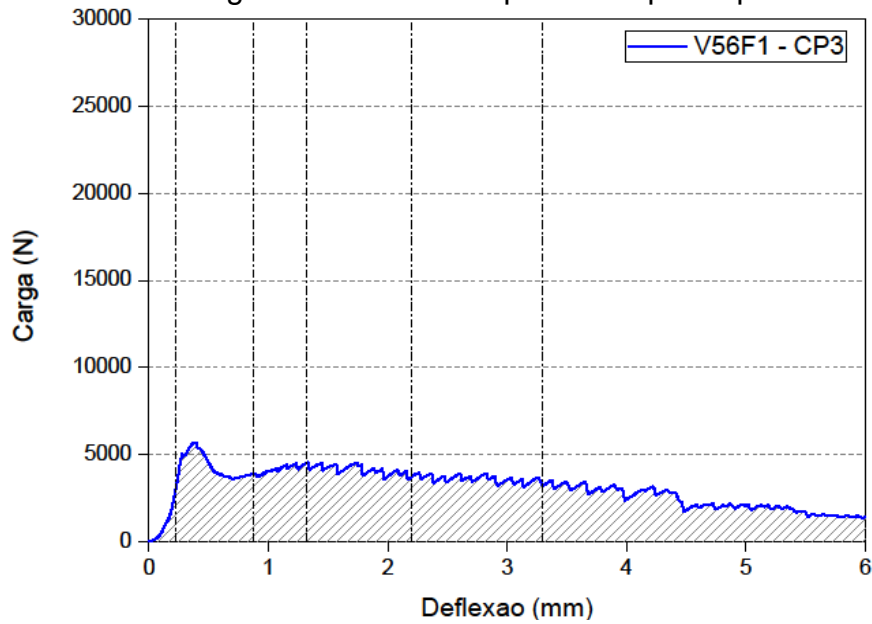
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.53 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F1CP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (1,400)
Ten. (Nxm)	0,674	2,549	3,440	-	-	3,567

Fonte: autor, 2019.

Figura A.54 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V56F1CP3.



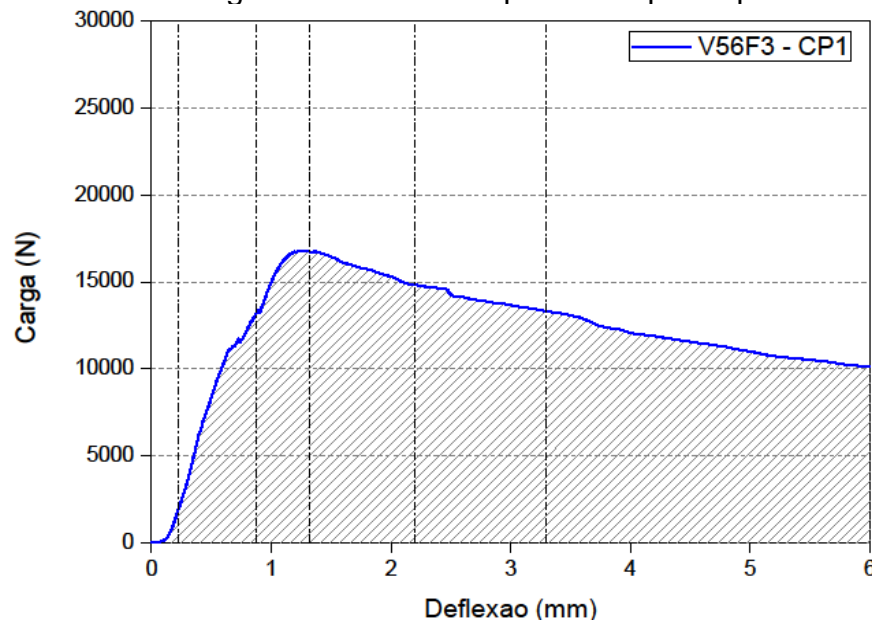
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.54 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F1CP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	0,184	3,057	4,850	8,554	12,392	18,665

Fonte: autor, 2019.

Figura A.55 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V56F3CP1.



Fonte: autor, 2019.

Tabela A.55 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F3CP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	0,066	5,777	12,629	26,649	42,277	73,352

Fonte: autor, 2019.

Figura A.56 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V56F3CP2.

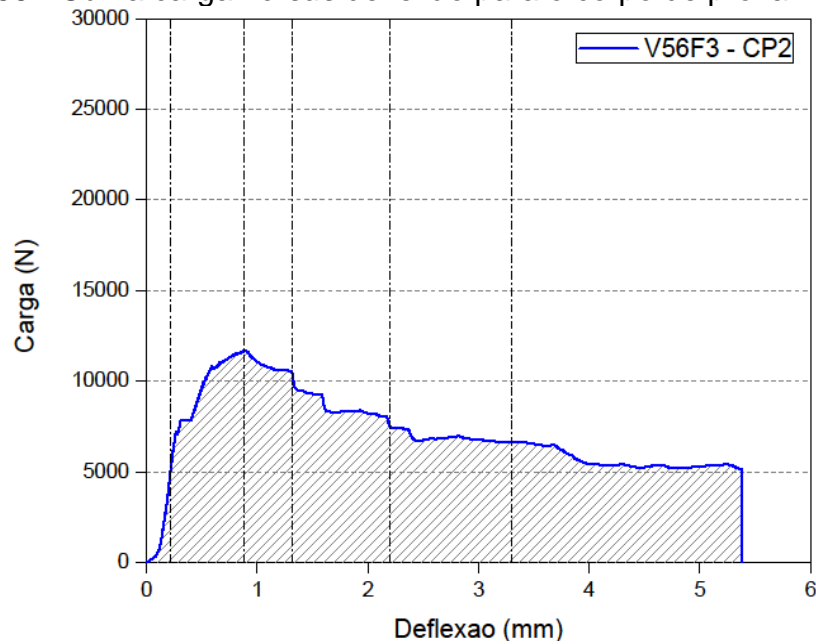


Tabela A.56 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F3CP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (5,379)
Ten. (Nxm)	0,309	6,729	11,489	19,151	26,611	38,304

Fonte: autor, 2019.

Figura A.57 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V56F3CP3.

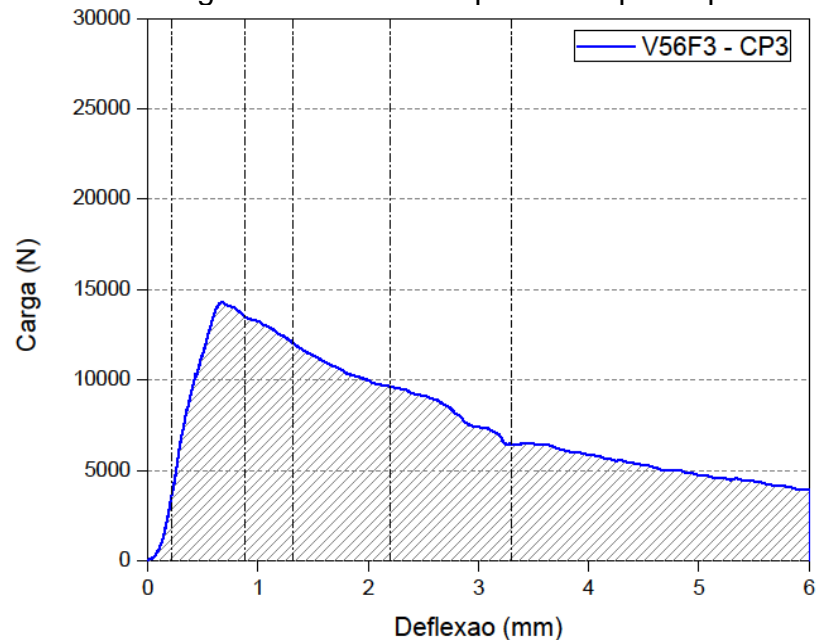


Tabela A.57 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F3CP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	0,256	7,766	13,274	22,749	31,866	45,820

Fonte: autor, 2019.

Figura A.58 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V56F5CP1.

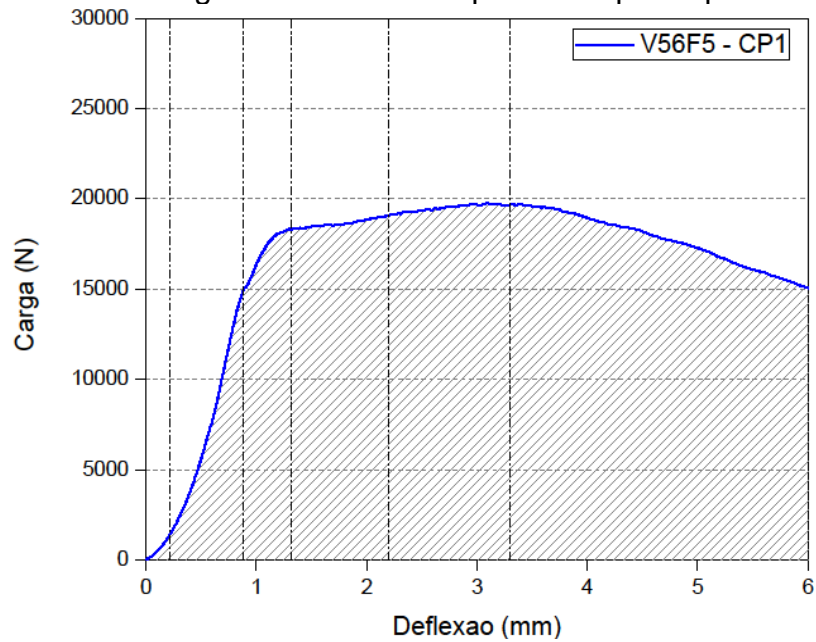


Tabela A.58 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F5CP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	0,128	4,912	12,352	28,811	50,271	98,666

Fonte: autor, 2019.

Figura A.59 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V56F5CP2.

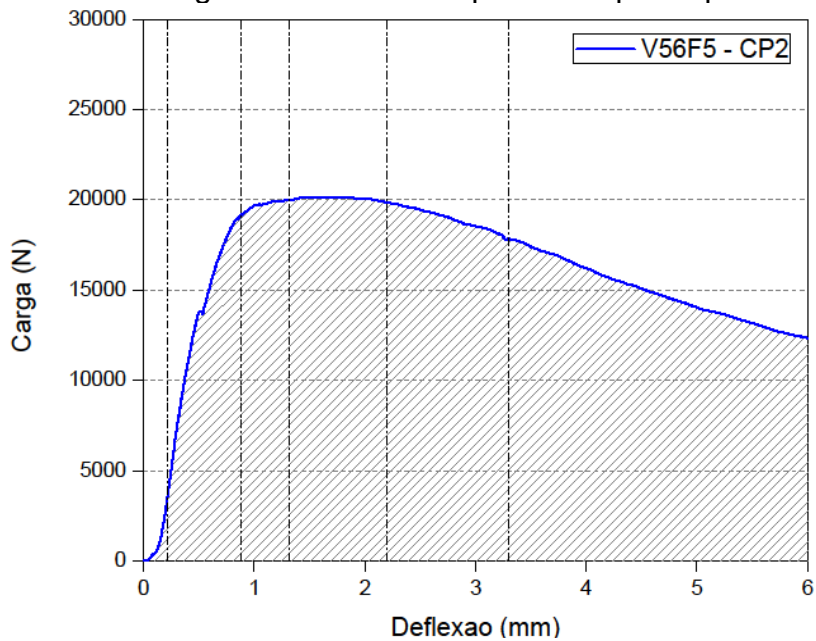
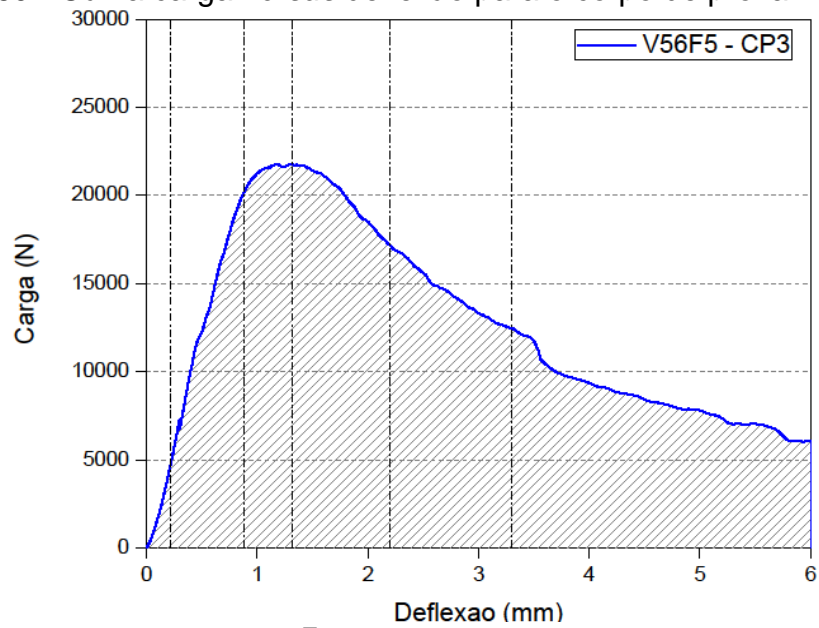


Tabela A.59 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F5CP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	0,208	9,117	17,909	35,693	56,381	97,017

Fonte: autor, 2019.

Figura A.60 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V56F5CP3.



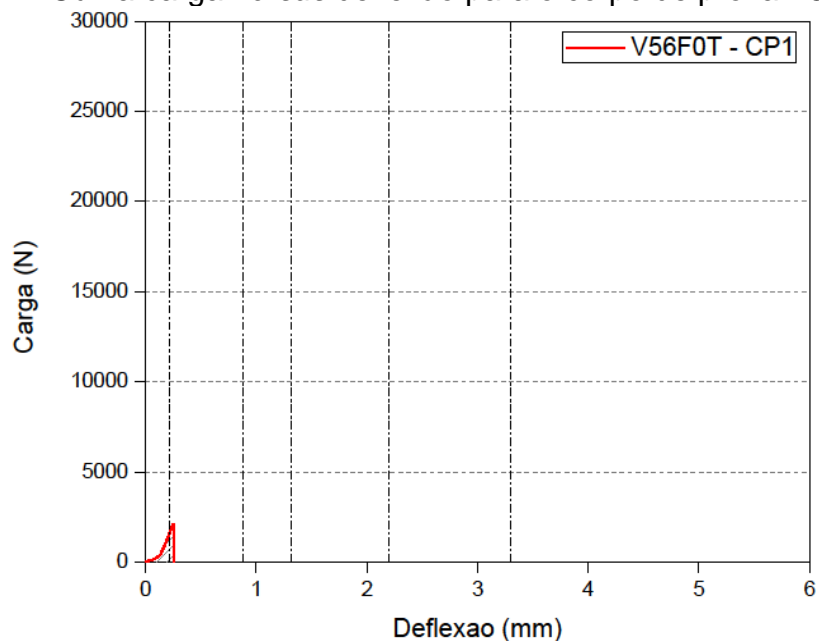
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.60 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F5CP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	0,445	9,203	18,508	36,209	52,198	74,923

Fonte: autor, 2019.

Figura A.61 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V56F0TCP1.

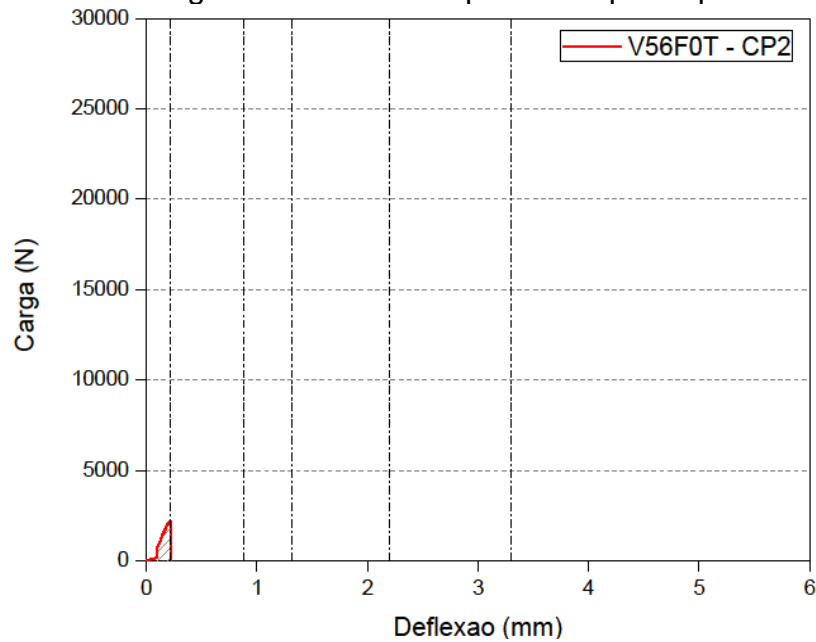


Fonte: autor, 2019.

Tabela A.61 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F0TCP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (0,260)
Ten. (Nxm)	0,106	-	-	-	-	0,180

Fonte: autor, 2019.

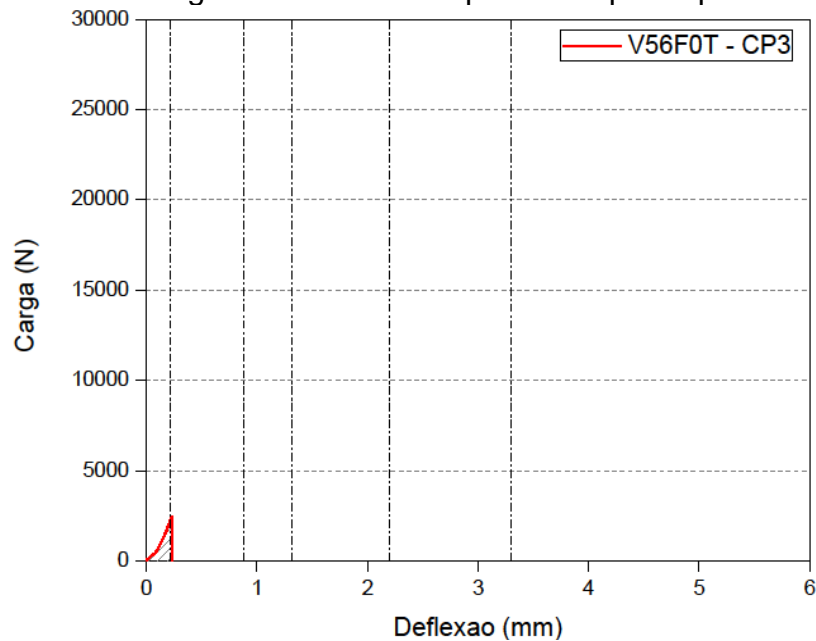
Figura A.62 - Curva carga *versus* deflexão para o corpo de prova V56F0TCP2.

Fonte: autor, 2019.

Tabela A.62 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F0TCP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (0,221)
Ten. (Nxm)	0,230	-	-	-	-	0,253

Fonte: autor, 2019.

Figura A.63 - Curva carga *versus* deflexão para o corpo de prova V56F0TCP3.

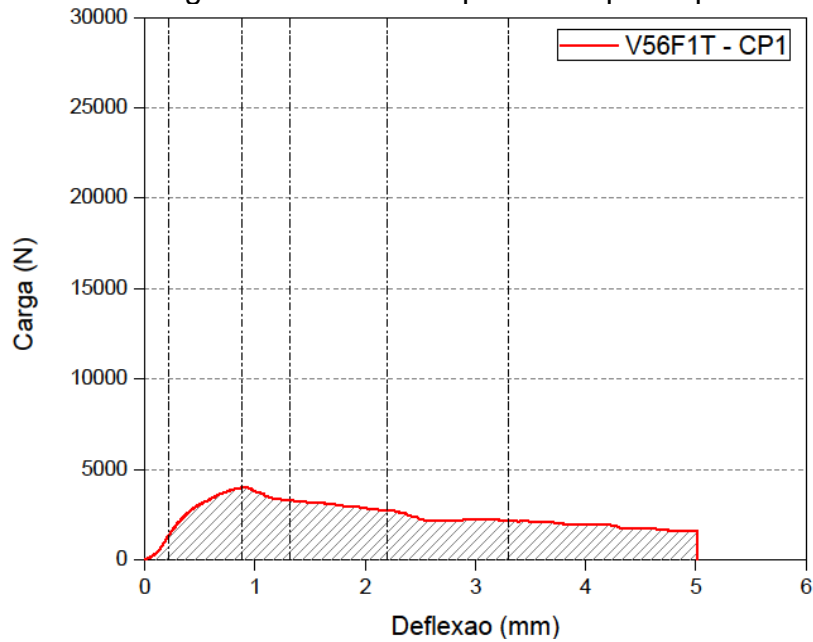
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.63 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F0TCP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (0,238)
Ten. (Nxm)	0,200	-	-	-	-	0,243

Fonte: autor, 2019.

Figura A.64 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V56F1TCP1.



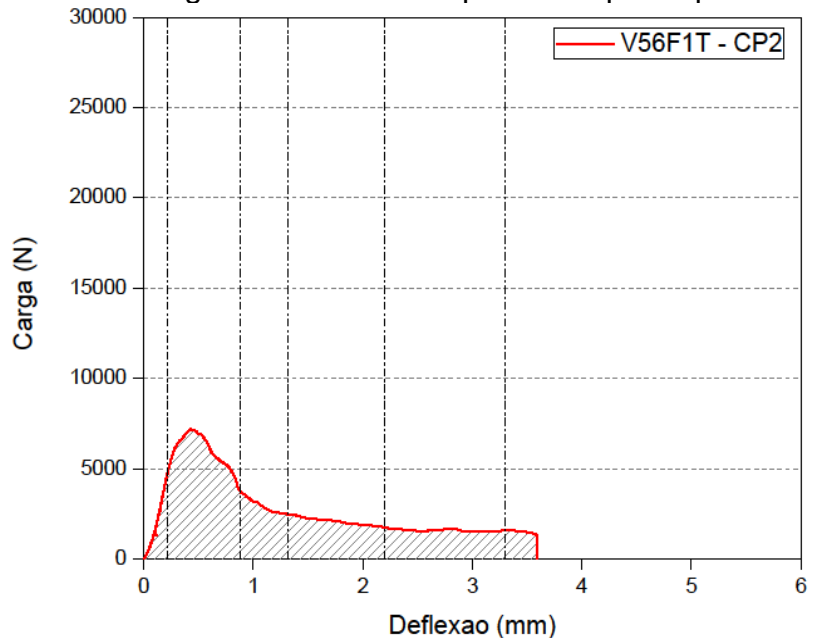
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.64 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F1TCP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (5,012)
Ten. (Nxm)	0,110	2,132	3,728	6,350	8,820	12,100

Fonte: autor, 2019.

Figura A.65 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V56F1TCP2.



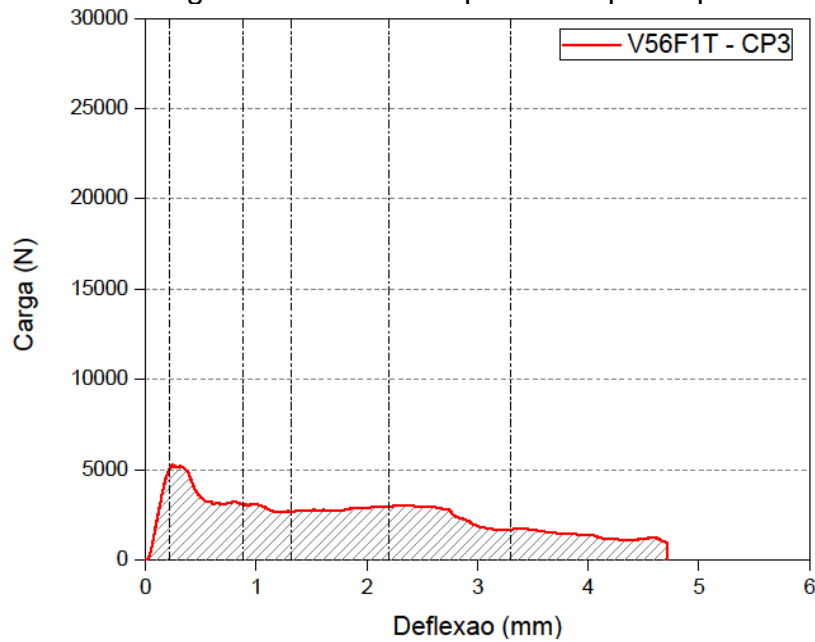
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.65 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F1TCP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (3,588)
Ten. (Nxm)	0,707	4,663	5,916	7,761	9,501	9,916

Fonte: autor, 2019.

Figura A.66 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V56F1TCP3.



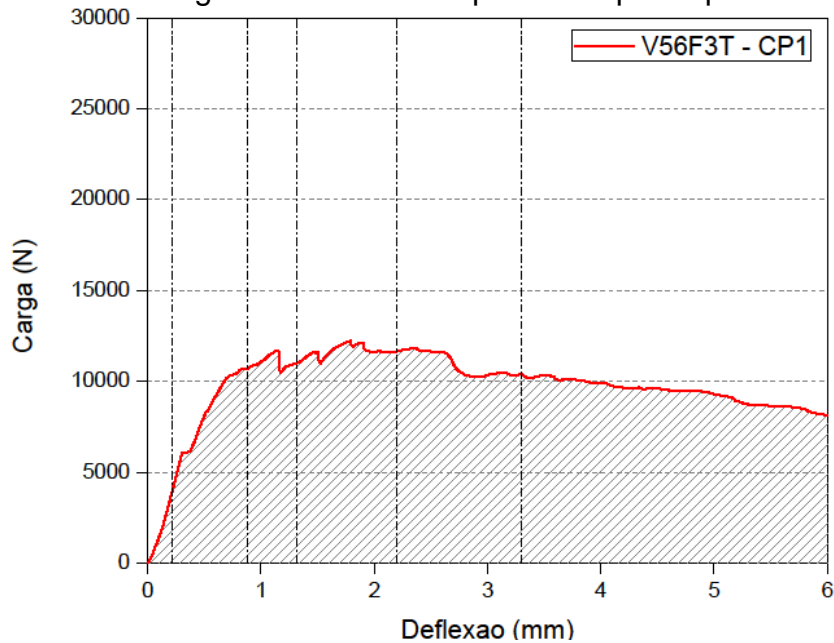
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.66 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F1TCP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (4,712)
Ten. (Nxm)	0,525	3,049	4,317	6,791	9,469	11,353

Fonte: autor, 2019.

Figura A.67 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V56F3TCP1.



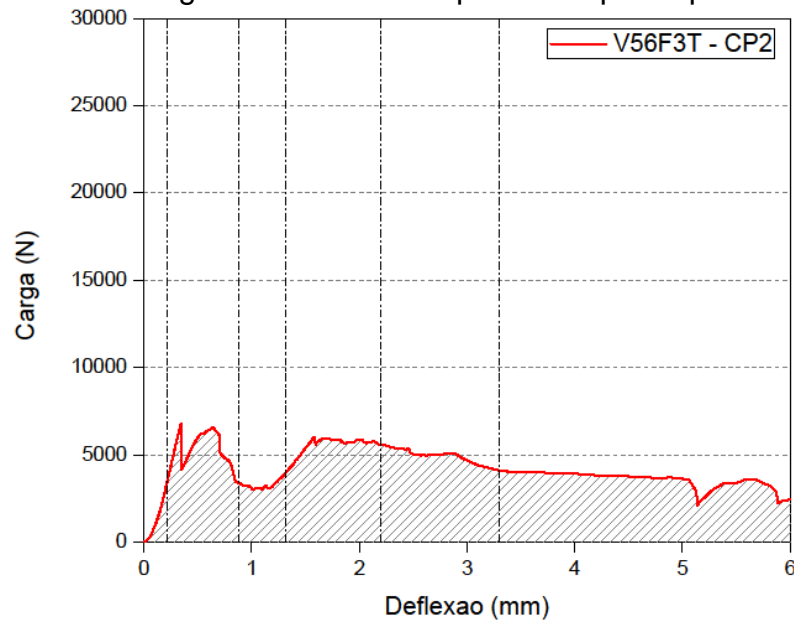
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.67 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F3TCP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	0,376	5,860	10,712	20,875	33,015	58,721

Fonte: autor, 2019.

Figura A.68 - Curva carga *versus* deflexão para o corpo de prova V56F3TCP2.



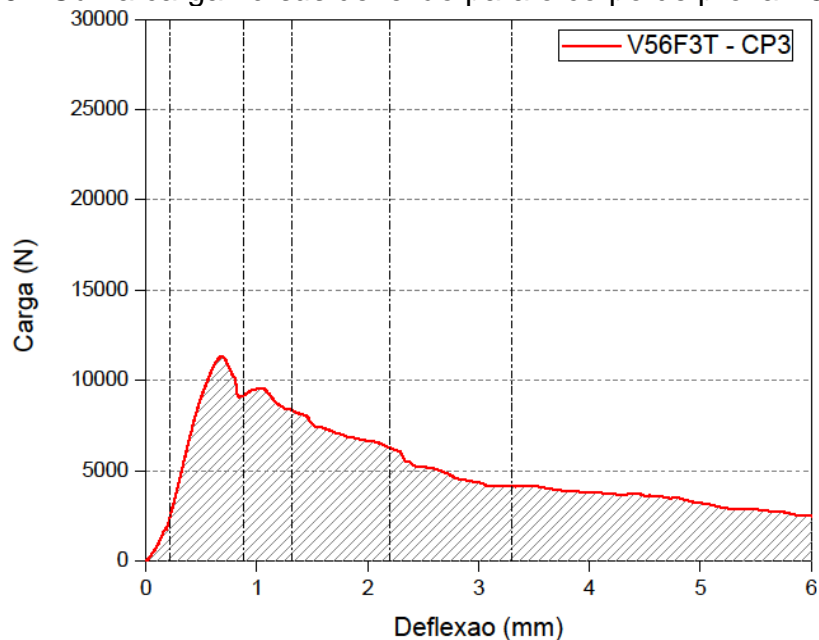
Fonte: autor, 2019.

Tabela A.68 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F3TCP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	0,280	3,787	5,237	10,095	15,550	25,245

Fonte: autor, 2019.

Figura A.69 - Curva carga *versus* deflexão para o corpo de prova V56F3TCP3.



Fonte: autor, 2019.

Tabela A.69 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F3TCP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	0,221	5,854	9,820	16,041	21,401	30,637

Fonte: autor, 2019.

Figura A.70 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V56F5TCP1.

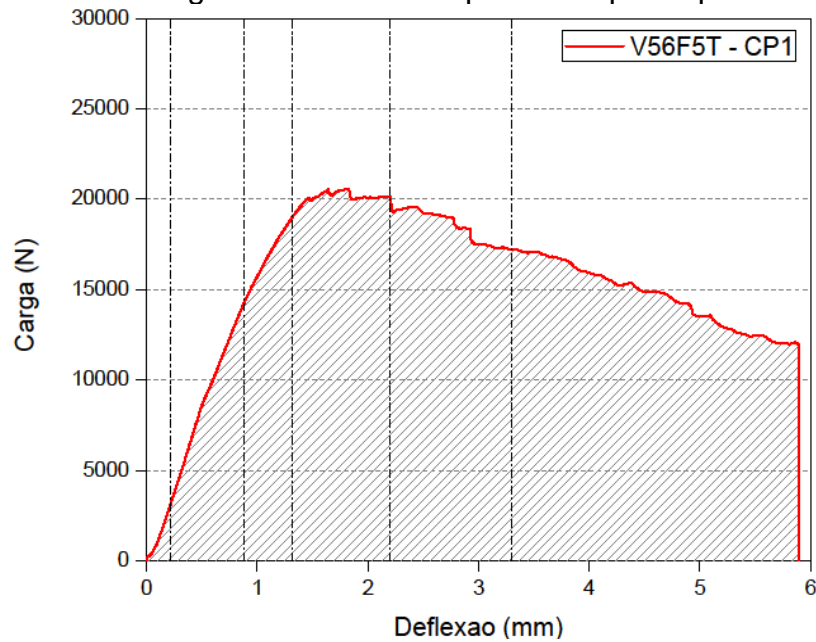


Tabela A.70 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F5TCP1.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (5,886)
Ten. (Nxm)	0,298	6,271	13,679	31,474	51,698	89,549

Fonte: autor, 2019.

Figura A.71 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V56F5TCP2.

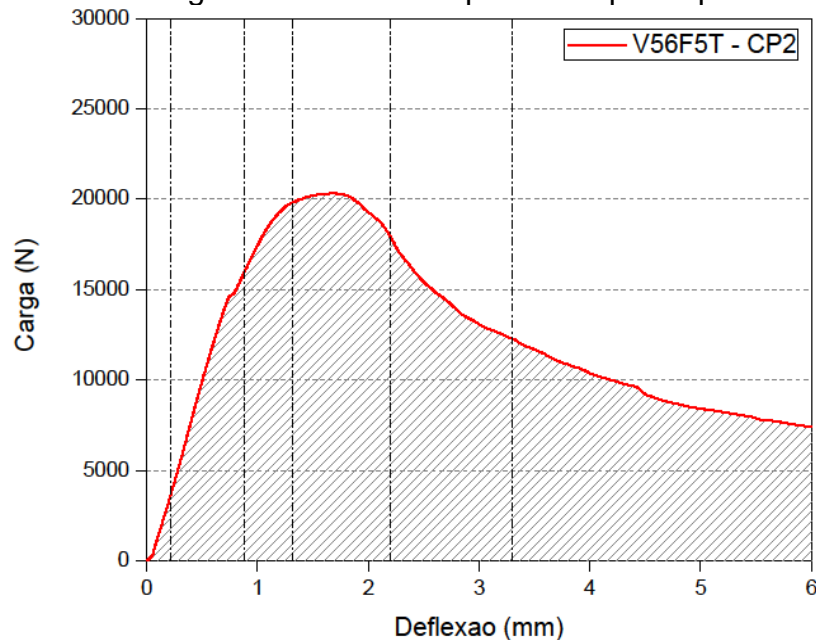


Tabela A.71 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F5TCP2.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (6,0)
Ten. (Nxm)	0,343	7,322	15,350	33,097	48,778	74,020

Fonte: autor, 2019.

Figura A.72 - Curva carga versus deflexão para o corpo de prova V56F5TCP3.

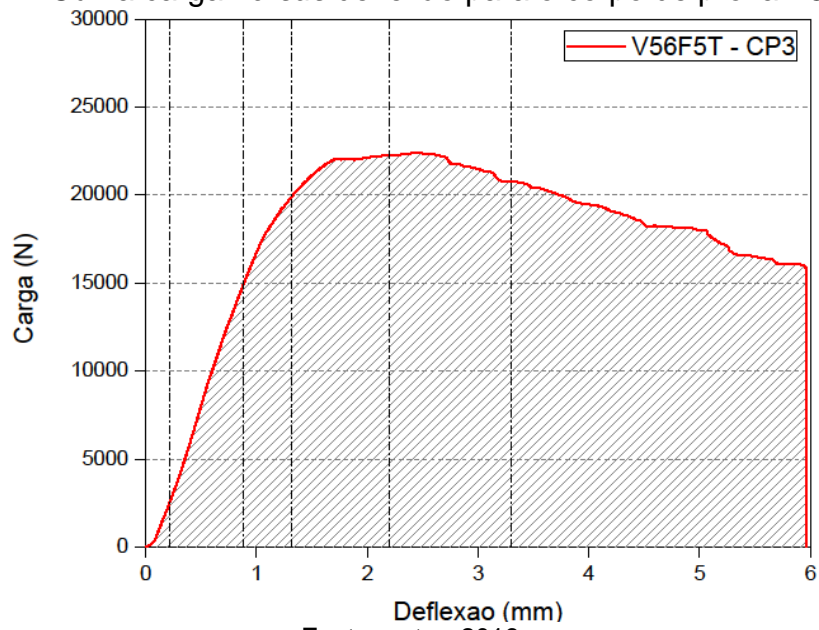


Tabela A.72 - Valores de tenacidade para o corpo de prova V56F5TCP3.

Def. (mm)	L/600	L/150	L/100	L/60	L/40	Max. (5,965)
Ten. (Nxm)	0,216	6,066	13,879	32,975	56,957	105,758

Fonte: autor, 2019.

APÊNDICE B – Resumo valores de tenacidade

Tabela B.1 – Quadro resumo para valores de tenacidade.

Nome	Def. Máx. (mm)	Tenacidade (N x mm)					
		L/600 (0,22)	L/150 (0,88)	L/100 (1,32)	L/60 (2,2)	L/40 (3,3)	Máx.
V7F0CP1	0,284	84,424	-	-	-	-	177,069
V7F0CP2	0,087	-	-	-	-	-	45,964
V7F0CP3	0,228	122,530	-	-	-	-	135,314
V7F1CP1	2,568	47,755	2259,080	3314,677	5298,677	-	6034,635
V7F1CP2	1,289	517,373	2509,493	-	-	-	3227,484
V7F1CP3	0,617	317,333	-	-	-	-	1545,414
V7F3CP1	2,502	402,060	6039,364	9333,882	14178,092	-	15432,088
V7F3CP2	6,0	293,269	5587,552	9018,166	16296,594	25288,600	42658,864
V7F3CP3	3,176	31,730	3301,569	7329,029	13465,534	-	18655,017
V7F5CP1	0,862	668,570	-	-	-	-	3004,923
V7F5CP2	3,281	972,148	8455,198	12639,889	19378,717	-	25752,329
V7F5CP3	4,763	144,410	6366,396	9747,119	15464,243	22202,852	29824,930
V7F0TCP1	0,413	15,681	-	-	-	-	161,120
V7F0TCP2	0,429	19,264	-	-	-	-	177,099
V7F0TCP3	0,256	81,985	-	-	-	-	143,129
V7F1TCP1	2,506	185,852	4271,947	6326,141	8987,135	-	9487,213
V7F1TCP2	6,0	338,189	3552,152	4615,601	6152,245	8027,210	15851,470
V7F1TCP3	1,617	640,572	3071,791	3710,266	-	-	4315,786
V7F3TCP1	5,44	319,636	7769,589	12582,732	19017,816	24892,071	31873,778
V7F3TCP2	6,0	312,950	8002,779	15046,997	26394,825	36153,487	53893,613
V7F3TCP3	6,0	668,167	7218,481	10746,128	17267,721	24351,507	37208,181
V7F5TCP1	5,463	568,654	10328,324	2044,564	39926,741	55498,338	70689,650
V7F5TCP2	6,0	367,645	10449,963	22656,201	45070,470	64773,390	90378,284
V7F5TCP3	5,763	447,951	9287,504	17261,933	30774,826	42759,857	57017,955
V28F0CP1	0,179	-	-	-	-	-	209,93
V28F0CP2	0,222	238,513	-	-	-	-	243,663
V28F0CP3	0,204	-	-	-	-	-	256,247
V28F1CP1	2,369	117,763	3043,275	5090,598	6748,111	-	6949,872
V28F1CP2	3,658	252,179	2720,373	3666,098	5595,011	7634,148	8160,478
V28F1CP3	0,904	404,418	3049,334	-	-	-	3064,491
V28F3CP1	6,0	717,257	10062,223	16906,482	27960,155	38747,586	55673,979
V28F3CP2	3,353	786,975	8689,882	13994,841	22019,738	27517,135	27645,998
V28F3CP3	5,047	350,531	6100,939	10222,561	17456,62	23339,039	28724,205
V28F5CP1	6,0	431,457	7764,086	13170,998	24914,229	38106,837	69540,751
V28F5CP2	4,368	459,049	11080,083	20243,961	29215,897	35736,456	40949,323
V28F5CP3	5,178	184,829	9531,051	16888,507	27951,782	37380,258	47200,428
V28F0TCP1	0,128	-	-	-	-	-	181,534

(Continuação)

Nome	Def. Máx. (mm)	Tenacidade (N x mm)					Máx.
		L/600 (0,22)	L/150 (0,88)	L/100 (1,32)	L/60 (2,2)	L/40 (3,3)	
V28F0TCP2	0,188	-	-	-	-	-	241,971
V28F0TCP3	0,218	-	-	-	-	-	183,674
V28F1TCP1	2,165	293,460	5074,081	7180,845	-	-	9552,441
V28F1TCP2	2,553	659,413	4983,430	6949,907	8858,173	-	9404,265
V28F1TCP3	3,707	623,493	4170,782	6079,834	9007,686	11407,784	12007,081
V28F3TCP1	6,0	345,769	7660,722	15097,289	29471,545	42986,609	65868,102
V28F3TCP2	6,0	234,811	5417,813	10748,956	17672,246	23268,894	32412,036
V28F3TCP3	6,0	249,740	5909,277	11994,665	27338,073	49142,340	78692,647
V28F5TCP1	6,0	313,422	7471,059	15989,706	35064,224	58428,761	101129,506
V28F5TCP2	6,0	139,707	4361,679	11217,361	30491,700	57099,999	108413,842
V28F5TCP3	6,0	234,013	7347,636	17103,811	40316,553	65319,074	91062,953
V56F0CP1	0,393	14,148	-	-	-	-	284,946
V56F0CP2	0,262	161,043	-	-	-	-	557,740
V56F0CP3	0,547	30,821	-	-	-	-	446,153
V56F1CP1	2,819	668,235	4170,694	5902,790	7777,307	-	8659,749
V56F1CP2	1,400	673,605	2548,943	3440,239	-	-	3567,378
V56F1CP3	6,0	184,089	3057,272	4849,629	8554,372	12392,130	18665,045
V56F3CP1	6,0	65,710	5777,193	12629,213	26649,078	42277,467	73352,282
V56F3CP2	5,379	308,579	6729,413	11489,226	19151,071	26611,212	38303,716
V56F3CP3	6,0	256,012	7765,754	13273,737	22748,707	31866,385	45820,441
V56F5CP1	6,0	128,490	4911,668	12351,611	28811,020	50270,789	98666,036
V56F5CP2	6,0	207,537	9117,438	17909,407	35692,813	56381,060	97017,112
V56F5CP3	6,0	444,663	9202,536	18507,759	36209,433	52197,730	74922,851
V56F0TCP1	0,260	105,717	-	-	-	-	180,430
V56F0TCP2	0,221	229,964	-	-	-	-	253,126
V56F0TCP3	0,238	200,220	-	-	-	-	242,676
V56F1TCP1	5,012	109,878	2131,706	3727,757	6350,296	8820,409	12099,875
V28F1TCP2	3,588	706,876	4663,397	5916,408	7760,583	9500,946	9915,979
V56F1TCP3	4,712	525,121	3049,150	4317,010	6790,546	9469,284	11353,198
V56F3TCP1	6,0	375,698	5860,353	10712,331	20874,818	33015,164	58721,278
V56F3TCP2	6,0	279,627	3787,029	5236,924	10094,551	15550,366	25245,101
V56F3TCP3	6,0	220,970	5853,794	9820,183	16040,613	21401,368	30636,616
V56F5TCP1	5,886	297,781	6270,621	13679,008	31474,459	51698,472	89549,027
V56F5TCP2	6,0	342,845	7322,193	15350,224	33097,376	48778,324	74020,460
V56F5TCP3	5,965	216,004	6066,011	13878,875	32974,972	56957,371	105758,112

Fonte: autor (2019).

APÊNDICE C – Banco de dados e resultados do tratamento estatístico

Tabela C.1 – Valores de deflexão, resistência na flexão e tenacidade, originais, utilizados no tratamento estatístico.

No.	Nome	Idade	% Fibras	Tratamento Térmico	CP	Deflexão (mm)	Resistência na flexão (MPa)	Tenacidade (N x mm)
1	V7F0CP1	7 dias	F0	-	1	0,284	3,24	177
2	V7F0CP2	7 dias	F0	-	2	0,087	3,20	46
3	V7F0CP3	7 dias	F0	-	3	0,228	3,30	135
4	V7F1CP1	7 dias	F1	-	1	2,568	9,77	6035
5	V7F1CP2	7 dias	F1	-	2	1,289	7,44	3227
6	V7F1CP3	7 dias	F1	-	3	0,617	8,93	1545
7	V7F3CP1	7 dias	F3	-	1	2,502	20,72	15432
8	V7F3CP2	7 dias	F3	-	2	6,000	20,83	42659
9	V7F3CP3	7 dias	F3	-	3	3,176	24,01	18655
10	V7F5CP1	7 dias	F5	-	1	0,862	13,93	3005
11	V7F5CP2	7 dias	F5	-	2	3,281	25,70	25752
12	V7F5CP3	7 dias	F5	-	3	4,763	25,82	29825
13	V7F0TCP1	7 dias	F0	T	1	0,413	4,77	161
14	V7F0TCP2	7 dias	F0	T	2	0,429	4,47	177
15	V7F0TCP3	7 dias	F0	T	3	0,256	4,12	143
16	V7F1TCP1	7 dias	F1	T	1	2,506	14,68	9487
17	V7F1TCP2	7 dias	F1	T	2	6,000	11,21	15851
18	V7F1TCP3	7 dias	F1	T	3	1,617	11,94	4316
19	V7F3TCP1	7 dias	F3	T	1	5,440	29,61	31874
20	V7F3TCP2	7 dias	F3	T	2	6,000	33,23	53894
21	V7F3TCP3	7 dias	F3	T	3	6,000	23,02	37208
22	V7F5TCP1	7 dias	F5	T	1	5,463	50,58	70690
23	V7F5TCP2	7 dias	F5	T	2	6,000	58,17	90378
24	V7F5TCP3	7 dias	F5	T	3	5,763	38,81	57018
25	V28F0CP1	28 dias	F0	-	1	0,179	7,32	210
26	V28F0CP2	28 dias	F0	-	2	0,222	8,26	244
27	V28F0CP3	28 dias	F0	-	3	0,204	6,80	256
28	V28F1CP1	28 dias	F1	-	1	2,369	11,15	6950
29	V28F1CP2	28 dias	F1	-	2	3,658	10,73	8160
30	V28F1CP3	28 dias	F1	-	3	0,904	12,38	3064
31	V28F3CP1	28 dias	F3	-	1	6,000	34,67	55674
32	V28F3CP2	28 dias	F3	-	2	3,353	29,21	27646
33	V28F3CP3	28 dias	F3	-	3	5,047	22,31	28724
34	V28F5CP1	28 dias	F5	-	1	6,000	32,31	69541
35	V28F5CP2	28 dias	F5	-	2	4,368	46,55	40949
36	V28F5CP3	28 dias	F5	-	3	5,178	40,42	47200
37	V28F0TCP1	28 dias	F0	T	1	0,128	6,15	182

(Continuação)

No.	Nome	Idade	% Fibras	Tratamento Térmico	CP	Deflexão (mm)	Resistência na flexão (MPa)	Tenacidade (N x mm)
38	V28F0TCP2	28 dias	F0	T	2	0,188	6,59	242
39	V28F0TCP3	28 dias	F0	T	3	0,218	5,54	184
40	V28F1TCP1	28 dias	F1	T	1	2,165	16,50	9552
41	V28F1TCP2	28 dias	F1	T	2	2,553	15,68	9404
42	V28F1TCP3	28 dias	F1	T	3	3,707	12,55	12007
43	V28F3TCP1	28 dias	F3	T	1	6,000	36,09	65868
44	V28F3TCP2	28 dias	F3	T	2	6,000	25,66	32412
45	V28F3TCP3	28 dias	F3	T	3	6,000	41,95	78693
46	V28F5TCP1	28 dias	F5	T	1	6,000	45,33	101130
47	V28F5TCP2	28 dias	F5	T	2	6,000	50,18	108414
48	V28F5TCP3	28 dias	F5	T	3	6,000	55,77	91063
49	V56F0CP1	56 dias	F0	-	1	0,393	8,32	285
50	V56F0CP2	56 dias	F0	-	2	0,262	9,10	558
51	V56F0CP3	56 dias	F0	-	3	0,547	8,66	446
52	V56F1CP1	56 dias	F1	-	1	2,819	12,88	8660
53	V56F1CP2	56 dias	F1	-	2	1,400	9,97	3567
54	V56F1CP3	56 dias	F1	-	3	6,000	11,71	18665
55	V56F3CP1	56 dias	F3	-	1	6,000	34,65	73352
56	V56F3CP2	56 dias	F3	-	2	5,379	24,15	38304
57	V56F3CP3	56 dias	F3	-	3	6,000	29,50	45820
58	V56F5CP1	56 dias	F5	-	1	6,000	40,76	98666
59	V56F5CP2	56 dias	F5	-	2	6,000	41,57	97017
60	V56F5CP3	56 dias	F5	-	3	6,000	44,96	74923
61	V56F0TCP1	56 dias	F0	T	1	0,260	4,35	180
62	V56F0TCP2	56 dias	F0	T	2	0,221	4,47	253
63	V56F0TCP3	56 dias	F0	T	3	0,238	5,08	243
64	V56F1TCP1	56 dias	F1	T	1	5,012	8,26	12100
65	V28F1TCP2	56 dias	F1	T	2	3,588	14,83	9916
66	V56F1TCP3	56 dias	F1	T	3	4,712	10,89	11353
67	V56F3TCP1	56 dias	F3	T	1	6,000	25,22	58721
68	V56F3TCP2	56 dias	F3	T	2	6,000	13,97	25245
69	V56F3TCP3	56 dias	F3	T	3	6,000	23,40	30637
70	V56F5TCP1	56 dias	F5	T	1	5,886	42,47	89549
71	V56F5TCP2	56 dias	F5	T	2	6,000	41,97	74020
72	V56F5TCP3	56 dias	F5	T	3	5,965	46,21	105758

Fonte: autor (2019).

Tabela C.2 – Valores de deflexão, resistência na flexão e tenacidade, transformados, utilizados no tratamento estatístico.

No.	Nome	Idade	% Fibras	Tratamento Térmico	CP	LOG10_D	LOG10_R	LOG10_T
1	V7F0CP1	7 dias	F0	-	1	-0,55	0,51	2,25
2	V7F0CP2	7 dias	F0	-	2	-1,06	0,51	1,66
3	V7F0CP3	7 dias	F0	-	3	-0,64	0,52	2,13
4	V7F1CP1	7 dias	F1	-	1	0,41	0,99	3,78
5	V7F1CP2	7 dias	F1	-	2	0,11	0,87	3,51
6	V7F1CP3	7 dias	F1	-	3	-0,21	0,95	3,19
7	V7F3CP1	7 dias	F3	-	1	0,40	1,32	4,19
8	V7F3CP2	7 dias	F3	-	2	0,78	1,32	4,63
9	V7F3CP3	7 dias	F3	-	3	0,50	1,38	4,27
10	V7F5CP1	7 dias	F5	-	1	-0,06	1,14	3,48
11	V7F5CP2	7 dias	F5	-	2	0,52	1,41	4,41
12	V7F5CP3	7 dias	F5	-	3	0,68	1,41	4,47
13	V7F0TCP1	7 dias	F0	T	1	-0,38	0,68	2,21
14	V7F0TCP2	7 dias	F0	T	2	-0,37	0,65	2,25
15	V7F0TCP3	7 dias	F0	T	3	-0,59	0,61	2,16
16	V7F1TCP1	7 dias	F1	T	1	0,40	1,17	3,98
17	V7F1TCP2	7 dias	F1	T	2	0,78	1,05	4,20
18	V7F1TCP3	7 dias	F1	T	3	0,21	1,08	3,64
19	V7F3TCP1	7 dias	F3	T	1	0,74	1,47	4,50
20	V7F3TCP2	7 dias	F3	T	2	0,78	1,52	4,73
21	V7F3TCP3	7 dias	F3	T	3	0,78	1,36	4,57
22	V7F5TCP1	7 dias	F5	T	1	0,74	1,70	4,85
23	V7F5TCP2	7 dias	F5	T	2	0,78	1,76	4,96
24	V7F5TCP3	7 dias	F5	T	3	0,76	1,59	4,76
25	V28F0CP1	28 dias	F0	-	1	-0,75	0,86	2,32
26	V28F0CP2	28 dias	F0	-	2	-0,65	0,92	2,39
27	V28F0CP3	28 dias	F0	-	3	-0,69	0,83	2,41
28	V28F1CP1	28 dias	F1	-	1	0,37	1,05	3,84
29	V28F1CP2	28 dias	F1	-	2	0,56	1,03	3,91
30	V28F1CP3	28 dias	F1	-	3	-0,04	1,09	3,49
31	V28F3CP1	28 dias	F3	-	1	0,78	1,54	4,75
32	V28F3CP2	28 dias	F3	-	2	0,53	1,47	4,44
33	V28F3CP3	28 dias	F3	-	3	0,70	1,35	4,46
34	V28F5CP1	28 dias	F5	-	1	0,78	1,51	4,84
35	V28F5CP2	28 dias	F5	-	2	0,64	1,67	4,61
36	V28F5CP3	28 dias	F5	-	3	0,71	1,61	4,67
37	V28F0TCP1	28 dias	F0	T	1	-0,89	0,79	2,26
38	V28F0TCP2	28 dias	F0	T	2	-0,73	0,82	2,38
39	V28F0TCP3	28 dias	F0	T	3	-0,66	0,74	2,26

(Continuação)

No.	Nome	Idade	% Fibras	Tratamento Térmico	CP	LOG10_D	LOG10_R	LOG10_T
40	V28F1TCP1	28 dias	F1	T	1	0,34	1,22	3,98
41	V28F1TCP2	28 dias	F1	T	2	0,41	1,20	3,97
42	V28F1TCP3	28 dias	F1	T	3	0,57	1,10	4,08
43	V28F3TCP1	28 dias	F3	T	1	0,78	1,56	4,82
44	V28F3TCP2	28 dias	F3	T	2	0,78	1,41	4,51
45	V28F3TCP3	28 dias	F3	T	3	0,78	1,62	4,90
46	V28F5TCP1	28 dias	F5	T	1	0,78	1,66	5,00
47	V28F5TCP2	28 dias	F5	T	2	0,78	1,70	5,04
48	V28F5TCP3	28 dias	F5	T	3	0,78	1,75	4,96
49	V56F0CP1	56 dias	F0	-	1	-0,41	0,92	2,45
50	V56F0CP2	56 dias	F0	-	2	-0,58	0,96	2,75
51	V56F0CP3	56 dias	F0	-	3	-0,26	0,94	2,65
52	V56F1CP1	56 dias	F1	-	1	0,45	1,11	3,94
53	V56F1CP2	56 dias	F1	-	2	0,15	1,00	3,55
54	V56F1CP3	56 dias	F1	-	3	0,78	1,07	4,27
55	V56F3CP1	56 dias	F3	-	1	0,78	1,54	4,87
56	V56F3CP2	56 dias	F3	-	2	0,73	1,38	4,58
57	V56F3CP3	56 dias	F3	-	3	0,78	1,47	4,66
58	V56F5CP1	56 dias	F5	-	1	0,78	1,61	4,99
59	V56F5CP2	56 dias	F5	-	2	0,78	1,62	4,99
60	V56F5CP3	56 dias	F5	-	3	0,78	1,65	4,87
61	V56F0TCP1	56 dias	F0	T	1	-0,59	0,64	2,26
62	V56F0TCP2	56 dias	F0	T	2	-0,66	0,65	2,40
63	V56F0TCP3	56 dias	F0	T	3	-0,62	0,71	2,39
64	V56F1TCP1	56 dias	F1	T	1	0,70	0,92	4,08
65	V28F1TCP2	56 dias	F1	T	2	0,55	1,17	4,00
66	V56F1TCP3	56 dias	F1	T	3	0,67	1,04	4,06
67	V56F3TCP1	56 dias	F3	T	1	0,78	1,40	4,77
68	V56F3TCP2	56 dias	F3	T	2	0,78	1,15	4,40
69	V56F3TCP3	56 dias	F3	T	3	0,78	1,37	4,49
70	V56F5TCP1	56 dias	F5	T	1	0,77	1,63	4,95
71	V56F5TCP2	56 dias	F5	T	2	0,78	1,62	4,87
72	V56F5TCP3	56 dias	F5	T	3	0,78	1,66	5,02

Fonte: autor (2019).

Tabela C.3 – Quantidade de corpos de prova utilizados no experimento.

Variável explicativa		Quantidade de corpos de prova
Idade	7 dias	24
	28 dias	24
	56 dias	24
Fibras	0%	18
	1%	18
	3%	18
	5%	18
Tratamento térmico	Não	36
	Sim	36

Fonte: autor (2019).

Tabela C.4 – Quantidade de corpos de prova agrupados em cada condição.

Variável explicativa			Quantidade de corpos de prova	
Idade	Fibras	Tratamento térmico		
7 dias	0%	Não	3	
		Sim	3	
	1%	Não	3	
		Sim	3	
	3%	Não	3	
		Sim	3	
	5%	Não	3	
		Sim	3	
	Total	Não	12	
	Total	Sim	12	
	Total	Total	Total	24
	28 dias	0%	Não	3
Sim			3	
1%		Não	3	
		Sim	3	
3%		Não	3	
		Sim	3	
5%		Não	3	
		Sim	3	
Total		Não	12	
Total		Sim	12	
Total		Total	Total	24
56 dias		0%	Não	3
	Sim		3	
	1%	Não	3	
		Sim	3	
	3%	Não	3	
		Sim	3	
	5%	Não	3	
		Sim	3	
	Total	Não	12	
	Total	Sim	12	
	Total	Total	Total	24
	Total	0%	Não	9
Sim			9	
Total		Total	18	
1%		Não	9	
		Sim	9	
Total		Total	18	

(Continuação)

Idade	Variável explicativa		Quantidade de corpos de prova
	Fibras	Tratamento térmico	
Total	3%	Não	9
		Sim	9
		Total	18
	5%	Não	9
		Sim	9
		Total	18
Total		Não	36
		Sim	36
		Total	72

Fonte: autor (2019).

Tabela C.5 – Testes de normalidade e homogeneidade de variância em relação à idade.

Variável Resposta	Idade	Teste de normalidade	Teste de homogeneidade de variância	
		K-S	Levene	
		<i>p-value</i>	<i>p-value</i>	
LOG10_R	7 dias	<u>0,198</u>	Baseado na média	<u>0,764</u>
	28 dias	<u>0,200</u>	Baseado na mediana	<u>0,775</u>
	56 dias	<u>0,200</u>	Baseado na mediana com gl ajustado	<u>0,775</u>
LOG10_T			Baseado na média aparada	<u>0,766</u>
	7 dias	0,042	Baseado na média	<u>0,912</u>
	28 dias	0,022	Baseado na mediana	<u>0,940</u>
	56 dias	0,046	Baseado na mediana com gl ajustado	<u>0,940</u>
LOG10_D			Baseado na média aparada	<u>0,908</u>
	7 dias	0,014	Baseado na média	<u>0,803</u>
	28 dias	0,001	Baseado na mediana	<u>0,816</u>
	56 dias	0,000	Baseado na mediana com gl ajustado	<u>0,816</u>
			Baseado na média aparada	<u>0,842</u>

Fonte: autor (2019). Nota: Os valores sublinhados representam as variáveis com distribuição e/ou homogeneidade de variância.

Tabela C.6 - Testes de normalidade e homogeneidade de variância em relação ao teor de fibras.

Variável Resposta	Fibras	Teste de normalidade	Teste de homogeneidade de variância	
		K-S	Levene	
		<i>p-value</i>	<i>p-value</i>	
LOG10_R	0%	<u>0,200</u>	Baseado na média	<u>0,186</u>
	1%	<u>0,200</u>	Baseado na mediana	<u>0,235</u>
	3%	<u>0,200</u>	Baseado na mediana com gl ajustado	<u>0,238</u>
	5%	0,002	Baseado na média aparada	<u>0,214</u>
LOG10_T	0%	<u>0,181</u>	Baseado na média	<u>0,367</u>
	1%	<u>0,103</u>	Baseado na mediana	<u>0,745</u>
	3%	<u>0,200</u>	Baseado na mediana com gl ajustado	<u>0,745</u>
	5%	0,004	Baseado na média aparada	<u>0,557</u>
LOG10_D	0%	<u>0,200</u>	Baseado na média	<u>0,059</u>
	1%	<u>0,200</u>	Baseado na mediana	0,033
	3%	0,000	Baseado na mediana com gl ajustado	0,035
	5%	0,000	Baseado na média aparada	0,042

Fonte: autor (2019). Nota: Os valores sublinhados representam as variáveis com distribuição e/ou homogeneidade de variância.

Tabela C.7 - Testes de normalidade e homogeneidade de variância em relação ao tratamento térmico.

Variável Resposta	Tratamento térmico	Teste de normalidade	Teste de homogeneidade de variância	
		K-S	Levene	
		<i>p-value</i>	<i>p-value</i>	
LOG10_R	Não	<u>0,132</u>	Baseado na média	<u>0,302</u>
	Sim	<u>0,200</u>	Baseado na mediana	<u>0,303</u>
			Baseado na mediana com gl ajustado	<u>0,303</u>
LOG10_T	Não	0,024	Baseado na média aparada	<u>0,304</u>
			Baseado na média	<u>0,837</u>
	Sim	0,000	Baseado na mediana	<u>0,963</u>
			Baseado na mediana com gl ajustado	<u>0,963</u>
LOG10_D	Não	0,001	Baseado na média aparada	<u>0,880</u>
			Baseado na média	<u>0,966</u>
	Sim	0,000	Baseado na mediana	<u>0,677</u>
			Baseado na mediana com gl ajustado	<u>0,678</u>
			Baseado na média aparada	<u>0,877</u>

Fonte: autor (2019). Nota: Os valores sublinhados representam as variáveis com distribuição e/ou homogeneidade de variância.

Tabela C.8 – Teste de homogeneidade de variância multivariado.

Teste de homogeneidade de variância multivariado	
M Box	
Variável explicativa	<i>p-value</i>
Idade	<u>0,507</u>
Fibras	0,000
TT	<u>0,666</u>

Fonte: autor (2019). Nota: Os valores sublinhados representam as variáveis com homogeneidade de variância.

Tabela C.9 – Valores de média, desvio padrão e intervalo de confiança para as variáveis resposta transformadas, em relação à idade.

Variável resposta	Idade	Média	Desvio padrão	Intervalo de confiança 95%	
				Limite inferior	Limite superior
LOG10_R	7 dias	1,124	0,384	1,270	1,331
	28 dias	1,270	0,329	1,415	1,477
	56 dias	1,217	0,333	1,363	1,424
LOG10_T	7 dias	3,698	1,046	3,613	3,784
	28 dias	3,929	1,022	3,844	4,014
	56 dias	4,011	0,983	3,926	4,096
LOG10_D	7 dias	0,228	0,570	0,156	0,301
	28 dias	0,277	0,625	0,204	0,349
	56 dias	0,395	0,562	0,322	0,467

Fonte: autor (2019).

Tabela C.10 - Valores de média, desvio padrão e intervalo de confiança para as variáveis resposta transformadas, em relação às fibras.

Variável resposta	Fibras	Média	Desvio padrão	Intervalo de confiança 95%	
				Limite inferior	Limite superior
LOG10_R	0%	0,736	0,147	0,877	0,948
	1%	1,061	0,091	1,201	1,272
	3%	1,364	0,161	1,565	1,635
	5%	1,595	0,144	1,736	1,806
LOG10_T	0%	2,310	0,225	2,211	2,408
	1%	3,859	0,282	3,760	3,957
	3%	4,585	0,198	4,487	4,684
	5%	4,764	0,371	4,666	4,862
LOG10_D	0%	-0,615	0,189	-0,699	-0,532
	1%	0,400	0,276	0,317	0,484
	3%	0,718	0,116	0,635	0,802
	5%	0,696	0,202	0,613	0,780

Fonte: autor (2019).

Tabela C.11 - Valores de média, desvio padrão e intervalo de confiança para as variáveis resposta transformadas, em relação ao tratamento térmico.

Variável resposta	Tratamento térmico	Média	Desvio padrão	Intervalo de confiança 95%	
				Limite inferior	Limite superior
LOG10_R	Não	1,181	0,329	1,332	1,382
	Sim	1,227	0,377	1,378	1,428
LOG10_T	Não	3,797	0,982	3,727	3,866
	Sim	3,962	1,048	3,893	4,032
LOG10_D	Não	0,238	0,575	0,179	0,297
	Sim	0,362	0,591	0,303	0,421

Fonte: autor (2019).

Tabela C.12 – Comparações múltiplas em relação à idade.

Comparações múltiplas (LSD)			
Variável resposta	Idade		<i>p-value</i>
LOG10_R	7 dias	28 dias	<u>0,000</u>
		56 dias	<u>0,000</u>
	28 dias	7 dias	<u>0,000</u>
		56 dias	<u>0,019</u>
	56 dias	7 dias	<u>0,000</u>
		28 dias	<u>0,019</u>
LOG10_T	7 dias	28 dias	<u>0,000</u>
		56 dias	<u>0,000</u>
	28 dias	7 dias	<u>0,000</u>
		56 dias	0,179
	56 dias	7 dias	<u>0,000</u>
		28 dias	0,179

(Continuação)

Comparações múltiplas (LSD)			
Variável resposta	Idade	p-value	
LOG10_D	7 dias	28 dias	0,345
		56 dias	<u>0,002</u>
	28 dias	7 dias	0,345
		56 dias	<u>0,025</u>
	56 dias	7 dias	<u>0,002</u>
		28 dias	<u>0,025</u>

Fonte: autor (2019).

Tabela C.13 – Comparações múltiplas em relação ao teor de fibras.

Comparações múltiplas (LSD)				
Variável resposta	Fibras	p-value		
LOG10_R	1%	<u>0,000</u>		
	0%	3%	<u>0,000</u>	
		5%	<u>0,000</u>	
		0%	<u>0,000</u>	
	1%	3%	<u>0,000</u>	
		5%	<u>0,000</u>	
		0%	<u>0,000</u>	
	3%	1%	<u>0,000</u>	
		5%	<u>0,000</u>	
		0%	<u>0,000</u>	
	5%	1%	<u>0,000</u>	
		3%	<u>0,000</u>	
		1%	<u>0,000</u>	
	LOG10_T	0%	3%	<u>0,000</u>
			5%	<u>0,000</u>
			0%	<u>0,000</u>
1%		3%	<u>0,000</u>	
		5%	<u>0,000</u>	
		0%	<u>0,000</u>	
3%		1%	<u>0,000</u>	
		5%	<u>0,013</u>	
		0%	<u>0,000</u>	
5%		1%	<u>0,000</u>	
		3%	<u>0,013</u>	
		1%	<u>0,000</u>	
LOG10_D	0%	3%	<u>0,000</u>	
		5%	<u>0,000</u>	
		0%	<u>0,000</u>	
	1%	3%	<u>0,000</u>	
		5%	<u>0,000</u>	
		0%	<u>0,000</u>	
	3%	1%	<u>0,000</u>	
		5%	0,705	
		0%	<u>0,000</u>	
	5%	1%	<u>0,000</u>	
		3%	0,705	

Fonte: autor (2019).

Tabela C.14 – Comparações múltiplas em relação ao tratamento térmico.

Comparações múltiplas (LSD)			
Variável resposta	Tratamento térmico		<i>p-value</i>
LOG10_R	Não	Sim	<u>0,012</u>
	Sim	Não	<u>0,012</u>
LOG10_T	Não	Sim	<u>0,001</u>
	Sim	Não	<u>0,001</u>
LOG10_D	Não	Sim	<u>0,004</u>
	Sim	Não	<u>0,004</u>

Fonte: autor (2019).

Tabela C.15 – Comparações múltiplas para a interação idade – tratamento térmico.

Comparações múltiplas (LSD)				
Variável resposta	Idade	Tratamento térmico		<i>p-value</i>
LOG10_R	7 dias	Não	Sim	<u>0,000</u>
		Sim	Não	<u>0,000</u>
	28 dias	Não	Sim	0,089
		Sim	Não	0,089
	56 dias	Não	Sim	<u>0,001</u>
		Sim	Não	<u>0,001</u>
LOG10_T	7 dias	Não	Sim	<u>0,000</u>
		Sim	Não	<u>0,000</u>
	28 dias	Não	Sim	0,051
		Sim	Não	0,051
	56 dias	Não	Sim	0,383
		Sim	Não	0,383
LOG10_D	7 dias	Não	Sim	<u>0,000</u>
		Sim	Não	<u>0,000</u>
	28 dias	Não	Sim	0,384
		Sim	Não	0,384
	56 dias	Não	Sim	<u>0,977</u>
		Sim	Não	<u>0,977</u>

Fonte: autor (2019).

Tabela C.16 - Comparações múltiplas para a interação fibras – tratamento térmico.

Comparações múltiplas (LSD)				
Variável resposta	Fibras	Tratamento térmico		<i>p-value</i>
LOG10_res	0%	Não	Sim	<u>0,037</u>
	1%	Não	Sim	<u>0,018</u>
	3%	Não	Sim	0,727
	5%	Não	Sim	<u>0,000</u>
LOG10_Ten	0%	Não	Sim	0,614
	1%	Não	Sim	<u>0,007</u>
	3%	Não	Sim	0,343
	5%	Não	Sim	<u>0,001</u>
LOG10_Def	0%	Não	Sim	0,892
	1%	Não	Sim	<u>0,009</u>
	3%	Não	Sim	0,192
	5%	Não	Sim	0,080

Fonte: autor (2019).