



Roberta Rodrigues Mendes

Estudo experimental de corpos de prova de concreto com fibras de aço sujeitos à tração por compressão diametral e à tração direta

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Orientadora: Prof^a. Deane de Mesquita Roehl
Co-orientador: Prof. Emil de Souza Sánchez Filho

Rio de Janeiro
Abril de 2016



Roberta Rodrigues Mendes

Estudo experimental de corpos de prova de concreto com fibras de aço sujeitos à tração por compressão diametral e à tração direta

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof^a. Deane de Mesquita Roehl

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Emil de Souza Sánchez Filho

Co-orientador

Universidade Federal Fluminense

Prof. Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof^a. Cláudia Valéria Gávio Coura

Instituto Federal de Educação Ciência e tecnologia do Sudeste/MG

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 29 de Abril de 2016

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Roberta Rodrigues Mendes

Graduou-se em Engenharia Civil na PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2013. Em 2010 trabalhou na empresa SOTER. Em 2012 estagiou na CSP Projetos e Consultoria, desenvolvendo consultoria estrutural. Ingressou no mestrado da PUC-Rio em março de 2014, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de estruturas de concreto com fibras de aço.

Ficha Catalográfica

Mendes, Roberta Rodrigues

Estudo experimental de corpos de prova de concreto com fibras de aço sujeitos à tração por compressão diametral e à tração direta / Roberta Rodrigues Mendes ; orientadora: Deane de Mesquita Roehl ; co-orientador: Emil de Souza Sánchez Filho. – 2016.

161 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2016.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Concreto. 3. Fibras de aço. 4. Tração por compressão diametral. 5. Tração direta. 6. Efeito escala I. Roehl, Deane de Mesquita. II. Sánchez Filho, Emil de Souza. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

A Deus pela força de poder concluir este trabalho.

Ao meu noivo Bruno pelo amor, compreensão e constante paciência nos momentos de ausência, quesitos indispensáveis para a execução deste trabalho.

Aos meus queridos pais Wilson e Rosali, pelo incentivo, carinho e dedicação durante toda minha vida, principalmente durante minha formação. Por todos esses anos acreditando e me apoiando sempre nas minhas decisões.

À minha irmã Erica, pelo carinho e amizade.

Aos meus afilhados Rafael, Julia e João e ao meu sobrinho Marcelo, pelos sorrisos e abraços de crianças que sempre me divertiam.

Aos meus familiares e amigos que, indiretamente ajudaram na conclusão deste trabalho.

À professora Deane, orientadora deste trabalho, pelo apoio durante toda minha formação e pelos ensinamentos prestados.

Ao professor Emil, co-orientador dessa pesquisa, pela paciência e dedicação, pelos sinceros conselhos e ensinamentos essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os amigos conquistados durante este tempo na PUC, em especial a Helena, pela amizade, auxílio e inesquecíveis risadas.

Aos funcionários da PUC-Rio: Euclides, José Nilson, Rogério, Rita, Rafael, Lenilson, dentre outros, por me ajudarem na execução do meu trabalho experimental.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

Mendes, Roberta Rodrigues; Mesquita Roehl, Deane; Sánchez Filho, Emil de Souza. **Estudo experimental de corpos de prova de concreto com fibras de aço sujeitos à tração por compressão diametral e à tração direta.** Rio de Janeiro, 2016. 161 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta pesquisa apresenta um estudo experimental do comportamento de corpos de prova de concreto armado com fibras metálicas comprimidos diametralmente e os submetidos à tração direta. Foram analisados 72 corpos de prova no LEM-DEC da PUC-Rio, sendo 54 cilíndricos variando-se o diâmetro e o consumo de fibras para o ensaio de compressão diametral e 18 variando-se o consumo de fibras para o ensaio de tração direta. Os 54 corpos de prova foram divididos em três grupos de acordo com a resistência à compressão (20, 30 e 50 MPa), cada grupo com 18 corpos de prova com consumo de fibras (20 kg/m³, 40 kg/m³ e 60 kg/m³) e diâmetros distintos (5 cm, 10 cm e 15 cm). Foram avaliados a resistência de tração, energia de deformação e efeito escala. Os resultados obtidos permitem analisar a influência do consumo de fibras e do diâmetro do corpo de prova. A resistência à tração varia linearmente com o consumo e o diâmetro do corpo de prova, verificando-se que a resistência do corpo de prova com diâmetro de 15 cm é 42 % menor que o de 5 cm. A energia de deformação não apresentou acréscimo significativo com o aumento do consumo de fibras de 40 kg/m³ para 60 kg/m³. A análise do efeito escala mostra um decréscimo da resistência à tração com incremento da dimensão do corpo de prova, e os resultados se assemelham aos estudos realizados por Carpinteri (1995), mesmo com consumos de fibras distintos. Os 18 corpos de prova submetidos à tração direta têm a mesma dimensão, diferindo em resistência (20, 30 e 50 MPa) e consumo (20 kg/m³, 40 kg/m³ e 60 kg/m³). Nesses foi avaliada a energia de deformação plástica e elástica. A região plástica não fica delineada para o consumo de 20 kg/m³ apresentando um comportamento similar ao concreto convencional.

Palavras-chave

Concreto; Fibras de Aço; Tração por compressão diametral; Tração direta; Efeito escala.

Abstract

Mendes, Roberta Rodrigues; Mesquita Roehl, Deane (Advisor); Sánchez Filho, Emil de Souza (Co-Advisor). **Experimental Study of Concrete Specimens reinforced with Steel Fibers Subject to tension under Diametral Compression and Direct Tension**. Rio de Janeiro, 2016. 161 p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This research presents an experimental study on the behavior of reinforced concrete specimens with steel fibers submitted to the splitting test and to direct tension. A total of 72 specimens were tested in the LEM-DEC PUC-Rio; 54 specimens with three different diameters and fiber consume for the diametral compression test and 18 with variations of fiber volume fraction for the direct tension test. The 54 specimens were divided into three groups according to their compressive strength (20, 30 and 50 MPa), each group having 18 specimens with variations of fiber volume fraction (20 kg / m³, 40 kg / m³ and 60 kg / m³) and diameter (5 cm, 10 cm and 15 cm). The purpose was to investigate the tensile stress, the fracture energy and the size effect. The results allowed the analysis of the influence of the fibers and specimen diameter on each variable before mentioned. The tensile stress varies linearly with fiber volume fraction and diameter, and the resistance of the specimens with 15 cm in diameter is 42% less than the resistance of the 5 cm specimen. The fracture energy was not increased significantly with the increase of fiber content from 40 kg fibers / m³ to 60 kg / m³. The size effect analysis shows that tensile strength decreases as the diameter increases. These results are similar to those of studies conducted by Carpinteri (1995), even with different values of fiber consume. The 18 specimens submitted to direct tension had the same diameter, varying in resistance (20, 30 and 50 MPa) and fiber volume fraction (20 kg / m³, 40 kg / m³ and 60 kg / m³). Here the plastic and elastic deformations were evaluated. The plastic region is not clearly defined for the fiber fraction of 20 kg / m³ presenting a behavior similar to the conventional concrete.

Keywords

Concrete; Steel fibers; Tension by Diametral compression; Direct tension; Size effect.

Sumário

1	Introdução	22
1.1	Relevância e justificativa da pesquisa	22
1.2	Objetivos	23
1.3	Metodologia	23
1.4	Estrutura do trabalho	24
2	Comportamento mecânico do concreto com fibras	25
2.1	Concreto armado com fibras	25
2.2	As fibras de aço	26
2.2.1	Mecanismo de atuação das fibras	29
2.2.2	A Interação fibra-matriz.....	29
2.2.3	Teor de fibras.....	30
2.2.4	Volume crítico	31
2.2.5	Índice de esbeltez	32
2.2.6	Comprimento crítico.....	33
2.2.7	Distribuição das fibras.....	34
2.3	Propriedades do concreto armado com fibras de aço	36
2.3.1	Resistência à compressão	36
2.3.2	Ductilidade	37
2.3.3	Resistência à tração	38
2.3.4	Trabalhabilidade	40
2.3.5	Durabilidade.....	41
3	Efeito escala.....	42
3.1	Introdução	42

3.2	Lei de Bazant	42
3.3	Multifractal Scaling Law – MFSL (CARPINTERI-1992)	44
3.4	Outras pesquisas	45
4	Programa experimental	46
4.1	Considerações iniciais	46
4.2	Materiais	47
4.2.1	As fibras de aço	47
4.2.2	Concreto	48
4.2.2.1	Resistência à tração direta	53
4.2.2.2	Resistência à compressão	54
4.2.2.3	Resistência à tração por compressão diametral.....	56
4.2.2.4	Módulo de elasticidade.....	59
4.3	Confecção dos corpos de prova	62
4.3.1	Formas.....	62
4.3.2	Corpos de prova de concreto.....	63
4.3.3	Concretagem	64
4.4	Esquema dos ensaios	65
5	Apresentação e análise dos resultados.....	67
5.1	Introdução	67
5.2	Apresentação dos grupos	67
5.2.1	Grupo I.....	67
5.2.2	Grupo II.....	68
5.2.3	Grupo III.....	68
5.3	Apresentação dos resultados	69
5.3.1	Compressão.....	69
5.3.2	Tensão de tração por compressão diametral.....	69
5.3.3	Gráficos f_t x consumo de fibras	71
5.3.4	Gráficos f_t x grupos.....	79
5.3.5	Gráficos f_t x diâmetro.....	86
5.3.6	Gráficos Ψ x consumo	92
5.3.7	Gráficos Ψ x diâmetro	97

5.3.8	Força de tração direta x deslocamento	103
5.3.8.1	Grupos.....	103
5.3.8.2	Consumo de fibras	105
5.3.9	Energia dissipada	108
5.3.9.1	Tração direta	108
5.3.9.2	Compressão diametral	111
5.3.10	Curva tensão vs. deformação específica	113
5.3.11	Relação da força de tração nos corpos de prova.....	115
5.3.12	Ruptura	116
5.3.13	Ângulo interno.....	118
5.3.14	Métodos comparativos	119
5.3.15	Efeito escala	120
6	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	123
6.1	Conclusões	123
6.1.1	Ensaio de tração por compressão diametral.....	123
6.1.2	Razão Ψ	124
6.1.3	Ensaio de tração direta	125
6.1.4	Efeito escala	125
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	126
7	Referências bibliográficas	127
A.	Anexo A – Ensaio de compressão diametral.....	132
B.	Anexo B – Ensaio de compressão simples	137
C.	Anexo C – Ensaio de tração direta	146
D.	Anexo D – Tensão x deformação específica.....	154

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Esquema de concentração de tensões (FIGUEIREDO, 2005).	25
Figura 2.2 – Exemplos de diferentes formas de fibras metálicas (SARZALEJO, 2009).	27
Figura 2.3 – Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto (FIGUEIREDO, 2008).	28
Figura 2.4 – Curvas médias de carga por deslocamento com diferentes consumos de fibra de aço (FIGUEIREDO, 2000).	30
Figura 2.5 – Diagramas carga x deslocamento de concreto com fibras em teor inferior (A), superior (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras (FIGUEIREDO, 2000).	31
Figura 2.6 – Concreto armado com fibras onde há compatibilidade dimensional entre as fibras e o agregado graúdo (FIGUEIREDO, 2000).	33
Figura 2.7 – Concreto armado com fibras onde não há compatibilidade dimensional entre as fibras e o agregado graúdo (FIGUEIREDO, 2000).	34
Figura 2.8 – Orientação das fibras (BENTUR e MINDESS, 1990).	35
Figura 2.9 – Tensão de compressão x deformação específica de concretos sem e com fibras de aço.	37
Figura 2.10 – Curvas carga x flecha para concretos com diferentes volumes de fibras.	38
Figura 2.11 – Curvas tensão x deformação específica de argamassas com fibras (ACI 544.4R88).	39
Figura 2.12 – Esquema de corpo de prova para ensaio de tração por compressão diametral.	40
Figura 2.13 – Resultados de ensaio de compressão diametral para concreto com e sem adição de fibras (CUCHIARA, 2004).	40
Figura 3.1 – Lei de Bazant; adaptado de BAZANT (1984).	43
Figura 3.2 – Multifractal Scaling Law; adaptado de CARPINTERI (1995).	44
Figura 4.1 – Fibras RL 45/30 BN.	47
Figura 4.2 – Abatimento do tronco de cone para série 5.	50
Figura 4.3 – Abatimento de tronco de cone para série 8.	50
Figura 4.4 – Abatimento de tronco de cone para série 9.	51
Figura 4.5 – Ensaio de tração direta.	53

Figura 4.6 – Corpo de prova de tração direta	53
Figura 4.7 – Ensaio de compressão simples.	56
Figura 4.8 – Vista frontal do ensaio de compressão diametral.	57
Figura 4.9 – Vista lateral do ensaio de compressão diametral.	57
Figura 4.10 – Extensômetro.	61
Figura 4.11 – Ensaio de módulo de elasticidade.	62
Figura 4.12 – Formas metálicas.	63
Figura 4.13 – Forma de silicone.	63
Figura 4.14 – Corpos de prova: a) CP 5 cm x 10 cm; b) CP 10 cm x 20 cm; c) CP 15 cm x 30 cm.	64
Figura 4.15 – Corpo de prova para o ensaio de tração direta.	64
Figura 4.16 – Máquina da MTS com capacidade máxima de 1000 kN.	65
Figura 4.17 – Máquina da MTS com capacidade máxima de 500 kN.	66
Figura 5.1 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, D5-I.	72
Figura 5.2 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, D5-II.	72
Figura 5.3 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, D5-III.	73
Figura 5.4 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, D5-II – sem média.	73
Figura 5.5 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, comparativo D5 grupos I e III.	74
Figura 5.6 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, D10-I.	74
Figura 5.7 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, D10-II.	75
Figura 5.8 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, D10-III.	75
Figura 5.9 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, comparativo D10 grupos I, II e III.	76
Figura 5.10 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, D15-I.	76
Figura 5.11 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, D15-II.	77
Figura 5.12 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, D15-II – sem média.	77
Figura 5.13 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, D15-III.	78

Figura 5.14 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, comparativo D15 grupos I e III.	78
Figura 5.15 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, D5-F20.	79
Figura 5.16 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, D5-F40.	80
Figura 5.17 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, D5-F60.	80
Figura 5.18 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, comparativo D5 consumo F20, 40 e 60.	81
Figura 5.19 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, D10-F20.	82
Figura 5.20 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, D10-F40.	82
Figura 5.21 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, D10-F60.	83
Figura 5.22 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, comparativo D10 consumo 20, 40 e 60.	83
Figura 5.23 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, D15-F20.	84
Figura 5.24 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, D15-F40.	84
Figura 5.25 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, D15-F60.	85
Figura 5.26 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, comparativo D15 consumo F20, 40 e 60.	85
Figura 5.27 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, F20-I.	86
Figura 5.28 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, F20-II.	87
Figura 5.29 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, F20-III.	87
Figura 5.30 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, comparação F20 com os grupos I, II, III.	87
Figura 5.31 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, F40-I.	88
Figura 5.32 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, F40-II.	88
Figura 5.33 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, F40-III.	89
Figura 5.34 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, comparação F40 com os grupos I, II e III.	89

Figura 5.35 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, F60-I.	90
Figura 5.36 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, F60-II.	90
Figura 5.37 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, F60-III.	91
Figura 5.38 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, comparação F40 com os grupos I, II e III.	91
Figura 5.39 – Ψ x consumo, I-D5.	92
Figura 5.40 – Ψ x consumo, I-D10.	93
Figura 5.41 – Ψ x consumo, I-D15.	93
Figura 5.42 – Gráficos comparativos de Ψ x consumo, grupo I.	93
Figura 5.43 – Ψ x consumo, II-D5.	94
Figura 5.44 – Ψ x consumo, II-D10.	95
Figura 5.45 – Ψ x consumo, II-D15.	95
Figura 5.46 – Gráficos comparativos de Ψ x consumo, grupo II.	95
Figura 5.47 – Ψ x consumo, III-D5.	96
Figura 5.48 – Ψ x consumo, III-D10.	96
Figura 5.49 – Ψ x consumo, III-D15.	97
Figura 5.50 – Gráficos comparativos de Ψ x consumo, grupo III.	97
Figura 5.51 – Ψ x diâmetro, I-F20.	98
Figura 5.52 – Ψ x diâmetro, I-F40.	98
Figura 5.53 – Ψ x diâmetro, I-F60.	98
Figura 5.54 – Gráficos comparativos de Ψ x diâmetro, grupo I.	99
Figura 5.55 – Ψ x diâmetro, II-F20.	99
Figura 5.56 – Ψ x diâmetro, II-F40.	100
Figura 5.57 – Ψ x diâmetro, II-F60.	100
Figura 5.58 – Gráficos comparativos de Ψ x diâmetro, grupo II.	100
Figura 5.59 – Ψ x diâmetro, III-F20.	101
Figura 5.60 – Ψ x diâmetro, III-F40.	101
Figura 5.61 – Ψ x diâmetro, III-F60.	102
Figura 5.62 – Gráficos comparativos de Ψ x diâmetro, grupo III.	102
Figura 5.63 – Força x deslocamento, Grupo I.	103
Figura 5.64 – Força x deslocamento, Grupo II.	104
Figura 5.65 – Força x deslocamento, Grupo III.	104
Figura 5.66 – Força x deslocamento, TD-F20.	106

Figura 5.67 – Força x deslocamento, TD-F40.	106
Figura 5.68 – Força x deslocamento, TD-F60.	107
Figura 5.69 – Energia elástica x consumo de fibras.	109
Figura 5.70 – Energia plástica x consumo de fibras.	109
Figura 5.71 – Energia elástica x grupos.	110
Figura 5.72 – Energia plástica x grupos.	111
Figura 5.73 – Curva tensão-deformação específica, I-TD-F20-2.	114
Figura 5.74 – Curva tensão-deformação específica, I-TD-F40-1.	114
Figura 5.75 – Curva tensão-deformação específica, I-TD-F60-2.	114
Figura 5.76 – Corpos de prova com consumo de fibra de 20 kg/m ³ .	116
Figura 5.77 – Corpos de prova com consumo de fibra de 60 kg/m ³ .	117
Figura 5.78 – Corpos de prova D10 com consumo de fibra de 20 kg/m ³ e 60 kg/m ³ .	117
Figura 5.79 – Corpos de prova D5 com consumo de fibra de 20 kg/m ³ e 60 kg/m ³ .	117
Figura 5.80 – Variação do ângulo de atrito interno em função de f_{cft} .	118
Figura 5.81 – Razão da força de tração pela fórmula proposta por HILSDORF pela obtida experimentalmente.	120
Figura 5.82 – Lei de Carpinteri x valores experimentais, Séries 1, 2 e 3.	121
Figura 5.83 – Lei de Carpinteri x valores experimentais, Séries 4, 5 e 6.	121
Figura 5.84 – Lei de Carpinteri x valores experimentais, Séries 7, 8 e 9.	122
Figura A.1 – Força x deslocamento, Série 1.	132
Figura A.2 – Força x deslocamento, Série 2.	133
Figura A.3 – Força x deslocamento, Série 3.	133
Figura A.4 – Força x deslocamento, Série 4.	134
Figura A.5 – Força x deslocamento, Série 5.	134
Figura A.6 – Força x deslocamento, Série 6.	135
Figura A.7 – Força x deslocamento, Série 7.	135
Figura A.8 – Força x deslocamento, Série 8.	136
Figura A.9 – Força x deslocamento, Série 9	136
Figura B.1 – Força x deslocamento, CON-1-1.	137
Figura B.2 – Força x deslocamento, CON-1-2.	137
Figura B.3 – Força x deslocamento, CON-2-1.	138
Figura B.4 – Força x deslocamento, CON-2-2.	138

Figura B.5 – Força x deslocamento, CON-3-1.	139
Figura B.6 – Força x deslocamento, CON-3-2.	139
Figura B.7 – Força x deslocamento, CON-4-1.	140
Figura B.8 – Força x deslocamento, CON-4-2.	140
Figura B.9 – Força x deslocamento, CON-5-1.	141
Figura B.10 – Força x deslocamento, CON-5-2.	141
Figura B.11 – Força x deslocamento, CON-6-1.	142
Figura B.12 – Força x deslocamento, CON-6-2.	142
Figura B.13 – Força x deslocamento, CON-7-1.	143
Figura B.14 – Força x deslocamento, CON-7-2.	143
Figura B.15 – Força x deslocamento, CON-8-1.	144
Figura B.16 – Força x deslocamento, CON-8-2.	144
Figura B.17 – Força x deslocamento, CON-9-1.	145
Figura B.18– Força x deslocamento, CON-9-2	145
Figura.C.1 – Força x deslocamento, I-TD-F20-2.	146
Figura C.2 – Força x deslocamento, I-TD-F40-2.	146
Figura C.3 – Força x deslocamento, I-TD-F40-1.	147
Figura C.4 – Força x deslocamento, I-TD-F60-2.	147
Figura C.5 – Força x deslocamento, II-TD-F20-1.	148
Figura C.6 – Força x deslocamento, II-TD-F20-2.	148
Figura C.7 – Força x deslocamento, II-TD-F40-2.	149
Figura C.8 – Força x deslocamento, II-TD-F40-1.	149
Figura C.9 – Força x deslocamento, II-TD-F60-1.	150
Figura C.10 – Força x deslocamento, II-TD-F60-2.	150
Figura C.11 – Força x deslocamento, III-TD-F20-1.	151
Figura C.12 – Força x deslocamento, III-TD-F40-1.	151
Figura C.13 – Força x deslocamento, III-TD-F40-2.	152
Figura C.14– Força x deslocamento, III-TD-F60-1.	152
Figura C.15 – Força x deslocamento, III-TD-F60-2	153
Figura D.1 – Tensão x deformação específica, I-TD-F20-2.	154
Figura D.2 – Tensão x deformação específica, I-TD-F40-1.	154
Figura D.3 – Tensão x deformação específica, I-TD-F40-2.	155
Figura D.4 – Tensão x deformação específica, I-TD-F60-2.	155
Figura D.5 – Tensão x deformação específica, II-TD-F20-1.	156
Figura D.6 – Tensão x deformação específica, II-TD-F20-2.	156

Figura D.7 – Tensão x deformação específica, II-TD-F40-1.	157
Figura D.8 – Tensão x deformação específica, II-TD-F40-2.	157
Figura D.9 – Tensão x deformação específica, II-TD-F60-1.	158
Figura D.10 – Tensão x deformação específica, II-TD-F60-2.	158
Figura D.11 – Tensão x deformação específica, III-TD-F20-1.	159
Figura D.12 – Tensão x deformação específica, III-TD-F40-1.	159
Figura D.13 – Tensão x deformação específica, III-TD-F40-2.	160
Figura D.14 – Tensão x deformação específica, III-TD-F60-1.	160
Figura D.15 – Tensão x deformação específica, III-TD-F60-2.	161

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Consumo de material por m ³ de concreto.	49
Tabela 4.2 – Valores do abatimento do tronco de cone.	49
Tabela 4.3 – Programa de concretagem.	52
Tabela 4.4 – Valores da resistência à tração direta do concreto	54
Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto.	55
Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de resistência a compressão.	55
Tabela 4.7– Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.	58
Tabela 4.8 – Resistência à tração média.	59
Tabela 4.9 – Valores de resistência à compressão obtidos nos ensaios para obtenção do módulo de elasticidade.	61
Tabela 4.10 – Módulo de elasticidade.	61
Tabela 5.1 – Data dos ensaios séries 1, 2 e 3.	67
Tabela 5.2 – Data dos ensaios séries 4, 5 e 6.	68
Tabela 5.3 – Data dos ensaios séries 7, 8 e 9.	68
Tabela 5.4 – Razão da tensão de tração por compressão diametral.	69
Tabela 5.5 – Razão entre as tensões de compressão diametral e axial.	71
Tabela 5.6 – Decréscimo da resistência a tração por compressão diametral.	92
Tabela 5.7 – Energias plásticas e elásticas de deformação.	105
Tabela 5.8 – Energia total dissipada.	112
Tabela 5.9 – Razões entre as energias dissipadas.	112
Tabela 5.10 – Percentual de deformação específica.	115
Tabela 5.11 – Razão da força de tração.	116
Tabela 5.12 – Ângulo de atrito interno.	118
Tabela 5.13 – Razão entre valores teóricos e experimentais.	119
Tabela 5.14 – Resultados da expressão 3.5 e dados experimentais.	120

Lista de Abreviaturas

ACI	American Concrete Institute
CAF	Concreto armado com fibras
CAFA	Concreto armado com fibras de aço
CP	Corpo de prova
EER	Extensômetro Elétrico de Resistência
LEM	Laboratório de Estruturas e Materiais do Departamento de Engenharia Civil
MFSL	Multifractal Scaling Law
MFL	Mecânica da Fratura Linear
NBR	Norma Brasileira
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
SEL	Size Effect Law

Lista de Símbolos

α_0	Valor adimensional
A	Constante física
A, B	Constantes físicas
d	Diâmetro do corpo de prova
$D_{máx}$	Diâmetro máximo do agregado
E_{ci}	Módulo de deformação (GPa)
ε	Deformação específica
ε_b	Deformação específica média dos corpos de prova sob tensão maior (m/m)
$\varepsilon_{0,5}$	Deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão básica de 0,5 MPa (m/m).
F	Força máxima aplicada, equivalente à carga de ruptura
$f_{c,28}$	Resistência à compressão axial aos 28 dias de idade
$f_{tD,i}$	Resistência à tração do corpo de prova de concreto quando comprimido diametralmente
f_t	Resistência à tração do concreto
$f_{t,5}$	Força de tração do corpo de prova de 5 cm de diâmetro
$f_{t,10}$	Força de tração do corpo de prova de 10 cm de diâmetro
$f_{t,15}$	Força de tração do corpo de prova de 15 cm de diâmetro
f_{dir}	Tensão de tração direta
$f_{dir,médio}$	Tensão média de tração direta
f_c	Resistência à compressão do concreto
$f_{c,ef}$	Resistência efetiva
f_{ctm}	Resistência média à tração axial (MPa)
f_{cm}	Resistência média à compressão (MPa)
L	Altura do corpo de prova
σ	Tensão normal

σ_b	Tensão correspondente à 30% da força de ruptura
$\sigma_{0,5}$	Tensão mais próxima de 0,5 MPa no corpo de prova de concreto
σ_{rup}	Tensão de ruptura do corpo de prova de concreto
σ_n	Resistência nominal
σ_{inf}	Tensão mais próxima de 0,5 MPa aplicada ao corpo de prova
Ψ	Razão entre a resistência à tração por compressão diametral pela tração direta

“Que a arte me aponte uma resposta
Mesmo que ela mesma não saiba
E que ninguém a tente complicar
Pois é preciso simplicidade para fazê-la florescer
Pois metade de mim é plateia
A outra metade é canção
Que a minha loucura seja perdoada
Pois metade de mim é amor
E a outra metade também”

Oswaldo Montenegro.

1 Introdução

1.1 Relevância e justificativa da pesquisa

O concreto de cimento Portland é o material mais utilizado em construções, e isso decorre de suas inúmeras vantagens, como sua aplicação em estruturas com infinitas variações de forma. É capaz de apresentar grande variação de suas propriedades em função do tipo e das proporções de seus componentes. No entanto as estruturas de concreto armado têm apresentado patologias diversas ao longo do tempo, não só devido às falhas humanas cometidas durante o ciclo de vida da estrutura (etapas de concepção e elaboração do projeto, execução, uso e manutenção), mas também devido a outros fatores muitas vezes não levados em consideração pelos projetistas e construtores, tais como a agressividade do ambiente no qual a estrutura será executada. Além dessas patologias o que vem preocupando é a rápida deterioração do concreto, que está associada com a sua baixa ductilidade.

No mercado brasileiro vêm surgindo diversos materiais que visam suprir ou melhorar o desempenho das práticas construtivas existentes. Os novos produtos originários de pesquisas vêm substituindo ou adicionando novos materiais para aplicação em construções, porém, esse uso exige a compreensão e o estudo do comportamento desses materiais.

Mesmo tendo um bom comportamento quando submetido a compressão, segundo METHA e MONTEIRO (1994) o concreto apresenta limitações. Sua capacidade de deformação é bem inferior quando comparada com a de outros materiais. Além disso, sua resistência à tração é cerca de 7% a 10% da de compressão. A ruptura na compressão se dá pela união de numerosas fissuras e não somente por algumas como no caso do concreto tracionado.

Buscando-se uma melhoria de suas características tem-se os concretos de alta resistência, de alto desempenho e o concreto com adição de fibras.

Dentre os diversos tipos de fibras incluem-se as fibras de aço, náilon, vidro, de carbono, fibras de polipropileno, as fibras vegetais (sisal, juta, celulose) e as

minerais (volastonita e mica). Essas fibras variam em propriedades, eficiência e custo. CALLISTER (2012) afirma que dentro das diversas fibras disponíveis as mais usadas são as de vidro, as sintéticas, as naturais e as metálicas.

O concreto armado com fibras de aço (CAFA) tem a finalidade de aumentar a vida útil do concreto conferindo-lhe uma maior resistência à tração, diminuindo a abertura de fissuras e reduzindo as diversas patologias encontradas nas estruturas de concreto.

A fissuração no concreto sem fibras representa uma barreira à propagação de tensões, representada pelas linhas de tensão. Essa barreira implica na concentração de tensões na extremidade da fissura e, no caso dessa tensão superar a resistência da matriz, tem-se a ruptura abrupta do material. A adição das fibras de aço ao concreto inibe a ampliação das fissuras devido à função das fibras de atuar como ponte de transferência de tensões em suas extremidades.

O CAFA vem sendo cada vez mais utilizado, pois além de ser um produto de baixo custo, as fibras pouco interferem na consistência do concreto desde que utilizadas em dosagens corretas.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste estudo experimental realizado no Laboratório de Estruturas e Materiais do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, é analisar a influência da adição das fibras de aço ao concreto no comportamento de corpos de prova submetidos aos ensaios de compressão diametral e tração direta. O efeito escala será analisado a partir das diferentes dimensões dos corpos de prova nos ensaios de tração por compressão diametral.

1.3 Metodologia

Foram ensaiados 72 corpos de prova divididos em três grupos em função de suas resistências. Em cada grupo os corpos de prova tinham características distintas, como as suas dimensões e consumo de fibras.

A partir da análise dos resultados obtidos neste programa experimental pretendeu-se por meio do ensaio de compressão diametral avaliar:

- a força de tração *versus* a resistência do concreto;
- a força de tração *versus* as dimensões de cada corpo de prova estudando-se o efeito escala, por meio da análise do comportamento de corpos de prova de diferentes tamanhos;
- a força de tração *versus* volume de fibras presentes no concreto, para se verificar sua influência no concreto;
- o efeito escala em corpos de prova armado com fibras de aço submetidos à tração por compressão diametral e a lei existente de Carpinteri (1995);
- a razão da força de tração obtida no ensaio de compressão diametral pela obtida no ensaio de tração direta;
- o ângulo de atrito interno do CAFA;
- as curvas de tensão x deformação específica dos ensaios.

1.4

Estrutura do trabalho

Este estudo está dividido em seis capítulos, referências bibliográficas e anexos.

O primeiro capítulo apresenta a motivação e os objetivos do trabalho.

No segundo capítulo são relatados o comportamento mecânico do CAFA e as principais características desse tipo de fibra.

O terceiro capítulo relata as teorias do efeito escala.

No capítulo quatro é mostrada a metodologia dos ensaios, os materiais utilizados, bem como a caracterização das propriedades mecânicas desses materiais. É estabelecida a nomenclatura de identificação dos corpos de prova e finalmente a instrumentação que foi utilizada no ensaio.

O quinto capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos nos ensaios dos corpos de prova.

As conclusões do trabalho juntamente com as sugestões de trabalhos futuros estão no capítulo seis.

Os dados obtidos nos ensaios se encontram nos anexos de A a D.

2

Comportamento mecânico do concreto com fibras

2.1

Concreto armado com fibras

Desde a antiguidade, as fibras vêm sendo utilizadas em materiais frágeis. Segundo relatos, palhas e pelos de cavalos foram utilizados para reforçar tijolos de adobe e alvenarias de argamassa e gesso.

Os primeiros estudos de concretos armados com fibras (CAF) se deu nos anos 1950 e 1960. Desde então o mercado oferece uma grande variedade de fibras com diferentes propriedades mecânicas, físicas e químicas. A sua escolha depende das características que se deseja fornecer ao compósito (FIGUEIREDO, 2000).

A adição das fibras no concreto controla a propagação de fissuras (MAIDL,1995). Isso ocorre, pois, as fibras servem como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, minimizando a concentração de tensões em suas extremidades (Figura 2.1). Com isto tem-se uma redução da velocidade de propagação das fissuras no concreto e o material passa a ter um comportamento pseudoductil, ou seja, continua apresentando uma resistência residual às solicitações atuantes após sua fissuração (FIGUEIREDO, 2000). Uma menor fissuração do concreto será proporcionada com a presença das fibras.

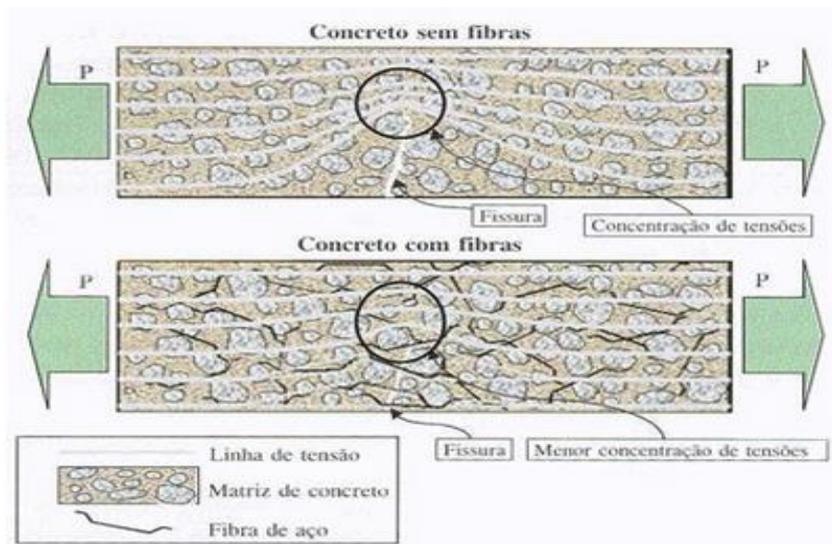


Figura 2.1 – Esquema de concentração de tensões (FIGUEIREDO, 2005).

Ensaio realizados por MARANGON (2011) mostram que as substituições parciais em 37% da taxa de armadura por fibras acarretam um aumento de 40% na carga de serviço e reduzem em 34% a abertura de fissuras.

As melhorias no comportamento do CAF são funções das propriedades dos elementos constituintes da matriz, das propriedades mecânicas e características geométricas das fibras, da composição e processo de fabricação do material compósito, bem como a interação entre as fibras e a matriz (BARROS, 1996). Dessa forma a dosagem da fibra deve atender aos requisitos de projeto, tanto específicos como gerais, e o material compósito passa a ter exigências específicas, tanto para o seu controle de qualidade quanto para sua aplicação.

Segundo FIGUEIREDO (2000), o CAF apresenta vantagens tecnológicas e econômicas em relação ao convencional em diversas aplicações, como é o caso do concreto projetado, dos pré-moldados, estruturas para túneis entre outros.

2.2

As fibras de aço

As fibras metálicas são as mais utilizadas no CAF, principalmente as de aço. O intuito da utilização deste tipo de fibra é aumentar a tenacidade, resistência à flexão, resistência ao impacto, resistência à fadiga e o controle da fissuração do concreto.

As fibras de aço podem ser classificadas como fibras de alto módulo, ou seja, possuem módulo de elasticidade superior ao do concreto convencional (FIGUEIREDO, 2000). Portanto elas podem ser usadas não somente como controle de fissuração, mas também como reforço primário do concreto. As fibras permitem também uma redistribuição de esforços no material mesmo utilizadas em quantidades reduzidas.

Segundo MAIDL (1995), mesmo com alto módulo de elasticidade as fibras têm como objetivo somente controlar as fissuras que são naturalmente formadas e não prevenir que elas se formem.

As vantagens do uso do CAF são bem conhecidas. MINDESS (1995) aponta que sua utilização, mesmo em estruturas de concreto armado convencional aumenta a competitividade do material, quando comparado com outros materiais, como as estruturas de aço por exemplo.

As fibras de aço são produzidas a partir de fios de aço trefilados ou laminados (formados por multifilamentos de aço, compostos de segmentos pequenos) com comprimentos e diâmetros variados. Elas podem ser fabricadas com extremidades dobradas ou alargadas aumentando sua aderência à matriz. As fibras são geralmente frisadas ou deformadas com um gancho em cada ponta ou com uma cabeça pequena, a fim de melhorar a ligação entre fibra e matriz de concreto (MAIDL, 1995). Axialmente, a forma pode ser retilínea ou corrugada e, transversalmente, a fibra pode apresentar seção circular, retangular ou variada. Na Figura 2.2 são apresentadas fibras de diferentes formas.

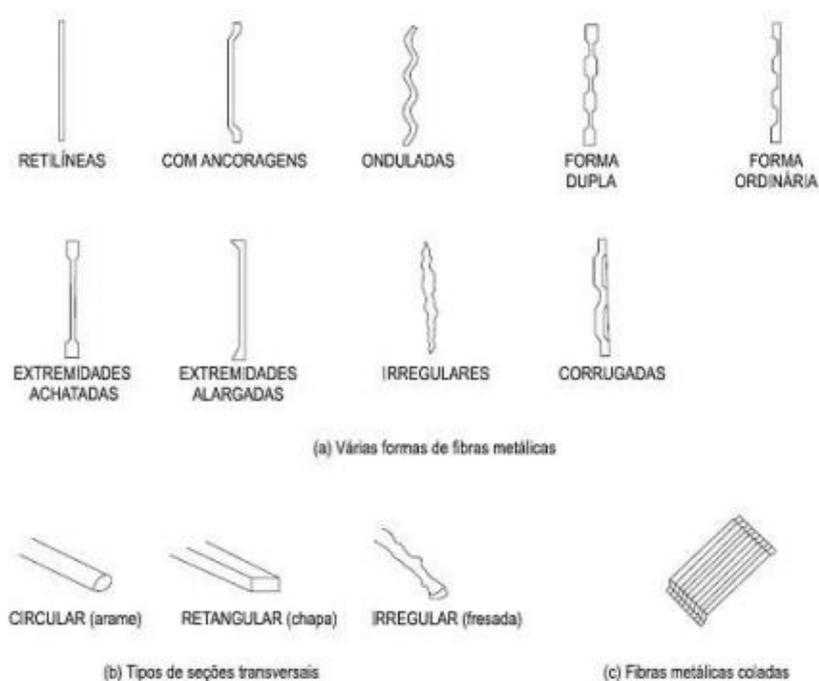


Figura 2.2 – Exemplos de diferentes formas de fibras metálicas (SARZALEJO, 2009).

A NBR 15530 (2007) – Fibras de aço para concreto – Especificação, estabelece parâmetros para a classificação das fibras, além de requisitos mínimos de geometria e tolerâncias dimensionais, defeitos de fabricação, resistência à tração e dobramento (FIGUEIREDO *et al*, 2008).

São previstos na norma três tipos básicos de fibras em função de sua geometria:

- Tipo A – fibra de aço com ancoragens nas extremidades.
- Tipo C – fibra de aço corrugada.
- Tipo R – fibra de aço reta.

Além disso, segundo a norma existem três classes previstas para as fibras definidas de acordo com o aço que as deu origem:

- Classe I – fibra de arame trefilado a frio.
- Classe II – fibra oriunda de chapa laminada cortada a frio.
- Classe III – fibra oriunda de arame trefilado e escarificado.

Na Figura 2.3 têm-se as correspondências entre as classes e as geometrias definidas em norma.

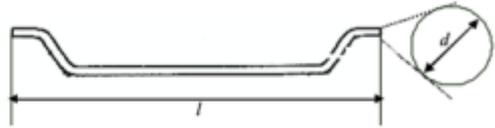
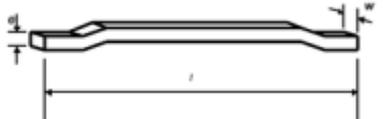
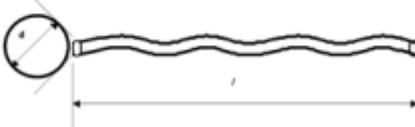
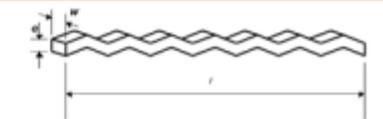
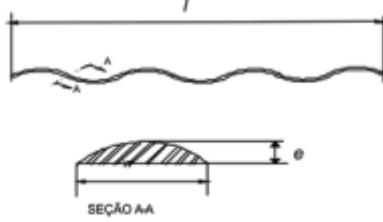
Tipo (geometria)	Classe da fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

Figura 2.3 – Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto (FIGUEIREDO, 2008).

Essa classificação possibilitou o estabelecimento de requisitos mínimos que podem ser correlacionados com o desempenho final do CAFA (FIGUEIREDO, 2008).

Diversos são os parâmetros adotados para esse controle como a dosagem, fator de forma da fibra, geometria, interação fibra matriz, fração volumétrica de fibra adicionada e pelo traço do concreto.

2.2.1 Mecanismo de atuação das fibras

As fibras agem como pontes de ligações, transferindo as solicitações de um lado para o outro da matriz e minimizando as tensões nas extremidades das fissuras, que por sua vez ficam mais finas, menos espaçadas e melhor distribuídas ao longo da estrutura (NUNES e AGOPYAN, 1998). A velocidade de propagação dessas fissuras também é reduzida, necessitando assim uma maior quantidade de energia para sua abertura e propagação. Sendo assim a ruptura do concreto se torna menos frágil, propiciando um eventual ganho de ductilidade da estrutura.

É possível ver que o comportamento do CAF tem sua importância ligada diretamente com sua capacidade de ligar as fissuras. Essa capacidade está associada pela eficiência da interação fibra-matriz que por sua vez é influenciada pela geometria e propriedades mecânicas das fibras e pela composição da matriz.

2.2.2 A Interação fibra-matriz

A aderência entre as fibras e a matriz é essencial. A interface entre os elementos apresenta influência dominante sobre as características dos materiais empregados. A principal função dessa interface é possibilitar uma adequada transferência dos esforços entre as fibras e a matriz (MAIDL, 1995).

As fibras são arrancadas em sua maioria, mostrando assim que o importante não é a resistência da fibra e sim a eficiência da aderência desta à matriz.

A aderência fibra-matriz está relacionada a diversos fatores como a ancoragem da fibra na matriz, adesão físico-química entre os materiais, o atrito fibra-matriz e a dimensão do agregado. Esses fatores são influenciados pelas características das fibras (volume, módulo de elasticidade, resistência, geometria e

orientação) e características da própria matriz (composição, resistência e propriedades físicas e mecânicas).

2.2.3 Teor de fibras

O teor de fibras presente na matriz atua diretamente na capacidade de reforço que as fibras apresentam. Quanto maior for o teor, maior a quantidade de fibras que vão atuar como ponte de transferência de tensões ao longo da fissura, aumentando assim o reforço pós-fissuração do concreto.

Um exemplo da influência do teor de fibras no concreto pode ser visto na Figura 2.4. Nela podem ser vistas as curvas médias de carga por deslocamento em um ensaio de tração na flexão com deslocamento controlado. No gráfico podemos ver que o trecho elástico inicial, em que a matriz trabalha antes de fissurar fica praticamente estável, ou seja, a influência do teor de fibras não é significativa.

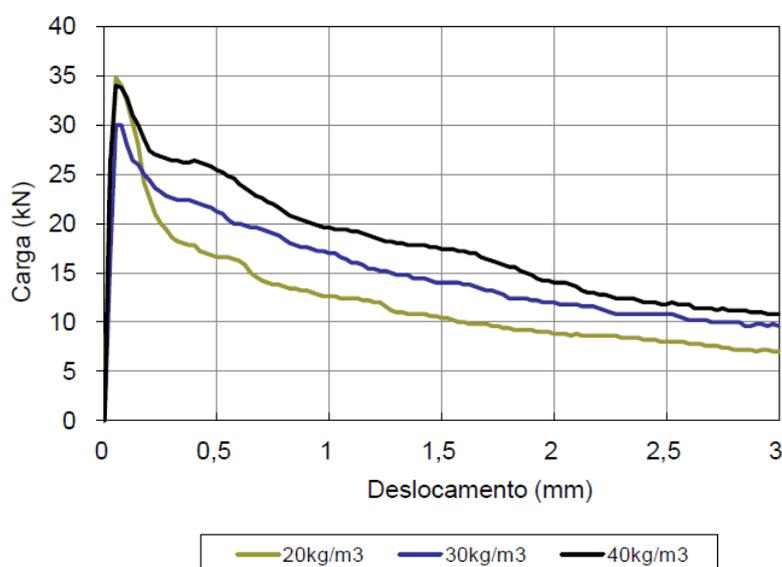


Figura 2.4 – Curvas médias de carga por deslocamento com diferentes consumos de fibra de aço (FIGUEIREDO,2000).

Porém, após a fissuração a carga resistida aumenta com o acréscimo do teor de fibras, isto é, o maior consumo de fibra proporciona uma resistência residual pós-fissuração.

2.2.4 Volume crítico

Segundo FIGUEIREDO (2000), a definição de volume crítico é a de que ele corresponde ao teor de fibras que mantém a mesma capacidade resistente para o compósito a partir do momento em que ocorre a ruptura da matriz. Abaixo do volume crítico, no momento em que ocorre a ruptura da matriz ocorre o comportamento *strain-softening* que significa uma perda da capacidade resistente. Acima do volume crítico o compósito apresenta comportamento *strain-hardening*, ou seja, ele continua aceitando níveis de carregamentos crescentes mesmo após a ruptura do concreto. Podemos observar isto na Figura 2.5. O trecho elástico linear inicial corresponde ao estágio pré-fissurado da matriz e o trecho similar a um patamar de escoamento é onde podemos ver a diferença do comportamento do CAFA com teores superiores, inferiores e iguais ao volume crítico de fibras.

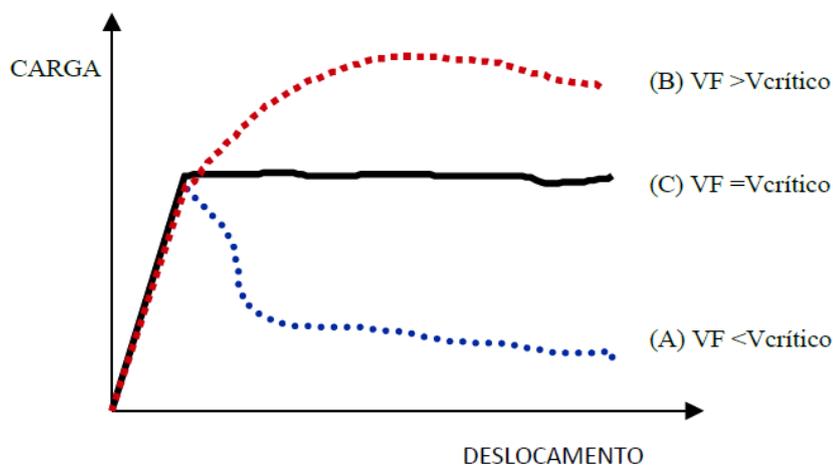


Figura 2.5 – Diagramas carga x deslocamento de concreto com fibras em teor inferior (A), superior (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras (FIGUEIREDO, 2000).

O Volume crítico pode ser calculado a partir de modelos que estimam a contribuição das fibras na rigidez da matriz após a fissuração. AVESTON *et al* (1971) propôs uma modelagem, que FIGUEIREDO (2000) comenta, onde ele focaliza um compósito ideal, com fibras contínuas e alinhadas à direção principal. Porém este modelo não representa a realidade do CAFA, onde as fibras são distribuídas aleatoriamente e descontínuas. Para a correção desses erros são utilizados os chamados fatores de eficiência, que permitem uma maior aproximação

do volume crítico teórico do obtido experimentalmente. Após a introdução desses coeficientes o autor estima em 0,91% o volume crítico para o caso de fibras de aço.

Segundo NUNES *et al* (2006), esse volume crítico é da ordem de 1% em volume, ou seja, cerca de 80 kg/m³ de concreto, valor este que está na mesma ordem de grandeza do valor calculado analiticamente por AVESTON *et al* (1971).

METHA e MONTEIRO (1994), ressalta que a adição de fibras a matrizes cimentícias reduz a trabalhabilidade, independentemente do tipo de fibra. Essa redução é proporcional à concentração do volume de fibras no concreto. Volumes altos devem ser utilizados com cuidado, pois podem causar problemas na homogeneidade.

2.2.5 Índice de esbeltez

A geometria da fibra é um dos principais aspectos que definem o desempenho do material no CAFA (FIGUEIREDO *et al*, 1997), sendo o índice de esbeltez da fibra um dos principais fatores que influenciam esse desempenho.

Índice de esbeltez, ou relação de aspecto é a relação entre o comprimento da fibra e o seu diâmetro equivalente (diâmetro do círculo cuja seção equivale à superfície da fibra). Este índice é capaz de indicar o grau de eficiência da fibra em função de sua geometria (NUNES e AGOPYAN, 1998). Este parâmetro varia entre 30 e 100 para as fibras de aço normalmente empregadas em concreto.

Fibras de maior seção transversal apresentam um desempenho maior pois essa seção transversal proporciona uma grande área de contato com a matriz aumentando assim a resistência ao arrancamento da fibra. Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), um maior índice de esbeltez pode tanto significar uma melhora na resistência ao arrancamento da fibra, pelo aumento do comprimento de ancoragem, como um aumento ao número de fibras que podem interceptar uma fissura, decorrente da utilização de um número maior de fibras. No entanto, quanto maior for o índice de esbeltez, maior será também a influência da fibra na perda de fluidez do material.

Devido a importância do índice de esbeltez no desempenho do concreto reforçado com fibras de aço, a NBR 15530 (2007) procurou regular dois fatores importantes: a geometria da fibra e a resistência do aço utilizado na fabricação da

mesma. A norma estabelece diferentes níveis de resistência em função do tipo e, principalmente, da classe de fibra avaliada.

Quanto maior for o índice de esbeltez da fibra, maior será a capacidade resistência pós-fissuração do concreto, desde que não se ultrapasse o comprimento crítico da fibra. Assim, o comprimento da fibra sempre merece atenção.

2.2.6 Comprimento crítico

FIGUEIREDO (2000) afirma que o comprimento crítico l_c pode ser definido como um mecanismo de transferência de tensão entre a matriz e a fibra. Esta tensão é máxima quando a tensão a que está submetida a fibra se iguala à tensão de cisalhamento entre a fibra e a matriz. À medida que as tensões de aderência superam a resistência de aderência, a fibra perde seu papel de transferência e é arrancada da matriz.

Segundo MAIDL (1995) deve haver compatibilidade dimensional entre agregados e fibras, possibilitando que as mesmas interceptem a fissura. A compatibilidade dimensional faz com que a fibra atue não somente como reforço da argamassa, mas sim como reforço do concreto. Isto é importante pois a fratura se propaga na região de interface entre o agregado graúdo e a pasta para concretos de baixa e moderada resistência. Quando não há essa compatibilidade poucas fibras trabalham como ponte de transferência de tensões na fissura (Figura 2.6 e Figura 2.7). Duas alternativas são empregadas de maneira a compatibilizar a mistura de concreto com fibras: reduzir a dimensão máxima característica do agregado, ou aumentar o comprimento da fibra.

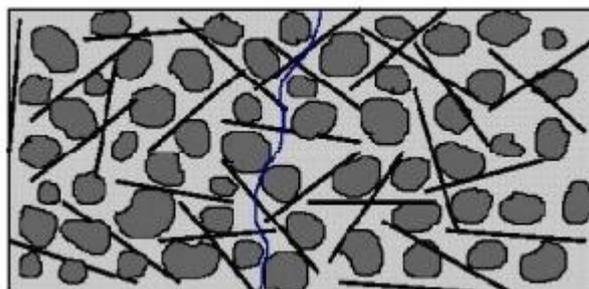


Figura 2.6 – Concreto armado com fibras onde há compatibilidade dimensional entre as fibras e o agregado graúdo (FIGUEIREDO, 2000).

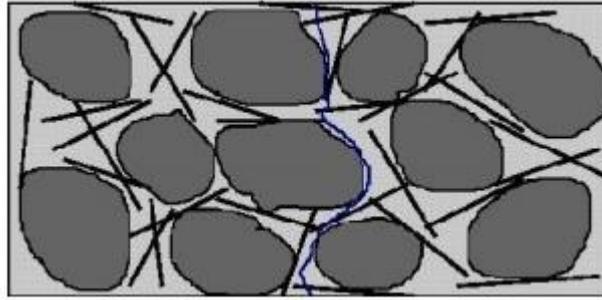


Figura 2.7 – Concreto armado com fibras onde não há compatibilidade dimensional entre as fibras e o agregado graúdo (FIGUEIREDO, 2000).

2.2.7 Distribuição das fibras

Na maioria dos casos as fibras metálicas se encontram soltas, embora aquelas com extremidades dobradas sejam fornecidas em pentes e unidas nas extremidades por uma cola solúvel em água, durante essa mistura essas fibras se soltam e se dispersam individualmente. Esse processo facilita a mistura da fibra com o concreto e evita que elas fiquem agrupadas e má distribuídas.

Segundo BENTUR e MINDESS (1990), o arranjo das fibras nos compósitos pode assumir várias geometrias em função da forma das fibras individuais e da sua dispersão na matriz. Podendo-se apresentar em três formas: arranjo unidimensional, bidimensional e tridimensional. Conforme se observa na Figura 2.8 o arranjo das fibras pode ser contínuo, com fibras longas (a, c) ou discreto, com fibras curtas (≤ 50 mm de comprimento) (b, d). No concreto as fibras normalmente utilizadas são discretas e curtas e tendem a se orientar de forma dispersa e não-uniforme.

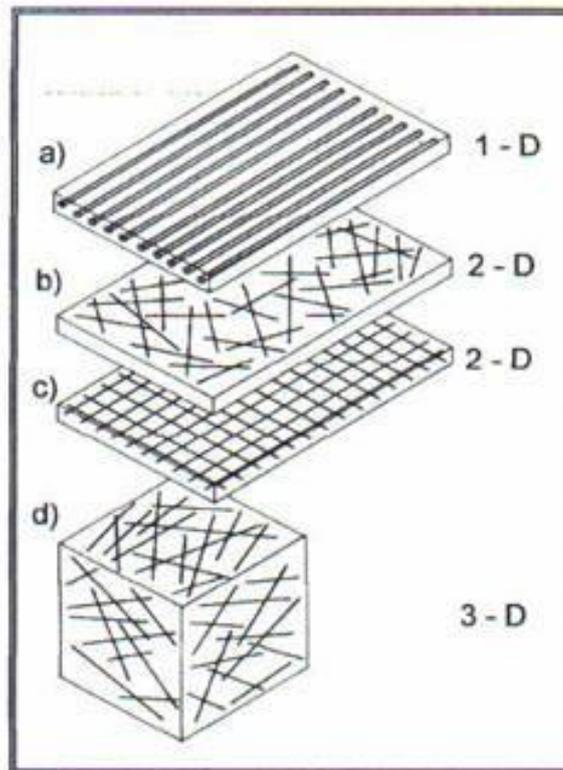


Figura 2.8 – Orientação das fibras (BENTUR e MINDESS, 1990).

Os compósitos formados por fibras longas se apresentam com um grande grau de orientação, pois as fibras tendem a se alinhar na direção maior. Já os de fibras curtas apresentam fibras orientadas em diversas direções. Na prática a distribuição das fibras de maneira uniforme é raramente obtida, essa uniformidade depende muito do processo de mistura, lançamento e adensamento.

SILVA *et al* (2008) desenvolveram compósitos reforçados com fibras de sisal alinhadas em somente uma direção e esses apresentaram múltipla fissuração nos ensaios de tração direta e flexão.

Em geral, para que as fibras produzam uma maior uniformidade nas propriedades de resistência do compósito, elas devem apresentar boa resistência à tração e possibilitar uma dispersão uniforme e uma orientação aleatória por todo o concreto.

2.3

Propriedades do concreto armado com fibras de aço

FIGUEIREDO (2000) afirma que quando adicionadas ao concreto, as fibras dificultam a fissuração devido ao seu alto módulo de elasticidade. Elas permitem uma redistribuição dos esforços mesmo aplicada com baixos teores.

Segundo BARROS *et al* (1999), as fibras fornecem capacidade de absorção adicional de energia, melhoram a resistência à flexão do concreto, bem como sua resistência ao impacto, à tração e ductilidade.

A fragilidade do concreto é reduzida com a inserção das fibras, o mesmo passa a ter um comportamento pseudo-dúctil, permitindo uma redistribuição dos esforços aumentando sua capacidade de suporte à fadiga e ao impacto e em contrapartida sua durabilidade (NUNES *et al* 2006).

Diversos fatores supracitados podem influenciar as propriedades mecânicas do concreto com fibras de aço, dentre eles: interação fibra/matriz, comprimento das fibras, orientação e volume das fibras no concreto.

2.3.1

Resistência à compressão

A resistência à compressão é considerada a propriedade essencial do concreto convencional, entretanto, BENTUR e MINDESS (1990), afirmam que a adição de fibras de aço no concreto produz um pequeno ou nenhum aumento na resistência à compressão do concreto. Em alguns casos pode ocorrer o decréscimo desse valor devido à adição de mais água, que é necessária com a adição das fibras, para aumentar a trabalhabilidade do concreto (FIGUEIREDO, 2000). MAIDL (1995) diz que o aumento da resistência à compressão pode ficar na faixa de 0 a 30%. De acordo com ACI 544.1R-96, na compressão, a carga última é sensivelmente afetada pelo acréscimo de fibras de aço ao concreto, onde são observados aumentos entre 0 e 15% para frações volumétricas de fibras acima de 1,5%.

Uma mudança significativa pode ser observada no comportamento pós-pico do material com a adição da fibra, tornando sua resposta mais suave em termos de declividade do ramo descendente do diagrama tensão-deformação específica, e levando-o a atingir níveis de deformação específica maiores, até a ruptura. Na Figura 2.9 pode-se observar a influência do teor de fibras nas curvas

tensão-deformação do CAFA. Nota-se um aumento significativo na deformação específica no pico da tensão de compressão, e um menor declive na parte descendente da curva comparado com concreto sem adição de fibras

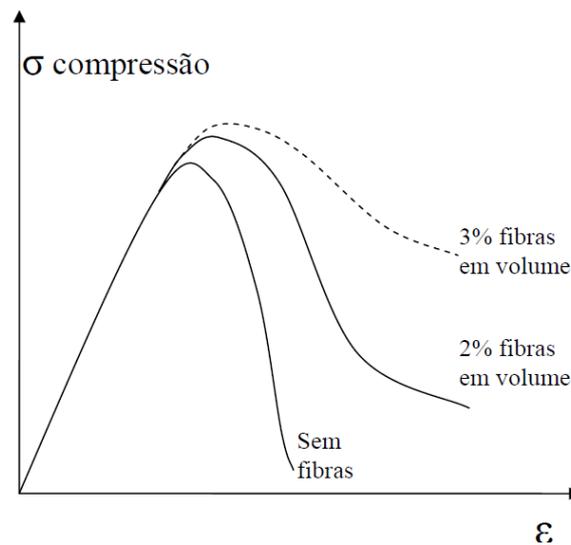


Figura 2.9 – Tensão de compressão x deformação específica de concretos sem e com fibras de aço.

Entretanto, segundo o ACI 544.4R-88, as fibras de aço com teores de fibras menores que 2% não acrescentam melhoria na resistência à compressão do concreto, podendo levar a uma pequena redução desta propriedade.

Independente da incerteza quanto ao aumento da resistência à compressão do CAFA, o objetivo da adição das fibras não é promover alterações nesta propriedade e sim melhorar o comportamento pós-fissuração, permitindo assim que o concreto deforme bem mais quando tracionado.

2.3.2 Ductilidade

CARMONA *et al* (1995) afirma que as fibras de aço quando inseridas ao concreto aumentam a sua ductilidade. Ductilidade é definida como sendo a área sob a curva carga x flecha, para qualquer tipo de carregamento. Elas não aumentam significativamente a deformação específica referente à carga de pico, porém, aumentam muito a absorção de energia na parte pós-pico da curva em função da quantidade de fibras que é incorporada a mistura (Figura 2.10).

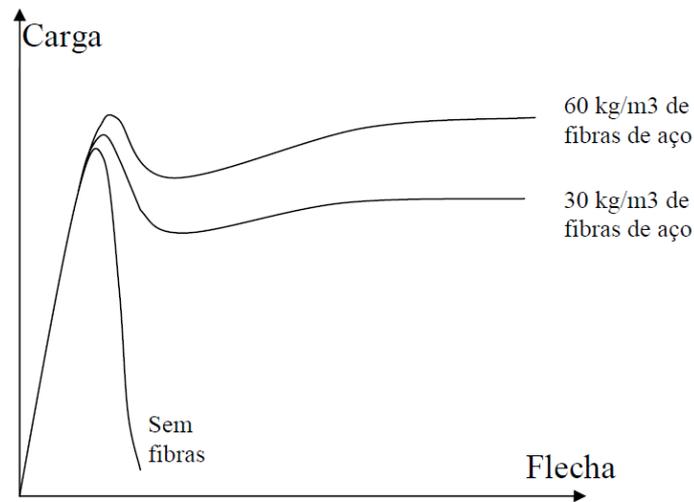


Figura 2.10 – Curvas carga x flecha para concretos com diferentes volumes de fibras.

No estudo realizado por MARANGON (2006) constatou-se um aumento na ductilidade em concretos fibrosos quando comparados à matriz de referência.

2.3.3 Resistência à tração

A adição de fibras de aço, em frações volumétricas adequadas, é uma aliada ao concreto armado no que diz respeito ao combate às tensões de tração induzidas. O uso das fibras auxilia na redução do aparecimento de fissuras, inclusive aquelas decorrentes da retração do concreto.

Segundo o ACI 544.1R (1996), para adições de fibra de aço ao concreto a uma fração volumétrica de 1,5 % são observados incrementos entre 30 e 40% na resistência à tração direta de matrizes de concreto. Para BENTUR e MINDESS (1990) é preciso adicionar teores elevados de fibras com alta resistência à tração para que seja notado o aumento da resistência à tração do compósito. Isso ocorre devido a capacidade das fibras de manter uma parcela resistente mesmo após o aparecimento da primeira fissura no concreto.

Um aumento da resistência pode ser observado quando se criam situações favoráveis como por exemplo: utilização de volume de fibras elevados, alinhamento das fibras na direção da tração, dosagem, o tipo da fibra e a boa aderência das fibras a matriz do concreto.

A Figura 2.11 mostra curvas de tensão x deformação específica de argamassas com e sem fibras. Nota-se que na parte crescente da curva, antes da fissuração, não

há muita diferença, porém na parte decrescente a curva depende do teor e da geometria da fibra utilizada.

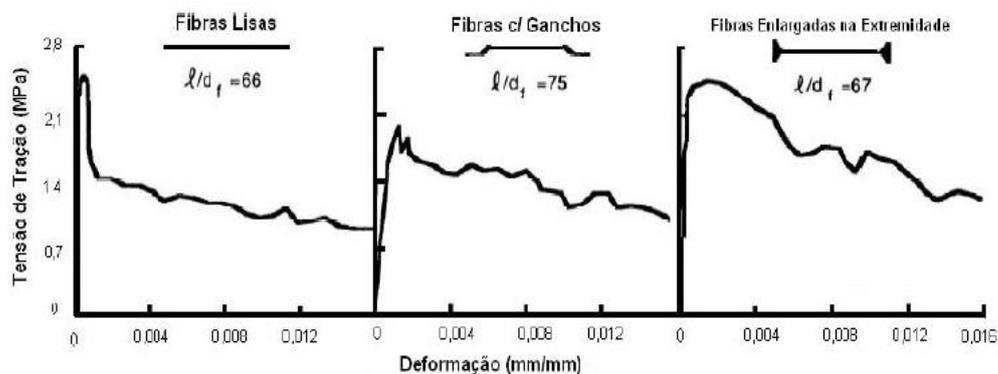


Figura 2.11 – Curvas tensão x deformação específica de argamassas com fibras (ACI 544.4R88).

A inserção das fibras proporciona uma melhoria na resistência à tração do concreto dependendo do volume de fibras que é utilizado. Um volume de 5% de fibras de aço lisas e retas orientadas na direção da tração pode ocasionar um aumento de até 133% da resistência a tração. Já quando são colocadas aleatoriamente este acréscimo só chega ao máximo de 60% (BENTUR e MINDESS, 1990).

O ensaio de tração direta não apresenta fácil execução, pois é recomendado entalhar o corpo de prova de maneira a induzir a fissura. Esta dificuldade levou ao desenvolvimento de métodos alternativos para obter a resistência à tração do concreto com fibras. O ensaio de tração por compressão diametral conhecido também como Ensaio Brasileiro é um desses métodos. Este ensaio vem sendo adotado desde 1953 devido a sua fácil execução e pelo seu desenvolvimento teórico, que permite transformar a carga de compressão aplicada ao longo de duas linhas axiais que são opostas no sentido diametral, em resistência à tração do material ensaiado. Nesse ensaio um corpo de prova cilíndrico de concreto é submetido a uma força de compressão aplicada em uma região reduzida ao longo de seu comprimento. Essa força é uniforme e produz uma tensão de tração ao longo da sua geratriz. A ruptura ocorre quando a resistência à tração atinge seu máximo valor. Portanto, é possível estimar a resistência à tração direta a partir da indireta. Uma desvantagem do ensaio de compressão diametral comparado ao de tração direta é que ele não fornece dados apropriados do comportamento do material pós fratura (DENNEMAN *et al*, 2011).

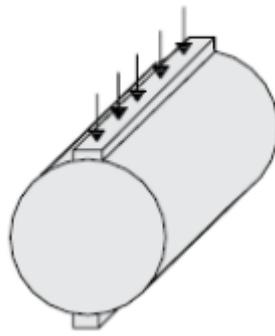


Figura 2.12 – Esquema de corpo de prova para ensaio de tração por compressão diametral.

CUCCHIARA *et al* (2004) mostra um aumento significativo da resistência à tração em ensaios de tração por compressão diametral com volumes variados de fibras. A tração não aumenta significativamente quando são utilizados volumes inferiores a 2%.

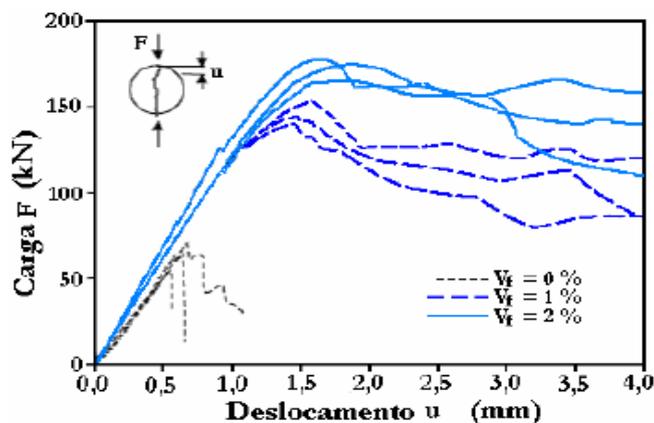


Figura 2.13 – Resultados de ensaio de compressão diametral para concreto com e sem adição de fibras (CUCCHIARA, 2004).

2.3.4 Trabalhabilidade

Sabe-se que a trabalhabilidade é uma das propriedades mais afetadas pelo uso de fibras, sendo sua redução diretamente proporcional ao teor volumétrico de fibras utilizado. (METHA e MONTEIRO, 1994).

Um dos efeitos mais importantes da adição de fibras de aço ao concreto no estado fresco, é a redução da trabalhabilidade, uma vez que as fibras enrijecem a mistura provocando a redução da fluidez e mobilidade do mesmo (CASTRO, 2010).

Essa redução é proporcional à quantidade de fibras no concreto, pois ao adicioná-las, a área superficial é aumentada demandando água de molhagem. Assim é muito importante um cuidado com a dosagem para que se assegure uma maior dispersão das fibras na matriz.

Segundo TOLEDO FILHO (1997) para que se avalie a mistura fresca reforçada com fibras é recomendado que se faça testes de trabalhabilidade nos quais efeitos dinâmicos estejam envolvidos.

2.3.5 Durabilidade

A durabilidade dos CAFA depende não somente da durabilidade das fibras, mas também da durabilidade do compósito e dos agentes agressivos externos (FIGUEIREDO, 2000).

Os CAFA apresentam boa durabilidade, desde que sejam bem compactados e curados. As fibras devem estar sempre protegidas pela pasta. Em geral é inevitável que ocorra corrosão em fibras mais superficiais, porém as fibras mais internas ficam protegidas e permanecem sem corrosão. A corrosão na superfície pode ser evitada utilizando fibras de aço inoxidável ou resistentes à corrosão.

3 Efeito escala

3.1 Introdução

Em engenharia muitos experimentos são realizados em dimensões menores do que as utilizadas em diversos elementos estruturais. Sendo assim, surge a necessidade de avaliar a influência do tamanho do espécime nos resultados obtidos para que esses possam ser aplicados em casos reais. Desse modo tem-se o efeito escala, que segundo RIOS *et al* (2002) deve ser levado em conta em qualquer teoria física. Ele pode ser explicado por uma combinação da teoria da plasticidade e mecânica da fratura. COURA *et al* (2007) relatam que esse fenômeno é a influência das dimensões da estrutura sobre as propriedades dos materiais. ELFAHAL *et al* (2004 e 2005) verificaram que as dimensões dos componentes do concreto influenciam seu comportamento quando submetido a uma carga estática. Existem diversos estudos teóricos e experimentais sobre este assunto. Os primeiros estudos foram realizados por Weibull, porém, não se aplicam a materiais frágeis não homogêneos. Atualmente existem duas formulações teóricas que são a de BAZANT (1984) e a de CARPINTERI (1992).

3.2 Lei de Bazant

Este autor relaciona a resistência do concreto em função das dimensões do corpo de prova e do agregado. A Lei de Bazant, ou "Size Effect Law" (SEL), pode ser descrita por (BAZANT *et al*, 1991):

$$\sigma_n = Bf_t \left(1 + \frac{d}{d_0}\right)^{-1/2} \quad (3.1)$$

onde

d – dimensão do corpo de prova;

σ_n – resistência nominal;

f_t – resistência à tração do concreto;

B , d_0 – constantes a serem determinadas nos ensaios.

De acordo com a expressão 3.1 o efeito escala é uma transição da Teoria da Plasticidade (efeito escala mínimo) e da Mecânica da Fratura Linear (efeito escala máximo). As estruturas que têm $d \geq d_0$ são mais frágeis prevalecendo a Mecânica da Fratura Linear (MFL), e a resposta de elementos com $d \leq d_0$ ficam mais próximas da Teoria da Plasticidade e são mais dúcteis (Figura 3.1).

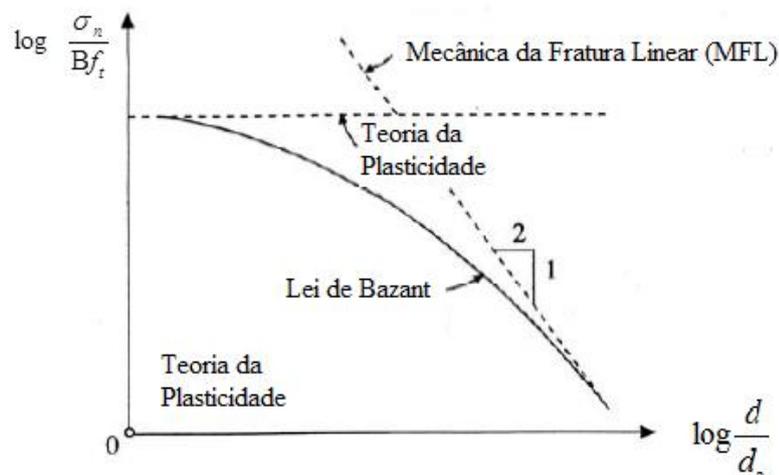


Figura 3.1 – Lei de Bazant; adaptado de BAZANT (1984).

Segundo COURA *et al* (2007), quando se aplica a SEL em corpos de prova não fissurados a hipótese torna-se falha. Um termo σ_0 , designado como sendo a resistência de um corpo de prova infinitamente grande foi introduzido por Bazant na equação 3.1.

BAZANT (1991) por meio de resultados experimentais afirma que existe efeito escala no ensaio brasileiro proposto por Lobo Carneiro, porém, só é válido até um certo diâmetro. Acima deste diâmetro essa lei não pode ser aplicada pois a curva da tensão nominal *versus* diâmetro tende para uma assíntota horizontal, significando o desaparecimento do efeito escala.

3.3 Multifractal Scaling Law – MFSL (CARPINTERI-1992)

A lei de Carpinteri é aplicável em concretos e considera que em elementos com pequenas dimensões, a dimensão do agregado é de grande magnitude acentuando o efeito escala. Em elementos com grandes dimensões em relação ao tamanho do agregado o efeito escala tende a desaparecer. A expressão que representa essa lei é (CARPINTERI,1992):

$$\sigma_n = \left(A + \frac{B}{d}\right)^{1/2} \quad (3.2)$$

onde

σ_n – resistência nominal;

d – dimensão do corpo de prova;

A, B – são constantes a serem determinadas nos ensaios.

Se d tende para o infinito a resistência nominal tende para um valor constante diferente de zero (resistência limite). Quando d tende para zero o valor da resistência tende para o infinito, significando que o efeito escala para alguns elementos de concreto é grande somente para alguns valores de dimensões, que podem ser grandes ou pequenos, dependendo da geometria da estrutura. Na expressão 3.2 a constante B depende das dimensões do elemento. Para estruturas com $d \geq B$ o efeito escala tende a ser nulo, a peça falha no início da fissuração (ruptura não dúctil). Porém, para $d \leq B$ o efeito escala é grande e a ruptura é dúctil.

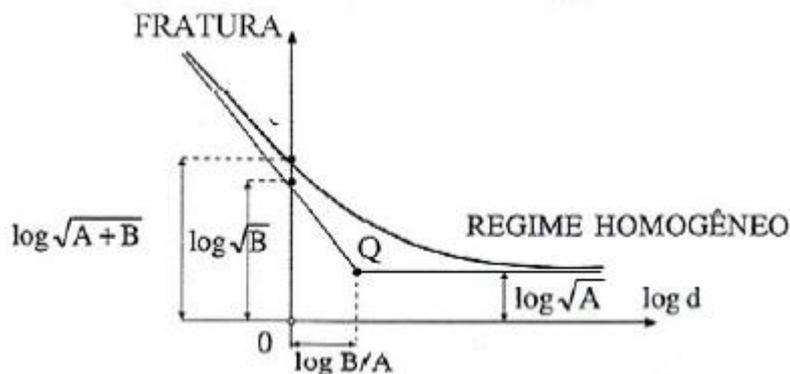


Figura 3.2 – Multifractal Scaling Law; adaptado de CARPINTERI (1995).

Segundo CARPINTERI *et al* (1995) a expressão 3.2 pode ser reorganizada da seguinte forma:

$$\sigma_n = f_t \left(1 + \alpha_0 \frac{d_{m\acute{a}x}}{d}\right)^{1/2} \quad (3.3)$$

Os parâmetros f_t e α_0 representam constantes a serem determinadas a partir do melhor ajuste dos dados experimentais e $d_{m\acute{a}x}$ é o diâmetro máximo do agregado.

3.4 Outras pesquisas

COURA *et al* (2007) por meio de resultados obtidos experimentalmente constatou que as curvas obtidas para a resistência média à compressão (MPa) x dimensão do corpo de prova (mm) apresentam uma tendência a se comportar de acordo com a formulação de CARPINTERI (1995). Buscando representar os resultados para resistência à compressão em função do corpo de prova e da dimensão do agregado, COURA (2006) obteve a seguinte expressão limitada a corpos de prova de dimensão 100 mm x 200 mm a 200 mm x 400 mm:

$$f_c = 33,448 - 0,037d - 0,106 d_{m\acute{a}x} \quad (3.4)$$

onde

f_c – resistência à compressão do concreto (MPa);

d – diâmetro do corpo de prova;

$d_{m\acute{a}x}$ – diâmetro máximo do agregado.

HILSDORF (1999) *apud* COURA (2007) estima para a resistência à tração indireta a seguinte expressão:

$$f_{ctm} = f_{ctmo} \ln \left(1 + \frac{f_{cm}}{f_{cmo}}\right) \quad (3.5)$$

onde

f_{ctm} – resistência média à tração axial (MPa);

f_{ctmo} – 2,12 MPa;

f_{cm} – resistência média à compressão (MPa);

f_{cmo} – 10 MPa.

4 Programa experimental

4.1 Considerações iniciais

Os procedimentos de ensaio são descritos neste capítulo, bem como a caracterização dos materiais utilizados.

O objetivo dos ensaios é verificar o comportamento de corpos de prova de CAFA submetidos à tração por compressão diametral e à tração direta, mediante a variação dos seguintes parâmetros:

1. resistências médias do concreto à compressão – 20 MPa, 30 MPa e 50 MPa;
2. dimensões dos corpos de prova – 5 cm x 10 cm, 10 cm x 20 cm, 15 cm x 30 cm para os ensaios de compressão diametral (Figura 4.14) e corpos de prova (Figura 4.5) para ensaio de tração direta.
3. consumo de fibras – 20 kg/m³, 40 kg/m³, 60 kg/m³.

Foram ensaiados 54 corpos de prova por compressão diametral, sendo diferenciados pelos parâmetros adotados e identificados em função dos mesmos, recebendo a seguinte nomenclatura: G-DX-FY-Z, onde G é o grupo ao qual o corpo de prova pertence. Os algarismos romanos I, II e III, referem-se à resistência do concreto, $f_c = 20$ MPa, $f_c = 30$ MPa e $f_c = 50$ MPa, respectivamente. A letra X varia de acordo com os diâmetros dos corpos de prova, 5 cm, 10 cm, 15 cm. A letra Y indica o consumo de fibras em kg/m³, ou seja, 20, 40 ou 60. A letra Z indica o número do corpo de prova, 1 ou 2.

Por exemplo, I-D15-F60-2 corresponde ao corpo de prova com resistência de 20 MPa, dimensões 15 cm x 30 cm, consumo de fibras igual a 60 kg/m³ e indica o corpo de prova número dois.

Foram ensaiados 18 corpos de prova por tração direta seguindo-se os parâmetros adotados e identificados em função dos mesmos, recebendo a nomenclatura: G-TD-FY-Z, onde as letras variam de acordo com as explicações apresentadas anteriormente, variando somente a sigla TD que significa que o corpo de prova é do ensaio de tração direta.

Por exemplo, II-TD-F20-1 corresponde ao corpo de prova com resistência de 30 MPa, para o ensaio de tração direta, com o consumo de fibras igual a 20 kg/m³, e indica o corpo de prova número um.

4.2 Materiais

4.2.1 As fibras de aço

As fibras de aço Dramix utilizadas foram fabricadas pela empresa Belga Bekaert.



Figura 4.1 – Fibras RL 45/30 BN.

A fibra utilizada na pesquisa foi a RL 45/30 BN (Figura 4.11) e segundo a empresa Belga Bekaert essa fibra é utilizada nas seguintes aplicações:

- capas de compressão;
- estabilização de taludes;
- concreto projetado.

As letras que compõem a denominação da fibra RL 45/30 BN significam:

- letra R – dupla ancoragem nas extremidades da fibra;
- letra L – indica que as fibras são produzidas soltas entre si;
- número 45 indica o índice de esbeltez l/d ;
- número 30 indica o comprimento da fibra em mm;
- letra B indica que o aço é sem revestimento;
- letra N indica baixo teor de carbono no material.

Essa empresa recomenda que para a dosagem do concreto seja utilizado um teor de argamassa maior que 50%, um fator água cimento menor que 0,55 e um abatimento do tronco de cone de 100 ± 20 mm.

A Belga Bekaert recomenda para dosar o Dramix no concreto as seguintes prescrições:

- ajustar o *slump* do concreto para, no mínimo 12 cm;
- adicionar o Dramix com velocidade máxima de 40 kg/mim (dois sacos);
- depois de adicionar o Dramix continuar misturando em alta velocidade durante 5 mim;
- nunca adicionar as fibras como o primeiro componente da mistura.

4.2.2 Concreto

A concretagem dos corpos de prova e os seus ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, entre os meses de agosto e outubro.

Foram realizadas nove séries de concretagem de acordo com a resistência à compressão do concreto e quantidade de fibras. Para cada série foram obtidas as seguintes dosagens em massa conforme a nomenclatura (cimento:areia:agregado graúdo:fator água/cimento) :

- série 1 (20 MPa / 20 kg/m³) – 1:2,00:2,02:0,55;
- série 2 (20 MPa / 40 kg/m³) – 1:2,00:2,02:0,55;
- série 3 (20 MPa / 60 kg/m³) – 1:2,00:2,02:0,55;
- série 4 (30 MPa / 20 kg/m³) – 1:1,48:1,65:0,45;
- série 5 (30 MPa / 40 kg/m³) – 1:1,48:1,65:0,45;
- série 6 (30 MPa / 60 kg/m³) – 1:1,48:1,65:0,45;
- série 7 (50 MPa / 20 kg/m³) – 1:1,16:1,43:0,39;
- série 8 (50 MPa / 40 kg/m³) – 1:1,16:1,43:0,39;
- série 9 (50 MPa / 60 kg/m³) – 1:1,16:1,43:0,39.

Para cada composição do concreto foi realizada uma única betonada por série com o objetivo de se obter uma homogeneidade nos corpos de prova, sendo que todos foram moldados seguindo as recomendações da NBR 5738–2003.

O cimento utilizado foi o CP II-32.

A areia tinha dimensão máxima característica $D_{m\acute{a}x}$ inferior à 4,75 mm e Módulo de Finura igual a 2,6 mm.

O agregado graúdo era a brita com dimensão máxima característica de 9,5 mm, valor obtido em laboratório de acordo com a NBR 7217–1987 e NBR 7211–2005.

Foi utilizado o aditivo superplastificante ADVA FLOW 20 A para uma melhor trabalhabilidade do concreto.

O consumo dos materiais empregados e os valores do abatimento do tronco de cone para cada série são mostrados nas Tabela 4.1 e Tabela 4.2, respectivamente.

O consumo dos materiais das séries 1, 2, 3 são iguais; o que diferencia uma série da outra é a quantidade de fibras. O mesmo é válido para as outras séries.

Tabela 4.1 – Consumo de material por m³ de concreto.

Material	Consumo em kg/m ³		
	Série 1,2,3	Série 4,5,6	Série 7,8,9
Cimento (kg)	418	511	589,74
Areia (Kg)	837,4	757,9	689
Brita 0 (kg)	847,5	847,5	847,5
Água (l)	230	230	230

Tabela 4.2 – Valores do abatimento do tronco de cone.

Abatimento de cone (mm)								
Série 1	Série 2	Série 3	Série 4	Série 5	Série 6	Série 7	Série 8	Série 9
65	75	120	45	74	60	110	95	30

O ensaio de abatimento do tronco de cone foi realizado para cada série, de acordo com a NBR NM 67 – 1998 (Figura 4.2, 4.2 e 4.3).



Figura 4.2 – Abatimento do tronco de cone para série 5.

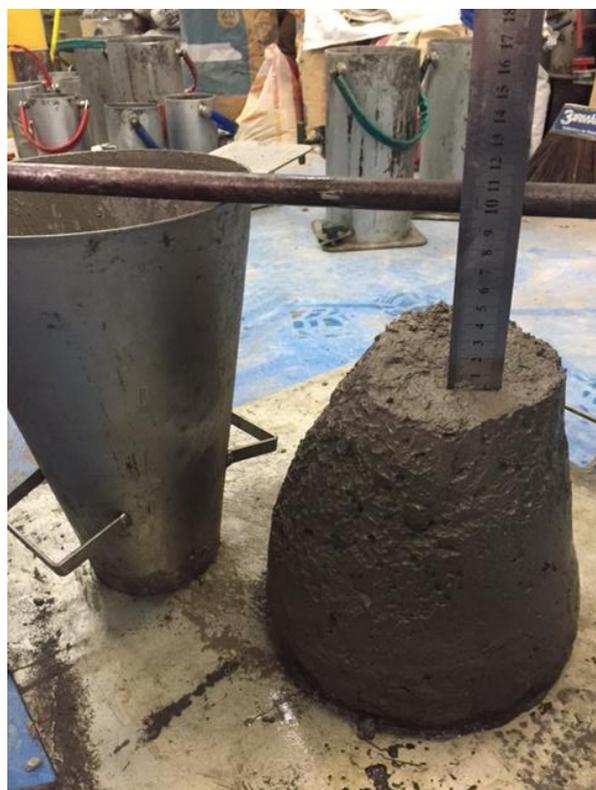


Figura 4.3 – Abatimento de tronco de cone para série 8.



Figura 4.4 – Abatimento de tronco de cone para série 9.

As peças concretadas foram divididas em séries. A concretagem seguiu a padronização apresentada pela Tabela 4.3.

Para o controle tecnológico do concreto utilizado na pesquisa, durante as concretagens foram moldados quatro corpos de prova de 10 cm x 20 cm em cada concretagem seguindo as recomendações da NBR-5738 – 2003. Esses corpos de prova foram usados para determinar a resistência à compressão simples e módulo de elasticidade do concreto. O ensaio de resistência à tração indireta do concreto foi realizado em 54 corpos de prova.

Os ensaios de caracterização que geraram as informações utilizadas na pesquisa foram realizados entre os dias 17/09/2015 e 20/10/2015. Os mesmos são descritos nas seções 4.2.1.2 a 4.2.1.4.

Tabela 4.3 – Programa de concretagem.

Série	CP ensaio	CP controle	Data	Série	CP ensaio	CP controle	Data
1	I-D5-F20-1	CON-1-1	18/ago	6	II-D5-F60-1	CON-6-1	08/set
	I-D10-F20-1	CON-1-2			II-D10-F60-1	CON-6-2	
	I-D15-F20-1	CON-1-3			II-D15-F60-1	CON-6-3	
	I-D5-F20-2	CON-1-4			II-D5-F60-2	CON-6-4	
	I-D10-F20-2				II-D10-F60-2		
	I-D15-F20-2				II-D15-F60-2		
	I-TD-F20-1				II-TD-F60-1		
	I-TD-F20-2				II-TD-F60-2		
2	I-D5-F40-1	CON-2-1	21/ago	7	III-D5-F20-1	CON-7-1	11/set
	I-D10-F40-1	CON-2-2			III-D10-F20-1	CON-7-2	
	I-D15-F40-1	CON-2-3			III-D15-F20-1	CON-7-3	
	I-D5-F40-2	CON-2-4			III-D5-F20-2	CON-7-4	
	I-D10-F40-2				III-D10-F20-2		
	I-D15-F40-2				III-D15-F20-2		
	I-TD-F40-1				III-TD-F20-1		
	I-TD-F40-2				III-TD-F20-2		
3	I-D5-F60-1	CON-3-1	25/ago	8	III-D5-F40-1	CON-8-1	15/set
	I-D10-F60-1	CON-3-2			III-D10-F40-1	CON-8-2	
	I-D15-F60-1	CON-3-3			III-D15-F40-1	CON-8-3	
	I-D5-F60-2	CON-3-4			III-D5-F40-2	CON-8-4	
	I-D10-F60-2				III-D10-F40-2		
	I-D15-F60-2				III-D15-F40-2		
	I-TD-F60-1				III-TD-F40-1		
	I-TD-F60-2				III-TD-F40-2		
4	II-D5-F20-1	CON-4-1	27/ago	9	III-D5-F60-1	CON-9-1	17/set
	II-D10-F20-1	CON-4-2			III-D10-F60-1	CON-9-2	
	II-D15-F20-1	CON-4-3			III-D15-F60-1	CON-9-3	
	II-D5-F20-2	CON-4-4			III-D5-F60-2	CON-9-4	
	II-D10-F20-2				III-D10-F60-2		
	II-D15-F20-2				III-D15-F60-2		
	II-TD-F20-1				III-TD-F60-1		
	II-TD-F20-2				III-TD-F60-2		
5	II-D5-F40-1	CON-5-1	01/set				
	II-D10-F40-1	CON-5-2					
	II-D15-F40-1	CON-5-3					
	II-D5-F40-2	CON-5-4					
	II-D10-F40-2						
	II-D15-F40-2						
	II-TD-F40-1						
	II-TD-F40-2						

4.2.2.1 Resistência à tração direta

Foi utilizada a máquina da MTS do Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC-Rio com capacidade para 1000 kN para realização dos ensaios. Para cada série foram ensaiados dois corpos de prova de dimensões a seguir (Figura 4.6) de acordo com a Figura 4.5.



Figura 4.5 – Ensaio de tração direta.

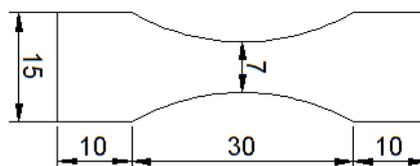


Figura 4.6 – Corpo de prova de tração direta

A Tabela 4.4 mostra os resultados dos ensaios dos corpos de prova submetidos à tração direta.

Tabela 4.4 – Valores da resistência à tração direta do concreto

Corpo de prova	Idade (dias)	f_{dir} (MPa)	$f_{dir,médio}$ (MPa)
I-TD-F20-1	30	2,28	2,34
I-TD-F20-2	30	2,39	
I-TD-F40-1	32	1,39	1,86
I-TD-F40-2	32	2,34	
I-TD-F60-1	28	0,0	1,35
I-TD-F60-2	28	1,35	
II-TD-F20-1	28	3,34	3,01
II-TD-F20-2	28	2,68	
II-TD-F40-1	28	3,02	2,58
II-TD-F40-2	28	2,13	
II-TD-F60-1	28	3,78	3,56
II-TD-F60-2	28	3,33	
III-TD-F20-1	32	4,19	4,19
III-TD-F20-2	32	0,00	
III-TD-F40-1	28	3,24	2,81
III-TD-F40-2	28	2,37	
III-TD-F60-1	33	3,26	3,65
III-TD-F60-2	33	4,03	

Os corpos de prova I-TD-F60-1 e III-TD-F20-2 já estavam rompidos antes de serem submetidos aos ensaios, por esse motivo eles foram descartados.

Os gráficos gerados a partir dos dados dos ensaios de tração direta se encontram no anexo C.

4.2.2.2 Resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão do concreto utilizado na pesquisa foi obtida em obediência à norma NBR 5739–1994. Para cada série foram ensaiados dois corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 cm x 20 cm.

Foi utilizada a máquina da MTS do Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC-Rio com capacidade para 500 kN para realização dos ensaios. Os valores obtidos nos ensaios são mostrados na Tabela 4.5.

Os gráficos gerados a partir dos dados de cada ensaio realizado para compressão simples se encontram no anexo B.

Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto.

Série	Corpos de prova	Data do ensaio 2015	Idade (dias)	f_c (MPa)
1	CON-1-1	17/09/2015	30	27,98
	CON-1-2	17/09/2015	30	34,64
2	CON-2-1	22/09/2015	32	31,70
	CON-2-2	22/09/2015	32	29,62
3	CON-3-1	22/09/2015	28	25,83
	CON-3-2	22/09/2015	28	29,26
4	CON-4-1	24/09/2015	28	39,67
	CON-4-2	24/09/2015	28	29,70
5	CON-5-1	29/09/2015	28	39,50
	CON-5-2	29/09/2015	28	41,68
6	CON-6-1	06/10/2015	28	39,07
	CON-6-2	06/10/2015	28	40,11
7	CON-7-1	13/10/2015	32	46,99
	CON-7-2	13/10/2015	32	48,84
8	CON-8-1	13/10/2015	28	49,54
	CON-8-2	13/10/2015	28	46,63
9	CON-9-1	20/10/2015	33	51,24
	CON-9-2	20/10/2015	33	49,58

As resistências à compressão médias são mostradas na Tabela 4.6:

Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de resistência a compressão.

Ensaio dos Corpos de prova aos 28 dias	Quantidade de corpos de prova	f_c (MPa)
Série 1	2	31,31
Série 2	2	30,66
Série 3	2	27,55
Série 4	2	34,69
Série 5	2	40,59
Série 6	2	39,59
Série 7	2	47,91
Série 8	2	48,09
Série 9	2	50,41

A Figura 4.6 mostra a execução do ensaio de resistência à compressão do concreto.



Figura 4.7 – Ensaio de compressão simples.

4.2.2.3

Resistência à tração por compressão diametral

Para todos os corpos de prova foram realizados ensaios de tração por compressão diametral seguindo as recomendações da NBR 7222–1994. Os corpos de prova foram ensaiados na máquina da MTS do Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC-Rio com capacidade para 500 kN. O ensaio de compressão diametral são mostrados nas Figura 4.8 e Figura 4.9.

A resistência à tração indireta de um corpo de prova cilíndrico de concreto é dada por:

$$f_{iD,i} = \frac{2F}{\pi d L} \quad (4.1)$$

onde

$f_{iD,i}$ – resistência à tração do CP de concreto por compressão diametral (MPa);

F – força máxima aplicada, equivalente à carga de ruptura (kN);

d – diâmetro do corpo de prova (mm);

L – altura do corpo de prova (mm).



Figura 4.8 – Vista frontal do ensaio de compressão diametral.

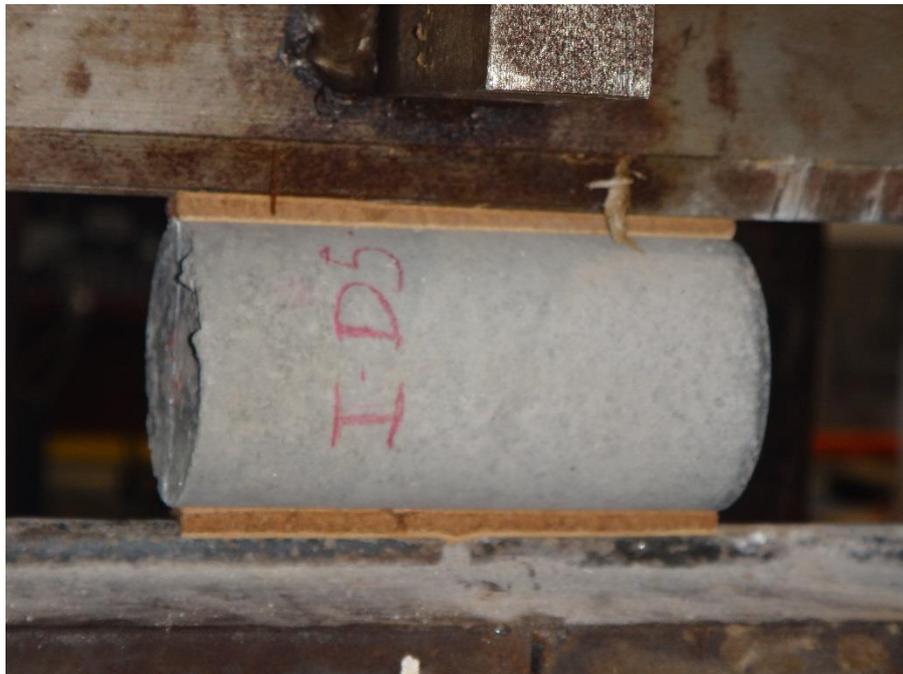


Figura 4.9 – Vista lateral do ensaio de compressão diametral.

Os valores dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral são mostrados na Tabela 4.7.

Os gráficos gerados a partir dos dados de cada ensaio realizado se encontram no anexo A.

Tabela 4.7– Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

Série	Corpo de prova	Idade (dias)	$f_{tD,i}$ (MPa)	Série	Corpo de prova	Idade (dias)	$f_{tD,i}$ (MPa)
1	I-D5-F20-1	30	3,29	5	II-D10-F40-2	28	2,3
	I-D5-F20-2	30	2,77		II-D15-F40-1	28	2,45
	I-D10-F20-1	30	1,70		II-D15-F40-2	28	2,73
	I-D10-F20-2	30	2,48	6	II-D5-F60-1	28	3,59
	I-D15-F20-1	30	2,13		II-D5-F60-2	28	4,45
	I-D15-F20-2	30	1,73		II-D10-F60-1	28	3,06
2	I-D5-F40-1	32	4,28		II-D10-F60-2	28	2,69
	I-D5-F40-2	32	4,87		II-D15-F60-1	28	2,74
	I-D10-F40-1	32	2,86		II-D15-F60-2	28	2,18
	I-D10-F40-2	32	3,04	7	III-D5-F20-1	32	4,46
	I-D15-F40-1	32	2,43		III-D5-F20-2	32	4,92
	I-D15-F40-2	32	2,1		III-D10-F20-1	32	3,61
3	I-D5-F60-1	28	4,08		III-D10-F20-2	32	3,77
	I-D5-F60-2	28	4,01		III-D15-F20-1	32	3,52
	I-D10-F60-1	28	2,4		III-D15-F20-2	32	2,5
	I-D10-F60-2	28	2,53	8	III-D5-F40-1	28	5,02
	I-D15-F60-1	28	2,33		III-D5-F40-2	28	5,97
	I-D15-F60-2	28	2,36		III-D10-F40-1	28	3,62
4	II-D5-F20-1	28	4,43		III-D10-F40-2	28	4,09
	II-D5-F20-2	28	4,52		III-D15-F40-1	28	3,08
	II-D10-F20-1	28	2,36		III-D15-F40-2	28	3,26
	II-D10-F20-2	28	2,57	9	III-D5-F60-1	33	6,18
	II-D15-F20-1	28	3,25		III-D5-F60-2	33	6,12
	II-D15-F20-2	28	2,11		III-D10-F60-1	33	4,43
5	II-D5-F40-1	28	4,4		III-D10-F60-2	33	4,41
	II-D5-F40-2	28	4,34		III-D15-F60-1	33	2,81
	II-D10-F40-1	28	3,18		III-D15-F60-2	33	3,28

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1412826/CA

As resistências à tração médias são mostradas na Tabela 4.8, onde estão separadas por série e por diâmetro.

Tabela 4.8 – Resistência à tração média.

CP	Quantidade de corpo de prova	$f_{td,i}$ (MPa)	CP	Quantidade de corpo de prova	$f_{td,i}$ (MPa)
Série 1-D5	2	3,03	Série 6-D5	2	4,02
Série 1-D10	2	2,09	Série 6-D10	2	2,88
Série 1-D15	2	1,93	Série 6-D15	2	2,46
Série 2-D5	2	4,58	Série 7-D5	2	4,69
Série 2-D10	2	2,95	Série 7-D10	2	3,69
Série 2-D15	2	1,93	Série 7-D15	2	3,17
Série 3-D5	2	4,05	Série 8-D5	2	5,50
Série 3-D10	2	2,47	Série 8-D10	2	3,86
Série 3-D15	2	2,35	Série 8-D15	2	3,17
Série 4-D5	2	4,48	Série 9-D5	2	6,15
Série 4-D10	2	2,47	Série 9-D10	2	4,42
Série 4-D15	2	2,68	Série 9-D15	2	3,05
Série 5-D5	2	4,37			
Série 5-D10	2	2,74			
Série 5-D15	2	2,59			

4.2.2.4 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade longitudinal do concreto foi obtido por meio de ensaios de acordo com as recomendações da NBR 8522–2008 (Figura 4.10). Para cada concretagem foram moldados dois corpos de prova cilíndrico de dimensão 10 cm x 20 cm de acordo com a NBR 5738–1994. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC-Rio com o mesmo equipamento utilizado nos experimentos descritos nas seções 4.2.2.2 e 4.2.2.3

A fim de se avaliar as deformações específicas do concreto durante o ensaio foram utilizados dois extensômetros elétricos de resistência (EER) com comprimento de 5 cm cada (Figura 4.9). Os EER foram colados à meia altura do corpo de prova em posições diametralmente opostas.

O procedimento adotado para se determinar o módulo de elasticidade do concreto foi a metodologia “A” prescrita na NBR 8522–2008, que simula a estrutura em seu primeiro carregamento, fornece o módulo de deformação secante e permite que se trace o diagrama tensão-deformação específica.

A previsão da força de ruptura foi obtida para cada série por meio de ensaios de resistência à compressão.

Primeiramente foi realizada a centralização do corpo de prova, seguida da aplicação de um carregamento crescente à velocidade de 0,50 MPa/s, com variação máxima de $\pm 0,05$ MPa, efetuando pausas de 60 segundos entre cada estágio de carregamento alternando entre a aplicação de carga de $0,3 f_c$ e 0,5 MPa, como orienta a NBR 8522 – 2008, fazendo-se quatro leituras para a primeira carga e três para a segunda, prosseguiu-se o carregamento do corpo de prova até atingir a ruptura.

O módulo de deformação secante é dado por:

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - \sigma_{0,5}}{\varepsilon_b - \varepsilon_{0,5}} 10^{-3} \quad 4.2$$

onde

E_{ci} – módulo de elasticidade (GPa);

σ_b – tensão correspondente a $0,3 f_c$ (MPa);

$\sigma_{0,5}$ – tensão mais próxima de 0,5 MPa no corpo de prova;

ε_b – deformação específica média dos corpos de prova sob tensão maior (m/m);

$\varepsilon_{0,5}$ – deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão básica de 0,5MPa (m/m).

A NBR 8522 – 2008 determina que a resistência à compressão $f_{c,ef}$ obtida ao fim dos ensaios para obtenção do módulo de elasticidade não deve diferir em mais de 20% da resistência à compressão calculada no item 4.2.1.2. A Tabela 4.9 apresenta os valores de $f_{c,ef}$ calculados.

O valor de $f_{c,ef}$ obtido no corpo de prova CP1 da série 6 não atende às especificações exigidas pela NBR 8522 – 2008, apresentando valor menor que 80% da resistência à compressão calculada previamente, portanto este corpo de prova será descartado para obtenção do módulo de elasticidade. A Tabela 4.10 apresenta os valores dos módulos de elasticidade calculados a partir da equação 4.2 para cada série.

Tabela 4.9 – Valores de resistência à compressão obtidos nos ensaios para obtenção do módulo de elasticidade.

Grupo	Corpo de Prova	Força Máxima (kN)	$f_{c,ef}$ (MPa)
1	CP1	210,83	26,84
	CP2	267,70	34,08
2	CP1	254,70	32,43
	CP2	242,58	30,89
3	CP1	214,52	27,31
	CP2	198,01	25,21
4	CP1	337,00	42,91
	CP2	271,75	34,60
5	CP1	300,00	38,20
	CP2	307,39	39,14
6	CP1	221,50	28,20
	CP2	318,50	40,55
7	CP1	378,08	48,14
	CP2	349,41	44,49
8	CP1	397,23	50,58
	CP2	378,98	48,25
9	CP1	394,10	50,18
	CP2	420,13	53,49

Tabela 4.10 – Módulo de elasticidade.

Série	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E_{ci} (Gpa)	32,34	29,84	19,84	23,19	27,58	25,60	31,49	27,08	29,98



Figura 4.10 – Extensômetro.



Figura 4.11 – Ensaio de módulo de elasticidade.

4.3 Confecção dos corpos de prova

4.3.1 Formas

Os corpos de prova cilíndricos foram confeccionados em formas metálicas e untadas com óleo para facilitar a retirada do concreto da forma. (Figura 4.12).

Os corpos de prova de tração direta foram confeccionados em formas de silicone e também foram untadas com óleo (Figura 4.13).



Figura 4.12 – Formas metálicas.



Figura 4.13 – Forma de silicone.

4.3.2 Corpos de prova de concreto

Os corpos de prova de compressão diametral tinham as seguintes dimensões: 5 cm x 10 cm (Figura 4.14a), 10 cm x 20 cm (Figura 4.14b) e 15 cm x 30 cm (Figura 4.14c) e o corpo de prova de tração direta tinha as dimensões mostradas na Figura 4.15.

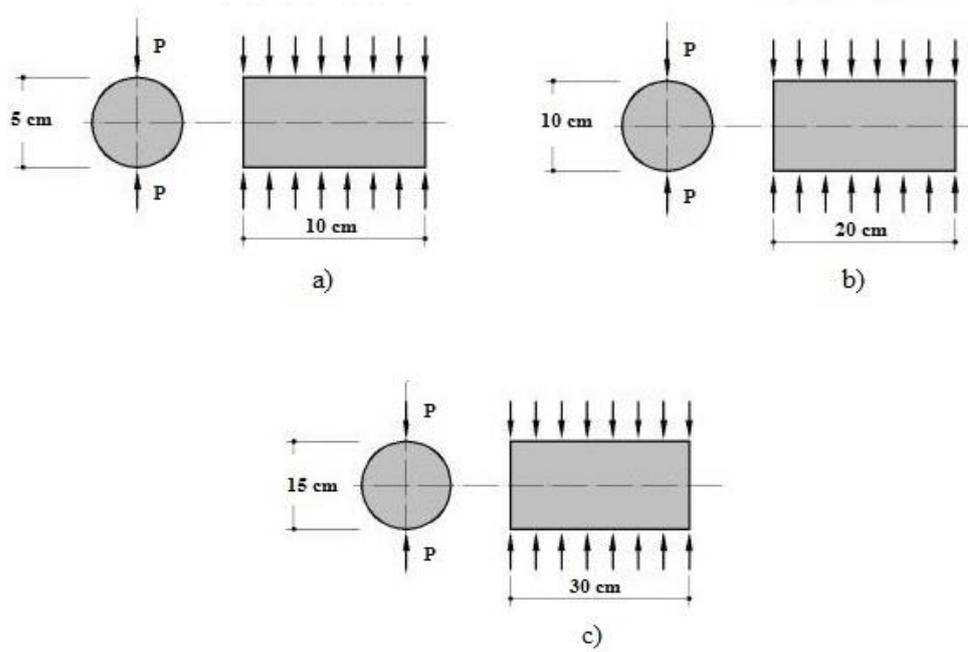


Figura 4.14 – Corpos de prova: a) CP 5 cm x 10 cm; b) CP 10 cm x 20 cm; c) CP 15 cm x 30 cm.

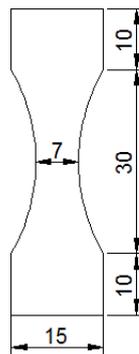


Figura 4.15 – Corpo de prova para o ensaio de tração direta.

4.3.3 Concretagem

As concretagens dos corpos de prova ocorreram no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio (LEM) nos meses de agosto e setembro.

O concreto foi lançado manualmente.

Os corpos de prova foram retirados das formas dois dias após cada concretagem e ficaram em condições ambientes no laboratório até as datas dos ensaios.

4.4 Esquema dos ensaios

Para realização do programa experimental foram ensaiados 72 corpos de prova de concreto, os quais foram divididos em nove séries, cada uma delas composta por dois corpos de prova de dimensões 5 cm x 10 cm, dois de 10 cm x 20 cm, dois de 15 cm x 30 cm e dois corpos de prova para tração direta.

No ensaio de tração direta é obtida a tração do concreto mostrada na Tabela 4.4 descrita no item 4.2.1.1. O equipamento utilizado nesse ensaio foi a máquina da MTS com capacidade máxima de 1000 kN (Figura 4.16).

No ensaio de compressão diametral é obtida a tração indireta dos corpos de prova por meio da expressão 4.1 descrita no item 4.2.1.3. O equipamento utilizado nesse ensaio foi a máquina da MTS com capacidade máxima de 500 kN (Figura 4.17).

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.



Figura 4.16 – Máquina da MTS com capacidade máxima de 1000 kN.



Figura 4.17 – Máquina da MTS com capacidade máxima de 500 kN.

5 Apresentação e análise dos resultados

5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados experimentais obtidos nos ensaios descritos no Capítulo 4.

5.2 Apresentação dos grupos

5.2.1 Grupo I

O Grupo I é composto por três séries de concretagem divididas de acordo com o consumo de fibras. A primeira tem 20 kg/m³ de fibras em sua composição, assim como as séries 2 e 3 têm 40 kg/m³ e 60 kg/m³ respectivamente. Todas têm a mesma dosagem calculada para atingir uma f_c de 20 MPa aos 28 dias. As datas das betonadas e seus respectivos ensaios, assim como suas resistências à compressão aos 28 dias são mostrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Data dos ensaios séries 1, 2 e 3.

Série	Data concreto	Data ensaio	Idade	f_c (MPa)
1	18/ago	17/set	30	31,31
2	21/ago	22/set	32	30,66
3	25/ago	22/set	28	27,55

Considerando-se a média das três séries têm-se para o grupo I uma resistência à compressão de 29,84 MPa. Essa será a resistência considerada para o grupo I para as análises de resultados.

5.2.2 Grupo II

O Grupo II é composto por três séries de concretagem divididas de acordo com o consumo de fibras. Para dar continuidade as séries anteriores, são denominadas de séries 4, 5 e 6. A série 4 tem 20 kg/m³ de fibras em sua composição, assim como as séries 5 e 6 têm 40 kg/m³ e 60 kg/m³, respectivamente. Todas têm a mesma dosagem calculada para atingir uma f_c de 30 MPa aos 28 dias. As datas das betonadas e seus respectivos ensaios, assim como suas resistências à compressão aos 28 dias são mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Data dos ensaios séries 4, 5 e 6.

Série	Data concreto	Data ensaio	Idade	f_c (MPa)
4	27/ago	24/set	28	34,69
5	01/set	29/set	28	40,59
6	08/set	06/out	28	39,59

Considerando-se a média das três séries têm-se para o grupo II uma resistência à compressão de 38,29 MPa. Essa será a resistência considerada para o grupo II para as análises de resultados.

5.2.3 Grupo III

O Grupo III é composto por três séries de concretagem divididas de acordo com o consumo de fibras. Dando continuidade as séries anteriores, são denominadas de séries 7, 8 e 9. A série 7 tem 20 kg/m³ de fibras em sua composição, assim como as séries 8 e 9 têm 40 kg/m³ e 60 kg/m³, respectivamente. Todas têm a mesma dosagem calculada para atingir uma f_c de 50 MPa aos 28 dias. As datas das betonadas e seus respectivos ensaios, assim como as suas resistências à compressão são mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Data dos ensaios séries 7, 8 e 9.

Série	Data concreto	Data ensaio	Idade	f_c (MPa)
7	11/set	13/out	32	47,91
8	15/set	13/out	28	48,09
9	17/set	20/out	33	50,41

Considerando-se a média das três séries têm-se para o grupo III uma resistência à compressão de 48,80 MPa. Essa será a resistência considerada para o grupo III para as análises de resultados.

O acréscimo de resistência do grupo I para o II foi de 28,31% e do grupo II para o III foi de 27,44%.

5.3 Apresentação dos resultados

5.3.1 Compressão

Como mencionado o grupo I foi dosado para uma f_c de 20 MPa aos 28 dias, porém, atingiu 29,84 MPa. O mesmo ocorre para o grupo II, a dosagem foi realizada para um concreto de 30 MPa e atingiu 38,29 MPa, acréscimo de 27,63%. O grupo III que foi dosado para 50 MPa ficou com 48,80 MPa, mesmo assim bem próximo do esperado. Isso pode estar relacionado a dois fatores:

- o cimento utilizado foi o CP II-32 o que dificulta uma dosagem para 50 MPa;
- segundo Helene (93) mesmo com um fator água cimento bem reduzido é difícil alcançar uma resistência de 50 MPa com o cimento CP II-32 .

Não se pode relacionar o aumento da resistência à compressão com o consumo de fibras pois não foi feita uma série de referência para comparação.

5.3.2 Tensão de tração por compressão diametral

Tabela 5.4 – Razão da tensão de tração por compressão diametral.

	CONSUMO			Grupos			Diâmetro				
	Δa	Δb	Δc		Δd	Δe	Δf		Δg	Δh	Δi
I-D5	1,51	0,88	1,34	D5-F20	1,48	1,05	1,55	I-F20	0,69	0,92	0,64
I-D10	1,41	0,84	1,18	D10-F20	1,18	1,50	1,77	I-F40	0,64	0,77	0,50
I-D15	1,17	1,04	1,22	D15-F20	1,39	1,12	1,56	I-F60	0,61	0,95	0,58
II-D5	0,98	0,92	0,90	D5-F40	0,96	1,26	1,20	II-F20	0,55	1,09	0,60
II-D10	1,11	1,05	1,17	D10-F40	0,93	1,41	1,31	II-F40	0,63	0,95	0,59
II-D15	0,97	0,95	0,92	D15-F40	1,14	1,22	1,40	II-F60	0,72	0,86	0,61
III-D5	1,17	1,12	1,31	D5-F60	0,99	1,53	1,52	III-F20	0,79	0,82	0,64
III-D10	1,04	1,15	1,20	D10-F60	1,17	1,54	1,79	III-F40	0,70	0,82	0,58
III-D15	1,05	0,96	1,01	D15-F60	1,05	1,24	1,30	III-F60	0,72	0,69	0,50

Na Tabela 5.4 tem-se a razão das tensões médias de tração, comparadas entre consumo, grupo e diâmetro, considerando-se que:

- $\Delta a = F_{40}/F_{20}$ – razão entre as tensões de tração de 40 e 20 kg/m³;
- $\Delta b = F_{60}/F_{40}$ – razão entre as tensões de tração de 60 e 40 kg/m³;
- $\Delta c = F_{60}/F_{20}$ – razão entre as tensões de tração de 60 e 20 kg/m³;
- $\Delta d = II/I$ – razão entre as tensões de tração dos grupos II e I;
- $\Delta e = III/II$ – razão entre as tensões de tração dos grupos III e II;
- $\Delta f = III/I$ – razão entre as tensões de tração dos grupos III e I;
- $\Delta g = D_{10}/D_5$ – razão entre as tensões de tração dos diâmetros 10 e 5;
- $\Delta h = D_{15}/D_{10}$ – razão entre as tensões de tração dos diâmetros 15 e 10;
- $\Delta i = D_{15}/D_5$ – razão entre as tensões de tração dos diâmetros 15 e 5.

Da Tabela 5.7 tem-se:

- a Δa do grupo I teve grande aumento da tensão de tração, sendo mais significativo em diâmetros menores, já Δb houve uma redução para os D5 e D10, e um aumento de somente 4% para a D15, o Δc teve um aumento significativo da tensão de tração;
- a Δa do grupo II não teve aumento significativo da tensão de tração para os D5 e D15, o D10 teve 11% de aumento, já a Δb houve decréscimo para D5 e D10, aumentando somente 5% no D15, a Δc somente aumentou no D10, aumento de 17%;
- a Δa do grupo III nota-se um aumento de 17% da tensão de tração para o D5 ficando o D15 e o D10 na faixa de 5% de aumento, já a Δb houve decréscimo para D15 e aumento de 12% e 15% para D5 e D10 respectivamente, a Δc teve acréscimo maior para diâmetros menores;
- Δd – para F20 nota-se um acréscimo significativo sendo maior no D5, para F40 e F60 houve comportamentos similares;
- Δe – houve um aumento significativo para todos os consumos de fibra, o mesmo aconteceu com o Δf ;
- $\Delta h > \Delta g$ é maior em todos os casos exceto no III-F60.

Uma comparação com a tensão de compressão axial utilizando-se a mesma legenda dos Δ^* (mesmos índices referindo-se à tensão de compressão) tem-se os

dados da Tabela 5.5. Os ensaios de compressão simples só ocorreram no corpo de prova de 10 cm de diâmetro, portanto, só é possível comparar o efeito do consumo e dos grupos.

Tabela 5.5 – Razão entre as tensões de compressão diametral e axial.

CONSUMO				Grupos			
Compressão simples							
	Δa	Δb	Δc		Δd	Δe	Δf
I-D10	0,98	0,90	0,88	D10-F20	1,11	1,38	1,53
II-D10	1,17	0,98	1,14	D10-F40	1,32	1,18	1,57
III-D10	1,00	1,05	1,05	D10-F60	1,44	1,27	1,83

Na Tabela 5.5, nota-se que para todos os grupos os Δa , b e c , na compressão simples, não tiveram alterações significativa. As razões Δd e f aumentaram de acordo com o consumo. A razão Δe é maior que 1 para todos os casos, porém, não aumenta com o consumo.

5.3.3

Gráficos f_t x consumo de fibras

Os gráficos das Figuras 5.1 a 5.14 ilustram os resultados dos corpos de prova nos ensaios realizados de acordo com o item 4.2.1.2 e 4.2.1.3.

Os parâmetros que são analisados são o diâmetro e o grupo. A resistência à tração por compressão diametral é estudada em função do aumento do consumo de fibra. A nomenclatura dos gráficos das Figuras 5.1 a 5.14 é:

- I, II ou III – resistência à compressão;
- D5, D10 e D15 – diâmetro do corpo de prova.

Todas as siglas utilizadas são descritas no Capítulo 4.

Por exemplo o gráfico da Figura 5.1 apresenta o comportamento da resistência à tração por compressão diametral em corpos de prova de diâmetro 5 cm do grupo I (29,84 MPa), em função do consumo de fibras.

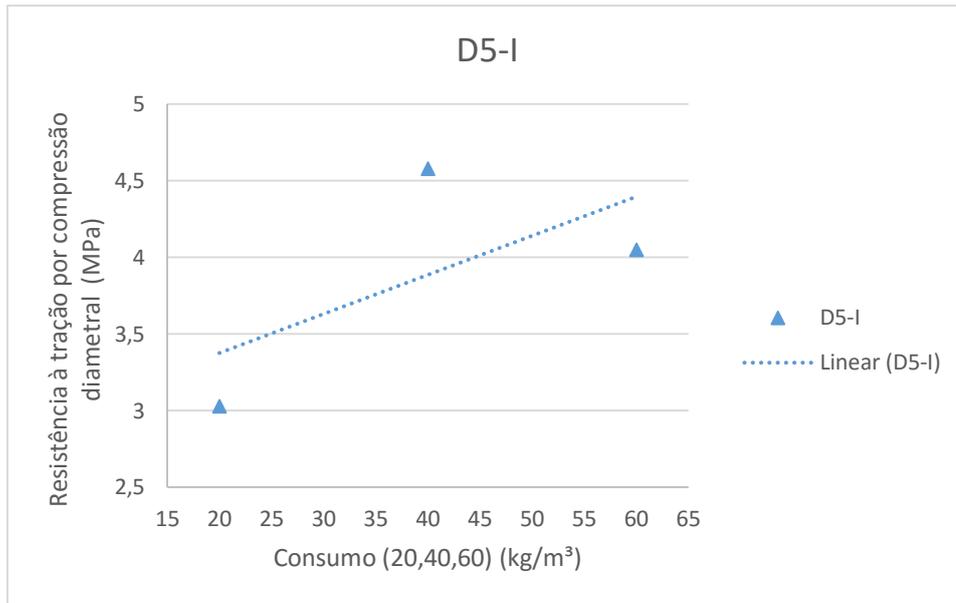


Figura 5.1 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, D5-I.

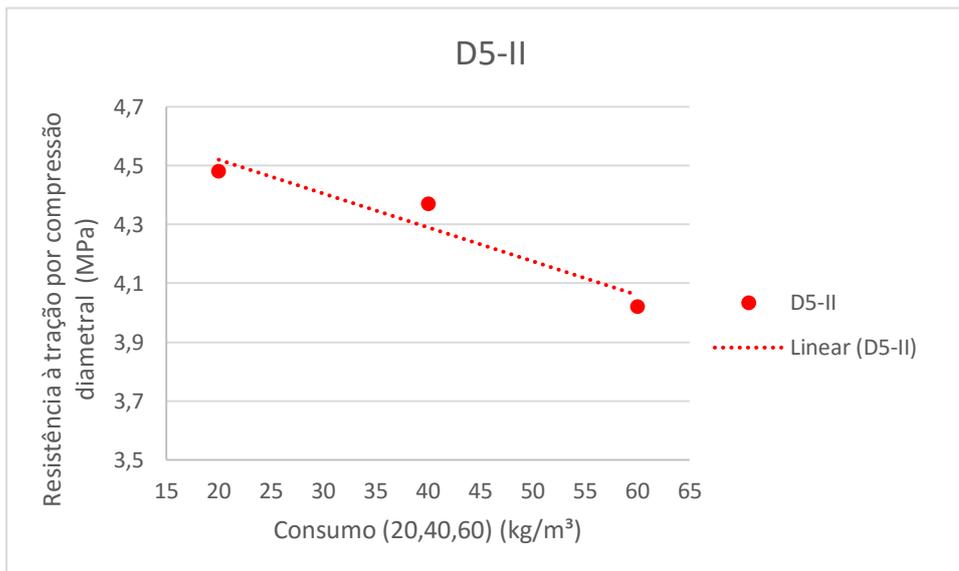


Figura 5.2 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, D5-II.

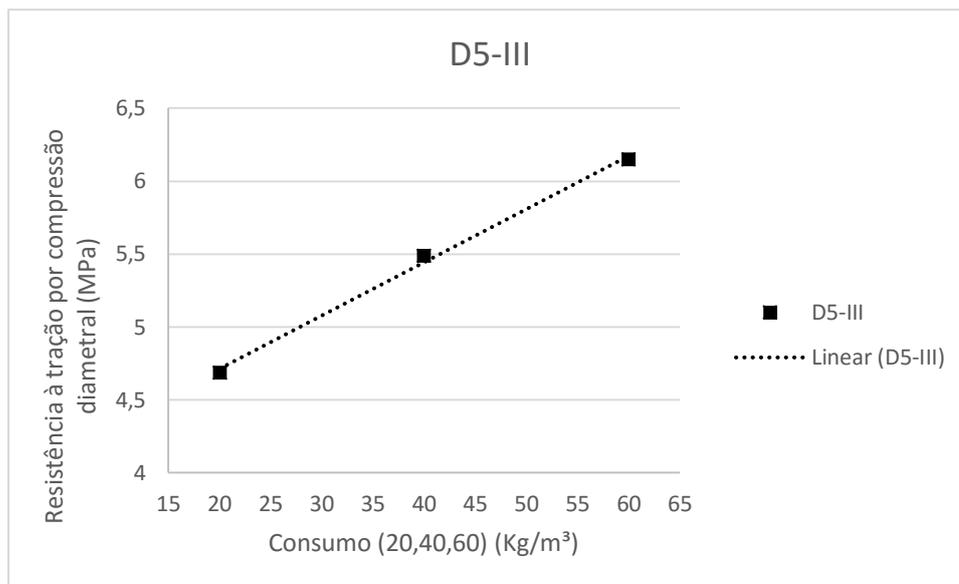


Figura 5.3 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, D5-III.

Nas Figuras 5.1 e 5.3 observa-se que o acréscimo de resistência é praticamente linear, principalmente no gráfico da Figura 5.3, com bom ajuste das curvas de tendências.

Na Figura 5.2 não se pode afirmar que a curva de ajuste tenha uma tendência decrescente, já que a variação de resistência é de 0,46 MPa entre o primeiro e o último corpo de prova com 20 kg/m³ e 60 kg/m³, respectivamente. Levando-se em conta apenas um corpo de prova ensaiado de cada consumo, sem retirar a média, esse ajuste apresenta um comportamento praticamente linear e crescente igualmente dos outros diâmetros. Observa-se esse ajuste na Figura 5.4. Verifica-se que somente dois corpos de cada diâmetro em cada betonada foi insuficiente para obter um resultado satisfatório.

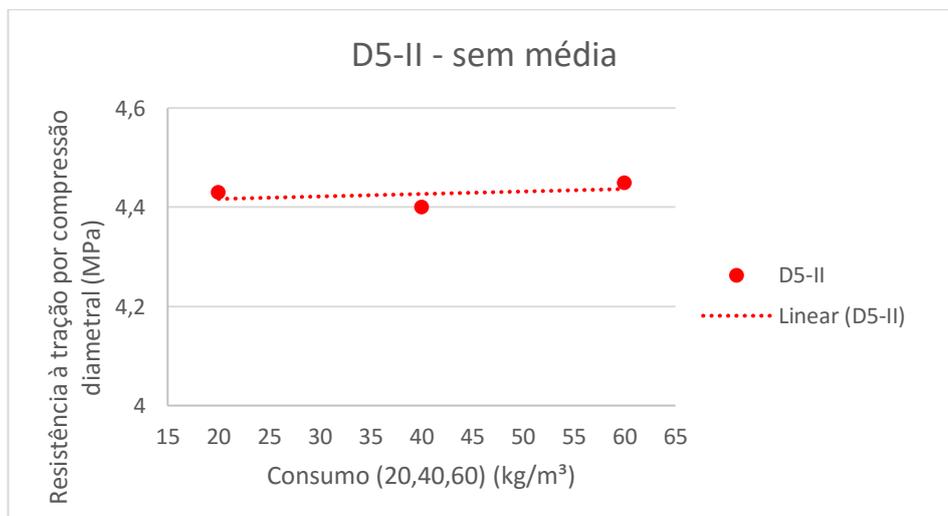


Figura 5.4 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, D5-II – sem média.

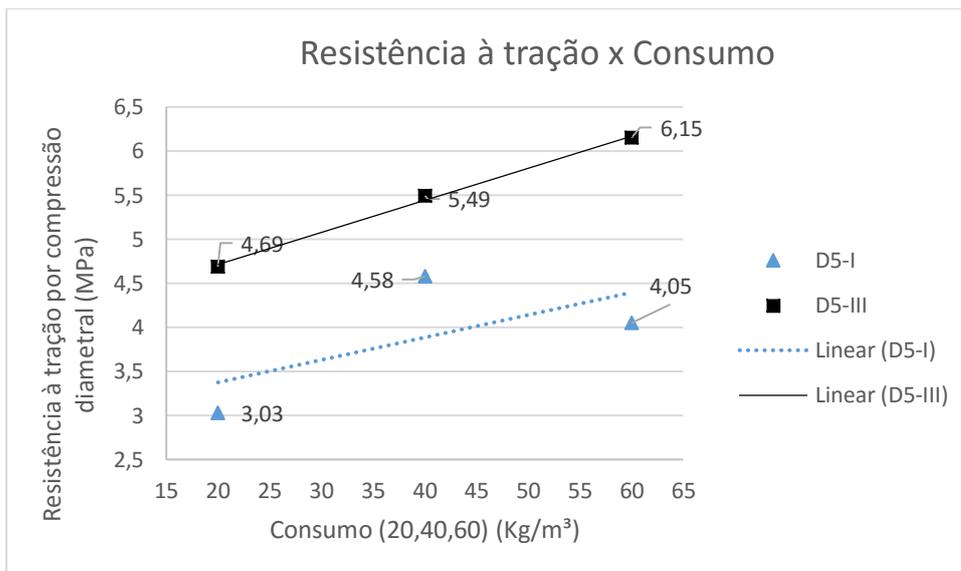


Figura 5.5 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, comparativo D5 grupos I e III.

No gráfico da Figura 5.5 tem-se a comparação entre os grupos, sem a comparação com o grupo II devido ao decréscimo que ocorreu na Figura 5.2. Observa-se que quanto maior é a f_c maior é a resistência à tração por compressão diametral resistida pelo corpo de prova. Do grupo I para o III houve um acréscimo de 63,53% de resistência à compressão, 54,78 % para F20, de 19,86% para F40 e 51,85 % para F60 de resistência à tração.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1412826/CA

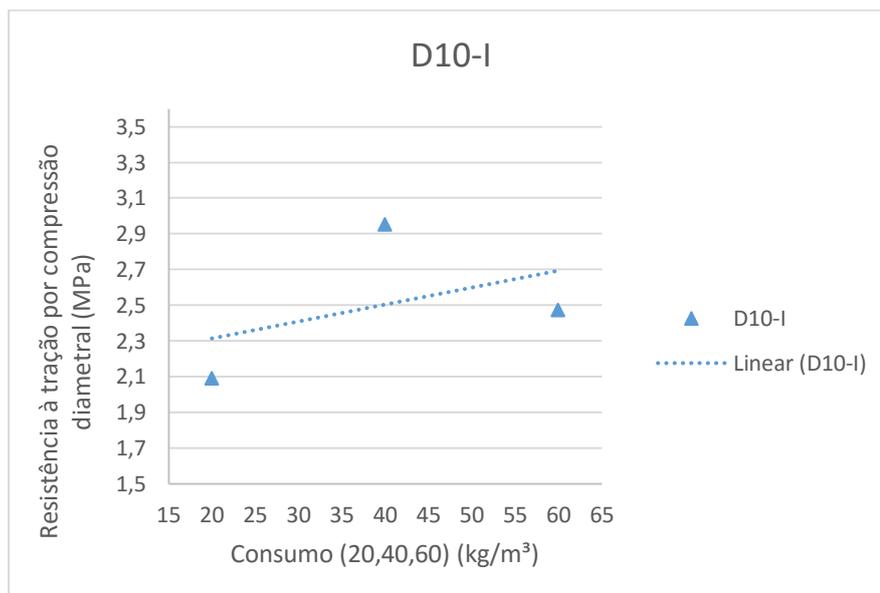


Figura 5.6 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, D10-I.

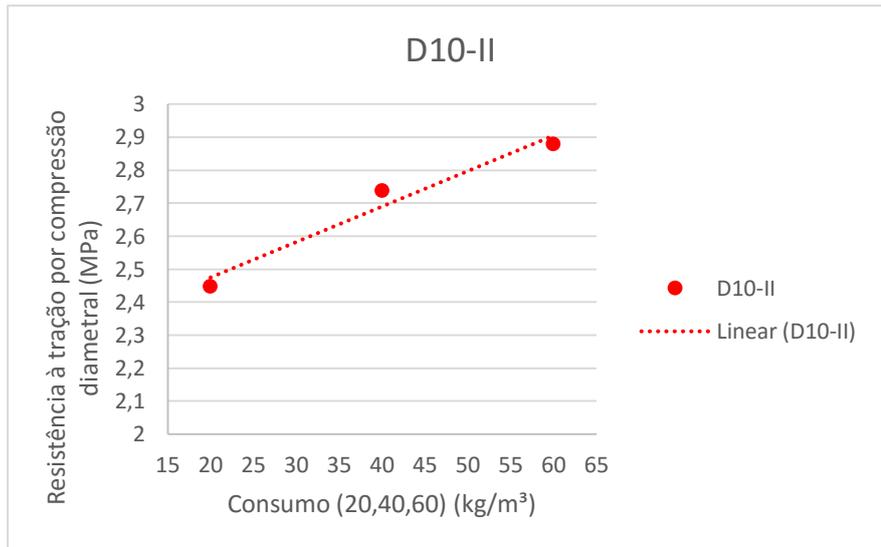


Figura 5.7 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, D10-II.

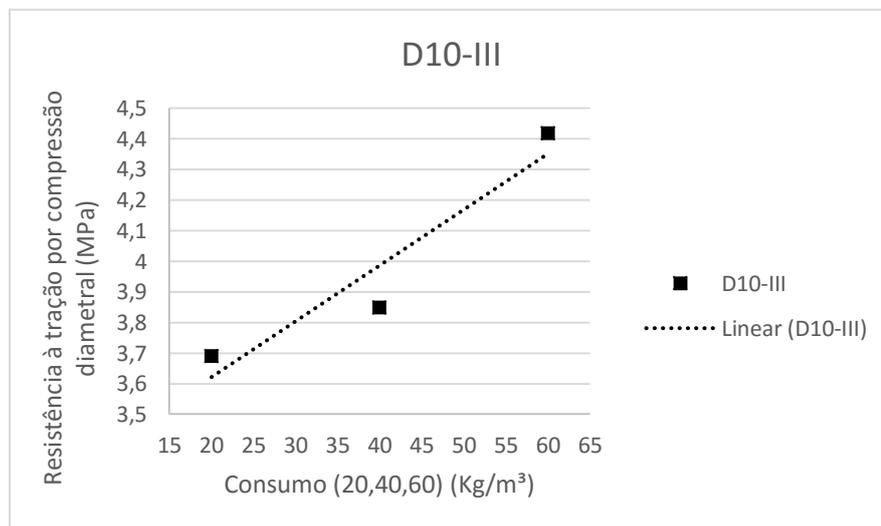


Figura 5.8 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, D10-III.

Nos gráficos das Figuras 5.6 a 5.8 pode-se observar que o acréscimo de resistência é praticamente linear, com bom ajuste da curva de tendência.

Os resultados mostrados na Figura 5.7 foram obtidos com corpos de prova cujas betonadas foram as mesmas dos corpos de prova cujos resultados constam na Figura 5.2, porém, não ocorreram as discrepâncias observadas.

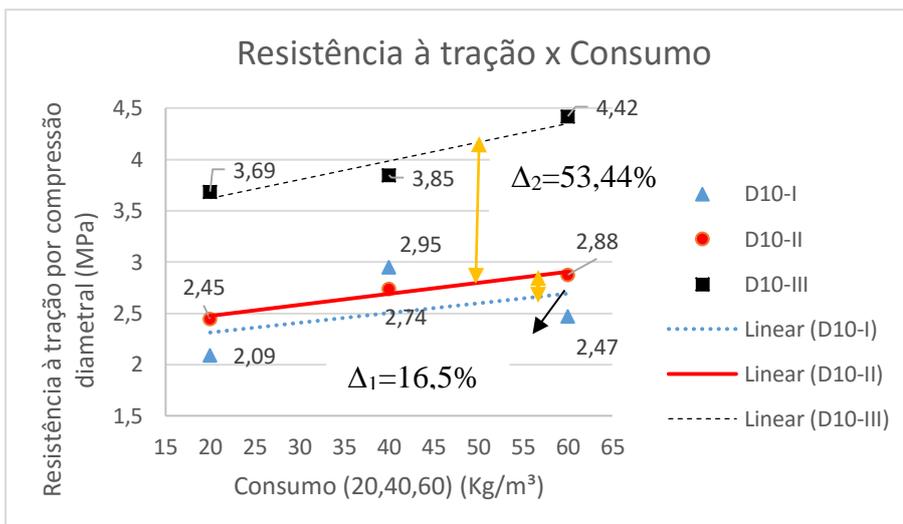


Figura 5.9 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, comparativo D10 grupos I, II e III.

No gráfico da Figura 5.9 tem-se uma comparação dos corpos de prova D10, entre os grupos I, II e III. Observa-se que quanto maior é a f_c maior é a resistência à tração por compressão diametral resistida pelo corpo de prova. O acréscimo de resistência foi praticamente linear. Observou-se que o aumento de resistência é mais acentuado a partir da $f_c = 38,29$ MPa (grupo II). Do grupo I para o II o aumento foi de 16,5 % já do II para o III a resistência à tração mais que dobrou, tendo um aumento de 53,44%, ambos para o consumo F60. Nesse caso a fibra influenciou o ganho de resistência, quanto maior foi o consumo de fibras maior o delta.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1412826/CA

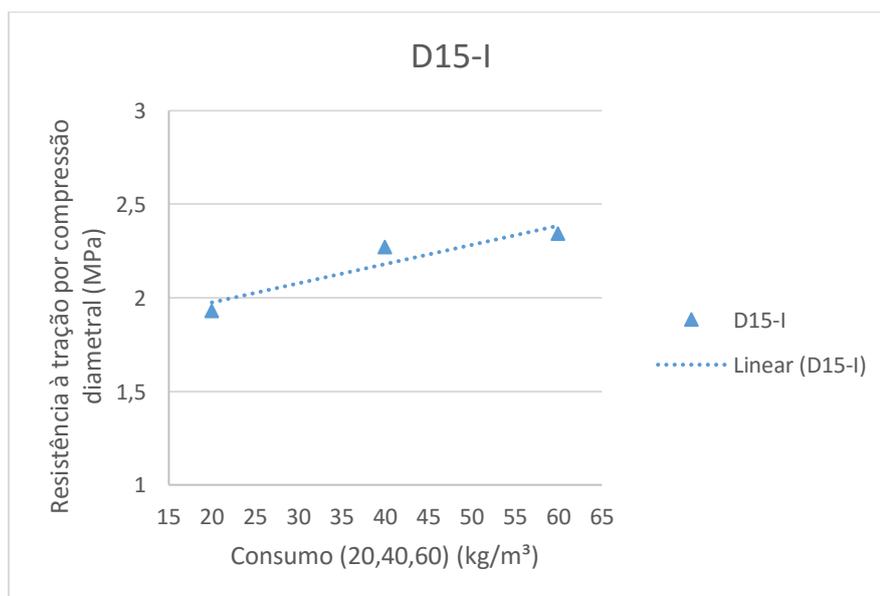


Figura 5.10 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, D15-I.

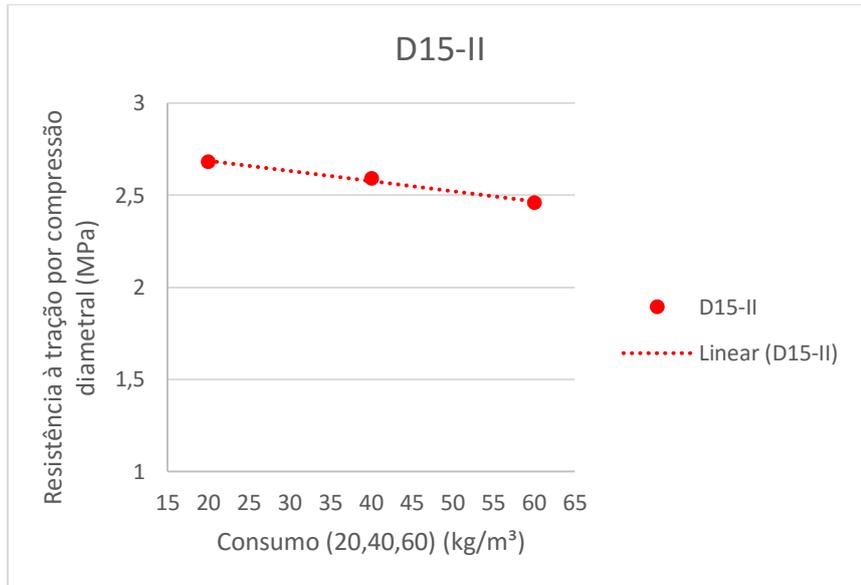


Figura 5.11 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, D15-II.

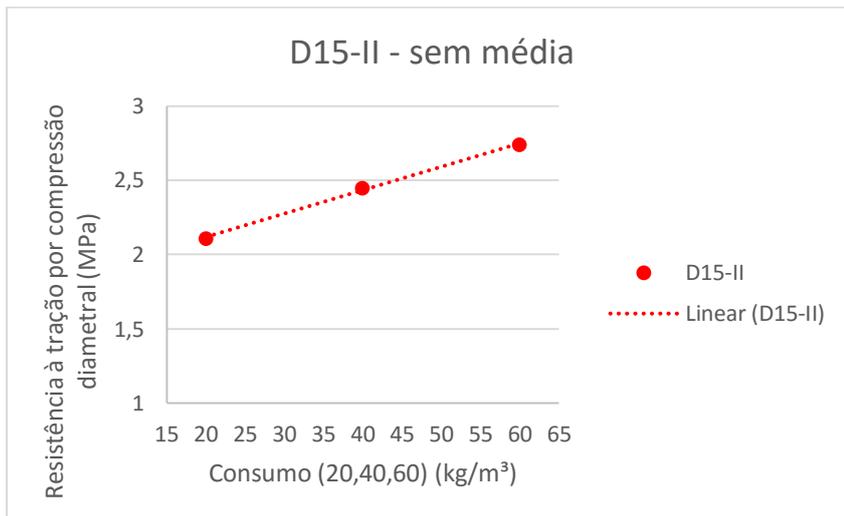


Figura 5.12 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, D15-II – sem média.

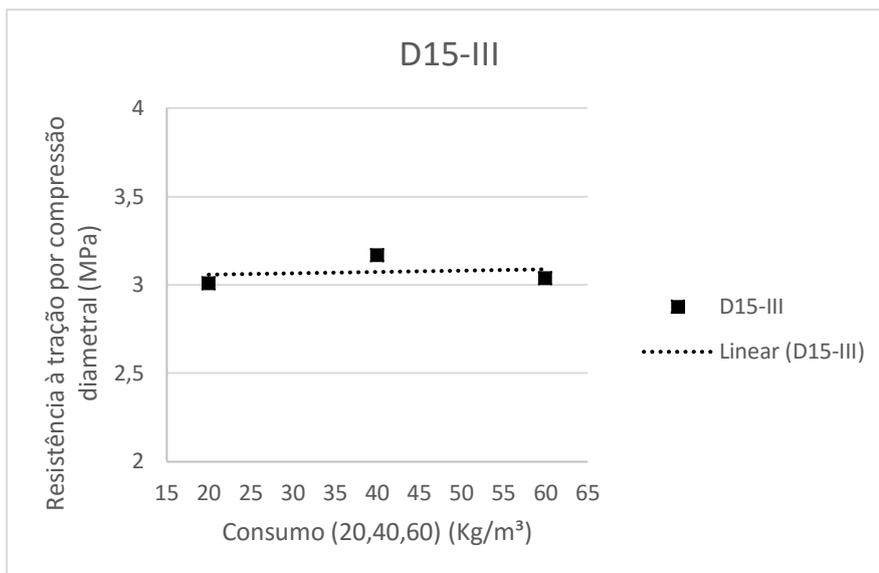


Figura 5.13 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, D15-III.

Nos gráficos das Figuras 5.10 e 5.12 observa-se um bom ajuste da curva de tendência. Na Figura 5.11 ocorreu o mesmo problema relativo aos dados mostrados na Figura 5.2, não se pode afirmar que a curva de ajuste tenha uma tendência decrescente, já que a variação de resistência é de 0,22 MPa entre o primeiro e o último corpo de prova com 20 kg/m³ e 60 kg/m³, respectivamente. Esse decréscimo pode ter sido ocasionado devido às diferentes betonadas de cada corpo de prova.

Sem utilizar a média dos corpos de prova como já feito anteriormente, tem-se o comportamento da Figura 5.12. Constata-se que é preciso mais corpos de prova para poder tirar a média e ter um bom resultado.

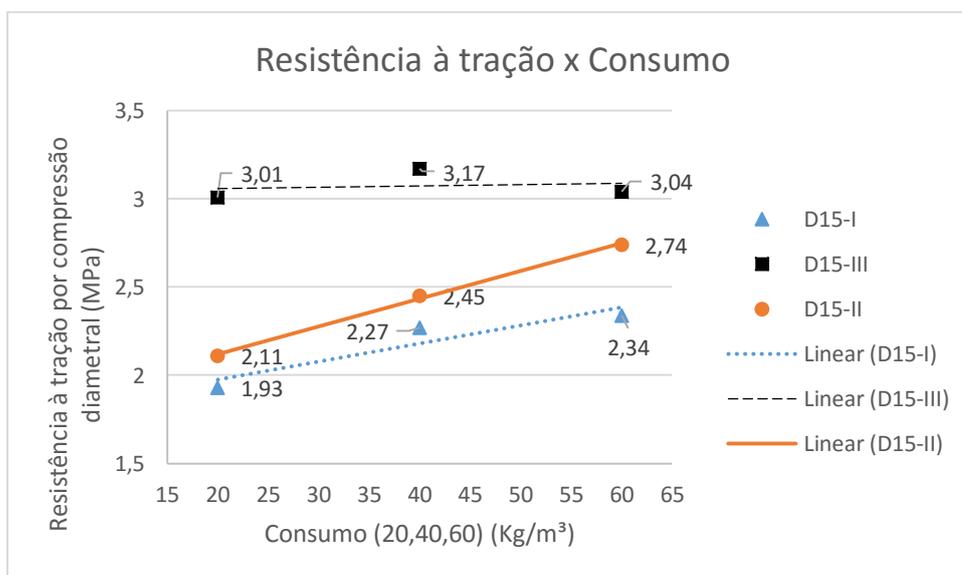


Figura 5.14 – Resistência à tração por compressão diametral x consumo, comparativo D15 grupos I e III.

No gráfico da Figura 5.14 tem-se uma comparação entre os grupos. Observa-se que quanto maior é a f_c maior é a resistência à tração por compressão diametral resistida pelo corpo de prova. Do grupo I para o III houve um acréscimo de resistência à tração de 55,95 % para F20, de 39,64% para F40 e 29,91 % para F60. O acréscimo de resistência à tração do grupo I para o III foi maior com menor quantidade de fibras, ou seja, para resistência à compressão mais alta o consumo elevado de fibra começa a não ter tanta influência na resistência à tração, nesse caso do corpo de prova de diâmetro 15 cm.

5.3.4 Gráficos f_t x grupos

Os gráficos das Figuras 5.15 a 5.26 apresentam os resultados dos corpos de prova dos ensaios realizados de acordo com o item 4.2.1.2 e 4.2.1.3.

Os parâmetros que são analisados são o diâmetro e o consumo de fibras. É estudada a resistência à tração por compressão diametral *versus* o grupo à qual pertence. A nomenclatura dos gráficos das Figuras 5.15 a 5.26 é:

- F20, F40 e F60 – Consumo de fibras;
- D5, D10 e D15 – diâmetro do corpo de prova.

Todas as siglas utilizadas são descritas no Capítulo 4.

A Figura 5.15 ilustra os dados obtidos para a resistência à tração por compressão diametral em corpos de prova de diâmetro 5 cm com 20 kg/m³ de fibras, variando a resistência à compressão (grupos I, II e III).

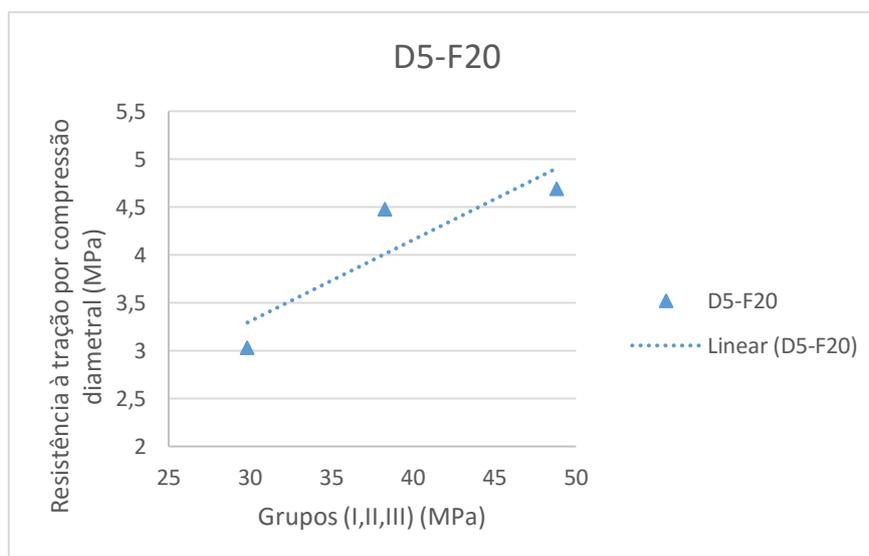


Figura 5.15 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, D5-F20.

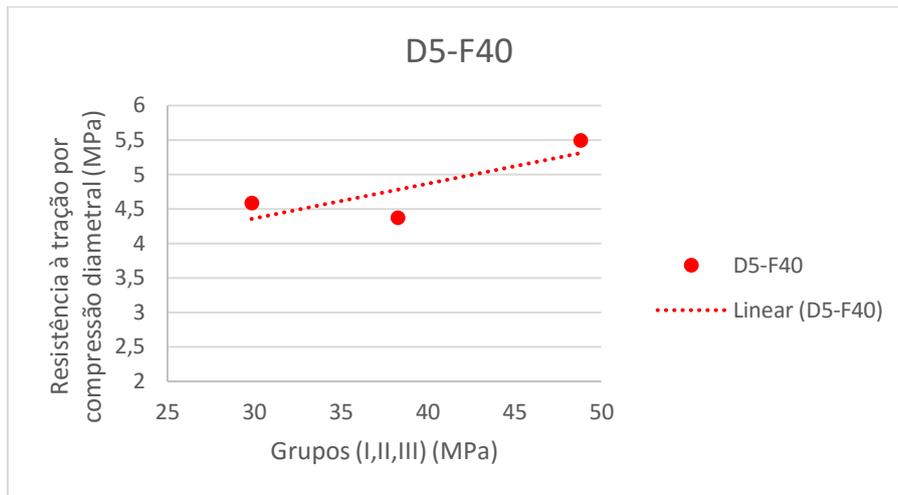


Figura 5.16 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, D5-F40.

Nos gráficos das Figuras 5.15 a 5.17 observa-se uma relação quase linear para todos os gráficos. Para um mesmo diâmetro e mesmo consumo de fibras quanto maior é a resistência à compressão maior é a resistência à tração por compressão diametral.

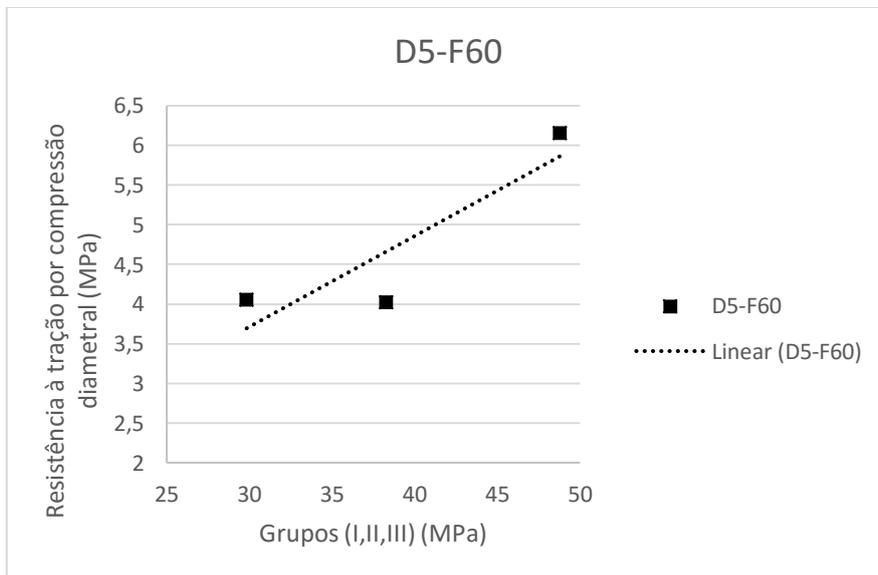


Figura 5.17 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, D5-F60.

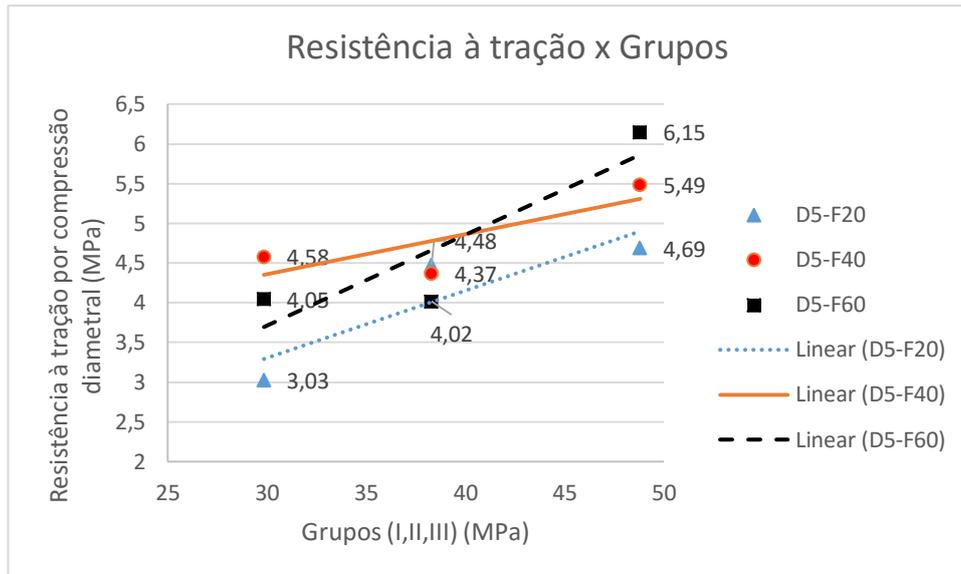


Figura 5.18 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, comparativo D5 consumo F20, 40 e 60.

Na Figura 5.18 observa-se que para o corpo de prova de 5 cm de diâmetro o consumo de fibras F20 gerou uma maior variação de resistência à tração com o aumento da resistência à compressão. Esse aumento foi de 54,78%. Para o grupo I, tem-se que a f_t de F40 é 10% maior que o F60, e 51,15 % maior que o F20, porém para o grupo III ocorre ao contrário, o F60 é 12% maior que o de F40 e 31,11% maior que o de F20.

Para o grupo II, observa-se que para os consumos de fibra houve uma variação de 11% somente. Nesse caso conclui-se que a resistência à compressão influenciou mais as curvas nos pontos F20 e F60.

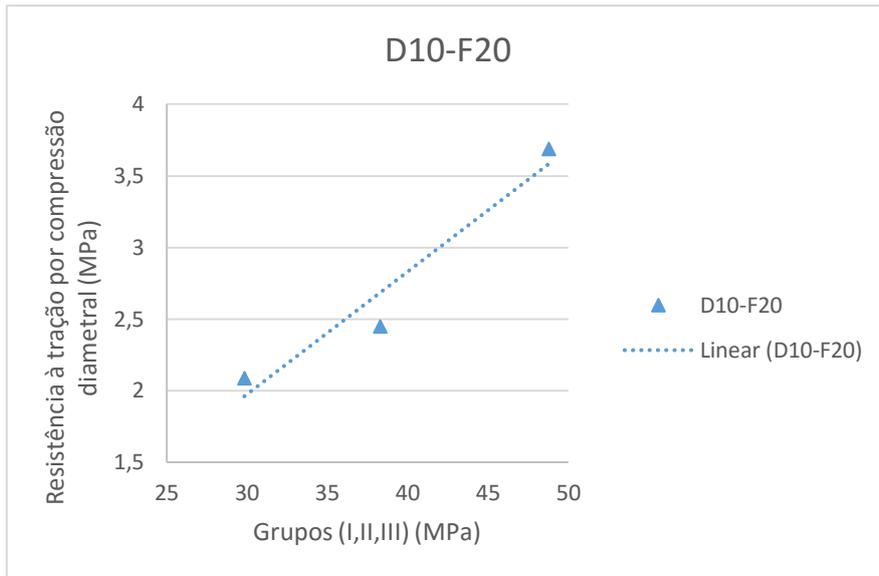


Figura 5.19 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, D10-F20.

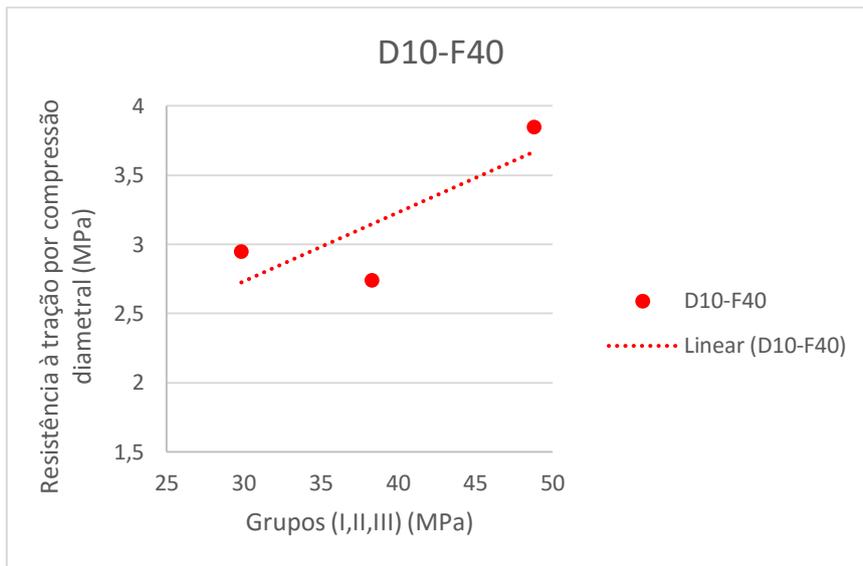


Figura 5.20 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, D10-F40.

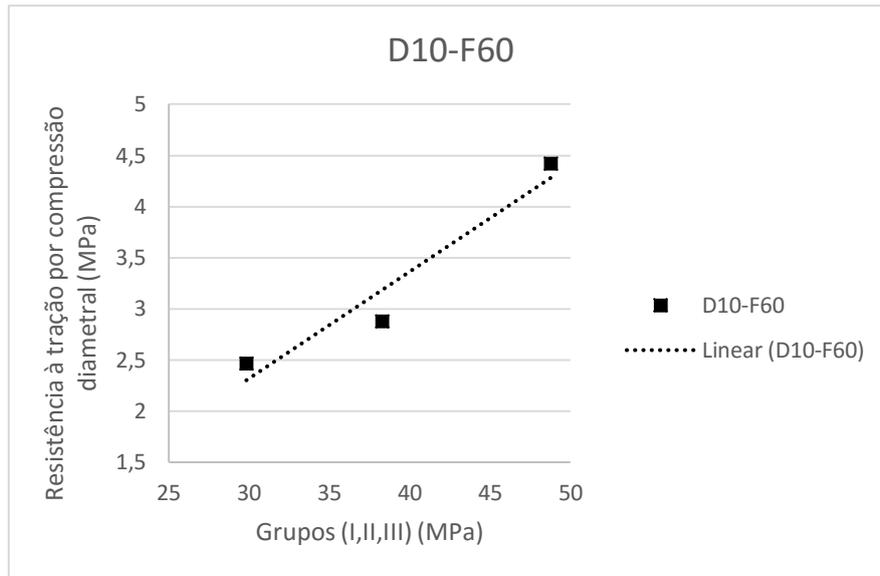


Figura 5.21 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, D10-F60.

Nos gráficos das Figuras 5.19 a 5.21 observa-se uma relação quase linear para todos os gráficos. Para um mesmo diâmetro e um mesmo consumo de fibras quanto maior é a resistência à compressão maior é a resistência à tração.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1412826/CA

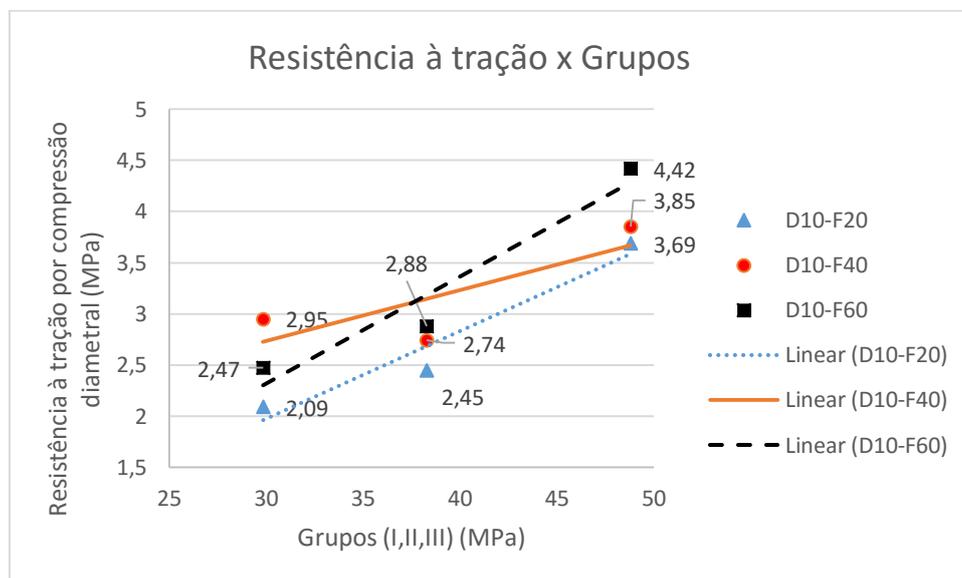


Figura 5.22 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, comparativo D10 consumo 20, 40 e 60.

Na Figura 5.22 verifica-se que para o corpo de prova de 10 cm de diâmetro o consumo de fibras F40 gerou uma menor variação de resistência à tração com o aumento da resistência à compressão. Esse aumento foi de 30%, os consumos F20 e F60 tiveram acréscimo de 76% e 78%, respectivamente.

Para o grupo I, observa-se que a f_t de F40 é 19% maior que o F60 e 41,14 % maior que o F20, porém, para o grupo III, o F60 é 14,80% maior que o F40 e 19,78% maior que o F20. Para o grupo II, tem-se que para os consumos de fibra houve somente uma variação de 17%.

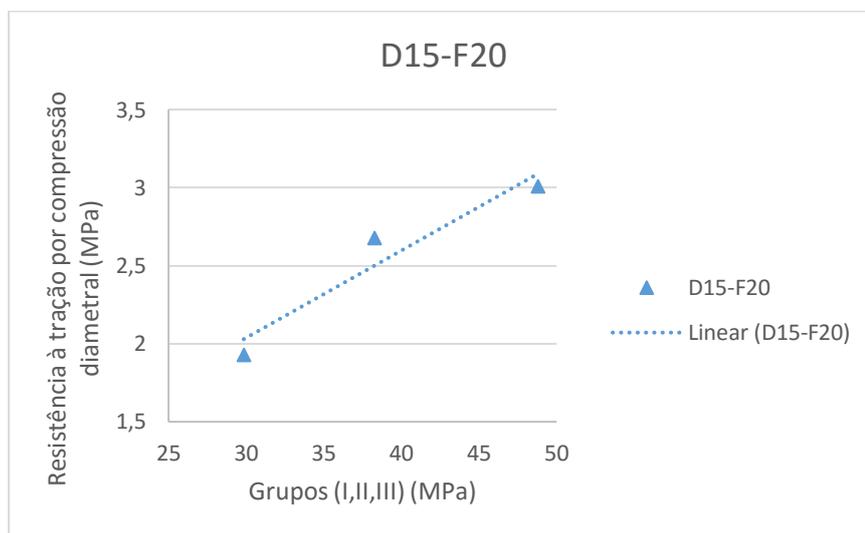


Figura 5.23 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, D15-F20.

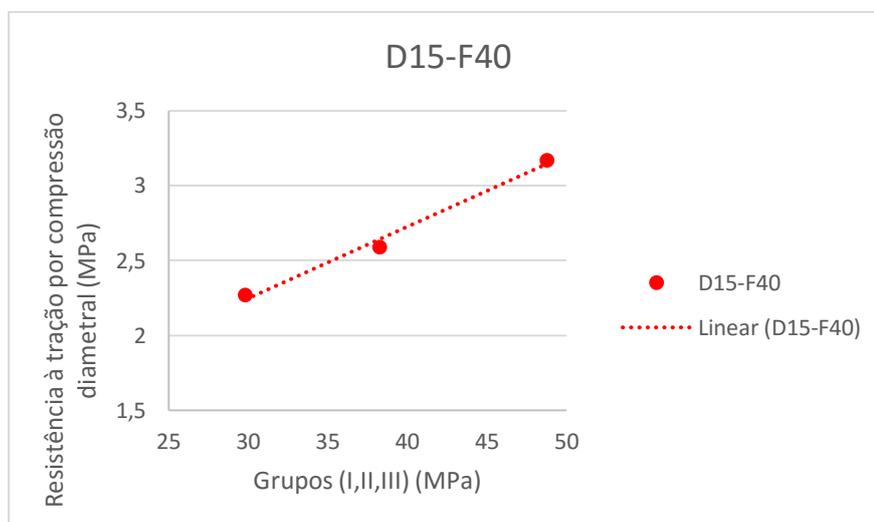


Figura 5.24 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, D15-F40.

Nos gráficos das Figuras 5.23 a 5.25 observa-se uma relação quase linear para todos os gráficos. Para um mesmo diâmetro e um mesmo consumo de fibras quanto maior é a resistência à compressão maior é a resistência à tração. A maior variação de resistência ocorre no consumo de fibras F20, que entre o grupo I e III houve um acréscimo da f_t de 55,95%, enquanto para os consumos de F40 e F60 o acréscimo da f_t foi de 39,64% e 29,91%, respectivamente.

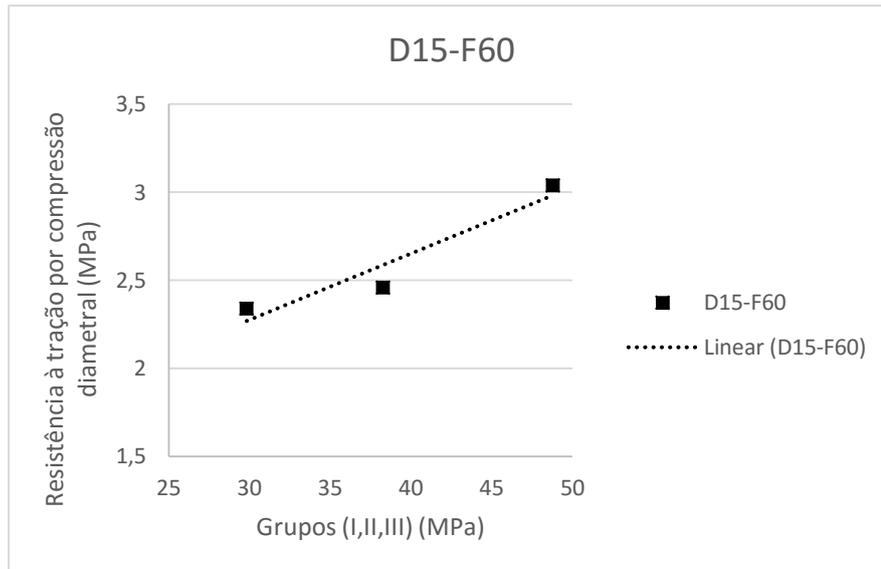


Figura 5.25 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, D15-F60.

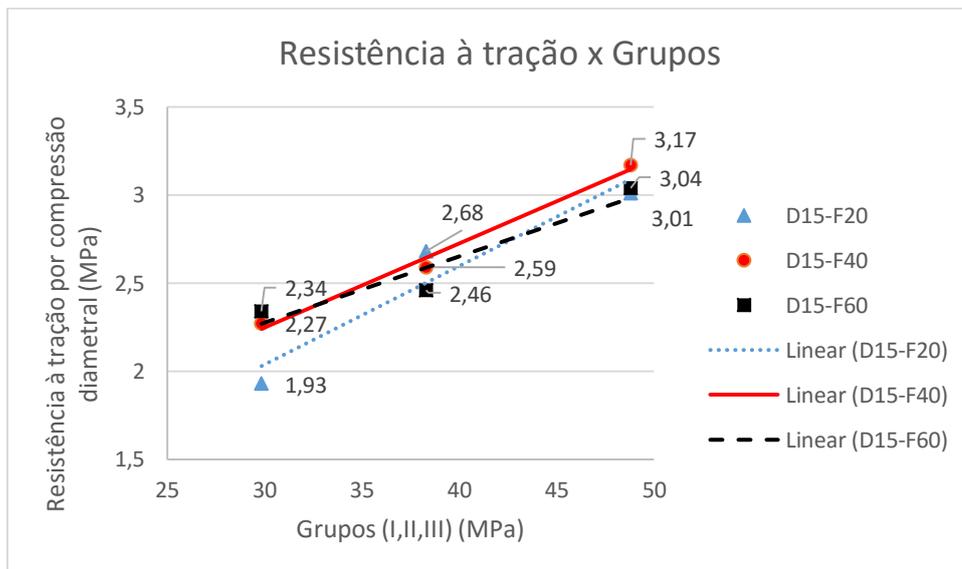


Figura 5.26 – Resistência à tração por compressão diametral x grupos, comparativo D15 consumo F20, 40 e 60.

Na Figura 5.26 tem-se que os valores de f_t não variam significativamente com o aumento do consumo, por exemplo, no consumo F60 para o grupo III (48,80MPa), a resistência à tração é praticamente a mesma para os outros consumos (F20 e F40).

Comparando-se os gráficos das Figuras 5.18, 5.22 e 5.26 observam-se que o consumo de fibras se comparando nos grupos tem mais significância quando se refere ao corpo de prova de menor diâmetro. Para o corpo de prova de maior diâmetro (D15) a influência das fibras quase não foi representativa para a mesma

f_c , ou seja, o consumo de fibras tem menor influência na resistência à tração quando o corpo de prova tem maiores dimensões.

5.3.5 Gráficos f_t x diâmetro

Os gráficos das Figuras 5.27 a 5.38 apresentam os dados dos corpos de prova dos ensaios realizados de acordo com o item 4.2.1.2 e 4.2.1.3.

Os parâmetros que são analisados são o grupo e o consumo de fibras. A Resistência à tração por compressão diametral é estudada em função do diâmetro dos corpos de prova. A nomenclatura dos gráficos das Figuras 5.27 a 5.38 é:

- F20, F40 e F60 – consumo de fibras;
- I, II e III – grupos.

Todas as siglas utilizadas são descritas no Capítulo 4.

Por exemplo a Figura 5.27 ilustra o comportamento da Resistência à tração por compressão diametral *versus* o diâmetro de corpos de prova com consumo de 20 kg/m³ de fibras e com resistência à compressão de 29,84 MPa.

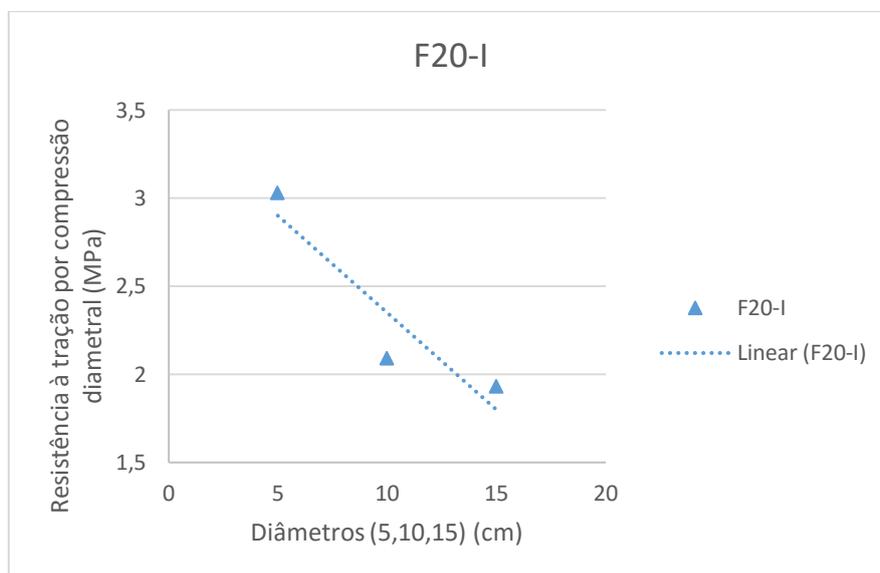


Figura 5.27 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, F20-I.

Observa-se nas Figuras 5.27 a 5.29 um decréscimo da resistência a tração com o acréscimo do diâmetro.

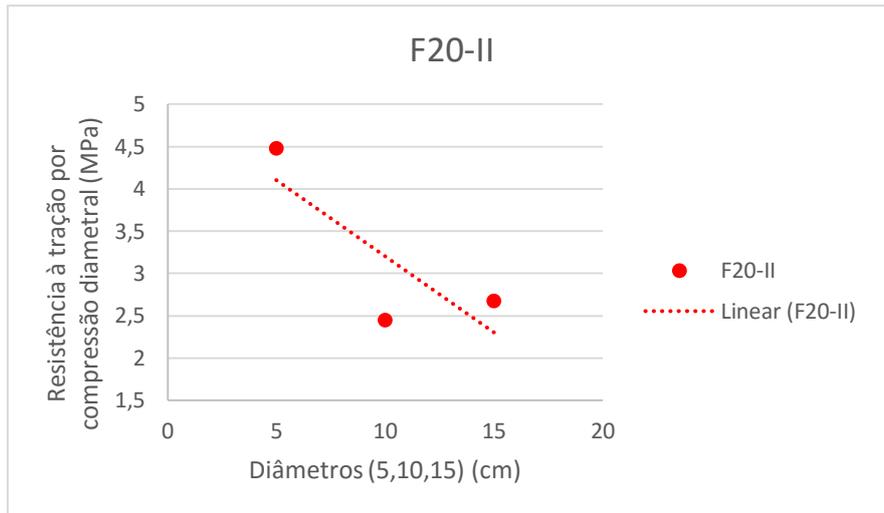


Figura 5.28 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, F20-II.

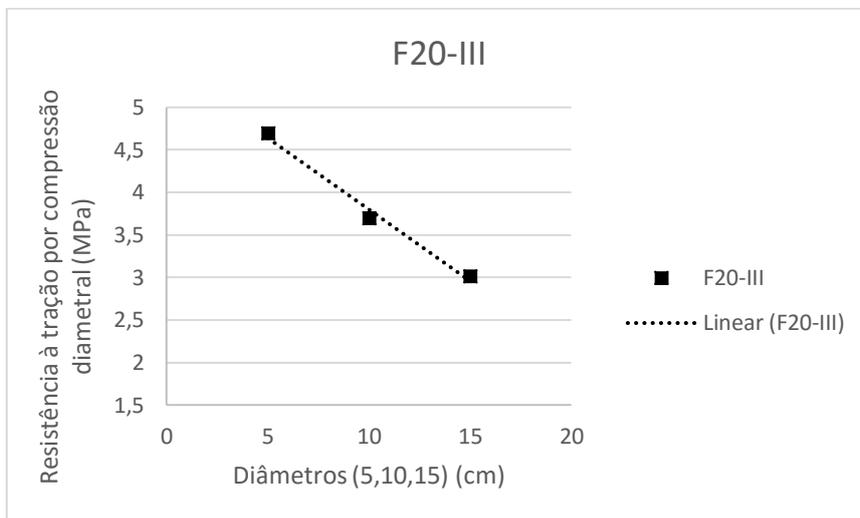


Figura 5.29 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, F20-III.

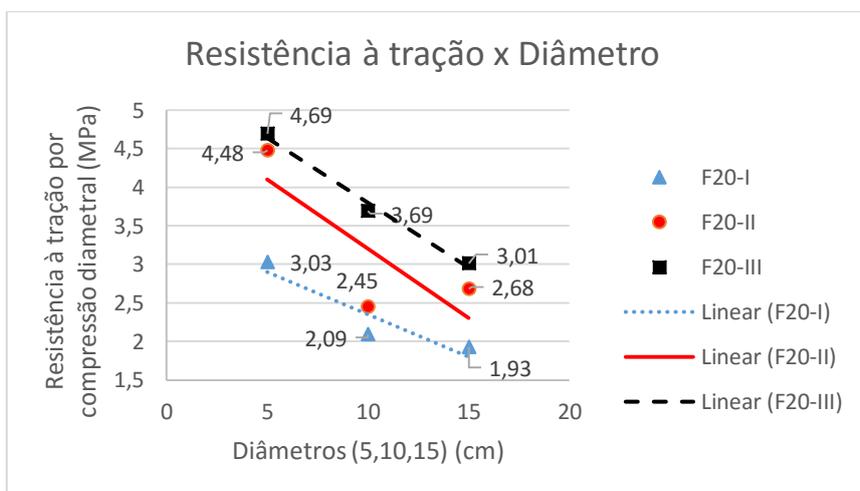


Figura 5.30 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, comparação F20 com os grupos I, II, III.

Na Figura 5.30 observa-se que com o acréscimo do diâmetro há decréscimo da resistência à tração da ordem de 36,30% para o grupo I, 40,70% e 35,82% para os grupos II e III, respectivamente.

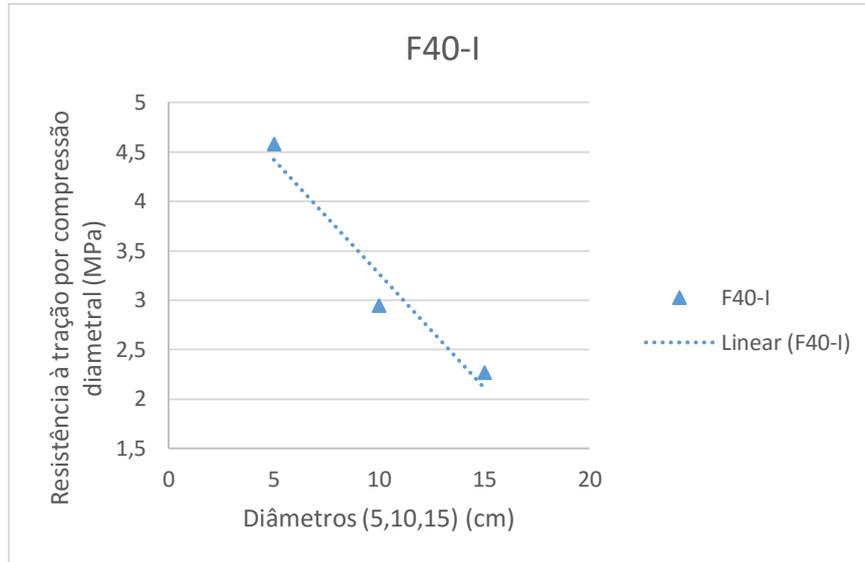


Figura 5.31 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, F40-I.

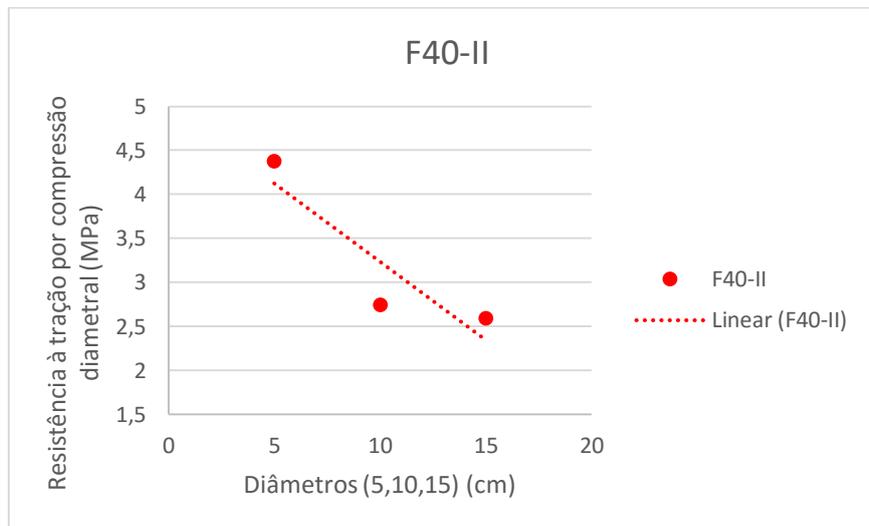


Figura 5.32 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, F40-II.

Nas Figuras 5.31 a 5.33 tem-se um decréscimo da resistência à tração com o acréscimo do diâmetro.

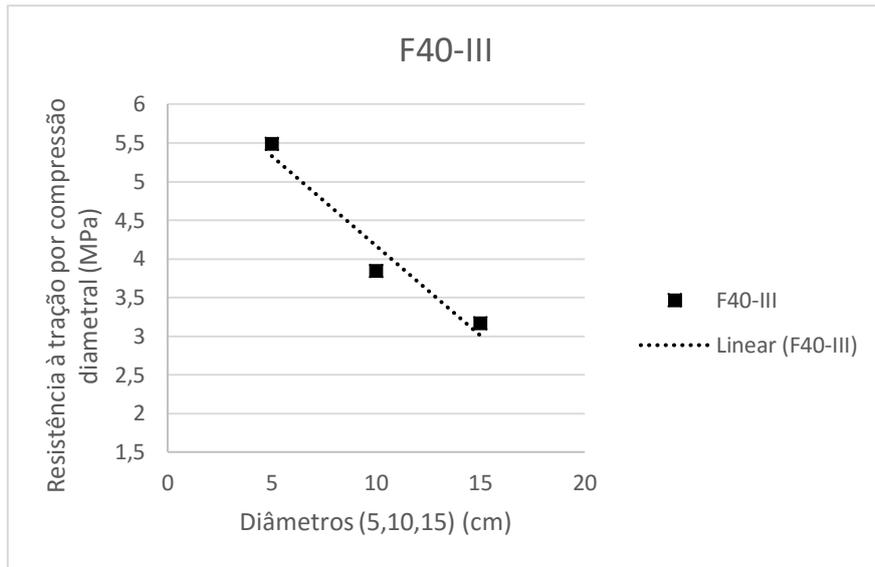


Figura 5.33 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, F40-III.

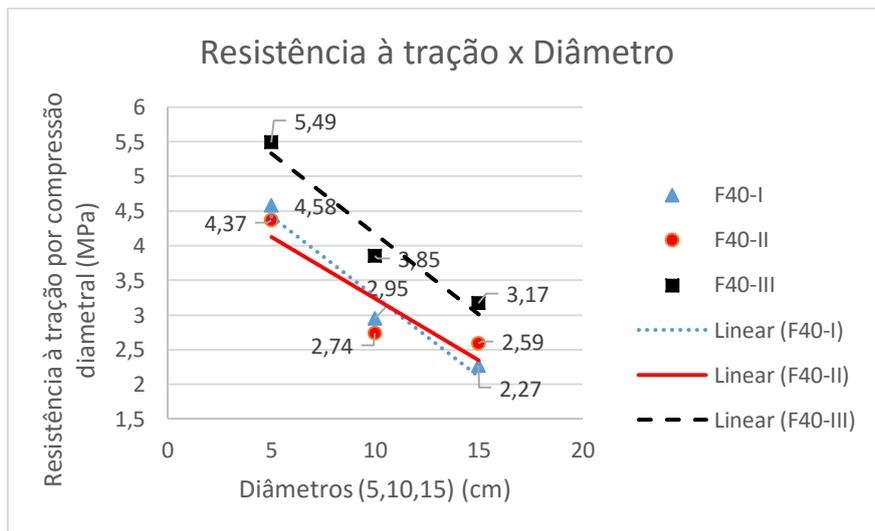


Figura 5.34 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, comparação F40 com os grupos I, II e III.

Na Figura 5.34 observa-se que com o acréscimo do diâmetro há decréscimo da resistência à tração da ordem de 50,43% para o grupo I, 40,73% para o grupo II, e um decréscimo de 42,25% para o grupo III.

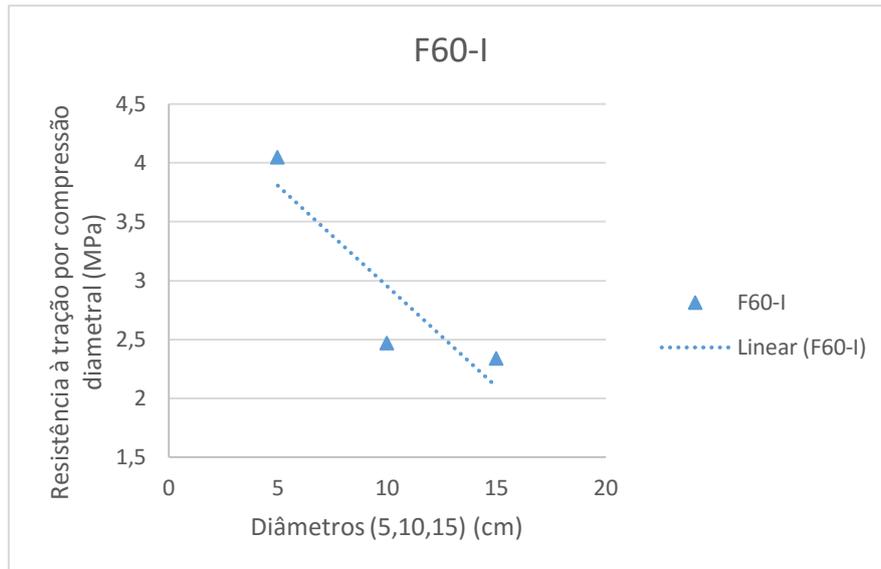


Figura 5.35 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, F60-I.

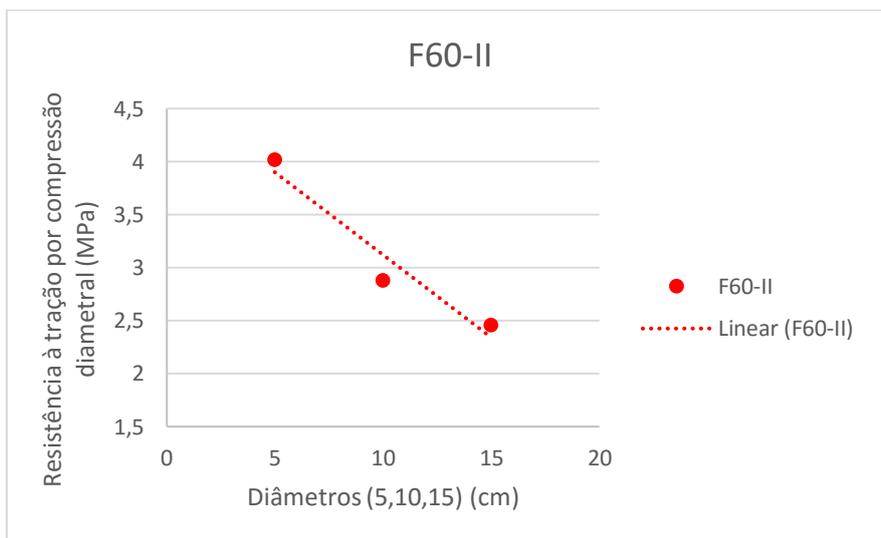


Figura 5.36 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, F60-II.

Nas Figuras 5.35 a 5.37 observa-se um decréscimo da resistência à tração com o acréscimo do diâmetro.

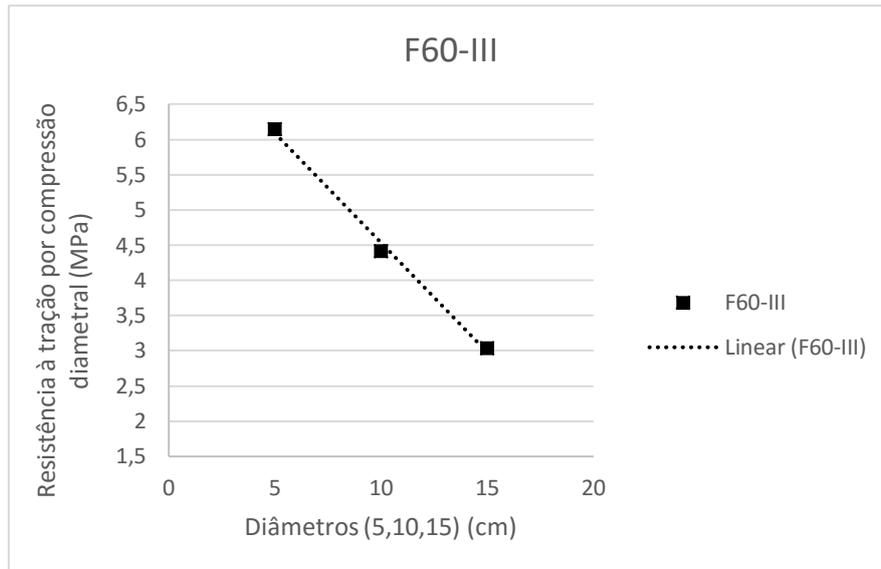


Figura 5.37 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, F60-III.

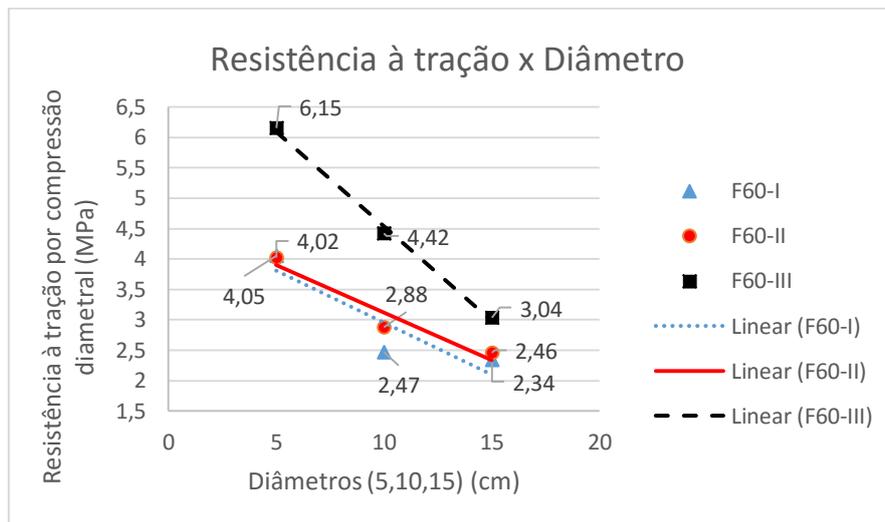


Figura 5.38 – Resistência à tração por compressão diametral x diâmetro, comparação F40 com os grupos I, II e III.

Na Figura 5.38, como visto nas Figuras 5.30 e 5.34, o decréscimo da resistência à tração ocorre devido ao acréscimo do diâmetro. Esse decréscimo é da ordem de 42,22% para o grupo I, 38,8% para o grupo II e 50,56% para o grupo III.

A Tabela 5.6 mostra resumidamente os decréscimos da resistência à tração de cada série de acordo com o aumento do diâmetro do corpo de prova.

Tabela 5.6 – Decréscimo da resistência a tração por compressão diametral.

	Decréscimo %		Decréscimo %		Decréscimo %
F20-I	36,30	F40-I	50,43	F60-I	42,22
F20-II	40,17	F40-II	40,73	F60-II	38,80
F20-III	35,82	F40-III	42,25	F60-III	50,56

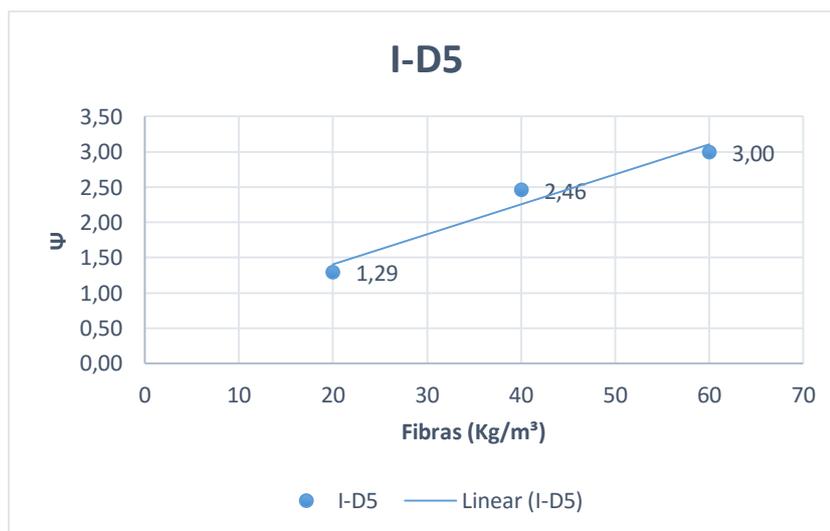
Para a resistência de 29,84 MPa o maior decréscimo de f_t foi para o consumo de 40 kg/m³. Para a resistência de 38,29 MPa esse decréscimo se manteve próximo para as três quantidades de consumo. Para a $f_c = 48,80$ MPa o maior decréscimo observado foi para o consumo de 60 kg/m³.

5.3.6 Gráficos Ψ x consumo

Nas Figuras 5.39 a 5.50 denomina-se Ψ a razão entre a resistência à tração por compressão diametral obtida no ensaio do item 4.2.1.3 pela resistência à tração direta obtida no ensaio do 4.2.1.1.

$$\Psi = \frac{f_{tD,i}}{f_{dir,m\u00e9dio}} \quad (5.1)$$

As Figuras 5.39 a 5.41 mostram a variação da razão Ψ em função do consumo de fibras de cada diâmetro do grupo I.

Figura 5.39 – Ψ x consumo, I-D5.

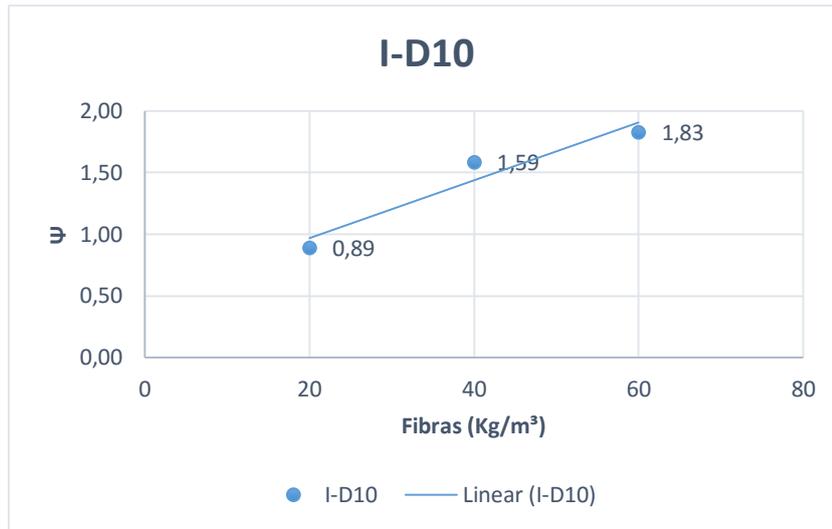


Figura 5.40 – Ψ x consumo, I-D10.

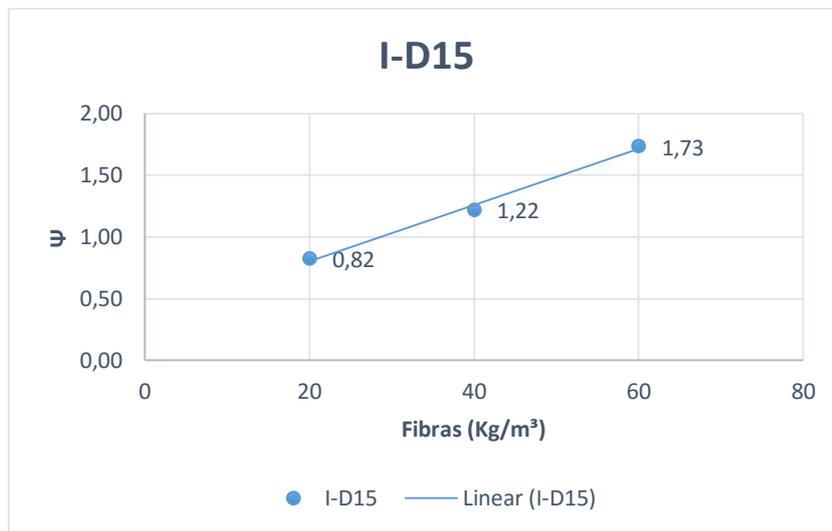


Figura 5.41 – Ψ x consumo, I-D15.

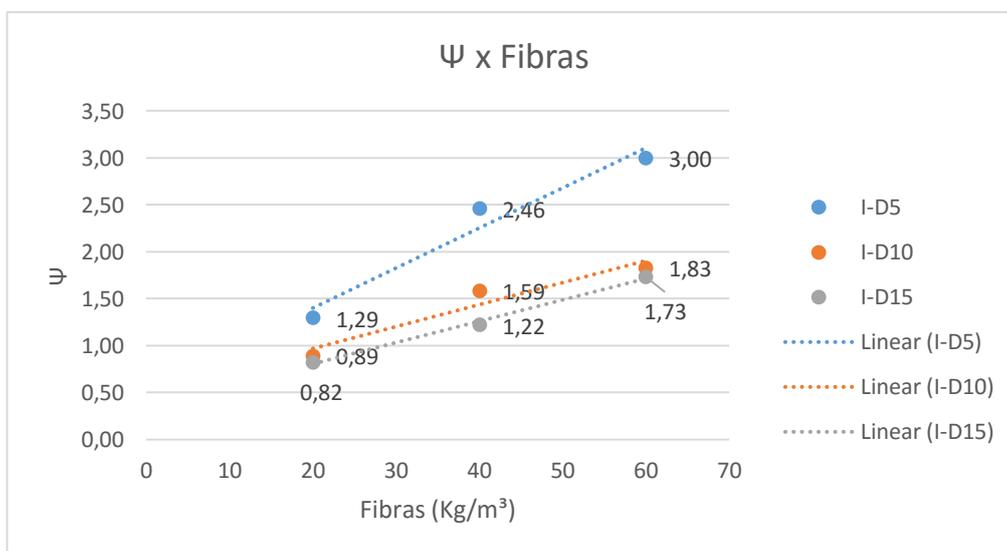


Figura 5.42 – Gráficos comparativos de Ψ x consumo, grupo I.

Os gráficos da Figura 5.42 apresentam as seguintes características:

- quanto maior é o consumo de fibras maior é Ψ ;
- o maior acréscimo de Ψ em relação ao consumo de fibras F20 para F40 foi do diâmetro D5, que teve um aumento de 90,69%, enquanto os D10 e D15 tiveram aumentos de 78,65% e 48,78%, respectivamente;
- o maior acréscimo de Ψ em relação ao consumo de fibras F40 para F60 foi do diâmetro D15, que teve um aumento de 41,80%, enquanto os D5 e D10 aumentaram em 21,95% e 15,09 %, respectivamente;
- o maior acréscimo de Ψ em relação ao consumo de fibras F20 para F60 foi do diâmetro D5, que teve um aumento de 132,55%, enquanto os D10 e D15 aumentaram em 105,61% e 110,97 %, respectivamente;
- com o diâmetro menor do corpo de prova, Ψ é maior para todos os valores de consumo de fibras adotados.

As Figuras 5.43 a 5.45 apresentam a razão de Ψ pelo consumo de fibras de cada diâmetro do grupo II.

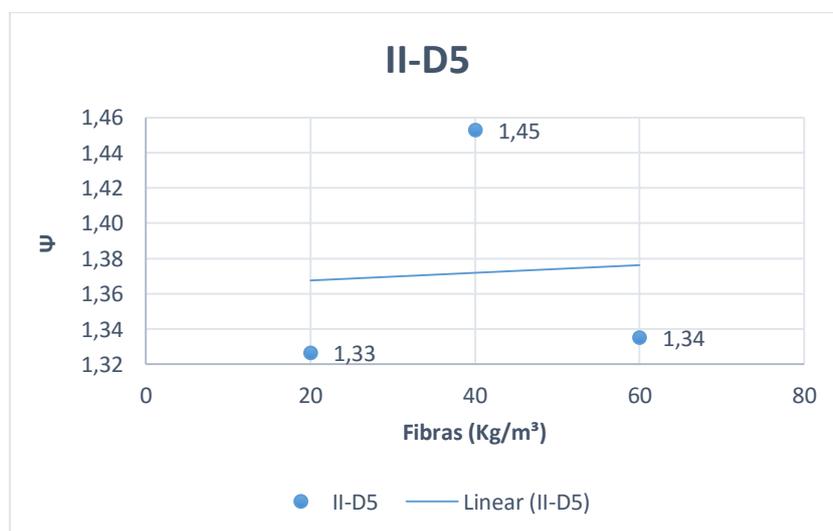


Figura 5.43 – Ψ x consumo, II-D5.

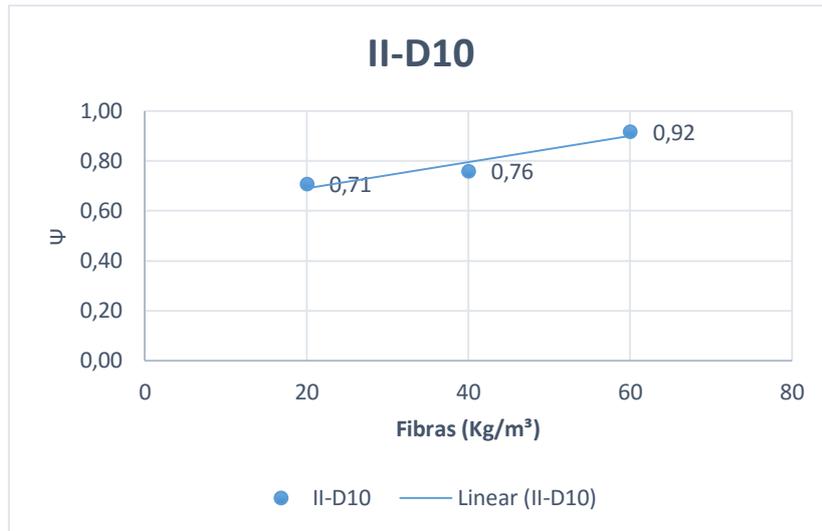


Figura 5.44 – Ψ x consumo, II-D10.

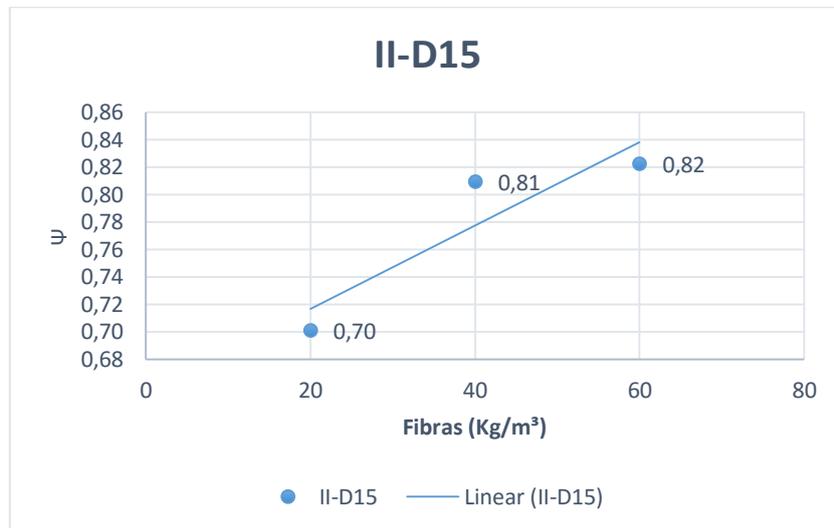


Figura 5.45 – Ψ x consumo, II-D15.

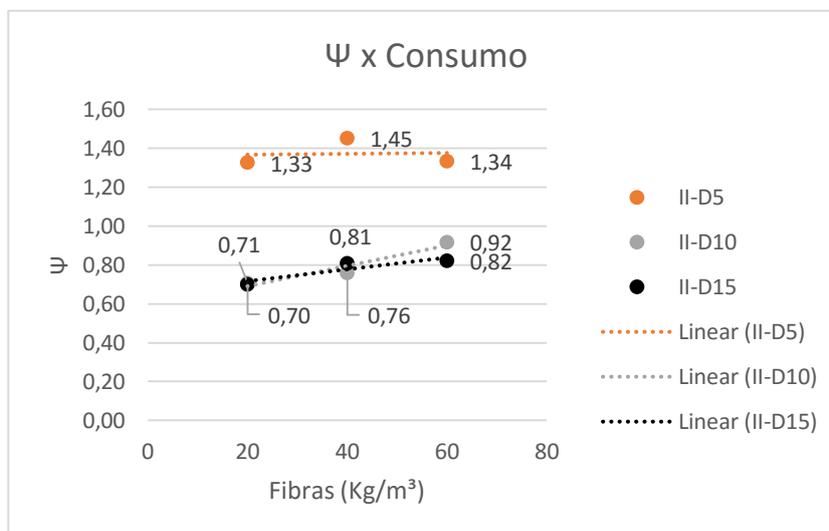


Figura 5.46 – Gráficos comparativos de Ψ x consumo, grupo II.

Os gráficos das Figura 5.46 apresentam as seguintes características:

- com o diâmetro menor do corpo de prova, Ψ é maior para todos os valores de consumo de fibras adotados;
- as curvas de tendência de Ψ tiverem acréscimo com o aumento de fibras.

As Figuras 5.47 a 5.49 apresentam a razão Ψ pelo consumo de fibras de cada diâmetro do grupo III.

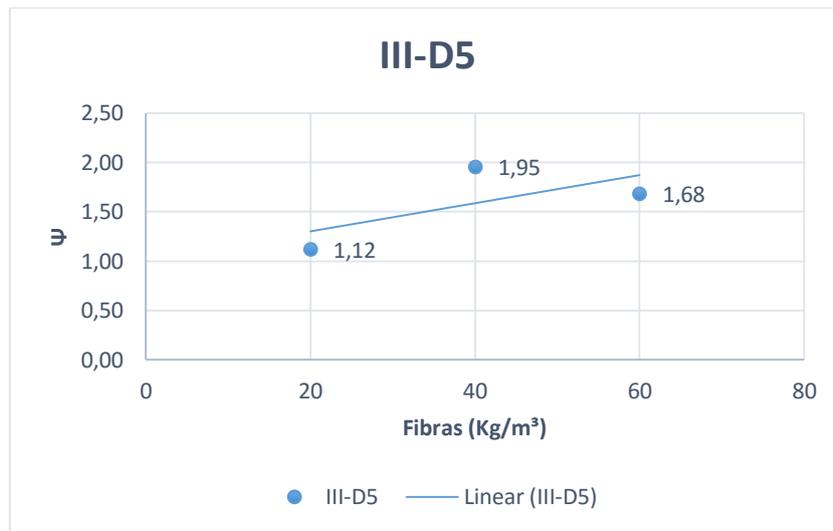


Figura 5.47 – Ψ x consumo, III-D5.

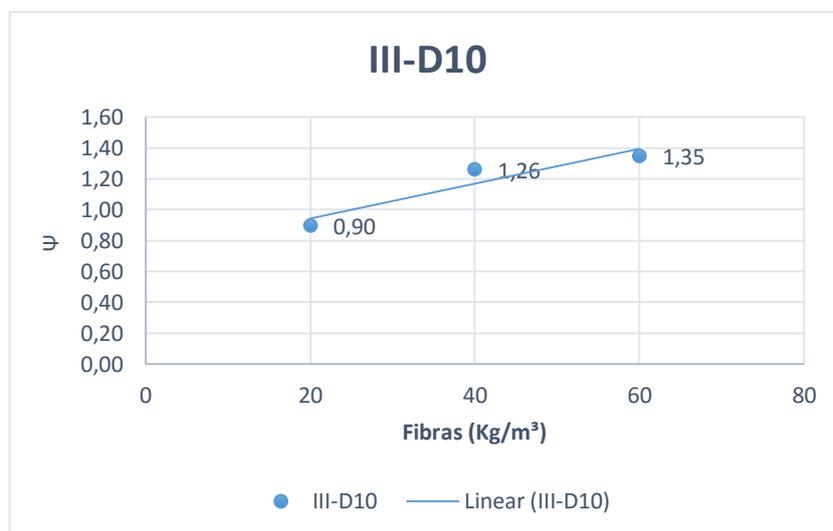


Figura 5.48 – Ψ x consumo, III-D10.

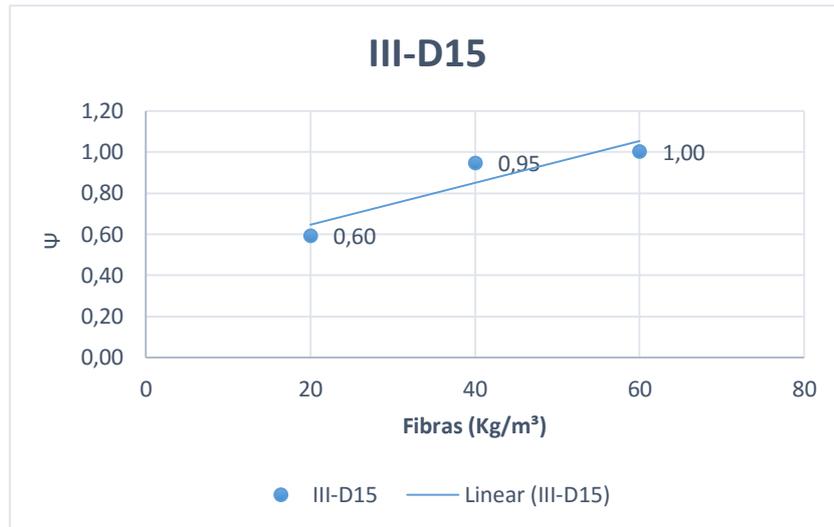


Figura 5.49 – Ψ x consumo, III-D15.

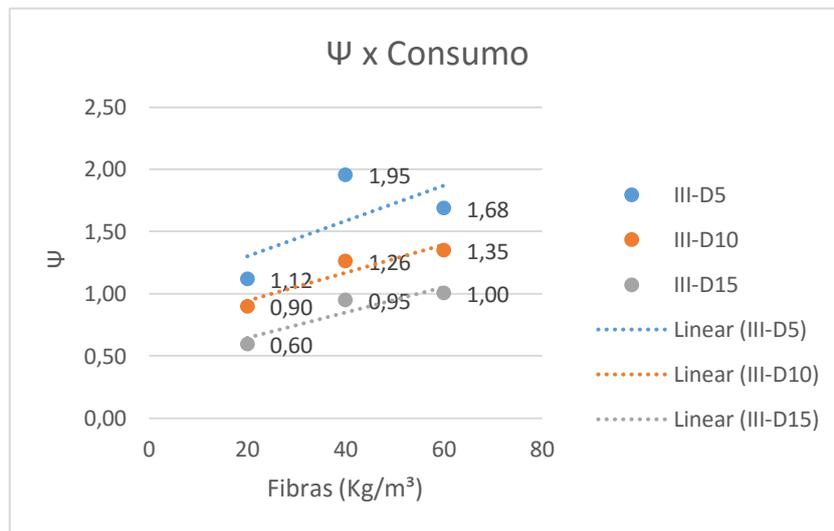


Figura 5.50 – Gráficos comparativos de Ψ x consumo, grupo III.

5.3.7 Gráficos Ψ x diâmetro

Nas Figuras 5.51 a 5.62 tem para a razão Ψ os resultados encontrados no item anterior por meio da equação 5.1.

As Figuras 5.51 a 5.53 mostram a variação da razão Ψ em função do diâmetro de cada consumo de fibras no grupo I.

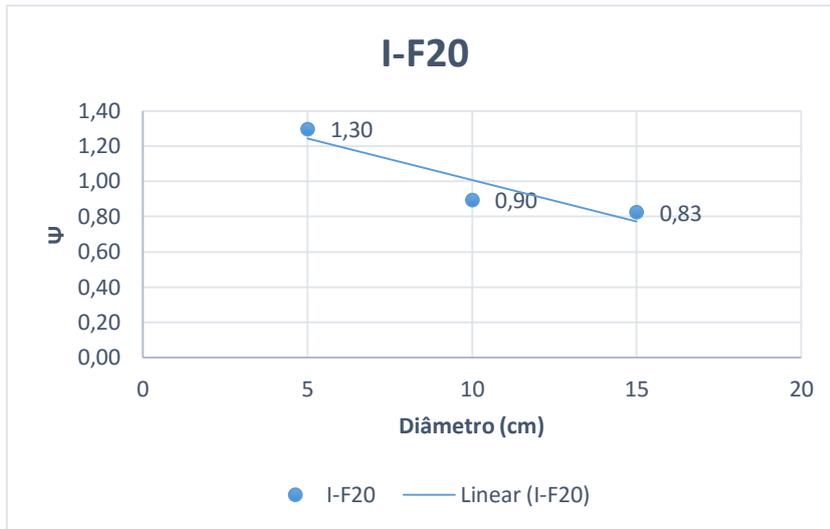


Figura 5.51 – Ψ x diâmetro, I-F20.

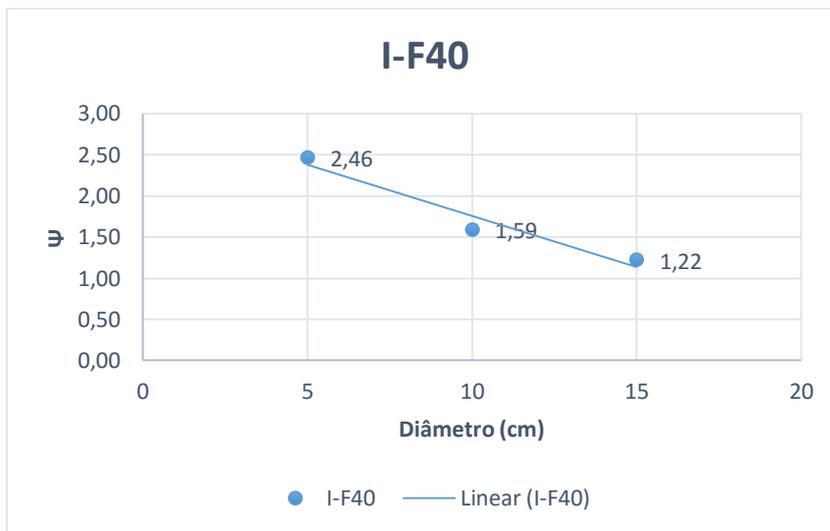


Figura 5.52 – Ψ x diâmetro, I-F40.

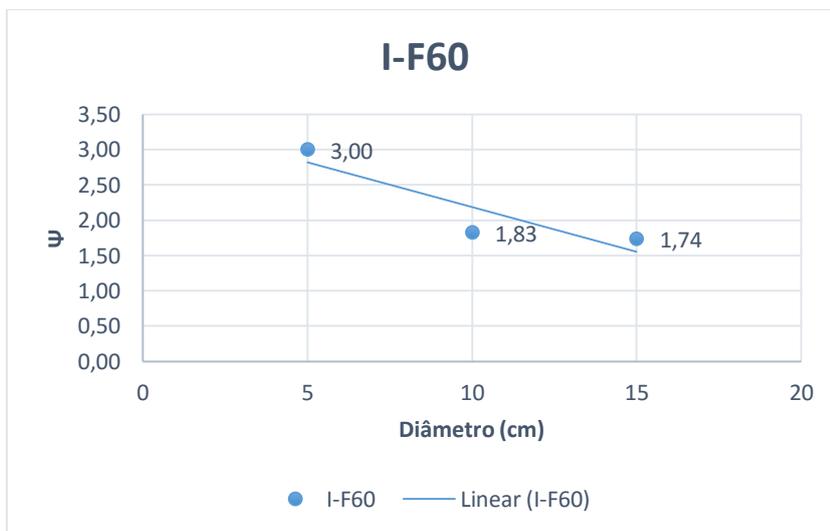


Figura 5.53 – Ψ x diâmetro, I-F60.

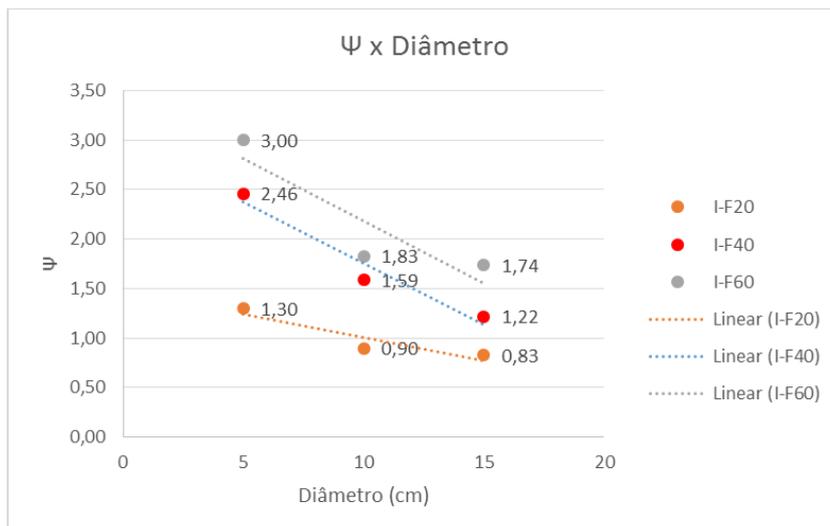


Figura 5.54 – Gráficos comparativos de Ψ x diâmetro, grupo I.

Os gráficos da Figura 5.54 apresentam as seguintes características:

- nos três gráficos houve redução de Ψ com o aumento do diâmetro;
- no consumo F40 essa redução foi mais acentuada;
- no consumo F60 os valores de Ψ são maiores para todos os diâmetros;
- houve aumento de Ψ para todos os diâmetros quando o consumo de fibra aumentou.

As Figuras 5.55 a 5.57 apresentam a razão Ψ pela variação do diâmetro de cada consumo de fibras no grupo II.

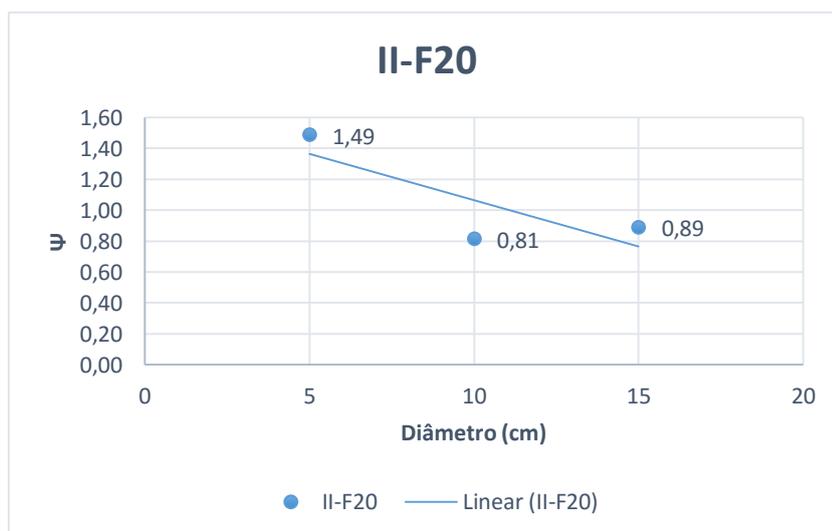


Figura 5.55 – Ψ x diâmetro, II-F20.

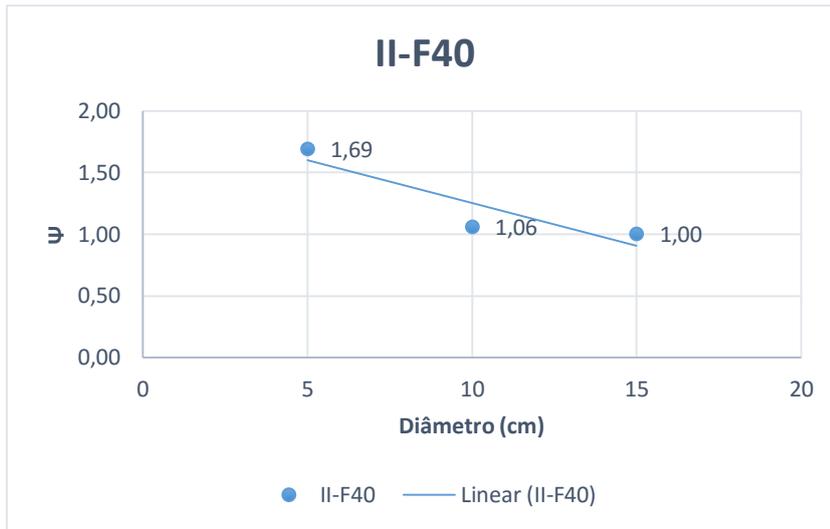


Figura 5.56 – Ψ x diâmetro, II-F40.

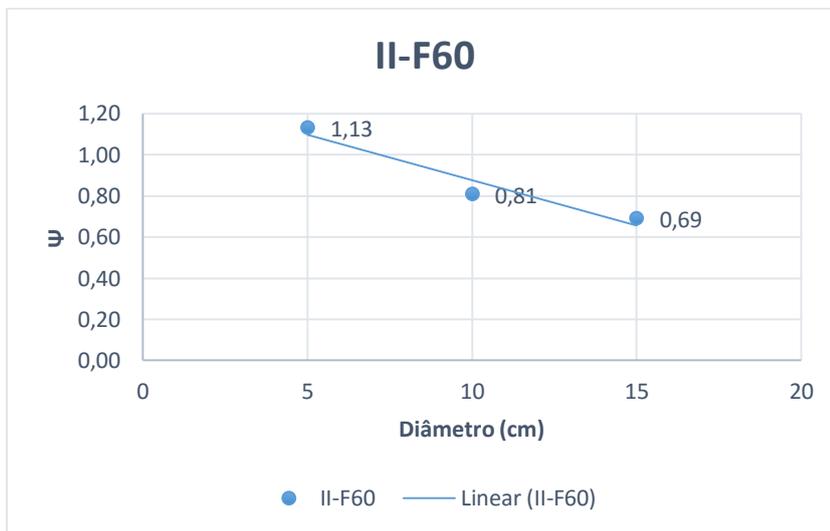


Figura 5.57 – Ψ x diâmetro, II-F60.

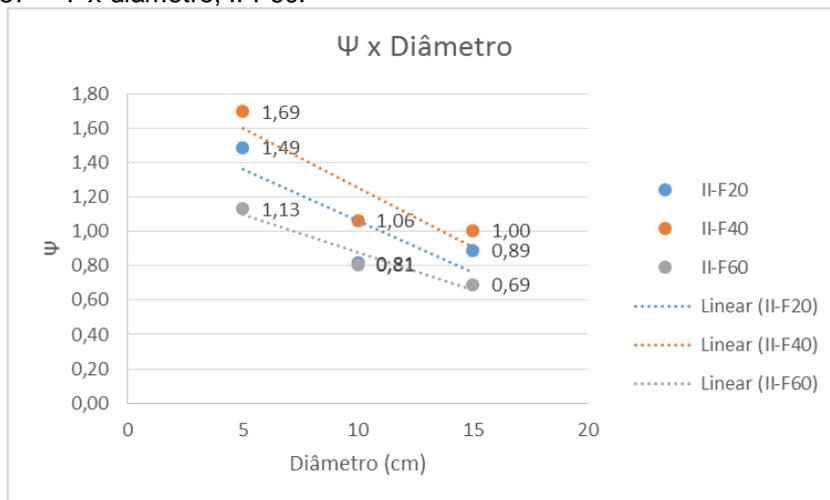


Figura 5.58 – Gráficos comparativos de Ψ x diâmetro, grupo II.

Os gráficos das Figura 5.58 apresentam as seguintes características:

- nos três gráficos houve redução de Ψ com aumento do diâmetro;
- no consumo F40 essa redução foi mais acentuada;
- no consumo F40 os valores de Ψ são maiores para todos os diâmetros
- houve aumento de Ψ para todos os diâmetros quando a fibra aumentou de F20 para F40, porém, houve uma diminuição de Ψ quando o consumo de fibras aumentou de F40 para F60.

As Figuras 5.59 e 5.61 apresentam a razão Ψ pela variação do diâmetro de cada consumo de fibras no grupo III.

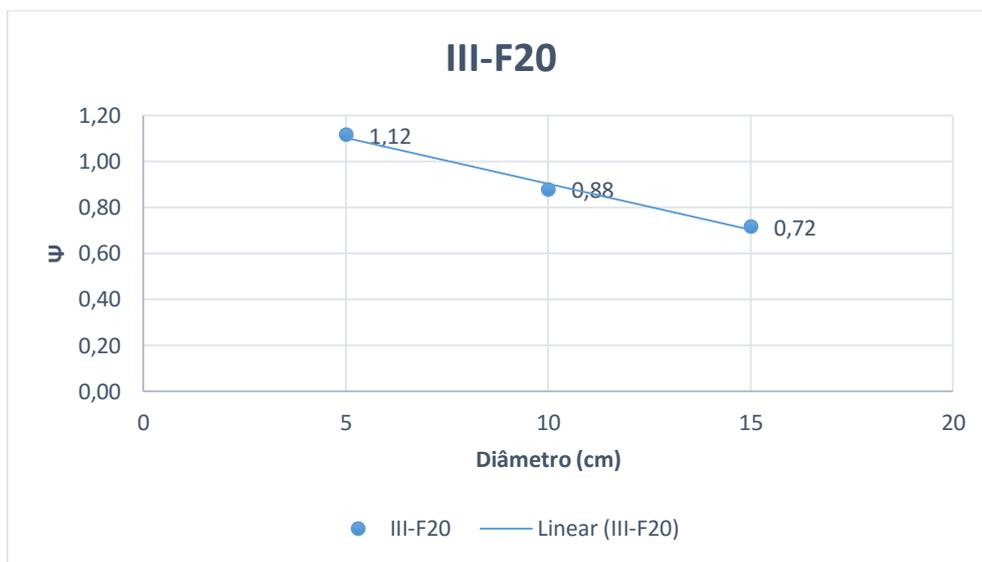


Figura 5.59 – Ψ x diâmetro, III-F20.

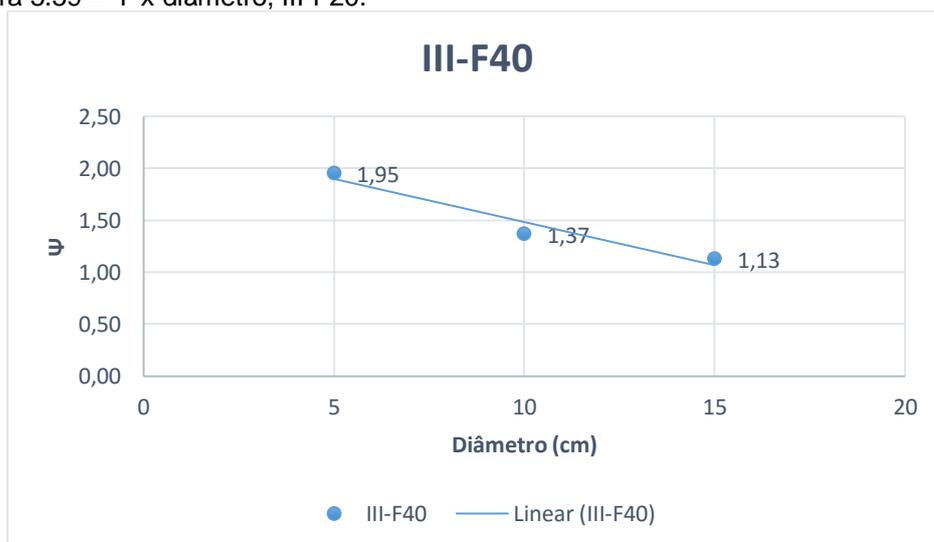
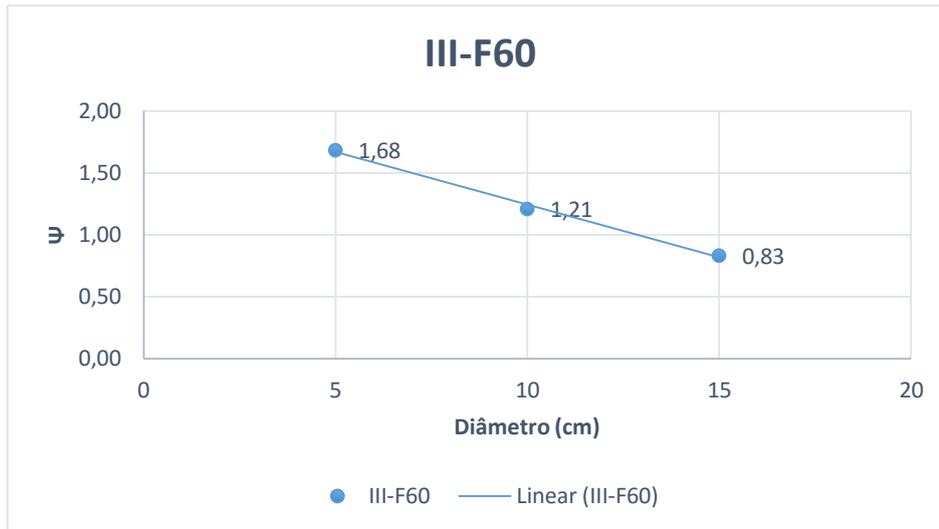
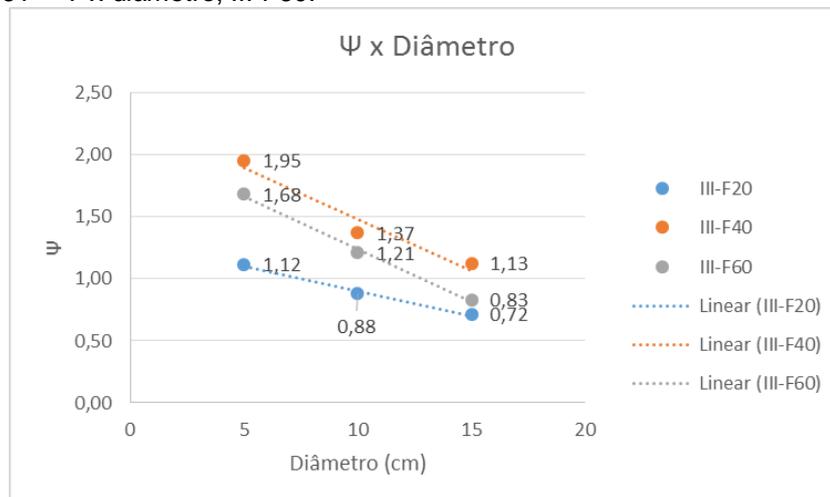


Figura 5.60 – Ψ x diâmetro, III-F40.

Figura 5.61 – Ψ x diâmetro, III-F60.Figura 5.62 – Gráficos comparativos de Ψ x diâmetro, grupo III.

Os gráficos das Figura 5.62 apresentam as seguintes características:

- nos três gráficos houve redução de Ψ com aumento do diâmetro;
- no consumo F60 essa redução foi mais acentuada;
- no consumo F40 os valores de Ψ são maiores para todos os diâmetros em relação aos consumos F20 e F60.

Para todos os gráficos apresentados neste capítulo observa-se que o consumo de fibras influenciou no acréscimo de Ψ em todos os diâmetros quando a f_c aumentou de 29,84 MPa, para valores de resistências acima de 38,29 MPa. O aumento do consumo de fibras influenciou o acréscimo de Ψ até certo ponto, depois esse aumento de consumo não foi significativo.

5.3.8 Força de tração direta x deslocamento

5.3.8.1 Grupos

As Figuras 5.63 a 5.68 mostram os dados dos ensaios do item 4.2.1.1. A força de tração direta é estudada em função do aumento do consumo de fibras.

Grupo I

O ensaio relativo ao corpo de prova I-TD-F20-1 e I-TD-F60-1 não foram mostrados, pois os corpos de prova já estavam rompidos quando foram submetidos ao ensaio.

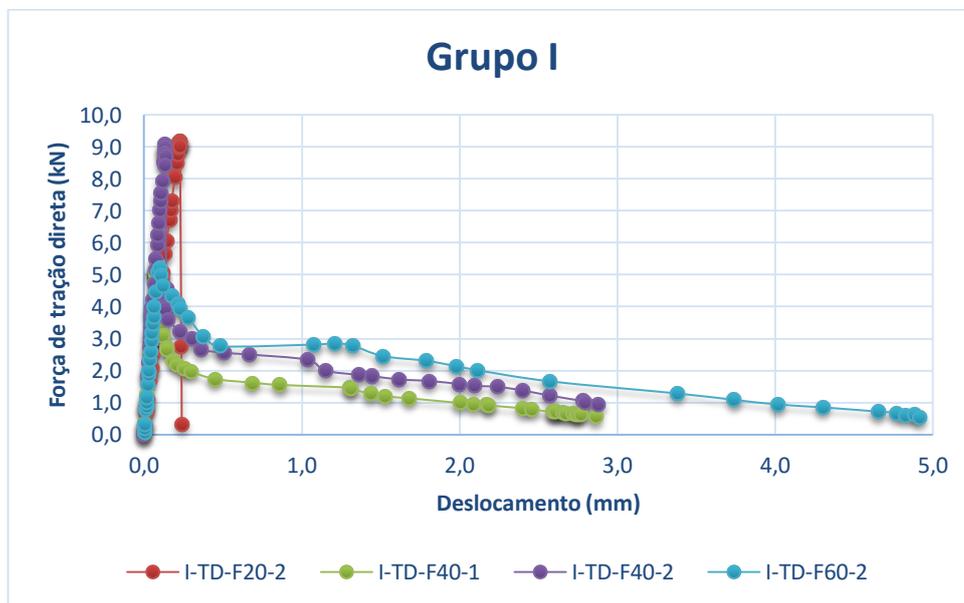


Figura 5.63 – Força x deslocamento, Grupo I.

Grupo II

Todos os corpos de prova foram tiveram sucesso no ensaio.

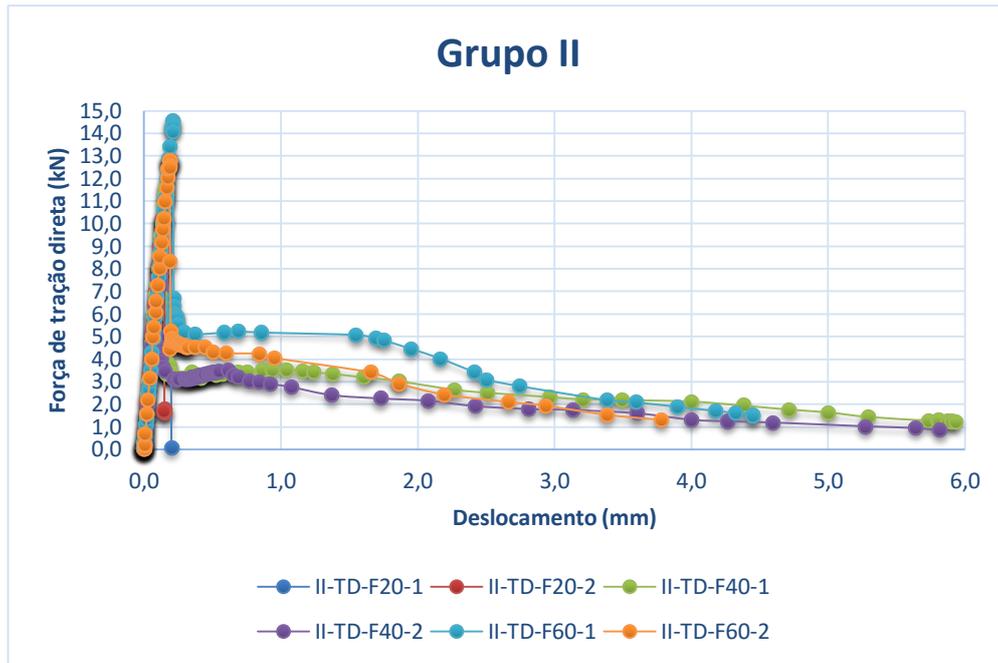


Figura 5.64 – Força x deslocamento, Grupo II.

Grupo III

O ensaio relativo ao corpo de prova III-TD-F20-2 não foi mostrado, pois o corpo de prova já estava rompido quando foi submetido ao ensaio.

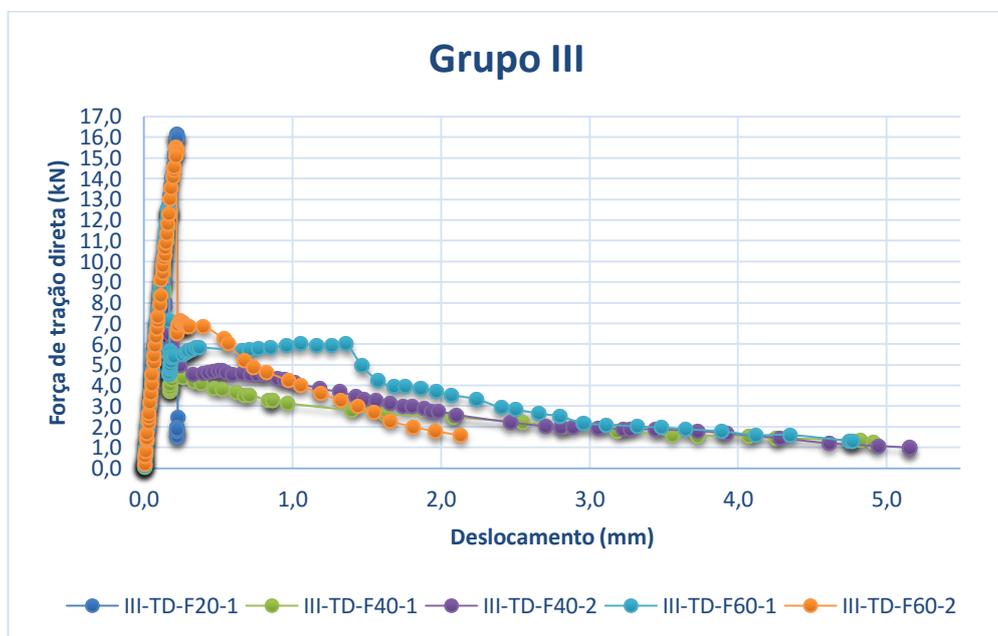


Figura 5.65 – Força x deslocamento, Grupo III.

Os gráficos das Figuras 5.63 a 5.65 apresentam as seguintes características:

- os corpos de prova com menor consumo de fibras tiveram uma carga de ruptura maior, porém, romperam em seguida;
- no gráfico da Figura 5.63 o corpo de prova com maior consumo de fibras apresenta a menor força de ruptura, porém, apresenta maior resistência no regime plástico após a ruptura;
- todos os corpos de prova com 20 kg/m³ de fibras, nos três grupos, não apresentaram energia plástica de deformação;
- na Figura 5.64 o corpo de prova com maior consumo de fibras (F60) apresenta maior força de ruptura em relação ao F40, porém, um deslocamento final menor. Todavia, observando-se a Tabela 5.7 tem-se que mesmo com um deslocamento final menor o corpo de prova F60 apresenta maior energia plástica de deformação. Observa-se no gráfico em questão que as linhas laranja e azul suportam uma carga maior durante mais tempo entre os deslocamentos de 1mm a 3mm. O mesmo ocorre para o gráfico da Figura 5.65 do grupo III;
- a queda de força após o pico de carga diminui com o aumento do consumo de fibras.

Os gráficos gerados para a obtenção das energias de deformação plástica e elástica se encontram no anexo A.

Tabela 5.7 – Energias plásticas e elásticas de deformação.

F20	E_{elástica}	E_{plástica}	F40	E_{elástica}	E_{plástica}	F60	E_{elástica}	E_{plástica}
I-TD-F20	1,08	–	I-TD-F40	0,46	4,49	I-TD-F60	0,31	9,03
II-TD-F20	1,29	–	II-TD-F40	0,78	12,40	II-TD-F60	1,415	12,84
III-TD-F20	1,88	–	III-TD-F40	0,90	13,08	III-TD-F60	1,455	15,67

5.3.8.2

Consumo de fibras

As Figuras 5.66 a 5.68 mostram os dados dos ensaios de tração direta. A força de tração direta é estudada para um mesmo consumo de fibras em função dos grupos (I, II, III). Os mesmos corpos de prova ausentes no item anterior devido a falha no ensaio também não serão mostrados nesse item.

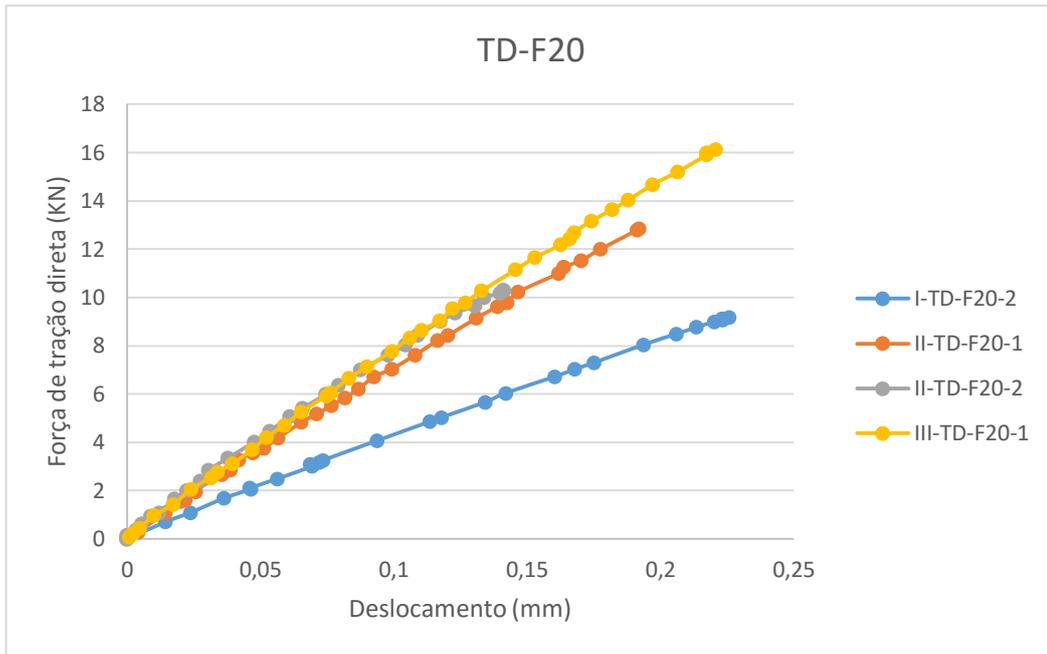


Figura 5.66 – Força x deslocamento, TD-F20.

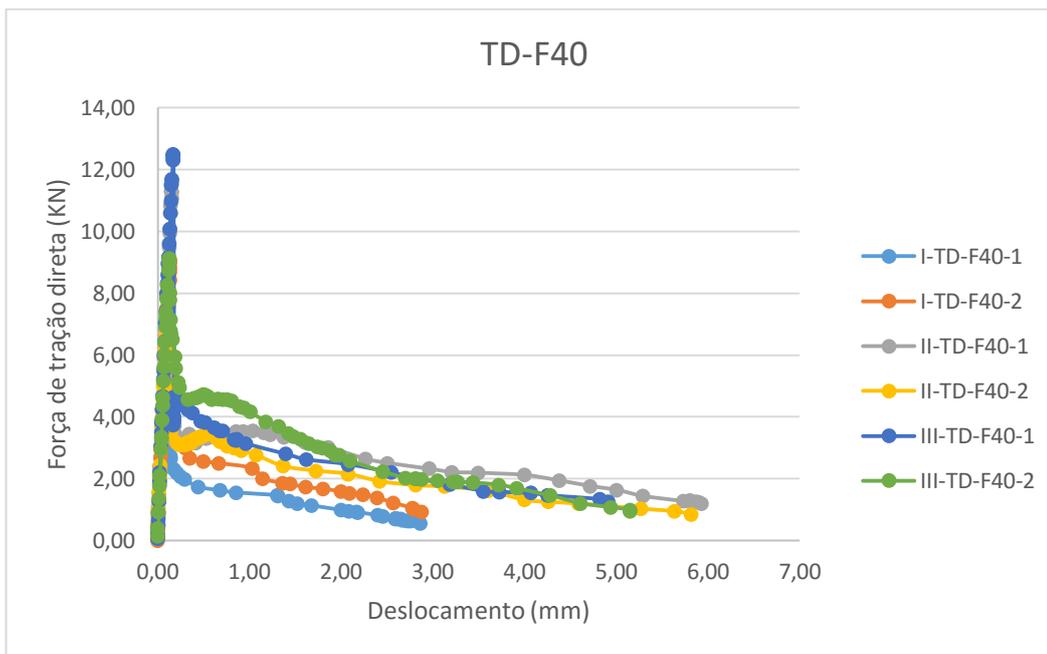


Figura 5.67 – Força x deslocamento, TD-F40.

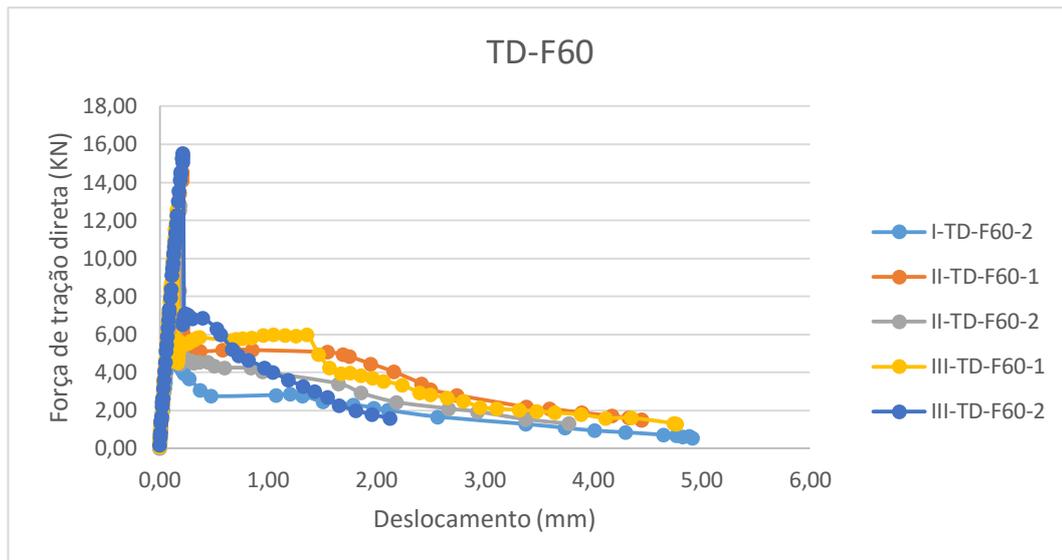


Figura 5.68 – Força x deslocamento, TD-F60.

No gráfico da Figura 5.66 observa-se que nenhum corpo de prova apresentou energia de deformação plástica. Pode-se ver que para o mesmo consumo de fibras (F20) os corpos de prova dos grupos I e III apresentaram praticamente o mesmo deslocamento final, porém, o corpo de prova do grupo III suportou maior carga de ruptura. Constata-se que quanto maior é a resistência à compressão do corpo de prova maior é sua carga de ruptura.

No gráfico da Figura 5.67 observa-se que todos os corpos de prova apresentaram energia plástica de deformação. Houve um menor deslocamento final e carga de ruptura para os corpos de prova do grupo I. O grupo II obteve o maior deslocamento final, porém o grupo III teve a maior carga de ruptura. Mesmo o grupo II apresentando maior deslocamento final, observa-se na Tabela 5.10 que o grupo III apresentou maior energia plástica de deformação.

No gráfico da Figura 5.68 observa-se que os corpos de prova com menor resistência à compressão apresentaram maior deslocamento final, porém, menor carga de ruptura. Mesmo o grupo I apresentando maior deslocamento final os grupos II e III apresentaram maior energia de deformação plástica (Tabela 5.10)

De acordo com a Tabela 5.7 observa-se:

- nenhum corpo de prova com 20 kg/m³ de fibras apresentou regime plástico;
- quanto maior era a resistência à compressão maior era a energia de deformação elástica para um mesmo consumo de fibras.

- a energia de deformação elástica reduz do F20 para o F40 e aumenta do F40 para o F60;
- a partir do consumo de F40, todos os corpos de prova apresentaram energia de deformação plástica.
- as energias de deformação plástica F40 e F60 são próximos nos grupos II e III;
- para o grupo I, quanto maior o consumo de fibras, menor a energia de deformação elástica e maior a plástica, tendo diferença significativa da energia de deformação elástica do F40 para F60;
- para o grupo II, quanto maior o consumo de fibras maior a energia de deformação plástica, porém, sem grande variação do F40 para o F60. Ocorre o mesmo para o grupo III;
- observa-se que para resistência à compressão menor as fibras influenciam mais a resistência à tração do que quando comparados a concretos de alta resistência.
- A queda de força após o pico de carga diminui com o aumento do consumo de fibras.

5.3.9 Energia dissipada

5.3.9.1 Tração direta

A área sob a curva força-deslocamento até o deslocamento último foram obtidas dos gráficos por meio do método de Simpson. Tem-se essas áreas na Tabela 5.7 do capítulo 5.3.8.1. Nos gráficos das Figuras 5.69 e 5.70 tem-se a energia dissipada *versus* o consumo de fibras.

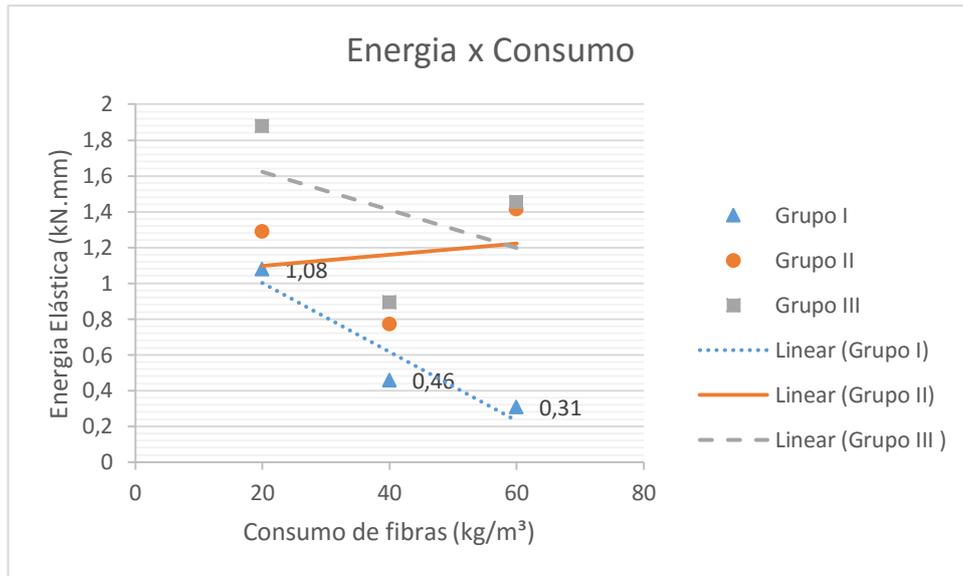


Figura 5.69 – Energia elástica x consumo de fibras.

O gráfico da Figura 5.69 apresenta as seguintes características:

- observa-se somente uma curva com tendência linear satisfatória;
- não há correlação entre os resultados ensaiados dos grupos II e III, requer mais ensaios;
- na curva do grupo I, quanto maior o consumo de fibras menor a energia elástica de deformação.

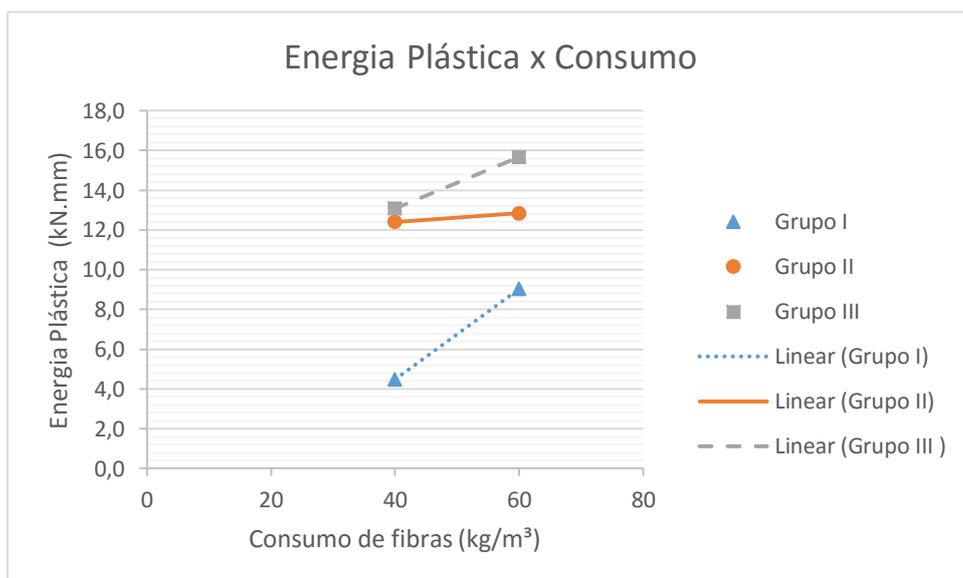


Figura 5.70 – Energia plástica x consumo de fibras.

O gráfico da Figura 5.70 apresenta apenas um indicativo do comportamento da variação da energia plástica, pois se tem apenas dois corpos de prova por grupo, apresenta as seguintes características:

- para o consumo F20, nenhum grupo apresentou energia plástica de deformação, o concreto se comporta como concreto simples;
- a capacidade de absorção de energia plástica aumentou consideravelmente com o aumento do consumo de fibras;
- os concretos mais resistentes se comportam de maneira similar;
- o grupo com f_c menor obteve o maior aumento da energia plástica de deformação, em cerca de mais de 100%.

Nos gráficos das Figuras 5.71 e 5.72 tem-se a energia dissipada *versus* grupo de corpos de prova.

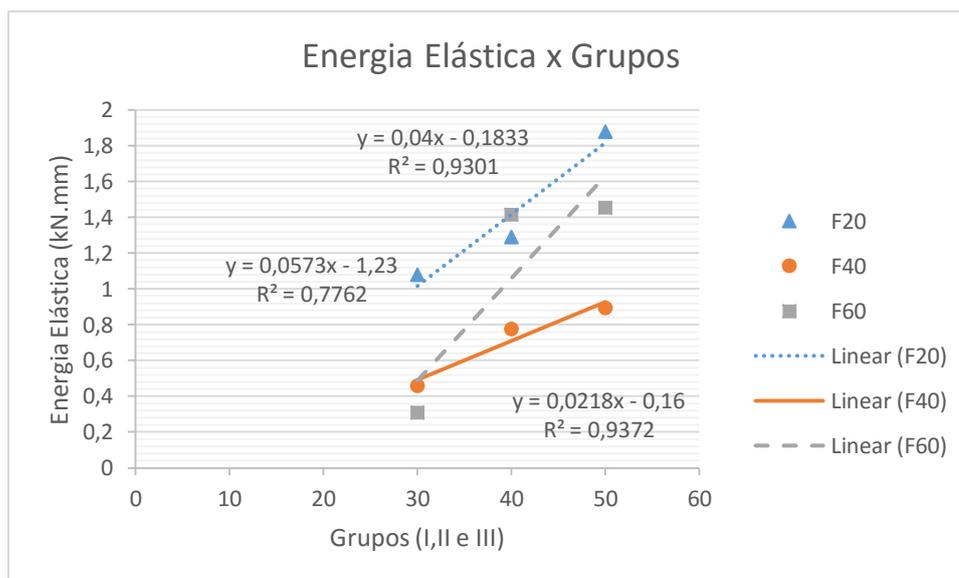


Figura 5.71 – Energia elástica x grupos.

O gráfico das Figura 5.71 apresenta as seguintes características:

- todas as curvas têm uma tendência linear;
- quanto maior o f_c maior a energia elástica de deformação;
- para o grupo I, quanto menor o consumo maior a energia elástica de deformação.

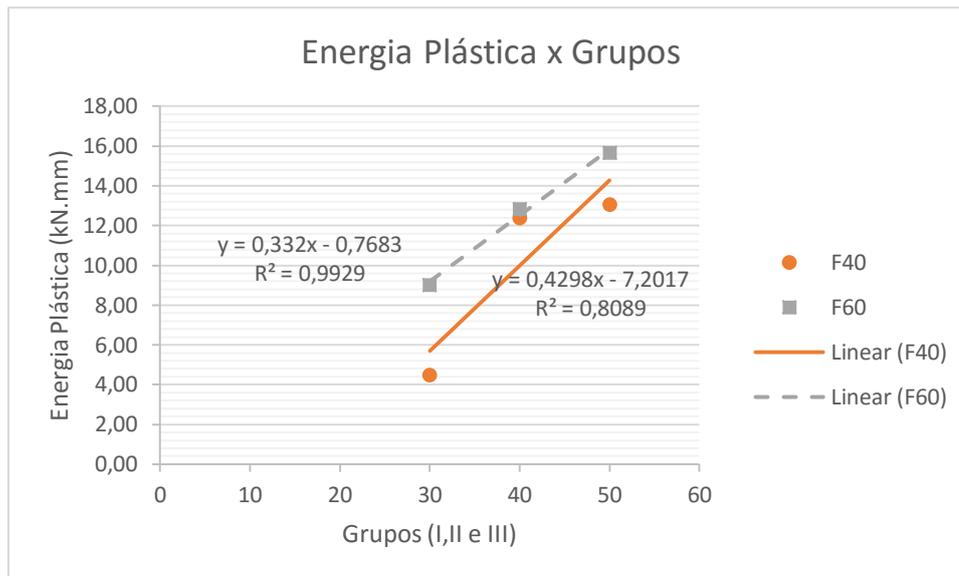


Figura 5.72 – Energia plástica x grupos.

O gráfico das Figura 5.72 apresenta as seguintes características:

- o concreto com consumo de fibras F20, não apresentou energia plástica, por esse motivo, não está representado no gráfico;
- quanto maior o consumo de fibras, maior a energia plástica;
- os consumos F40 e F60 apresentaram comportamento similar, nos três grupos de resistência à compressão.

5.3.9.2 Compressão diametral

Na Tabela 5.8 tem-se a média da energia total dissipada dos ensaios de compressão diametral, que é a área sob a curva força-deslocamento até o deslocamento último. Essas áreas foram obtidas dos gráficos por meio do método de Simpson. Todos os gráficos encontram-se no Anexo A.

Tabela 5.8 – Energia total dissipada.

Série 1	E total	Série 2	E total	Série 3	E total
I-D5-F20	68,78	I-D5-F40	105,05	I-D5-F60	129,78
I-D10-F20	139,83	I-D10-F40	291,72	I-D10-F60	252,28
I-D15-F20	389,22	I-D15-F40	511,43	I-D15-F60	407,00
Série 4	E total	Série 5	E total	Série 6	E total
II-D5-F20	120,36	II-D5-F40	129,46	II-D5-F60	110,72
II-D10-F20	270,60	II-D10-F40	273,58	II-D10-F60	279,30
II-D15-F20	555,97	II-D15-F40	478,36	II-D15-F60	442,72
Série 7	E total	Série 8	E total	Série 9	E total
III-D5-F20	134,42	III-D5-F40	145,13	III-D5-F60	145,93
III-D10-F20	348,52	III-D10-F40	386,64	III-D10-F60	457,50
III-D15-F20	660,38	III-D15-F40	647,30	III-D15-F60	740,90

Na Tabela 5.9 tem-se a razão entre as energias totais dissipadas, comparadas considerando-se o consumo, o grupo e o diâmetro, sendo que:

- $\Delta a = F_{40}/F_{20}$ – razão entre a energia dissipada de 40 e 20 kg/m³;
- $\Delta b = F_{60}/F_{40}$ – razão entre a energia dissipada de 60 e 40 kg/m³;
- $\Delta c = F_{60}/F_{20}$ – razão entre a energia dissipada de 60 e 20 kg/m³;
- $\Delta d = II/I$ – razão entre a energia dissipada do grupo II e I;
- $\Delta e = III/II$ – razão entre a energia dissipada do grupo III e II;
- $\Delta f = III/I$ – razão entre a energia dissipada do grupo III e I;
- $\Delta g = D_{10}/D_5$ – razão entre a energia dissipada do diâmetro 10 e 5;
- $\Delta h = D_{15}/D_{10}$ – razão entre a energia dissipada do diâmetro 15 e 10;
- $\Delta i = D_{15}/D_5$ – razão entre a energia dissipada do diâmetro 15 e 5.

Tabela 5.9 – Razões entre as energias dissipadas.

	Consumo			Grupos			Diâmetro				
	Δa	Δb	Δc		Δd	Δe	Δf		Δg	Δh	Δi
I-D5	1,53	1,24	1,89	D5-F20	1,75	1,12	1,95	I-F20	2,03	2,78	5,66
I-D10	2,09	0,86	1,80	D10-F20	1,94	1,29	2,49	I-F40	2,78	1,75	4,87
I-D15	1,31	0,80	1,05	D15-F20	1,43	1,19	1,70	I-F60	1,94	1,61	3,14
II-D5	1,08	0,86	0,92	D5-F40	1,23	1,12	1,38	II-F20	2,25	2,05	4,62
II-D10	1,01	1,02	1,03	D10-F40	0,94	1,41	1,33	II-F40	2,11	1,75	3,70
II-D15	0,86	0,93	0,80	D15-F40	0,94	1,35	1,27	II-F60	2,52	1,59	4,00
III-D5	1,08	1,01	1,09	D5-F60	0,85	1,32	1,12	III-F20	2,59	1,89	4,91
III-D10	1,11	1,18	1,31	D10-F60	1,11	1,64	1,81	III-F40	2,66	1,67	4,46
III-D15	0,98	1,14	1,12	D15-F60	1,09	1,67	1,82	III-F60	3,14	1,62	5,08

Da Tabela 5.9 tem-se:

- Δa do grupo I – grande aumento da energia total dissipada, o mesmo ocorreu no Δc para todos os diâmetros, o Δb somente teve aumento para o D5;
- $\Delta a, \Delta b$ e Δc do grupo II – tiveram comportamento semelhante, não tendo aumento significativo de energia dissipada;
- $\Delta a, \Delta b$ e Δc do grupo III – maior aumento foi Δc para o D10;
- Δd – a energia total dissipada quase dobrou para F20 no D10, porém, não foi tão significativa assim no F60;
- Δe – a energia total dissipada aumentou para todos diâmetros, tendo um maior aumento no D15 do consumo F60;
- Δf – para F20 o aumento foi muito grande chegando a ser mais que o dobro, para F40 e F60 também teve aumento;
- $\Delta i > \Delta g > \Delta h$ para todos os casos exceto, para o I-F20 que $\Delta h > \Delta g$.

5.3.10 Curva tensão vs. deformação específica

A curva de tensão-deformação específica foi obtida para o ensaio de tração direta.

A medida que a força axial F aumentava gradualmente, o alongamento total Δl era mensurado em cada incremento de carga até ocorrer a fratura do corpo de prova. Com a área inicial da secção transversal A_0 e o comprimento l_0 medidos no corpo de prova original de tração, foram obtidas a tensão normal $\sigma = F/A$ e deformação específica $\varepsilon = \Delta l/l_0$.

As Figuras 5.73 a 5.75 mostram os diagramas de tensão-deformação específica para três ensaios realizados do grupo I, todos os outros ensaios do grupo I, II e III encontram-se no Anexo D. Para cada material essa curva pode assumir formas muito distintas.

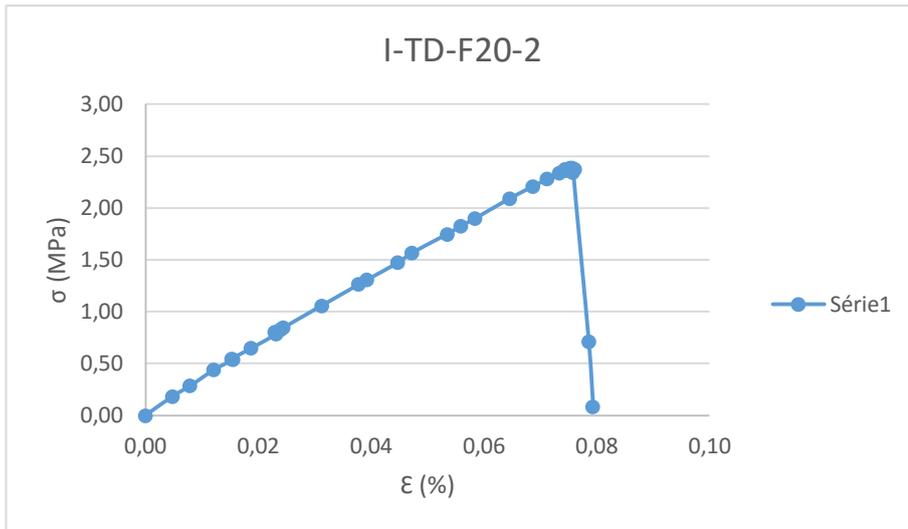


Figura 5.73 – Curva tensão-deformação específica, I-TD-F20-2.

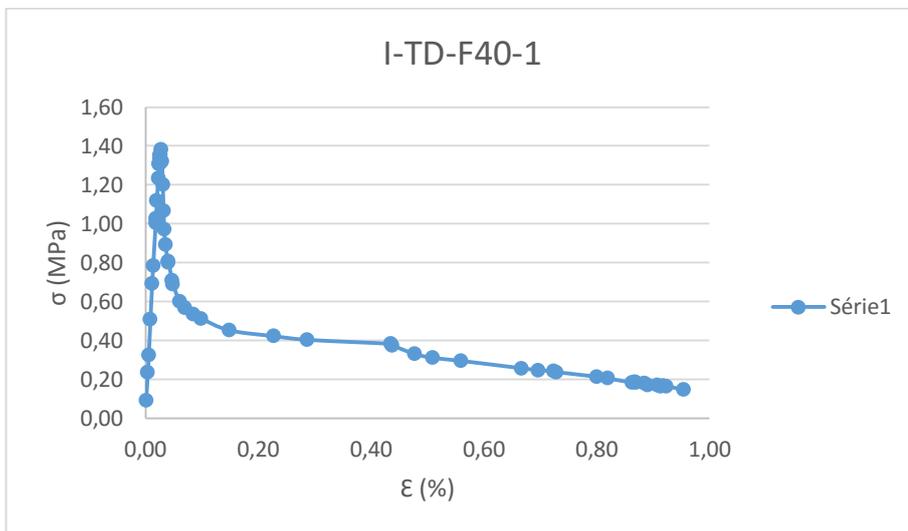


Figura 5.74 – Curva tensão-deformação específica, I-TD-F40-1.

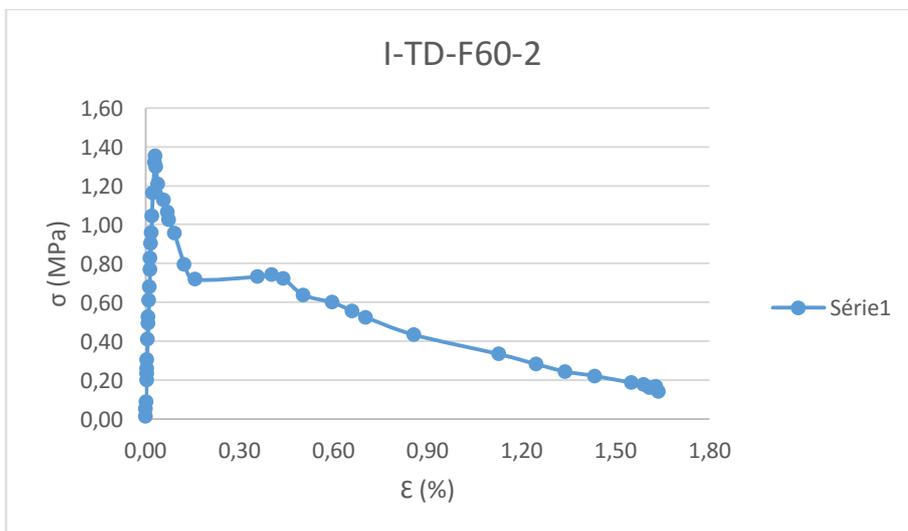


Figura 5.75 – Curva tensão-deformação específica, I-TD-F60-2.

Das Figuras 5.73 a 5.75 observa-se que a deformação específica ε aumenta para concretos com o consumo maior de fibras.

A ductilidade é a propriedade do material que indica o grau de deformação que o mesmo suporta até o momento de sua fratura. Os materiais frágeis são caracterizados por suportar pouca ou nenhuma deformação no processo de ensaio de tração. Já um material dúctil apresenta grande deformação.

Na Tabela 5.10 tem-se o percentual de deformação específica de cada corpo de prova definido por (SOCHOR,2001):

$$\% \varepsilon = 100. \Delta l / l_0 \quad (5.2)$$

onde Δl indica o quanto o corpo de prova deformou no ensaio de tração direta.

Observa-se nas Figuras 5.73 a 5.75 que a variação da tensão e deformação específica é linear para os pequenos valores de estágios de carregamento.

Tabela 5.10 – Percentual de deformação específica.

Corpo de prova	$100 * \frac{\Delta l}{l_0}$ (%)	Corpo de prova	$100 * \frac{\Delta l}{l_0}$ (%)
I-TD-F20-2	0,08	II-TD-F40-2	1,93
I-TD-F40-1	0,95	II-TD-F60-1	1,48
I-TD-F40-2	0,95	II-TD-F60-2	1,26
I-TD-F60-2	1,63	III-TD-F20-1	0,07
II-TD-F20-1	0,07	III-TD-F40-1	1,63
II-TD-F20-2	0,05	III-TD-F40-2	1,71
II-TD-F40-1	1,97	III-TD-F60-1	1,59
II-TD-F40-2	1,93	III-TD-F60-2	0,70

5.3.11 Relação da força de tração nos corpos de prova

Na Tabela 5.11 tem-se a razão entre a força de tração do corpo de prova de 15 cm de diâmetro pela do corpo de prova de 5 e 10 cm de diâmetro e do corpo de prova de 10 cm pela do corpo de prova de 5 cm, além das médias, desvio padrão e coeficiente de variação desses resultados.

Tabela 5.11 – Razão da força de tração.

	$\frac{ft_{15}}{ft_5}$	$\frac{ft_{15}}{ft_{10}}$	$\frac{ft_{10}}{ft_5}$
I -F20	0,64	0,92	0,69
I-F40	0,50	0,77	0,64
I- F60	0,58	0,95	0,61
II -F20	0,60	1,09	0,55
II-F40	0,59	0,95	0,63
II- F60	0,61	0,85	0,72
III -F20	0,64	0,82	0,79
III-F40	0,58	0,82	0,70
III- F60	0,49	0,69	0,72
Média	0,581	0,873	0,67
DP	0,054	0,119	0,07
COV	9,241	13,620	10,64

Para os ensaios realizados o coeficiente de variação é aceitável.

5.3.12 Ruptura

Em todos os corpos de prova submetidos ao ensaio de tração por compressão diametral houve o desenvolvimento de uma fissura na sua região central. Nas Figuras 5.76 a 5.79 observa-se a ruptura de alguns corpos de prova ensaiados.



Figura 5.76 – Corpos de prova com consumo de fibra de 20 kg/m³.

Nota-se que na Figura 5.76 os corpos de prova apresentaram ruptura frágil, resultando em duas metades imediatamente após a força atingir o valor máximo. Na Figura 5.77 os corpos de prova apresentaram ruptura dúctil, pois as fibras costuram a linha de ruptura, não deixando que o corpo de prova se parta totalmente.

Nas Figuras 5.78 e 5.79 é possível ver a comparação entre os corpos de prova com 20 kg/m³ e 60 kg/m³.



Figura 5.77 – Corpos de prova com consumo de fibra de 60 kg/m³.



Figura 5.78 – Corpos de prova D10 com consumo de fibra de 20 kg/m³ e 60 kg/m³.



Figura 5.79 – Corpos de prova D5 com consumo de fibra de 20 kg/m³ e 60 kg/m³.

5.3.13 Ângulo interno

Segundo CHEN (1982):

$$\frac{f_c}{f_t} \cong 2tg^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (5.3)$$

A partir dos valores experimentais de f_c (resistência à compressão) e f_t (resistência à tração por compressão diametral) obtém-se os seguintes ângulos (Tabela 5.12).

Tabela 5.12 – Ângulo de atrito interno.

	$\frac{f_c}{f_t}$	Ângulo
Série 1	14,98	49,86
Série 2	10,39	42,63
Série 3	11,18	44,14
Série 4	14,07	48,69
Série 5	14,81	49,65
Série 6	13,77	48,27
Série 7	12,98	47,14
Série 8	12,47	46,36
Série 9	11,40	44,56

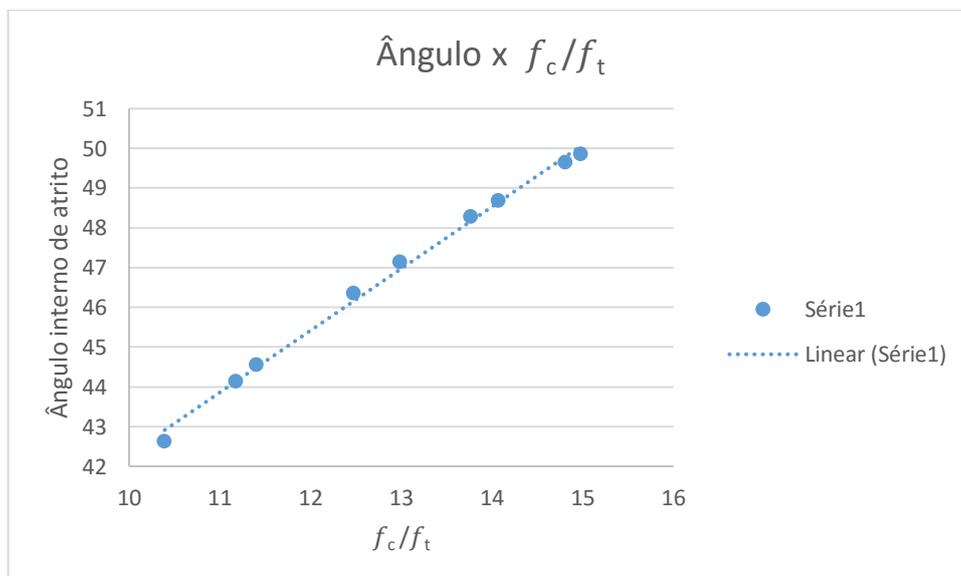


Figura 5.80 – Variação do ângulo de atrito interno em função de $\frac{f_c}{f_t}$.

CHEN (1982) propôs a seguinte expressão teórica para o cálculo da carga última a partir do ensaio de compressão diametral:

$$Q^u = \frac{a}{\sin \beta} \left[\frac{f_c l (1 - \sin \varphi)}{\cos(\beta + \varphi)} - 2 f_t l \cos \beta \operatorname{tg}(\beta + \varphi) \right] + f_t l d \operatorname{tg}(\beta + \varphi) \quad (5.4)$$

onde

$$\cot \beta = \operatorname{tg} \varphi + \operatorname{sec} \varphi \left[1 + \frac{\left(\frac{d}{2a}\right) \cos \varphi}{\left(\frac{f_c}{f_t}\right) [(1 - \sin \varphi)/2] - \sin \varphi} \right]^{1/2} \quad (5.5)$$

e as constantes $d, 2a, l, f_c$ e f_t são as dimensões dos corpos de prova e dos resultados dos ensaios. A Tabela 5.13 mostra os valores de Q^u calculados com a equação 5.4, os valores experimentais e a razão entre eles.

Tabela 5.13 – Razão entre valores teóricos e experimentais.

CHEN	ENSAIO	CHEN/ENSAIO
115,65	77,86	1,49
126,18	94,95	1,33
110,99	79,42	1,40
130,53	80,63	1,62
150,42	100,03	1,50
149,94	96,00	1,56
184,66	118,54	1,56
187,55	128,76	1,46
201,88	139,00	1,45
	Média	1,48
	DP	0,09
	COV (%)	6,00

Constata-se que os valores fornecidos pela expressão 5.4 são em média 50% maiores do que os experimentais.

5.3.14 Métodos comparativos

De acordo com a expressão 3.5 do item 3.4 e com os dados obtidos nos ensaios experimentais tem-se a Tabela 5.14 e o gráfico da Figura 5.81.

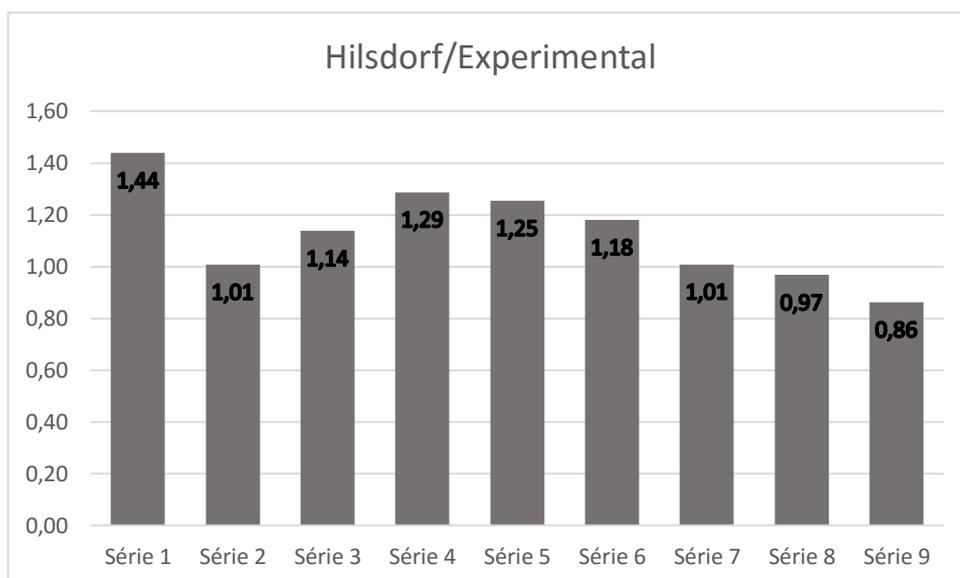


Figura 5.81 – Razão da força de tração pela fórmula proposta por HILSDORF pela obtida experimentalmente.

Tabela 5.14 – Resultados da expressão 3.5 e dados experimentais.

	HILSDORF	Experimental	Razão
Série 1	3,01	2,09	1,44
Série 2	2,97	2,95	1,01
Série 3	2,80	2,47	1,14
Série 4	3,17	2,47	1,29
Série 5	3,44	2,74	1,25
Série 6	3,39	2,88	1,18
Série 7	3,72	3,69	1,01
Série 8	3,73	3,86	0,97
Série 9	3,81	4,42	0,86
	Média		1,13
	DP		0,18
	COV (%)		16,16

O coeficiente de variação é inferior a 25%, donde se conclui que os resultados obtidos pelos dois métodos são aceitáveis.

5.3.15 Efeito escala

De acordo com o capítulo 3 verifica-se a razão entre a lei de Carpinteri e o estudo experimental realizado, a constante utilizada para a expressão 3.3 foi $\alpha_0 = 0,5$, obtendo-se as Figuras 5.82 a 5.84. Analisando-se essas figuras constata-se que os resultados obtidos experimentalmente se assemelham aos estudos

realizados por CARPINTERI (1995), devido a boa aproximação dos resultados experimentais.

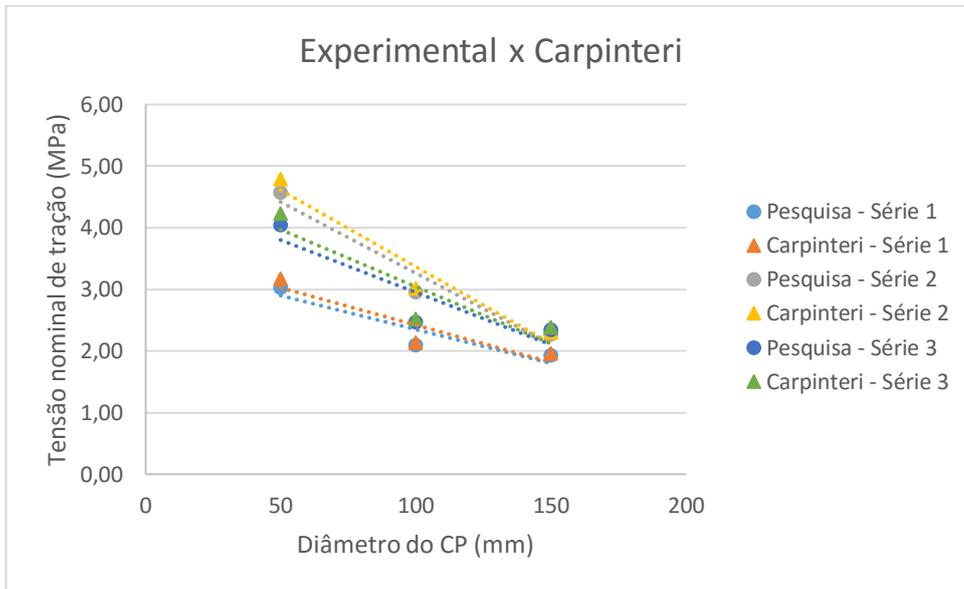


Figura 5.82 – Lei de Carpinteri x valores experimentais, Séries 1, 2 e 3.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1412826/CA

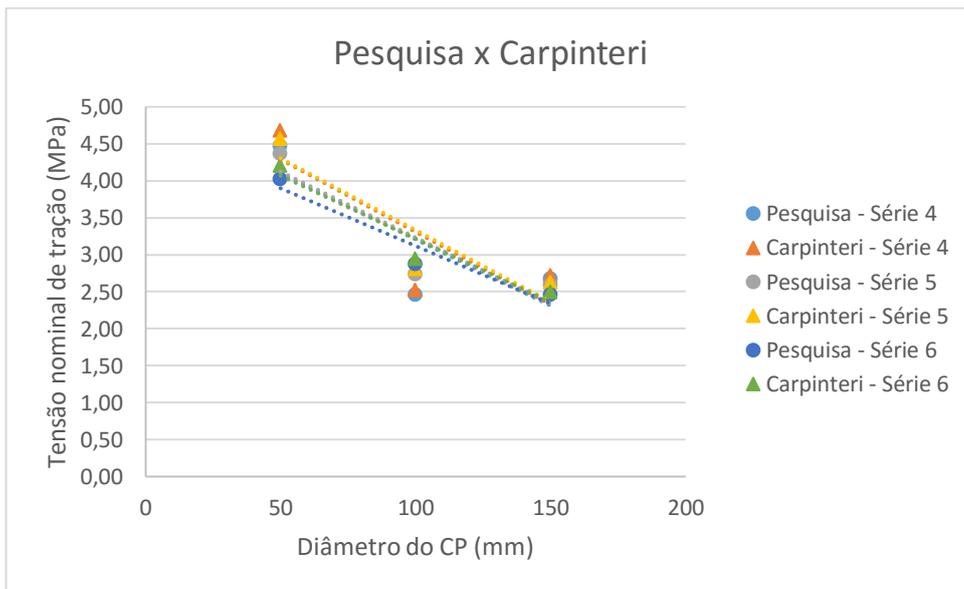


Figura 5.83 – Lei de Carpinteri x valores experimentais, Séries 4, 5 e 6.

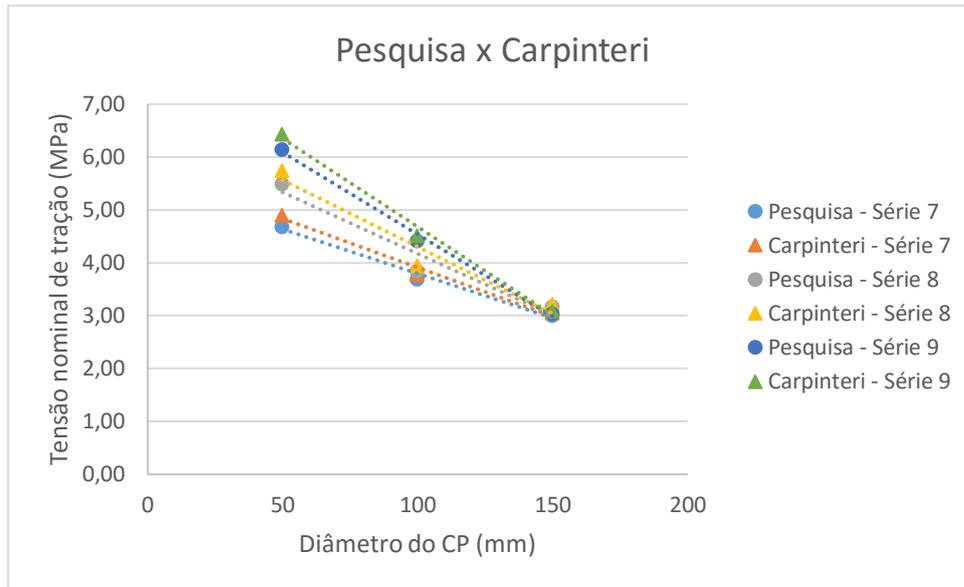


Figura 5.84 – Lei de Carpinteri x valores experimentais, Séries 7, 8 e 9.

Com os gráficos das Figuras 5.82 a 5.84 têm-se que quanto maior é a dimensão do corpo de prova, menor é sua tensão nominal de tração. Isto ocorre para todos os valores de consumo de fibra adotados. Para os diâmetros de 50 mm observa-se que as tensões de tração são diferentes para os consumos, porém, essa diferença tem uma redução com o aumento do diâmetro. Nos diâmetros de 150 mm a tensão de tração é praticamente igual para todos os consumos.

6

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

6.1

Conclusões

O estudo realizado limita-se às características dos materiais utilizados, as dimensões dos corpos de prova, os teores de fibras de aço e de suas propriedades mecânicas. A partir da análise de resultados experimentais e teóricos pode-se concluir que:

6.1.1

Ensaio de tração por compressão diametral

1. Para um mesmo diâmetro e mesma resistência à compressão, quanto maior o consumo de fibras maior é a resistência à tração, sendo que o acréscimo de f_t varia linearmente com o aumento de f_c , para todos os diâmetros e consumos de fibras analisados.
2. Existe influência significativa do consumo de fibras de aço na resistência à tração por compressão diametral dos CAFA. Para um mesmo diâmetro e mesma resistência à compressão, quanto maior o consumo de fibras maior é a resistência à tração, sendo que o acréscimo de f_t varia linearmente com o aumento de f_c , para todos os diâmetros e consumos de fibras.
3. O consumo de fibras tem menor influência na resistência à tração quando o corpo de prova tem maiores dimensões.
4. Existe influência significativa das dimensões dos corpos de prova na resistência à tração por compressão diametral dos CAFA. Para um mesmo consumo de fibras e mesma resistência à compressão, quanto maior é o diâmetro do corpo de prova menor é a sua resistência de tração, sendo que o ensaio do corpo de prova de 5 cm de diâmetro só é válido com fibras pequenas, de até 3 cm.

5. Para os ensaios realizados a resistência à tração varia linearmente com o consumo e o diâmetro do corpo de prova.
6. A análise dos resultados dos ensaios utilizando-se a média dos valores obtidos para cada grupo apresenta anomalias, que foram corrigidas ao se considerar todos os resultados individuais.
7. A resistência à tração do D15 é em torno de 55% menor do que a resistência do D5.
8. O aumento da resistência à compressão de 30 MPa para 40 MPa, acarreta um acréscimo de resistência à tração maior no concreto com consumo F20 do que nos consumos F40 e F60.
9. O aumento da resistência à compressão de 40 MPa para 50 MPa acarretou aumento da resistência à tração para todos os consumos de fibras.
10. O acréscimo da resistência à compressão tem maior influência na resistência à tração do que o maior consumo de fibras.
11. Os concretos de 30 MPa apresentaram um acréscimo maior de resistência à tração com o aumento do consumo de fibras do que os concretos de 40 MPa e 50 MPa.
12. O maior acréscimo de energia dissipada quando comparado os consumos F20 para F40 é quando o concreto apresenta menor resistência à compressão, o mesmo ocorre quando há variação de F20 para F60.
13. O acréscimo do consumo de fibras de F40 para F60 não teve influência significativa na energia dissipada.
14. A partir da Figura 5.80 conclui-se que quanto maior é a razão $\frac{f_c}{f_t}$, maior é o ângulo de atrito, pois são linearmente independentes.

6.1.2 Razão Ψ

15. A razão Ψ sempre aumenta com o acréscimo do consumo de fibras para todos os diâmetros e f_c , e varia inversamente com o diâmetro para todos os corpos de prova.

6.1.3

Ensaio de tração direta

16. A região plástica não fica delineada para o consumo de 20 kg/m³ (Figura 5.63).
17. A energia elástica de deformação aumenta com a resistência à compressão.
18. O comportamento do concreto com consumo de fibras reduzido é similar ao do concreto simples.
19. Com o aumento da resistência à compressão tem-se o aumento da energia plástica de deformação.
20. Os concretos com maiores resistências à compressão (a partir de 40 MPa), têm comportamento similares para os consumos de F40 e F60.
21. O acréscimo do consumo de fibras acarreta uma diminuição da queda da força aplicada após o pico de carga.
22. O acréscimo do consumo de fibras acarreta uma diminuição da resistência à tração direta.

6.1.4

Efeito escala

23. Quando a dimensão do agregado é pequena em relação às dimensões do corpo de prova (15 cm x 30 cm), o efeito escala tende a desaparecer devido a "homogeneidade" do material. Entretanto, no corpo de prova (5 cm x 10 cm) a "heterogeneidade" do material faz com que o efeito escala fique evidente.
24. A configuração da curva representativa do comportamento da resistência à tração por compressão diametral do CAFa em função da variação do diâmetro do corpo de prova, aproxima-se da configuração da curva traçada com a equação de CARPINTERI *et al.* (1995).
25. Os resultados experimentais para resistência à tração por compressão diametral do concreto confirmam que o efeito escala está presente neste estudo, ou seja, há um decréscimo da resistência à tração com o incremento da dimensão do corpo de prova.

26. Constata-se que os resultados obtidos experimentalmente sempre se assemelham aos estudos realizados por CARPINTERI (1992), mesmo com consumos de fibras diferentes.
27. O modelo de CARPINTERI (1992) é válido para CAFA, salientando-se que é possível afirmar isso para os consumos estudados, ou seja, 20 kg/m³, 40 kg/m³ e 60 kg/m³.
28. As expressões para o efeito escala para a determinação da resistência mecânica do concreto devem ser reavaliadas para grandes estruturas, pois em grandes dimensões o efeito escala tende a diminuir.
29. Quanto maior é a dimensão do corpo de prova menor é a influência das fibras sobre a resistência à tração do concreto.

6.2

Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para continuidade dessa pesquisa sugere-se:

- i. realização de ensaios semelhantes aos realizados, porém, utilizando-se um número maior de corpo de prova;
- ii. realização de ensaios com consumo de fibras acima de 60 kg/m³;
- iii. realização de ensaios de tração direta com consumo de fibras de 25, 30 e 35 kg/m³, para analisar a partir de qual consumo o concreto começa a ter regime plástico;
- iv. realização de ensaios semelhantes aos realizados, porém, com outros tipos de fibras;
- v. realização de mais pesquisas para verificação do efeito tamanho, variando os diâmetros máximos dos agregados;
- vi. na verificação do efeito escala sugere-se que se realize ensaios com maior variabilidade nos diâmetros de corpos de prova para determinação da resistência à tração por compressão diametral do CAFA;
- vii. verificar o efeito escala devido às fibras, utilizando-se fibras de aço com diferentes dimensões e índice de esbeltez.

7

Referências bibliográficas

ACI 544.4R-88; AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Manual of Concrete Practice: Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete. Detroit, v.85.1988.

ACI 544.1R-96; AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Manual of concrete practice: State of the art report on fiber reinforced concrete. Detroit. v.93.1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR-7222: Argamassa e Concreto – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos de prova Cilíndrico. Brasil, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR-9937: Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR-7217: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR NM 67:1998. Concreto – Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR-8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR-5739: Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos de prova de Concreto Cilíndricos – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR-15530: Fibras de aço para concreto – Especificações. Brasil, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR-5738: Moldagem e Cura de Corpos de Prova Cilíndricos ou Prismáticos de Concreto. Rio de Janeiro, 2003.

AVESTON, J.; COOPER, G. A.; KELLY, A. Single and Multiple fracture. Conference on the Properties of Fiber Composites, p.15-26., London, 1971.

BARROS, J. A. O. Caracterização do comportamento do betão reforçado com fibras de aço por intermédio de ensaios experimentais. Jornadas de Estruturas de Betão, Betões de Elevado Desempenho, 151-170, 1996.

BARROS, J. A. O.; CRUZ, J. S.; UIRIX, E. Avaliação da Capacidade de Absorção de Energia de Betões Reforçados com Fibras de aço. Portugal, 1999.

BENTUR, A.; MINDESS, S. Fiber Reinforced Cementitious Composites. New York. Barking, Elsevier Science Publishers, 1990.

BAZANT, Z. P. Size Effect in Blunt Fracture. Concrete, Rock, Metal, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 518-535, 1984.

BAZANT, Z. P.; KAZEMI, M. T.; HASEGAWA, T.; MAZARS, J. Size Effect in Brazilian Split-cylinder tests: Measurements and Fractura Analysis. ACI Journal, Vol 88, p 325-332, 1991.

CARMONA, S.; GETTU, R.; HURTADO, C.; MARTÍN, M. A. Use Of Splitting-Tension Test To Characterize The Toughness Of Fiber-Reforced Concrete. *Anales de mecanica de la fractura*, v.12, p 233–238. 1995.

CARPINTERI, A. Fractal Nature of Material Microstructure and Size Effect on Apparent Mechanical Properties. *Mechanics of Materials*, 1992.

CARPINTERI, A.; CHIAIA, B.; FERRO, G. Size effects on nominal tensile strength of concrete structures: multifractality of material ligaments and dimensional transition from order to disorder. *Materials and Structures*. p 311-317. 1995.

CASTRO, N. S. Influência Do Agregado Graúdo Na Trabalhabilidade Do Concreto Reforçado Com Fibra De Aço. Feira de Santana, 2010. 72p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana.

CALLISTER, W. D. *Ciência e Engenharia de materiais: uma introdução*. 8. ed. LTC. Rio de Janeiro, 2012.

CHEN. *Plasticity in reinforced concrete*. McGraw-Hill, 1982.

COURA, C. V. G., BARBOSA, M. T. G., DARWISH, F. A. I. Análise da Lei de Bazant e Carpinteri na Resistência à Compressão do Concreto. *Rev. Int. De Desastres Naturales, Accidentes e Infraestrutura Civil*. Vol 8(1), 2007.

COURA, C. V. G. Estudo da influência da Dimensão do Agregado e do Corpo de prova na Resistência à compressão do Concreto. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Fluminense, Brasil, 2006.

CUCCHIARA, C.; MENDOLA, L. L.; PAPIA, M. Effectiveness of stirrups and steel fibres as shear reinforcement. *Cement and Concrete Composites*, v.26, n.7, p.777-786, 2004.

DENNEMAN, E.; KEARSLEY, E. P.; VISSER, A. T. Splitting tensile test for fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*, 2011.

ELFAHAL, M. M; KRAUTHAMMER, T; OHNO, T; BEPPU, M; MINDESS, S. Size effect for normal strength concrete cylinders subjected to axial impact. *International Journal of Impact Engineering*. 2004.

ELFAHAL, M. M; KRAUTHAMMER, T; Dynamic Size effect in normal and High-Strength concrete cylinders. *ACI Materials Journal*. Vol 102, p 77-85, 2005.

FIGUEIREDO, A. D. CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Boletim técnico. São Paulo, 2000.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com Fibras. *Concreto Ensino, Pesquisa e Realizações*. IBRACON, Iphis Gráfica e Editora, São Paulo, 2005.

FIGUEIREDO, A. D.; CHAMA NETO, P. J.; FARIA, H. M. A nova normalização brasileira sobre fibras de aço. *Concreto & Construções*. IBRACON. Ano XXXVI. Nº 50. ISSN 1809-7197. p. 67-75. 2008.

FIGUEIREDO, A. D.; CECCATO, M. R.; TORNARI, P. Influência do comprimento da fibra no desempenho do concreto reforçado com fibras de aço. *Congresso Brasileiro do Concreto*. São Paulo, 1997.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. Manual de dosagem e controle do concreto. São Paulo: PINI, 1993.

MAIDL, B, R. *Steel Fibre Reinforced Concrete*. Ernst & Sohn, Berlim, 1995.
MARANGON, E. Desenvolvimento e Caracterização de Concretos Autoadensáveis Reforçados Com Fibras de Aço. Dissertação de mestrado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

MARANGON, E. Caracterização Material e Estrutural de Concretos Autoadensáveis Reforçados Com Fibras de Aço. Tese de Doutorado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Estrutura, propriedades e materiais. Editora Pini Ltda. São Paulo, novembro de 1994.

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

NUNES, F. G. T.; ARAÚJO, D. L.; GUERRA, E. A. Influência da adição de fibras de aço nas propriedades mecânicas do concreto. Congresso Brasileiro de Concreto, Rio de Janeiro, 2006

NUNES, N. L. AGOPYAN, V. A Influência do Fator de Forma da Fibra na Tenacidade à Flexão do Concreto Reforçado com Fibras de Aço. Boletim Técnico, EPUSP, 18 p., São Paulo, 1998.

RIOS, R. D.; RIERA, J. D.; ITURRIOZ, I. Uma Contribuição ao Entendimento do Efeito de Escala em Estruturas de Concreto. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

SILVA, F. A.; MOBASHER, B., TOLEDO FILHO, R.D. Recent Advances in High Performance Natural (Sisal) Fiber Cement Composites. In: Seventh International Rilem Symposium on Fibre Reinforced Concrete: Design and Applications, pp. 105-113, Chennai. Rilem Publications S.A.R.L. 2008.

SOCHOR, M; Strength of Materials I. 2001.

TOLEDO FILHO, R. D. Materiais compósitos reforçados com fibras naturais: Caracterização experimental, Tese de Doutorado em Engenharia, DEC-PUC-Rio/DEC-Imperial College, Rio de Janeiro. 1997.

A.Anexo A – Ensaio de compressão diametral

Os gráficos desse anexo apresentam os resultados dos ensaios de compressão diametral.

Série 1

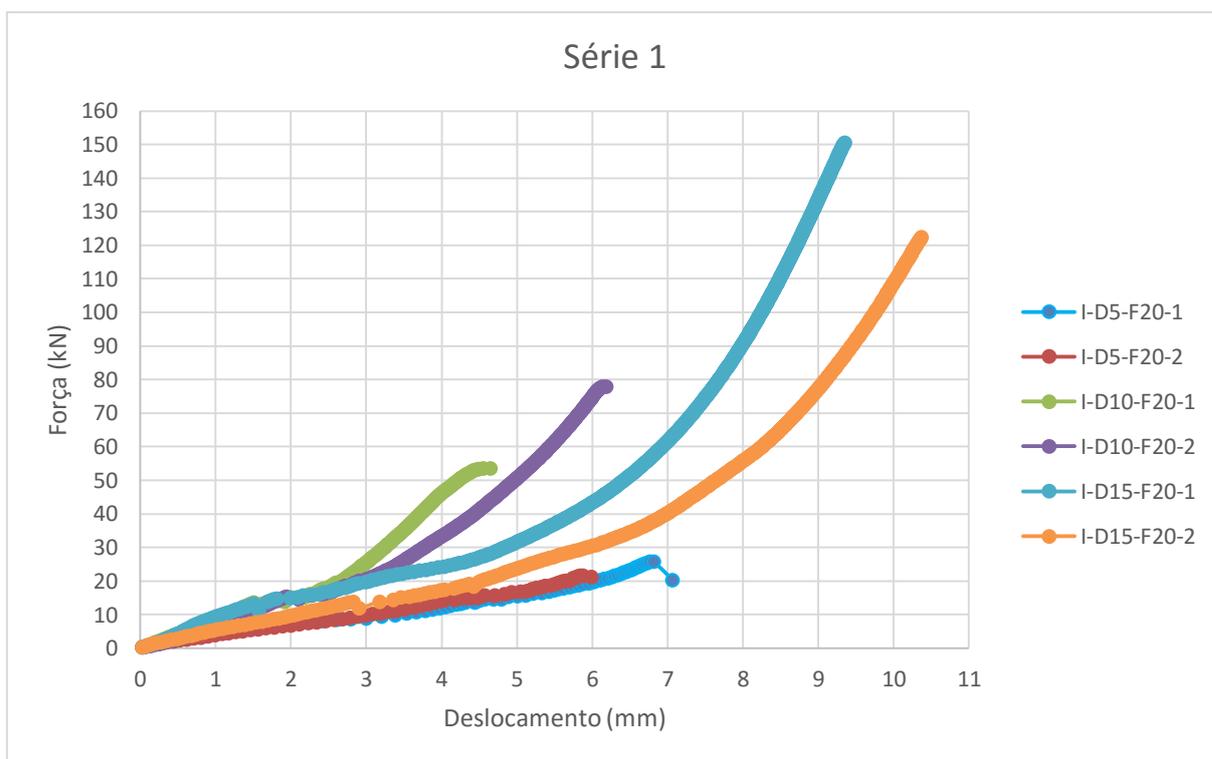


Figura A.1 – Força x deslocamento, Série 1.

Série 2

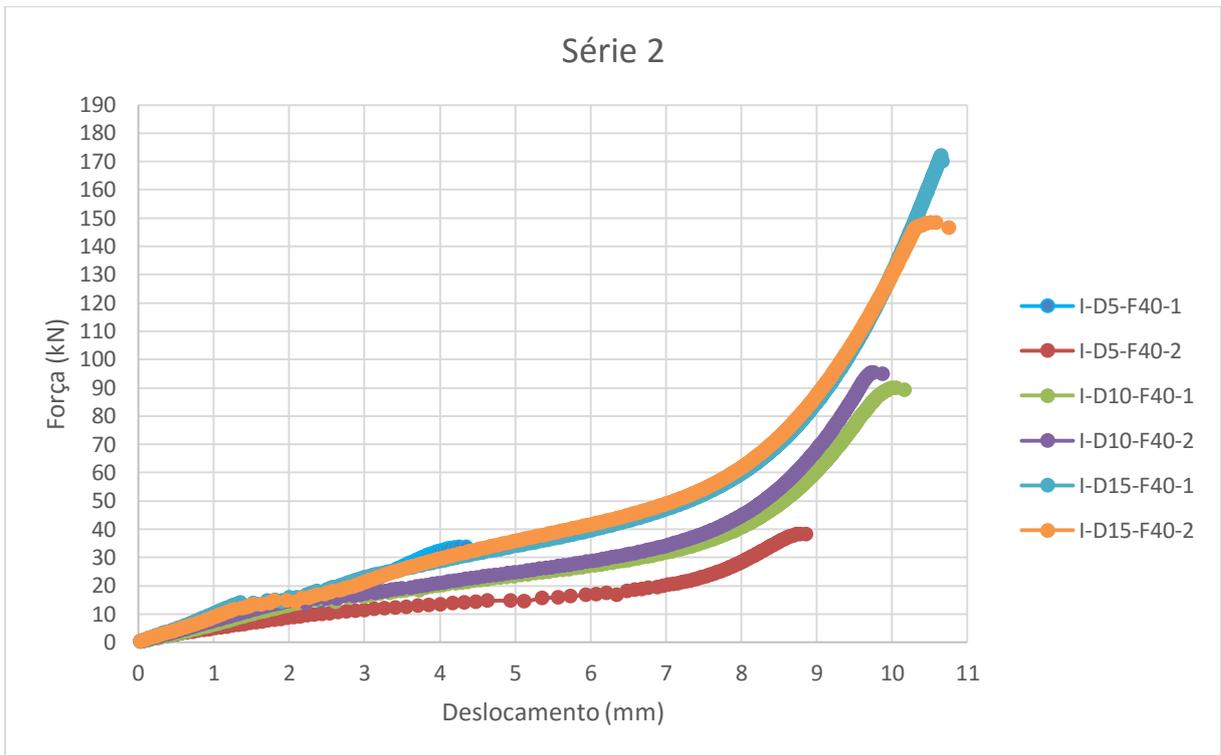


Figura A.2 – Força x deslocamento, Série 2.

Série 3

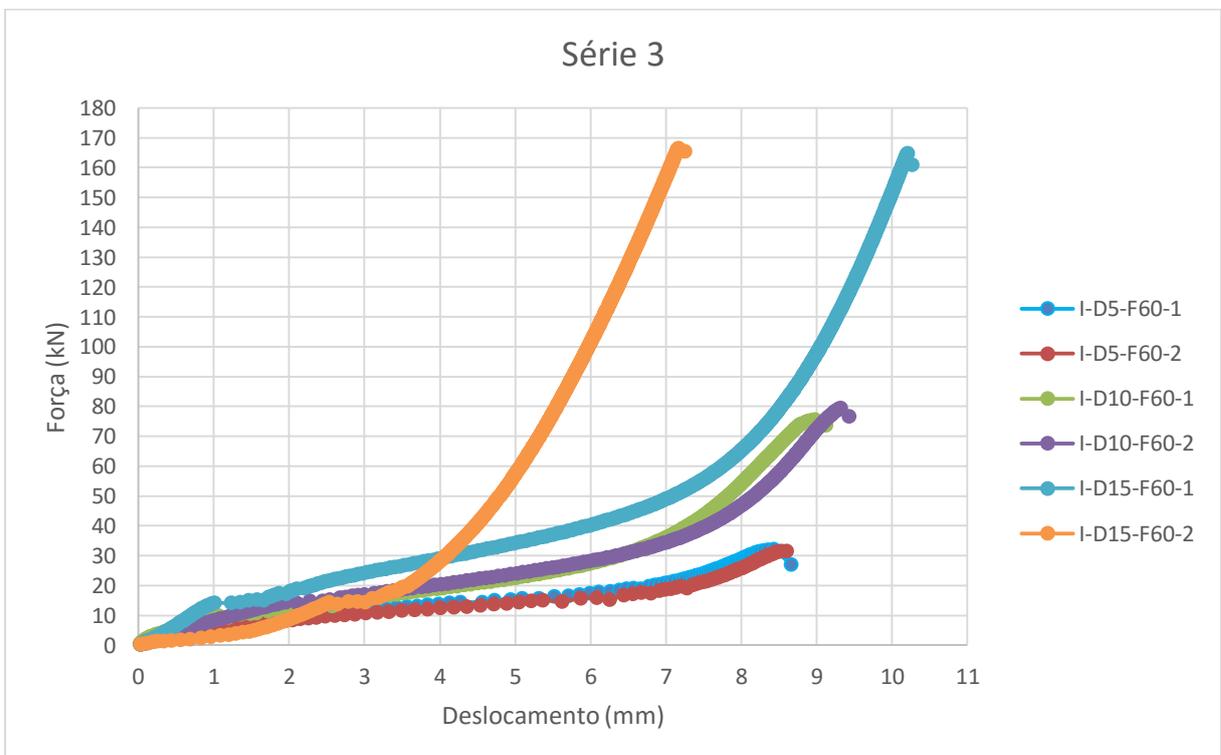


Figura A.3 – Força x deslocamento, Série 3.

Série 4

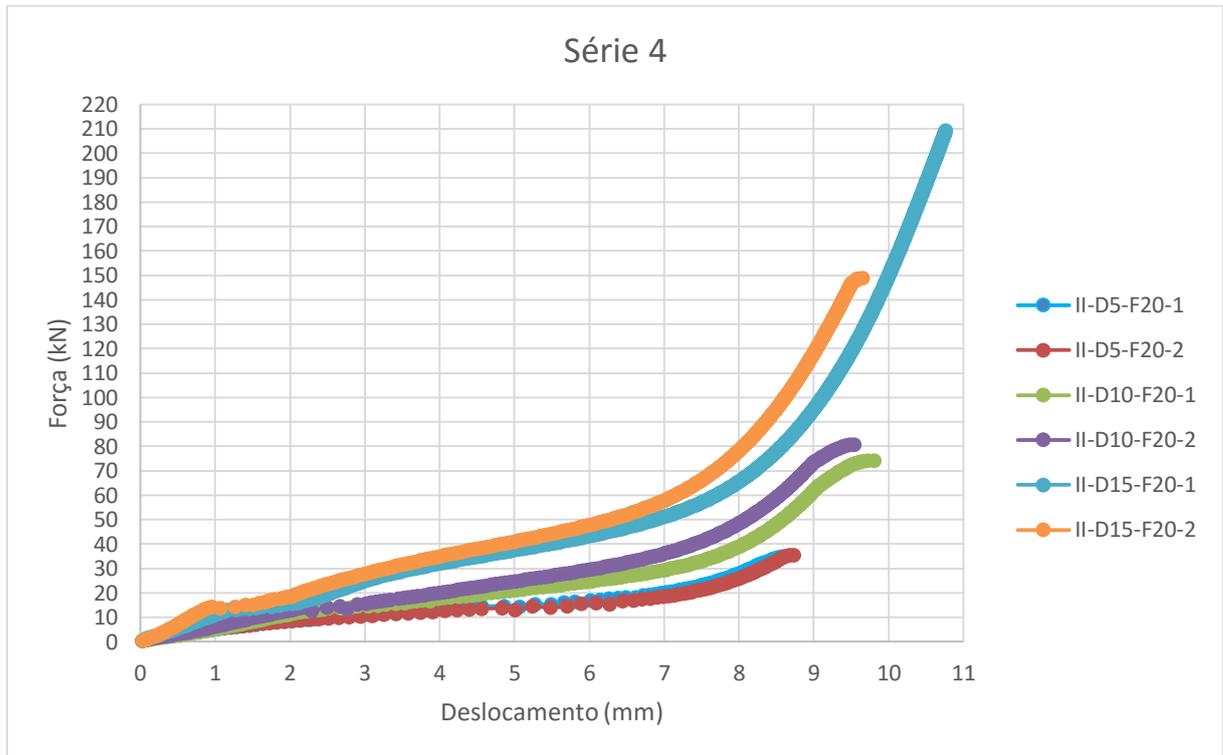


Figura A.4 – Força x deslocamento, Série 4.

Série 5

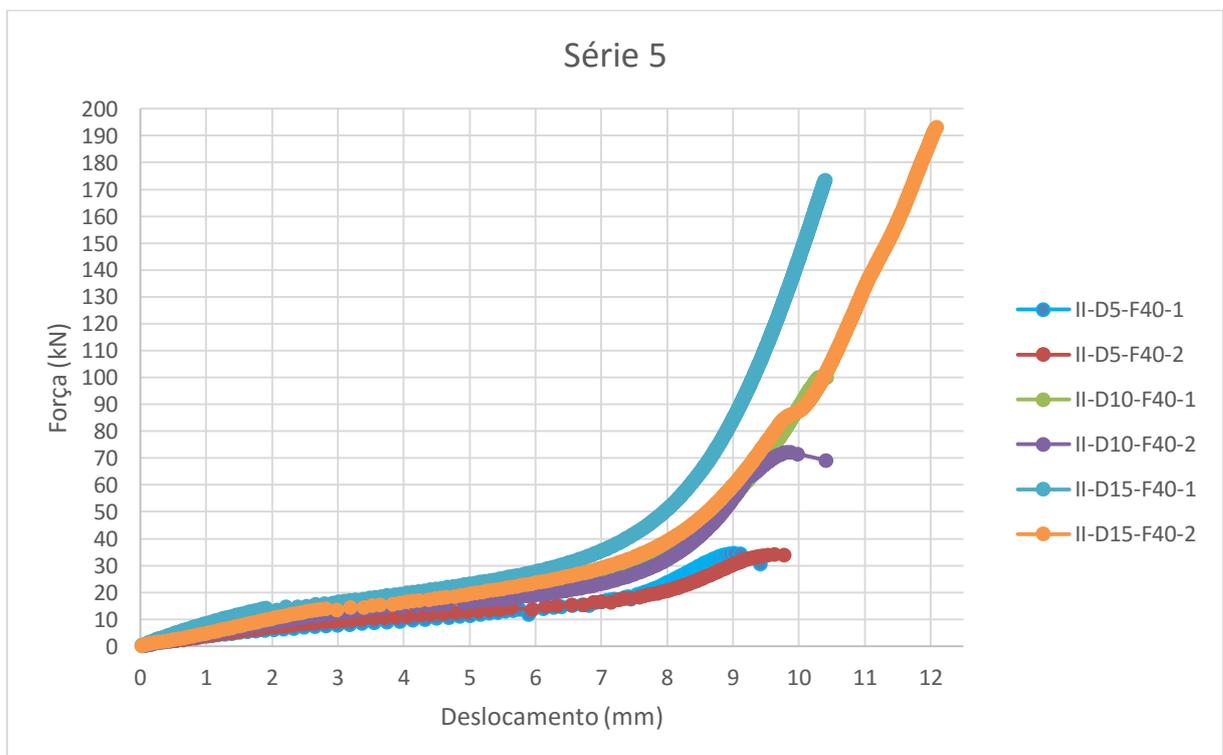


Figura A.5 – Força x deslocamento, Série 5.

Série 6

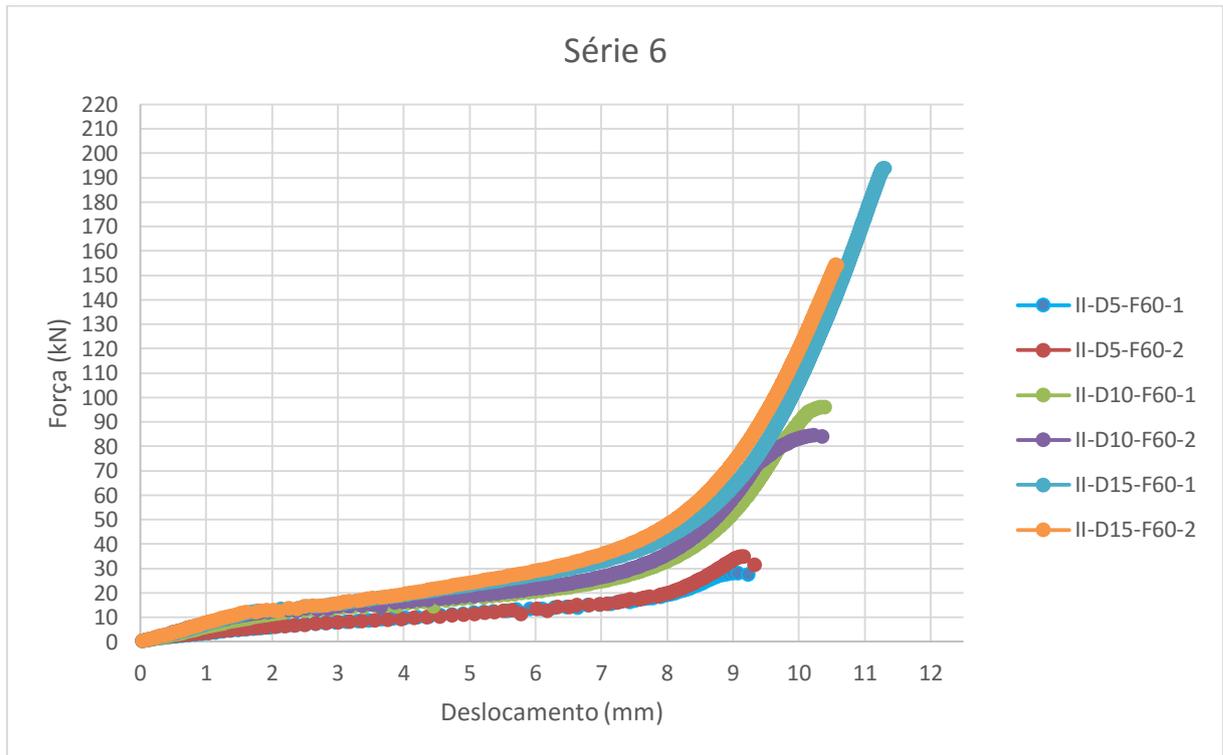


Figura A.6 – Força x deslocamento, Série 6.

Série 7

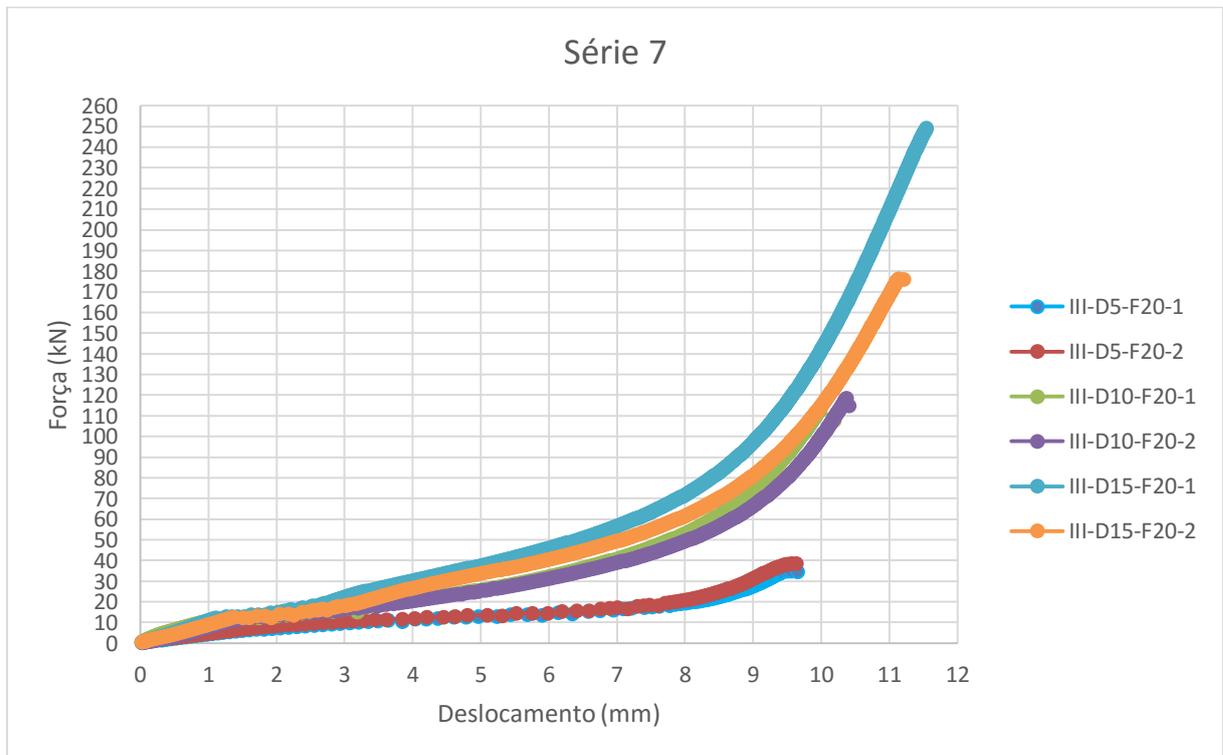


Figura A.7 – Força x deslocamento, Série 7.

Série 8

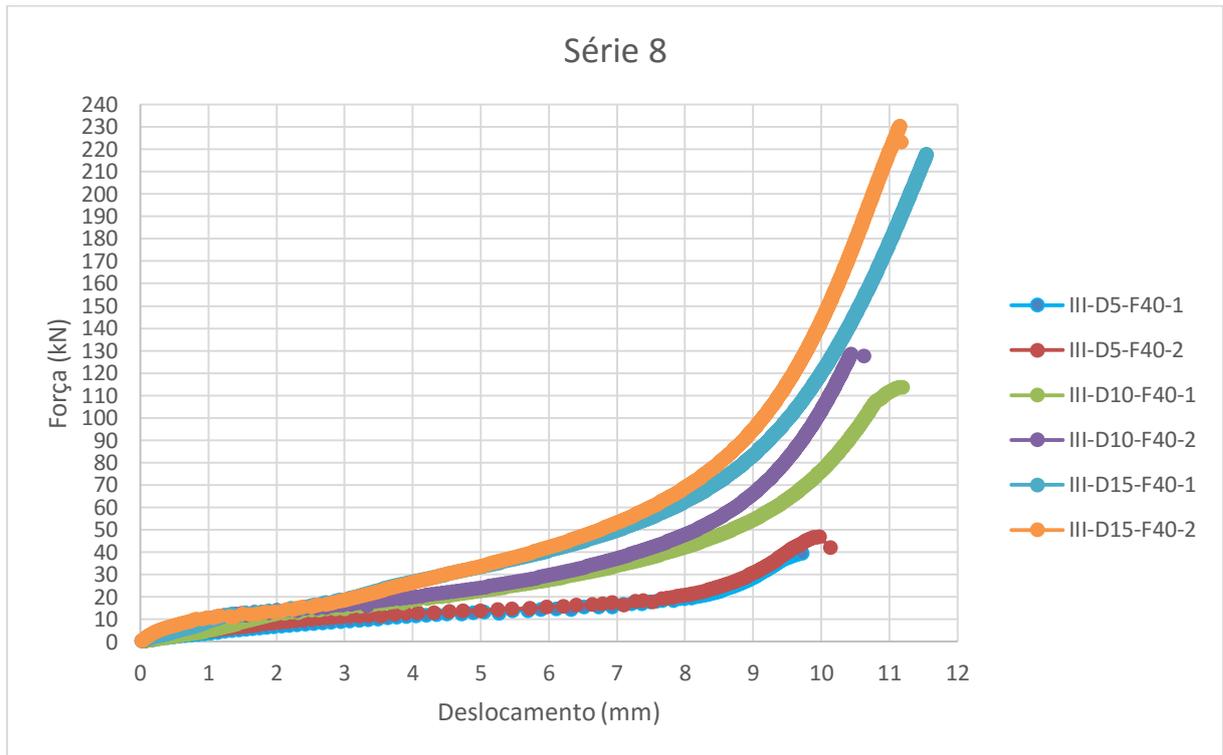


Figura A.8 – Força x deslocamento, Série 8.

Série 9

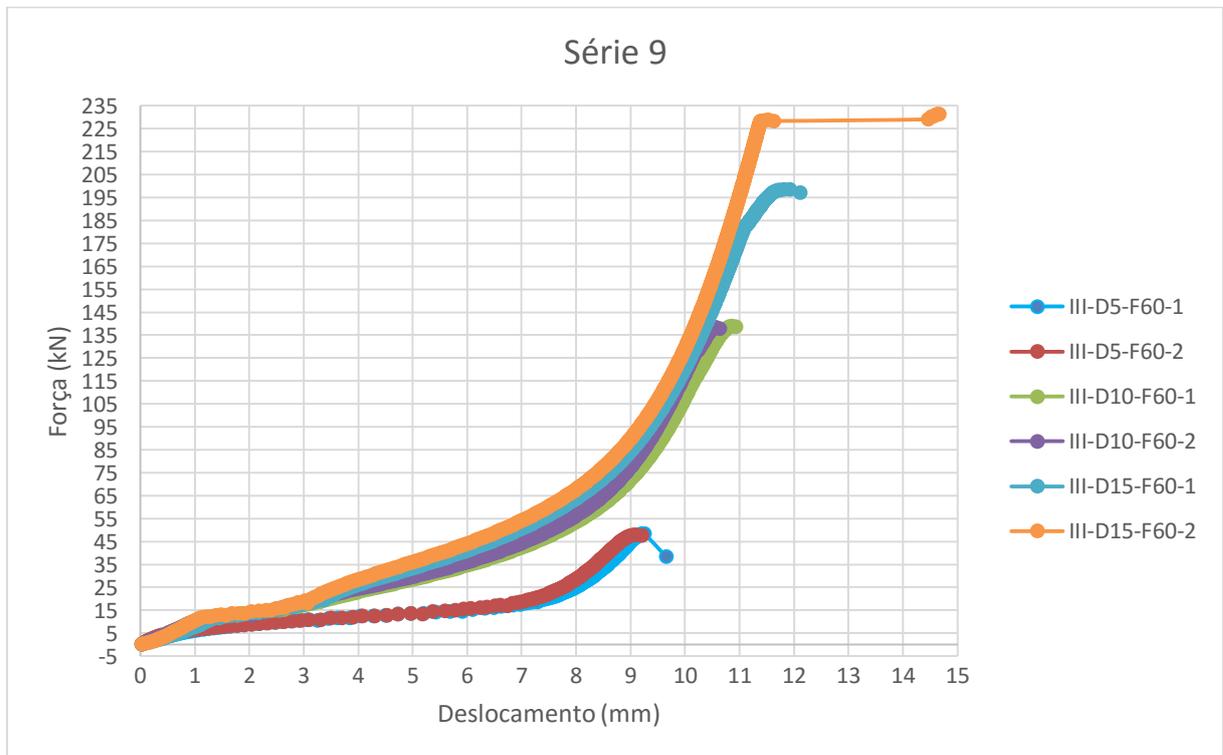


Figura A.9 – Força x deslocamento, Série 9

B.Anexo B – Ensaios de compressão simples

Os gráficos desse anexo apresentam os resultados dos ensaios de compressão.

Série 1

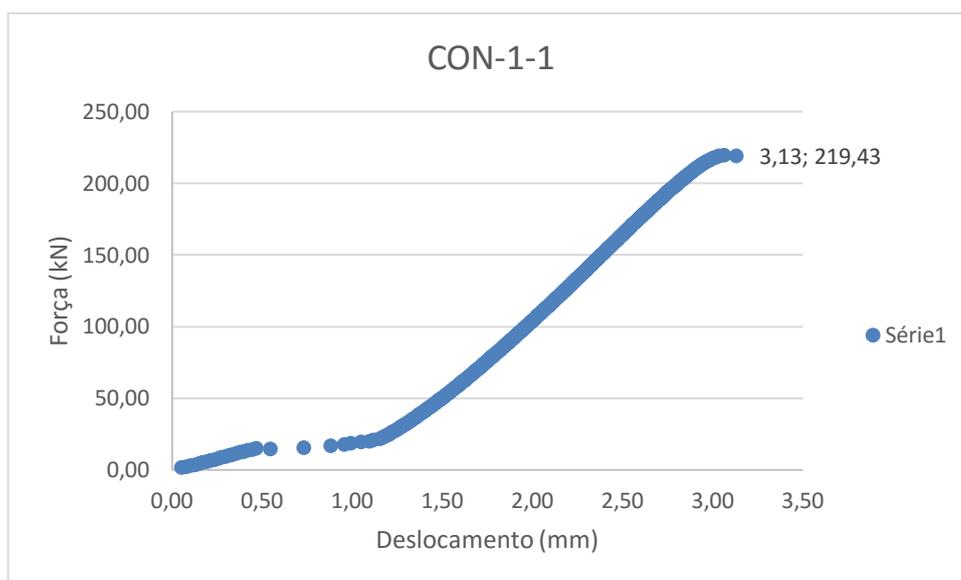


Figura B.1 – Força x deslocamento, CON-1-1.

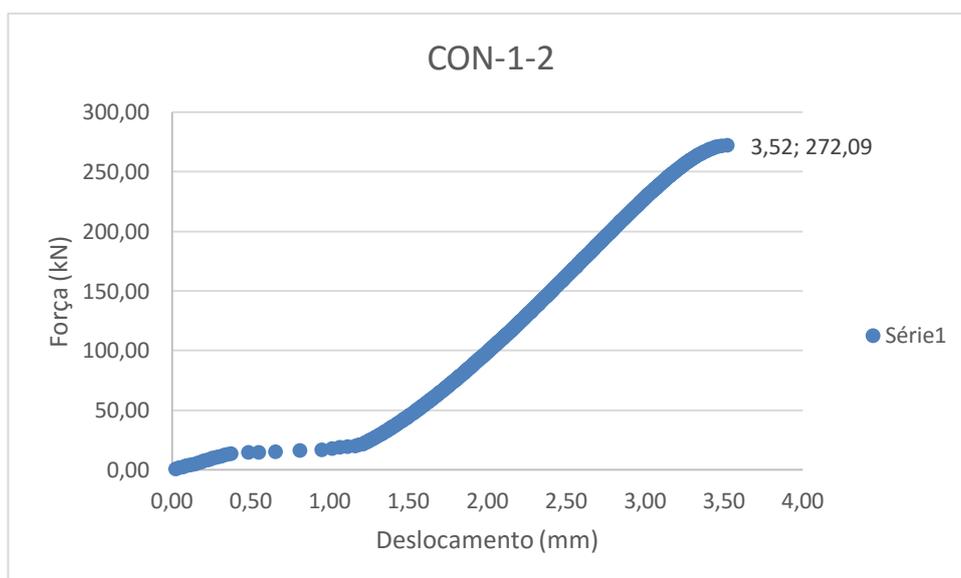


Figura B.2 – Força x deslocamento, CON-1-2.

Série 2

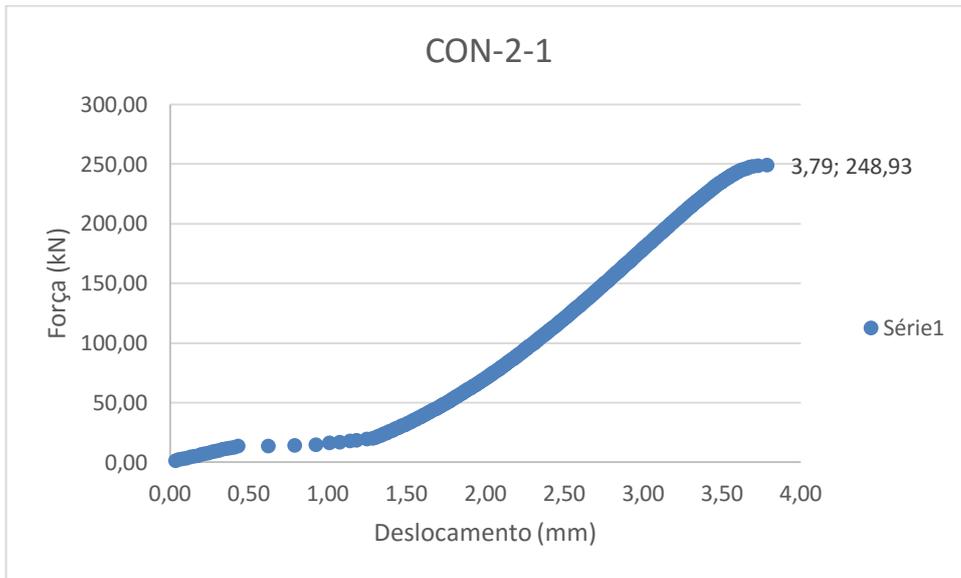


Figura B.3 – Força x deslocamento, CON-2-1.

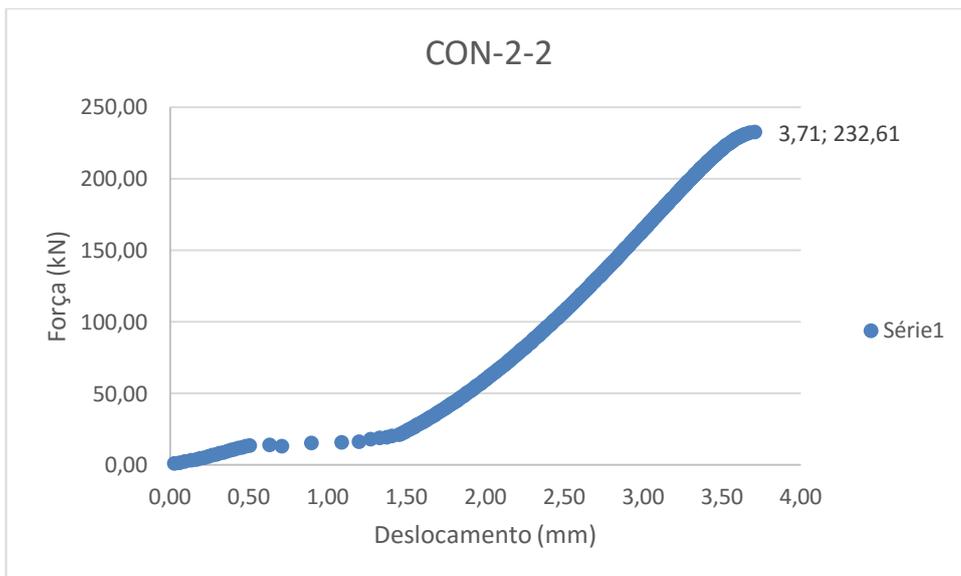


Figura B.4 – Força x deslocamento, CON-2-2.

Série 3

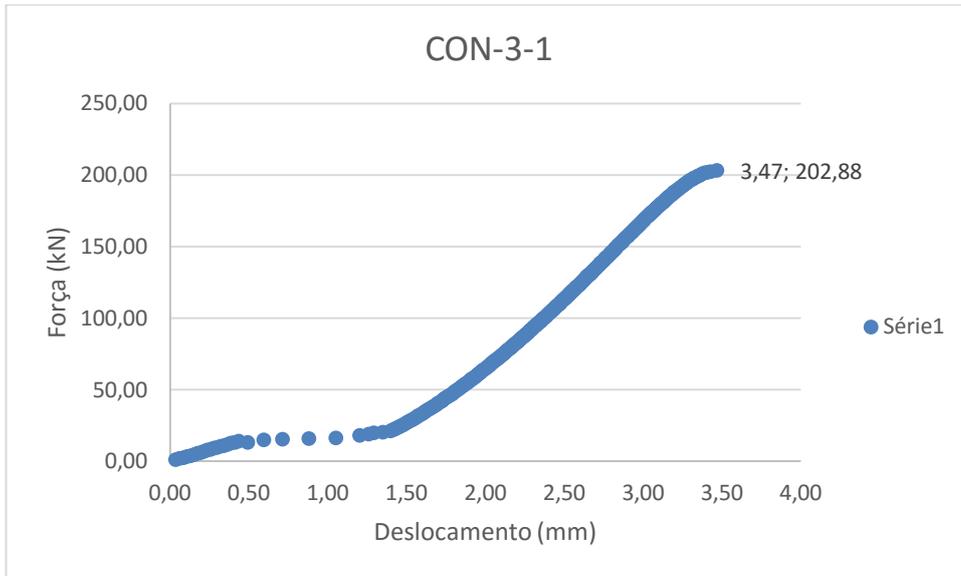


Figura B.5 – Força x deslocamento, CON-3-1.

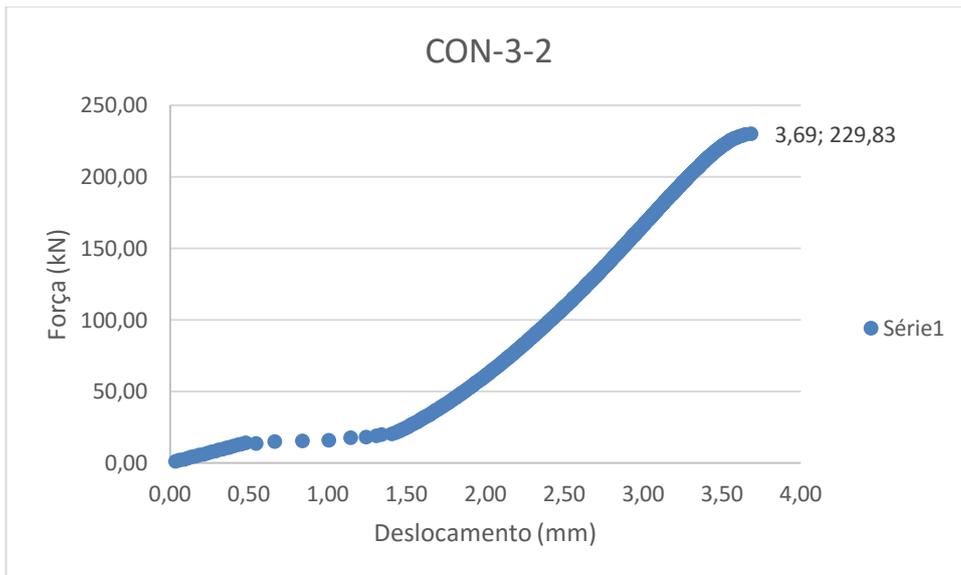


Figura B.6 – Força x deslocamento, CON-3-2.

Série 4

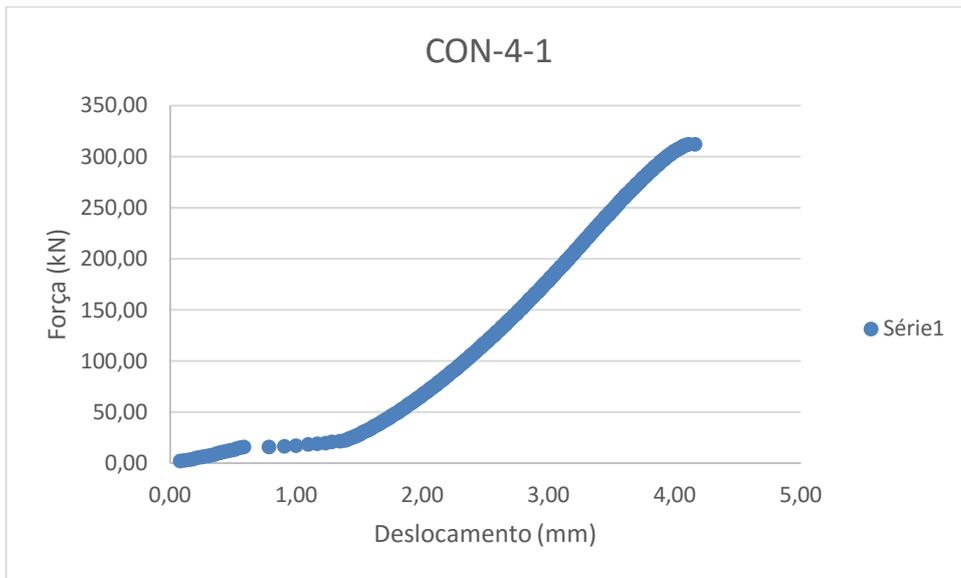


Figura B.7 – Força x deslocamento, CON-4-1.

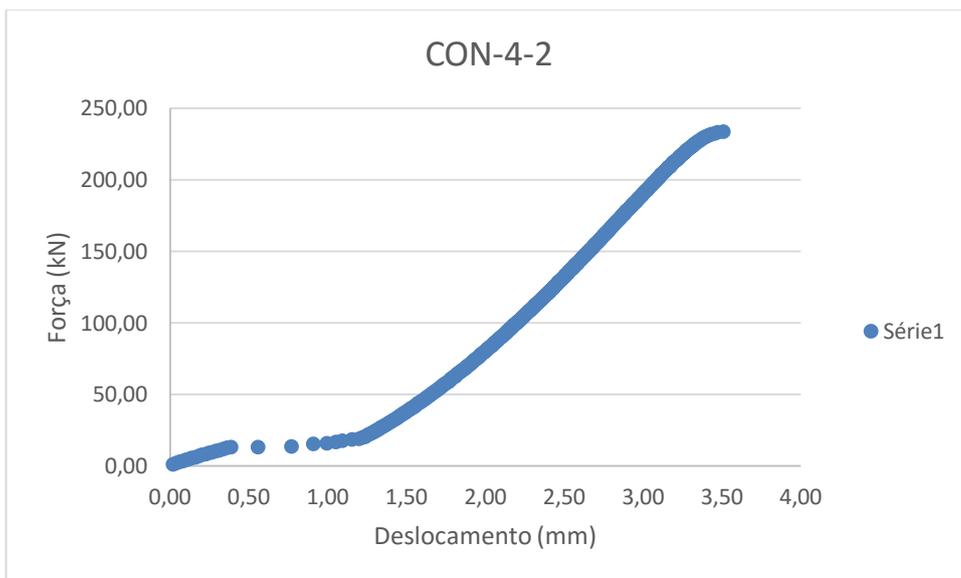


Figura B.8 – Força x deslocamento, CON-4-2.

Série 5

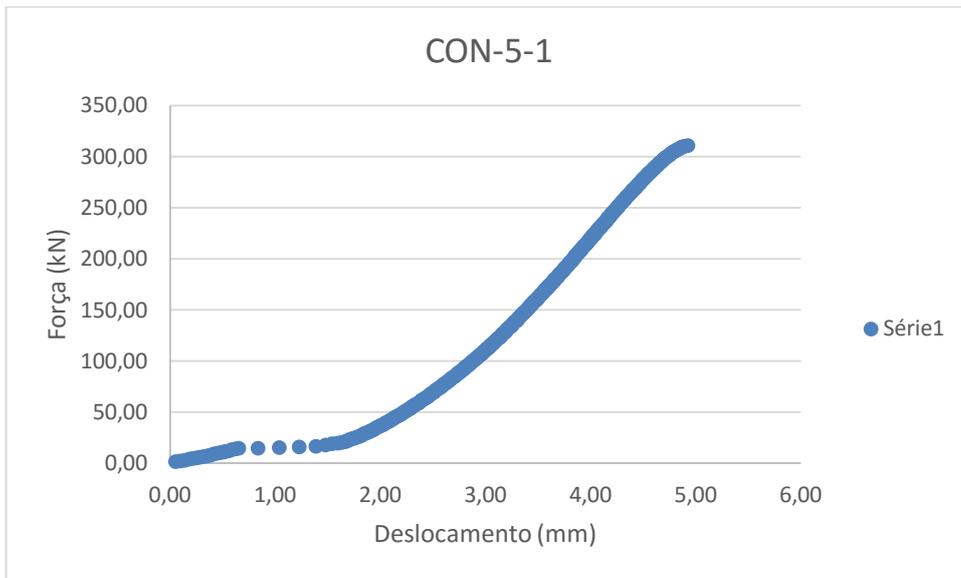


Figura B.9 – Força x deslocamento, CON-5-1.

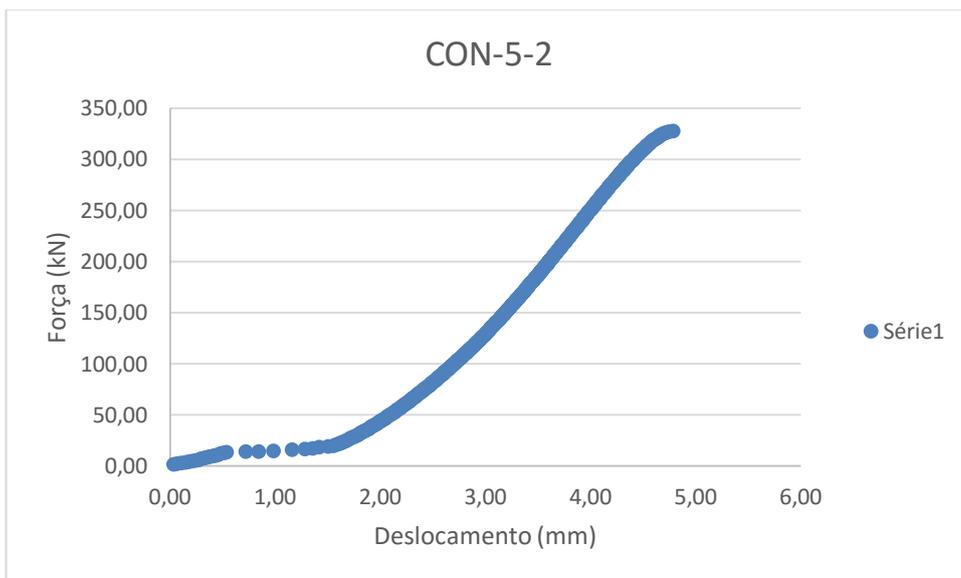


Figura B.10 – Força x deslocamento, CON-5-2.

Série 6

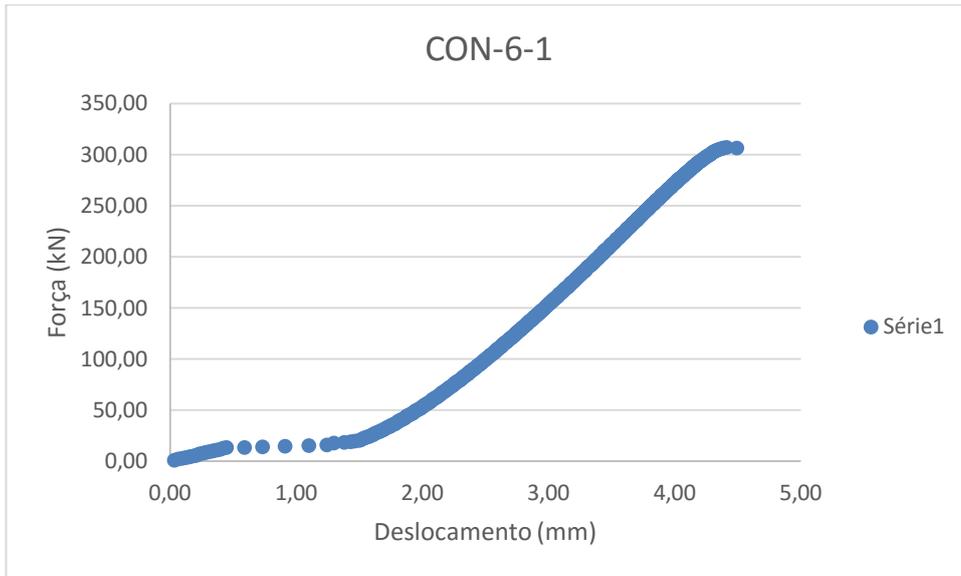


Figura B.11 – Força x deslocamento, CON-6-1.

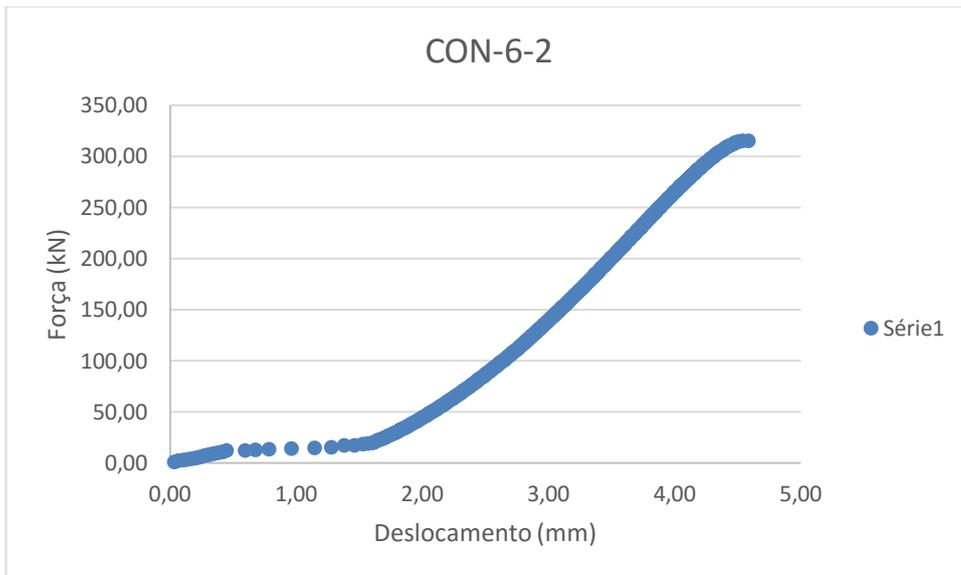


Figura B.12 – Força x deslocamento, CON-6-2.

Série 7

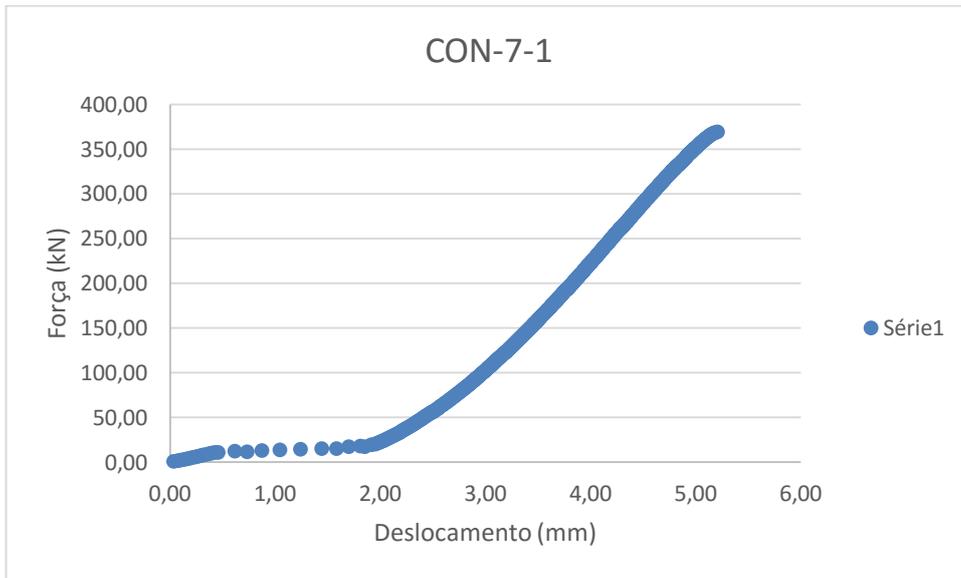


Figura B.13 – Força x deslocamento, CON-7-1.

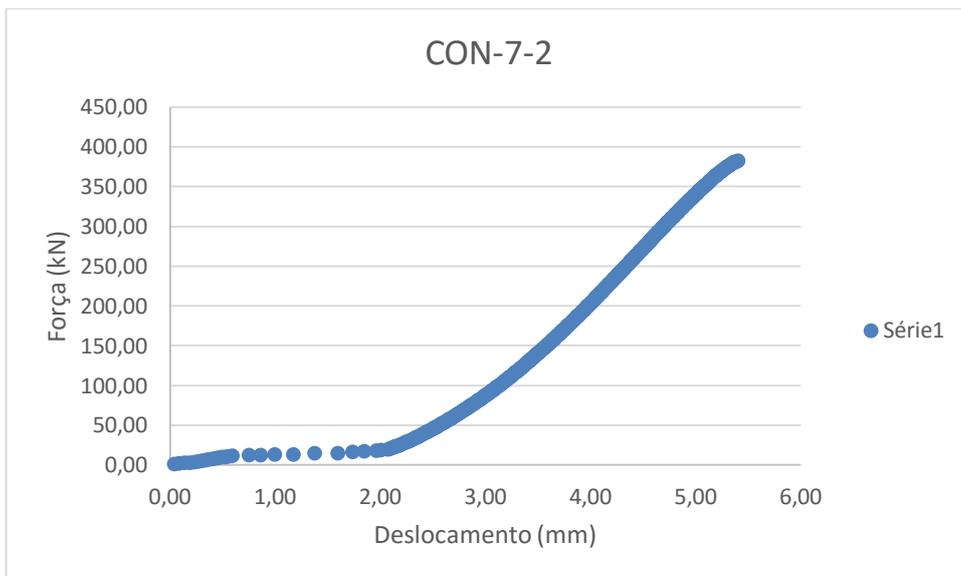


Figura B.14 – Força x deslocamento, CON-7-2.

Série 8

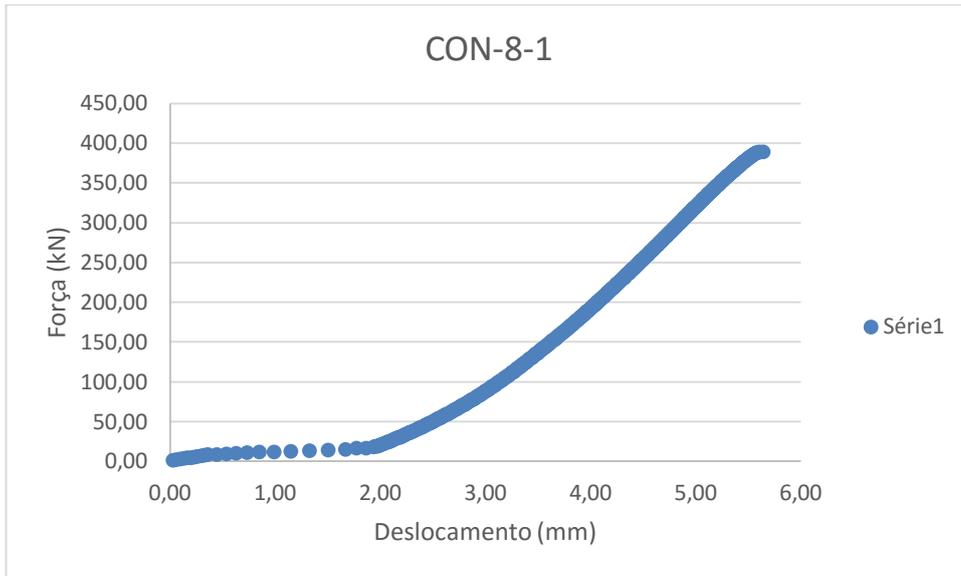


Figura B.15 – Força x deslocamento, CON-8-1.

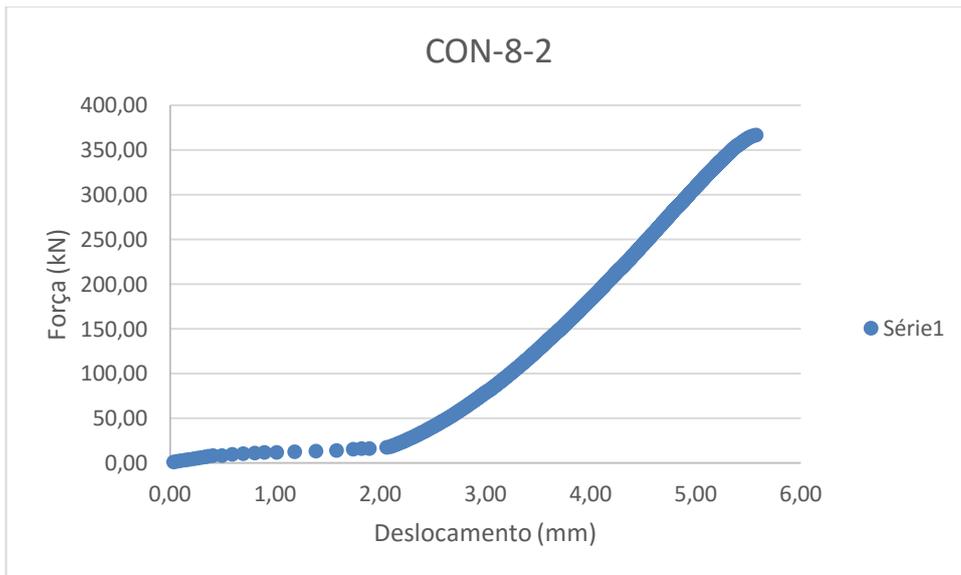


Figura B.16 – Força x deslocamento, CON-8-2.

Série 9

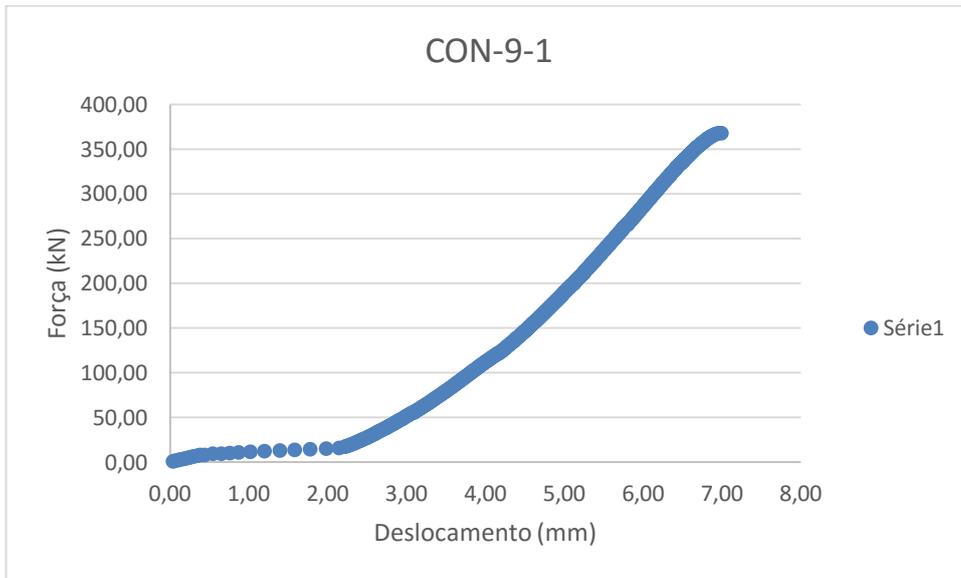


Figura B.17 – Força x deslocamento, CON-9-1.

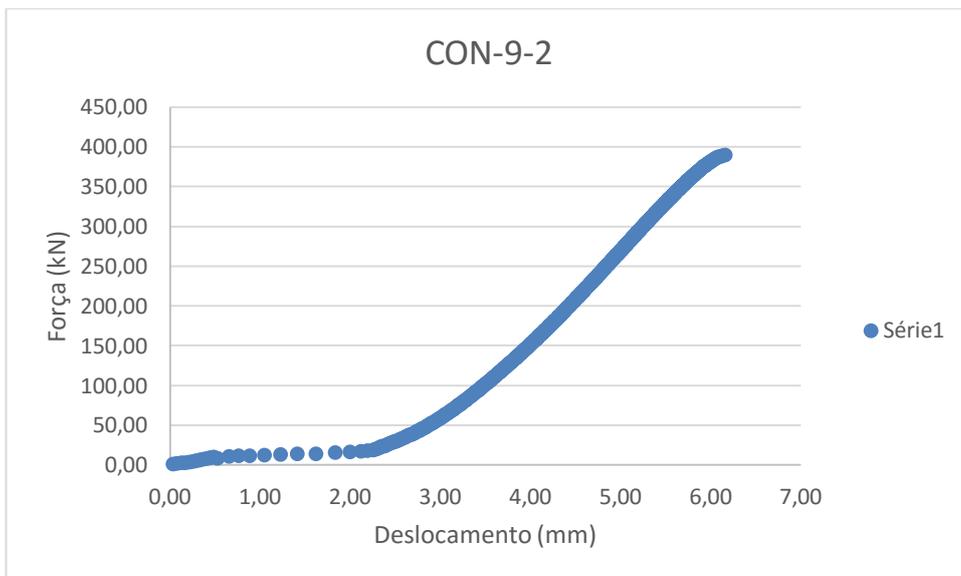


Figura B.18– Força x deslocamento, CON-9-2

C. Anexo C – Ensaios de tração direta

Os gráficos desse anexo apresentam os resultados dos ensaios de tração direta.

Série 1

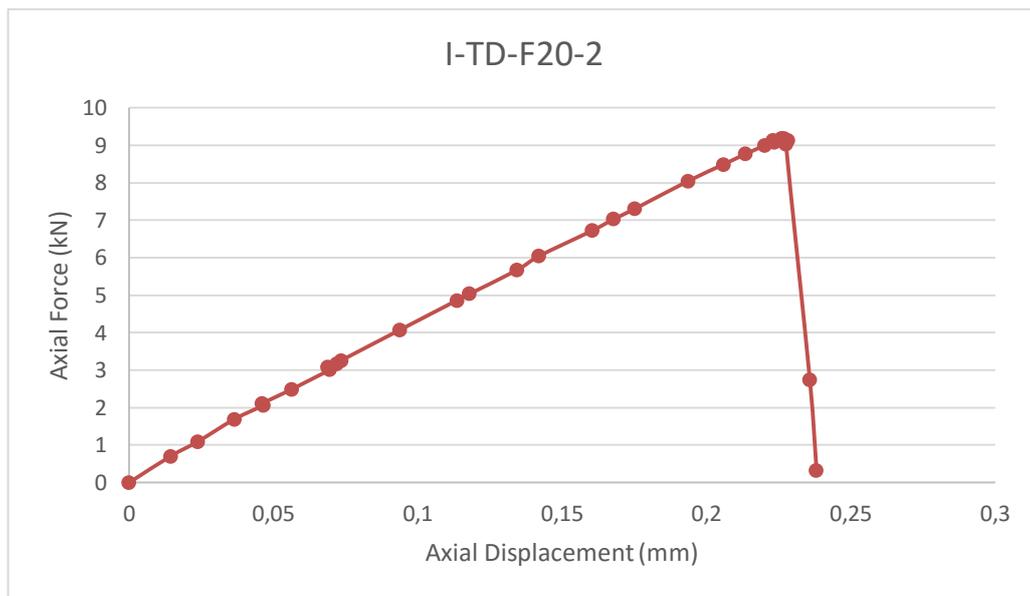


Figura.C.1 – Força x deslocamento, I-TD-F20-2.

Série 2

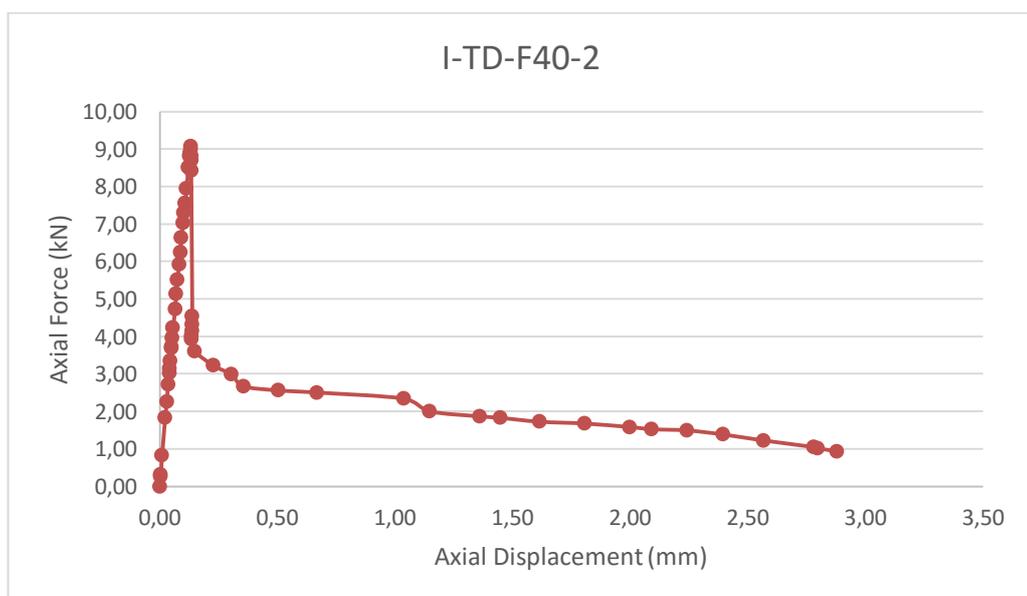


Figura C.2 – Força x deslocamento, I-TD-F40-2.

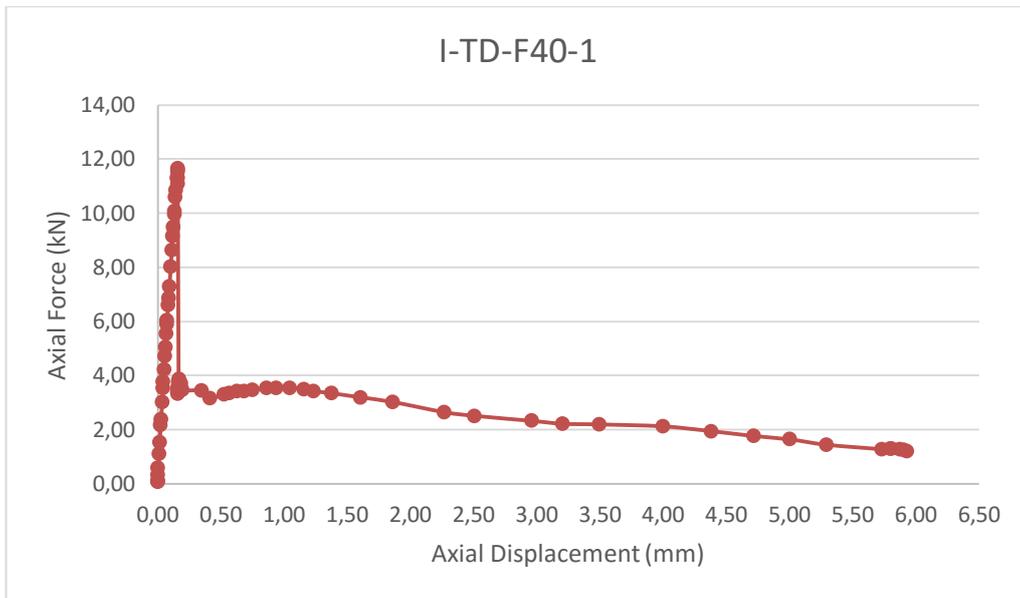


Figura C.3 – Força x deslocamento, I-TD-F40-1.

Série 3

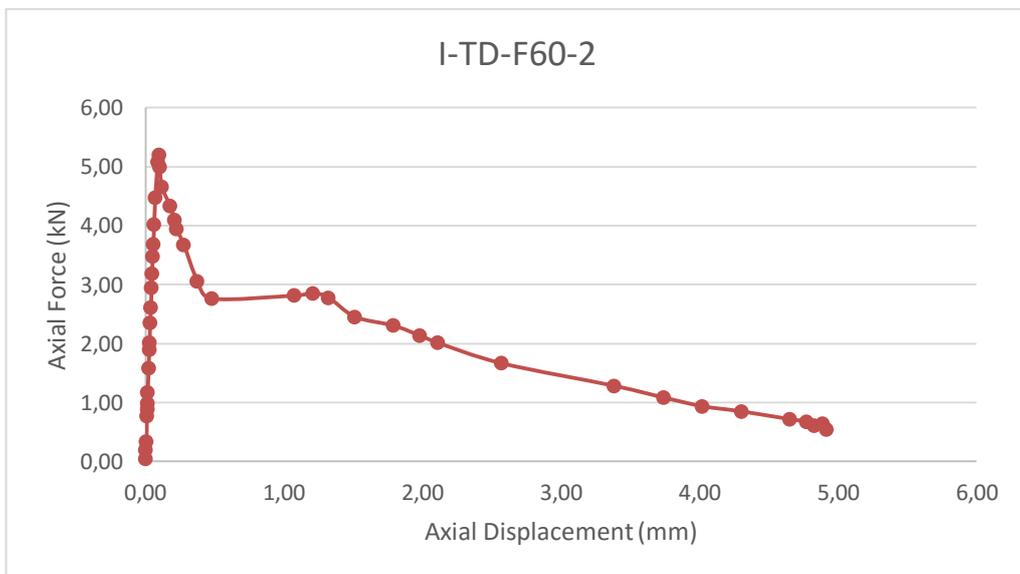


Figura C.4 – Força x deslocamento, I-TD-F60-2.

Série 4

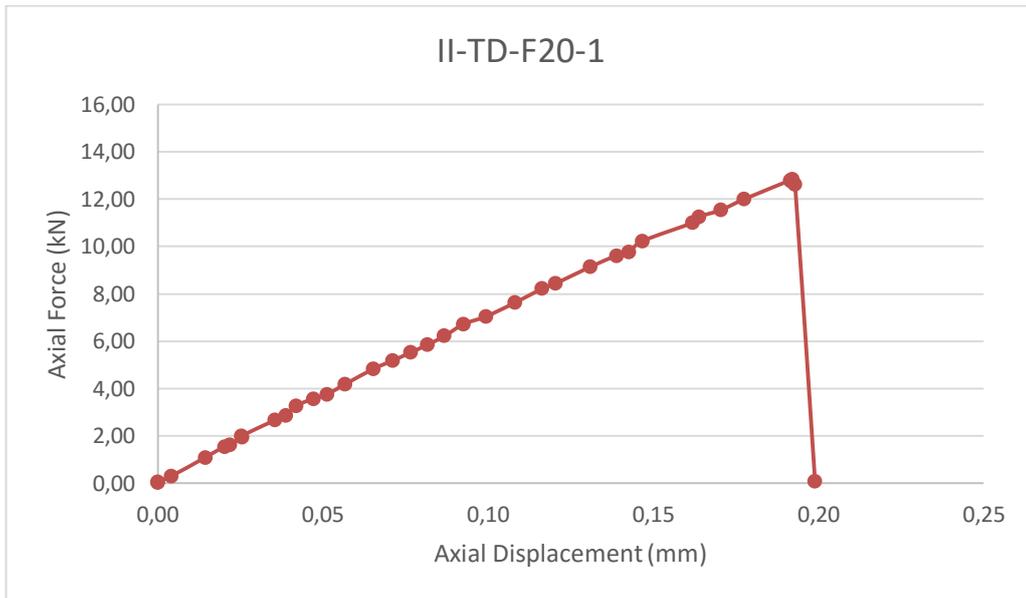


Figura C.5 – Força x deslocamento, II-TD-F20-1.

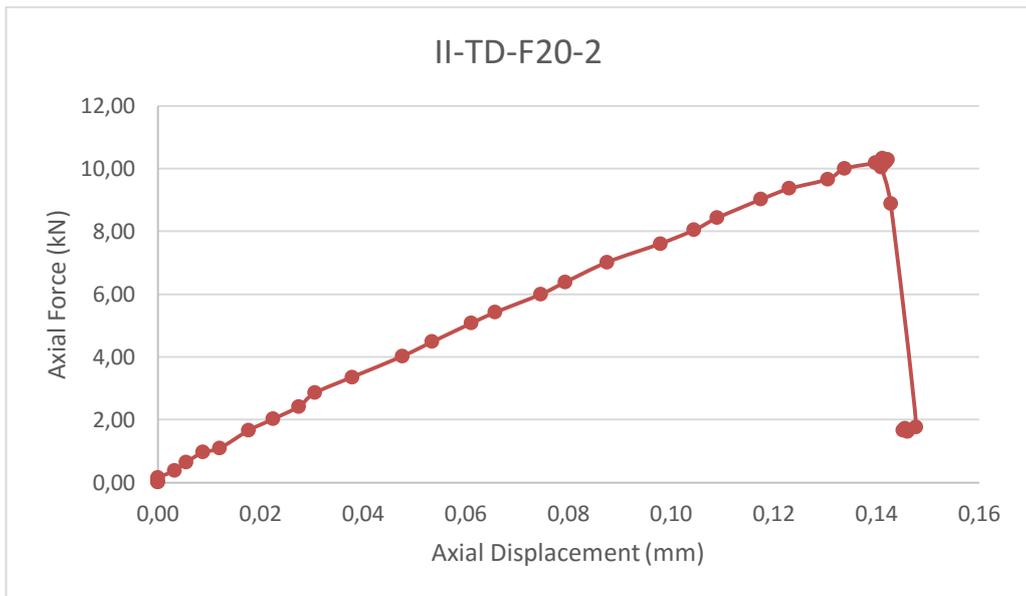


Figura C.6 – Força x deslocamento, II-TD-F20-2.

Série 5

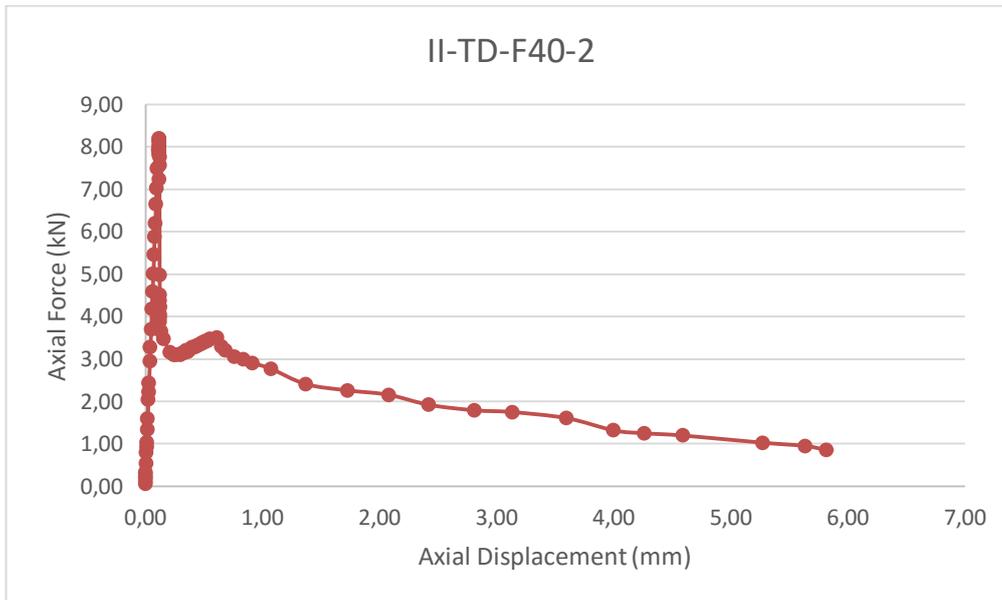


Figura C.7 – Força x deslocamento, II-TD-F40-2.

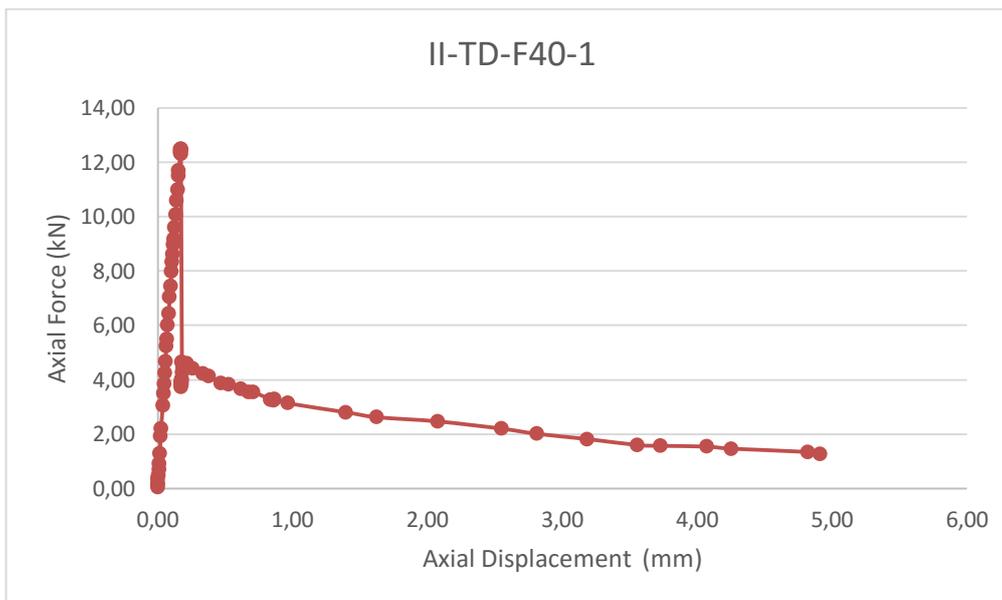


Figura C.8 – Força x deslocamento, II-TD-F40-1.

Série 6

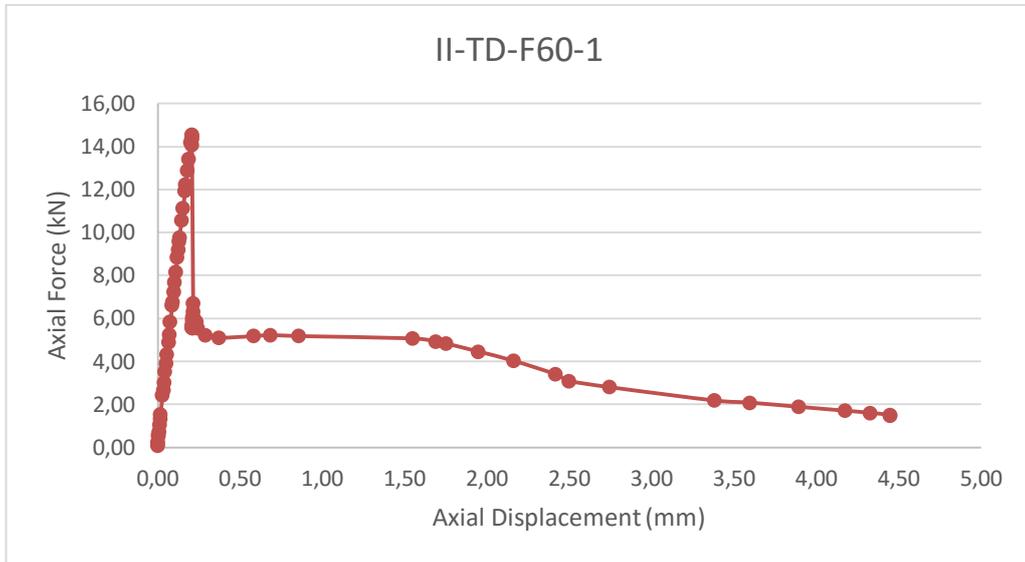


Figura C.9 – Força x deslocamento, II-TD-F60-1.

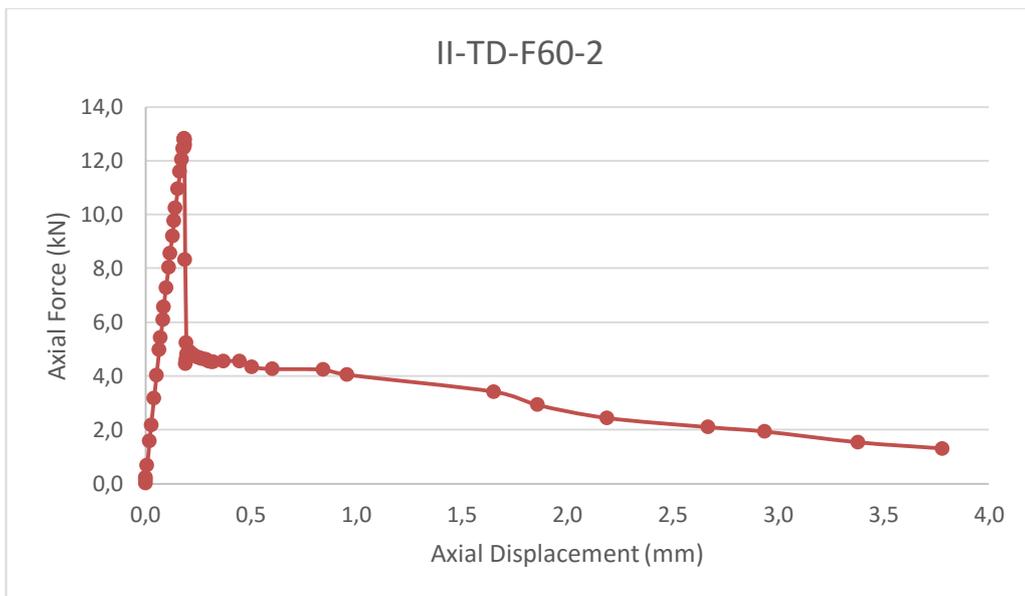


Figura C.10 – Força x deslocamento, II-TD-F60-2.

Série 7

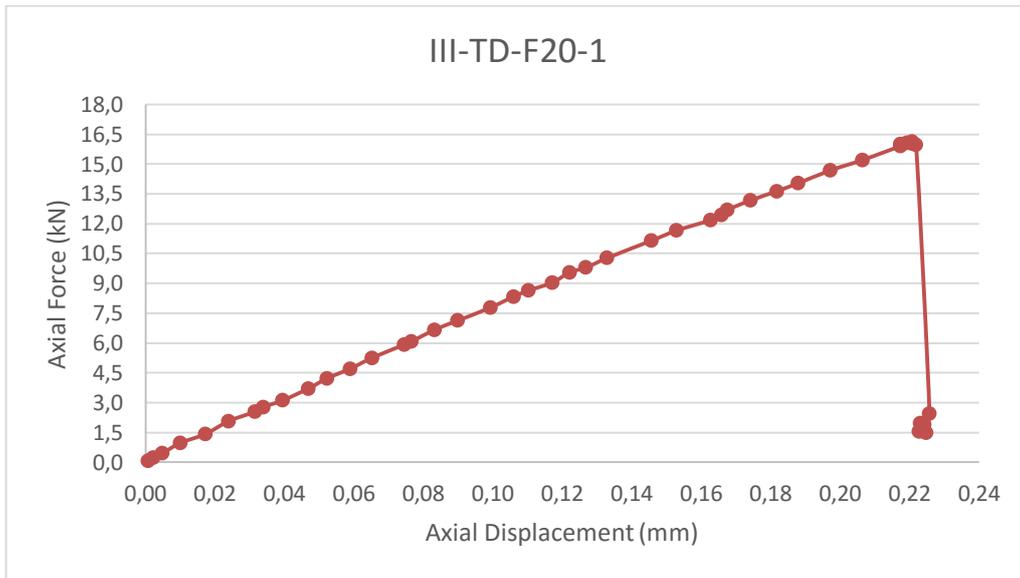


Figura C.11 – Força x deslocamento, III-TD-F20-1.

Série 8

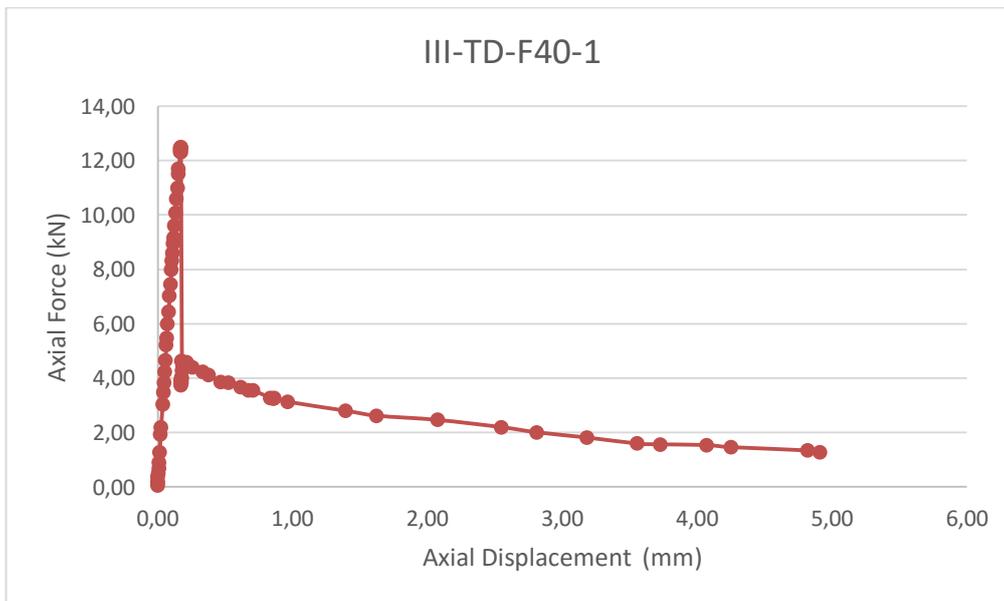


Figura C.12 – Força x deslocamento, III-TD-F40-1.

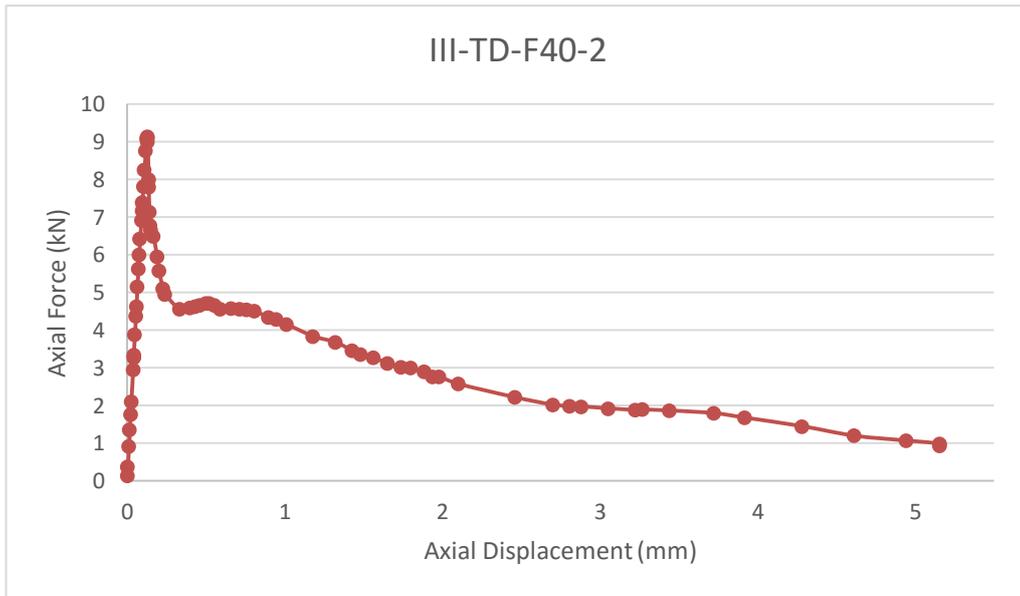


Figura C.13 – Força x deslocamento, III-TD-F40-2.

Série 9

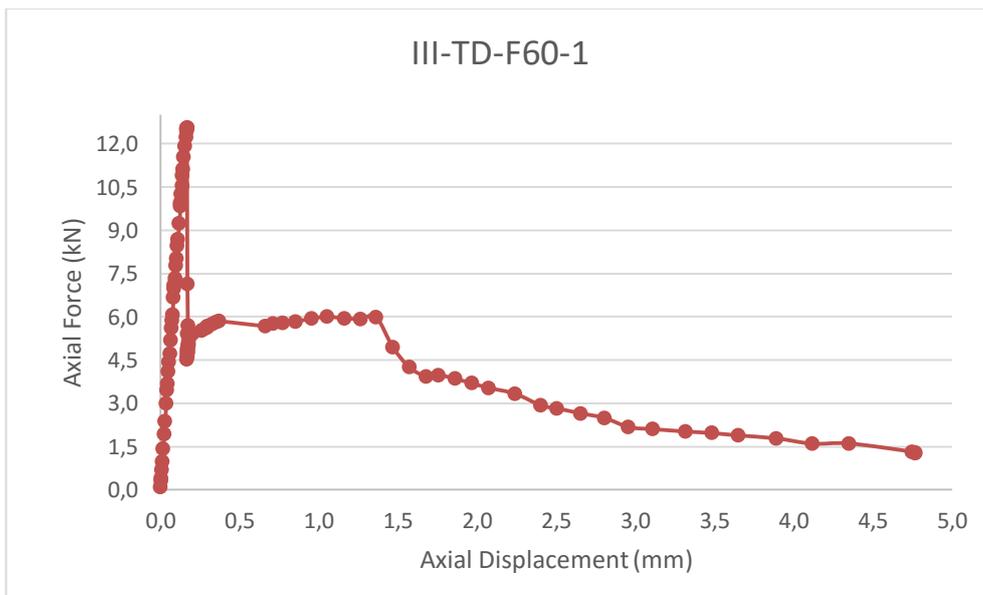


Figura C.14– Força x deslocamento, III-TD-F60-1.

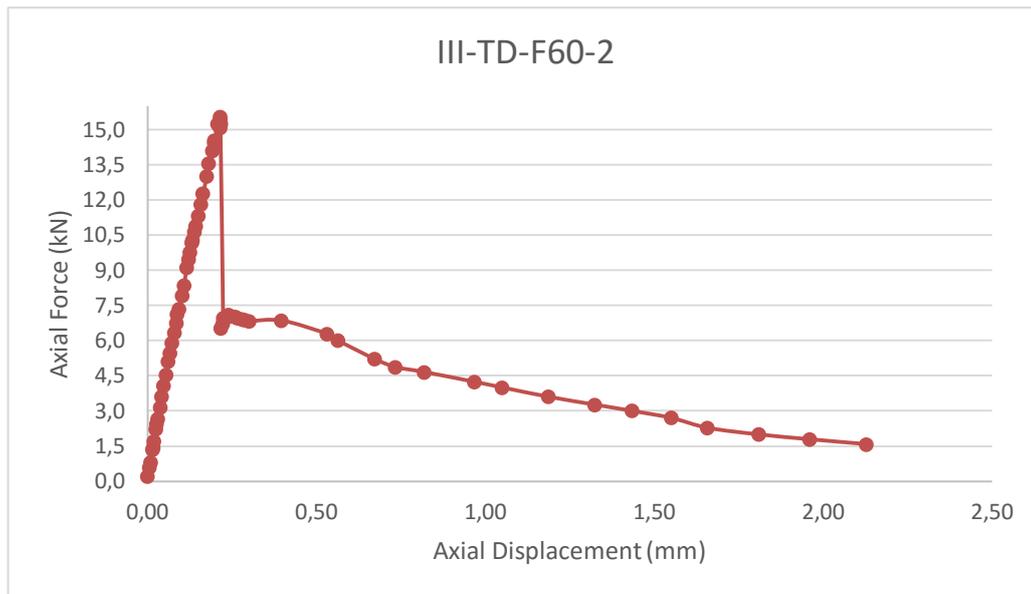


Figura C.15 – Força x deslocamento, III-TD-F60-2

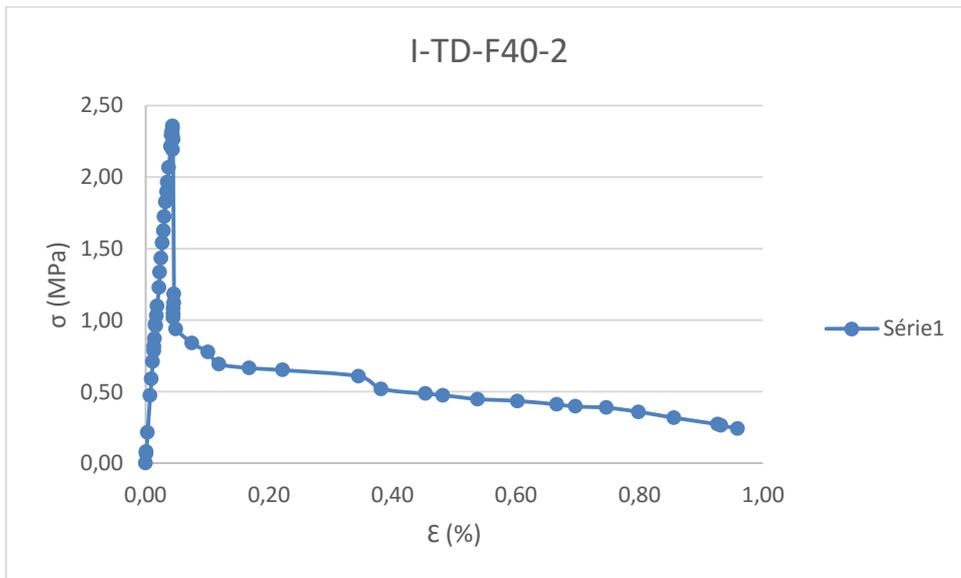


Figura D.3 – Tensão x deformação específica, I-TD-F40-2.

Série 3

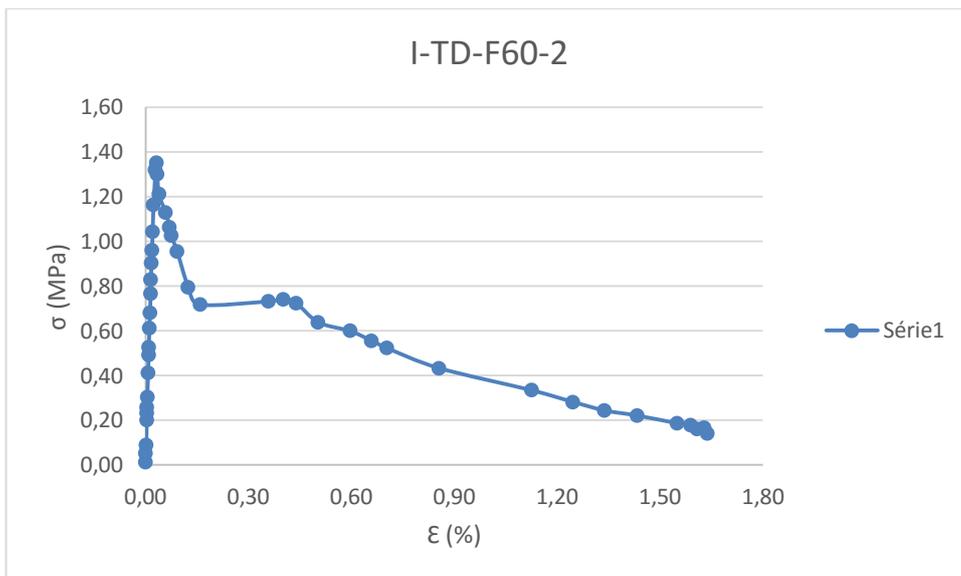


Figura D.4 – Tensão x deformação específica, I-TD-F60-2.

Série 4

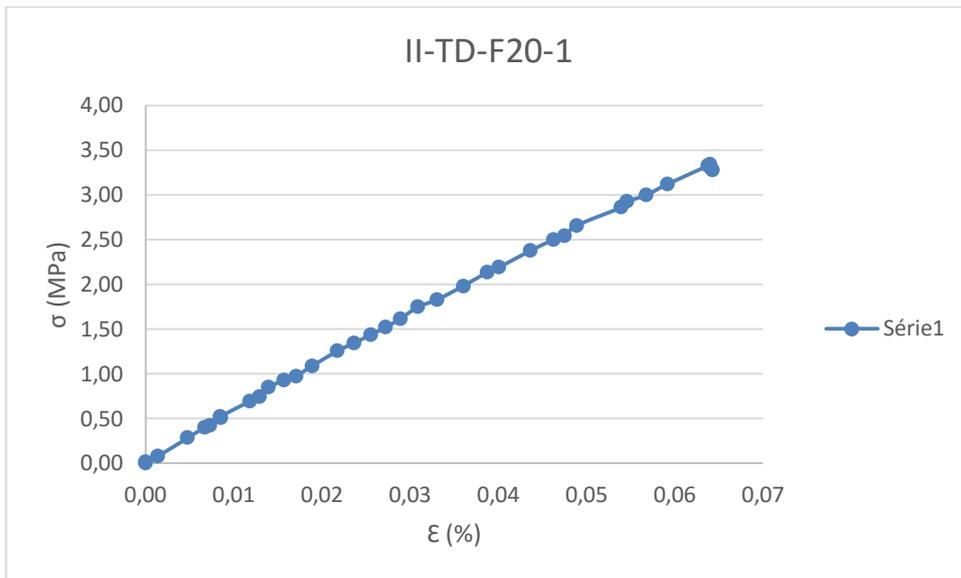


Figura D.5 – Tensão x deformação específica, II-TD-F20-1.

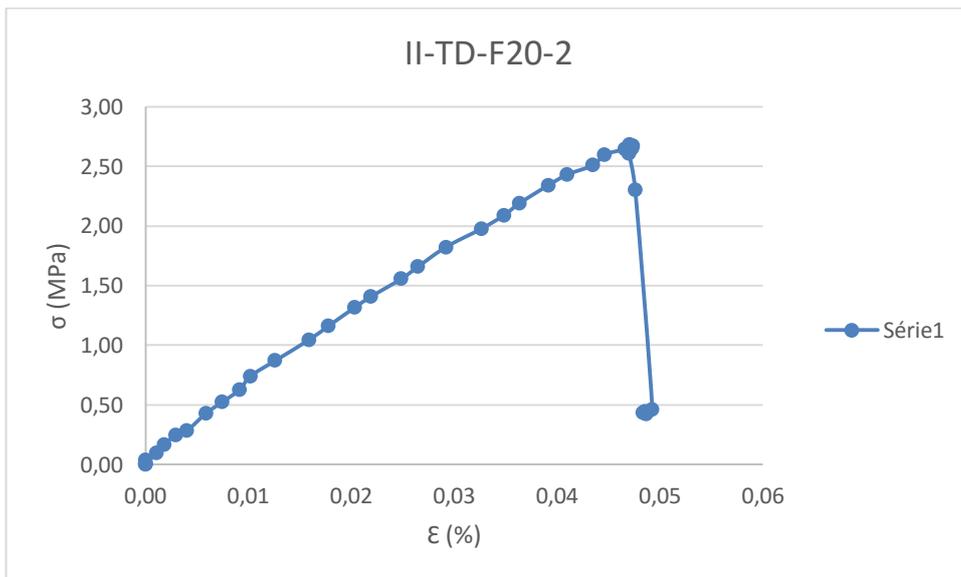


Figura D.6 – Tensão x deformação específica, II-TD-F20-2.

Série 5

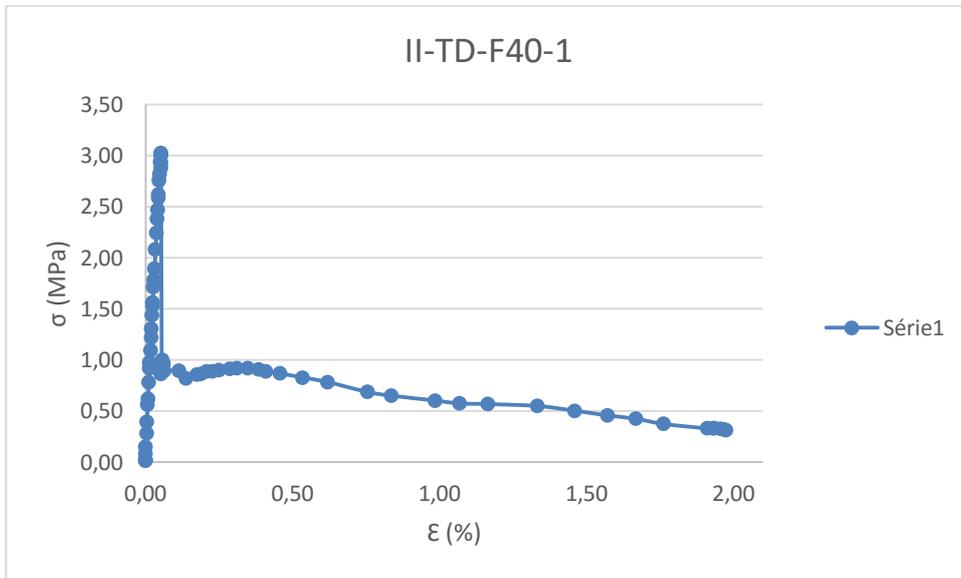


Figura D.7 – Tensão x deformação específica, II-TD-F40-1.

PUC-Rio - Certificação Digital N° 1412826/CA

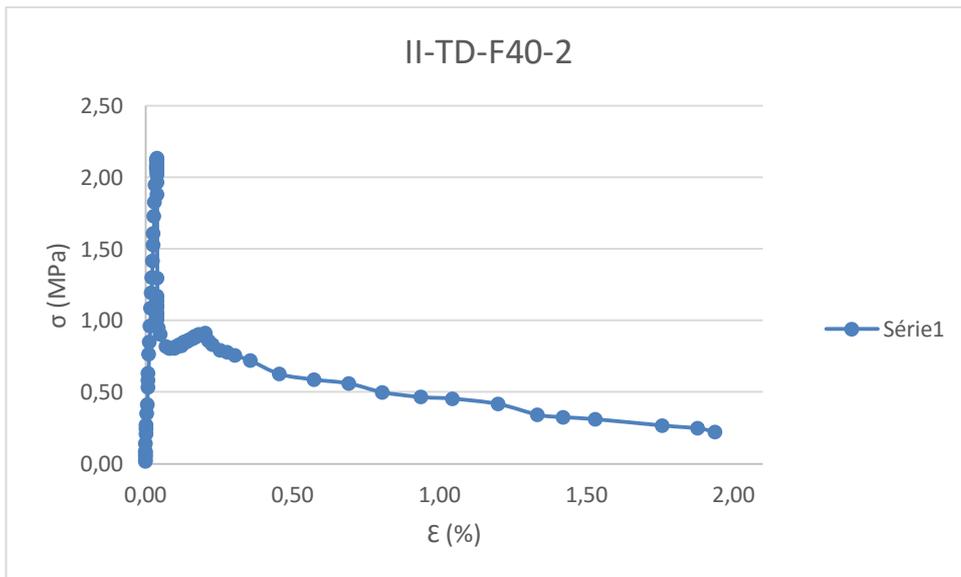


Figura D.8 – Tensão x deformação específica, II-TD-F40-2.

Série 6

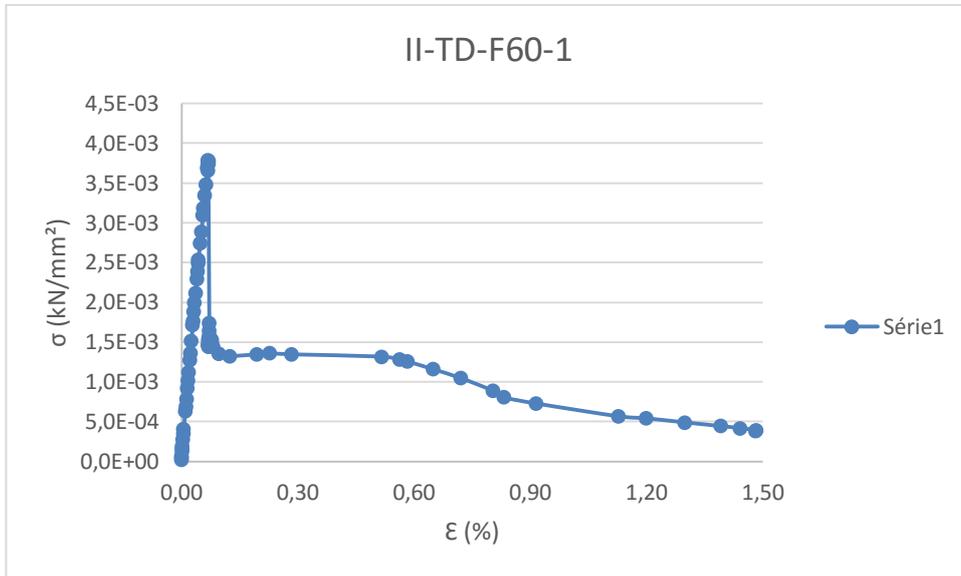


Figura D.9 – Tensão x deformação específica, II-TD-F60-1.

PUC-Rio - Certificação Digital N° 1412826/CA

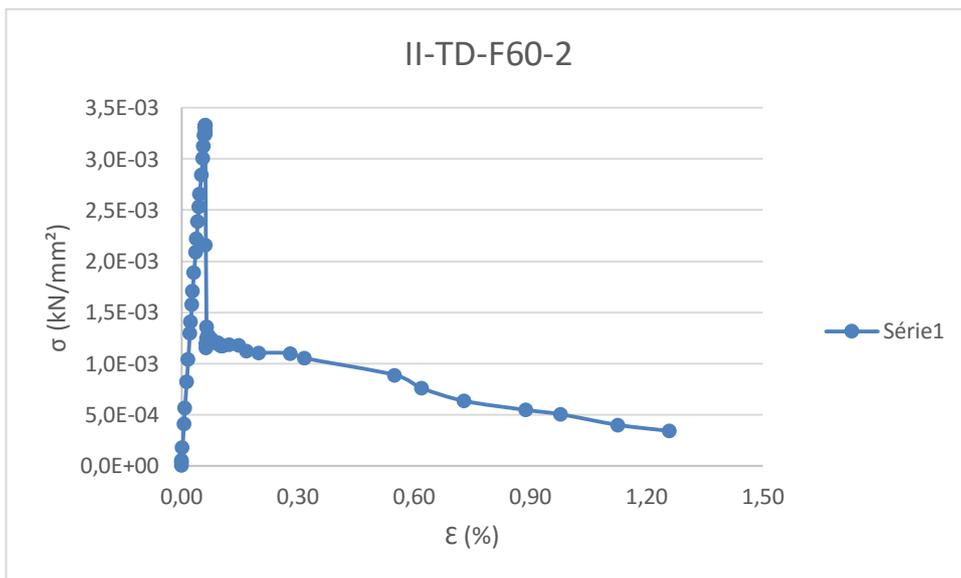


Figura D.10 – Tensão x deformação específica, II-TD-F60-2.

Série 7

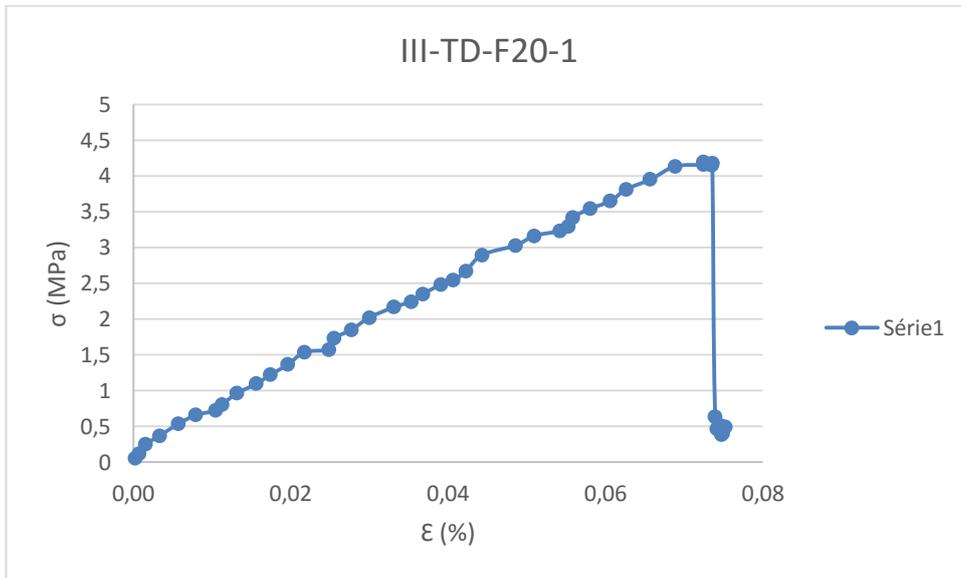


Figura D.11 – Tensão x deformação específica, III-TD-F20-1.

Série 8

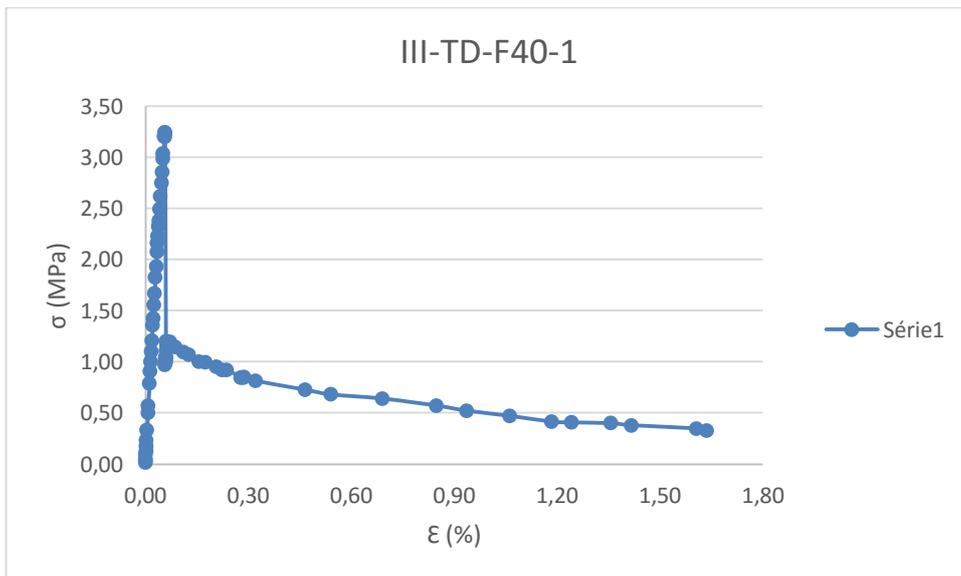


Figura D.12 – Tensão x deformação específica, III-TD-F40-1.

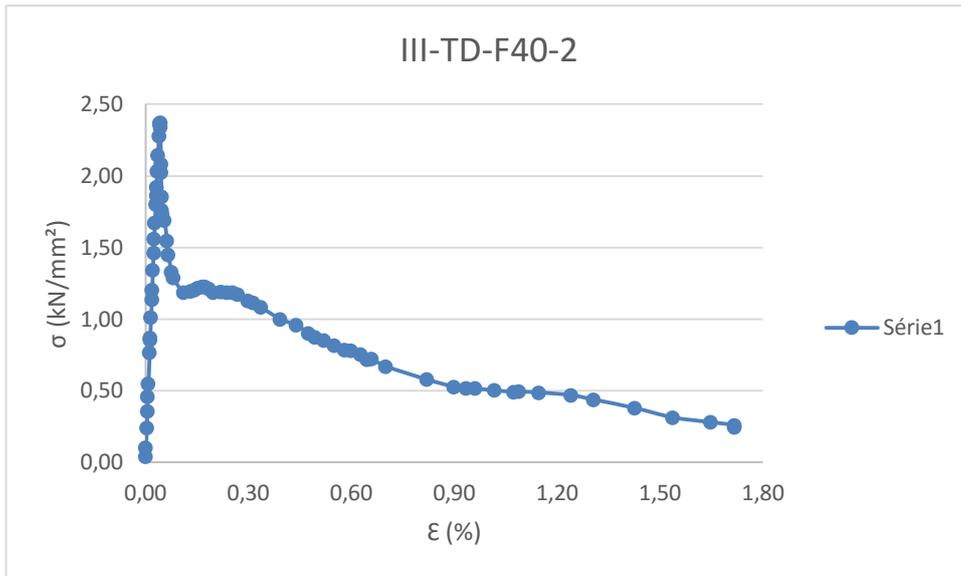


Figura D.13 – Tensão x deformação específica, III-TD-F40-2.

Série 9

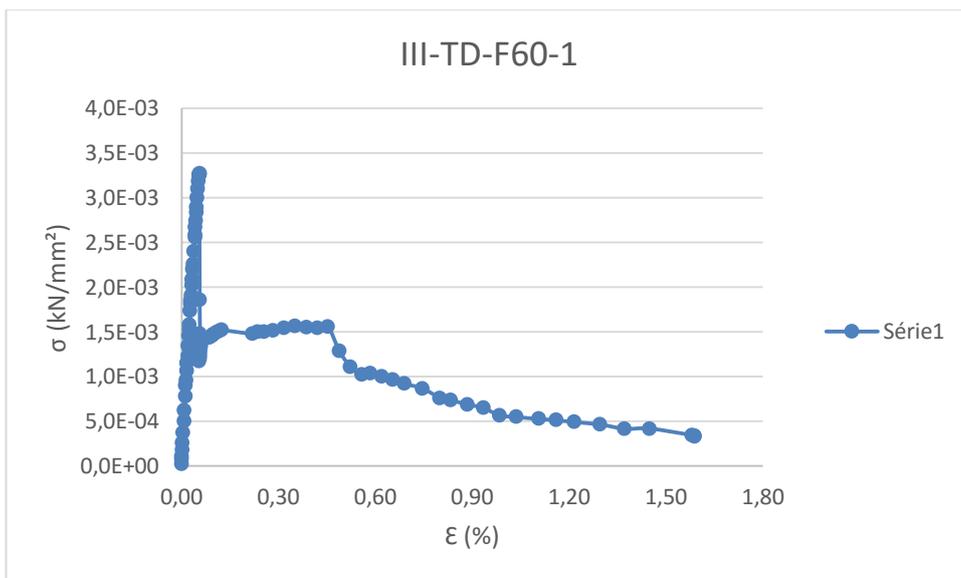


Figura D.14 – Tensão x deformação específica, III-TD-F60-1.

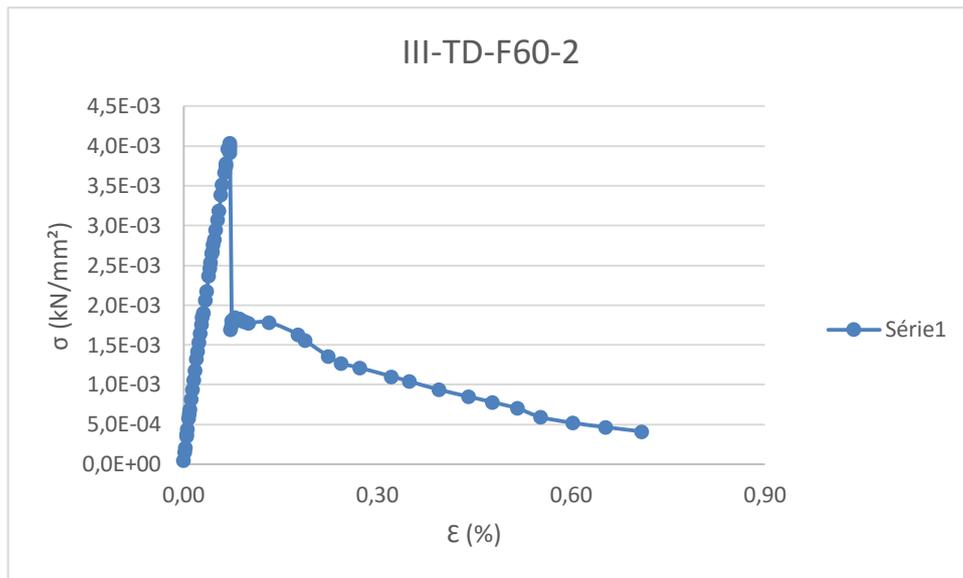


Figura D.15 – Tensão x deformação específica, III-TD-F60-2.