

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Claudia de Oliveira Pacheco

Verificação Experimental da Aderência CFC-Concreto por meio de Ensaio Tração-Compressão

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Área de Concentração: Estruturas.

Orientadores: Giuseppe Barbosa Guimarães
Emil de Souza Sánchez Filho

Rio de Janeiro
agosto de 2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



Claudia de Oliveira Pacheco

**Verificação Experimental da Aderência CFC-Concreto por meio
de Ensaio Tração-Compressão**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Giuseppe Barbosa Guimarães

Orientador
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Emil de Souza Sánchez Filho

Co-orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Marta de Souza Lima Velasco

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Robson Luiz Gaiofatto

Universidade Católica de Petrópolis

Ibrahim Abd El Malik Shehata

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Luiz Antônio Vieira Carneiro

Instituto Militar de Engenharia

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de agosto de 2006.

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

Claudia de Oliveira Pacheco

Graduou-se em Engenharia Civil, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil da PUC-Rio em março do ano de 2004, atuando na área de Estruturas e Materiais, trabalhando com ensaios de laboratório.

Ficha Catalográfica

Pacheco, Claudia de Oliveira

Verificação experimental da aderência CFC-Concreto por meio de ensaios tração-compressão / Claudia de Oliveira Pacheco; orientadores: Giuseppe Barbosa Guimarães, Emil de Souza Sánchez Filho. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2006.

176 f. : il. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Reforço estrutural. 3. Concreto. 4. Compósitos de fibra de carbono. 5. Aderência. I. Guimarães, Giuseppe Barbosa . II. Sánchez Filho, Emil de Souza. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Aos meus queridos pais Marcus e Maria Carmelita,
pelo amor, apoio e paciência.

Agradecimentos

Aos meus queridos pais, pelo incentivo, apoio, carinho e compreensão ao longo deste trabalho que só foi possível por acreditarem no meu sucesso e estarem sempre ao meu lado.

Ao professor Giuseppe Guimarães, pela orientação recebida ao longo da realização deste trabalho.

Ao meu co-orientador, professor Emil de Souza Sánchez Filho, por compartilhar comigo seu conhecimento, pela paciência, compreensão e dedicação permanente.

A todos os amigos conquistados durante esse período na PUC, por terem sido grandes companheiros durante esta jornada.

Aos funcionários Euclídes, José Nilson, Evandro e Haroldo pela amizade e por me oferecerem condições de percorrer esse caminho, concretizando este trabalho.

A RHEOTEC, pelo fornecimento de todo o tecido de fibra de carbono necessário para essa pesquisa.

A CAPES pelo apoio financeiro.

A todas as pessoas que contribuíram de maneira direta ou indireta para a realização deste trabalho.

Resumo

Pacheco, Claudia de Oliveira; Guimarães, Giuseppe Barbosa; Sánchez Filho, Emil de Souza. **Verificação Experimental da Aderência CFC- Concreto por meio de Ensaio Tração- Compressão em Corpos-de-prova Cúbicos**. Rio de Janeiro, 2006. 176p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O objetivo foi estudar a aderência entre o compósito de fibra de carbono (CFC) e o substrato de concreto, em corpos-de-prova compostos de cubos de concreto, por meio do ensaio de tração-compressão. Foram ensaiados 18 corpos-de-prova compostos de dois cubos de concreto (móvel e fixo) ligados por tiras de CFC coladas às suas laterais opostas onde a região à ser estudada foi devidamente instrumentada. Os parâmetros estudados foram a resistência do concreto, o tipo de carregamento (monotônico crescente e carregamento em ciclos de carga e descarga) e as diferentes superfícies do concreto (superfície lisa e superfície rugosa). Os resultados dos ensaios mostraram que para as diferentes resistências à compressão do concreto no intervalo estudado não se obteve uma formulação que indicasse a influência da resistência à compressão sob a resistência última de aderência, para a qual foi obtido um valor característico igual a $1,44 \text{ MPa}$. Foram medidas as deformações específicas do CFC assim como do concreto, com as quais foram calculadas as tensões de aderência e as deformações específicas. Com os resultados experimentais foram obtidos gráficos e curvas de ajuste para energia de fratura vs. resistência de aderência. Com o critério de Coulomb-Mohr generalizado pode-se estimar como valor inicial a resistência de aderência da ordem de 30% da tensão tangencial máxima resistida pelo substrato de concreto.

Palavras-chave

Reforço Estrutural; Concreto; Compósitos de Fibra de Carbono; Aderência.

Abstract

Pacheco, Claudia de Oliveira; Guimarães, Giuseppe Barbosa; Sánchez Filho, Emil de Souza (Advisors). **Experimental Verification on CFC-concrete bond throughout Tension-Compression tests.** Rio de Janeiro, 2006. 176p. MSc. Dissertation – Civil Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The purpose of this work was study the bond between the composite of fiber carbon (CFC) and the concrete substratum. A total of 18 tension-compression tests on specimens with two concrete cubes (fixed and movable) linked by fiber carbon on opposites sides were performed. The area to be studied was properly monitored. The variables of these tests were the concrete strength, the loading type (monotonic loading and loading/unloading cycles), and different concrete surfaces (smooth face and rough face). The test results showed that in the interval analyzed, could not be obtain a formulation that indicates the influence of ultimate bond stress on concrete strength. A characteristic value of 1,44 *MPa* was obtained for the ultimate bond stress. The specific deformations of CFC and concrete were measured, allowing to calculate the bond stress and the corresponding mean strain. The experimental results provided graphs and adjustment curves for energy of fracture *vs.* bond stress. With the Coulomb-Mohr criteria it can be considered as initial value for bond stress 30% of the concrete mean shear strain.

Keywords

Structural Strengthening; Concrete; Carbon Fiber Composites; Bond.

Sumário

1	Introdução	29
1.1.	Considerações Gerais	29
1.2.	Objetivos	30
1.3.	Organização do trabalho	31
2	Revisão Bibliográfica	32
2.1.	Introdução	32
2.2.	Estudo de Mazen <i>et alii</i> (1998)	32
2.3.	Estudo de Miller e Nanni (1999)	34
2.4.	Estudo de Harmon <i>et alii</i> (1999)	36
2.5.	Estudo de Kallifa <i>et alii</i> (1999)	38
2.6.	Estudo de Neubauer e Rostásy (1999)	41
2.7.	Estudo de Cruz e Barros (2001)	42
2.8.	Pesquisa de Leung e Yang (2002)	45
2.9.	Estudo de Meneghel (2005)	47
2.10.	Outras Pesquisas	48
3	Programa experimental	55
3.1.	Introdução	55
3.2.	Concreto	56
3.2.1	Resistência à compressão simples do concreto	58
3.2.2	Resistência à tração indireta do concreto	59
3.2.3	Módulo de elasticidade do concreto	60
3.3.	Compósito de fibra de carbono	66
3.3.1.	Tecido de fibra de carbono	66
3.3.2.	Ensaio de resistência à tração do compósito de fibra de carbono	68
3.3.3.	Materiais necessários para a aplicação do tecido de fibra de carbono ao substrato de concreto	71
3.3.3.1	. Resina de imprimação	72
3.3.3.2	. Resina epoxídica	73

3.4. Confeção dos corpos-de-prova	74
3.4.1. Formas	74
3.4.2. Corpos-de-prova de concreto	75
3.4.3 Concretagem	75
3.5. Colagem do tecido de fibra de carbono	76
3.6. Instrumentação dos corpos-de-prova	78
3.7. Equipamentos e corpos-de-prova	79
3.8. Observações	81
4 Apresentação dos Resultados e Análises	84
4.1. Notas iniciais	84
4.2. Forças últimas e modos de ruptura	84
4.3. Deformações específicas ao longo do comprimento de ancoragem	92
4.3.1. Deformações específicas ao longo do comprimento de ancoragem para carregamento monótonico crescente	92
4.3.2. Deformações específicas ao longo do comprimento de ancoragem para o carregamento em ciclos de carga e descarga	97
4.4. Tensões de aderência e deformações específicas no CFC	99
4.4.1. Variação das tensões de aderência ao longo do comprimento de ancoragem	107
4.4.2. Resistência de aderência	113
4.5. Efeito da resistência à compressão do concreto nas resistências últimas de aderência	115
4.6. Efeito da rugosidade nas resistências últimas aderência	116
4.7. Efeito do carregamento em ciclos de carga e descarga no CFC	117
4.8. Energia de fratura	121
4.8.1. Modelo de Holzenkämpfer (1994)	121
4.9. Tensão tangencial máxima resistida pelo substrato de concreto	125
5 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	131
5.1. Conclusões	131
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	133
6 Referências Bibliográficas	134

Anexo A Análise Granulométrica e Massas dos Agregados	138
Anexo B Resultado dos Ensaios de Módulo de Elasticidade do Concreto	142
B.1 Série de concretagem I; corpos-de-prova com $f_c = 23,32MPa$	142
B.2 Série de concretagem II; corpos-de-prova com $f_c = 28,42MPa$	146
B.3 Série de concretagem III; corpos-de-prova com $f_c = 37,08MPa$	148
Anexo C Ensaio de Resistência à Tração do CFC	152
Anexo D Resultados dos Ensaios de Aderências	159
D.1 Resultado do ensaio MCLI-1	159
D.2 Resultado do ensaio MCLI-2	160
D.3 Resultado do ensaio MCLII-1	161
D.4 Resultado do ensaio MCLII-2	162
D.5 Resultado do ensaio MCLIII-1	163
D.6 Resultado do ensaio MCLIII-2	164
D.7 Resultado do ensaio MCRI-1	165
D.8 Resultado do ensaio MCRI-2	166
D.9 Resultado do ensaio MCRI-3	167
D.10 Resultado do ensaio MCRII-1	168
D.11 Resultado do ensaio MCRII-2	169
D.12 Resultado do ensaio MCRIII-1	170
D.13 Resultado do ensaio MCRIII-2	171
D.14 Resultado do ensaio CDLI-1	172
D.15 Resultado do ensaio CDLII-1	173
D.16 Resultado do ensaio CDLIII-1	174
D.17 Resultado do ensaio CDRII-1	175
D.18 Resultado do ensaio CDRIII-1	176

Lista de figuras

- Figura 2.1 – Distribuição de tensões numa seção transversal de concreto armado reforçado com CFC (Neubauer e Rostásy, 1996). 33
- Figura 2.2 – Esquema de ensaio de Miller e Nanni (1999) cotas em *mm*. 34
- Figura 2.3 – Curva $\tau \times s$ para os corpos-de-prova; adaptada de Miller e Nanni (1999). 35
- Figura 2.4 – Esquema das vigas ensaiadas por Harmon *et alii* (1999) cotas *cm*. 37
- Figura 2.5 – Comparação das curva $\tau \times s$ do tecido da Mbrace e da Zoltek Corporation; adaptada de Harmon *et alii* (1999). 37
- Figura 2.6 – Armação das viga ensaiada por Kalifa *et alii* (1999). 38
- Figura 2.7 – Esquema das vigas ensaiadas por Kalifa *et alii* (1999). 39
- Figura 2.8 – Diagrama força x deformação específica vertical para as vigas BT2 e BT3; adaptada de Kalifa *et alii* (1999). 40
- Figura 2.9 – Força vs flecha no meio do vão; adaptada de Kalifa *et alii* (1999). 40
- Figura 2.10 – Comportamento das interfaces dos materiais: (a) divisão em zonas ao longo da interface CFC/Concreto; (b) curva $\tau \times s$; adaptada de Leung e Yang (1999). 46
- Figura 2.11 – Modelo para o descolamento do CFC do substrato de concreto; adaptada de Leung e Yang (1999). 47
- Figura 2.12 – Desenho esquemático das vigas ensaiadas (medidas em *mm*); adaptada de Cruz e Barros (2003). 43
- Figura 2.13 – Ruptura por força cortante; adaptada de Cruz e Barros (2003). 43
- Figura 2.14 – Reforço de CFC para força cortante; adaptada de Cruz e Barros (2003). 44
- Figura 2.15 – Curva $\tau \times \varepsilon$ obtida na lâmina de CFC depois do reforço lateral; adaptada de Cruz e Barros (2003). 44
- Figura 2.16 – Curva $\tau \times s$ tensão do adesivo; adaptada de Cruz e Barros (2003). 45
- Figura 2.17 – Gráfico tensão média de aderência x comprimento de aderência; adaptada de CHAJES *et al.* (1996). 49

Figura 2.18– Gráfico tensão média de aderência x comprimento de aderência para dois tipos de CFC; adaptada de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).	49
Figura 2.19 – Gráfico carga de ruptura x comprimento de aderência; adaptada de CHAJES <i>et al.</i> (1996).	50
Figura 2.20 – Corpo-de-prova para o ensaio de aderência; adaptada de NAKABA <i>et al.</i> (2001).	51
Figura 2.21 – Tensão de aderência vs deslocamento; adaptada de NAKABA <i>et al.</i> (2001).	52
Figura 2.22 – Relação tensão de aderência – deslocamento triangular; adaptada de YUN e WU <i>apud</i> CHEN e TENG (2001).	53
Figura 3.1 – Esquema do ensaio de tração-compressão.	55
Figura 3.2 – Ensaio à tração por compressão diametral.	60
Figura 3.3 – Corpos-de-prova cilíndricos de concreto com extensômetros elétricos de resistência colados à sua meia altura.	61
Figura 3.4 – Sistema de aplicação da força ao corpo-de-prova.	62
Figura 3.5 – Gráfico tensão x deformação específica do corpo-de-prova 1 da série I.	63
Figura 3.6 – Gráfico tensão x deformação específica do corpo-de-prova 2 da série I.	63
Figura 3.7 – Gráfico tensão x deformação específica do corpo-de-prova 1 da série II.	64
Figura 3.8 – Gráfico tensão x deformação específica do corpo-de-prova 1 da série III.	64
Figura 3.9 – Gráfico tensão x deformação específica do corpo-de-prova 2 da série III.	65
Figura 3.10 – Tecido de fibra de carbono, tipo N-300.	67
Figura 3.11 – Verso do tecido de fibra de carbono tipo N-300 com destaque para a costura.	67
Figura 3.12 – Corpos-de-prova CFC revestidos com resina epóxi.	68
Figura 3.13 – Dimensões dos corpos-de-prova para ensaio de tração; adaptada da norma ASTM D 3039/3039M.	69
Figura 3.14 – Gráfico tensão x deformação específica dos corpos-de-prova de CFC.	70

Figura 3.15 – Ensaio dos corpos-de-prova de compósitos de fibra de carbono com placas de alumínio nas extremidades.	71
Figura 3.16 – Resina de imprimação: Componente A e componente B.	73
Figura 3.17 – Resina epóxi: componente A e componente B.	74
Figura 3.18 – Formas de madeira para a confecção dos corpos-de-prova de concreto.	75
Figura 3.19 – Corpos-de-prova de concreto (medidas em cm).	75
Figura 3.20 – Posicionamento dos corpos-de-prova para a colagem do CFC.	76
Figura 3.21 – Corpos-de-prova após a aplicação do primer.	77
Figura 3.22 – Aplicação do tecido no corpo-de-prova.	77
Figura 3.23 – Posicionamento dos extensômetros elétricos no CFC e no concreto (medidas em mm).	78
Figura 3.24 – Posicionamento dos LVDT nos corpos-de-prova.	79
Figura 3.25 – Desenho esquemático e equipamentos do ensaio de tração-compressão.	79
Figura 3.26 – Vista frontal do ensaio de tração-compressão.	80
Figura 3.27 – Vistas laterais do ensaio de tração-compressão.	80
Figura 3.28 – Vista superior do ensaio de tração-compressão.	80
Figura 3.29 – Esquema do ensaio de aderência com tração-compressão.	80
Figura 3.30 – CFC inadequado para os ensaios de aderência, com destaque para as aberturas da malha e sentido das fibras.	82
Figura 3.31 – Detalhe da largura do CFC após o manuseio do corpo-de-prova MCLI-3.	83
Figura 3.32 – Ruptura do tecido no comprimento descolado do corpo-de-prova MCLII-2.	83
Figura 4.1 – Forças de ruptura dos corpos-de-prova.	84
Figura 4.2 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCLI-1.	86
Figura 4.3 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCLI-2.	86
Figura 4.4 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCLII-1.	87
Figura 4.5 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da	

ancoragem do corpo-de-prova MCLII-2.	87
Figura 4.6 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCLIII-1.	87
Figura 4.7 – Ruptura por descolamento do tecido com fissuras no bloco de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCLIII-2.	88
Figura 4.8 – Ruptura no tecido de CFC ao longo do comprimento descolado do corpo-de-prova MCRI-1 (corpo-de-prova descartado).	88
Figura 4.9 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCRI-2.	88
Figura 4.10 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCRI-3.	89
Figura 4.11 – Ruptura por descolamento seguido de separação das fibras do tecido de CFC do corpo-de-prova MCRII-1.	89
Figura 4.12 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCRII-2.	89
Figura 4.13 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCRIII-1.	90
Figura 4.14 – Ruptura por descolamento seguido de separação das fibras do tecido de CFC do corpo-de-prova MCRIII-2.	90
Figura 4.15 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova CDLI-1.	90
Figura 4.16 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova CDLII-1.	91
Figura 4.17 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova CDLIII-1.	91
Figura 4.18 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova CDRII-1.	91
Figura 4.19 – Ruptura por descolamento seguido de separação das fibras do tecido de CFC do corpo-de-prova CDRIII-1.	92
Figura 4.20 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLI-1.	92
Figura 4.21 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLI-2.	93

Figura 4.22 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLII-1.	93
Figura 4.23 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLII-2.	93
Figura 4.24 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLIII-1.	94
Figura 4.25 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLIII-2.	94
Figura 4.26 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-1 (corpo-de-prova descartado).	94
Figura 4.27 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-2.	95
Figura 4.28 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-3.	95
Figura 4.29 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRII-1.	95
Figura 4.30 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRII-2.	96
Figura 4.31 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRIII-1.	96
Figura 4.32 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRIII-2.	96
Figura 4.33 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDLI-1.	97
Figura 4.34 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDLII-1.	98
Figura 4.35 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDLIII-1.	98
Figura 4.36 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDRII-1.	98
Figura 4.37 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDRIII-1.	99
Figura 4.38 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-	

de-prova MCLI-1.	100
Figura 4.39 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCLI-2.	100
Figura 4.40 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCLII-1.	101
Figura 4.41 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCLII-2.	101
Figura 4.42 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCLIII-1.	101
Figura 4.43 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCLIII-2.	102
Figura 4.44 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRI-1 (corpo-de-prova descartado).	102
Figura 4.45 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRI-2.	102
Figura 4.46 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRI-3.	103
Figura 4.47 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRII-1.	103
Figura 4.48 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRII-2.	103
Figura 4.49 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRIII-1.	104
Figura 4.50 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRIII-2.	104
Figura 4.51 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova CDLI-1.	105
Figura 4.52 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova CDLII-1.	105
Figura 4.53 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova CDLIII-1.	105
Figura 4.54 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova CDRII-1.	106

Figura 4.55 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova CDRIII-1.	106
Figura 4.56 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLI-1.	107
Figura 4.57 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLI-2.	107
Figura 4.58 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLII-1.	108
Figura 4.59 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLII-2.	108
Figura 4.60 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLIII-1.	108
Figura 4.61 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLIII-2.	109
Figura 4.62 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-1.	109
Figura 4.63 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-2.	109
Figura 4.64 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-3.	110
Figura 4.65 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRII-1.	110
Figura 4.66 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRII-2.	110
Figura 4.67 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRIII-1.	111
Figura 4.68 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRIII-2.	111
Figura 4.69 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDLI-1.	111
Figura 4.70 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDLII-1.	112
Figura 4.71 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de	

ancoragem para o corpo-de-prova CDLIII-1.	112
Figura 4.72 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDRII-1.	112
Figura 4.73 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDRIII-1.	113
Figura 4.74 – Resistência aderência f_b vs. resistência do concreto f_c .	115
Figura 4.75 – Resistência de aderência f_b vs tipo de superfície do concreto.	116
Figura 4.76 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 1 do corpo-de-prova CDLI-1.	117
Figura 4.77 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 2 do corpo-de-prova CDLI-1.	117
Figura 4.78 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 1 do corpo-de-prova CDLII-1.	118
Figura 4.79 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 2 do corpo-de-prova CDLII-1.	118
Figura 4.80 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 1 do corpo-de-prova CDLIII-1.	118
Figura 4.81 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 2 do corpo-de-prova CDLIII-1.	119
Figura 4.82 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 1 do corpo-de-prova CDRII-1.	119
Figura 4.83 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 2 do corpo-de-prova CDRII-1.	119
Figura 4.84 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 1 do corpo-de-prova CDRIII-1.	120
Figura 4.85 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 2 do corpo-de-prova CDRIII-1.	120
Figura 4.86 – Resistência à compressão f_c vs. energia de fratura $G_{F,teórica}$.	123
Figura 4.87 – Resistência de aderência f_b vs. energia de fratura $G_{F,teórica}$.	124
Figura 4.88 – Tensões principais atuantes no substrato de concreto.	126
Figura 4.89 – Detalhe das tensões principais atuantes no substrato de concreto.	126
Figura 4.90 – Critério de ruptura de Coulomb-Mohr generalizado para o concreto.	

	126
Figura 4.91 – Gráfico $\frac{f_b}{\tau_{m\acute{a}x}}$ vs. resist\ecencia \grave{a} compress\~ao do concreto f_c .	129
Figura 4.92 – Resist\ecencia de ader\ecencia para concretos com resist\ecencia f_c acima de 15 MPa .	130
Figura B.1 – Gr\~afico tens\~ao x deforma\~ao espec\~ifica para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_c = 23,32MPa$.	144
Figura B.2 – Gr\~afico tens\~ao x deforma\~ao espec\~ifica para o CP2 dos corpos-de-prova com $f_c = 23,32MPa$.	145
Figura B.3 – Gr\~afico tens\~ao x deforma\~ao espec\~ifica para o CP3 dos corpos-de-prova com $f_c = 28,42MPa$.	147
Figura B.4 – Gr\~afico tens\~ao x deforma\~ao espec\~ifica para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_c = 37,08MPa$.	149
Figura B.5 – Gr\~afico tens\~ao x deforma\~ao espec\~ifica para o CP2 dos corpos-de-prova com $f_c = 37,08MPa$.	151
Figura C.1 – Gr\~afico tens\~ao x deforma\~ao espec\~ifica do o CP1.	153
Figura C.2 – Gr\~afico tens\~ao x deforma\~ao espec\~ifica do o CP2.	154
Figura C.3 – Gr\~afico tens\~ao x deforma\~ao espec\~ifica do o CP3.	155
Figura C.4 – Gr\~afico tens\~ao x deforma\~ao espec\~ifica do o CP4.	156
Figura C.5 – Gr\~afico tens\~ao x deforma\~ao espec\~ifica do o CP5.	157
Figura C.6 – Gr\~afico tens\~ao x deforma\~ao espec\~ifica do o CP6.	158
Figura D.1 – Gr\~afico carga x deforma\~ao espec\~ifica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCLI-1.	159
Figura D.2 – Gr\~afico carga x deslocamento do bloco m\~ovel do corpo-de-prova MCLI-1.	159
Figura D.3 – Gr\~afico carga x deforma\~ao espec\~ifica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCLI-2.	160
Figura D.4 – Gr\~afico carga x deslocamento do bloco m\~ovel do corpo-de-prova MCLI-2.	160
Figura D.5 – Gr\~afico carga x deforma\~ao espec\~ifica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCLII-1.	161
Figura D.6 – Gr\~afico carga x deslocamento do bloco m\~ovel do corpo-de-prova	

MCLII-1.	161
Figura D.7 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCLII-2.	162
Figura D.8 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCLII-2.	162
Figura D.9 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCLIII-1.	163
Figura D.10 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCLIII-1.	163
Figura D.11 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCLIII-2.	164
Figura D.12 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCLIII-2.	164
Figura D.13 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCRI-1.	165
Figura D.14 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCRI-1.	165
Figura D.15 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCRI-2.	166
Figura D.16 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCRI-2.	166
Figura D.17 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCRI-3.	167
Figura D.18 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCRI-3.	167
Figura D.19 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCRII-1.	168
Figura D.20 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCRII-1.	168
Figura D.22 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCRII-2.	169
Figura D.23 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCRIII-1.	170

Figura D.24 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCRIII-1.	170
Figura D.25 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCRIII-2.	171
Figura D.26 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCRIII-2.	171
Figura D.27 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova CDLI-1.	172
Figura D.28 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova CDLI-1.	172
Figura D.29 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova CDLII-1.	173
Figura D.30 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova CDLII-1.	173
Figura D.31 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova CDLIII-1.	174
Figura D.32 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova CDLIII-1.	174
Figura D.33 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova CDRII-1.	175
Figura D.34 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova CDRII-1.	175
Figura D.35 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova CDRIII-1.	176
Figura D.36 – Gráfico a carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova CDRIII-1.	176

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Consumo de material por m ³ de concreto.	57
Tabela 3.2 – Valores do abatimento do tronco de cone.	57
Tabela 3.3 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto no dia do ensaio de aderência CFC-concreto.	58
Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto para 28 dias.	59
Tabela 3.5 – Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.	60
Tabela 3.6 – Resultados do ensaio do módulo de elasticidade do concreto da série I.	63
Tabela 3.7 – Resultados do ensaio do módulo de elasticidade do concreto da série II.	64
Tabela 3.8 – Resultados do ensaio do módulo de elasticidade do concreto da série III.	65
Tabela 3.9 – Valores calculados para módulo de elasticidade do concreto.	65
Tabela 3.10 – Dimensões dos corpos-de-prova adotadas para ensaio de tração em materiais compósitos de fibras de carbono; adaptada da ASTM D3039/3039M.	68
Tabela 3.11 – Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos-de-prova de CFC.	70
Tabela 3.12 – Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos-de-prova de CFC (material com características inadequadas).	81
Tabela 3.13 – Forças e modos de ruptura.	82
Tabela 4.1 – Forças e modos de ruptura.	85
Tabela 4.2 – Resistências últimas de aderência dos corpos-de-prova.	114
Tabela 4.3 – Resistência de aderência vs tipo de superfície do concreto.	116
Tabela 4.4 – Relação entre a resistência de aderência f_b , obtido pela equação 4.3 e a energia de fratura teórica $G_{F,teórica}$ obtida com expressão 4.8.	122
Tabela 4.5 – resultados da calibração de c_2 pela equação 4.14.	125

Tabela 4.6 – Análise da tensão $\tau_{máx}$, calculada pela equação 4.18.	128
Tabela A.1 – Resultados da análise granulométrica do agregado miúdo: resíduos passantes e retidos.	138
Tabela A.2 – Resultados da análise granulométrica do agregado graúdo: resíduos passantes e retidos.	139
Tabela B.1 – Resultados obtidos do ensaio de módulo de elasticidade do concreto para o CP1 da série I.	142
Tabela B. 2 – Resultados obtidos do ensaio de módulo de elasticidade do concreto para o CP2 dos da série I.	144
Tabela B. 3 – Resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP1 da série II.	146
Tabela B.4 – Resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP1 da série III.	148
Tabela B.5 – Resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP2 dos corpos-de-prova da série III.	150
Tabela C.1 – Leituras do indicador manual de deformações VISHAY, no ensaio de resistência à tração do CFC do CP1.	152
Tabela C.2 – Leituras do indicador manual de deformações VISHAY, no ensaio de resistência à tração do CFC do CP2.	154
Tabela C.3 – Leituras do indicador manual de deformações VISHAY, no ensaio de resistência à tração do CFC do CP3.	155
Tabela C.4 – Leituras do indicador manual de deformações VISHAY, no ensaio de resistência à tração do CFC do CP4.	156
Tabela C.5 – Leituras do indicador manual de deformações VISHAY, no ensaio de resistência à tração do CFC do CP5.	157
Tabela C.6 – Leituras do indicador manual de deformações VISHAY, no ensaio de resistência à tração do CFC do CP6.	158

Lista de Símbolos

Romanos

A_c	Área da seção transversal do concreto
A_f	Área da seção transversal do CFC
b_c	Largura do elemento de concreto
b_f	Largura do CFC
b_ℓ	Largura do reforço
b_p	Largura do compósito
b_w	Largura da viga
C_F	Coefficiente
<i>CFC</i>	Compósito de fibra de carbono
c_2	Coefficiente
d	Diâmetro
D	Altura viga
$D_{máx}$	Dimensão máxima característica do agregado
E	Módulo de elasticidade
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
E_{CS}	Módulo de elasticidade secante do concreto
E_f	Módulo de elasticidade do CFC
E_ℓ	Módulo de elasticidade do reforço
E_p	Módulo de elasticidade do compósito
$E_{sec,n}$	Módulo de deformação secante

F_c	Força aplicada no concreto
F_f	Força aplicada na fibra
$F_{máx}$	Força máxima aplicada no CFC
F_s	Força aplicada na armadura
F_u	Força última
$f_{ct,sp}$	Resistência à tração indireta do concreto
f_b	Resistência de aderência
f_{bu}	Resistência de aderência última
$f_{b,k}$	Resistência de aderência característica
f_c	Resistência à compressão do concreto
$f_{c,28}$	Resistência à compressão do concreto aos 28 dias
f_{ct}	Resistência à tração do concreto
f_{ctm}	Resistência à tração média do concreto
f_{real}	Resistência à compressão do concreto obtido no ensaio do módulo de elasticidade
f_t	Resistência à tração
f_{tf}	Resistência à tração do CFC
G_F	Energia de fratura total
$G_{F,teórica}$	Energia de fratura segundo o modelo de Holzenkämpfer
$G_{F,K}$	Energia de fratura característica
h	Altura
k	Coefficiente
K_b	Coefficiente que considera a influência da largura relativa do compósito sobre a largura do elemento de concreto

L	Comprimento; leitura do frasco (volume ocupado pelo conjunto água – agregado miúdo)
l_b	Comprimento embutido
$l_{b,efet}$	Comprimento de ancoragem efetivo
l_f	Comprimento de ancoragem segundo o modelo de Holzenkämpfer
l_o	Distância inicial entre dois pontos onde são obtidas as medidas das deformações específicas
l_1	Comprimento descolado
MF	Módulo de finura
n_f	Relação entre os módulos de elasticidade do CFC e do concreto
n	Número de elementos infinitesimais; Variação dos níveis de aplicação de carga, 0,1.....0,7 ou 0,8
P	Força de ruptura; força lida na célula de carga
P_a	Peso do agregado miúdo
P_b	Peso do agregado graúdo
P_{rec}	Peso do recipiente
PRF	Polímero reforçado com fibra
P_u	Força última de aderência
s	Deslocamento relativo entre o CFC e o concreto
$s_{máx}$	Deslocamento relativo a $\tau_{b,máx}$
$T_{u,máx}$	Valor máximo para a força de aderência última
t_a	Espessura do adesivo
t_f	Espessura do compósito do CFC
t_ℓ	Espessura do reforço
t_p	Espessura do compósito

V_{rec} Volume do recipiente

Z_s Altura útil da armadura

Z_f Altura útil do CFC

Gregos

β_L Coeficiente adimensional que relaciona o comprimento de aderência com o comprimento de aderência efetivo

β_p Coeficiente adimensional que relaciona a largura do compósito com a do elemento de concreto

ΔL Distância entre dois pontos nos quais foram obtidas as deformações específicas

Δl_b Distância entre os pontos onde são obtidas as medidas

δ_1 Deslocamento correspondente à tensão máxima de aderência

δ_b Massa específica real do agregado graúdo

δ_f Deslocamento máximo

ε Deformação específica

ε_b Deformação específica média no concreto

ε_c Deformação específica do concreto

ε_{co} Deformação específica inicial no concreto

ε_f Deformação específica do CFC

ε_{fu} Deformação específica última no CFC

$\varepsilon_{f,i}$ Deformação específica no laminado de PRF na seção i

$\varepsilon_{f,i+1}$ Deformação específica no laminado de PRF na seção $i + 1$

ε_{inf} Deformação específica correspondente à tensão inferior inicial

ε_n Deformação específica correspondente à tensão σ_n

ε_0	Deformação específica correspondente à leitura ℓ_o
ε_s	Deformação específica na armadura
ε_{so}	Deformação específica inicial na armadura
γ	Massa específica do agregado miúdo
γ_a	Massa específica aparente do agregado miúdo
γ_b	Massa específica aparente do agregado graúdo
ρ_f	Taxa geométrica da armadura de CFC
σ	Tensão
σ_c	Tensão normal no concreto
σ_f	Tensão normal no CFC
σ_{ij}	Tensor de tensões
σ_{inf}	Tensão inferior correspondente à $0,5MPa$
σ_n	Tensão considerada para o cálculo do módulo secante
σ_1, σ_2	Tensões principais atuantes no substrato de concreto
τ	Tensão tangencial
τ_b	Tensão de aderência
τ_{bk}	Tensão de aderência característica
$\tau_{b,máx}$	Tensão de aderência máxima
τ_{bu}	Tensão última de aderência
τ_f	Tensão tangencial no tecido de CFC
τ_{II}	Tensão de aderência para a região II
$\tau_{máx}$	Tensão tangencial máxima

1 Introdução

1.1. Considerações Gerais

Os projetos de estruturas em concreto armado devem atender três fatores indispensáveis: funcionalidade, segurança e durabilidade. Alterações em estruturas de concreto armado durante seu regime de utilização devido a modificações geométricas, ao aumento das solicitações e pela ação de agentes agressivos, podem levar estruturas a situações de risco.

Para restabelecer as condições de segurança em estruturas em risco o tratamento utilizado é a restauração total ou parcial dos elementos comprometidos, ou reforço estrutural, restabelecendo-se assim as condições de segurança exigidas.

Atualmente, a utilização de reforço tem se tornado prática comum. Existem varias técnicas de reforço disponíveis, cujo desempenho e aplicação dependem do carregamento da estrutura e de sua geometria.

A aplicação de materiais compósitos de fibras de carbono (CFC) como elemento de reforço está se mostrando uma das melhores técnicas surgidas nos últimos tempos. As propriedades desses materiais, como leveza, alta resistência mecânica, resistência à corrosão, neutralidade eletromagnética, facilidade de aplicação e manutenção das dimensões originais do elemento estrutural, permitem a substituição das chapas de aço estruturais, empregadas desde a década de 1960.

A crescente utilização desse tipo de reforço exige estudos mais conclusivos visando à verificação do comportamento dos elementos reforçados. Donde a necessidade de aumentar o conhecimento e a confiança no comportamento desses materiais por meio de pesquisas experimentais e teóricas sobre o seu desempenho estrutural. Esses estudos visam fornecer subsídios para os fabricantes dos materiais compósitos e para os engenheiros que especificam e dimensionam reforços estruturais usando essa técnica de reforço.

Ao se utilizar a técnica de reforço de estruturas de concreto armado com CFC deve-se garantir a perfeita aderência entre o CFC e o substrato de concreto. A aderência entre o reforço e o substrato de concreto é o fundamento básico dessa técnica. Na literatura são encontrados vários estudos sobre aderência, e alguns serão abordados no capítulo seguinte. Contudo, esses estudos ainda não são conclusivos e mostram que ainda não existe uma formulação teórica consistente para a aderência concreto-CFC.

1.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho é o estudo experimental da aderência entre o concreto e o compósito de fibra de carbono (CFC) por meio de ensaios tração-compressão de corpos-de-prova compostos de dois cubos de concreto (móvel e fixo), ligados por tiras de CFC coladas às suas laterais opostas.

Os parâmetros estudados foram: tipo de solicitação atuante, resistência à compressão do concreto e tipo de superfície de aderência do CFC ao substrato de concreto.

Foram realizados dezoito ensaios de tração-compressão, divididos em quatro grupos: Grupo I, com carregamento monótonico crescente e superfície lisa do substrato de concreto; Grupo II, com carregamento monótonico crescente e superfície rugosa do substrato de concreto; Grupo III, com carregamento em ciclos de carga e descarga e a superfície lisa do substrato de concreto; Grupo IV com carregamento em ciclos de carga e descarga e superfície rugosa do substrato de concreto.

Foram medidas as deformações específicas do tecido de CFC assim como no concreto. Com as deformações específicas foram calculadas as tensões de aderência e as deformações específicas médias. Com esses resultados foram traçados gráficos de deformações específicas vs. distâncias ao longo do comprimento de ancoragem, tensão de aderência vs. distâncias ao longo do comprimento de ancoragem e tensão de aderência vs deformação específica do CFC.

1.3. Organização do trabalho

No capítulo 2 são apresentados resumidamente alguns estudos experimentais e teóricos encontrados na literatura, incluindo-se o estudo de aderência com chapa de aço colada ao concreto realizado por Neubauer e Rostásy (1999), por tratar de pesquisa que fundamenta diversos conceitos básicos.

No capítulo 3 são descritos todos os materiais utilizados nesta pesquisa. São apresentadas as características e os aspectos da concretagem dos corpos-de-prova, as características do CFC, os materiais necessários para aplicação deste material ao substrato de concreto, o detalhamento do aparato utilizados nos ensaios tração-compressão e a instrumentação dos corpos-de-prova.

No capítulo 4 são relatados e analisados os resultados dos ensaios tração-compressão do programa experimental, como tipo e força de ruptura, além de parâmetros mecânicos referentes à aderência concreto-CFC.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Os dados obtidos nos experimentos constam nos diversos anexos:

Anexo A – Análise Granulométrica e Massas dos Agregados.

Anexo B – Resultado dos Ensaio de Módulo de Elasticidade do Concreto.

Anexo C – Ensaio de Resistência à Tração do CFC.

Anexo D – Resultados dos Ensaio de Aderência Tração-Compressão.

2 Revisão Bibliográfica

2.1. Introdução

Nesse capítulo são apresentados alguns estudos sobre o comportamento do reforço com CFC em elementos estruturais, de modo a salientar a importância da aderência CFC-concreto no comportamento desses elementos.

São descritos alguns ensaios específicos sobre aderência CFC-concreto encontradas na literatura, de modo a realçar alguns tópicos ainda por serem melhor estudados.

2.2. Estudo de Mazen *et alii* (1998)

Esse estudo aborda experimentos e análises efetuadas por diversos autores com o objetivo de se avaliar o comportamento de vigas reforçadas com CFC. Esses autores observaram que dois tipos diferentes de rupturas ocorrem em vigas de concreto reforçado com CFC: a) ruptura por flexão da vigas de concreto; b) ruptura local, por concentração de tensões na extremidade do reforço. O modo de ruptura local é o mais comum. Foram desenvolvidos métodos analíticos para obtenção da tensão normal e tensão tangencial na interface CFC-concreto.

Verificou-se que a ruptura local ocorre principalmente devido à concentração de tensão tangencial e normal na extremidade do reforço, e devido às fissuras de flexão ao longo da viga. Esse modo de ruptura ocorre com o descolamento das placas de concreto-CFC no local de maior tensão tangencial na interface sendo a ruptura do concreto causada pela tensão tangencial.

Para o dimensionamento do reforço são admitidas as seguintes hipóteses:

- As seções permanecem planas após as deformações.
- Existe aderência completa entre o reforço e o concreto.
- Admite-se um comportamento isotrópico para o CFC, para a resina epóxi utilizada na colagem, para o concreto e para o aço.

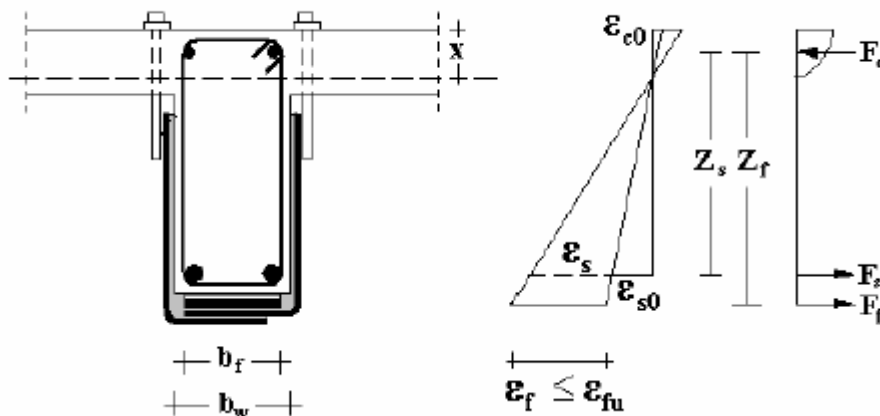


Figura 2.1 – Distribuição de tensões numa seção transversal de concreto armado reforçado com CFC (Neubauer e Rostásy, 1996).

Os resultados experimentais mostram que durante a flexão de vigas de concreto armado a distribuição das tensões tangenciais e normais ao longo da interface adesivo-concreto varia muito após a fase elástica. Na região em torno de cada fissura tem-se uma concentração de tensões devido à presença do reforço, que se opõe ao crescimento da fissura. As análises dessas tensões são importantes no estudo de vigas reforçadas com CFC.

Malek *et alli* (1998) desenvolveram um modelo para a análise dessas tensões e deduziram equações que fornecem valores máximos para a tensão normal e tangencial. Esses autores mostraram que os resultados obtidos com o modelo proposto apresentam concordância satisfatória com os resultados obtidos por meio da aplicação de uma discretização em elementos finitos.

Arduini e Nanni (1997) consideraram a interface adesivo-concreto para a análise das tensões tangencial e normal. A distribuição de tensões tangencial e normal foi considerada variando linearmente (forma triangular), de maneira a permitir que fossem obtidos os valores dessas tensões ao longo do reforço.

Täljsten (1997) aplicou conceitos da teoria da mecânica da fratura e desenvolveu equações para as solicitações na extremidade do reforço. Entretanto essas equações são muito complexas e não se aplicam ao projeto de reforço com CFC.

2.3. Estudo de Miller e Nanni (1999)

Esses autores estudaram alguns parâmetros que afetam a aderência entre os tecidos de CFC e o concreto, tais como: o comprimento de ancoragem, a resistência à compressão do concreto e a resistência dos tecidos de CFC. Os resultados experimentais obtidos foram comparados com trabalhos de outros autores, de modo a permitir a formulação de um método para se calcular a força última de aderência.

Nesse trabalho foram ensaiadas três séries de corpos-de-prova, cada uma com seis corpos-de-prova, com três diferentes comprimentos de aderência do reforço. Cada série variou a resistência à compressão do concreto ou o número de camadas de CFC. A Figura 2.2 ilustra o esquema de ensaio.

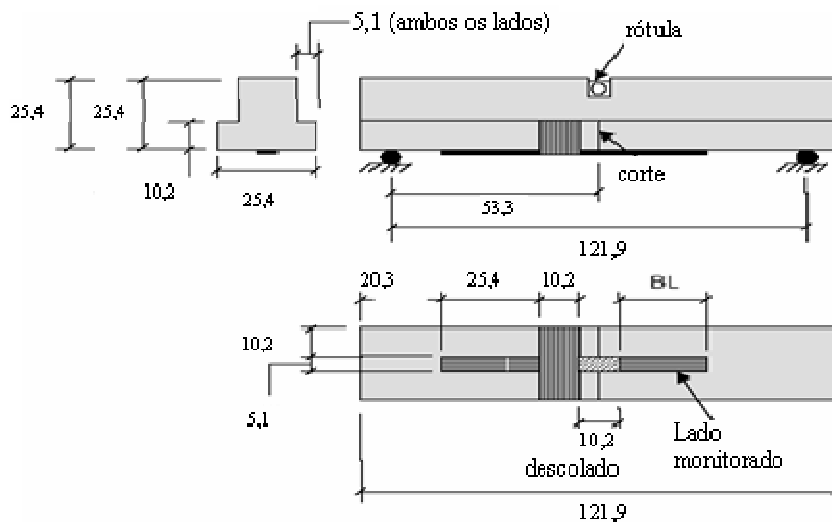


Figura 2.2 – Esquema de ensaio de Miller e Nanni (1999) cotas em *mm*.

As deformações específicas ao longo do tecido de CFC foram utilizadas para se obter a curva $\tau \times s$, (Figura 2.3), sendo cada curva para uma dada força aplicada. Observou-se a ocorrência de descolamento do tecido de CFC antes da ruptura. Um LVDT foi utilizado para monitorar a flecha durante os ensaios.

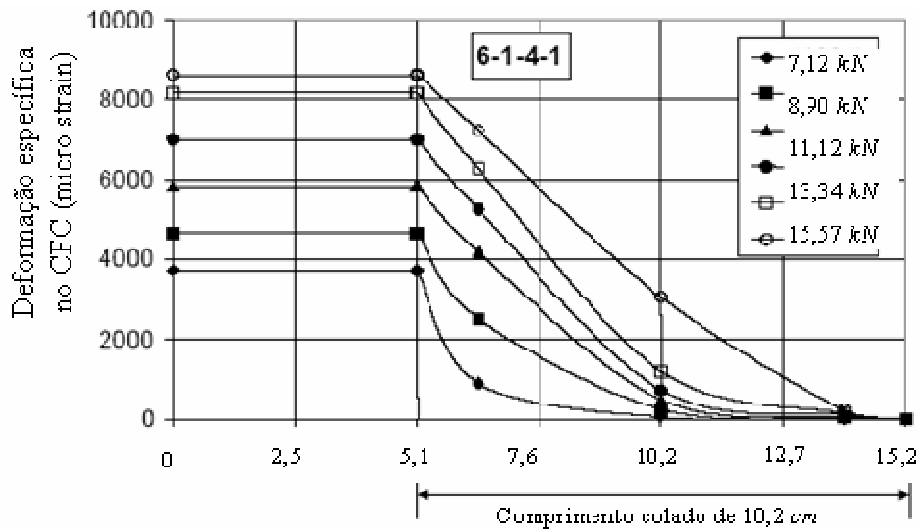


Figura 2.3 – Curva $\tau \times s$ para os corpos-de-prova; adaptada de Miller e Nanni (1999).

O modo de ruptura foi por descolamento do CFC. Ao longo de comprimento efetivo de ancoragem, o CFC resiste à força aplicada. A partir desse comprimento não ocorre mais deformação.

Os resultados experimentais mostram que a partir de um certo comprimento a força aplicada não pode mais ser transferida ao tecido de CFC, logo não há acréscimo de resistência. Disto conclui-se que há um comprimento efetivo de ancoragem.

Esperava-se também que a resistência do concreto afetasse a resistência última de aderência, porém, isso não foi observado. A resistência do concreto influencia a força de início de fissuração, mas não a força última.

O número de camadas de CFC teve influência na resistência CFC-concreto. Para duas camadas de CFC a força média última obtida foi 1,5 vezes maior que para uma camada de CFC.

Foi efetuada uma aproximação linear dos resultados dos ensaios em conjunto com os resultados experimentais do método de Maeda *et al.* (1997), que utiliza um modelo analítico para estimar a força última e considera uma distribuição linear de tensão antes do descolamento ocorrer. Usando-se dados desta experiência e a de Maeda *et al.* (1997), observou-se que com o acréscimo da resistência do concreto houve um acréscimo da força última. Logo pode-se admitir a relação linear como razoável, embora sejam necessários novos estudos experimentais para validar essa relação.

2.4. Estudo de Harmon *et alii* (1999)

Este estudo aborda diversas pesquisas conduzidas em conjunto com o departamento de Engenharia Química da Universidade de Washington, para testar o sistema de resina de fibra obtidos no mercado e desenvolver um sistema de resina para a Zoltek Corporation .

Os materiais testados foram: tecidos produzidos pela Mbrace e tecidos da Zoltek Corporation, além de resinas experimentais desenvolvidas por essa Universidade. O objetivo da pesquisa foi o desenvolvimento de um sistema de resina comercial para a Zoltek Corporation, que pudesse competir com o sistema da Mbrace.

Para testar a ligação do sistema resina-fibra com o substrato de concreto, executaram-se vigas para serem ensaiadas à flexão. Os ensaios foram realizados por meio de um macaco hidráulico e um dispositivo de aplicação de força que transmitia as forças concentradas de forma simétrica. A força foi aplicada ao eixo viga, de forma que a tensão de tração estivesse distribuída uniformemente ao longo do tecido de CFC, situado na parte inferior da viga . Um lado da viga não foi monitorado e nesse local, colocou-se um acréscimo de reforço de CFC com 5'' por 5'' (127 cm x 127 cm) para assegurar que não ocorresse uma ruptura nessa parte (Figura 2.4).

O tecido de CFC foi instrumentado com extensômetros elétricos de resistência (EER). As deformações específicas lidas pelos EER foram colocadas sob a forma de gráficos representando a distribuição de tensão tangencial ao longo do tecido de CFC. A curva $\tau \times s$ obtida representa a ligação efetiva do tecido de CFC com o concreto, de modo a permitir analisar a eficiência da ligação do tecido de CFC com o concreto para uma força aplicada.

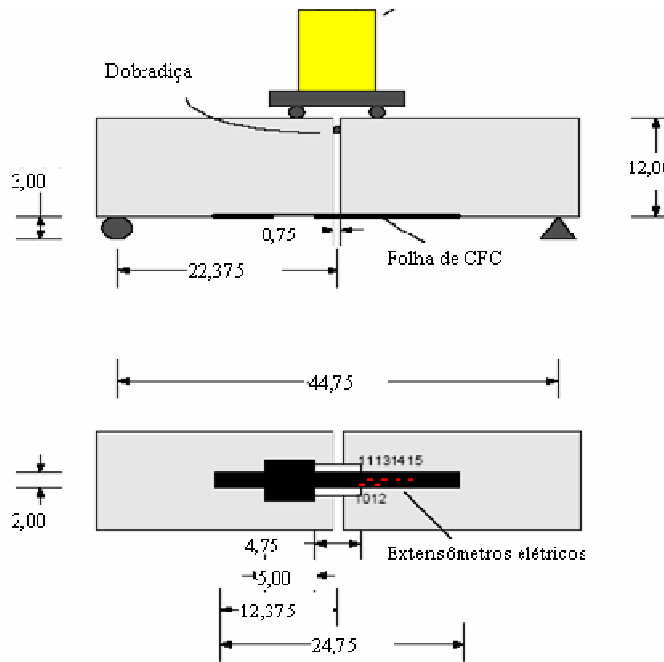


Figura 2.4 – Esquema das vigas ensaiadas por Harmon *et alii* (1999) cotas em cm.

Os resultados experimentais mostram que o sistema Mbrace se foi mais eficiente. No ensaio com o tecido Mbrace esse se destacou do substrato de concreto para uma força de 3000 libras (13,60 kN). Com o tecido da Zoltek Corporation o tecido se rompeu para uma força de 2.516 libras (11,41 kN). O rompimento do tecido não havia sido previsto, pois o objetivo era testar o elemento de ligação e não o tecido.

A análise dos resultados indica duas razões para a melhor eficiência do sistema Mbrace:

- integridade das fibras;
- o sistema de malha do tecido.

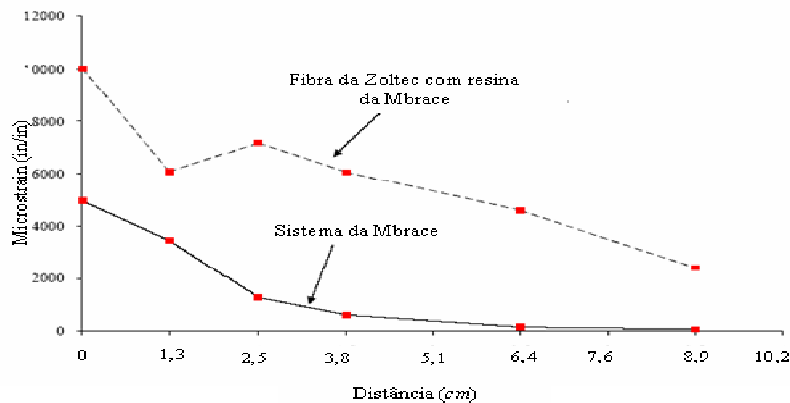


Figura 2.5 – Comparação das curva $\tau \times s$ do tecido da Mbrace e da Zoltek Corporation; adaptada de Harmon *et alii* (1999).

A curva $\tau \times s$, (Figura 2.5) mostra que o tecido da Mbrace deformou de 4.000 a 5.000 microstrain menos que a fibra da Zoltek Corporation, o que indica maior resistência da fibra da Mbrace. Observou-se também que a curva $\tau \times s$ do tecido da Zoltek Corporation indica que o tecido começou a se descolar do concreto. Ambos possuíam a mesma taxa de reforço.

O tecido da Zoltek Corporation se rompeu com menor força porque o sistema de malha usado na fabricação não é adequado. As fibras de carbono são extremamente resistentes, porém, as fibras devem ser paralelas. Se isto não ocorrer, as fibras não estarão alinhadas na direção da aplicação da força ao tecido de CFC, logo podem não contribuir para resistir à força aplicada na viga.

2.5. Estudo de Kallifa *et alii* (1999)

Esses autores realizaram ensaios para estudar a resistência de vigas reforçadas à força cortante com CFC. Foram testadas três vigas com carregamentos em quatro pontos. A viga com seção T foi armada com barras de aço na região longitudinal e sem estribos nos vãos de cisalhamento (região de teste, Figura 2.6).

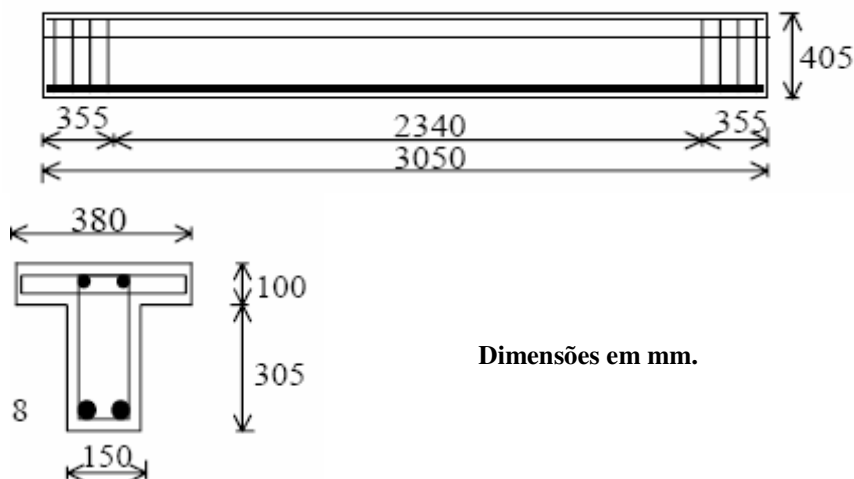


Figura 2.6 – Armação das viga ensaiada por Kalifa *et alii* (1999).

Uma viga denominada BT1 foi ensaiada como viga de referência, ou seja, sem o uso do reforço de CFC. Outra viga denominada BT2 teve um reforço em forma de U, sem nenhum tipo de ancoragem para o reforço. Uma terceira viga

BT3 foi reforçada de maneira semelhante à viga BT2, sendo que na viga BT3 o reforço em forma de U foi ancorado nas mesas em ambos os lados da seção. A Figura 2.7 mostra o esquema de reforço das vigas e as posições dos extensômetros elétricos de resistência.

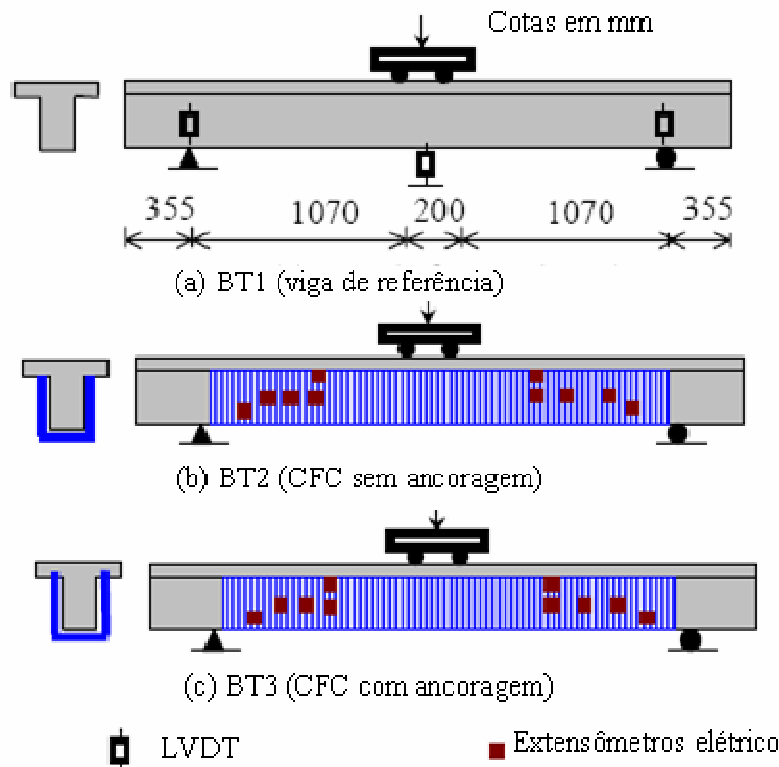


Figura 2.7 – Esquema das vigas ensaiadas por Kalifa *et alii* (1999).

A viga BT1 ao ser carregada apresentou fissuras para a força de 110 kN. A partir daí o carregamento cresceu e as fissuras se propagaram até o colapso, que ocorreu para a força de 180 kN.

A viga BT2 começou a se romper pelo descolamento do tecido de CFC, seguindo-se o esmagamento do concreto para a força de 310 kN. O reforço de CFC aumentou em 72% a resistência da viga. O descolamento poderia ter sido evitado com a melhor utilização do CFC, o que aumentaria a resistência da viga.

A viga BT3 não apresentou esmagamento do concreto nem descolamento do reforço. A ruptura se deu pela ruptura do CFC perto do apoio. O resultado da ancoragem em forma de U resultou num acréscimo significativo na sua capacidade resistente. A Figura 2.8 mostra os diagramas força *vs.* deformação específica obtidos por meio das leituras dos extensômetros elétricos de resistência 7, 8 e 10 colados nas vigas reforçadas. Em ambas as vigas as fissuras se iniciaram para o

mesmo valor da força aplicada, porém, a força última da viga BT3 foi muito superior. Essa força última foi de 442 kN, o que significou um acréscimo de 42% na resistência quando comparada com a viga BT2.

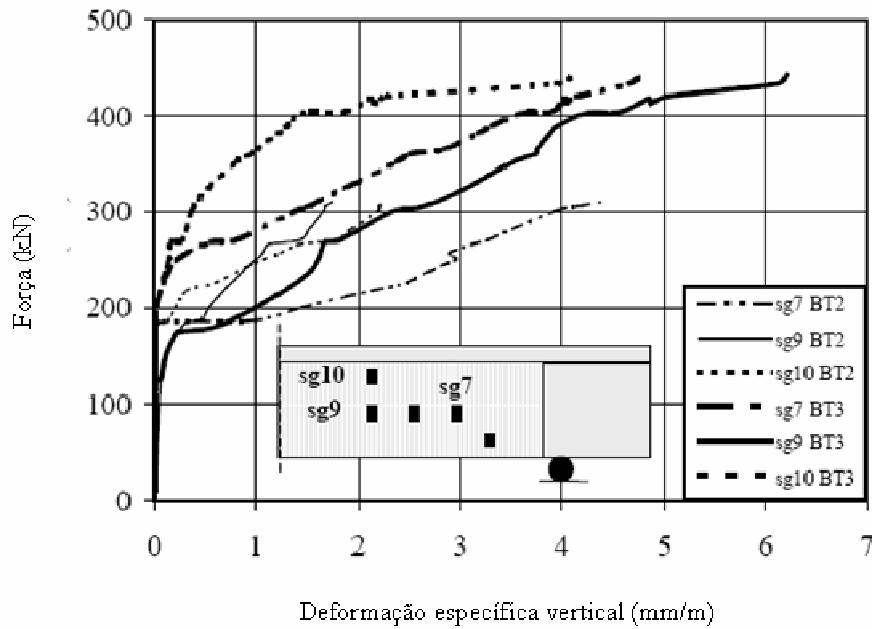


Figura 2.8 – Diagrama força x deformação específica vertical para as vigas BT2 e BT3; adaptada de Kalifa *et alii* (1999).

Os resultados experimentais das flechas das três vigas são apresentados na Figura 2.9. Esse gráfico mostra que viga BT3 teve maior ductilidade e mostrou mais rigidez.

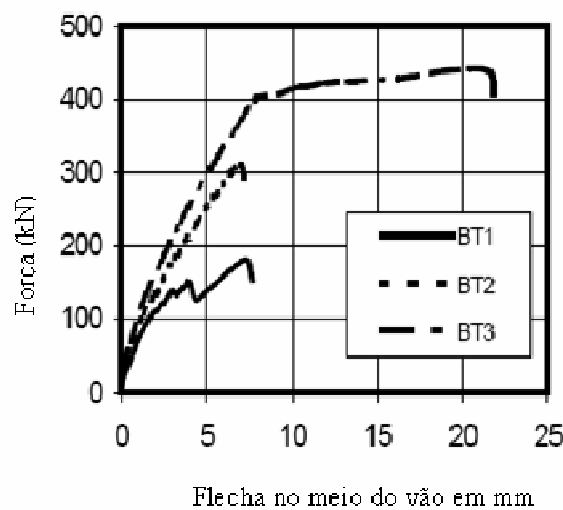


Figura 2.9 – Força vs flecha no meio do vão; adaptada de Kalifa *et alii* (1999).

2.6. Estudo de Neubauer e Rostásy (1999)

Os estudos sobre a aderência concreto-CFC são normalmente baseados nas leis de tensão de aderência x deslocamento. O que diferencia esses estudos está na adoção de um tipo específico de lei $\tau \times s$ e o tipo de análise: elástica linear ou não linear.

Neubauer e Rostásy (1999) conceberam um modelo de aderência para reforço de estruturas de concreto com chapas metálicas, adotando uma análise energética da aderência entre o substrato de concreto e o reforço. Esse modelo mostra-se adequado para os reforços com chapas metálicas, sendo baseado nos mecanismos de fratura do concreto.

Nesse modelo são admitidas as seguintes hipóteses:

- a) a tensão de aderência é governada pela energia de fratura G_F ;
- b) a tensão de aderência do compósito τ_ℓ é dependente do deslocamento relativo s_ℓ na direção da força atuante no reforço.

A energia de fratura G_F não depende do comprimento ancorado ℓ_t e não deve exceder certo valor $\ell_{t,máx}$, sendo a expressão para G_F dada por:

$$G_F = K_b^2 C_F f_{ct} \quad (2.1)$$

onde

f_{ct} – resistência à tração da superfície de concreto;

C_F – fator que contém todos os efeitos secundários;

K_b – fator que considera a influência da largura relativa do compósito sobre a largura do elemento de concreto, sendo $K_b > 1$ e usualmente não excede a $K_b = 1,3$.

Os resultados dos ensaios de Neubauer e Rostásy (1999) mostram que $\ell_{t,máx}$ não tem influência no acréscimo da força última T_u . A expressão para a força última $T_{u,máx}$ é dada por:

$$T_{u,máx} = b_\ell K_b \sqrt{2G_F E_\ell t_\ell} = 0,64 K_b b_\ell \sqrt{E_\ell t_\ell f_{ctm}} \quad (2.2)$$

O comprimento de ancoragem $\ell_{t,máx}$ obtido com $T_{u,máx}$ é dado por:

$$\ell_{t,máx} = 2 \sqrt{\frac{2G_F E_\ell t_\ell}{\tau_{II}^2}} = \sqrt{\frac{E_\ell t_\ell}{2f_{ctm}}} \quad (mm) \quad (2.3)$$

onde

E_ℓ – módulo de elasticidade do reforço;

t_ℓ – espessura do reforço;

b_ℓ – largura do reforço;

τ_{II} – tensão máxima de aderência;

f_{ctm} – resistência média à tração do concreto.

A energia de fratura de aderência no concreto é constituída de componentes do modo I (modo de fratura) e do modo II (Teoria da Fratura). O modo I é produzido pelo deslocamento transversal devido à rugosidade das faces da fissura. O modo II ocorre em decorrência da direção da força de tração no reforço. Os modelos simplificados para a aderência são admitidos como um modo II puro e G_F representa a energia de fratura total constituída pelos componentes do modo I e modo II.

2.7. Estudo de Cruz e Barros (2001)

Esses autores estudaram o comprimento crítico efetivo para a ancoragem do tecido de CFC e analisaram a relação entre a tensão e o deslocamento desse reforço.

Foram realizados ensaios de vigas bi-apoiadas sujeitas a um esquema de força em quatro pontos, de modo a se estudar esse problema (Figura 2.12). Nas vigas o CFC foi totalmente embutido no bloco B. No bloco A o CFC foi embutido em um comprimento l_b , que é um dos parâmetros dessa pesquisa. Os blocos A e B foram conectados na parte de baixo pelo CFC e em cima por meio de uma barra de aço (Figura 2.12).

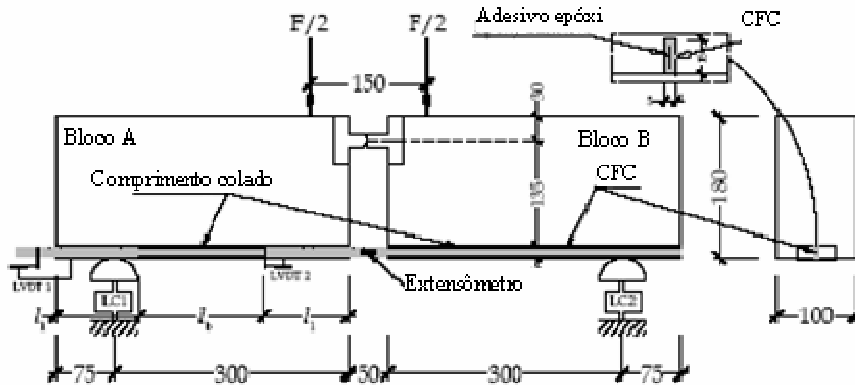


Figura 2.10 – Desenho esquemático das vigas ensaiadas (medidas em mm); adaptada de Cruz e Barros (2001).

Foram ensaiadas seis séries de três vigas e considerados três comprimentos de ancoragem $k_1\emptyset$, $k_2\emptyset$ e $k_3\emptyset$, sendo \emptyset o diâmetro equivalente de uma barra circular com a mesma área da seção transversal do tecido de CFC. Os valores de k_1 , k_2 e k_3 foram de 20, 25 e 30, respectivamente.

Foram realizados nove ensaios com carregamentos monotônicos e nove ensaios com carregamento cíclicos.

Para medir o deslocamento foram usados dois LVDT e colados extensômetros de resistência elétrica ao tecido de CFC para se medir a deformação específica.

O primeiro ensaio com carregamento monôtonico foi realizado com um comprimento embutido de $25\emptyset$. Nesse ensaio a ruptura se deu pela força cortante, tendo o concreto a idade de 14 dias, o que não era almejado. Por esse motivo decidiu-se colar as partes rompidas e reforçar as laterais com CFC (Figura 2.13 e 2.14).

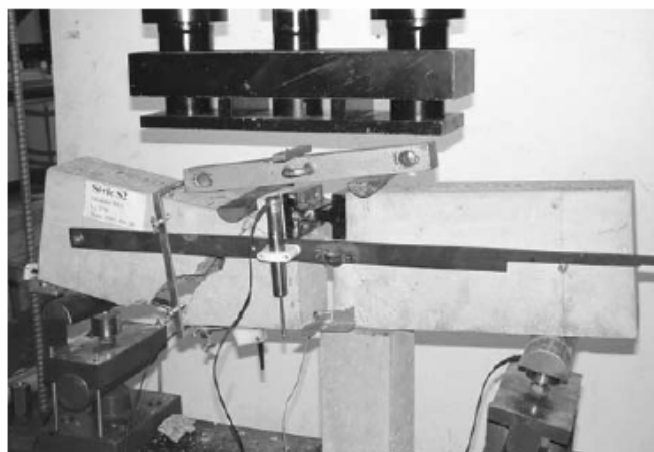


Figura 2.11 – Ruptura por força cortante; adaptada de Cruz e Barros (2001).



Figura 2.12 – Reforço de CFC para força cortante; adaptada de Cruz e Barros (2001).

A Figura 2.15 mostra a curva tensão vs. deformação específica obtida para o tecido de CFC. A curva é praticamente linear, e a tensão máxima no CFC é da ordem de grandeza da sua resistência à tração indicada pelo fabricante (2.000 *MPa*), o que significa que para esse comprimento embutido a resistência última da fibra é atingida. A Figura 2.15 ilustra o caso em que a resistência aumenta de acordo com o comprimento embutido. Para um comprimento embutido de 20ϕ a inclinação da curva $\tau \times s$ é superior ao módulo de elasticidade especificado pelo fabricante das fibras, indicando que abaixo desse comprimento de ancoragem a tensão de tração última do tecido de CFC não será atingida.

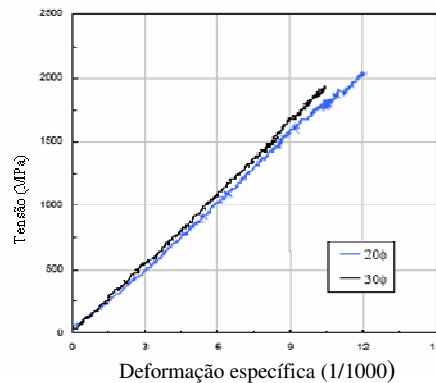


Figura 2.13 – Curva $\tau \times \varepsilon$ obtida na lâmina de CFC depois do reforço lateral; adaptada de Cruz e Barros (2001).

A Figura 2.16 representa a relação entre tensão e o deslocamento no adesivo. A tensão no adesivo foi calculada pela relação entre a força no tecido de CFC e a área de contato e o deslocamento vertical foi obtido por meio da

diferença de valores obtidos com o LVDT1 e o LVDT2. Essa curva não é linear, o que mostra que o comportamento não segue a lei de Hooke sob força cortante.

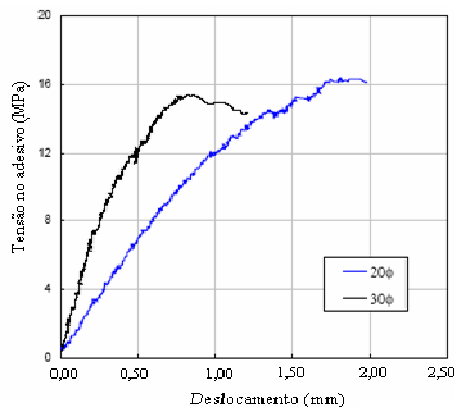


Figura 2.14 – Curva $\tau \times s$ tensão do adesivo; adaptada de Cruz e Barros (2001).

2.8. Pesquisa de Leung e Yang (2002)

Esses autores modelaram o processo de descolamento em função da propagação de fissuras ao longo da interface CFC-concreto, admitindo uma tensão de cisalhamento atuando nas fissuras.

Segundo Täljsten (1996) a interface de CFC-concreto tem uma região com comportamento elástico, na qual não são observados danos (região A) e outra região onde, quando o descolamento ocorre, existem danos interfaciais, conduzindo à separação dos materiais. O comportamento dessa região descolada pode ser subdividido em dois tipos: um na qual a tensão cisalhante está diminuindo na região da interface (região B) e outro que é definido por zona de livre tensão onde as superfícies descoladas estão completamente separadas (região C). Logo o processo de descolamento pode ser analisado pelas propagações de fissuras, descrevendo-se o comportamento entre as interfaces dos materiais por uma curva $\tau \times s$ (Figura 2.10).

Antes de ocorrer o descolamento a deformação cisalhante é resultado da deformação do adesivo e do deslocamento relativo entre as duas superfícies, ou da área descolada. A área sob a curva $\tau \times s$ representa a energia de fratura necessária para o descolamento total da superfície.

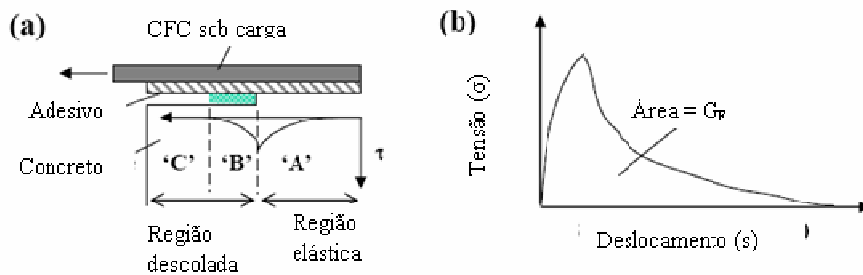


Figura 2.15 – Comportamento das interfaces dos materiais: (a) divisão em zonas ao longo da interface CFC/Concreto; (b) curva $\tau \times s$; adaptada de Leung e Yang (2002).

Brosens e Van Gemert (1997) consideram o início do descolamento e da ruptura separadamente. Para se determinar a força de descolamento inicial emprega-se a área da curva $\tau \times s$ em regime elástico. Para se determinar força última emprega-se a área total sob essa curva.

Yuan *et al.* (2001) e Leung e Tung (2001) estudaram a curva $\tau \times s$ por meio de equações diferenciais para a zona elástica e zona descolada. Resolvendo-se essas equações e impondo-se as condições de contorno, tem-se o comprimento da zona descolada para uma dada força e a distribuição de tensões ao longo do tecido de CFC. Nesse caso assume-se que o descolamento ocorre para uma tensão cisalhante crítica. Os resultados experimentais de Bizindavyi e Neale (1999) indicaram que a tensão cisalhante ao longo da interface de CFC-concreto pode alcançar valores altos, acima da resistência ao cisalhamento do próprio concreto. Essa observação indica que o rompimento na interface pode não ocorrer quando uma porção pequena da interface está sob concentração de tensões.

Nesse estudo foi considerado um modelo simples para o descolamento do CFC do substrato de concreto, para o qual ao longo da interface na região descolada considera-se a tensão cisalhante τ como uma função linear do deslocamento s . Para o comportamento elástico da interface, onde não ocorre descolamento, a distribuição de tensões pode ser obtida por meio de uma análise última de tensões. A Figura 2.11 ilustra a disposição desse modelo.

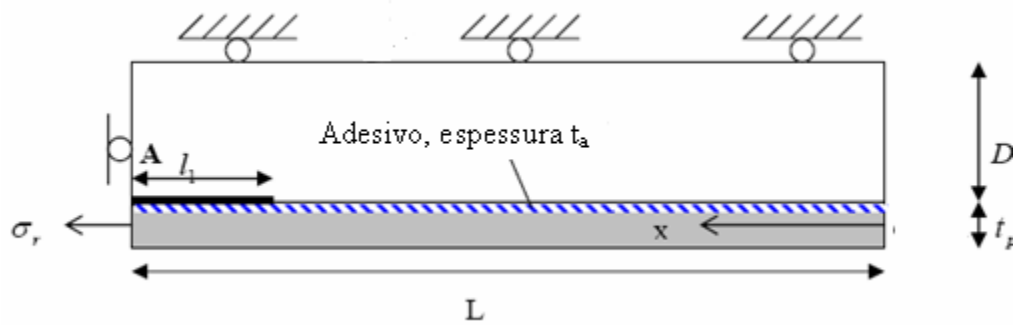


Figura 2.16 – Modelo para o descolamento do CFC do substrato de concreto; adaptada de Leung e Yang (2002).

Considerando-se as tensões atuantes no concreto, no adesivo e no CFC, a energia do sistema pode ser calculada como uma função do comprimento descolado l_1 . Com o aumento de l_1 a taxa de liberação de energia do sistema é comparada com a energia interfacial crítica, de modo a se obter a relação entre a força aplicada e o comprimento descolado. Com esses dados foram derivadas expressões analíticas para o comportamento das tensões ao longo da interface. Os resultados da análise indicaram que a tensão cisalhante efetiva dentro da região colada é uma função do atrito entre as interfaces, da resistência entre essas, do módulo de cisalhamento e da espessura do adesivo.

2.9. Estudo de Meneghel (2005)

Os ensaios de aderência concreto-CFC realizados por Meneghel (2005) foram realizados com um equipamento projetado especialmente para transmitir aos materiais força de tração ao CFC e compressão ao concreto. Este mesmo dispositivo de ensaio foi utilizado na presente pesquisa, que é uma ampliação desses estudos. Os detalhes de ensaio são apresentados no Capítulo 3.

Meneghel (2005) estudou parâmetros como resistência à compressão do concreto e largura do tecido, que afetam os resultados de ensaios de corpos-de-prova usados para o estudo da aderência entre o CFC e o substrato de concreto. Foram ensaiados nove corpos-de-prova de concreto com faixas de CFC colados as laterais, todos com as mesmas características geométricas, com três resistências à compressão dos blocos de concreto e duas larguras diferentes do tecido.

Como conclusões dos resultados experimentais de Meneghel (2005) tem-se:

- a) Existe um comprimento de ancoragem efetivo no qual as tensões de aderência são realmente distribuídas. O valor deste comprimento foi de 120 *mm*;
- b) a largura do tecido não influencia as tensões últimas de aderência;
- c) no intervalo estudado, as tensões últimas de aderência não dependem da resistência a compressão do concreto;
- d) o valor característico da tensão última de aderência obtida foi $\tau_{bk} = 1,45 \text{ MPa}$.

2.10. Outras Pesquisas

O uso de ancoragem entre o concreto e o CFC tem função importante em projetos de reforço pelo fato do CFC ser um material frágil que apresenta baixa ductilidade e ruptura brusca sem patamar de escoamento. (NAKABA *et al.*, 2001).

Pela análise das deformações específicas e forças de ruptura percebe-se que a aderência é totalmente alcançada para certo comprimento de ancoragem. Para comprimentos de ancoragem menores quando o comprimento de ancoragem aumenta a força de ruptura tende a ser maior e a tensão de aderência média diminui. Sendo necessário calcular um comprimento de aderência adequado para evitar a ruptura brusca do tipo frágil. (CHAJES *et al.*, 1996).

Para os comprimentos menores que o efetivo, observando-se os ensaios de tração pura, as tensões de aderência tendem a diminuir quando a área de aderência aumenta, isso ocorre porque as tensões estão concentradas na região da extremidade do reforço e não distribuídas ao longo da área do comprimento de ancoragem.

Quando o comprimento de aderência excede ao comprimento crítico (comprimento de aderência efetivo), a força última permanece constante. Como a força de tração do CFC é transferida ao concreto, não existe tensão de aderência entre as regiões descoladas. Segundo NAKABA *et al.* (2001) o comprimento de aderência efetivo está relacionado com a rigidez do CFC.

As Figuras 2.17 e 2.18 mostram o comportamento das tensões de aderência em função de comprimentos de aderência variáveis, obtidas de resultados experimentais de CHAJES *et al.* (1996).

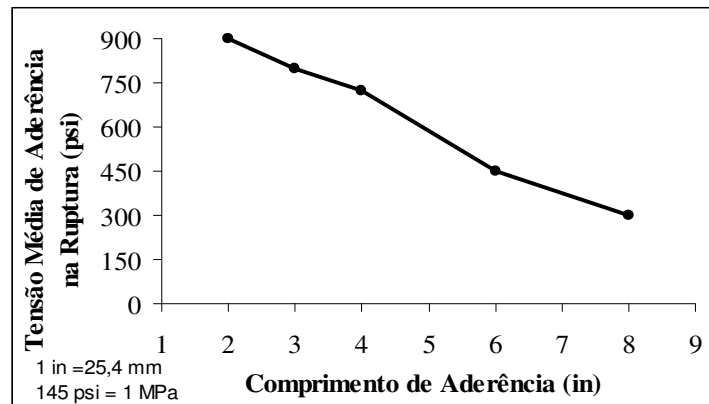


Figura 2.17 – Gráfico tensão média de aderência x comprimento de aderência; adaptada de CHAJES *et al.* (1996).

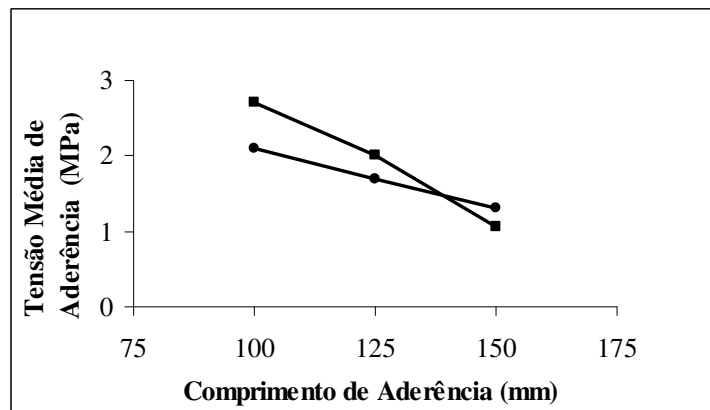


Figura 2.18 – Gráfico tensão média de aderência x comprimento de aderência para dois tipos de CFC; adaptada de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).

Percebe-se que as tensões médias de aderência diminuem quando os comprimentos de aderência aumentam, devido ao fato de que para grandes comprimentos de aderência a tensão máxima de aderência não é atingida.

A Figura 2.19 mostra que para comprimentos de aderência menores as forças de ruptura são menores, e a partir de um certo comprimento esta se torna constante.

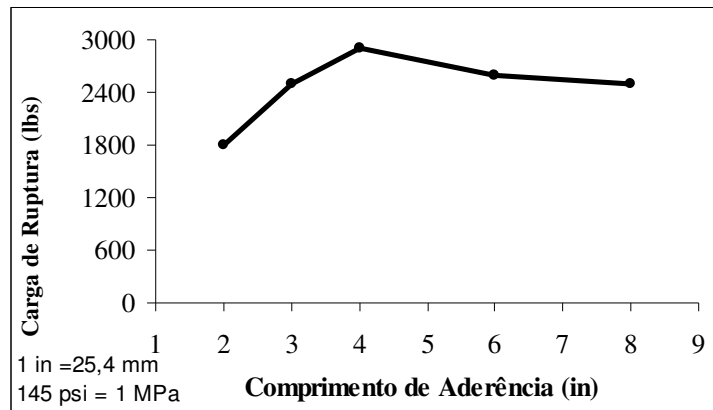


Figura 2.19 – Gráfico carga de ruptura x comprimento de aderência; adaptada de CHAJES *et al.* (1996).

➤ **CHAJES *et al.* (1996)**

Esses autores realizaram ensaios de aderência com corpos-de-prova cúbicos de concreto aos quais foram coladas chapas de material compósito. Foram analisados os efeitos da preparação da superfície de concreto, o tipo de adesivo, a resistência à compressão do concreto e os efeitos de diversos comprimentos de aderência da chapa.

Na maioria dos corpos-de-prova ensaiados por esses autores a ruptura ocorre no concreto ao longo da superfície de aderência.

Segundo CHAJES *et al.* (1996) algumas premissas são admitidas:

1. o mecanismo de ruptura está diretamente relacionado com a magnitude da deformação específica do concreto;
2. a deformação específica do concreto está diretamente relacionada com a deformação específica do compósito;
3. o comprimento de aderência do compósito é afetado pela largura, geometria e método de ensaio utilizado.

Segundo esses autores são necessários experimentos adicionais e novos trabalhos analíticos para o desenvolvimento de uma teoria de aderência entre o conjunto concreto-compósito, que considere a influência dos efeitos da resistência variável do concreto, da ductilidade do adesivo e das propriedades do compósito.

➤ **NAKABA *et al.* (2001)**

Esses autores realizaram experimentos com corpos-de-prova reforçados com CFC utilizados para se obter as tensões de aderência do sistema concreto-compósito.

O CFC é colado nos dois lados do corpo-de-prova, sendo que um dos lados foi reforçado para assegurar que a ruptura não ocorresse nesse lado (Figura 2.20).

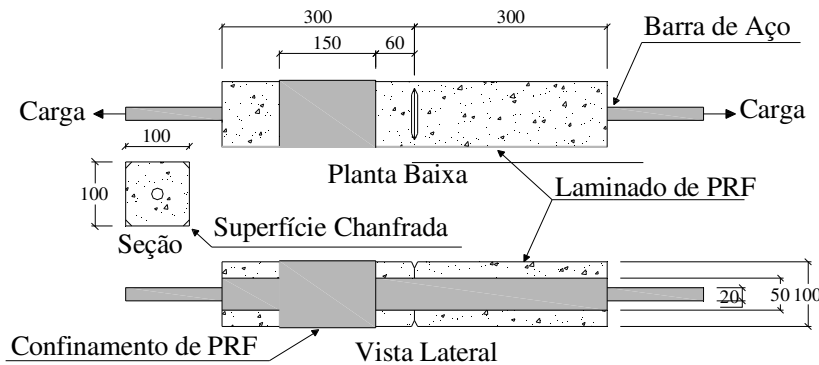


Figura 2.20 – Corpo-de-prova para o ensaio de aderência; adaptada de NAKABA *et al.* (2001).

Por meio dos resultados de análises algébricas NAKABA *et al.* (2001) formularam o estudo da aderência considerando uma lei da tensão de aderência local *vs* deslocamento, que permite determinar um comprimento de aderência efetivo para o CFC. A força de tração foi obtida por meio da diferença entre a deformação específica da seção *i*, e a deformação específica relativa a seção *i-1*. A média da tensão de aderência da seção *i*, $\tau_{b,i}$ é calculada dividindo-se a diferença da força de tração pela área da superfície do laminado:

$$\tau_{b,i} = \frac{(\varepsilon_{f,i} - \varepsilon_{f,i-1})t_f E_f}{\Delta l_b} \quad (2.4)$$

onde

$\varepsilon_{f,i}, \varepsilon_{f,i-1}$ – deformação específica no tecido de PRF na seção “*i*” e na seção *i-1*, respectivamente;

t_f – espessura do tecido de CFC;

E_f – módulo de elasticidade do CFC;

Δl_b – distância entre os pontos onde são obtidas as medidas.

O deslocamento s_i da seção i é a soma da diferença entre o alongamento da seção equivalente composta pelo concreto, resina epóxi e barra de aço da extremidade livre do CFC (ou da extremidade carregada do corpo-de-prova) para a seção i .

Com os resultados experimentais é desenhado um gráfico tensão de aderência local vs deslocamento para cada intervalo de medidas do extensômetro, para todos os corpos-de-prova. As curvas tendem para uma forma parabólica (Figura 2.21):

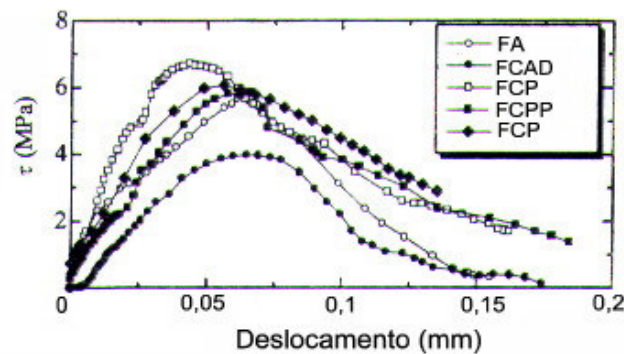


Figura 2.21 – Tensão de aderência vs deslocamento; adaptada de NAKABA *et al.* (2001).

Por meio da análise das curvas foi formulado um modelo que permite determinar a relação entre a tensão de aderência local vs. deslocamento (Figura 2.21), $\tau_b \times s$, donde:

$$\frac{\tau_b}{\tau_{b,máx}} = \frac{s}{s_{máx}} \cdot \frac{n}{(n-1) + \left(\frac{s}{s_{máx}}\right)^n} \quad (2.5)$$

$\tau_{b,máx}$ – tensão de aderência local máxima em *MPa* ;

$s_{máx}$ – deslocamento relativo a $\tau_{b,máx}$ em *mm* .

➤ CHEN e TENG (2001)

Esses autores propuseram um modelo de aderência pela combinação da análise da mecânica da fratura com dados experimentais, e observaram que a relação tensão de aderência vs. deslocamento para reforços de CFC colados ao

concreto pode ser representada por uma relação triangular como mostra a Figura 2.22.

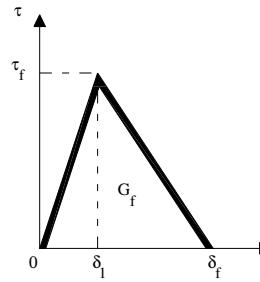


Figura 2.22 – Relação tensão de aderência – deslocamento triangular; adaptada de YUN e WU *apud* CHEN e TENG (2001).

As medidas das propriedades da tensão de aderência τ_f e do deslocamento δ_f são difíceis de serem determinadas na prática. É desejável que as propriedades da tensão de aderência e deslocamento sejam medidas simplesmente como a resistência do concreto.

Os modelos existentes para projetos práticos de reforço de estruturas de concreto armado não são conclusivos e indicam a necessidade do desenvolvimento de um novo, esse modelo deve ser capaz de avaliar a resistência última da aderência e do comprimento de aderência efetivo.

Os resultados experimentais (CHAJES *et al.*, 1996) mostraram que a resistência última da aderência é proporcional a $\sqrt{f'_c}$, e que possui comportamento similar à resistência da aderência do reforço interno de aço (armadura). CHEN e TENG (2001) aproximaram τ_f pela resistência à tração do concreto que pode ser relacionada com a resistência à compressão sob uma expressão em termos de $\sqrt{f'_c}$. Usando-se a solução da Mecânica da Fratura Não Linear (MFNL) esses dois parâmetros foram calculados pelas seguintes equações:

:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{\sqrt{f'_c}}}, \quad mm \quad (2.6)$$

onde $E_p t_p$ é dado em $MPa \cdot mm$ e f'_c é dado em MPa .

Esses autores propuseram um modelo simples para força última da aderência fundamentado em dados experimentais:

$$P_u = 0,427 \beta_p \beta_L \sqrt{f'_c} b_p L_e, \quad N \quad (2.7)$$

sendo

$$\beta_L = \begin{cases} 1 & \text{se } L \geq L_e \\ \text{sen} \left[\frac{\pi L}{2L_e} \right] & \text{se } L < L_e \end{cases} \quad (2.8)$$

$$\beta_p = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_p}{b_c}}{1 + \frac{b_p}{b_c}}} \quad (2.9)$$

onde

b_p – largura do compósito;

b_c – largura do elemento de concreto.

3 Programa experimental

3.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados na confecção dos corpos-de-prova de concreto e caracterizadas as tiras de CFC e as resinas utilizadas nos ensaios.

O objetivo deste estudo experimental é analisar a aderência entre o concreto e compósitos de fibra de carbono, CFC, por meio de ensaios tração-compressão de corpos-de-prova compostos de dois blocos de concreto (móvel e fixo) ligados por tiras de tecidos de CFC coladas em duas laterais opostas. Nos ensaios foram medidas as deformações específicas no concreto e no CFC e calculadas as tensões de aderência.

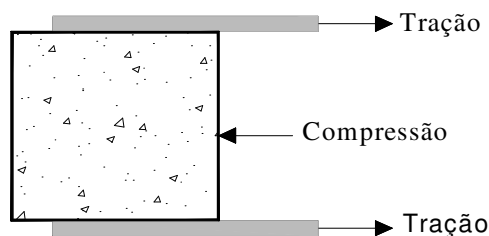


Figura 3.1 – Esquema do ensaio de tração-compressão.

Foram ensaiados 18 corpos-de-prova identificados conforme a seguinte nomenclatura: MCLI-1, MCLI-2, MCLII-1, MCLII-2, MCLIII-1, MCLIII-2, MCRI-1, MCRI-2, MCRI-3, MCRII-1, MCRII-2, MCRIII-1, MCRIII-2, CDLI-1, CDLII-1, CDLIII-1, CDRII-1, CDRIII-1. As letras MC indicam o carregamento monotônico crescente e CD indicam o carregamento em ciclos de carga e descarga. A letra L indica a superfície lisa do bloco e a letra R a superfície rugosa.

Os números I, II e III junto às letras referem-se à resistência do concreto: o número I refere-se a $f_{c,28} = 23,3 \text{ MPa}$, II refere-se a $f_{c,28} = 28,4 \text{ MPa}$ e III refere-se a $f_{c,28} = 37,1 \text{ MPa}$. Os números 1 e 2 no final da nomenclatura indicam que foram

ensaiados um ou dois corpos-de-prova com as mesmas características. Para melhor descrição dos corpos-de-prova, estes foram divididos em quatro grupos: o grupo I é composto de corpos-de-prova com carregamento monótonico crescente e superfície lisa do bloco; o grupo II é composto de corpos-de-prova com carregamento monótonico crescente e superfície rugosa do bloco; o grupo III é composto de corpos-de-prova com carregamento em ciclos de carga e descarga e superfície lisa do bloco; o grupo IV é composto de corpos-de-prova com carregamento em ciclos de carga e descarga e superfície rugosa do bloco.

As superfícies rugosas às quais foram colados o CFC eram as faces superiores das formas dos corpos-de-prova. Durante a concretagem essas faces foram niveladas com colher de pedreiro e a rugosidade simulada passando-se uma vassoura na superfície do concreto fresco. No preparo da colagem do CFC, as partes pontiagudas e com grandes saliências foram lixadas, de modo a evitar que o CFC pudesse se danificar. Entretanto, essas faces continuaram a ter considerável aspereza, quando comparadas com as faces dos corpos-de-prova lisos.

Os carregamentos em ciclo de carga e descarga foram aplicados em incrementos de 2,5 *kN* (força atuando na lateral do CFC), seguido de descarga total.

Todos os corpos-de-prova tinham dimensões de 200 *mm* x 200 *mm* x 200 *mm* e comprimentos de ancoragem do CFC igual a 120 *mm*.

3.2. Concreto

O concreto utilizado na confecção dos corpos-de-prova foi dosado pelo método do ACI – American Concrete Institute para alcançar, aos 28 dias, três diferentes resistências à compressão.

Os corpos-de-prova foram divididos em três séries de acordo com a resistência à compressão do concreto.

Os traços em massa foram: 1:2,61:3,09; 1:1,82:2,40; 1:1,25:1,89 (cimento : areia : agregado graúdo), com relação água cimento de 0,62 , 0,48 e 0,38, para as respectivas resistências, ou séries de corpos-de-prova. O cimento empregado no preparo do concreto foi o CP II F 32. A areia era de rio lavada, com massa

específica igual a $2,65 \text{ g/cm}^3$ com módulo de finura de 2,86, obtidos por meio de ensaios realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC-Rio, de acordo com a NBR 9776 e NBR 7217. O agregado graúdo era de gnaiss britado número 1, com dimensão máxima característica igual a 19,1 mm, massa específica absoluta igual a $2,62 \text{ g/cm}^3$ e massa específica aparente igual a $1,61 \text{ g/cm}^3$, também obtidas em laboratório de acordo com a NBR 7217 e NBR 9937. Os resultados da análise granulométrica e a da determinação das massas específicas dos agregados graúdo e miúdo encontram-se no Anexo A.

O concreto foi misturado mecanicamente numa betoneira com capacidade de 100 litros.

Os consumos dos materiais empregados e os valores de abatimento do tronco de cone para cada betonada são mostrados na Tabela 3.1 e Tabela 3.2, respectivamente.

Tabela 3.1 – Consumo de material por m^3 de concreto.

Material	Quantidade em kg por m^3		
	Série I	Série II	Série III
Cimento CP II F 32	322,6 kg	416,7 kg	526,3 kg
Areia	841,2 kg	756,9 kg	658,6 kg
Brita 1	998,2 kg	998,2 kg	998,2 kg
Água	148,7 l	153,8 l	159,8 l

Tabela 3.2 – Valores do abatimento do tronco de cone.

Abatimento de cone (mm)		
Série I	Série II	Série I
80	80	80

Em cada concretagem foram moldados corpos-de-prova cúbicos e corpos-de-prova cilíndricos. Os corpos-de-prova cilíndricos foram utilizados para a determinação da resistência à compressão, da resistência à tração por compressão diametral e do módulo de elasticidade do concreto. Os corpos-de-prova foram

moldados em obediência à NBR 5738 e tinham as dimensões de 100 mm × 200 mm. Após sete dias, todos os corpos-de-prova foram retirados das formas.

3.2.1

Resistência à compressão simples do concreto

Para cada série foram realizados ensaios de compressão simples em corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 100 mm × 200 mm. Esses foram realizados aos 28 dias e no dia de cada ensaio. Os corpos-de-prova foram ensaiados à compressão simples na prensa CONTENCO, com capacidade de 2400 kN, no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC-Rio, em obediência à norma NBR 5739. Os valores médios da resistência do concreto à compressão simples são mostrados na Tabela 3.3 e Tabela 3.4.

Tabela 3.3 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto no dia do ensaio de aderência CFC-concreto.

Série	Corpos-de-prova	Data do ensaio	Quantidade de corpos-de-prova	Idade (dias)	f_c médio (MPa)
I	MCLI-1	24/1/2006	2	153	26,3
	MCLI-2	31/1/2006	2	160	28,9
	MCRI-1	3/2/2006	2	155	23,8
	MCRI-2	6/2/2006	2	158	23,4
	MCRI-3	10/2/2006	2	154	24,1
	CDLI-1	7/3/2006	2	179	23,2
II	MCLII-1	22/2/2006	2	182	31,8
	MCLII-2	20/3/2006	2	208	31,7
	MCRII-1	14/3/2006	2	202	32,9
	MCRII-2	21/3/2006	2	201	29,7
	CDLII-1	21/3/2006	2	201	30,5
	CDRII-1	23/3/2006	2	195	28,2
III	MCLIII-1	24/3/2006	2	196	34,5
	MCLIII-2	7/2/2006	2	167	32,7
	MCRIII-1	8/2/2006	2	160	40,8
	MCRIII-2	9/2/2006	2	153	37,4
	CDLIII-1	22/3/2006	2	202	32,1
	CDRIII-1	23/3/2006	2	195	39,8

Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto para 28 dias.

Ensaio dos corpos-de-prova aos 28 dias	Quantidade de corpos-de-prova	f_c médio (MPa)
Série I	2	23,3
Série II	1	28,4
Série III	2	37,1

As resistências à compressão aos 28 dias foram usadas apenas para conferir a variação de resistência, pois na data dos ensaios de aderência concreto–CFC foram realizados ensaios de compressão, cujos resultados foram utilizados na análise efetuada.

3.2.2 Resistência à tração indireta do concreto

Para cada série foram realizados ensaios de tração por compressão diametral em corpos-de-prova cilíndricos de dimensões $100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$. Os corpos-de-prova foram ensaiados na prensa CONTENCO, com capacidade de 2400 kN , no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC-Rio (Figura 3.2). A resistência à tração indireta foi obtida segundo a fórmula:

$$f_{ct,sp} = \frac{2P}{\pi dh} \quad (3.1)$$

onde

P – força lida na célula de carga;

d – diâmetro do corpo-de-prova;

h – altura do corpo-de-prova.



Figura 3.2 – Ensaio à tração por compressão diametral.

Os valores médios da resistência do concreto à tração indireta são mostrados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

Série	Quantidade de corpos-de-prova	Idade (dias)	$f_{ct,sp}$ médio (MPa)
I	3	258	2,85
II	4	250	3,15
III	4	242	3,52

3.2.3 Módulo de elasticidade do concreto

Foram moldados dois corpos-de-prova cilíndricos de concreto com dimensões $100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ para cada concretagem, de acordo com a NBR 5738. Os corpos-de-prova foram ensaiados para determinação do módulo de elasticidade do concreto na prensa CONTENCO, com capacidade de 2400 kN , no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC – Rio, em obediência à NBR 8522. Para a medida das deformações específicas do concreto durante o ensaio foram utilizados dois extensômetros elétricos de resistência com comprimento de 67

mm, colados à meia altura do corpo-de-prova em posições diametralmente opostas.



Figura 3.3 – Corpos-de-prova cilíndricos de concreto com extensômetros elétricos de resistência colados à sua meia altura.

O ensaio consistiu na aplicação de carregamento crescente preestabelecido em função da resistência à compressão do concreto. Para cada carregamento tem-se uma tensão no concreto e a sua respectiva deformação específica, com a relação constitutiva dada por:

$$\sigma = E_c \varepsilon \quad (3.2)$$

sendo

σ – tensão no concreto;

E_c – módulo de elasticidade do concreto;

ε – deformação específica do concreto.

O procedimento usado para a determinação do módulo de elasticidade do concreto foi o plano de carga tipo III prescrito na NBR 8522, que corresponde à simulação de uma estrutura em seu primeiro carregamento, onde se calcula apenas o módulo de deformação secante, dado por:

$$E_{\text{sec},n} = \frac{\sigma_n - \sigma_{\text{inf}}}{\varepsilon_n - \varepsilon_0} \quad (3.3)$$

onde

$E_{\text{sec},n}$ – módulo de deformação secante;

σ_n – tensão considerada para o cálculo do módulo secante;

ε_n – deformação específica correspondente à tensão σ_n ;

n – variação dos níveis de aplicação de carga, 0,1... 0,7 ou 0,8;

ε_0 – deformação específica correspondente à tensão σ_{inf} ;

σ_{inf} – 0,5 MPa.

A NBR 8522 prescreve que somente devem ser considerados válidos os resultados de ensaios de corpos-de-prova cujas resistências f_{real} não diferem mais de 20 % da resistência prevista f_c . O módulo secante adotado, segundo a NBR 8522, corresponde a $0,3 f_{c,28}$.

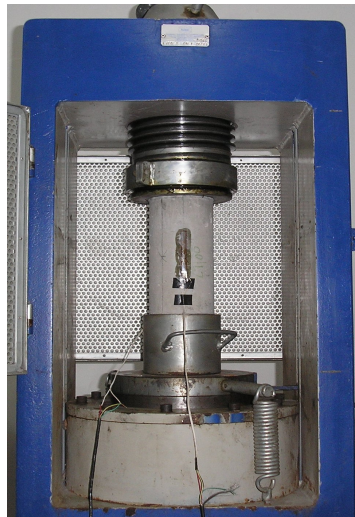


Figura 3.4 – Sistema de aplicação da força ao corpo-de-prova.

Os resultados dos ensaios para cada série estão representados nas Tabelas 3.6 a 3.8 e nos gráficos tensão x deformação específica mostrados nas Figuras 3.5 a 3.9.

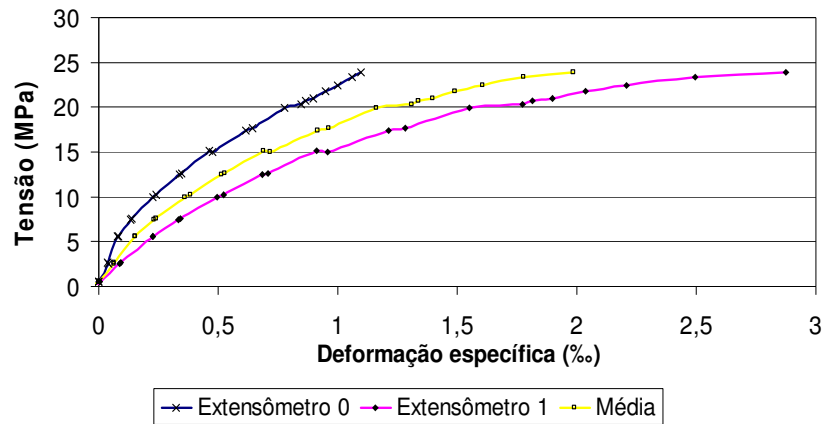


Figura 3.5 – Gráfico tensão x deformação específica do corpo-de-prova 1 da série I.

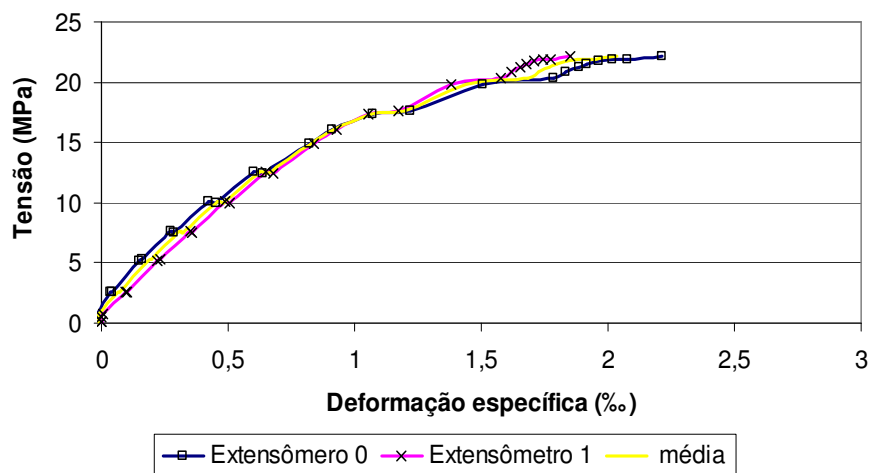


Figura 3.6 – Gráfico tensão x deformação específica do corpo-de-prova 2 da série I.

Tabela 3.6 – Resultados do ensaio do módulo de elasticidade do concreto da série I.

Corpo-de-prova	Força de Ruptura P(kN)	Tensão de Ruptura σ (MPa)	Deformação Específica na Ruptura ϵ_c (‰)	Força para $0,3 f_c$ (kN)	Tensão para $0,3 f_c$ (MPa)	Deformação Específica para $0,3 f_c$ (‰)	Módulo de Elasticidade Secante E_{cs} (GPa)
1	192,18	24,48	1,068	58,43	7,44	0,233	29,73
2	173,91	22,15	2,033	59,53	7,58	0,311	22,04

OBS: O corpo-de-prova 1 da Tabela 3.6 será desconsiderado na análise.

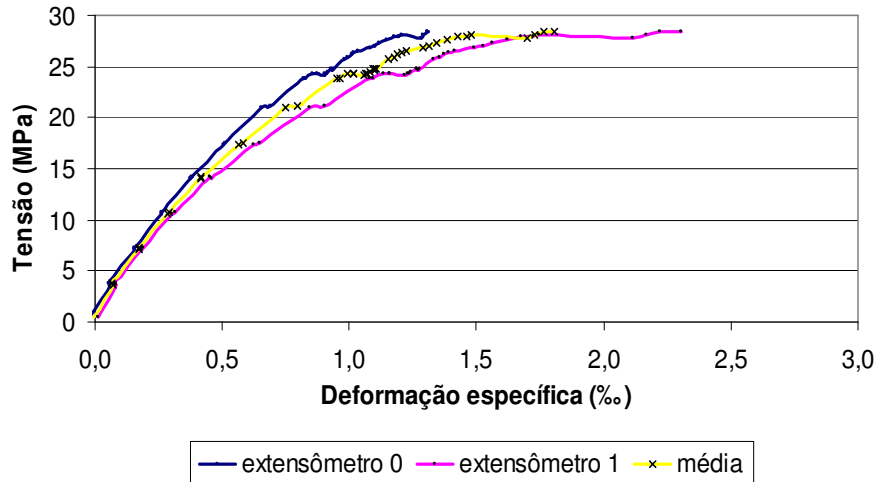


Figura 3.7 – Gráfico tensão x deformação específica do corpo-de-prova 1 da série II.

Tabela 3.7 – Resultados do ensaio do módulo de elasticidade do concreto da série II.

Corpo-de-prova	Força de Ruptura P(kN)	Tensão de Ruptura σ (MPa)	Deformação Específica na Ruptura ϵ_c (‰)	Força para $0,3 f_c$ (kN)	Tensão para $0,3 f_c$ (MPa)	Deformação Específica para $0,3 f_c$ (‰)	Módulo de Elasticidade Secante E_{cs} (GPa)
1	223,04	28,41	1,806	82,63	10,53	0,292	34,28

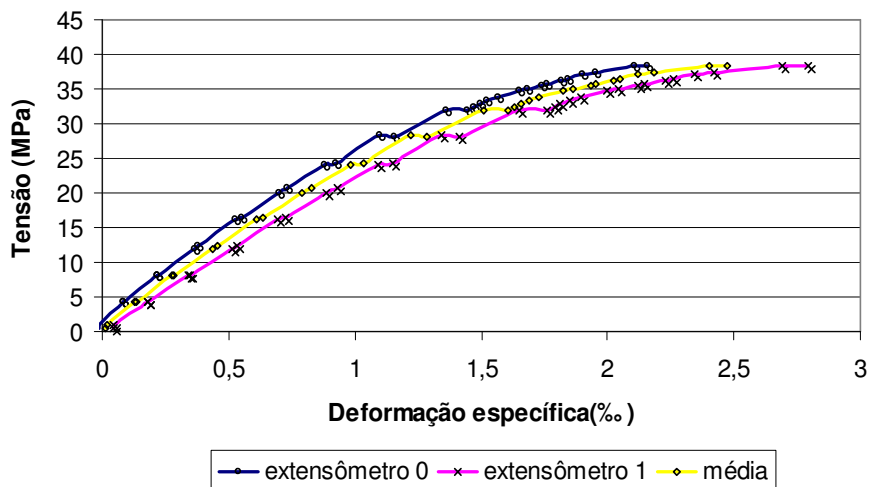


Figura 3.8 – Gráfico tensão x deformação específica do corpo-de-prova 1 da série III.

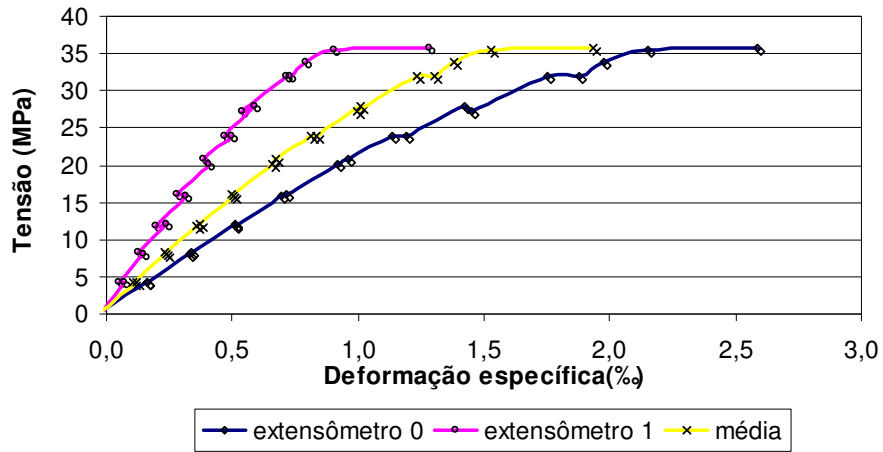


Figura 3.9 – Gráfico tensão x deformação específica do corpo-de-prova 2 da série III.

Tabela 3.8 – Resultados do ensaio do módulo de elasticidade do concreto da série III.

Corpo-de-prova	Força de Ruptura P(kN)	Tensão de Ruptura σ (MPa)	Deformação Específica na Ruptura ϵ_c (‰)	Força para $0,3 f_c$ (kN)	Tensão para $0,3 f_c$ (MPa)	Deformação Específica para $0,3 f_c$ (‰)	Módulo de Elasticidade Secante E_{cs} (GPa)
1	301,75	38,44	2,476	94,19	12,00	0,438	30,26
2	280,36	35,72	1,937	94,58	12,05	0,375	29,90
Média	291,055	37,08	2,206	94,38	12,025	0,407	30,08

A NBR 6118 (2003) prescreve para o módulo de elasticidade secante do concreto a seguinte fórmula:

$$E_{cs} = 0,85 \times 5600 \sqrt{f_c} \text{ (MPa)} \quad (3.4)$$

A Tabela 3.9 mostra uma comparação dos resultados obtidos nos ensaios realizados com os valores calculados pela equação 3.4 prescrita pela NBR 6118 (2003).

Tabela 3.9 – Valores calculados para módulo de elasticidade do concreto.

<i>Corpo-de-prova</i>	<i>Ensaio E_{cs} (GPa) aos 28 dias</i>	<i>NBR6118 (2003) E_{cs} (GPa)</i>
$f_c = 23,3MPa$	22,04	22,83
$f_c = 28,4MPa$	34,28	25,37
$f_c = 37,1MPa$	30,08	28,98

O módulo de elasticidade E_{cs} para $f_c = 28,4MPa$ foi superior ao módulo de elasticidade do concreto com $f_c = 37,1MPa$. Ressalta-se que para $f_c = 28,4MPa$ foi ensaiado apenas um corpo-de-prova.

Os resultados da Tabela 3.9 indicam que a Equação 3.4 produz em geral módulos secantes inferiores àqueles obtidos em laboratório (Equação 3.3), resultando em deformações maiores que os valores reais.

Todos os dados e os resultados obtidos nos ensaios do módulo de elasticidade encontram-se no Anexo B.

3.3. Compósito de fibra de carbono

3.3.1. Tecido de fibra de carbono

Em Araújo (2002) e Machado (2004) são ensaiadas vigas à flexão com reforço de CFC, cujas características são as mesmas dos tecidos de fibra de carbono que foram usados nesta dissertação. A técnica de aplicação desse produto está detalhada nessas dissertações.

Foram utilizados tecidos de fibra de carbono (Tec-Fiber) fornecidos pela Rheotec Aditivos de Concreto Ltda, do tipo N-300 (Figuras 3.10 e 3.11), com as seguintes características fornecidas pelo fabricante:

- Largura da faixa = 500 mm .
- Espessura = 0,165 mm .
- Área da seção transversal = 82,5 mm² .
- Deformação específica na ruptura = 1,55 % .
- Resistência à tração = 3.550 MPa .

- Módulo de elasticidade = 235 GPa .
- Gramatura (folha) = 300 g/m^2 .



Figura 3.10 – Tecido de fibra de carbono, tipo N-300.



Figura 3.11 – Verso do tecido de fibra de carbono tipo N-300 com destaque para a costura.

Para a colagem do CFC aos cubos de concreto foram utilizadas 18 tiras de $1.720\text{ mm} \times 75\text{ mm}$, enquanto que para o reforço na lateral oposta não instrumentada do bloco móvel foram utilizadas 18 tiras de $180\text{ mm} \times 180\text{ mm}$ para garantir que não ocorresse a ruptura no trecho não instrumentado.

3.3.2.

Ensaio de resistência à tração do compósito de fibra de carbono

Foram ensaiados à tração seis corpos-de-prova de tecido unidirecional de fibra de carbono revestidos com resina epóxi, com 15mm de largura, 250mm de comprimento e abas de alumínio de 20mm de largura por 50mm de comprimento. Cada corpo-de-prova foi instrumentado com um extensômetro elétrico de resistência em seu centro e as deformações específicas no CFC foram lidas por meio do indicador manual de deformações VISHAY.



Figura 3.12 – Corpos-de-prova CFC revestidos com resina epóxi.

O ensaio de resistência à tração do CFC foi realizado em obediência à norma ASTM D 3039 / D 3039M – *Standard Test Method for Tensile Properties of Matrix Composite Material*, que especifica os procedimentos para a determinação da resistência à tração e do módulo de elasticidade de materiais compostos de fibras reforçados com matriz polimérica (ou resina epóxi).

Essa norma estabelece dimensões mínimas para os corpos-de-prova, de modo que estes tenham um número suficiente de fibras em sua seção transversal que represente as propriedades do material. Essas dimensões são mostradas na Figura 3.13 e Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Dimensões dos corpos-de-prova adotadas para ensaio de tração em materiais compósitos de fibras de carbono; adaptada da ASTM D3039/3039M.

<i>Orientação das fibras</i>	<i>Largura (mm)</i>	<i>Comp. (mm)</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Comp. aba (mm)</i>	<i>Espessura aba (mm)</i>	<i>Ângulo aba (°)</i>
<i>0° unidirecional</i>	15	250	1,0	56	1,5	7 ou 90
<i>90° unidirecional</i>	25	175	2,0	25	1,5	90
<i>Fios descontínuos</i>	25	250	2,5	-	-	-

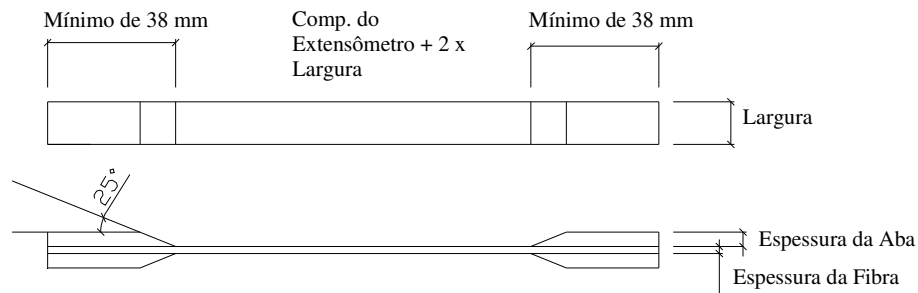


Figura 3.13 – Dimensões dos corpos-de-prova para ensaio de tração; adaptada da norma ASTM D 3039/3039M.

Os ensaios foram realizados na máquina EMIC modelo DL 10.000 com capacidade de 100 *kN*, do Laboratório de ensaios Mecânicos do Departamento de Materiais do IME – Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro.

O cálculo da resistência à tração do CFC foi efetuado de acordo com a norma ASTM D 3039 / D 3039M, seguindo-se:

$$f_{tf} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_f} \quad (3.5)$$

onde

f_{tf} – resistência à tração (*MPa*);

$F_{m\acute{a}x}$ – força máxima aplicada (*N*);

A_f – área da seção transversal do corpo-de-prova (largura 15 *mm* x 0,165 *mm* de espessura)

O módulo de elasticidade é igual ao coeficiente angular do trecho linear calculado a partir do gráfico tensão x deformação específica do CFC (Figura 3.14). Os resultados dos ensaios constam na Tabela 3.11 e a Figura 3.15 mostra o esquema de ensaio e os corpos-de-prova ensaiados.

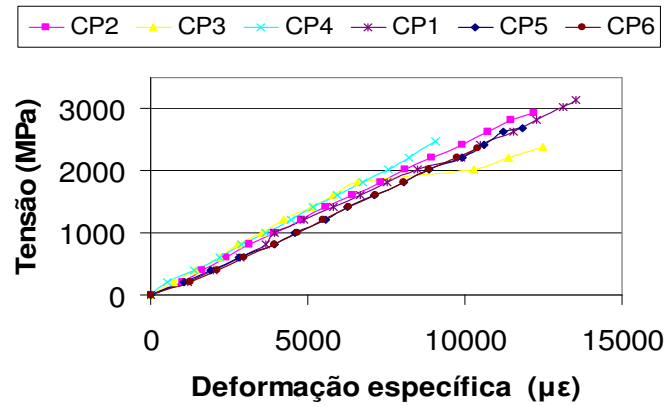


Figura 3.14 – Gráfico tensão x deformação específica dos corpos-de-prova de CFC.

Tabela 3.11 – Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos-de-prova de CFC.

Corpos-de-prova	Força $F_{máx}$ (kN)	Resistência f_f (MPa)	Módulo de Elasticidade E_f (GPa)
1	7,76	3.136	232,1
2	7,41	2.993	247,4
3	6,06	2.448	279,3
4	6,24	2.523	272,7
5	6,76	2.729	224,9
6	5,99	2.418	225,6
Média	6,70	2.708	247,0



Figura 3.15 – Ensaio dos corpos-de-prova de compósitos de fibra de carbono com placas de alumínio nas extremidades.

Todos os dados, resultados e gráficos obtidos nos ensaios de resistência à tração do CFC encontram-se no Anexo C.

3.3.3. Materiais necessários para a aplicação do tecido de fibra de carbono ao substrato de concreto

Obedecendo-se ao sistema recomendado pelo fabricante, a aplicação do tecido de fibra de carbono foi feita em quatro etapas. Em cada etapa faz-se necessário o uso de um produto específico que permite a correta aplicação do reforço. Os quatro produtos são:

- a) argamassa de reparo,
- b) resina de imprimação,
- c) argamassa epoxídica,
- d) resina epoxídica.

A argamassa de reparo e a argamassa epoxídica são dispensáveis dependendo das condições da superfície. Essas se tornam necessárias quando existem significativas irregularidades na superfície. A argamassa de reparo preenche as possíveis anormalidades da superfície e a argamassa epoxídica promove a regularização final da superfície.

Para a colagem do CFC no substrato de concreto dos corpos-de-prova desse trabalho não houve a necessidade da utilização desses produtos, já que as superfícies se encontravam regulares. A aplicação foi feita utilizando somente a resina de imprimação e a resina epoxídica.

3.3.3.1. Resina de imprimação

Após a preparação da superfície dos corpos-de-prova, feita manualmente com lixas, as superfícies foram limpas com algodão e álcool. Em seguida foi aplicada a Tec-Poxi PR da Rheotec Aditivos de Concreto Ltda (Figura 3.16). A resina de imprimação é responsável pela aderência perfeita da camada de resina epoxídica ao substrato de concreto. Seu uso é obrigatório neste sistema de aplicação. Para 100 gramas da mistura dos componentes A + B, a 22° C tem-se as seguintes propriedades:

- Componente A: transparente.
- Componente B: transparente amarelado.
- Mistura A+B: incolor.
- Proporção dos componentes: 71% de componente A e 29 % de componente B (em peso).
- Viscosidade: 65 a 75 s (CF 4).
- Massa específica: $1,050 \text{ g} / \text{cm}^3$.
- Sólido por volume: mínimo de 98%.
- Tempo de vida útil da mistura: mínimo de 40 min.
- Secagem ao toque: 4 horas máximo.
- Secagem ao manuseio: 6 horas máximo.
- Secagem completa: 10 horas máximo.
- Cura total: 7 dias.

- Alongamento por ruptura: $0,218 \text{ mm} / \text{ mm}$.
- Resistência à tração: $20,0 \pm 2,0 \text{ MPa}$ após 24 horas.
- Rugosidade do substrato: 60 a 80 microns.
- Tempo de aplicação: a 10° C máximo de 2 horas, 20° C máximo de 1 hora e a 35° C máximo de 15 minutos.



Figura 3.16 – Resina de imprimação: Componente A e componente B.

3.3.3.2. Resina epoxídica

Seguido da resina de imprimação, ou seja, após 4 a 6 horas de sua aplicação, foi aplicada a Tec-Poxi da Rheotec (Figura 3.17), a resina epoxídica responsável pela perfeita aderência do CFC ao substrato de concreto. Essa resina é um componente fundamental deste sistema de reforço.

Para 100 gramas da mistura dos componentes A + B, temperatura de 22° C , são prescritas as seguintes propriedades dos materiais:

- Componente A: azul.
- Componente B: levemente amarelado.
- Mistura A+B: azul transparente.
- Proporção dos componentes: 66,7% de componente A e 33,3 % de componente B (em peso).
- Viscosidade: 70 a 80 s (CF 4).
- Massa específica: $1,055 \text{ g} / \text{ cm}^3$.
- Sólido por volume: mínimo de 98 %.

- Tempo de vida útil da mistura: mínimo de 40 min.
- Secagem ao toque: 4 horas máximo.
- Secagem ao manuseio: 6 horas máximo.
- Cura total: 7 dias.
- Resistência de aderência: 1,5 *MPa* .
- Alongamento por ruptura = 0,300 *mm/mm* .
- Resistência à tração: $55 \pm 3,0$ *MPa* após 24 horas.
- Resistência à compressão: mínima de 60 *MPa* .
- Tempo de aplicação: a 10° C máximo de 2 horas, a 20° C máximo de 1 hora e a 35° C máximo de 20 minutos.



Figura 3.17 – Resina epóxi: componente A e componente B.

3.4. Confecção dos corpos-de-prova

3.4.1. Formas

As formas dos corpos-de-prova foram feitas em madeira e forradas com um plástico. Essas formas são compostas de cinco tábuas que foram devidamente pregadas, como mostra a Figura 3.18.



Figura 3.18 – Formas de madeira para a confecção dos corpos-de-prova de concreto.

3.4.2. Corpos-de-prova de concreto

Os corpos-de-prova são compostos por dois blocos iguais (móvel e fixo) de concreto, com dimensões de $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$, cujas resistências à compressão aos 28 dias foram de $23,0\text{ MPa}$, $28,4\text{ MPa}$ e $37,08\text{ MPa}$ (Figura 3.19).

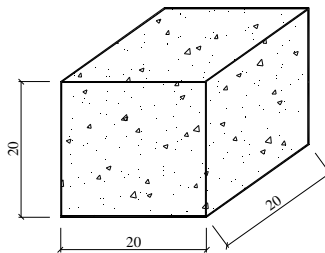


Figura 3.19 – Corpos-de-prova de concreto (medidas em cm).

3.4.3 Concretagem

As concretagens dos corpos-de-prova foram realizadas no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio (LEM/DEC).

O concreto foi lançado manualmente e o adensamento foi feito por meio de vibrador de imersão com diâmetro de $25,4\text{ mm}$, durante e imediatamente após a colocação do concreto nas formas. A cura foi realizada de forma usual, sem uso de qualquer processo especial.

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

3.5. Colagem do tecido de fibra de carbono

O CFC foi colado aos blocos dos corpos-de-prova por meio do posicionamento dos blocos em cantoneiras fixadas num pórtico para que estes ficassem alinhados, de modo que os eixos das tiras do CFC ficassem no mesmo plano (Figuras 3.20 e 3.21).

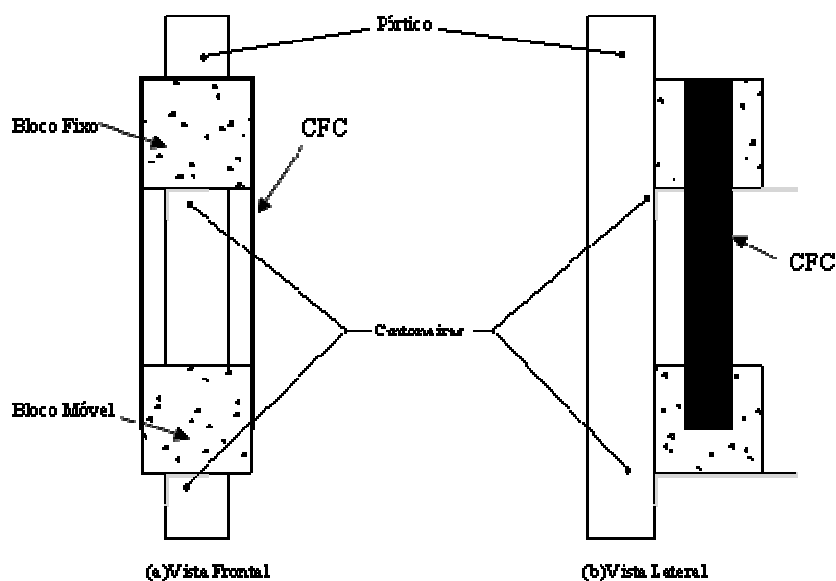


Figura 3.20 – Posicionamento dos corpos-de-prova para a colagem do CFC.

A aplicação do CFC foi feita em várias etapas, de acordo com as instruções do fabricante. O CFC foi previamente cortado com estilete, nas dimensões pré-determinadas, e os componentes do *primer* e da resina foram homogeneizados em separado, suas massas foram aferidas em balança digital, de acordo com as proporções exatas, e misturadas manualmente. Em seguida, preparou-se a superfície do substrato de concreto com lixa, para receber o CFC. Nesta etapa a superfície do substrato foi limpa com álcool, deixando-a livre de qualquer resíduo ou poeira.

Com a superfície pronta para receber o CFC, realizou-se a imprimação do substrato. O *primer* é um epóxi que permite um alto poder de impregnação devido à sua baixa viscosidade. O objetivo da aplicação do *primer* é vedar os poros do concreto, promovendo a perfeita aderência entre a superfície de concreto e o CFC.



Figura 3.21 – Corpos-de-prova após a aplicação do primer.

Cerca de três horas após a aplicação do *primer*, tempo necessário para se chegar ao ponto de viscosidade ideal da resina de imprimação, aplicou-se a primeira camada de resina epóxi ao concreto e, simultaneamente, uma camada de resina no CFC, finalizando-se a formação do compósito. Fez-se então a aplicação do CFC ao corpo-de-prova, de modo a se retirar todo o ar aprisionado. Após a aplicação do CFC foi necessário esperar seis dias, tempo esse indicado pelo fabricante do material, para que o ensaio pudesse ser realizado.



Figura 3.22 – Aplicação do tecido no corpo-de-prova.

Após seis dias de cura da resina, os extensômetros elétricos de resistência foram colados, os corpos-de-prova foram acoplados à estrutura de ensaio e os LVDT foram instalados.

3.6. Instrumentação dos corpos-de-prova

O comportamento dos corpos-de-prova foi acompanhado durante os ensaios por medições das deformações específicas no CFC e no concreto por meio de extensômetros elétricos de resistência, por meio de medições do deslocamento do corpos-de-prova móvel com LVDT, sendo realizadas leituras das forças aplicadas por intermédio de uma célula de carga com capacidade para 100 *kN*.

Os corpos-de-prova foram instrumentados com cinco extensômetros elétricos de resistência na face lateral da fibra, espaçados de 27,5 *mm* e dois no concreto, com espaçamento de 47,3 *mm*. O comprimento de ancoragem foi de 120 *mm* (Figura 3.23).

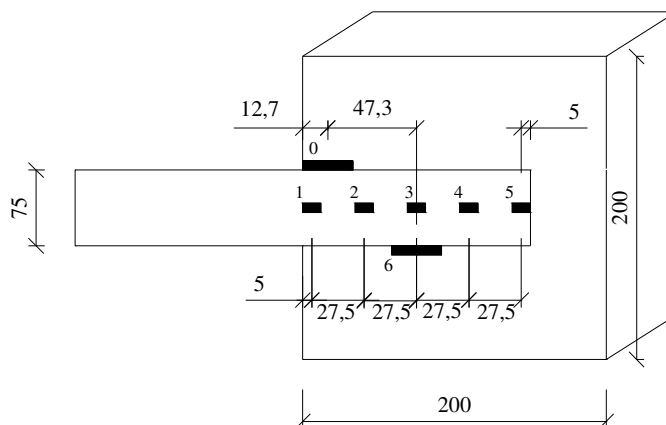


Figura 3.23 – Posicionamento dos extensômetros elétricos no CFC e no concreto (medidas em mm).

Os extensômetros elétricos colados ao tecido foram numerados de 1 a 5, a partir da extremidade esquerda do comprimento de ancoragem do CFC. Os extensômetros do concreto tiveram os números 0 e 6 (Figura 3.23). A lateral instrumentada do CFC tinha quatro trechos onde foram calculadas as tensões de

aderência e as deformações específicas médias no CFC. Todos os corpos-de-prova tiveram o mesmo posicionamento dos LVDT (Figura 3.24).

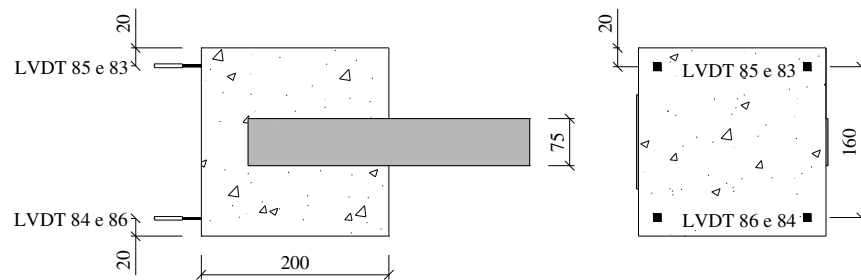


Figura 3.24 – Posicionamento dos LVDT nos corpos-de-prova.

3.7. Equipamentos e corpos-de-prova

O aparato empregado nos ensaios foi formado de cantoneiras metálicas e roldanas, com a característica de permitir o deslocamento do bloco móvel (Figuras 3.25 a 3.28) ao longo de um eixo de mesma direção da força aplicada no centro dos blocos de concreto. O bloco fixo serviu de apoio para o macaco hidráulico de 120 *kN* e para a célula de carga 100 *kN*. A força aplicada pelo macaco foi transferida para as tiras de CFC por meio dos blocos de concreto.

Uma chapa de aço foi colada ao bloco móvel para que a força se distribuisse de modo uniforme e entre essa chapa e o macaco foi colocada uma rótula de aço.

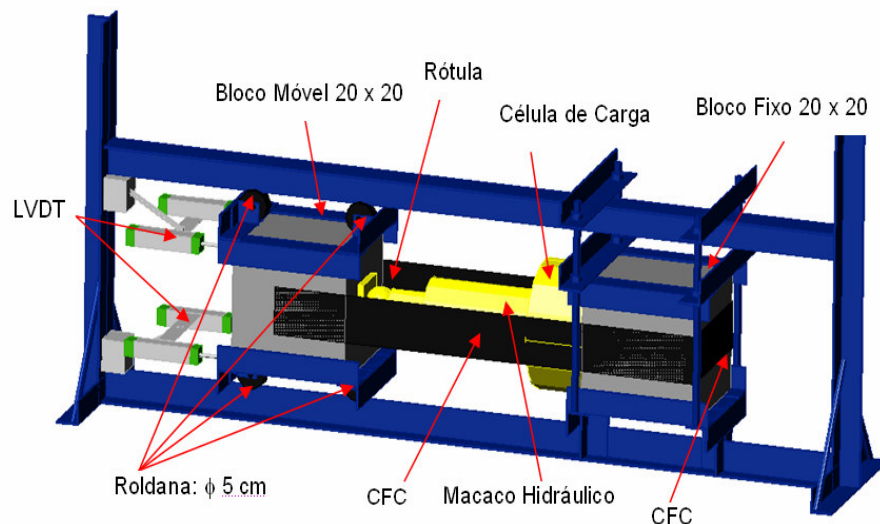


Figura 3.25 – Desenho esquemático e equipamentos do ensaio de tração-compressão.

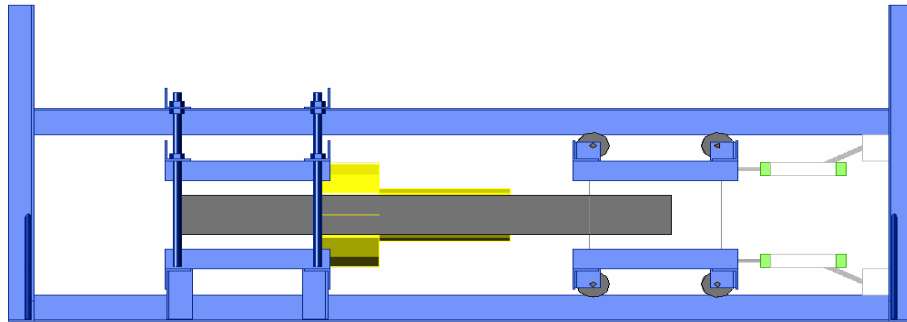


Figura 3.26 – Vista frontal do ensaio de tração-compressão.

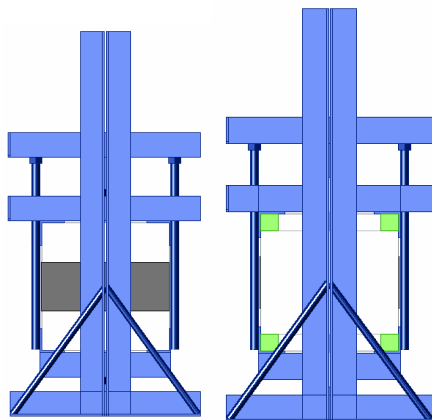


Figura 3.27 – Vistas laterais do ensaio de tração-compressão.

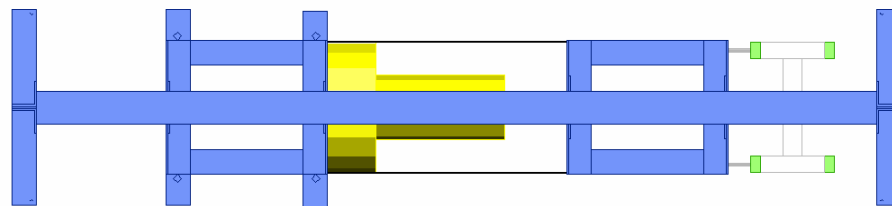
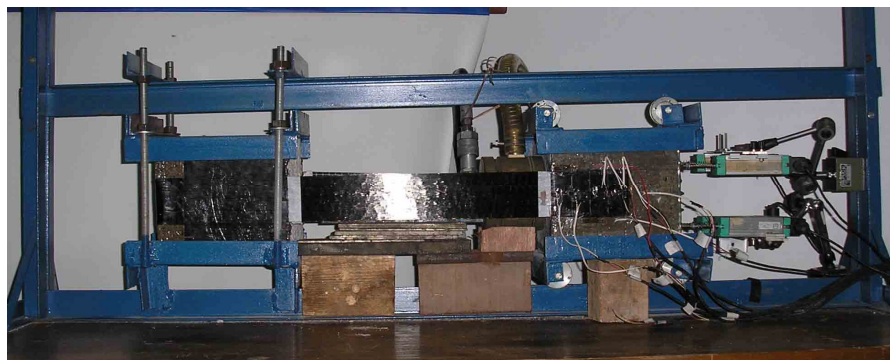


Figura 3.28 – Vista superior do ensaio de tração-compressão.

A Figura 3.29 mostra um corpo-de-prova pronto para ser ensaiado.



(a) Vista Frontal

Figura 3.29 – Esquema do ensaio de aderência com tração-compressão.

3.8. Observações

Foram realizados inicialmente sete ensaios no Laboratório de Estruturas e Matérias (LEM) da PUC-Rio, com os corpos-de-prova e equipamentos descritos anteriormente, usando-se um CFC fornecido pela Rheotec, cujas características mecânicas eram diferentes do CFC descrito anteriormente.

Os ensaios de aderência mostraram-se inconsistentes e não serão considerados neste estudo. Apenas para documentar esses ensaios, são transcritos os procedimentos e resultados obtidos.

Foram ensaiados à tração três corpos-de-prova desse CFC com 15mm de largura, 250mm de comprimento e abas de alumínio de 20mm de largura por 50mm de comprimento. Os ensaios foram realizados na máquina EMIC modelo DL 10.000 com capacidade de 100 kN, no Laboratório de ensaios Mecânicos do Departamento de Materiais do IME – Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro. A Tabela 3.12 mostra os resultados desses ensaios.

Tabela 3.12 – Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos-de-prova de CFC (material com características inadequadas).

<i>Corpos-de-prova</i>	<i>Força $F_{máx}$ (kN)</i>	<i>Resistência f_f (MPa)</i>
1	6,40	2.585,86
2	5,57	2.250,51
3	5,12	2.068,69
Média	5,70	2.301,68

Esse material apresentou uma resistência à tração 35% inferior ao valor fornecido pelo fabricante. Na maior parte dos ensaios de aderência a fibra rompeu-se antes da ruptura da aderência. Esse CFC se mostrou frágil após a colagem, pois com o próprio manuseio dos corpos-de-prova as fibras se mostravam quebradiças. O material CFC tinha fibras de pequeno comprimento, e os resultados dos ensaios mostraram que o mesmo não seria adequado para o estudo da aderência.



Figura 3.30 – CFC inadequado para os ensaios de aderência, com destaque para as aberturas da malha e sentido das fibras.

Os resultados obtidos são mostrados de forma sumária na Tabela 3.13. Ressalta-se que estes resultados não serão analisados nesta pesquisa, devido à baixa qualidade do CFC.

Tabela 3.13 – Forças e modos de ruptura.

<i>Corpos-de-Prova</i>	F_u (kN)	<i>Largura do CFC (mm)</i>	<i>Resistência à Compressão do Concreto (MPa)*</i>	<i>Modos de Ruptura</i>
MCLI-1	13,29	75	24,9	Ruptura do CFC no bloco ancorado seguido de arrancamento do substrato de concreto
MCLI-2	13,85	75	30,0	Arrancamento do substrato de concreto
MCLI-3	9,60	62	25,4	Ruptura do CFC no comprimento descolado
MCLII-1	11,69	75	32,3	Arrancamento do substrato de concreto
MCLII-2	13,37	75	33,6	Ruptura do CFC no comprimento descolado
MCLII-3	6,38	63	30,1	Ruptura do CFC no comprimento descolado
MCLIII-1	11,39	50	37,5	Ruptura do CFC no bloco ancorado seguido de arrancamento do substrato de concreto

* Obtida no dia do ensaio.

Nos corpos de prova MCLI-3 e MCLII-3 a largura que deveria ser de 75mm ficou em 62mm e 63mm respectivamente, pois na colagem o adesivo

escoou do bloco superior, atingindo o CFC protegido, tornando as fibras do mesmo extremamente quebradiças ao manuseio (Figura 3.31).

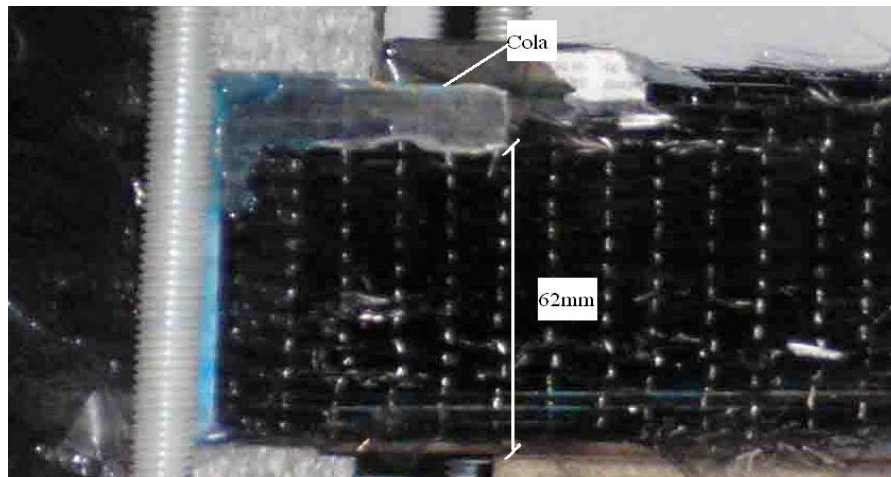


Figura 3.31 – Detalhe da largura do CFC após o manuseio do corpo-de-prova MCLI-3.

A Figura 3.32 mostra um exemplo da ruptura do tecido no comprimento descolado.

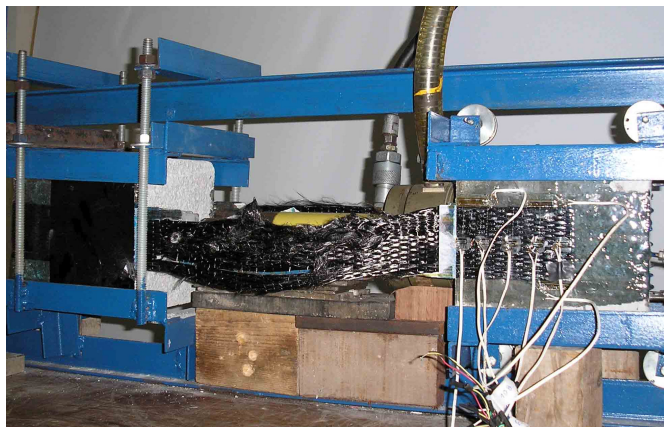


Figura 3.32 – Ruptura do tecido no comprimento descolado do corpo-de-prova MCLII-2.

Conclui-se que esse material de baixa qualidade não é adequado para as aplicações práticas e com ele não foi possível avançar no objetivo desse trabalho, o estudo da aderência CFC-concreto.

4

Apresentação dos Resultados e Análises

4.1.

Notas iniciais

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios descritos no capítulo 3 e são calculados diversos parâmetros mecânicos referentes à aderência concreto-CFC.

Constam no Anexo D os diagramas de carga *vs.* deformação específica do CFC para todos os extensômetros e carga *vs.* deslocamento do bloco móvel.

4.2.

Forças últimas e modos de ruptura

A Tabela 4.1 e a Figura 4.1 mostram as forças e os modos de ruptura dos corpos-de-prova, onde F_u é a força de ruptura atuante no lado instrumentado do CFC (metade do valor medido pela célula de carga). F_u (MPa)

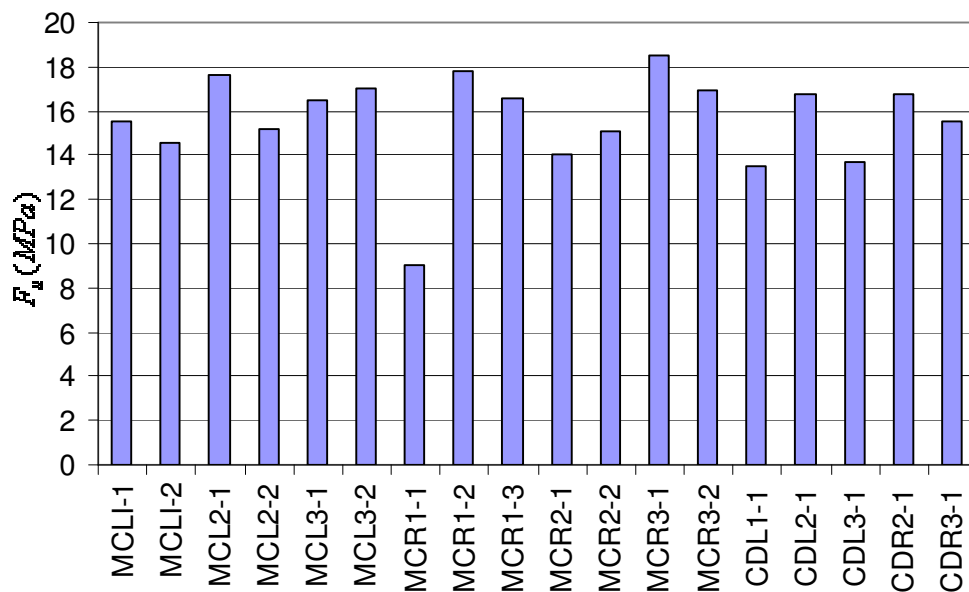


Figura 4.1 – Forças de ruptura dos corpos-de-prova.

Tabela 4.1 – Forças e modos de ruptura.

Grupos	Corpo-de-prova	Resistência à compressão do concreto (MPa)*	F_u (kN)	Modos de ruptura
Grupo I	MCLI-1	26,3	15,56	Arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.2)
	MCLI-2	28,9	14,57	Descolamento do tecido com arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.3)
	MCLII-1	31,8	17,65	Descolamento do tecido com arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.4)
	MCLII-2	31,7	15,20	Arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.5)
	MCLIII-1	34,5	16,53	Descolamento do tecido com arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.6)
	MCLIII-2	32,7	17,06	Descolamento do tecido com arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.7)
Grupo II	MCRI-1	23,8	9,07	Ruptura no tecido de CFC (Figura 4.8)
	MCRI-2	23,3	17,78	Arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.9)
	MCRI-3	24,1	16,60	Arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.10)
	MCRII-1	32,9	14,06	Descolamento seguido de separação das fibras do tecido de CFC (Figura 4.11)
	MCRII-2	29,7	15,07	Arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.12)
	MCRIII-1	40,8	18,51	Descolamento do tecido com arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.13)
	MCRIII-2	37,4	16,94	Descolamento seguido de separação das fibras do tecido de CFC (Figura 4.14)
Grupo III	CDLI-1	23,2	13,53	Arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.15)
	CDLII-1	30,5	16,78	Arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.16)
	CDLIII-1	32,1	13,65	Arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.17)
Grupo VI	CDRII-1	28,2	16,73	Descolamento seguido de separação das fibras do tecido de CFC (Figura 4.18)
	CDRIII-1	39,8	15,50	Descolamento seguido de separação das fibras do tecido de CFC (Figura 4.19)

* Obtida no dia do ensaio.

O corpo-de-prova MCRI-1 foi desconsiderado, pois durante o ensaio o CFC se rompeu no trecho situado entre blocos.

Os demais resultados não apresentaram grande variação e tiveram um valor médio para força de ruptura de 15,98 *kN*.

As forças de ruptura dos corpos-de-prova com diferentes resistências não apresentaram nenhuma correlação, ou seja, o aumento da resistência do concreto no intervalo estudado não necessariamente acarretou o aumento da força última.

As Figuras 4.2 a 4.19 mostram os modos de ruptura dos corpos-de-prova.

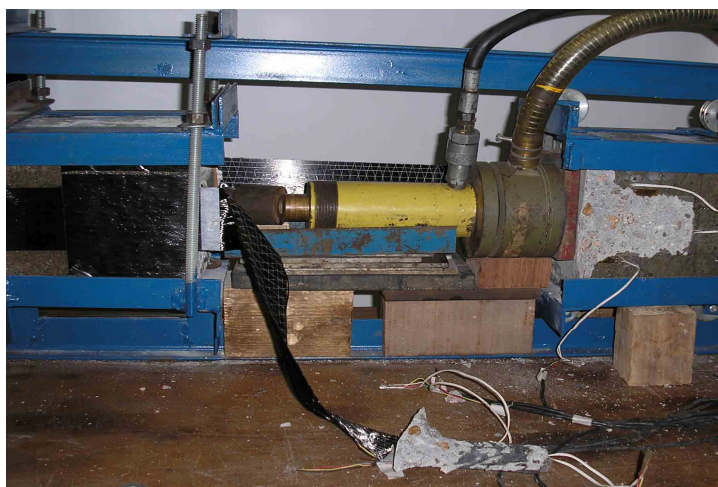


Figura 4.2 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCLI-1.

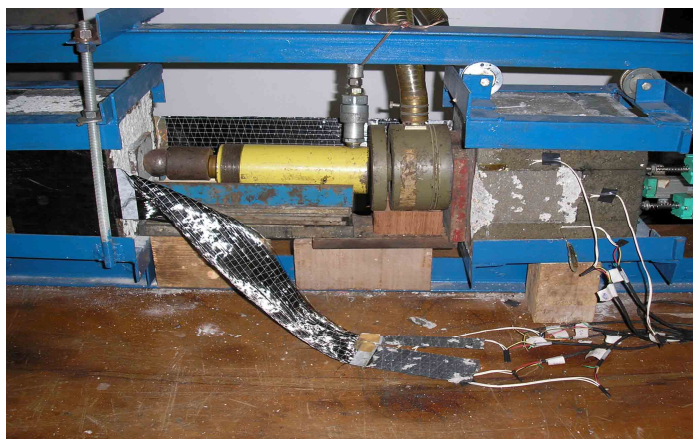


Figura 4.3 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCLI-2.

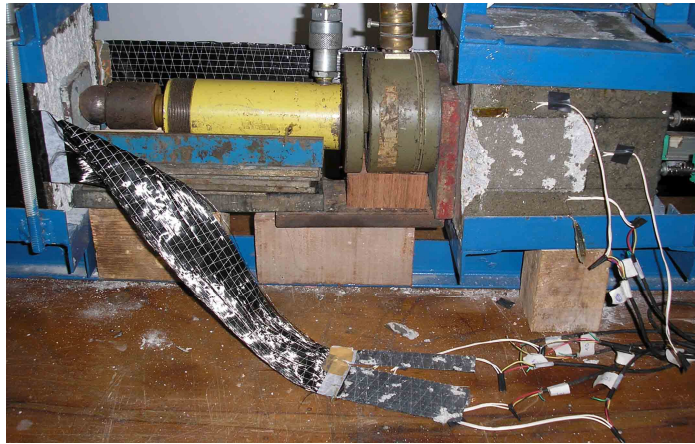


Figura 4.4 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCLII-1.

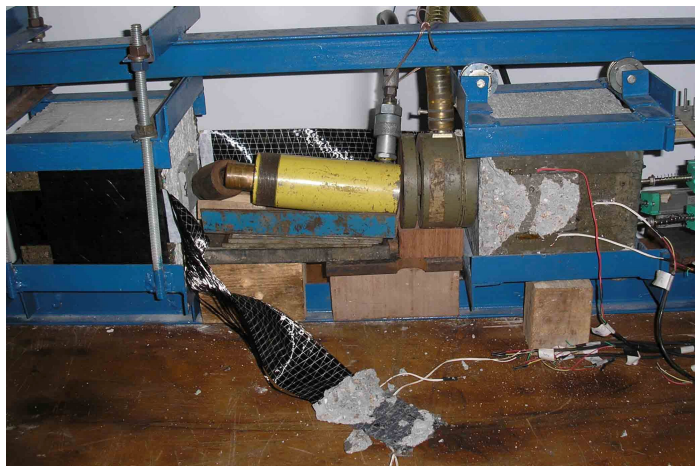


Figura 4.5 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCLII-2.



Figura 4.6 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCLIII-1.



Figura 4.7 – Ruptura por descolamento do tecido com fissuras no bloco de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCLIII-2.



Figura 4.8 – Ruptura no tecido de CFC ao longo do comprimento descolado do corpo-de-prova MCRI-1 (corpo-de-prova descartado).



Figura 4.9 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCRI-2.

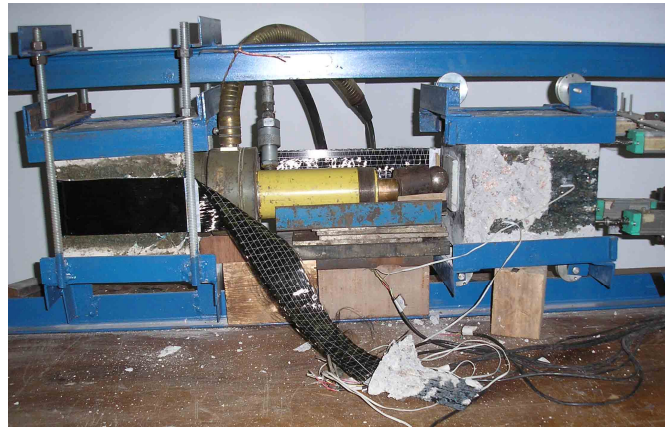


Figura 4.10 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCRI-3.

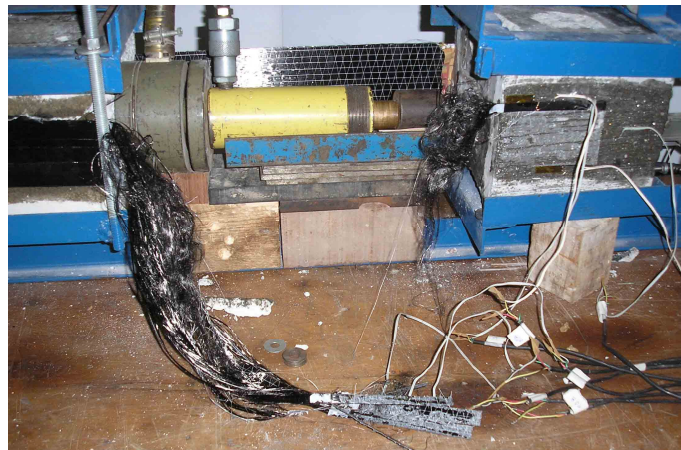


Figura 4.11 – Ruptura por descolamento seguido de separação das fibras do tecido de CFC do corpo-de-prova MCRII-1.

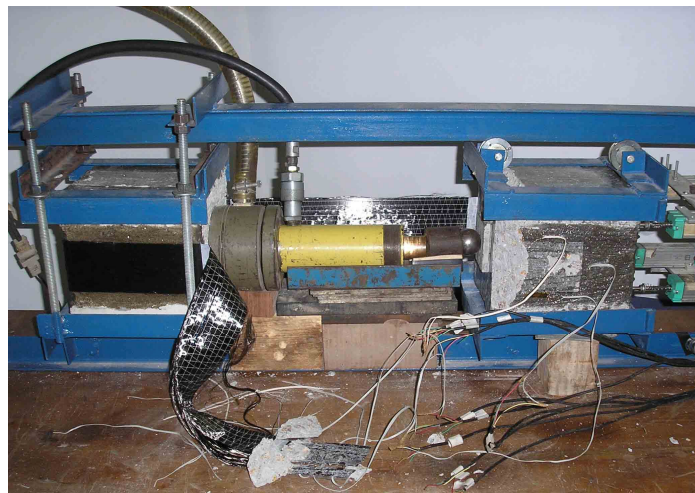


Figura 4.12 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCRII-2.

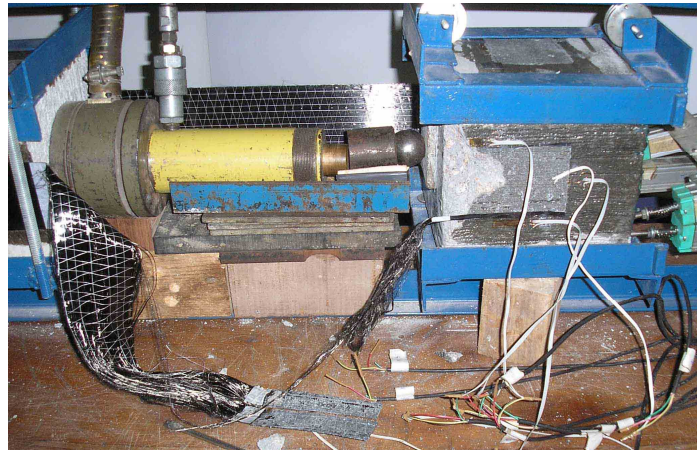


Figura 4.13 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCRIII-1.



Figura 4.14 – Ruptura por descolamento seguido de separação das fibras do tecido de CFC do corpo-de-prova MCRIII-2.

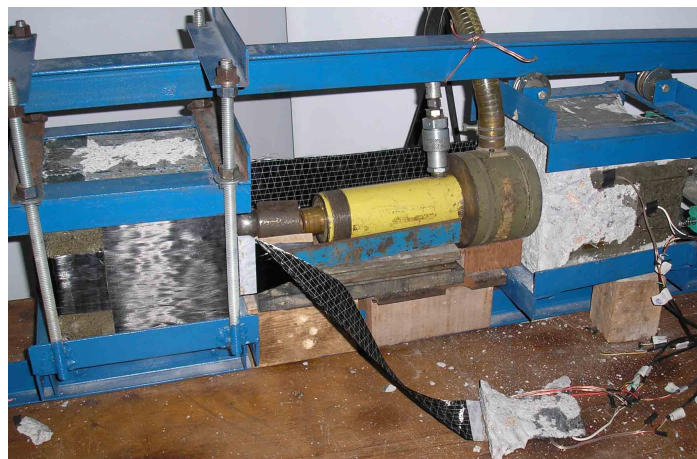


Figura 4.15 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova CDLI-1.

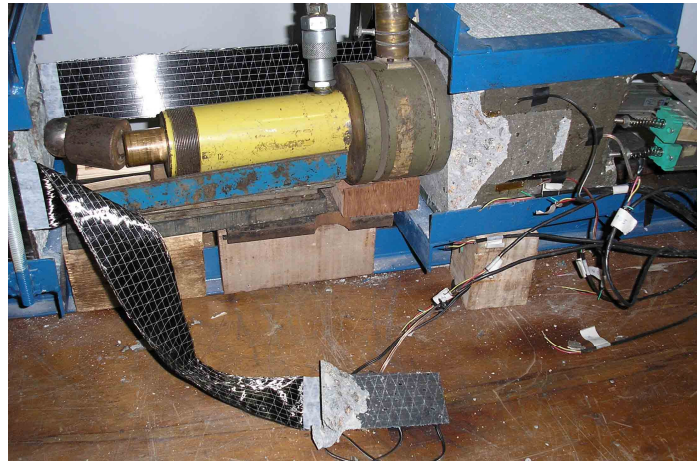


Figura 4.16 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova CDLII-1.

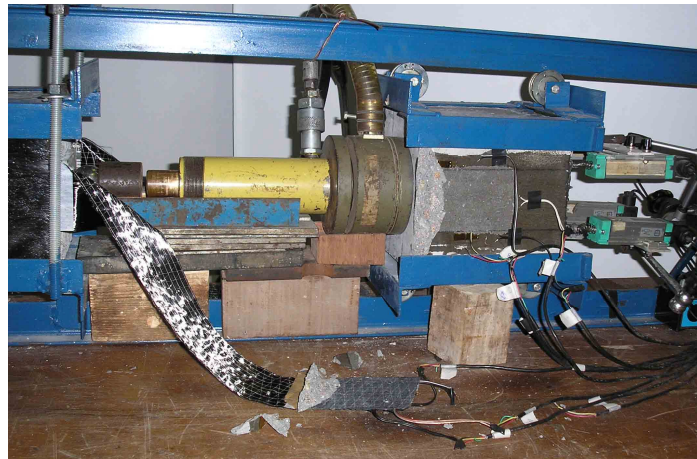


Figura 4.17 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova CDLIII-1.

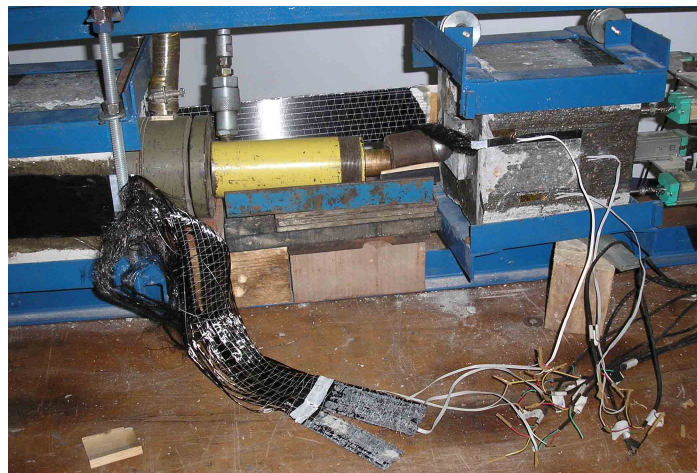


Figura 4.18 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova CDRII-1.



Figura 4.19 – Ruptura por descolamento seguido de separação das fibras do tecido de CFC do corpo-de-prova CDRIII-1.

4.3. Deformações específicas ao longo do comprimento de ancoragem

4.3.1. Deformações específicas ao longo do comprimento de ancoragem para carregamento monôtonico crescente

Neste item são analisadas as deformações específicas ao longo do comprimento de ancoragem do CFC dos corpos-de-prova com carregamento Monôtonico Crescente para os diversos estágios de carregamentos, considerando-se apenas a força atuante na face instrumentada, ou seja, metade do valor medido pela célula de carga (figuras 4.20 a 4.32).

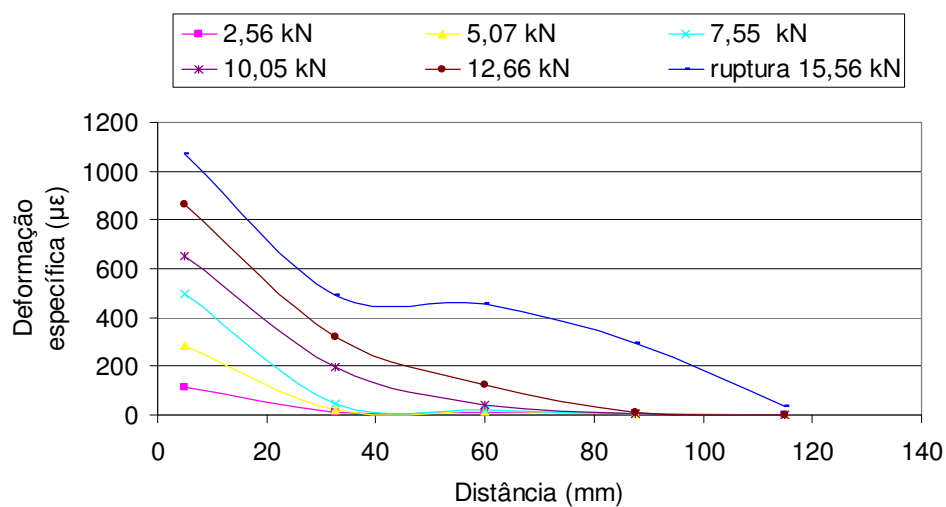


Figura 4.20 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLI-1.

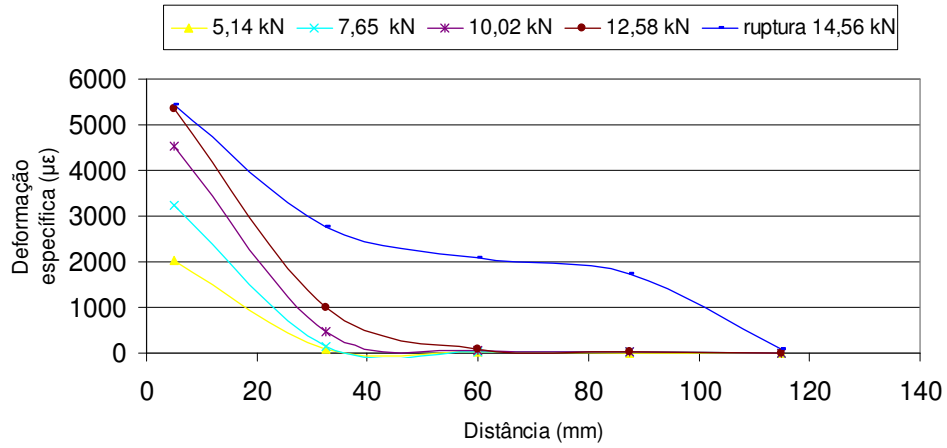


Figura 4.21 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLI-2.

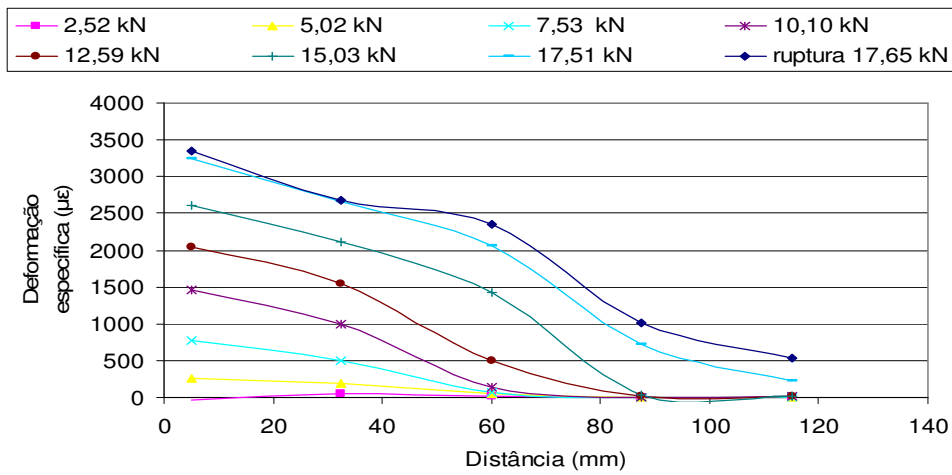


Figura 4.22 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLII-1.

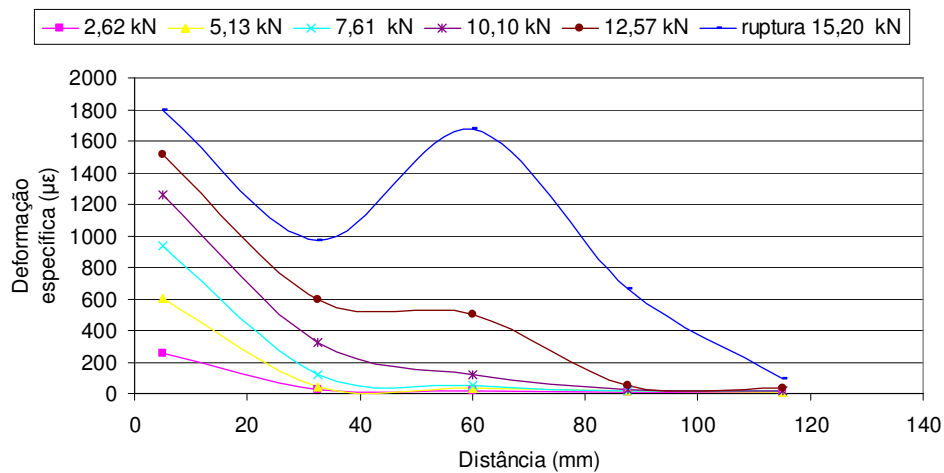


Figura 4.23 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLII-2.

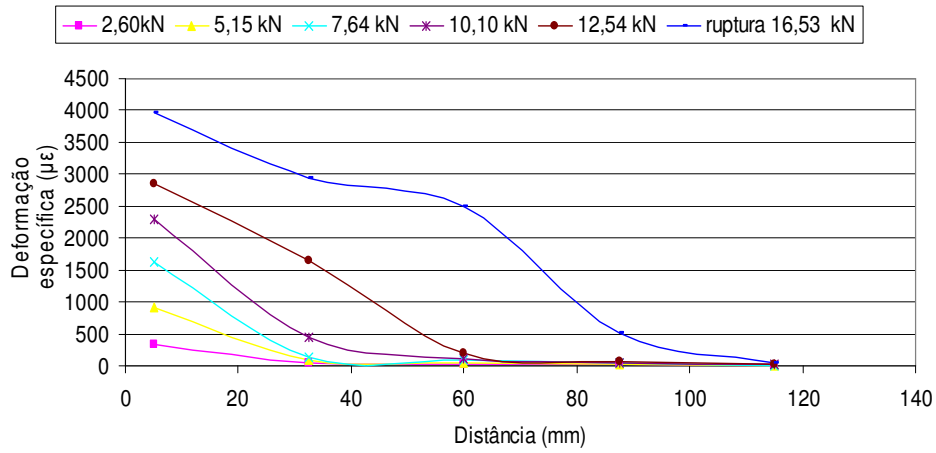


Figura 4.24 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLIII-1.

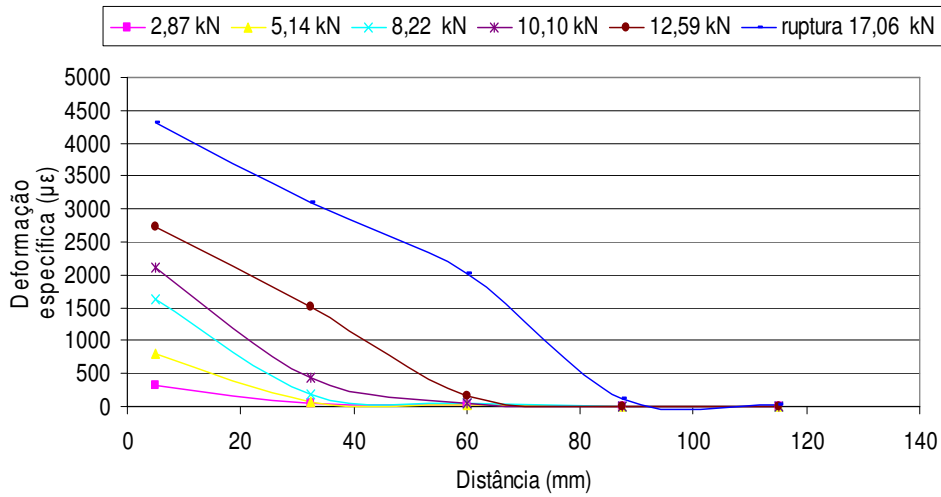


Figura 4.25 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLIII-2.

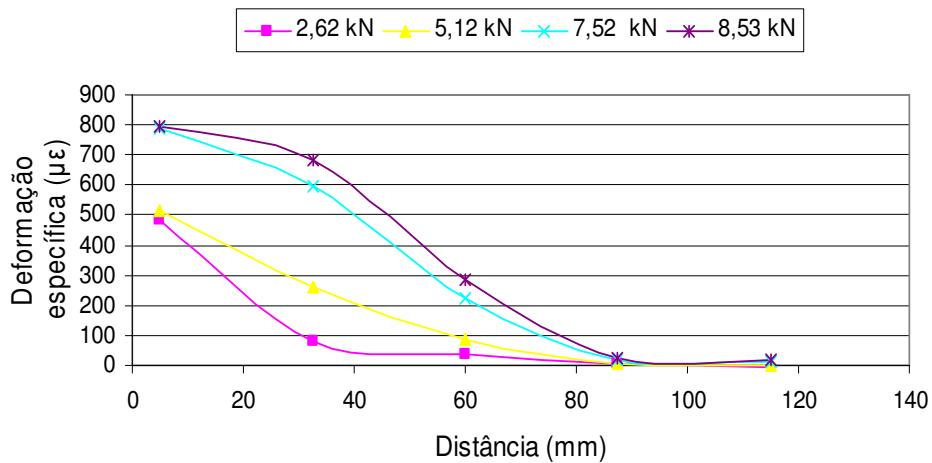


Figura 4.26 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-1 (corpo-de-prova descartado).

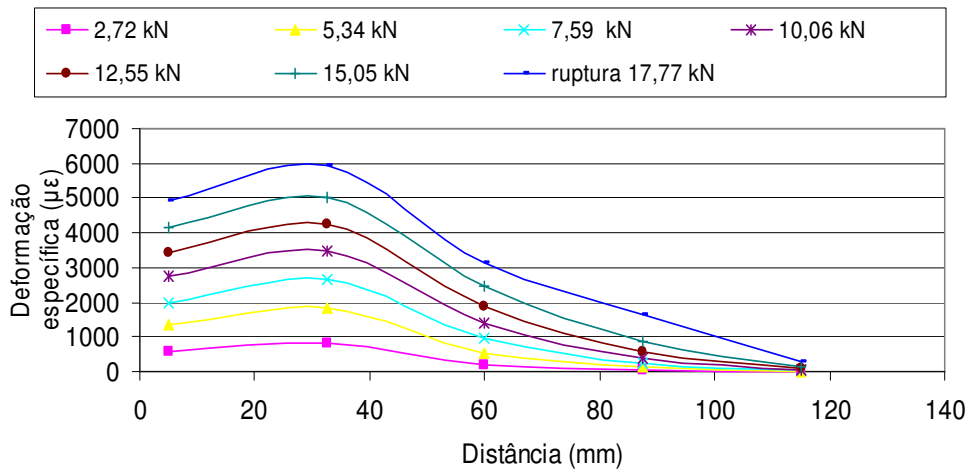


Figura 4.27 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-2.

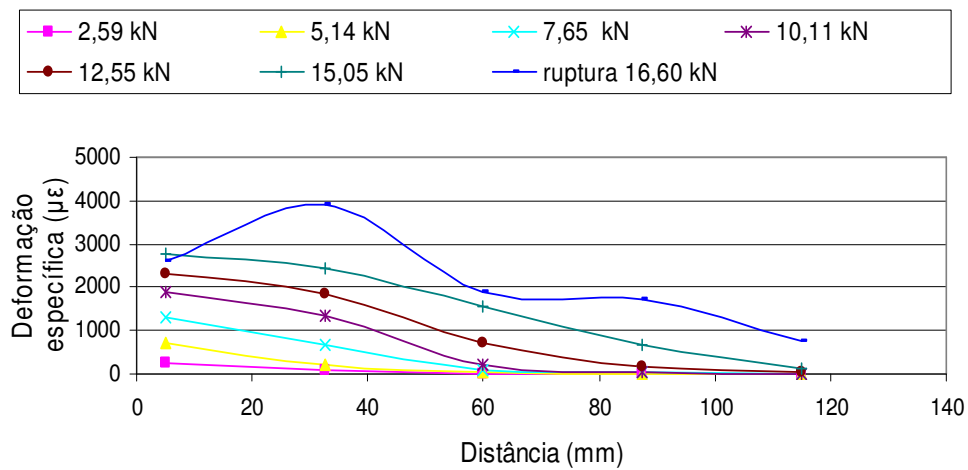


Figura 4.28 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-3.

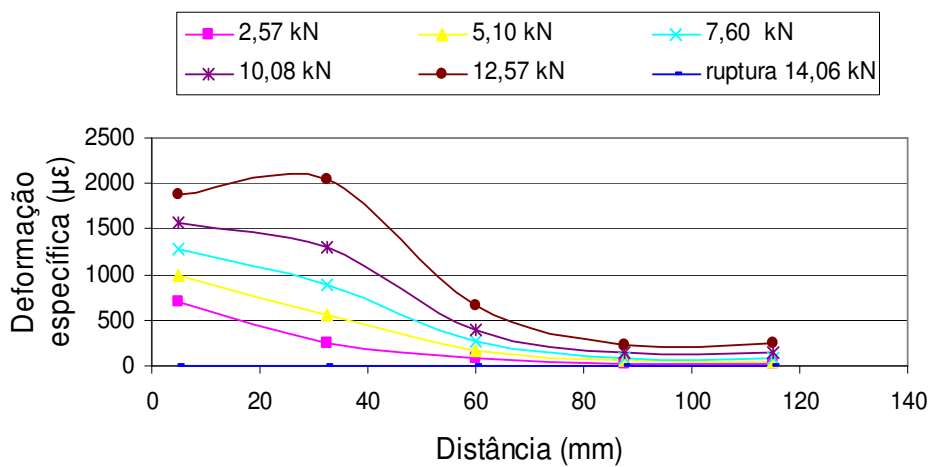


Figura 4.29 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCR II-1.

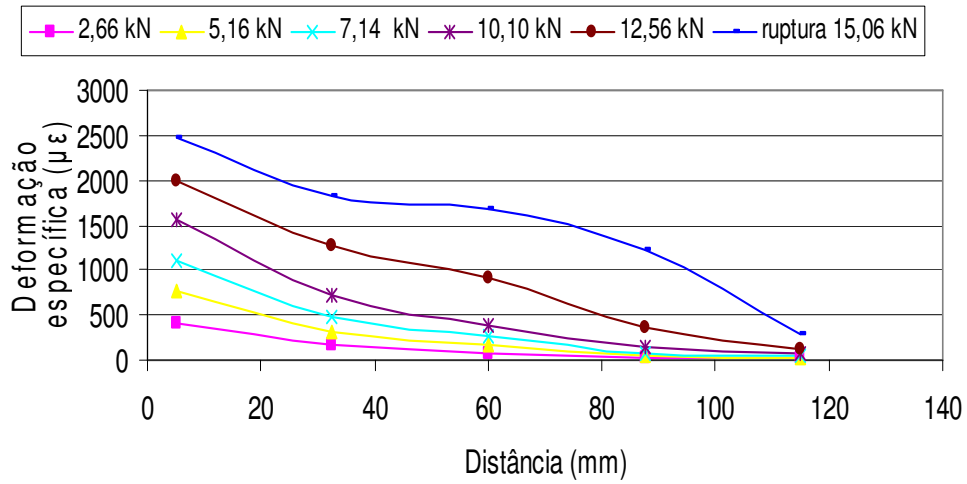


Figura 4.30 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRII-2.

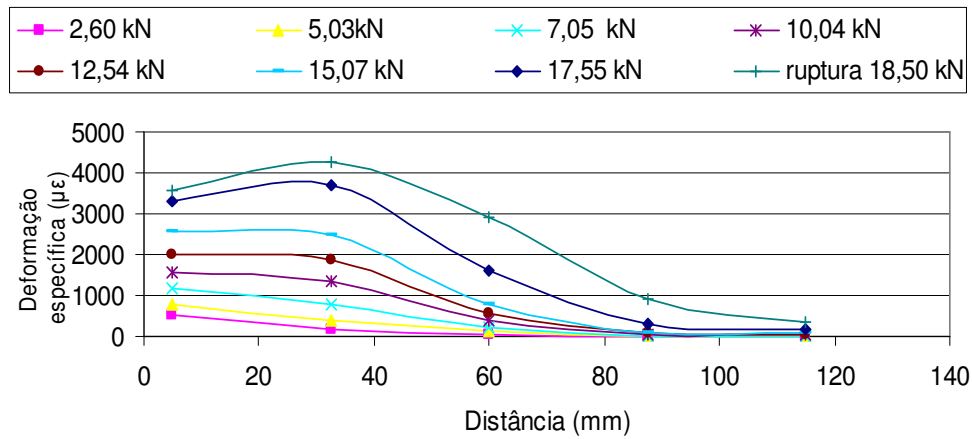


Figura 4.31 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRIII-1.

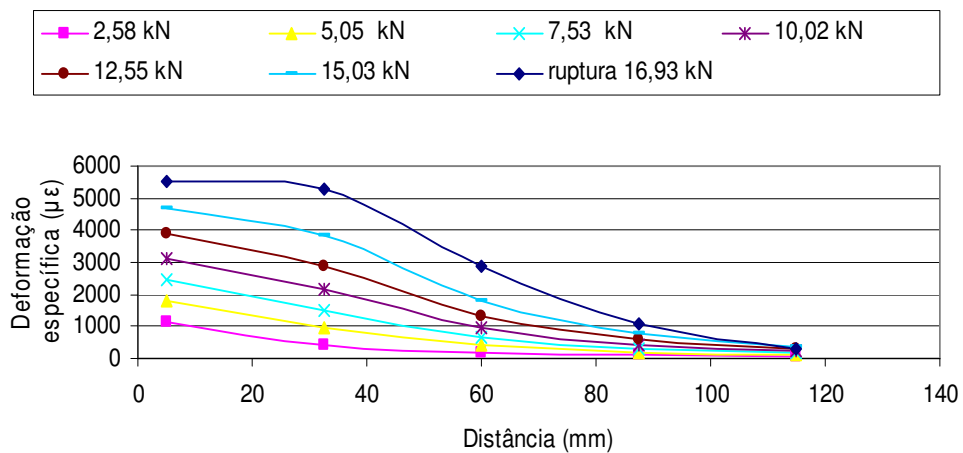


Figura 4.32 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRIII-2.

Com os gráficos das Figuras 4.20 a 4.32 verifica-se que:

- para carregamentos não próximos da ruptura os gráficos de deformação específica vs. distância mostraram um decréscimo aproximadamente exponencial para a deformação específica em relação à distância. Com o acréscimo do carregamento tendem a ocorrer rupturas localizadas entre o CFC e o concreto, que são identificadas por mudanças na concavidade das curvas de deformação específica vs. distância. Na maioria dos casos essas rupturas ocorreram entre as distâncias $x = 32,5 \text{ mm}$ e $x = 60 \text{ mm}$.
- observa-se que em alguns casos as rupturas localizadas ocorreram a partir de valores inferiores a 60% da força de ruptura (Figuras 4.22, 4.29 e 4.31). Por vezes essas rupturas ocorreram para uma força de cerca de 60 a 80% da força de ruptura.
- na Figura 4.27 percebe-se a mudança de forma da curva na distância $x = 32,5 \text{ mm}$, que se manifesta já no primeiro carregamento ($2,72 \text{ kN}$ que é cerca de 15% da força de ruptura). Isso parece indicar alguma deficiência na colagem do CFC.

4.3.2. Deformações específicas ao longo do comprimento de ancoragem para o carregamento em ciclos de carga e descarga

Neste item são analisadas as deformações específicas ao longo do comprimento de ancoragem do CFC dos corpos-de-prova para o carregamento em ciclos de carga e descarga para os primeiros estágios de carregamento (Figuras 4.33 a 4.37). Cada estágio de carga foi obtido após a descarga do estágio de carga anterior.

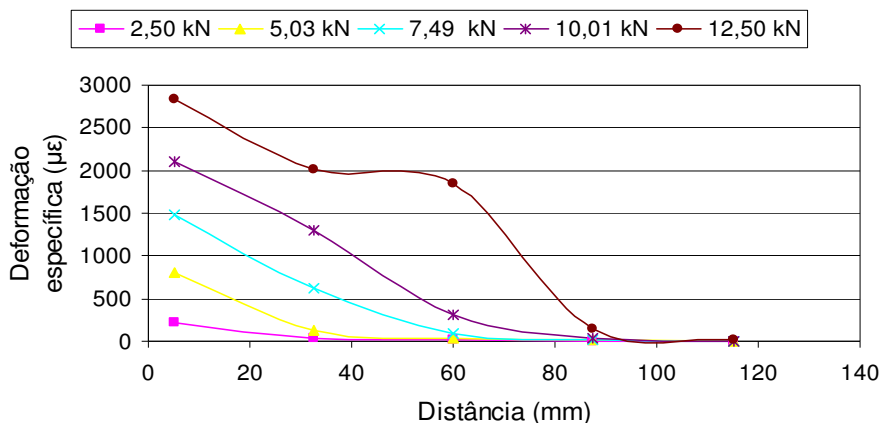


Figura 4.33 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDLI-1.

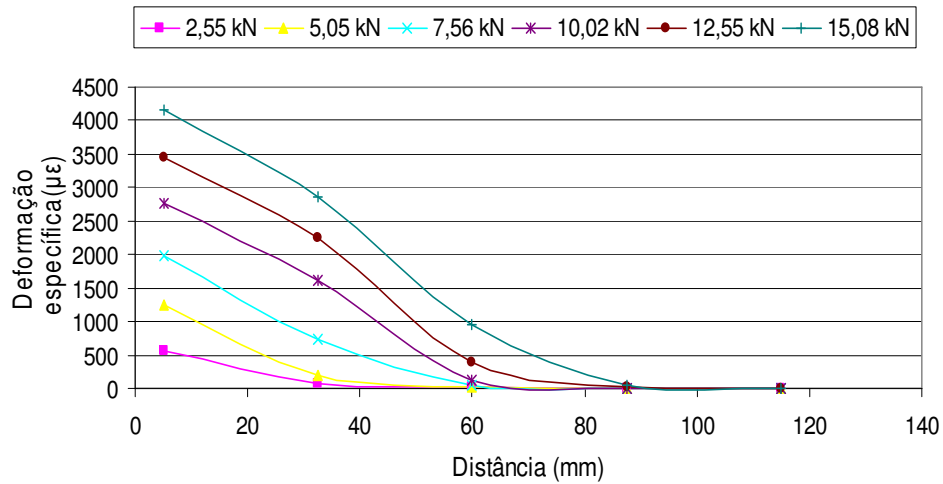


Figura 4.34 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDLII-1.

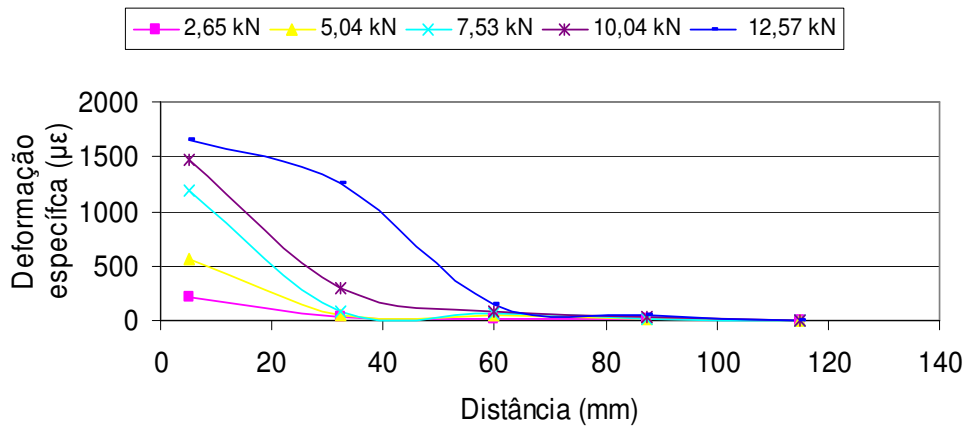


Figura 4.35 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDLIII-1.

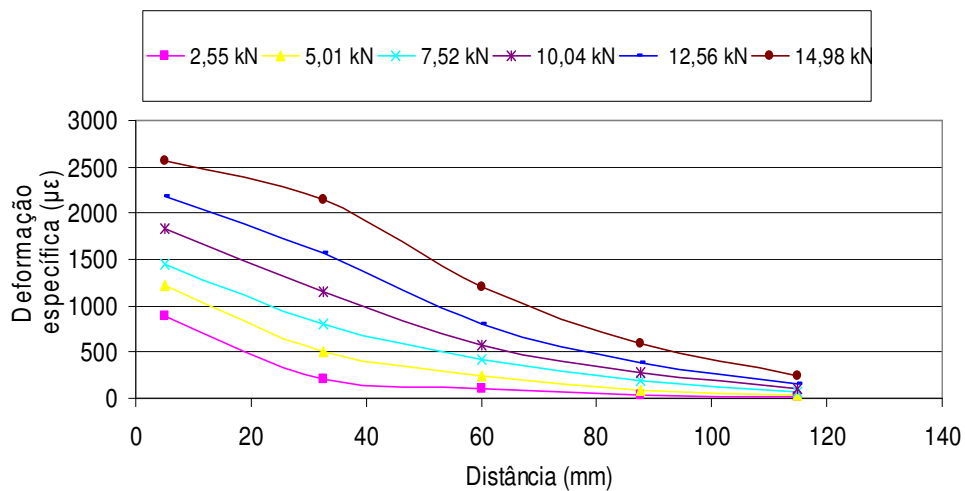


Figura 4.36 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDRII-1.

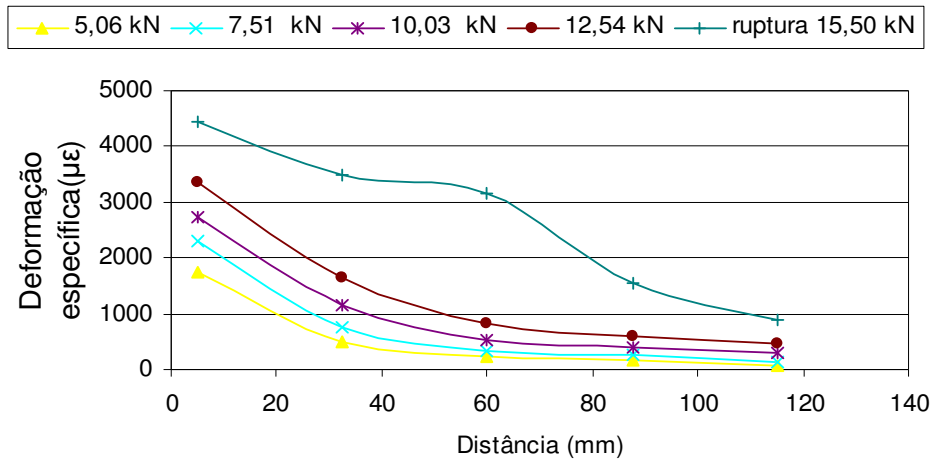


Figura 4.37 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDRIII-1.

O comportamento das curvas deformação específica vs. distância é praticamente idêntico ao carregamento monótonico crescente.

As deformações específicas foram maiores nos dois primeiros EER colados na extremidade carregada do comprimento de ancoragem (correspondente aos extensômetros 1 e 2). Os dois últimos EER (correspondentes aos extensômetros 4 e 5) apresentaram valores baixos para as deformações específicas, confirmando a proposição do comprimento efetivo de 120 mm.

4.4.

Tensões de aderência e deformações específicas no CFC

As tensões de aderência foram calculadas baseando-se na lei de Hooke, expressas em função das deformações específicas lidas nos EER colados ao tecido de CFC ε_f :

$$\tau_b = \frac{(\varepsilon_{f,i} - \varepsilon_{f,i+1})t_f E_f}{l_0} \quad (4.1)$$

onde

τ_b – tensão de aderência no ponto médio do trecho $i, i+1$;

$\varepsilon_{f,i} - \varepsilon_{f,i+1}$ – deformação específica do tecido de CFC na seção i e na seção $i+1$, respectivamente, considerando-se a seqüência 1,2,3,4 e 5 dos EER;

t_f – espessura do CFC;

E_f – módulo de elasticidade do CFC;

l_0 – distância entre os pontos onde são medidas das deformações específicas.

O valor da deformação específica média no CFC é dado por:

$$\varepsilon_b = \frac{\varepsilon_{f,i} + \varepsilon_{f,i+1}}{2} \quad (4.2)$$

As Figuras 4.38 a 4.50 mostram as curvas tensão de aderência vs. deformação específica do CFC para cada corpo-de-prova dos ensaios com carregamento monotônico crescente, para os trechos 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, que correspondem ao intervalo entre os respectivos extensômetros de 1 a 5.

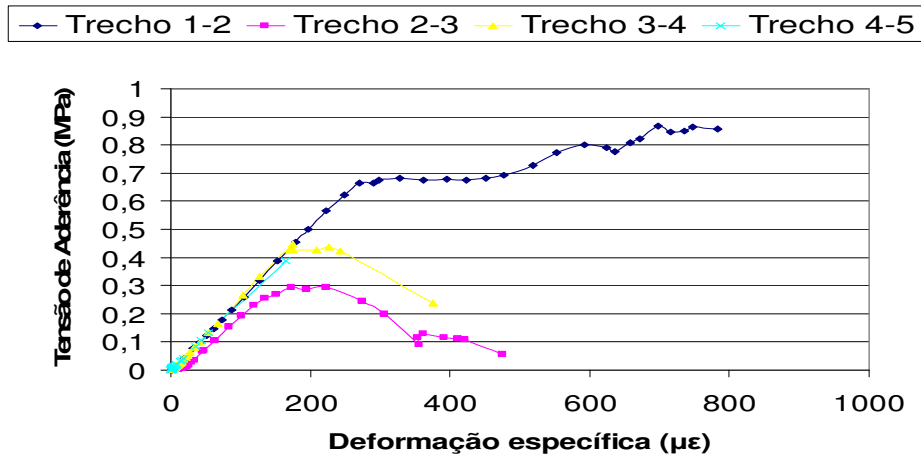


Figura 4.38 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCLI-1.

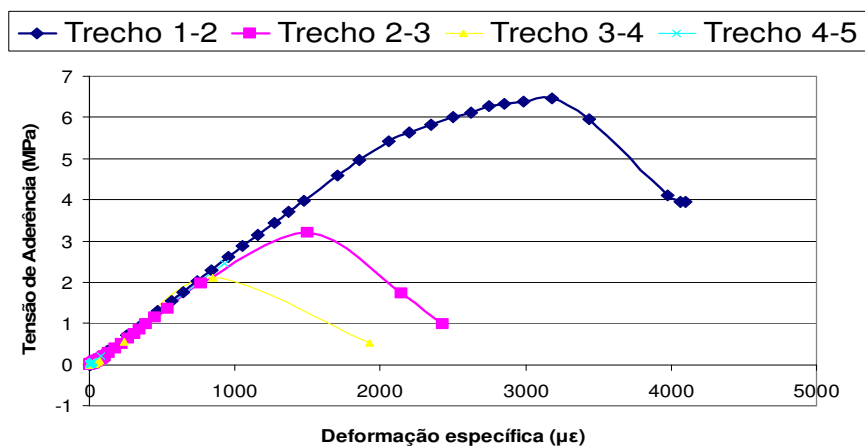


Figura 4.39 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCLI-2.

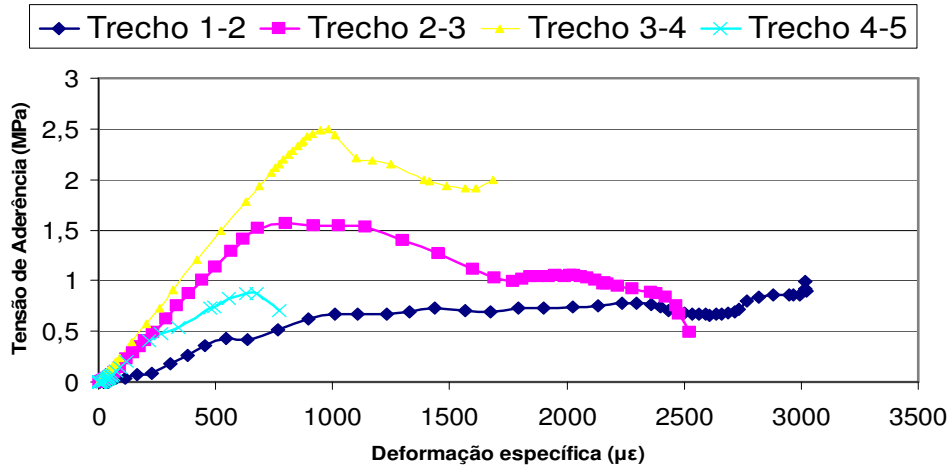


Figura 4.40 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCLII-1.

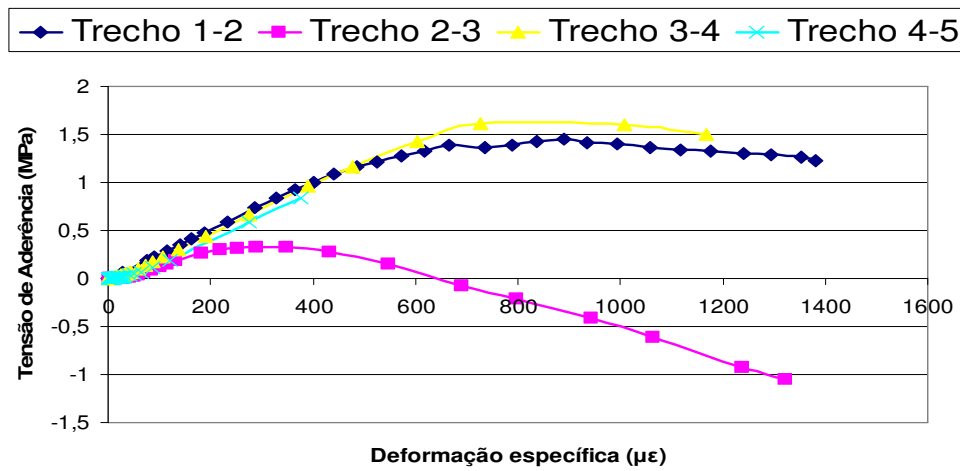


Figura 4.41 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCLII-2.

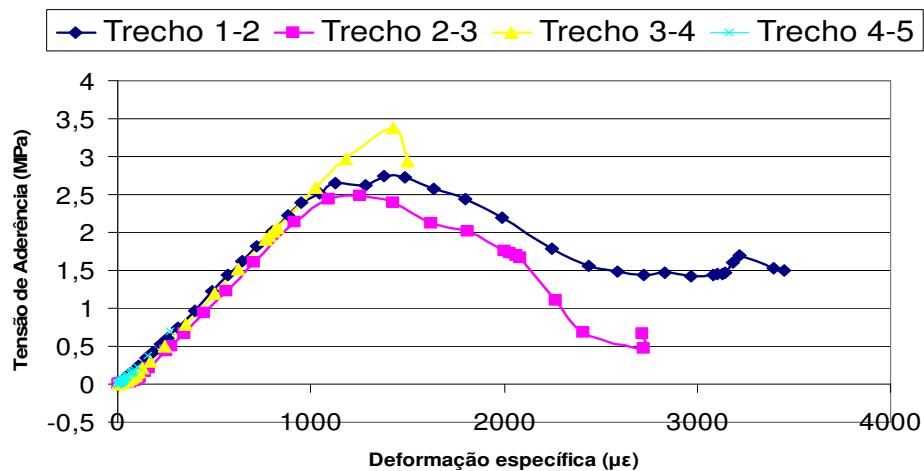


Figura 4.42 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCLIII-1.

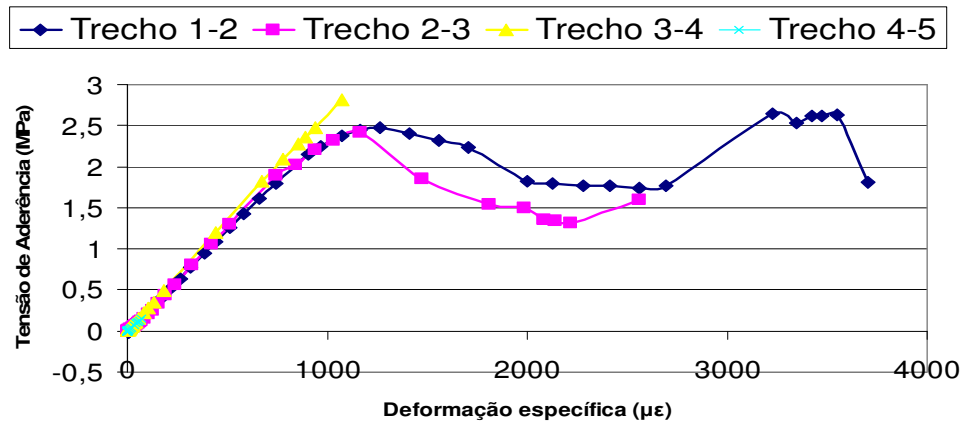


Figura 4.43 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCLIII-2.

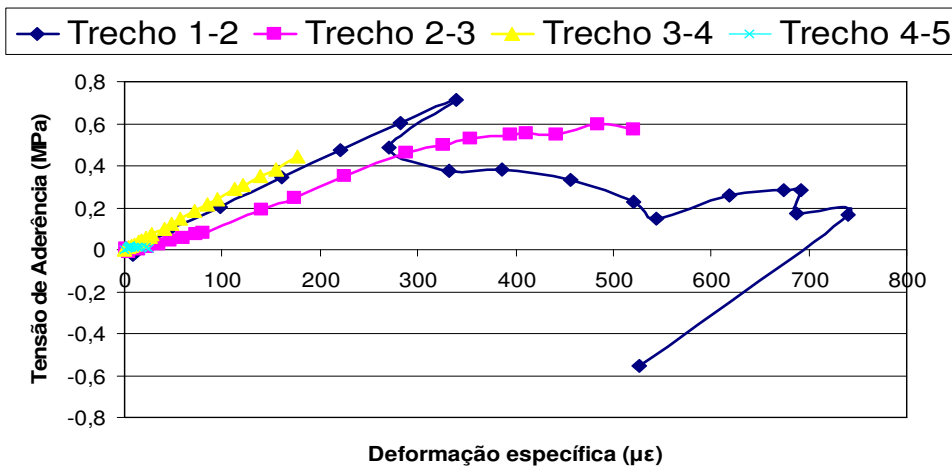


Figura 4.44 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRI-1 (corpo-de-prova descartado).

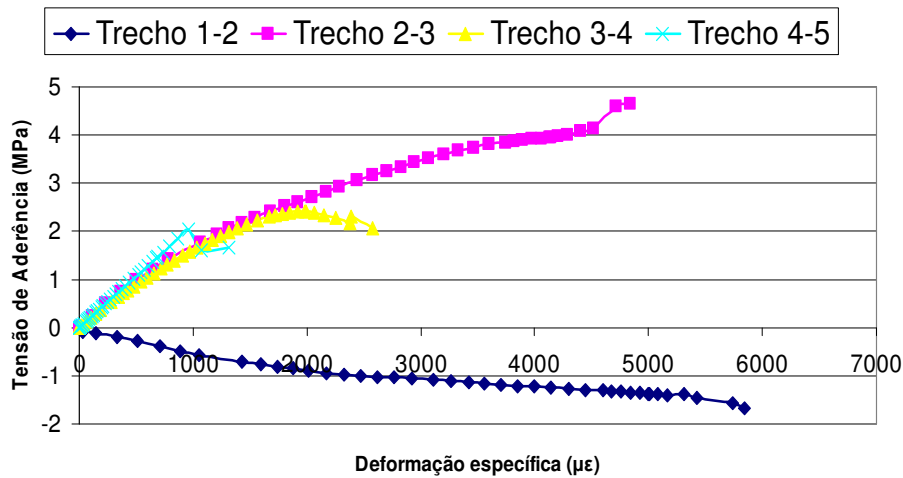


Figura 4.45 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRI-2.

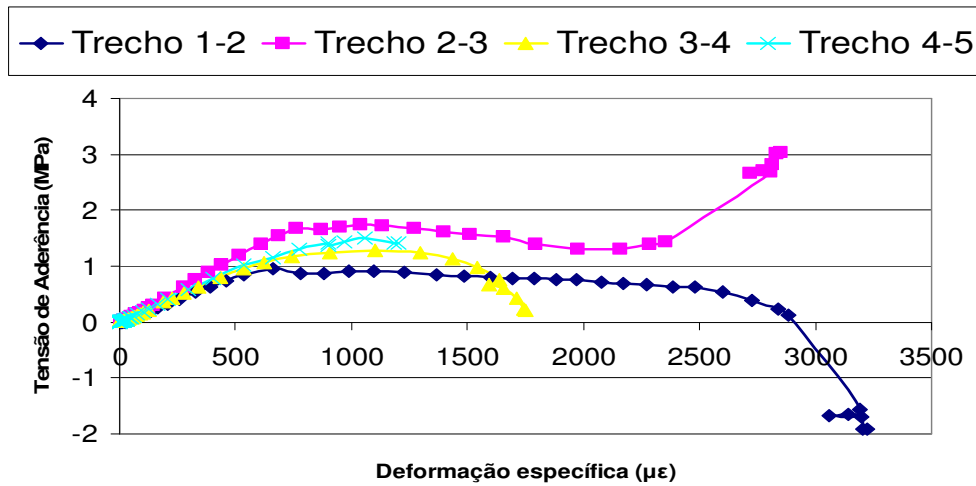


Figura 4.46 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRI-3.

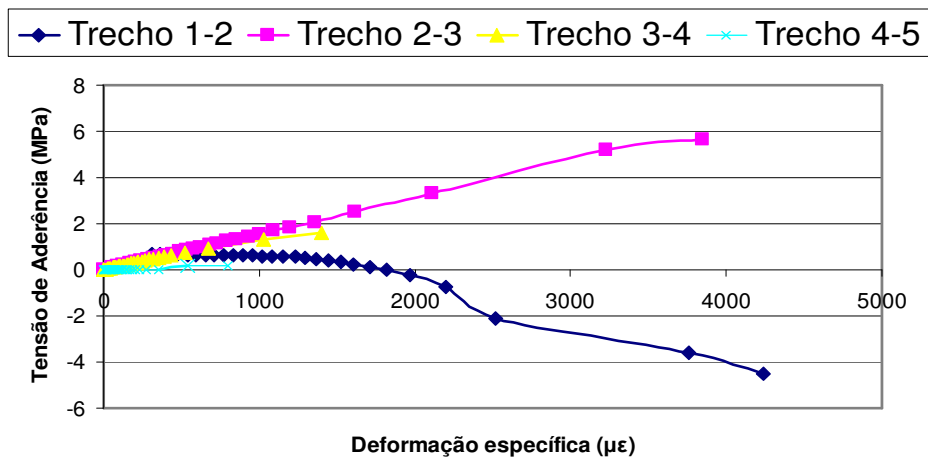


Figura 4.47 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRII-1.

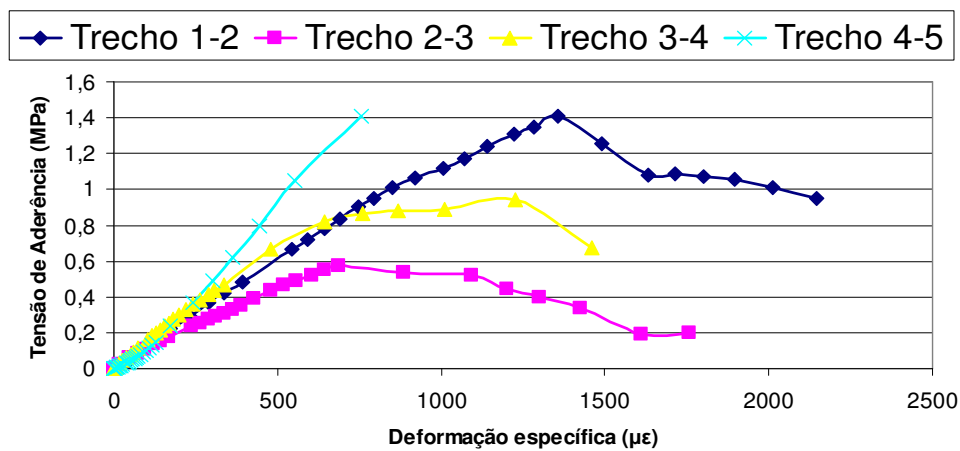


Figura 4.48 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRII-2.

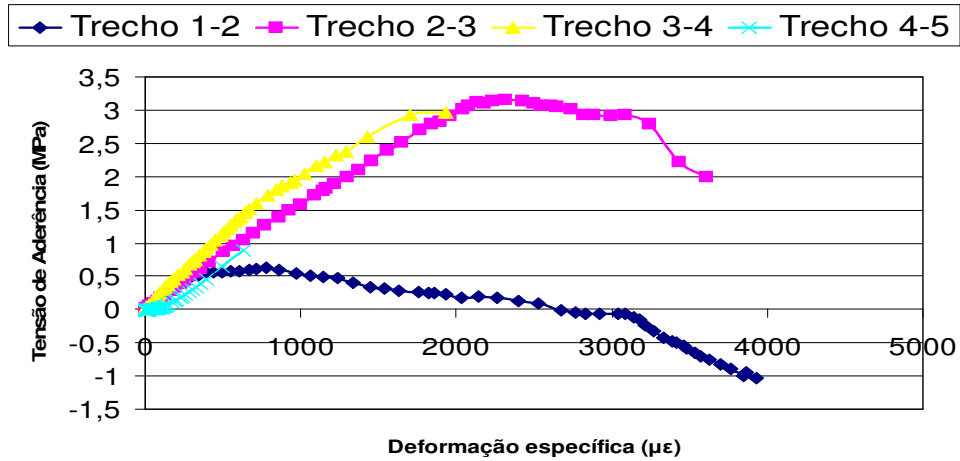


Figura 4.49 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRIII-1.

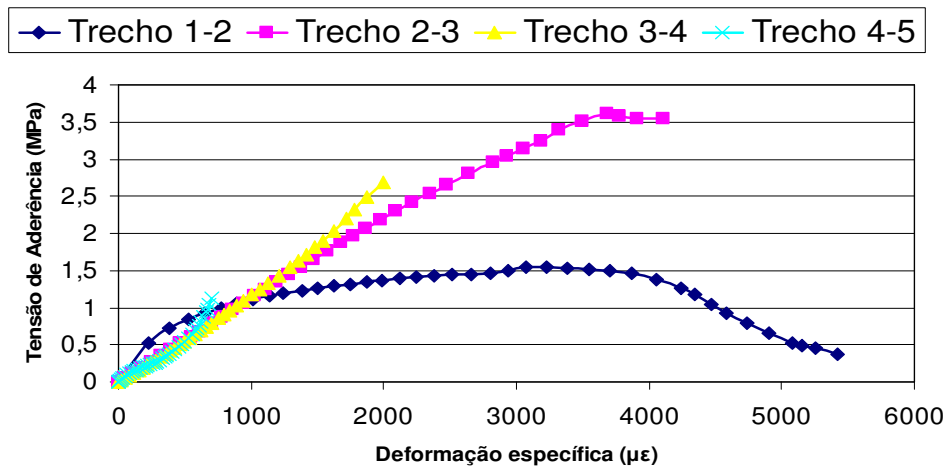


Figura 4.50 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRIII-2.

As Figuras 4.51 a 4.55 mostram as envoltórias das curvas tensões de aderência x deformação específica do CFC para cada corpo-de-prova dos ensaios com carregamento em ciclos de carga e descarga, cujas tensões de aderência foram calculadas pela expressão 4.1.

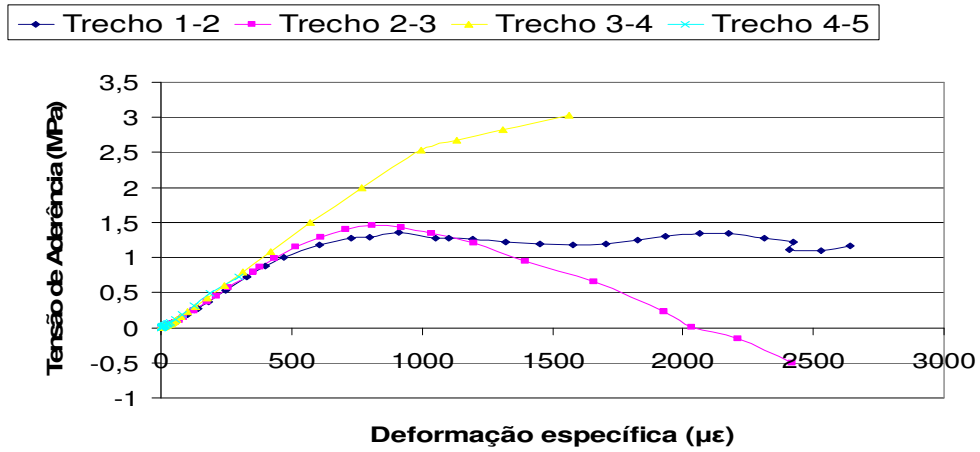


Figura 4.51 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova CDLI-1.

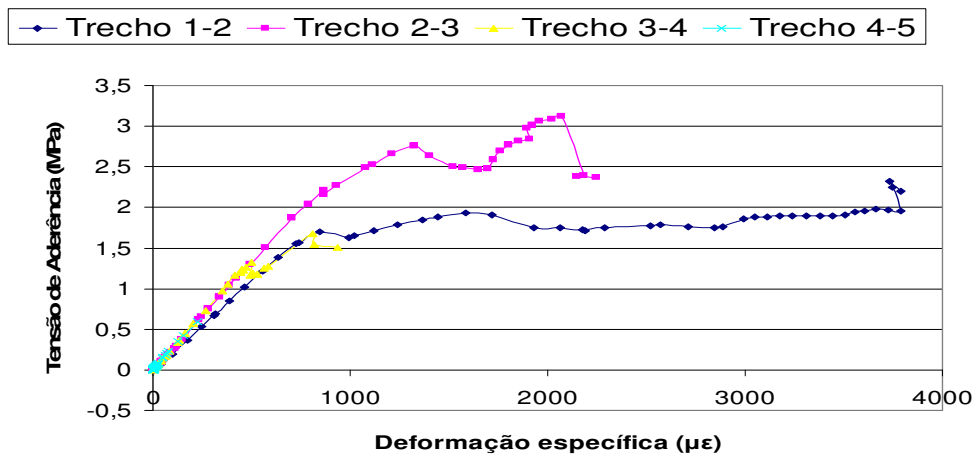


Figura 4.52 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova CDLII-1.

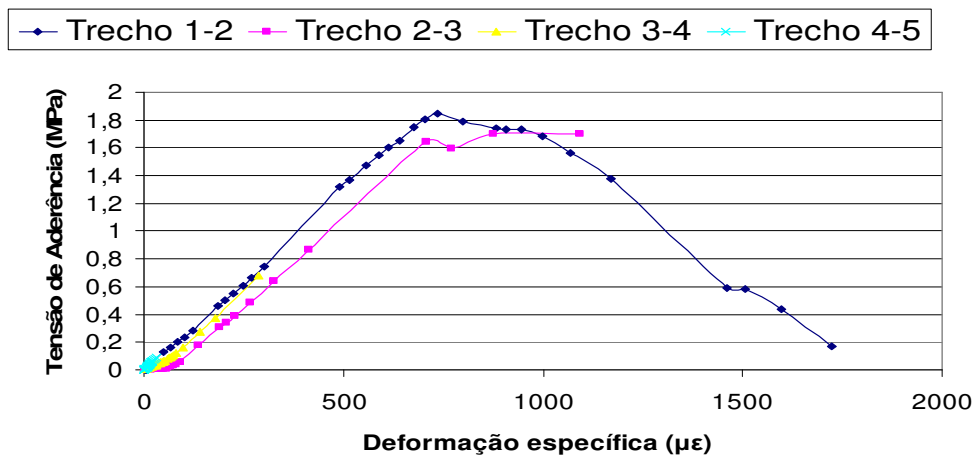


Figura 4.53 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova CDLIII-1.

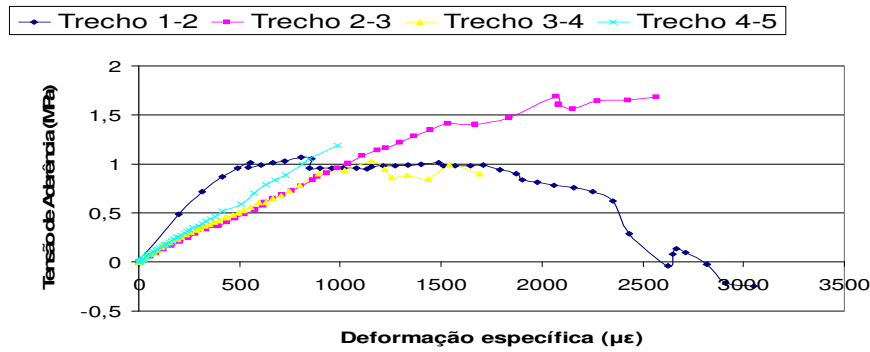


Figura 4.54 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova CDRII-1.

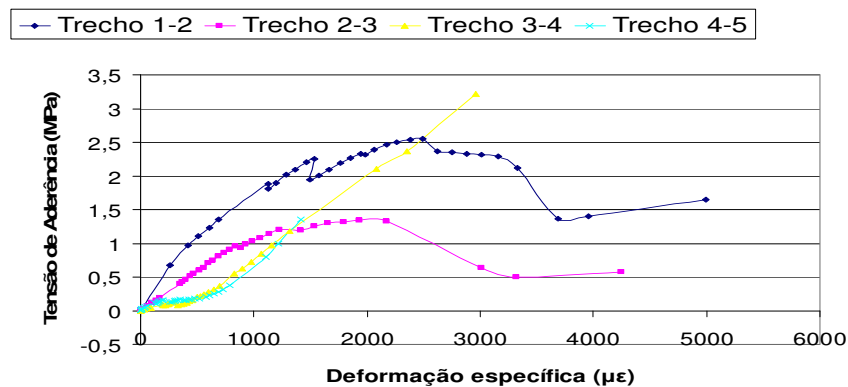


Figura 4.55 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova CDRIII-1.

As curvas tensão de aderência vs. deformação específica apresentam comportamentos diferentes para os diversos trechos, tanto pela esperada diferença de deformações entre duas seções consecutivas, como pela ocorrência de rupturas localizadas no contato CFC-concreto. As rupturas localizadas podem explicar algumas anomalias (irregularidades) nas curvas tensão de aderência vs. deformação específica.

A ocorrência de tensões de aderência negativas mostra, segundo a Equação 4.1, que a deformação $\varepsilon_{f,i+1}$ é maior que a seção adjacente $\varepsilon_{f,i}$. Indicando que está ocorrendo uma redistribuição de tensões da seção i para a seção adjacente $i+1$.

Em conseqüência da redistribuição de tensões da seção i para a seção adjacente $i+1$, um ponto de máximo na curva tensão de aderência vs. deformação específica não significa, em geral uma tensão de ruptura. Portanto, a diminuição de tensões em uma seção indica um acréscimo de tensões em uma seção adjacente, em função da redistribuição de tensões.

4.4.1.

Varição das tensões de aderência ao longo do comprimento de ancoragem

Neste item são analisadas as tensões de aderência ao longo do comprimento de ancoragem do CFC dos corpos-de-prova com carregamento Monótonico Crescente para os diversos estágios de carregamentos (Figuras 4.56 a 4.68).

Os extensômetros 1,2,3,4 e 5 estão posicionados nas abscissas 5 mm, 32,5 mm, 60 mm, 87,5 mm e 115 mm e as tensões de aderência (calculadas pela equação 4.1) estão representadas no ponto médio entre dois extensômetros consecutivos. Os pontos indicados nas Figuras 4.56 a 4.73 indicam tensões de aderência médias nos trechos limitados pelos extensômetros.

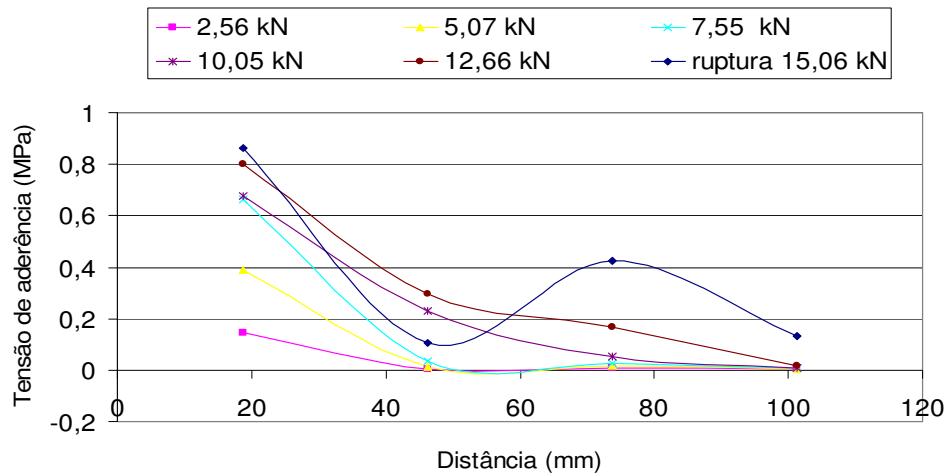


Figura 4.56 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLI-1.

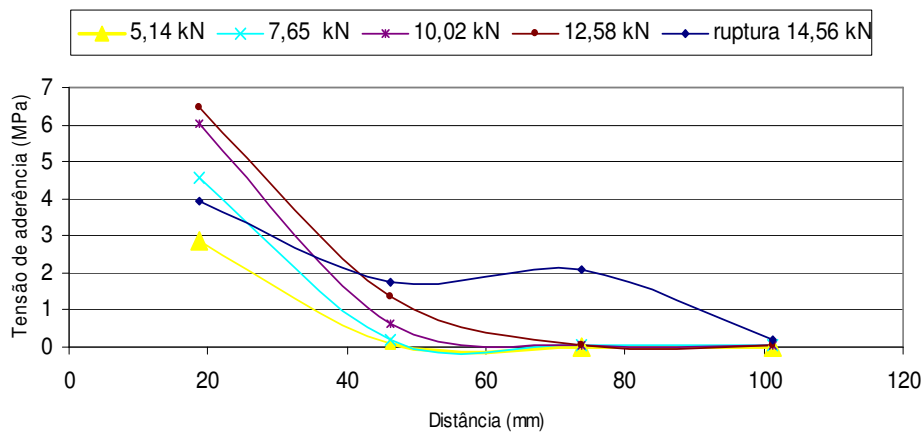


Figura 4.57 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLI-2.

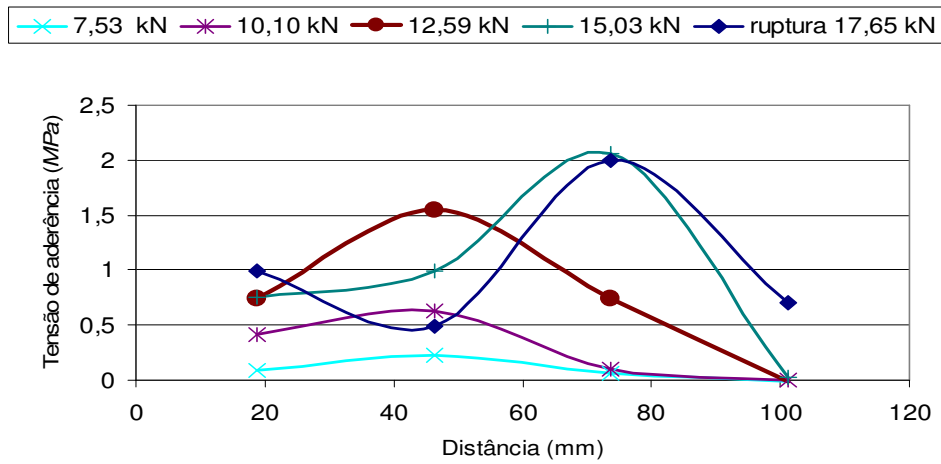


Figura 4.58 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLII-1.

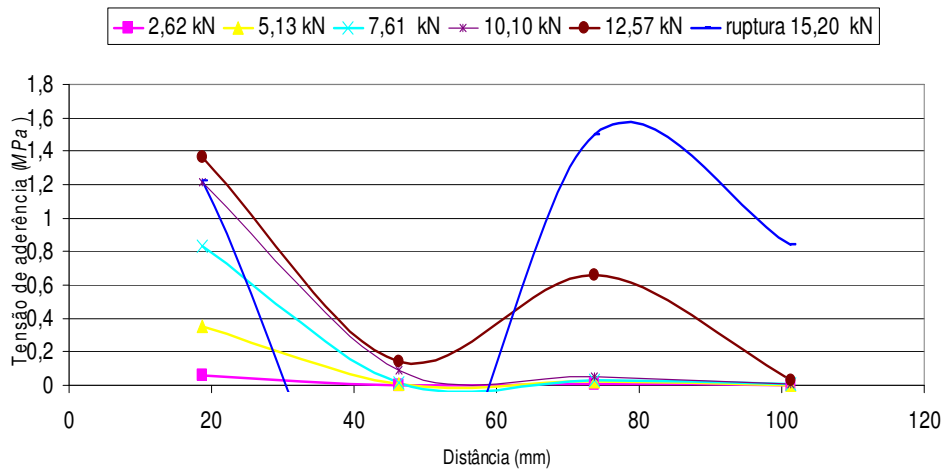


Figura 4.59 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLII-2.

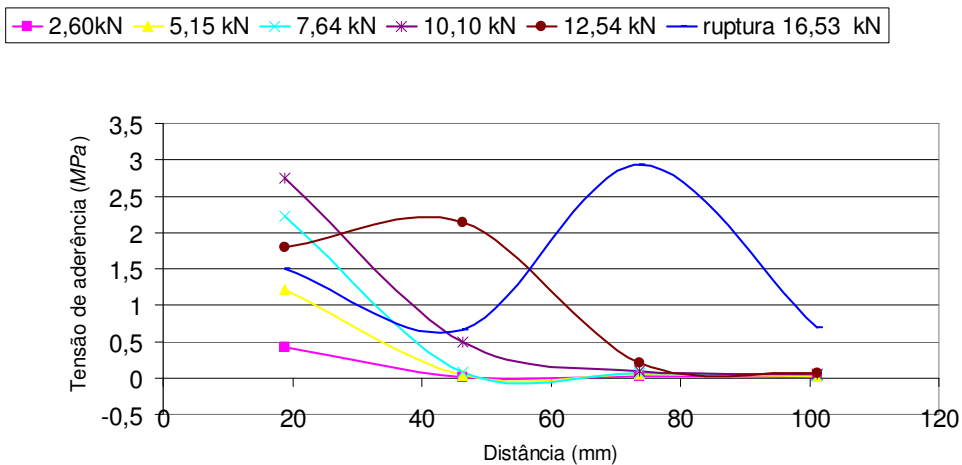


Figura 4.60 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLIII-1.

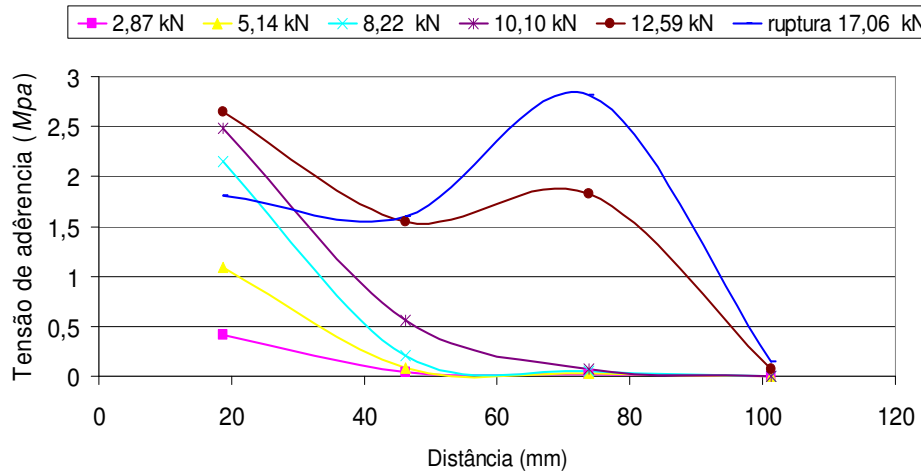


Figura 4.61 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLIII-2.

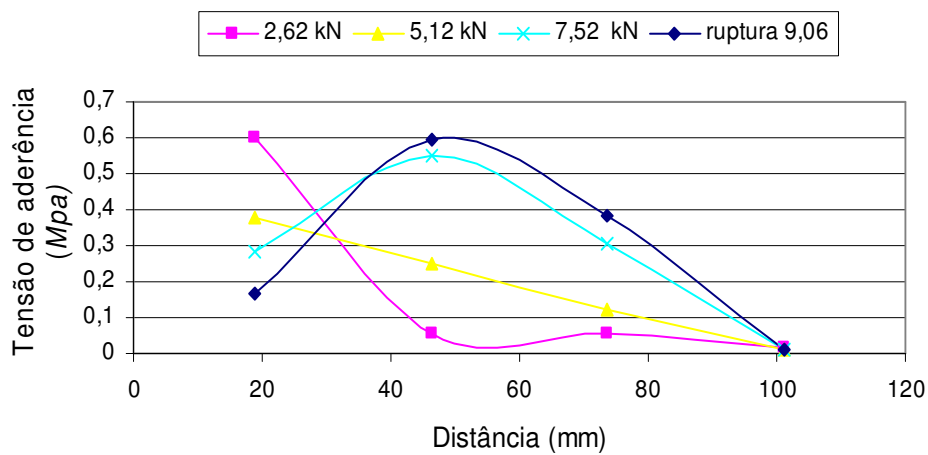


Figura 4.62 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-1.

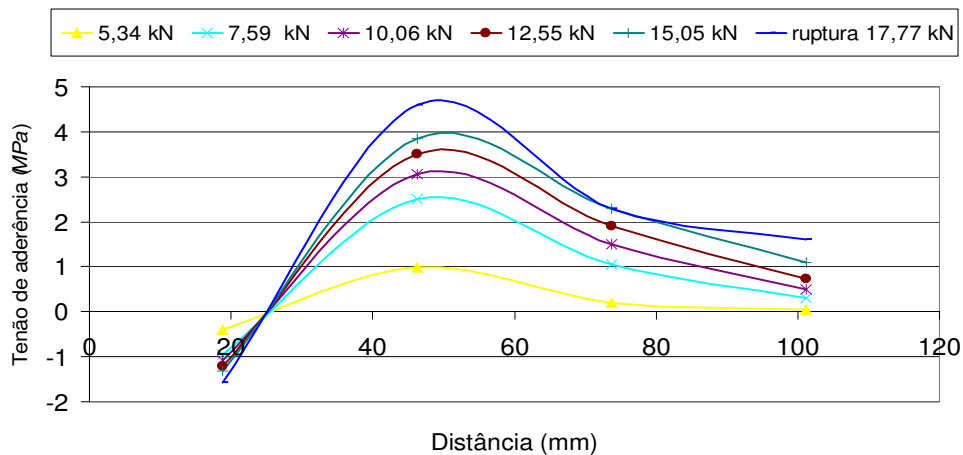


Figura 4.63 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-2.

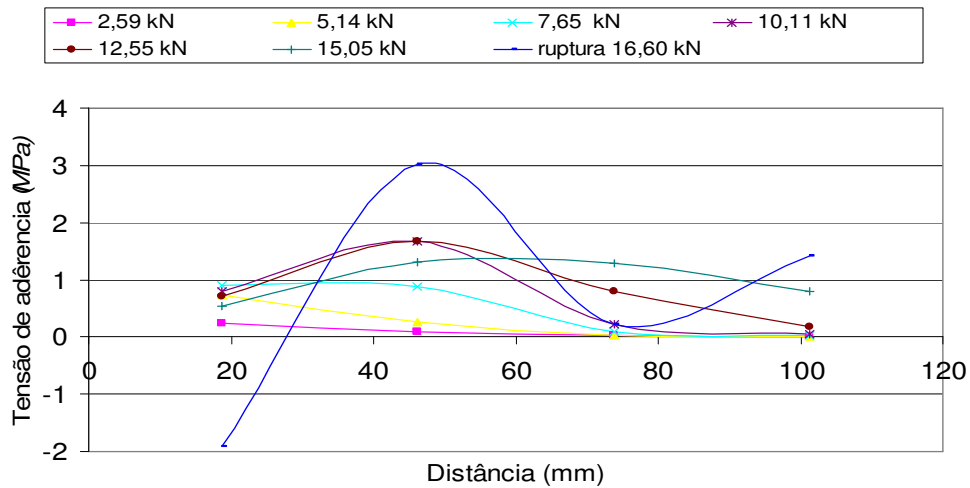


Figura 4.64 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-3.

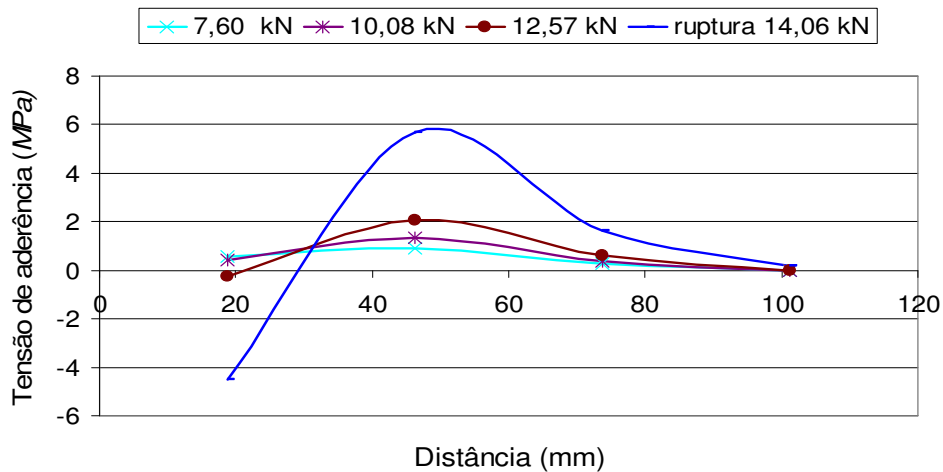


Figura 4.65 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRII-1.

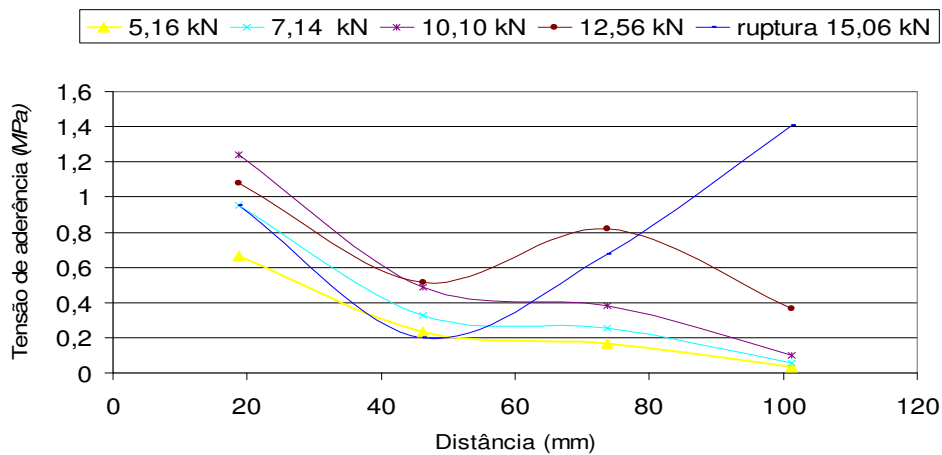


Figura 4.66 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRII-2.

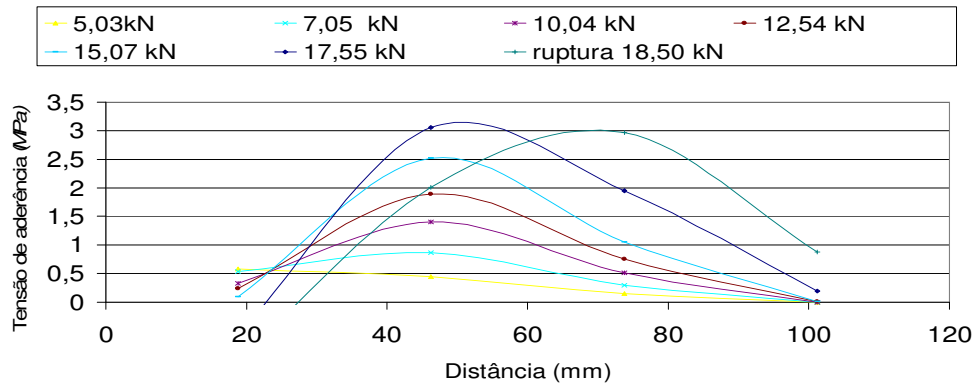


Figura 4.67 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRIII-1.

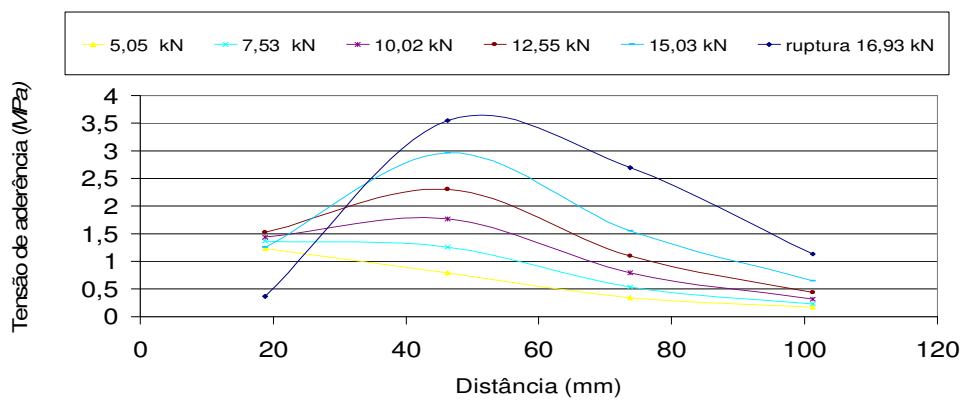


Figura 4.68 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRIII-2.

Na Figuras 4.69 a 4.73 são analisadas as resistências de aderência ao longo do comprimento de ancoragem do CFC dos corpos-de-prova para o carregamento em ciclos de carga e descarga para os primeiros estágios de carregamento.

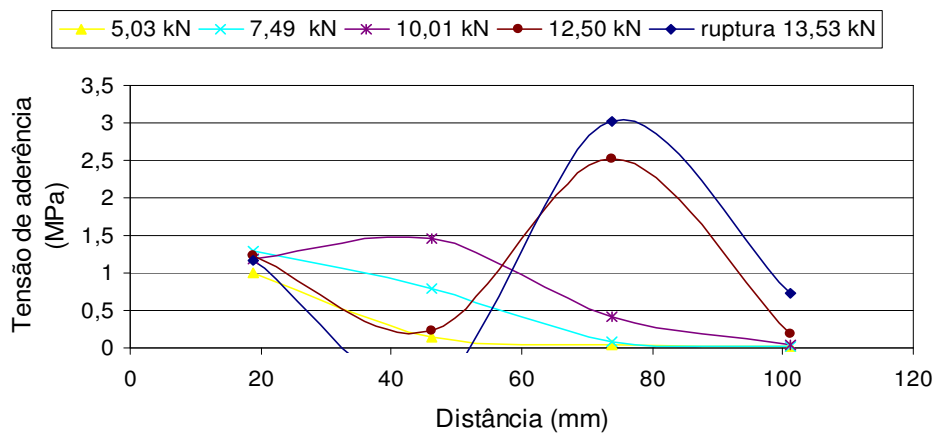


Figura 4.69 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDLI-1.

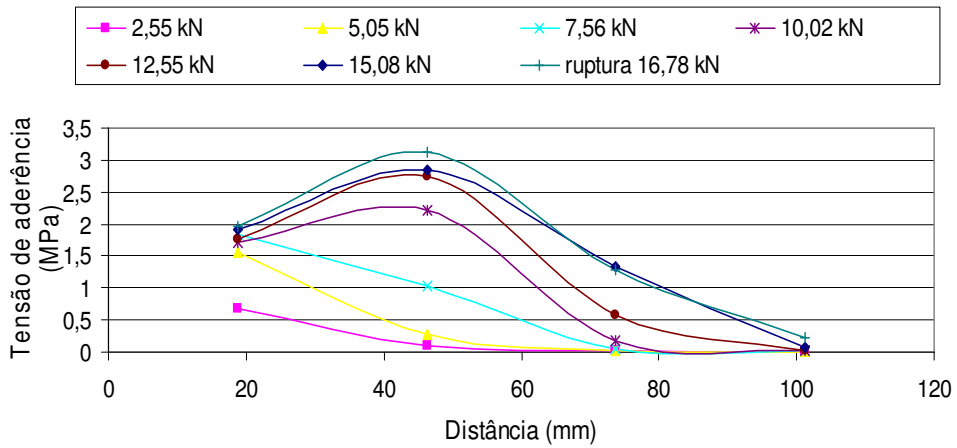


Figura 4.70 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDLII-1.

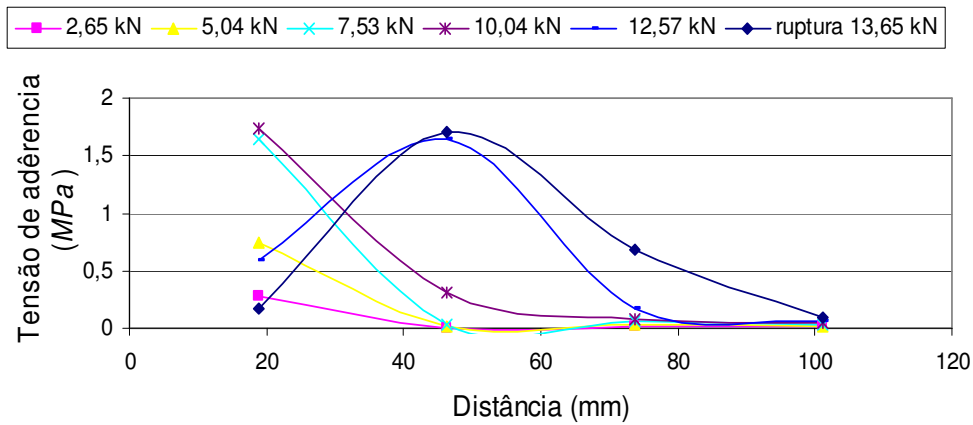


Figura 4.71 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDLIII-1.

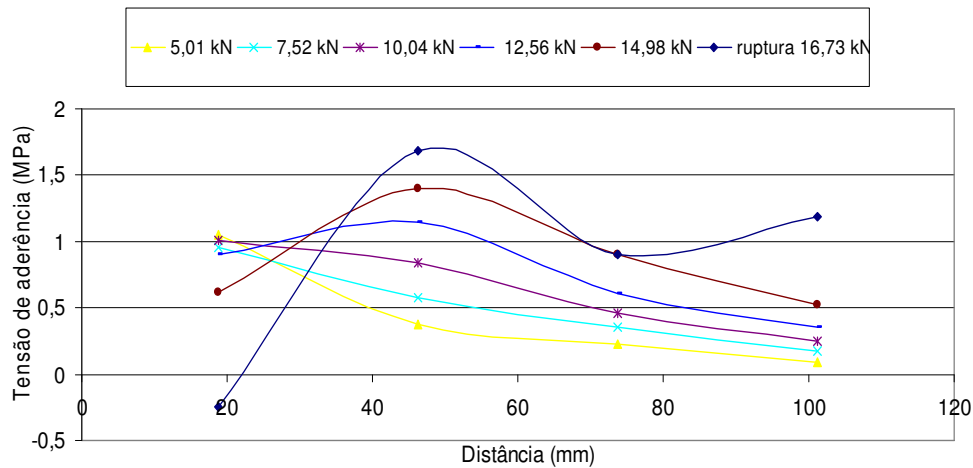


Figura 4.72 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDRII-1.

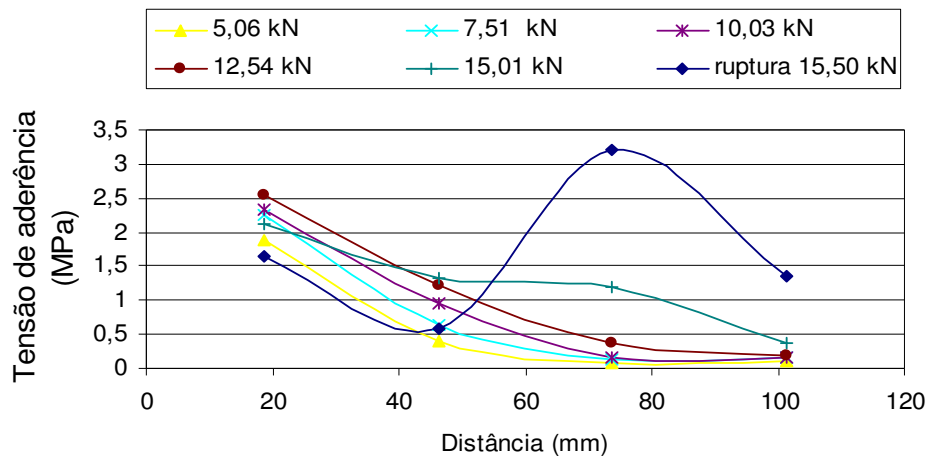


Figura 4.73 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDRIII-1.

Na maior parte dos corpos-de-prova, com o aumento do carregamento as tensões de aderência aumentaram e os pontos de tensão máxima se deslocaram ao longo do comprimento de ancoragem do tecido. No momento da ruptura a tensão máxima ocorre nos trechos intermediários, trecho 2-3 e trecho 3-4. É importante salientar que os pontos tensão de aderência vs. distância nas Figuras 4.56 a 4.73, por representarem tensões médias nos trechos considerados, fazem com que o aspecto dessas curvas seja em geral diferente das curvas deformação específica vs. distância, cujos pontos representam a deformação nos locais dos extensômetros, nas Figuras 4.20 a 4.37.

4.4.2. Resistência de aderência

Os valores da resistência última de aderência foram calculados em função da área total do CFC colado ao corpo-de-prova de concreto por meio da expressão:

$$f_{bu} = \frac{F_u}{l_{b,efet} b_f} \quad (4.3)$$

onde

F_u – força última;

$l_{b,efet}$ – comprimento de ancoragem efetivo;

b_f – largura do CFC.

A Tabela 4.2 mostra resultados da análise estatística efetuada para as os valores da resistência de aderência última, considerando-se as duas sistemáticas de cálculo, equações 4.1 e 4.3. Mostra também os resultados obtidos para os valores experimentais de Meneghel (2005). Os valores de resistência de aderência última obtidos pelo uso da equação 4.1 foram obtidos pela média das resistências de aderência dos trechos correspondentes à última leitura de deformações.

Tabela 4.2 – Resistências últimas de aderência dos corpos-de-prova.

Grupo	Corpo-de-prova	Resistências últimas de aderência (MPa)	
		Equação 4.1	Equação 4.3.
Grupo I	MCLI-1	0,382	1,729
	MCLI-2	1,977	1,618
	MCLII-1	1,045	1,961
	MCLII-2	1,152	1,688
	MCLIII-1	1,451	1,837
	MCLIII-2	1,590	1,896
Grupo II	MCRI-1*	–	–
	MCRI-2	2,514	1,975
	MCRI-3	1,644	1,844
	MCRII-1	2,988	1,562
	MCRII-2	0,809	1,674
	MCRIII-1	1,719	2,056
	MCRIII-2	1,936	1,882
Grupo III	CDLI-1	1,359	1,503
	CDLII-1	1,669	1,864
	CDLIII-1	0,660	1,517
Grupo VI	CDRII-1	1,004	1,858
	CDRIII-1	1,698	1,722
Média		1,636	1,776
Desvio padrão (s)		0,694	0,165
Coefficiente de variação (%)		42,40	9,30
Meneghel (2005)	L50-R25-2	2,85	2,00
	L50-R35-1	1,85	2,10
	L50-R45-1	1,42	1,47
	L50-R45-2	1,48	1,95
	L100-R35	2,13	2,55
	L100-R45	1,78	2,11
Média		1,918	2,030
Desvio padrão (s)		0,525	0,347
Coefficiente de variação (%)		27,4	17,1

*Corpo-de-prova desconsiderado na análise.

Os valores estatísticos calculados para os resultados experimentais desse trabalho e de Meneghel (2005) indicam que:

- os resultados fornecidos pela equação 4.1 com os dados de Meneghel (2005) apresentam menor dispersão do que os dados experimentais deste trabalho;
- a dispersão dos resultados fornecidos pela equação 4.3 com os dados deste trabalho é cerca de 45% inferior à dispersão obtida com os dados de Meneghel (2005).

A menor dispersão obtida pela Equação 4.3 mostra a sua melhor adequação em relação à Equação 4.1, onde a resistência última de aderência foi obtida pela média de tensões nos 4 trechos considerados. Entretanto, a obtenção de resultados mais precisos através da Equação 4.3 depende da determinação confiável do comprimento de ancoragem efetivo $l_{b,efet}$, como obtido no presente trabalho.

Considerando os dados experimentais deste trabalho e de Meneghel (2005) com a Equação 4.3, e considerando-se um quantil de 5% na curva de Gauss, tem-se para a resistência de aderência característica:

$$f_{bk} = \bar{f}_b - 1,65s \quad (4.4)$$

segundo-se

$$f_{bk} = 1,842 - 1,65 \times 0,245 = 1,44MPa \quad (4.5)$$

Neste trabalho é adotado $f_{bk} = 1,44MPa$ para as demais análises.

4.5.

Efeito da resistência à compressão do concreto nas resistências últimas de aderência

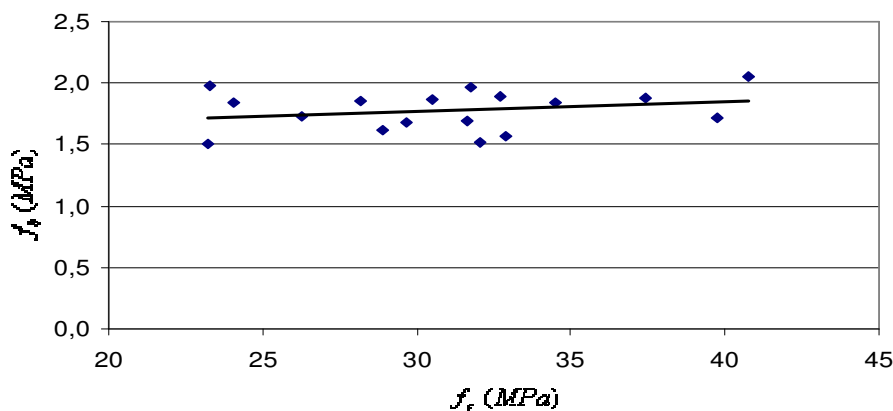


Figura 4.74 – Resistência aderência f_b vs. resistência do concreto f_c .

A Figura 4.74 mostra a relação entre a resistência à compressão do concreto e a resistência de aderência f_b , calculado pela equação 4.3, se observa que este não depende da resistência do concreto f_c , no intervalo estudado.

4.6. Efeito da rugosidade nas resistências últimas aderência

A Figura 4.75 e a Tabela 4.3 mostram as resistências de aderência, obtidas pela equação 4.3, dos ensaios dos corpos-de-prova com superfície lisa e rugosa.

Tabela 4.3 – Resistência de aderência vs tipo de superfície do concreto.

Corpos-de-prova lisos	Resistência de aderência f_b (MPa)	Corpos-de-prova rugosos	Resistência de aderência f_b (MPa)
MCLI-1	1,729	MCRI-1	–
MCLI-2	1,618	MCRI-2	1,975
MCLII-1	1,961	MCRI-3	1,844
MCLII-2	1,688	MCRII-1	1,562
MCLIII-1	1,837	MCRII-2	1,674
MCLIII-2	1,896	MCRIII-1	2,056
CDLI-1	1,503	MCRIII-2	1,882
CDLII-1	1,864	CDRII-1	1,858
CDLIII-1	1,517	CDRIII-1	1,722
Média	1,735	Média	1,822
Desvio Padrão (s)	0,166	Desvio Padrão (s)	0,162
Coefficiente de Variação (CV) (%)	9,6	Coefficiente de Variação (CV) (%)	8,9

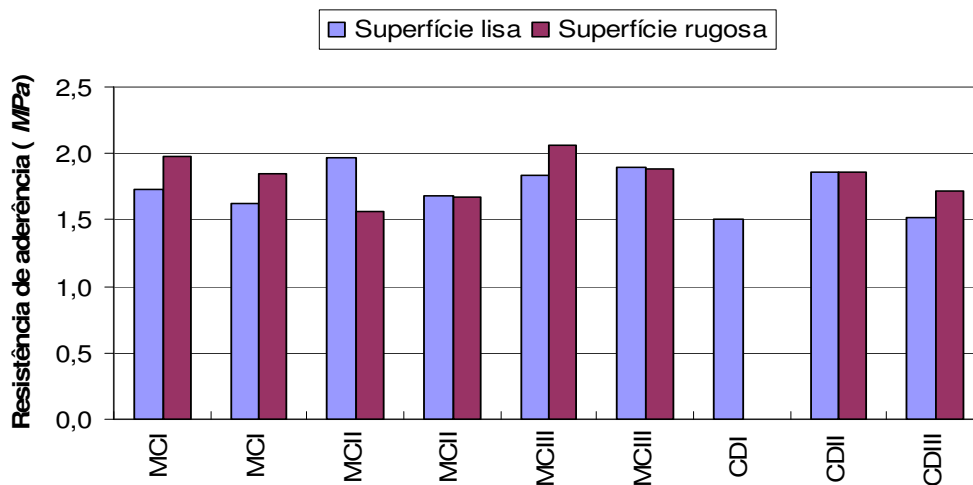


Figura 4.75 – Resistência de aderência f_b vs tipo de superfície do concreto.

Para os corpos de prova de superfície rugosa a média da resistência última de aderência foi 4,8% superior aos corpos-de-prova com superfície lisa.

4.7. Efeito do carregamento em ciclos de carga e descarga no CFC

Neste item são analisados os efeitos do carregamento em ciclos de carga e descarga realizados em cinco corpos-de-prova, identificados com a seguinte nomenclatura: CDLI-1, CDLII-1, CDLIII-1, CDRII-1, CDRIII-1.

Os carregamentos foram aplicados em incrementos de 2,5 kN (força atuando na lateral do CFC), seguido de descarga total.

As Figuras 4.76. a 4.85 mostram as deformações dos extensômetros 1 e 2 dos corpos-de-prova.

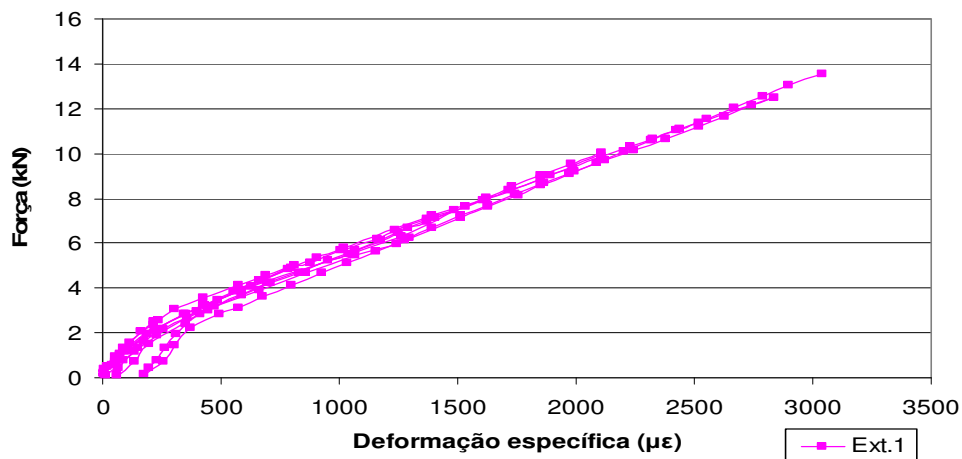


Figura 4.76 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 1 do corpo-de-prova CDLI-1.

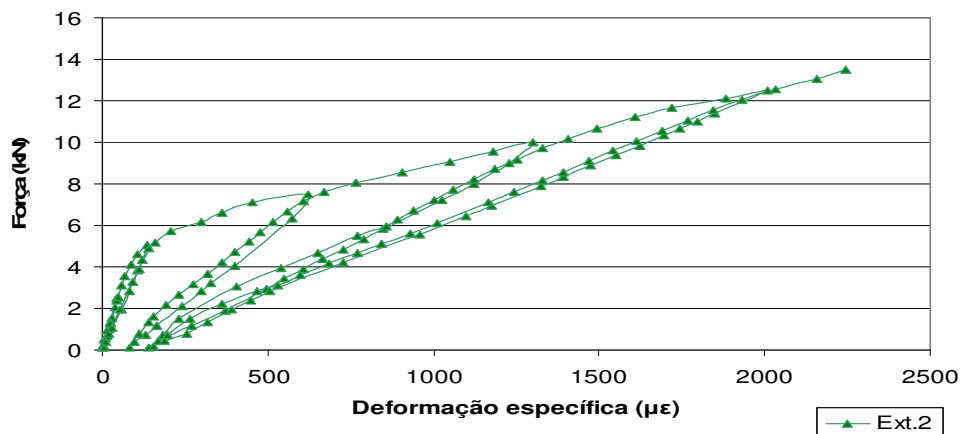


Figura 4.77 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 2 do corpo-de-prova CDLI-1.

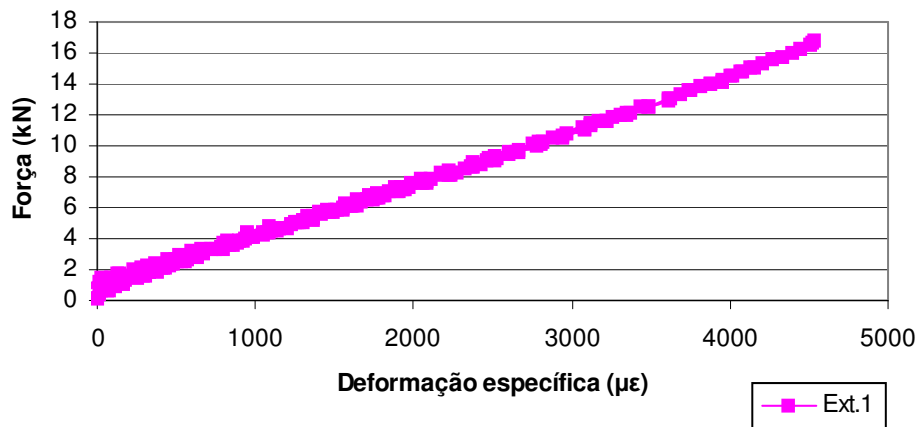


Figura 4.78 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetro 1 do corpo-de-prova CDLII-1.

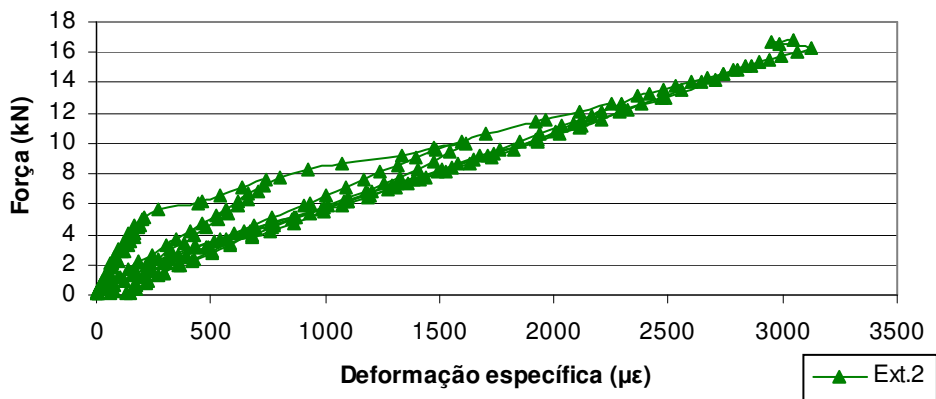


Figura 4.79 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetro 2 do corpo-de-prova CDLII-1.

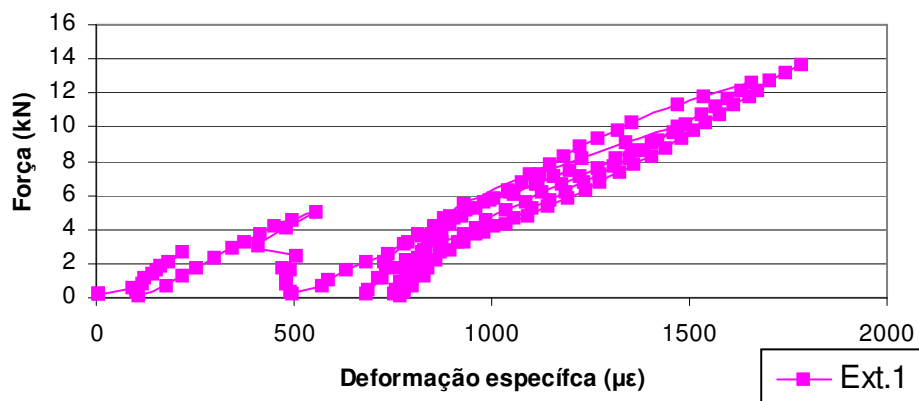


Figura 4.80 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetro 1 do corpo-de-prova CDLIII-1.

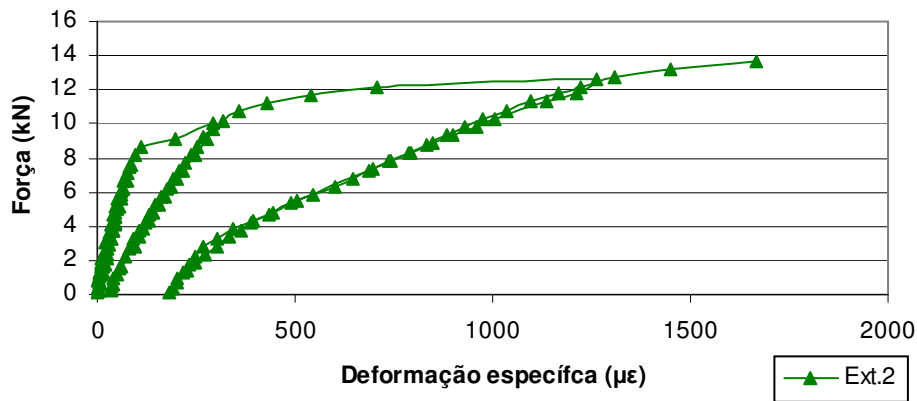


Figura 4.81 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetro 2 do corpo-de-prova CDLIII-1.

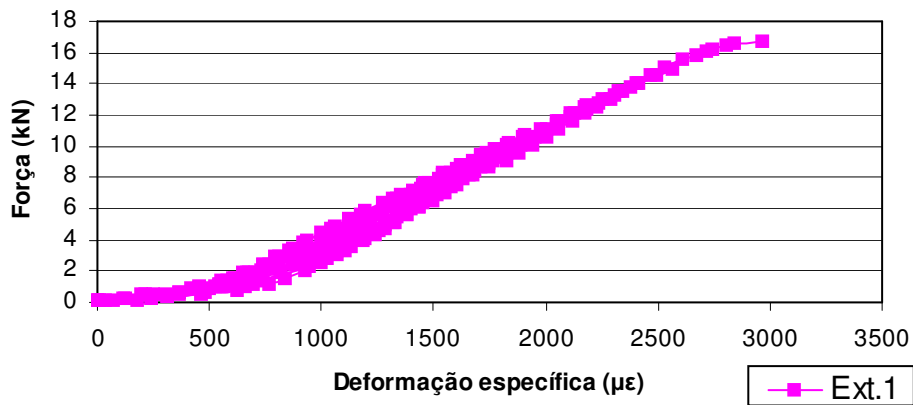


Figura 4.82 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetro 1 do corpo-de-prova CDRII-1.

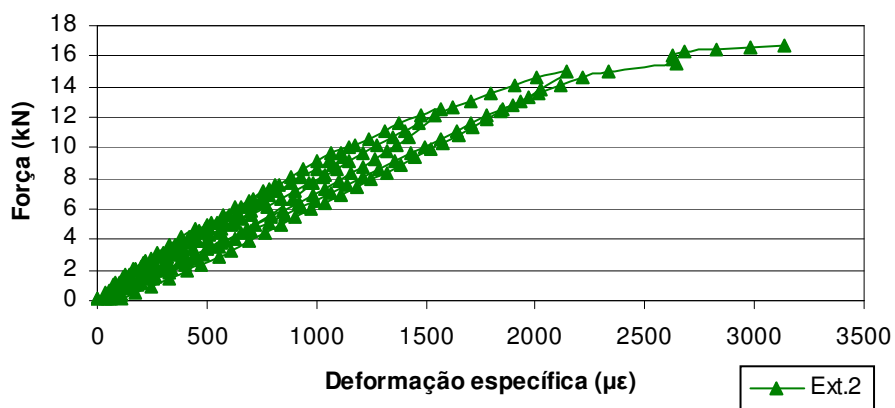


Figura 4.83 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetro 2 do corpo-de-prova CDRII-1.

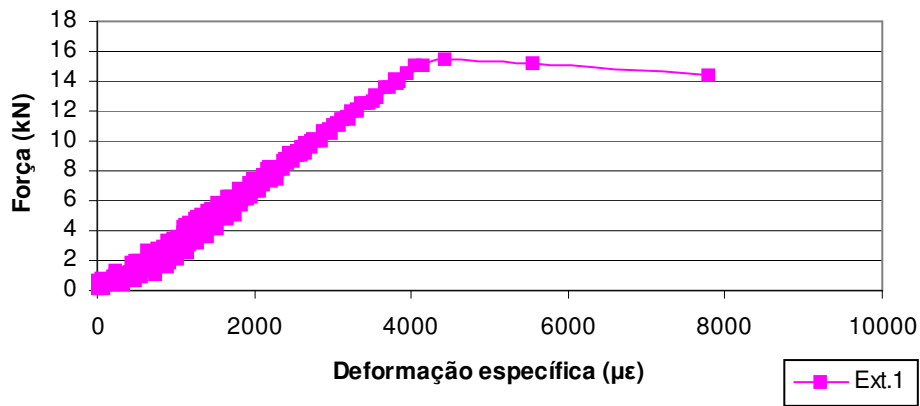


Figura 4.84 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetro 1 do corpo-de-prova CDRIII-1.

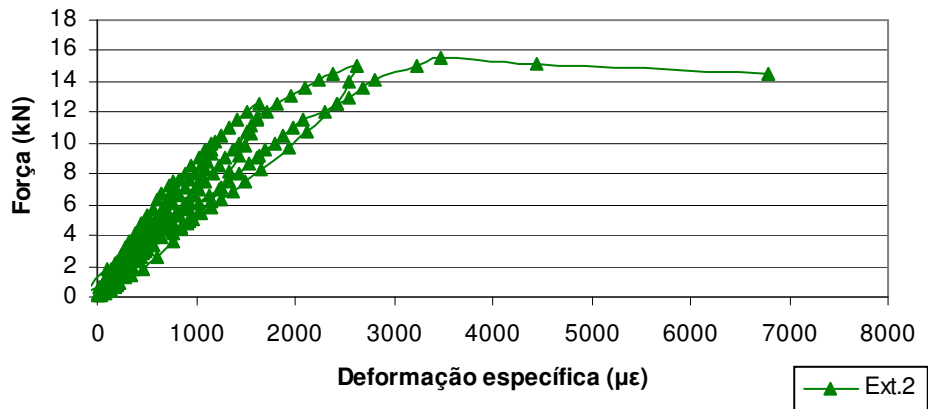


Figura 4.85 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetro 2 do corpo-de-prova CDRIII-1.

O efeito do carregamento em ciclos de carga e descarga, na maior parte dos ensaios realizados, não apresentou grandes deformações residuais.

O extensômetro 1 do corpo-de-prova CDLIII-1 apresentou maiores deformações residuais de aproximadamente 800 $\mu\epsilon$ (Figura 4.80).

Os demais corpos-de-prova apresentaram pequenas deformações residuais de aproximadamente 200 $\mu\epsilon$.

4.8. Energia de fratura

A energia de fratura G_F é dado pela área sob o gráfico $\tau \times s$, e pode ser obtida por meio de modelos teóricos, destacando-se o modelo de Holzenkämpfer (1994). Esse modelo consta no Bulletin 14 FIB (2001).

4.8.1. Modelo de Holzenkämpfer (1994)

Os resultados experimentais foram usados como dados para aferir o modelo de Holzenkämpfer (1994), pois esse modelo foi originalmente concebido e aferido para chapas metálicas colados ao concreto.

Desse autor tem-se:

$$F_u = b_f \sqrt{\frac{2G_{F,\text{teórico}} E_f t_f}{1 + \frac{E_f A_f}{E_c A_c}}} = b_f \sqrt{\frac{2G_{F,\text{teórico}} E_f t_f}{1 + n_f \rho_f}} \quad (4.6)$$

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} \quad (4.7)$$

Explicitando-se a energia de fratura na equação 4.6 tem-se:

$$G_{F,\text{teórico}} = \left(\frac{F_u}{b_f}\right)^2 \left(1 + \frac{E_f A_f}{E_c A_c}\right) \left(\frac{1}{2E_f t_f}\right) \quad (4.8)$$

onde

F_u – força última obtida no ensaio;

b_f – largura do CFC;

E_f – módulo de deformação do CFC;

t_f – espessura do CFC;

A_f – área do CFC;

E_c – módulo de deformação do concreto;

A_c – área do concreto do corpo-de-prova.

No cálculo do $G_{F,teórico}$ foram usados os seguintes parâmetros: $b_f = 75 \text{ mm}$, $E_f = 247 \text{ GPa}$, $t_f = 0,165 \text{ mm}$, $A_f = 12,375 \text{ mm}^2$ ($75 \text{ mm} \times 0,165 \text{ mm}$), $E_c = 22.040 \text{ MPa}$ para série I, $E_c = 34.280 \text{ MPa}$ para série II, $E_c = 30.080 \text{ MPa}$ para série III, $A_c = 40.000 \text{ mm}^2$. As forças últimas F_u foram as forças obtidas nos ensaios.

O cálculo de $G_{F,teórica}$ usando-se o valor experimental da força última F_u , permite relacionar esse parâmetro com a resistência de aderência f_b calculada por meio da equação 4.3. A Tabela 4.4 mostra as energias de fratura teóricas $G_{F,teórica}$ calculadas com a equação 4.8

Tabela 4.4 – Relação entre a resistência de aderência f_b , obtido pela equação 4.3 e a energia de fratura teórica $G_{F,teórica}$ obtida com expressão 4.8.

Corpo-de-prova	f_b (MPa)	f_c (MPa)	$G_{F,teórica}$ (N / mm)
MCLI-1	1,729	26,3	0,530
MCLI-2	1,618	28,9	0,464
MCLII-1	1,961	31,8	0,681
MCLII-2	1,688	31,7	0,505
MCLIII-1	1,837	34,5	0,597
MCLIII-2	1,896	32,7	0,636
MCRI-1*	–	–	–
MCRI-2	1,975	23,3	0,692
MCRI-3	1,844	24,1	0,603
MCRII-1	1,562	32,9	0,432
MCRII-2	1,674	29,7	0,496
MCRIII-1	2,056	40,8	0,749
MCRIII-2	1,882	37,4	0,627
CDLI-1	1,503	23,2	0,400
CDLII-1	1,864	30,5	0,615
CDLIII-1	1,517	32,1	0,407
CDRII-1	1,858	28,2	0,612
CDRIII-1	1,722	39,8	0,525
Média			0,563
Desvio padrão			0,103
Coefficiente de variação (%)			18,32

*Corpo-de-prova desconsiderado na análise.

A análise estatística efetuada para os valores de G_F apresentou o valor médio de $0,563 \text{ MPa}$, desvio padrão igual a $0,103$ e coeficiente de variação de $18,32\%$.

Usando-se o valor médio de G_F obtido na curva de tendência tem-se para o valor característico da energia de fratura $G_{F,k}$:

$$G_{F,k} = \bar{G}_F - 1,65s \quad (4.9)$$

$$G_{F,k} = 0,563 - 1,65 \times 0,103 = 0,393 \frac{N}{mm} \quad (4.10)$$

As Figuras 4.86 e 4.87 mostram a relação entre a resistência à compressão f_c a resistência de aderência f_b vs. a energia de fratura $G_{F,teórica}$.

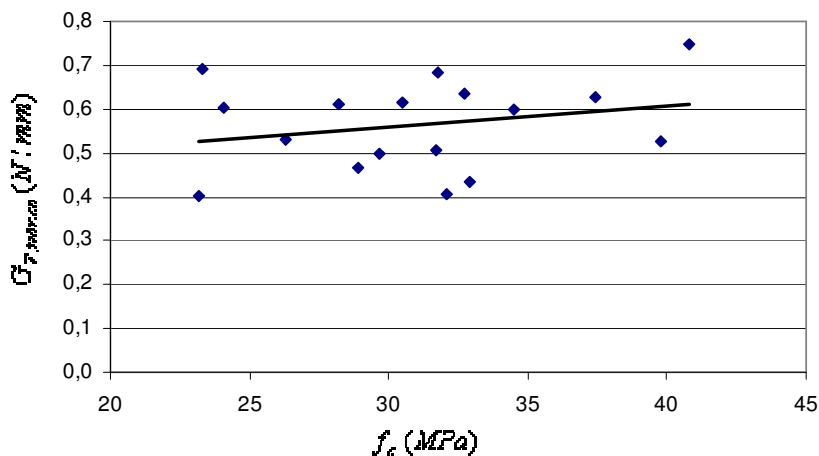


Figura 4.86 – Resistência à compressão f_c vs. energia de fratura $G_{F,teórica}$.

Na equação 4.8 se observa que $G_{F,teórica}$ não depende diretamente da resistência do concreto no intervalo estudado, mas o módulo de elasticidade do concreto E_c consta dessa equação. Ressalta-se que $1 + \left(\frac{E_f A_f}{E_c A_c} \right) \cong 1$,
 donde tem-se:

$$G_{F,teórico} = \left(\frac{F_u}{b_f} \right)^2 \left(\frac{1}{2E_f t_f} \right) \quad (4.11)$$

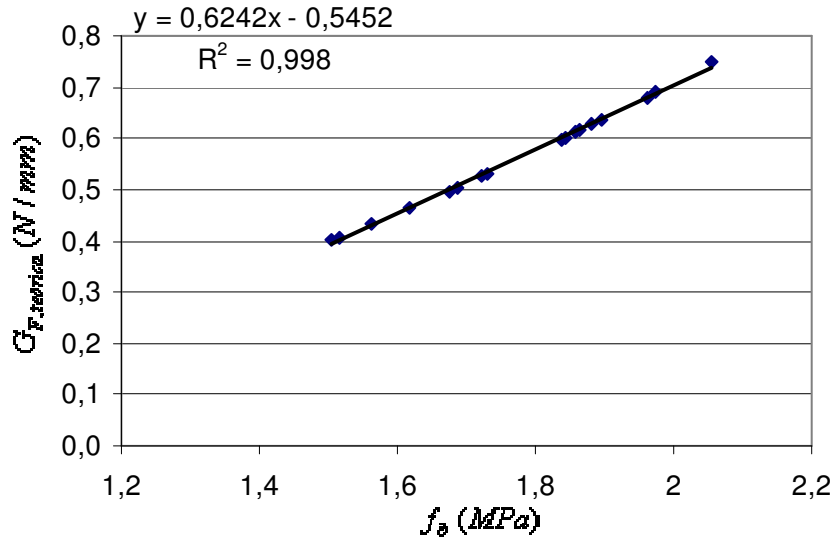


Figura 4.87 – Resistência de aderência f_b vs. energia de fratura $G_{F,teórica}$.

A variação da energia de fratura $G_{F,teórica}$ em função da resistência de aderência f_b mostrada na Figura 4.87, indica que a curva de tendência tem bom ajuste de dados. A curva $G_{F,teórica} = 0,6242f_b + 0,5452$ com $R^2=0,998$ serve como um bom referencial inicial para estudos posteriores.

Manipulando-se as expressões que constam de Holzenkämpfer (1994) e do Bulletin 14 FIB (2001) seguem-se respectivamente:

$$l_f = 2 \sqrt{\frac{2G_f E_f t_f}{\tau_{máx}^2}} \quad (4.12)$$

$$l_f = \sqrt{\frac{E_f t_f}{c_2 f_{ctm}}} \quad (4.13)$$

Usando-se o valor de $G_{F,k}$ e $f_{b,k}$ na Equação 4.12 tem-se:

$$l_f = 2 \sqrt{\frac{2 \times 0,393 \times 247000 \times 0,165}{1,44^2}} = 248,5 \text{ mm}$$

O valor de l_f calculado por esse modelo foi cerca de duas vezes superior ao valor usado nos ensaios. O valor de $l_f = 248,5\text{ mm}$ calculado com o valor de $f_{b,k}$ é muito conservativo, visto que o comprimento adotado foi igual a 120 mm , e no extremo desse comprimento quase não existiam tensões de aderência. Ressalta-se que o modelo de Holzenkämpfer (1994) foi originalmente estudado para chapas metálicas.

Segundo o Bulletin 14 FIB (2001) o coeficiente c_2 deve ser obtido a partir de resultados experimentais. Neste trabalho os valores de c_2 , foram obtidos usando-se a Equação 4.13, escrita sob a forma:

$$c_2 = \frac{E_f t_f}{l_f^2 f_{ctm}} \quad (4.14)$$

Com a relação dada pela NBR 6118/2003:

$$f_{ctm} = 0,9 f_{ct,sp} \quad (4.15)$$

Tem-se os valores mostrados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – resultados da calibração de c_2 pela equação 4.14.

Série	f_{ct} (MPa)	c_2
I	2,57	1,103
II	2,84	0,998
III	3,17	0,893

4.9.

Tensão tangencial máxima resistida pelo substrato de concreto

A tensão de tangencial máxima atuante no substrato de concreto deve atender a um critério de ruptura, sendo adotado o critério de Coulomb-Mohr generalizado. A Figura 4.88 e Figura 4.89 mostram o estado de tensões atuantes na interface concreto adesivo.

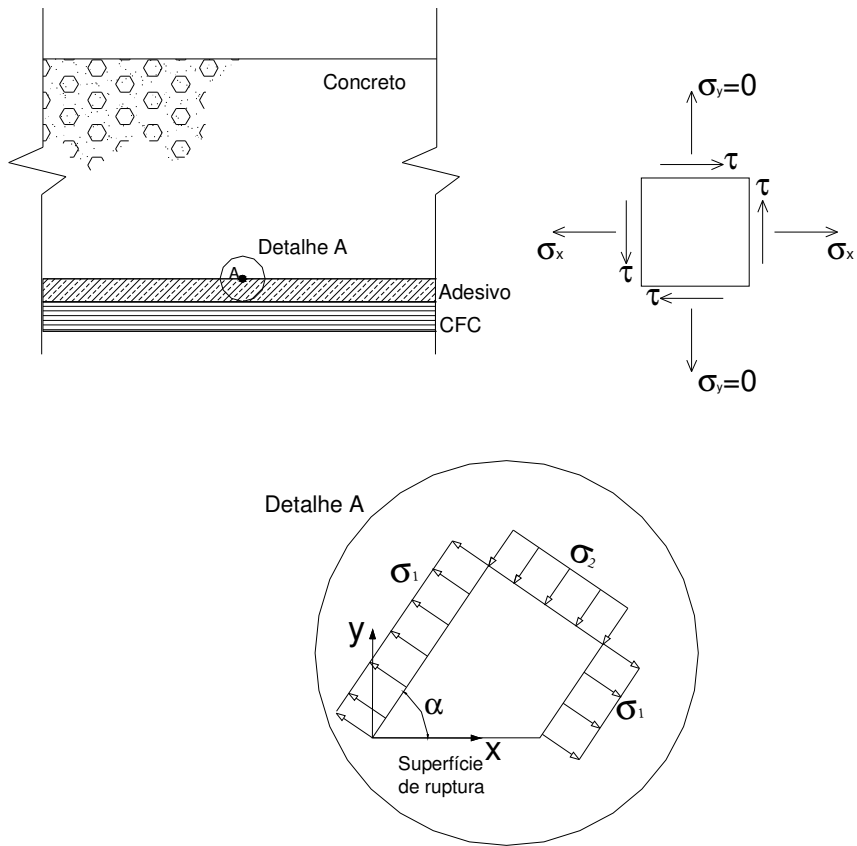


Figura 4.88 – Tensões principais atuantes no substrato de concreto.

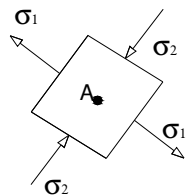


Figura 4.89 – Detalhe das tensões principais atuantes no substrato de concreto.

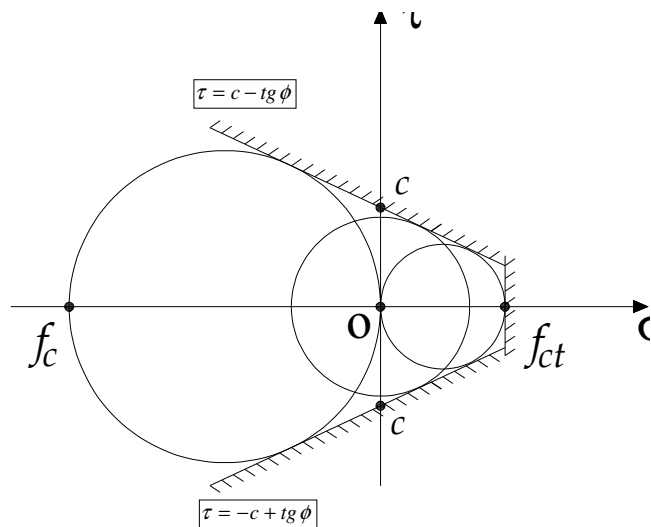


Figura 4.90 – Critério de ruptura de Coulomb-Mohr generalizado para o concreto.

O tensor de tensões no ponto A é dado por:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

sendo as tensões principais

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\frac{\sigma_x^2}{4} + \tau_{xy}^2} \quad (4.17)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x}{2} - \sqrt{\frac{\sigma_x^2}{4} + \tau_{xy}^2} \quad (4.18)$$

A envoltória do critério de ruptura em forma normalizada é dada por:

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{m} \left[1 + (m-1) \frac{\sigma_y}{f_c} \right]} \quad (4.20)$$

Sendo $\sigma_y = 0$ tem-se:

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{m}} \quad (4.20)$$

Pondo-se:

$$m = \frac{f_c}{f_{ct}} \quad (4.19)$$

onde f_c e f_{ct} são, respectivamente, a resistência a compressão e a resistência a tração do concreto obtidas em ensaios normalizados, resulta:

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{f_{ct}}{f_c}} \quad (4.20)$$

Com essas expressões e atendendo-se ao critério de ruptura de Coulomb-Mohr generalizado, tem-se para a tensão tangencial máxima resistida pelo substrato de concreto:

$$\tau_{máx} = \frac{1}{2} \sqrt{f_c f_{ct}} \quad (4.20)$$

Essa tensão tangencial é função das resistências à compressão e à tração do concreto.

Tabela 4.6 – Análise da tensão $\tau_{m\acute{a}x}$, calculada pela equação 4.18.

Corpo-de-prova	f_c (MPa)	f_{ct} (MPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$f_b = \frac{F_u}{b_f \ell_f}$ (MPa)	$\frac{f_b}{\tau_{m\acute{a}x}}$
MCLI-1	26,29	2,57	4,108	1,729	0,421
MCLI-2	28,91	2,57	4,307	1,618	0,376
MCLII-1	31,75	2,84	4,749	1,961	0,413
MCLII-2	31,65	2,84	4,741	1,688	0,356
MCLIII-1	34,53	3,17	5,226	1,837	0,352
MCLIII-2	32,72	3,17	5,088	1,896	0,373
MCRI-1*	–	–	–	–	–
MCRI-2	23,28	2,57	3,867	1,975	0,511
MCRI-3	24,06	2,57	3,933	1,844	0,469
MCRII-1	32,92	2,84	4,830	1,562	0,323
MCRII-2	29,68	2,84	4,589	1,674	0,365
MCRIII-1	40,76	3,17	5,683	2,056	0,362
MCRIII-2	37,40	3,17	5,441	1,882	0,346
CDLI-1	23,24	2,57	3,859	1,503	0,390
CDLII-1	30,48	2,84	4,651	1,864	0,401
CDLIII-1	32,08	3,17	5,041	1,517	0,301
CDRII-1	28,15	2,84	4,472	1,858	0,415
CDRIII-1	39,77	3,17	5,613	1,722	0,307
Média			4,717	1,776	0,381
Desvio padrão			0,585	0,165	0,054
Coefficiente de variação (%)			12,39	9,30	14,30

*corpo-de-prova desconsiderado na análise.

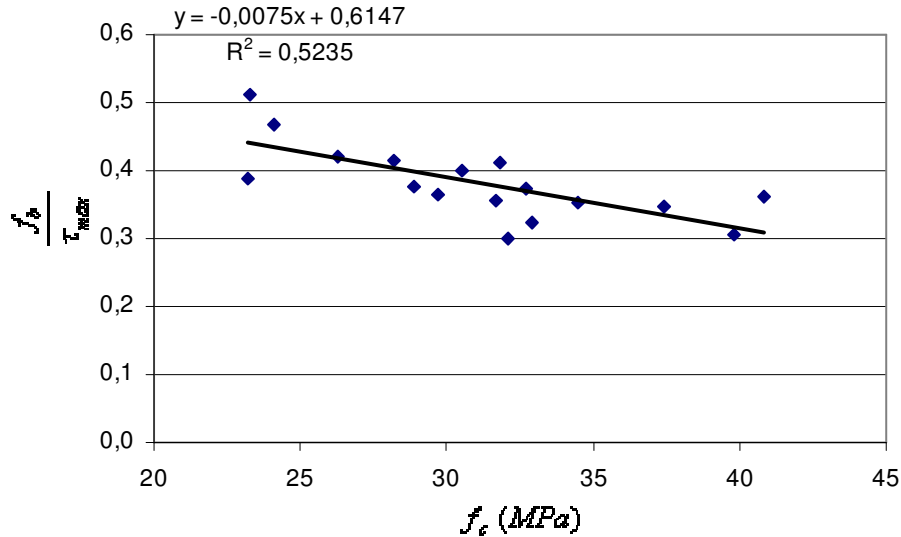


Figura 4.91 – Gráfico $\frac{f_b}{\tau_{m\acute{a}x}}$ vs. resistência à compressão do concreto f_c .

O comportamento da relação $\frac{f_b}{\tau_{m\acute{a}x}}$ vs. resistência à compressão do concreto f_c é mostrado no da Figura 4.91 e indica que a curva $\frac{f_b}{\tau_{m\acute{a}x}} \times f_c$ tem um ajuste de dados regular, mostrando que relação $\frac{f_b}{\tau_{m\acute{a}x}}$ diminui com o aumento da resistência à compressão do concreto.

Para os cálculos usais adotando-se $m = 10$ tem-se:

$$\tau_{m\acute{a}x} = 0,158 f_c \quad (4.19)$$

O cálculo do valor característico da relação $\frac{f_b}{\tau_{m\acute{a}x}}$ para um quantil de 5% na curva de Gauss:

$$\left(\frac{f_b}{\tau_{m\acute{a}x}} \right)_k = 0,381 - 1,65 \cdot 0,054 = 0,291 \quad (4.20)$$

então:

$$f_b = 0,291 \tau_{m\acute{a}x} = 0,291 \times 0,158 f_c \quad (4.21)$$

donde resulta

$$f_b = 4,60\% f_c \leq 1,44 \text{ MPa} \quad (4.22)$$

Se for adotado a relação prescrita pela NBR 6118/2003 tem-se:

$$f_{ct} = 0,3 f_c^{\frac{2}{3}} \quad (4.23)$$

Portanto, com uma análise análoga à anterior tem-se:

$$f_{b.} = 7,97\% f_c^{0,8335} \leq 1,44 MPa \quad (4.24)$$

A diferença entre essas duas sistemáticas é da ordem de 5% para $f_c = 20 MPa$, e para os concretos com maiores resistências o valor $f_{bk} = 1,44 MPa$ limita a tensão de aderência.

Com essa análise observa-se que concretos com $f_c < 23 MPa$ podem romper para $\tau_{máx} < f_{bk} = 1,44 MPa$. Entretanto, os resultados experimentais mostraram que esse valor de f_{bk} atende a todos os tipos de ensaios realizados.

As resistências à compressão dos corpos-de-prova ensaiados situam-se no intervalo $23 MPa \leq f_c \leq 40 MPa$, donde para casos em que $15 MPa \leq f_c \leq 22 MPa$ não se pode afirmar que a tensão característica de aderência seja $1,44 MPa$. Para confirmar esse óbice foram calculadas de acordo com a expressão 4.20 as tensões de aderência relativas ao intervalo $15 MPa \leq f_c \leq 22 MPa$ que são $0,690 MPa \leq f_b \leq 1,012 MPa$.

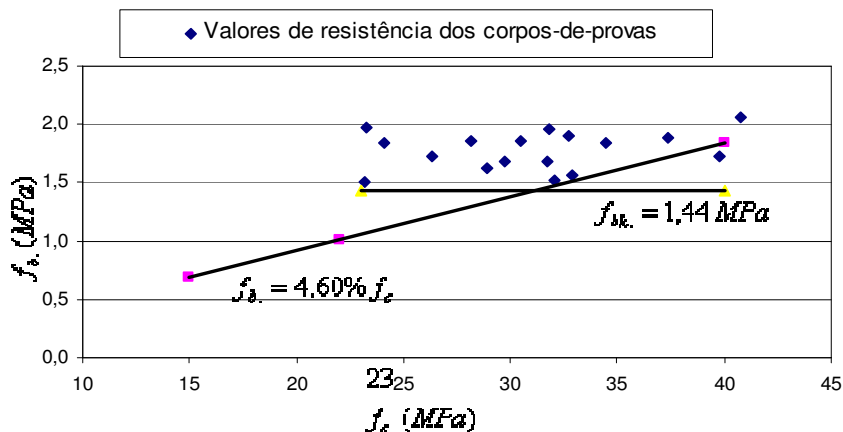


Figura 4.92 – Resistência de aderência para concretos com resistência f_c acima de $15 MPa$.

A Figura 4.92 mostra que $f_b = 4,60\% f_c$ pode ser usado a favor da segurança em concretos com $f_c < 23 MPa$.

5

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

5.1.

Conclusões

Este trabalho experimental estudou parâmetros que afetam os ensaios de aderência entre o concreto e o CFC por meio de ensaios tração-compressão de corpos-de-prova, compostos de dois cubos de concreto (móvel e fixo) ligados por tiras de tecidos de CFC coladas em suas laterais opostas. Os blocos tinham as mesmas características geométricas. Os parâmetros estudados foram tipo de carregamento atuante (carregamento monotônico crescente e carregamento em ciclos de carga e descarga), resistência à compressão do concreto ($f_c = 23,3 \text{ MPa}$; $f_c = 28,4 \text{ MPa}$ e $f_c = 37,1 \text{ MPa}$) e diferentes tipos de superfícies de aderência do CFC ao substrato de concreto (face lisa e face rugosa dos cubos de concreto).

Foram realizados 18 ensaios em corpos-de-prova de concreto variando-se os parâmetros. A execução dos ensaios de aderência ocorreu de forma satisfatória e apenas um ensaio não foi considerado nas análises.

Os resultados obtidos nos ensaios de aderência realizados neste estudo permitem concluir que:

1. Considerando os dados experimentais deste trabalho e de Meneghel (2005) o valor característico da resistência última de aderência foi de $f_{bk} = 1,44 \text{ MPa}$;
2. Para as diferentes resistências à compressão do concreto no intervalo estudado não se obteve uma formulação que indicasse a influência de f_c . Porém, nas equações 4.6, 4.7 e 4.8 tem-se o módulo de elasticidade do concreto E_c , que está associado à sua resistência à compressão, então essa dependência existe.

3. o valor de G_F obtido com a curva $G_F = f(\tau)$ usando-se $\tau = f_{bk}$ é superior ao valor G_{Fk} calculado com o modelo de Holzenkämpfer (1994) que adota uma curva $\tau \times s$ bilinear, concluindo-se que esse modelo fornece valores à favor da segurança;

4. tem-se com o critério de Coulomb-Mohr generalizado os limites $0,301 \leq \frac{f_b}{\tau_{m\acute{a}x}} \leq 0,511$ (Tabela 4.6), donde como um valor inicial pode-se estimar a tensão de aderência da ordem de 30% da tensão tangencial máxima resistida pelo substrato de concreto, isto é, $f_b = 0,291\tau_{m\acute{a}x}$ sendo $\tau_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2}\sqrt{f_c f_{ct}}$;

5. os diferentes modos de carregamentos estudados (monótonico crescente e carregamento em ciclos de carga e descarga) não influenciaram os valores das resistências últimas de aderência obtidas;

6. os diferentes tipos de superfícies do concreto (superfície lisa e superfície rugosa dos cubos), sobre os quais foram colados os CFC, pouco influenciaram as resistências últimas de aderência, dadas por $f_{bu} = \frac{F_u}{l_{b,efet} b_f}$. Para as superfícies rugosas o acréscimo nas resistências últimas de aderência foi da ordem de 5%;

7. a análise da resistência do substrato do concreto indica que para $f_c < 23MPa$ a resistência última pode ser inferior a $1,44MPa$, que é o valor encontrado para a tensão característica de aderência, logo pode ocorrer uma ruptura por deslocamento do concreto.

8. verifica-se que para concretos $15MPa \leq f_c \leq 22MPa$ pode ser adotada, à favor da segurança, uma relação linear entre f_b e f_c . Ressalta-se que esses valores têm a finalidade de orientar o projetista, pois são valores extrapolados.

9. o Boletim da Fib (2000) prescreve que substrato de concreto deve ter uma resistência mínima à tração de $1,5MPa$, de modo a ter-se um efetivo reforço

com CFC, daí a adoção da formulação adotada para se calcular f_b em função de

$$f_c \text{ e } m = \frac{f_c}{f_{ct,sp}}, \text{ ou adotando-se uma relação empírica entre } f_{ct,sp} \text{ e } f_c.$$

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros têm-se:

- realizar um estudo experimental para o ensaio de tração-tração com os mesmos parâmetros dos ensaios de tração-compressão realizados nesse trabalho, para permitir uma melhor avaliação da aderência, comparando-se os resultados fornecidos por esses dois tipos de ensaios;
- realizar uma análise numérica com o uso de um programa elaborado com método dos elementos finitos, usando-se os mesmos parâmetros dos ensaios de tração-compressão realizados nesse estudo, de modo a conceber uma sistemática para que seja possível fazer simulações numéricas;
- realizar o mesmo estudo experimental para o ensaio de tração-compressão utilizando-se tiras de CFC inclinadas com ângulo de inclinação até 10° , para avaliar a influência da mão-de-obra na qualidade e resistência do reforço executado;
- realizar ensaios de flexão utilizando-se uma camada de tecido com carregamento abrupto (carregamento de impacto);
- realizar ensaios de tração-compressão para cargas cíclicas;
- realizar ensaios de tração-compressão, tal como os desta pesquisa, mas utilizando-se diversos tipos de materiais compósitos.

6

Referências Bibliográficas

ADHIKARY, B.B. e MUTSUYOSHI, H. **Study on the bond between concrete and externally bonded CFRP sheet. Fibre reinforced plastics for reinforced concrete structures.** Proceedings of the fifth international conference. Cambridge, U.K., 2001. V.1. P. 371-378.

ALMAKT M.M.; BALÁZS G.L.; PILAKOUTAS (1998). **Strengthening of RC Elements by CFRP Plates Local Failure.** 2nd Int. PhD Symposium in Civil Engineering, Budapest.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI 440 F – 2000. **Guidelines for the selection, design and installation of fiber reinforced polymer (FRP) systems for external strengthening of concrete structures.** 97p., USA, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM – D3039/D3039, 2000 – **Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials.** USA.

ARAÚJO, A. C. N. (2002) **Estudo experimental do reforço à flexão de vigas de concreto armado utilizando compósitos com tecidos de fibras de carbono.** Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2002.

ARDUINI, M.; NANNI, A. (1997) **Parametric Study of Beams with Externally Bonded.** ACI Structural Journal, Setember – October, pp. 493 – 501.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto – procedimentos.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 9776: Agregados – **Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman.** 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 5738: **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto.** Rio de Janeiro, 1994.

BIZINDAVYI, L.; K. NEALE (1999). **Transfer Lengths and Bond Strengths for Composites bonded to Concrete.** ASCE Journal of Composites for Construction, **3** (4), pp.153 – 160.

BROSENS, K.; D. Van Gemert (1997). **Plate End Shear Design for External CFRP Laminates.** In: Fracture Mechanics of Concrete Structures, pp. 1793 – 1804.

CHAJES, M. J.; FINCH, W. W.; JANUSZKA, T. F. e THOMSON, T. A. **Bond and force transfer of composites material plates bonded to concrete.** ACI Structural Journal, 1996; 93 (2). P. 208-217.

CHEN, J.F.; TENG, J.G. **Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete.** Journal of Structural Engineering, 2001; 127 (7). P. 784-791.

CRUZ S. J.M.; BARROS J.A. O.; FARIA R. (2001). **Assessing the Embedded Length of Epoxy-Bonded Carbon Laminates by Pull-out Bending Test.** Proceedings of the conference in construction, J.Figueiras, L.Juvandes and R. Faria (eds), Porto, Portugal, 217-222.

FIB – Bulletin 14 External Bonded FRP Reinforcement for RC Structures 2001.

HARMON T.; VITKIP L. (1999). **Bond Development Between Carbon Fiber Reinforced Polymers and Concrete.** School of Engineering & Applied Science, Washington University.

HOLZENKÄMPFER, P. (1994). **Ingenieurmodelle des Verbunds Geklebter Bewehrung für Betonbauteile.** Tese de Doutorado. T.U. Braunschweig. Deutschland.

KHALIFA A.; ALKHRDAJI T.; NANNI A.; LANSBURG S.(1999). **Anchorage of Surface Mounted FRP Reinforcement.** Concrete international: Design and Construction, Vol 21, N°

KURIHARA, S.; MATSUI, S.; ALI, M. **Bonding shear strength of adhesives between concrete elements.** Repair, rehabilitation and maintenance of concrete

structures and innovations in design and construction. Fourth international conference, Seoul, Korea, 2001. P.551-569.

LEUNG C.K.Y.; Y. YANG (2002). **A Fracture - Based Model For Debonding of FRP Plate from Concrete Substrate**. 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, June 2-5, Columbia University, N. Y.

MACHADO, M. G. (2004) **Estudo Experimental da Ductilidade de Vigas em Concreto Armado Reforçadas à Flexão Utilizando Compósitos com Tecidos de Fibras de Carbono**. Dissertação de Mestrado, 301p. Puc-Rio, Rio de Janeiro.

MAEDA, TOSHIYA; ASANO, YASUHIKO; SATO, YASUHIKO; UEDA, TAMON; KAKUTA, YOSHIO (1997). **A Study on Bond Mechanism of Carbon Fiber Sheet**. Proceedings of the Third International Symposium on Non – Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Vol 1, Japan, pp.279 – 286.

MALEK, A.;SAADATMANESH, H.; EHSANI, M. (1998). **Prediction of Failure load of R/C Beams Strengthened with FRP plate Due to Stress Concentration at the Plate End**. ACI Structural Journal, March – April, pp.142 – 152.

MAZEN, M.A.; GYÖRGY L.B.; KYPROS P.(1998) **Strengthening of RC Elements by CFRP Plates Local Failure**. 2and Int. PhD Symposium in Civil Engineering, Budapest.

MENEGHEL, J. (2005) **Análise Experimental da Aderência entre o Concreto e Compósitos com Tecido de Fibras de Carbono**. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro.

MILLER B; NANNI A. (1999). **Bond Between CFRP Sheets and Concrete**. 5th Materials Congress, Cincinnati, OH, L.C. Bank Editor, Maio 10-12, Pp. 240-247.

NAKABA, K.; KANAKUBO, T.; FURUTA, T. e YOSHIZAWA, H. **Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete**. ACI Structural Journal, 2001; 98 (3). P.359-367.

NEUBAUER, U. N.; ROSTÁSY, F. S. **Bond failure of CFRP-plates at inclined cracks – Experiments and fracture mechanics model**. Forschungsarbeiten 1995-1999. Heft 144. iBMB, TU Braunschweig, Deutschland, 1999. pp.59-62.

RHEOTEC Catalogo para Aditivos & Auxiliares para concreto; Fibra de Carbono e Resinas Epóxicas, São Paulo, Brasil (s.d.).

SÁNCHEZ E., BARBOSA M.T.G., VELASCO M.S.L., EINSFELD R. A., FERREIRA, T.V.B. (2004) **Equação Diferencial da Adêrcia Entre Materiais Compósitos de Fbra de Carbono e o Concreto**. Jornadas Sud-Americanas de Ingenieria Estructural, Mendoza, Argentina. CD-ROM.

SÁNCHEZ, E. **Reforço de Vigas de Concreto Estrutural Através de Chapas Metálicas Coladas com Epóxi**. Seminário: Reforço e Recuperação de Estruturas, Juiz de Fora, 1998. v.1, n.2 pp. 28-39.

TÄLJSTEN, B. (1996). **Strengthening of Concrete Prisms using the Plate Bonding Technique**. Int. J. of Fracture, 82, pp. 253 – 266.

TÄLJSTEN, B. (1997). **Strengthening of Concrete Structures**. Proceedings of FIP Symposium, Innsbruck , March, pp. 873 – 881.

YANG X., WEI J., NANNI A., DHARANI L.R. (2001). **Stresses in FRP Laminates Wrapped Around Corners**. Proc., ASC 16th Annual Conference – Virginia Tech. Blacksburg, V.A., September 9-12, M.W. Hyer and A.C. Loos, Eds., Paper 088, CD-ROM.

YANG X.; NANNI A.; CHEN G. (2001). **Effect of Corner Radius on the Performance of Externally Bonded Reinforcement**. Non-Metallic Reinforcement for Concrete Structures – FRPRCS- 5, Combrige, July 16-18, p.197-204.

YUAN, H.; Z. S. WU; YOSHIZAWA (2001). **Theoretical Solutions of Interfacial Stress Transfer of Externally Bonded Steel/Composite Laminates**. Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, pp. 27 – 39.

Anexo A

Análise Granulométrica e Massas dos Agregados

De acordo com a NBR 7217/1987 foi realizada a determinação da composição granulométrica dos agregados graúdo e miúdo para concreto. A quantidade de material utilizado foi de 3000 g de agregado graúdo e 1000 g de agregado miúdo. Foram determinados o módulo de finura e a dimensão máxima característica dos agregados. As Tabelas A.1 e A.2 mostram, respectivamente, os valores dos resíduos passantes e retidos nas peneiras utilizadas no ensaio para os agregados miúdo e graúdo.

Os ensaios foram realizados Laboratório de Estruturas e Matérias (LEM) da PUC-Rio,

Tabela A.1 – Resultados da análise granulométrica do agregado miúdo: resíduos passantes e retidos.

Peneiras	Malha (mm)	Resíduos		Resíduos acumulados (%)	
		g	%	Passado	Retido
3"	76,2				
2"	50,8				
1 1/2"	38,1				
1"	25,4				
3/4"	19,1				
1/2"	12,7				
3/8"	9,52				
1/4"	6,35			100	
4	4,76	18	1,8	98,2	1,8
8	2,38	78	7,8	90,4	9,6
16	1,19	199	19,9	70,5	29,5
30	0,59	299	29,9	40,6	59,4
50	0,297	301	30,1	10,5	89,5
100	0,149	71	7,1	3,4	96,6
200	0,074				
Fundo		34	3,4	0	
Total		1000	100		286,4

Tabela A.2 – Resultados da análise granulométrica do agregado graúdo: resíduos passantes e retidos.

Peneiras	Malha (mm)	Resíduos		Resíduos acumulados (%)	
		g	%	Passado	Retido
3"	76,2				
2"	50,8				
1 1/2"	38,1				
1"	25,4			100	
3/4"	19,1	46	1,5	98,5	1,5
1/2"	12,7				
3/8"	9,52	2110	70,3	28,1	71,9
1/4"	6,35				
4	4,76	654	21,8	6,3	92,1
8	2,38				92,1
16	1,19				92,1
30	0,59				92,1
50	0,297				92,1
100	0,149				92,1
200	0,074				92,1
Fundo		190	6,3		
Total		3000	100		626,0

➤ **Dimensão máxima característica do agregado**

A dimensão máxima característica do agregado é a porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal.

- Agregado miúdo

$$D_{\max} = 4,76 \text{ mm} \quad (\text{A.1})$$

- Agregado graúdo

$$D_{\max} = 19,1 \text{ mm} \quad (\text{A.2})$$

➤ **Módulo de finura:**

O módulo de finura do agregado foi calculado pela soma das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal e dividindo esta soma por 100 %.

- Agregado miúdo

$$MF = \frac{286,4}{100} = 2,86 \quad (\text{A.3})$$

- Agregado graúdo

$$MF = \frac{686,9}{100} = 6,87 \quad (\text{A.4})$$

➤ **Massa específica real do agregado miúdo**

A massa específica real do agregado miúdo foi obtida de acordo com a NBR 9776 utilizando o Frasco de Chapman. O cálculo foi feito segundo a seguinte expressão:

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (\text{A.5})$$

onde γ é a massa específica do agregado miúdo em g/cm^3 , e L é a leitura do frasco (volume ocupado pelo conjunto água – agregado miúdo) em cm^3 .

A massa inicial utilizada foi de 500 g e colocou-se água até a marca de 200 cm^3 do frasco. A leitura feita foi de 389 cm^3 , obtendo-se o seguinte valor para a massa específica:

$$\gamma = \frac{500}{389 - 200} = 2,65\text{ g/cm}^3 \quad (\text{A.6})$$

➤ **Massa específica real do agregado graúdo**

A massa específica real do agregado graúdo foi obtida utilizando-se o vaso sifonado com capacidade de 5.000 ml, sendo que a massa inicial utilizada foi de 1.000 g colocou-se água até a marca de 1.000 cm^3 do frasco e a leitura feita foi de 1.382 cm^3 , obtendo-se o seguinte valor para a massa específica:

$$\delta_b = \frac{1000}{1382 - 1000} = 2,62 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{A.7})$$

➤ **Massa específica aparente do agregado miúdo**

A massa específica aparente foi determinada utilizando um recipiente retangular e calculada dividindo-se a massa de brita contida no recipiente pelo volume do recipiente.

$$V_{\text{recipiente}} = 15 \times 31,5 \times 31,5 \text{ cm}^3 = 14883,75 \text{ cm}^3 \quad (\text{A.8})$$

$$P_{\text{recipiente}} = 7,3 \text{ kg} \quad (\text{A.9})$$

$$P_a = 31,1 - 7,3 = 23,8 \text{ kg} = 23800 \text{ g} \quad (\text{A.10})$$

$$\gamma_a = \frac{23800}{14883,75} = 1,60 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{A.11})$$

➤ **Massa específica aparente do agregado graúdo**

A massa específica aparente foi determinada utilizando um recipiente retangular e calculada dividindo-se a massa de brita contida no recipiente pelo volume do recipiente.

$$P_b = 31,3 - 7,3 = 24,0 \text{ kg} = 24000 \text{ g} \quad (\text{A.12})$$

$$\gamma_b = \frac{24000}{14883,75} = 1,61 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{A.13})$$

Anexo B

Resultado dos Ensaios de Módulo de Elasticidade do Concreto

Este anexo mostra os dados obtidos no ensaio para determinação do módulo de elasticidade do concreto, por meio de tabelas e gráficos, para as três dosagens do concreto dos corpos-de-prova.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Matérias (LEM) da PUC-Rio.

As tabelas a seguir mostram o carregamento aplicado de acordo com a NBR 8522, as tensões, as deformações obtidas pela média dos dois extensômetros e o módulo de elasticidade secante para cada corpo-de-prova utilizado nos ensaios.

Conforme visto no capítulo 3, o módulo de deformação secante é calculado de acordo com a seguinte equação.

$$E_c = \frac{\sigma_n - \sigma_{inf}}{\varepsilon_n - \varepsilon_0} \quad (B.1)$$

B.1

Série de concretagem I; corpos-de-prova com $f_c = 23,32 \text{ MPa}$

➤ CP1

Tabela B.1 – Resultados obtidos do ensaio de módulo de elasticidade do concreto para o CP1 da série I.

<i>Leituras</i>	<i>Carga P (kN)</i>	<i>Tensão σ_c (MPa)</i>	<i>Deformação esp. Média ε_c (‰)</i>	<i>Tensão ($\sigma_n - \sigma_{inf}$) (MPa)</i>	<i>Deformação Esp. ($\varepsilon_n - \varepsilon_{inf}$) (‰)</i>	<i>Módulo de Elasticidade Secante E_c (GPa)</i>
	2,070	-0,264	0,01519			
	-3,988	-0,508	-0,00118			
0,5 MPa	-4,368	-0,556	-0,00176			

0,1 f_c	-20,021	-2,550	-0,06355	-1,994	-0,06179	32,27
	-21,032	-2,679	-0,0656	-2,123	-0,06384	
0,2 f_c	-43,690	-5,566	-0,15349	-5,009	-0,15173	33,01
	-43,661	-5,562	-0,15488	-5,005	-0,15312	
0,3 f_c	-58,432	-7,444	-0,233435	-6,887	-0,231675	29,73
	-59,241	-7,547	-0,240975	-6,990	-0,239215	
0,4 f_c	-78,341	-9,980	-0,359685	-9,423	-0,357925	26,33
	-80,257	-10,224	-0,38331	-9,667	-0,38155	
0,5 f_c	-98,046	-12,490	-0,51222	-11,934	-0,51046	23,38
	-98,680	-12,571	-0,528845	-12,014	-0,527085	
0,6 f_c	-119,11	-15,174	-0,688045	-14,618	-0,686285	21,30
	-117,28	-14,940	-0,718945	-14,384	-0,717185	
0,7 f_c	-136,97	-17,449	-0,915185	-16,893	-0,913425	18,49
	-138,74	-17,674	-0,964725	-17,118	-0,962965	
0,8 f_c	-156,38	-19,922	-1,163775	-19,366	-1,162015	16,67
	-159,41	-20,308	-1,3096	-19,752	-1,30784	
	-162,10	-20,651	-1,339495			
	-165,13	-21,036	-1,39677			
	-171,01	-21,785	-1,491815			
	-175,93	-22,413	-1,60418			
	-183,10	-23,326	-1,777035			
	-187,91	-23,938	-1,98781			
	-191,21	-24,358	-2,30282			
	-192,18	-24,482	-2,71078			
	-189,39	-24,126	-3,364955			
Ruptura	-173,44	-22,095	-2,64847			

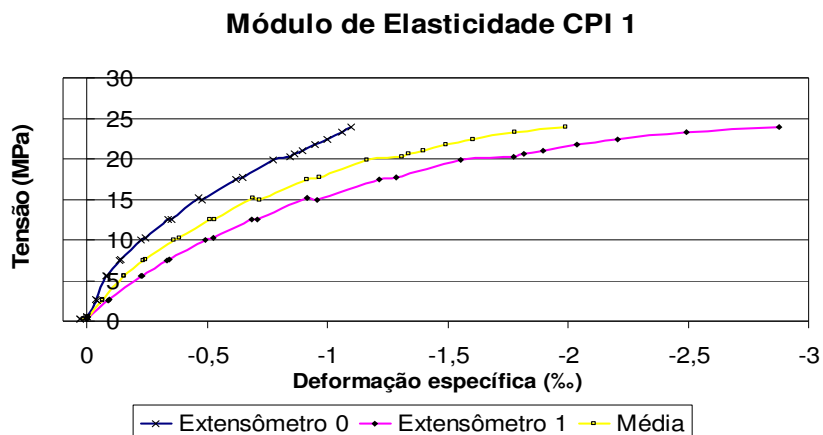


Figura B.1 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_c = 23,32\text{MPa}$.

➤ **CP2**

Tabela B. 2 – Resultados obtidos do ensaio de módulo de elasticidade do concreto para o CP2 dos da série I.

<i>Leituras</i>	<i>Carga P (kN)</i>	<i>Tensão σ_c (MPa)</i>	<i>Deformação esp. Média ϵ_c (‰)</i>	<i>Tensão ($\sigma_n - \sigma_{inf}$) (MPa)</i>	<i>Deformação Esp. ($\epsilon_n - \epsilon_{inf}$) (‰)</i>	<i>Módulo de Elasticidade Secante E_c (GPa)</i>
	-2,70	-0,344	0,01365			
	-2,71	-0,345	0,01354			
0,5MPa	-4,01	-0,510	0,00973			
	-5,90	-0,752	0,01165	-0,241	0,00193	
0,1 f_c	-20,35	-2,592	-0,06668	-2,082	-0,07640	27,25
	-20,75	-2,643	-0,07080	-2,132	-0,08053	
0,2 f_c	-40,74	-5,190	-0,18472	-4,680	-0,19445	24,07
	-41,74	-5,317	-0,19712	-4,807	-0,20684	
0,3 f_c	-59,53	-7,583	-0,31113	-7,072	-0,32085	22,04
	-58,58	-7,462	-0,32133	-6,951	-0,33105	
0,4 f_c	-79,49	-10,126	-0,45708	-9,616	-0,46681	20,60
	-78,65	-10,019	-0,47951	-9,509	-0,48924	

0,5 f_c	-98,39	-12,534	-0,62665	-12,024	-0,63637	18,89
	-97,70	-12,446	-0,65696	-11,936	-0,66668	
0,6 f_c	-117,37	-14,952	-0,82841	-14,441	-0,83813	17,23
	-125,86	-16,033	-0,91883	-15,523	-0,92855	
0,7 f_c	-136,53	-17,392	-1,06283	-16,881	-1,07255	15,74
	-138,76	-17,677	-1,19545	-17,166	-1,20518	
0,8 f_c	-155,93	-19,864	-1,44220	-19,354	-1,45193	13,33
	-159,15	-20,274	-1,68260	-19,763	-1,69233	
	-164,06	-20,900	-1,72370	-20,389	-1,73343	
	-167,09	-21,285	-1,77002	-20,775	-1,77974	
	-169,07	-21,538	-1,79944	-21,027	-1,80917	
	-170,33	-21,698	-1,83796	-21,188	-1,84769	
	-172,10	-21,924	-1,88092	-21,413	-1,89065	
	-172,31	-21,950	-1,92634	-21,439	-1,93606	
Ruptura	-173,91	-22,154	-2,03317	-21,644	-2,04290	

Módulo de Elasticidade CPI 2

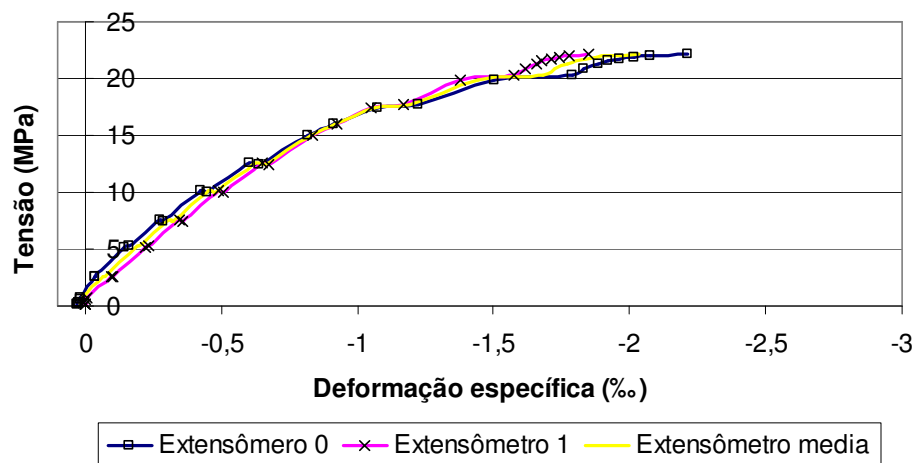


Figura B.2 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP2 dos corpos-de-prova com $f_c = 23,32MPa$.

B.2**Série de concretagem II; corpos-de-prova com $f_c = 28,42MPa$** **➤ CP1**

Tabela B. 3 – Resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP1 da série II.

<i>Leituras</i>	<i>Carga P (kN)</i>	<i>Tensão σ_c (MPa)</i>	<i>Deformação esp. Média ϵ_c (‰)</i>	<i>Tensão ($\sigma_n - \sigma_{inf}$) (MPa)</i>	<i>Deformação Esp. ($\epsilon_n - \epsilon_{inf}$) (‰)</i>	<i>Módulo de Elasticidade Secante E_c (GPa)</i>
0,5MPa	-4,15	-0,53	0,0080			
0,1 f_c	-28,59	-3,64	-0,0712	-3,113	-0,0792	39,2957
	-29,34	-3,74	-0,0650			
0,2 f_c	-55,22	-7,03	-0,1699	-6,505	-0,1779	36,5599
	-56,69	-7,22	-0,1701			
0,3 f_c	-82,63	-10,53	-0,2836	-9,996	-0,2916	34,2768
	-84,19	-10,72	-0,2890			
0,4 f_c	-111,04	-14,15	-0,4157	-13,616	-0,4237	32,1350
	-110,04	-14,02	-0,4160			
0,5 f_c	-136,70	-17,41	-0,5651	-16,884	-0,5731	29,4619
	-137,08	-17,46	-0,5799			
0,6 f_c	-164,29	-20,93	-0,7488	-20,399	-0,7568	26,9527
	-166,28	-21,18	-0,7960			
0,7 f_c	-187,45	-23,88	-0,9489	-23,350	-0,9569	24,4007
	-187,69	-23,91	-0,9596			
0,8 f_c	-191,37	-24,38	-0,9940			
	-191,31	-24,37	-1,0147			
	-190,42	-24,26	-1,0167			
	-190,12	-24,22	-1,0598			
	-190,80	-24,31	-1,0656			

	-190,99	-24,33	-1,0705			
	-192,46	-24,52	-1,0791			
	-195,11	-24,86	-1,0960			
	-194,53	-24,78	-1,1002			
	-193,51	-24,65	-1,1010			
	-194,89	-24,83	-1,1077			
	-202,40	-25,78	-1,1543			
	-203,87	-25,97	-1,1735			
	-205,24	-26,15	-1,1909			
	-206,58	-26,32	-1,2032			
	-208,27	-26,53	-1,2259			
	-210,83	-26,86	-1,2870			
	-211,97	-27,00	-1,3110			
	-213,88	-27,25	-1,3400			
	-217,12	-27,66	-1,3855			
	-219,35	-27,94	-1,4259	-27,413	-1,4339	19,1176
	-219,76	-27,99	-1,4586			
	-220,63	-28,11	-1,4767			
	-217,79	-27,74	-1,6992			
	-220,16	-28,05	-1,7284			
	-222,57	-28,35	-1,7617			
Ruptura	-223,04	-28,41	-1,8057			

Módulo de Elasticidade CPII 1

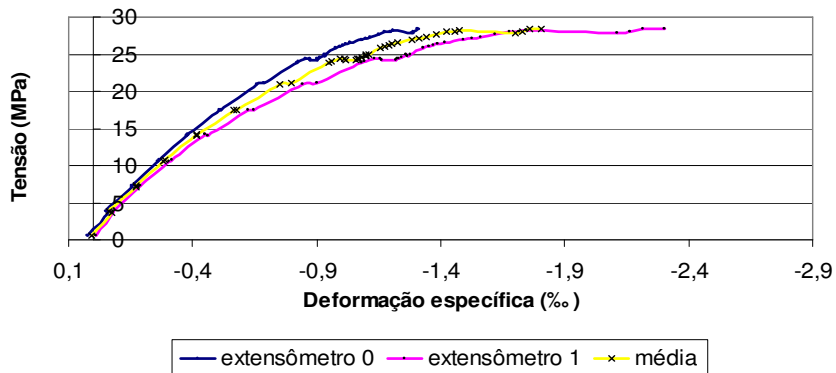


Figura B.3 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP3 dos corpos-de-prova com $f_c = 28,42MPa$.

B.3**Série de concretagem III; corpos-de-prova com $f_c = 37,08\text{MPa}$** **➤ CP1**

Tabela B.4 – Resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP1 da série III.

<i>Leituras</i>	<i>Carga P (kN)</i>	<i>Tensão σ_c (MPa)</i>	<i>Deformação esp. Média ϵ_c (‰)</i>	<i>Tensão ($\sigma_n - \sigma_{inf}$) (MPa)</i>	<i>Deformação Esp. ($\epsilon_n - \epsilon_{inf}$) (‰)</i>	<i>Módulo de Elasticidade Secante E_c (GPa)</i>
0,5 MPa	-4,14	-0,53	-0,0149			
	-6,63	-0,84	-0,0162			
0,1 f_c	-33,28	-4,24	-0,1308	-3,71	-0,0994	37,37
	-33,81	-4,31	-0,1323			
0,2 f_c	-63,21	-8,05	-0,2783	-7,52	-0,2311	32,56
	-63,96	-8,15	-0,2824			
0,3 f_c	-94,19	-12,00	-0,4377	-11,47	-0,3790	30,26
	-97,22	-12,38	-0,4553			
0,4 f_c	-126,20	-16,08	-0,6117	-15,55	-0,5426	28,66
	-129,84	-16,54	-0,6392			
0,5 f_c	-157,34	-20,04	-0,7920	-19,52	-0,7124	27,39
	-162,41	-20,69	-0,8317			
0,6 f_c	-188,26	-23,98	-0,9854	-23,46	-0,8942	26,23
	-190,53	-24,27	-1,0350			
0,7 f_c	-221,97	-28,28	-1,2223	-27,75	-1,1143	24,90
	-220,63	-28,11	-1,2828			
0,8 f_c	-250,66	-31,93	-1,5071	-31,40	-1,3792	22,77
	-249,62	-31,80	-1,6034			
	-254,05	-32,36	-1,6318			
	-257,93	-32,86	-1,6547			

	-261,62	-33,33	-1,6872			
	-265,35	-33,80	-1,7302			
	-272,70	-34,74	-1,8250			
	-275,12	-35,05	-1,8603			
	-279,04	-35,55	-1,9312			
	-280,06	-35,68	-1,9542			
	-284,72	-36,27	-2,0245			
	-286,77	-36,53	-2,0519			
	-290,64	-37,02	-2,1209			
	-293,45	-37,38	-2,1856			
	-301,10	-38,36	-2,4002			
Ruptura	-301,75	-38,44	-2,4762			

Módulo de Elasticidade CP111 1

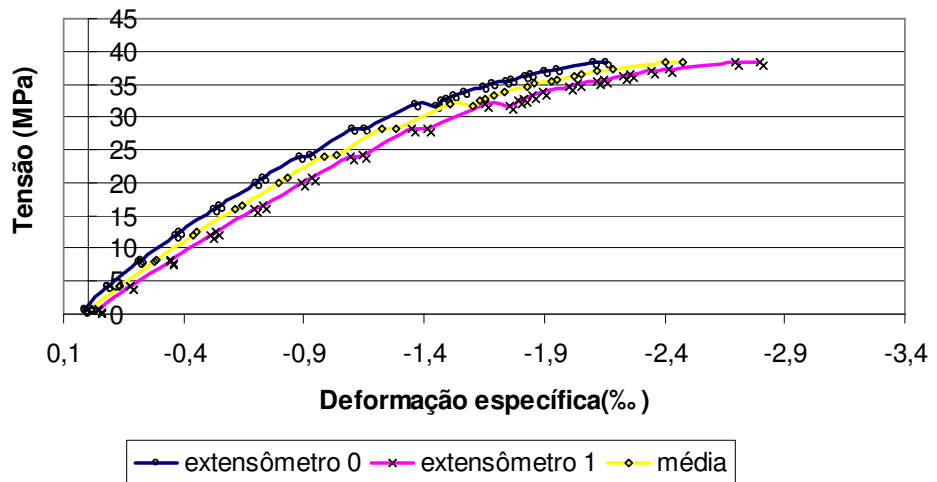


Figura B.4 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_c = 37,08MPa$.

➤ CP2

Tabela B.5 – Resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP2 dos corpos-de-prova da série III.

<i>Leituras</i>	<i>Carga</i> P (kN)	<i>Tensão</i> σ_c (MPa)	<i>Deformação</i> <i>esp.</i> <i>Média</i> ϵ_c (‰)	<i>Tensão</i> $(\sigma_n - \sigma_{inf})$ (MPa)	<i>Deformação</i> <i>Esp.</i> $(\epsilon_n - \epsilon_{inf})$ (‰)	<i>Módulo de</i> <i>Elasticidade</i> <i>Secante</i> E_c (GPa)
0,5 MPa	-4,07	-0,52	0,0112			
	-5,45	-0,69	0,0082			
0,1 f_c	-33,31	-4,24	-0,1162	-3,72	-0,1273	29,24
	-33,57	-4,28	-0,1046			
0,2 f_c	-62,54	-7,97	-0,2368	-7,45	-0,2480	30,04
	-65,07	-8,29	-0,2312			
0,3 f_c	-94,58	-12,05	-0,3745	-11,53	-0,3856	29,90
	-93,45	-11,90	-0,3552			
0,4 f_c	-124,24	-15,83	-0,5058	-15,31	-0,5169	29,61
	-125,47	-15,98	-0,4983			
0,5 f_c	-157,81	-20,10	-0,6608	-19,58	-0,6720	29,15
	-163,35	-20,81	-0,6737			
0,6 f_c	-186,83	-23,80	-0,8149	-23,28	-0,8261	28,18
	-187,68	-23,91	-0,8312			
0,7 f_c	-219,22	-27,93	-1,0062	-27,41	-1,0174	26,94
	-213,21	-27,16	-0,9970			
0,8 f_c	-250,31	-31,89	-1,2351	-31,37	-1,2463	25,17
	-250,65	-31,93	-1,3064			
	-266,04	-33,89	-1,3831			
	-279,23	-35,57	-1,5275			
Ruptura	-280,36	-35,72	-1,9365			

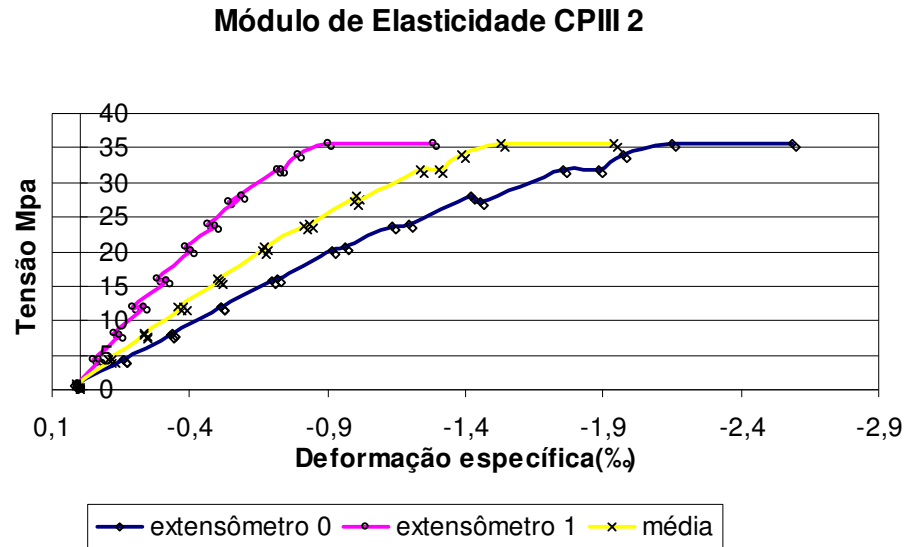


Figura B.5 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP2 dos corpos-de-prova com $f_c = 37,08MPa$.

Anexo C

Ensaio de Resistência à Tração do CFC

As tabelas e gráficos constantes desse anexo mostram os resultados dos ensaios de resistência à tração do tecido de fibra de Carbono. realizados na máquina EMIC modelo DL 10.000 com capacidade de 100 *kN*, no Laboratório de ensaios Mecânicos do departamento de Materiais do IME - Instituto Militar de Engenharia –Rio de Janeiro.

➤ CP1

Tabela C.1 – Leituras do indicador manual de deformações VISHAY, no ensaio de resistência à tração do CFC do CP1.

Carga <i>P</i> (<i>kN</i>)	Tensão σ_f (<i>MPa</i>)	Deformação Específica ϵ_f ($\mu\epsilon$)
0	0	0
0,5	202,02	1160
1	404,04	2010
1,5	606,06	2860
2	808,08	3650
2,5	1010,10	3930
3	1212,12	4890
3,5	1414,14	5820
4	1616,16	6680
4,5	1818,18	7510
5	2020,20	8480
5,5	2222,22	9880
6	2424,24	10500
6,5	2626,26	11540
7	2828,28	12280
7,5	3030,30	13150
7,76	3136,81	13530

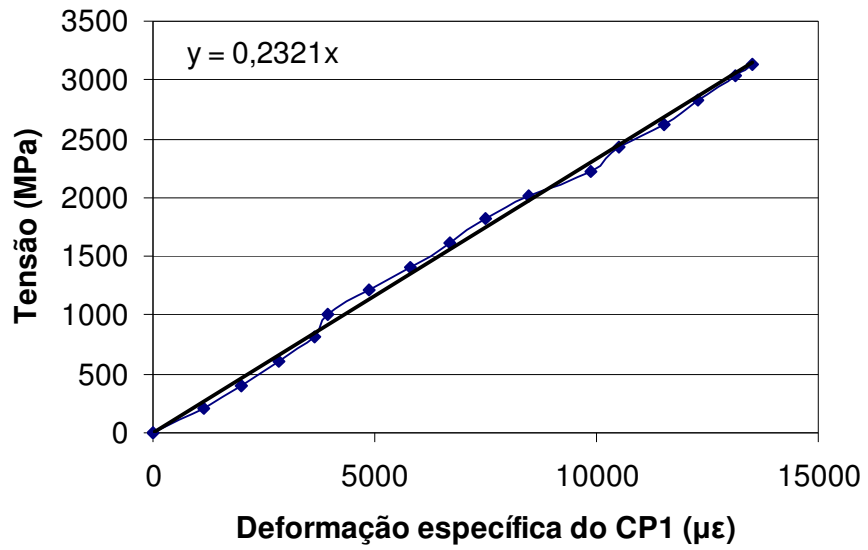


Figura C.1 – Gráfico tensão x deformação específica do o CP1.

➤ CP2

Tabela C.2 – Leituras do indicador manual de deformações VISHAY, no ensaio de resistência à tração do CFC do CP2.

Carga P (kN)	Tensão σ_f (MPa)	Deformação Específica ϵ_f ($\mu\epsilon$)
0	0	0
0,5	202,02	1010
1	404,04	1620
1,5	606,06	2400
2	808,08	3130
2,5	1010,10	3960
3	1212,12	4780
3,5	1414,14	5560
4	1616,16	6420
4,5	1818,18	7300
5	2020,20	8090
5,5	2222,22	8950
6	2424,24	9920
6,5	2626,26	10740
7	2828,28	11470
7,41	2993,62	12200

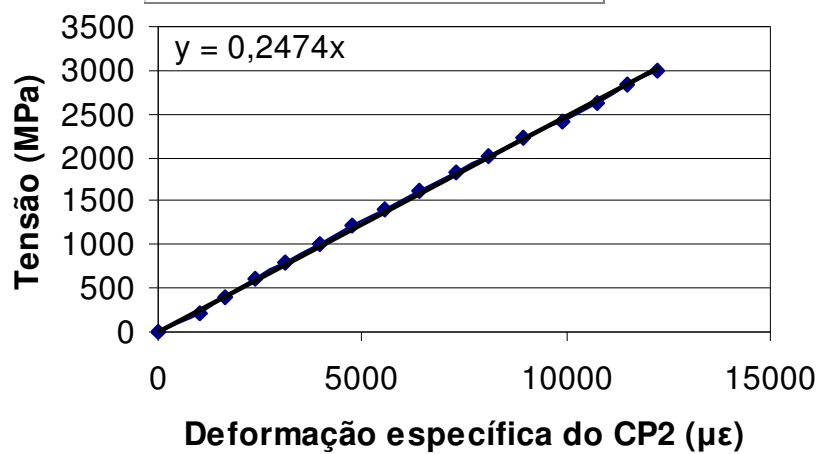


Figura C.2 – Gráfico tensão x deformação específica do o CP2.

➤ **CP3**

Tabela C.3 – Leituras do indicador manual de deformações VISHAY, no ensaio de resistência à tração do CFC do CP3.

Carga P (kN)	Tensão σ_f (MPa)	Deformação Específica ϵ_f ($\mu\epsilon$)
0	0	0
0,5	202,0202	750
1	404,0404	1430
1,5	606,0606	2200
2	808,0808	2780
2,5	1010,101	3520
3	1212,121	4240
3,5	1414,141	5120
4	1616,162	5820
4,5	1818,182	6590
5	2020,202	10280
5,5	2222,222	11400
6,06	2448,08	12480

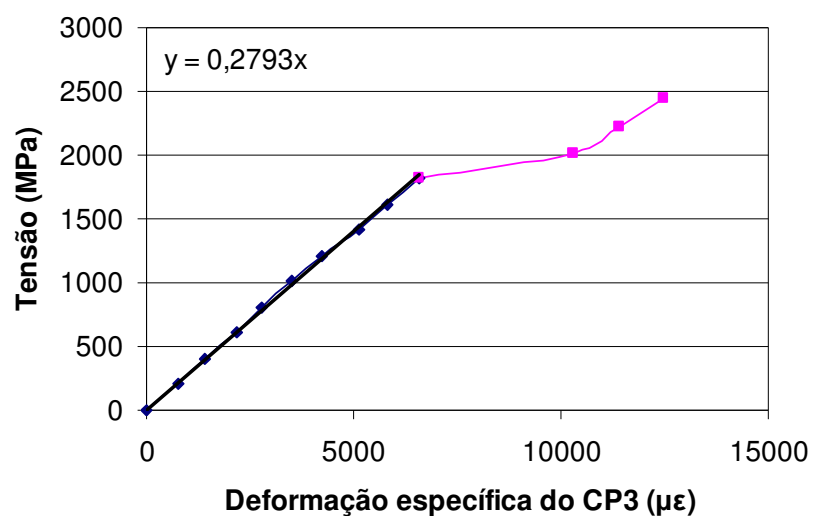


Figura C.3 – Gráfico tensão x deformação específica do o CP3.

➤ CP4

Tabela C.4 – Leituras do indicador manual de deformações VISHAY, no ensaio de resistência à tração do CFC do CP4.

Carga P (kN)	Tensão σ_f (MPa)	Deformação Específica ϵ_f ($\mu\epsilon$)
0	0	0
0,5	202,02	530
1	404,04	1400
1,5	606,06	2210
2	808,08	2890
2,5	1010,10	3650
3	1212,12	4490
3,5	1414,14	5160
4	1616,16	5920
4,5	1818,18	6730
5	2020,20	7580
5,5	2222,22	8200
6,24	2523,07	9080

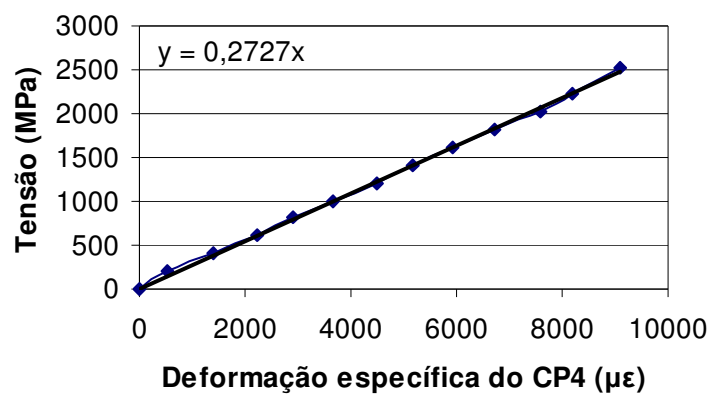


Figura C.4 – Gráfico tensão x deformação específica do o CP4.

➤ CP 5

Tabela C.5 – Leituras do indicador manual de deformações VISHAY, no ensaio de resistência à tração do CFC do CP5.

Carga P (kN)	Tensão σ_f (MPa)	Deformação Específica ϵ_f ($\mu\epsilon$)
0	0	0
0,5	202,02	1040
1	404,04	1930
1,5	606,06	2790
2	808,08	3940
2,5	1010,10	4610
3	1212,12	5560
3,5	1414,14	6240
4	1616,16	7100
4,5	1818,18	8050
5	2020,20	8880
5,5	2222,22	9930
6	2424,24	10600
6,5	2626,26	11210
6,76	2729,94	11840

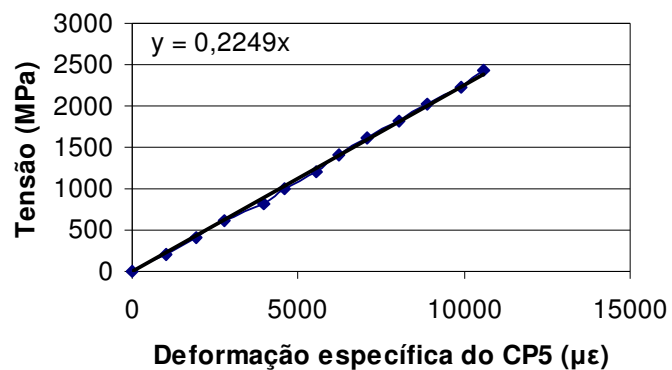


Figura C.5 – Gráfico tensão x deformação específica do o CP5.

➤ CP 6

Tabela C.6 – Leituras do indicador manual de deformações VISHAY, no ensaio de resistência à tração do CFC do CP6.

Carga P (kN)	Tensão σ_f (MPa)	Deformação Específica ϵ_f ($\mu\epsilon$)
0	0	0
0,5	202,02	1260
1	404,04	2120
1,5	606,06	2980
2	808,08	3940
2,5	1010,10	4660
3	1212,12	5480
3,5	1414,14	6320
4	1616,16	7170
4,5	1818,18	8040
5	2020,20	8850
5,5	2222,22	9770
5,99	2418,51	10390

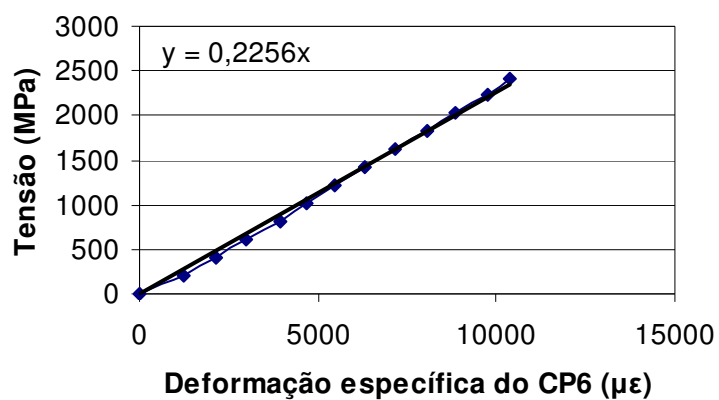


Figura C.6 – Gráfico tensão x deformação específica do o CP6.

Anexo D Resultados dos Ensaios de Aderências

Este anexo mostra os gráficos obtidos no ensaio de aderência para as deformações específicas lidas nos sete extensômetros colados ao tecido de CFC e os deslocamentos dos LVDT's posicionados nos blocos moveis. A carga corresponde a força lida pela célula de carga durante os ensaios dos corpos-de-prova.

D.1 Resultado do ensaio MCLI-1

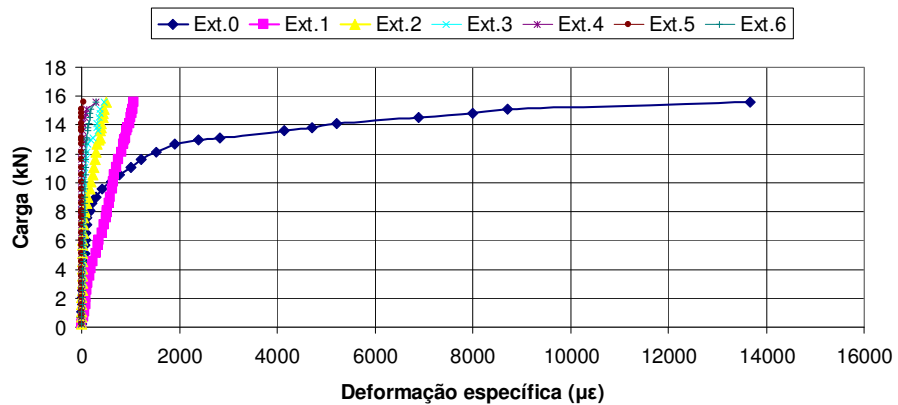


Figura D.1 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCLI-1.

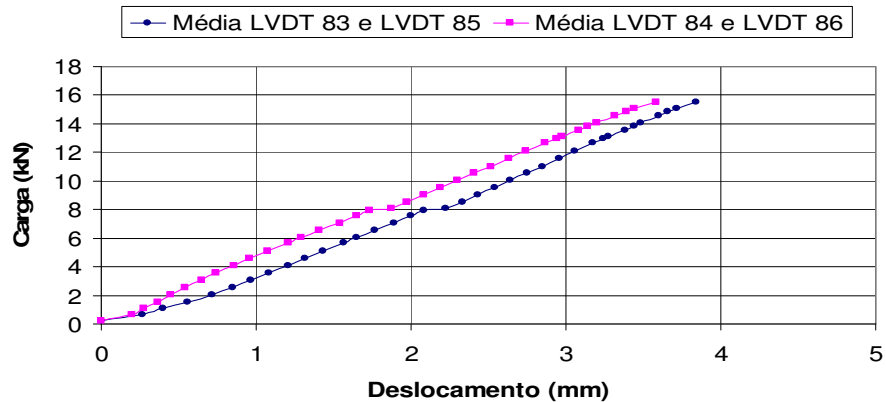


Figura D.2 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCLI-1.

D.2
Resultado do ensaio MCLI-2

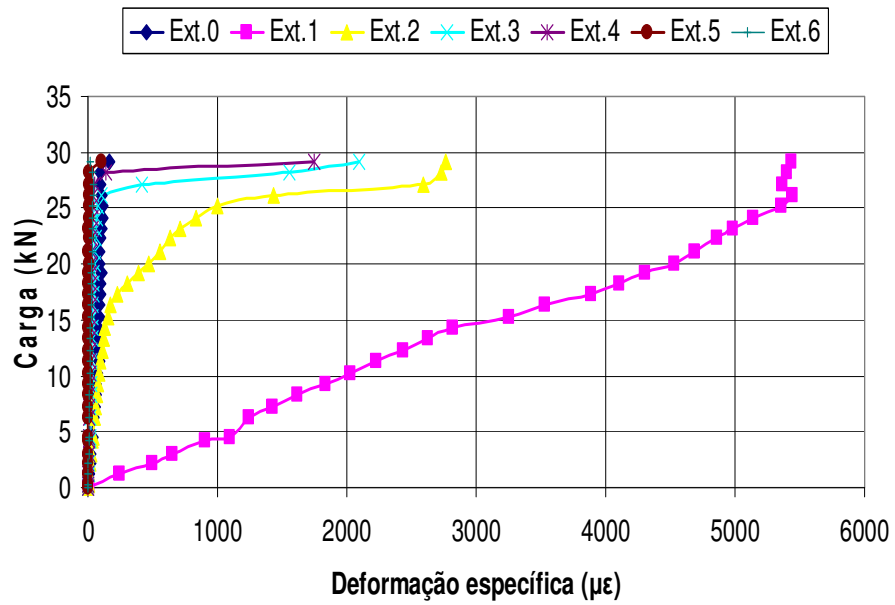


Figura D.3 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCLI-2.

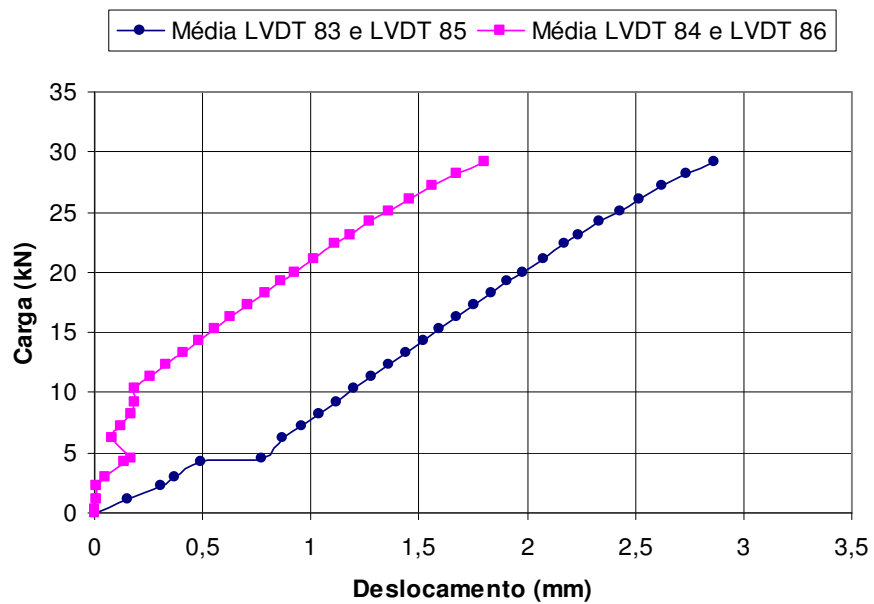


Figura D.4 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCLI-2.

D.3
Resultado do ensaio MCLII-1

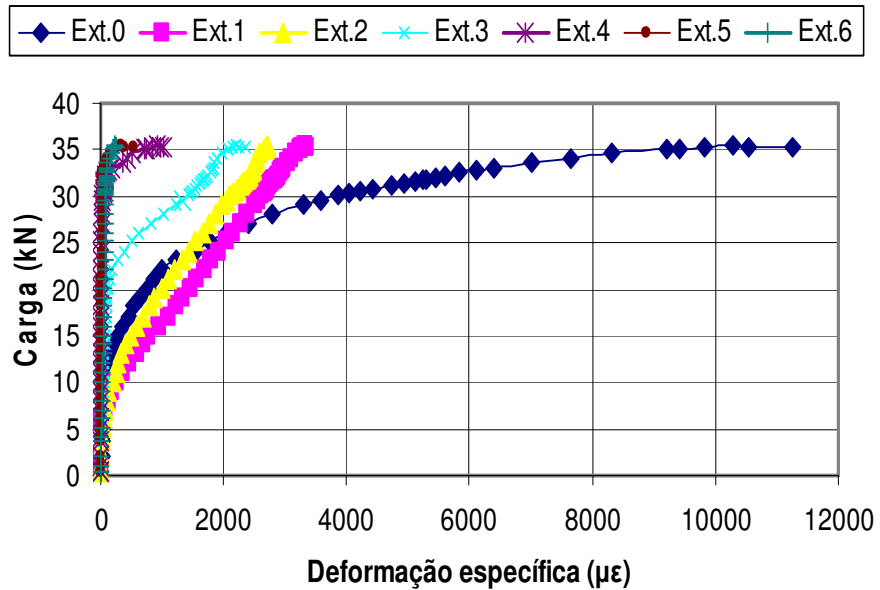


Figura D.5 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCLII-1.

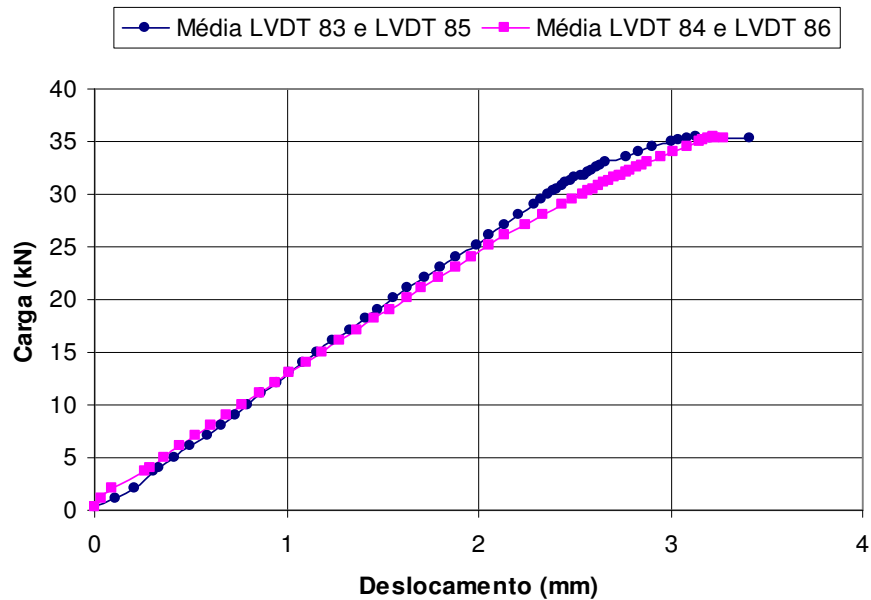


Figura D.6 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCLII-1.

D.4
Resultado do ensaio MCLII-2

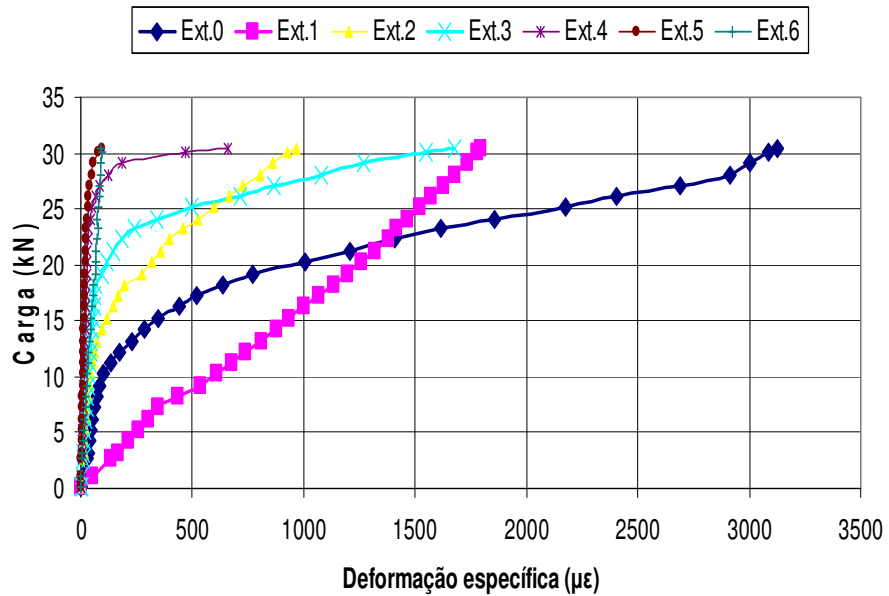


Figura D.7 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCLII-2.

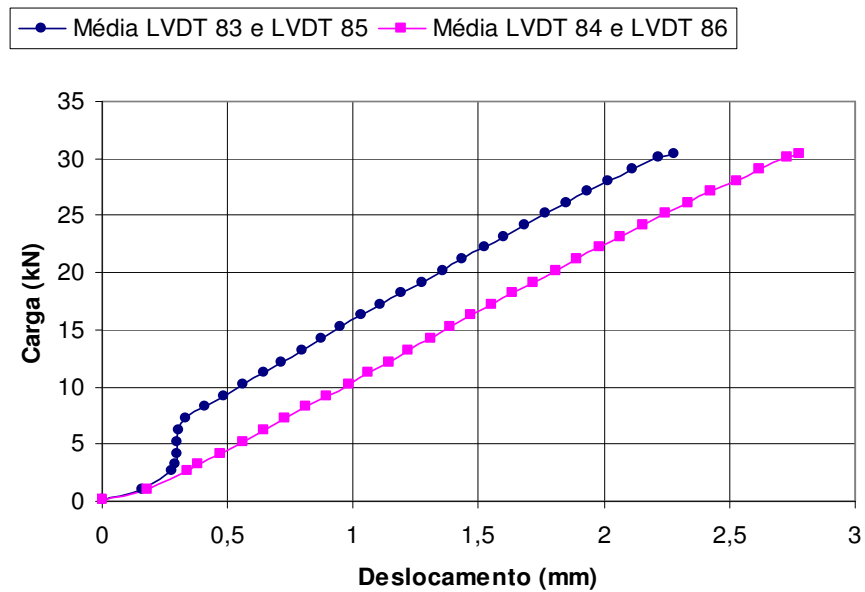


Figura D.8 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCLII-2.

D.5
Resultado do ensaio MCLIII-1

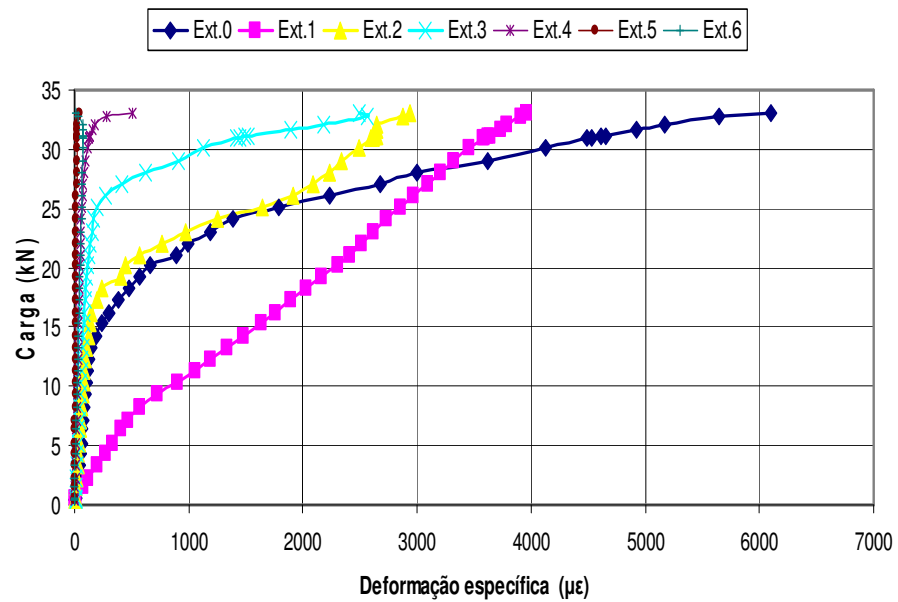


Figura D.9 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCLIII-1.

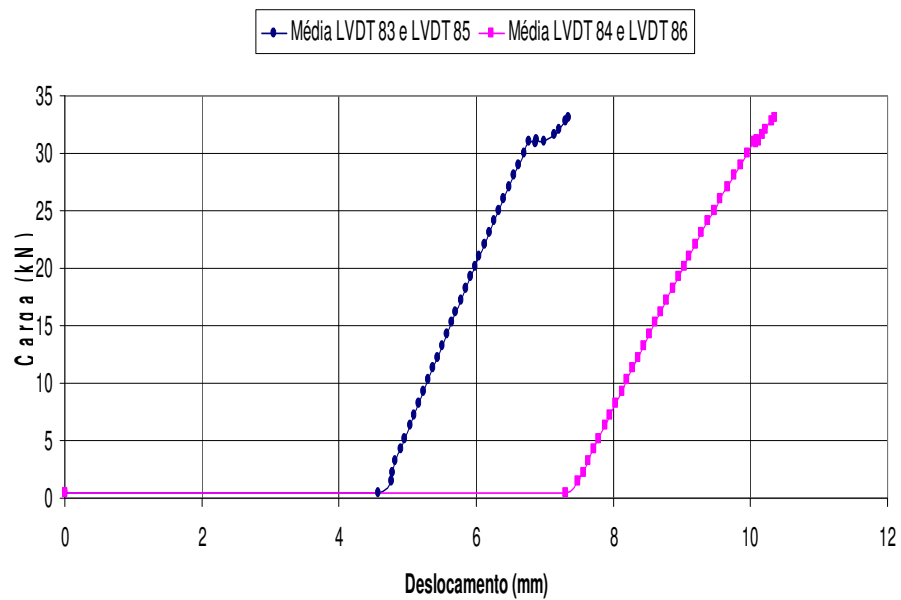


Figura D.10 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCLIII-1.

D.6
Resultado do ensaio MCLIII-2

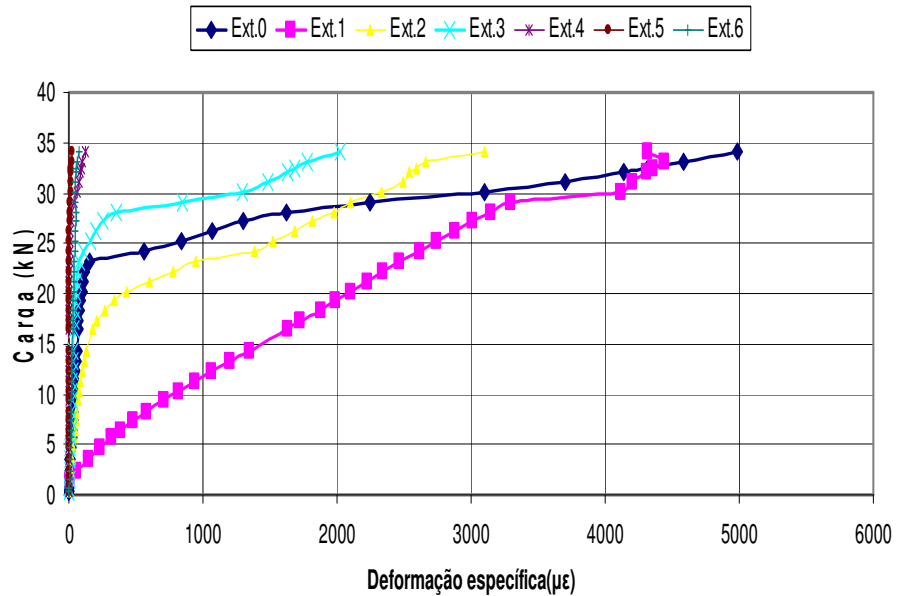


Figura D.11 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCLIII-2.

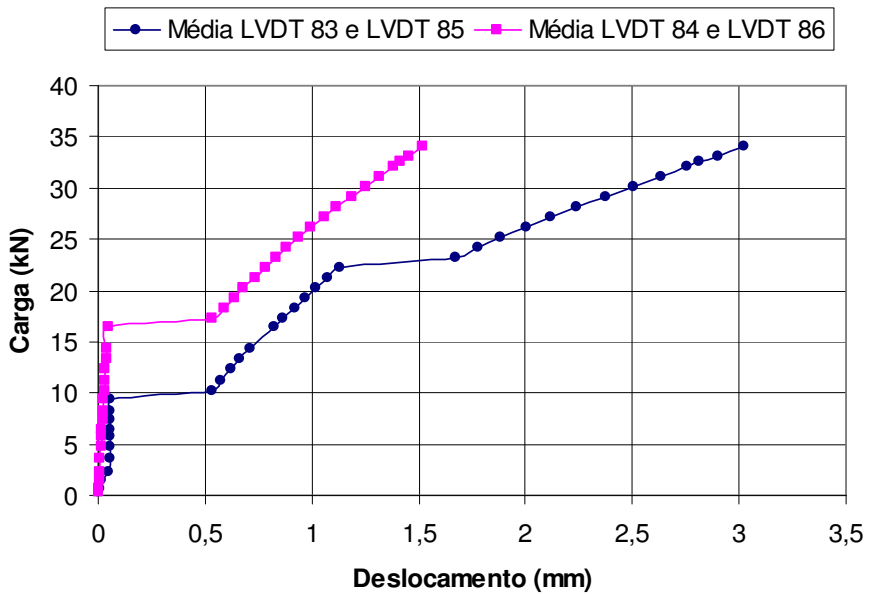


Figura D.12 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCLIII-2.

D.7
Resultado do ensaio MCRI-1

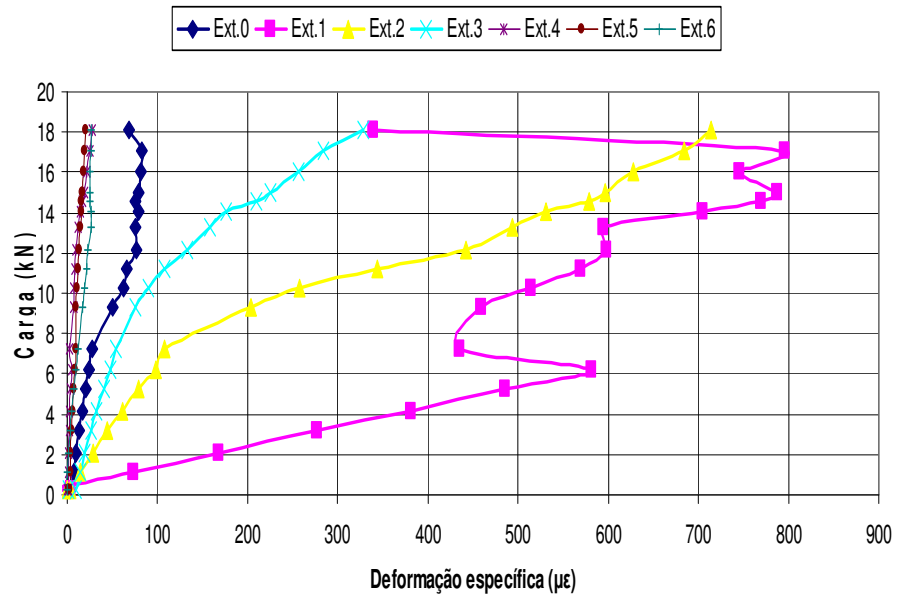


Figura D.13 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCRI-1.

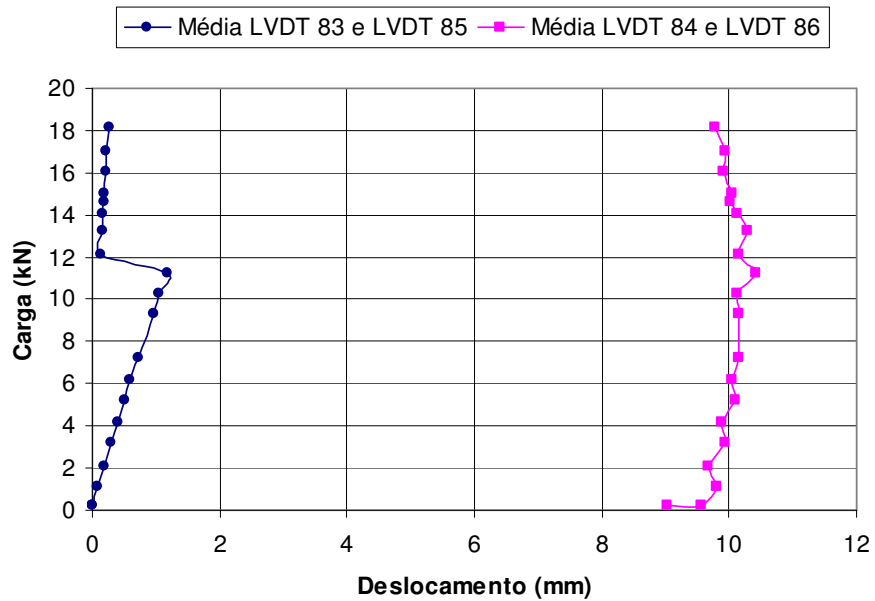


Figura D.14 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCRI-1.

D.8 Resultado do ensaio MCRI-2

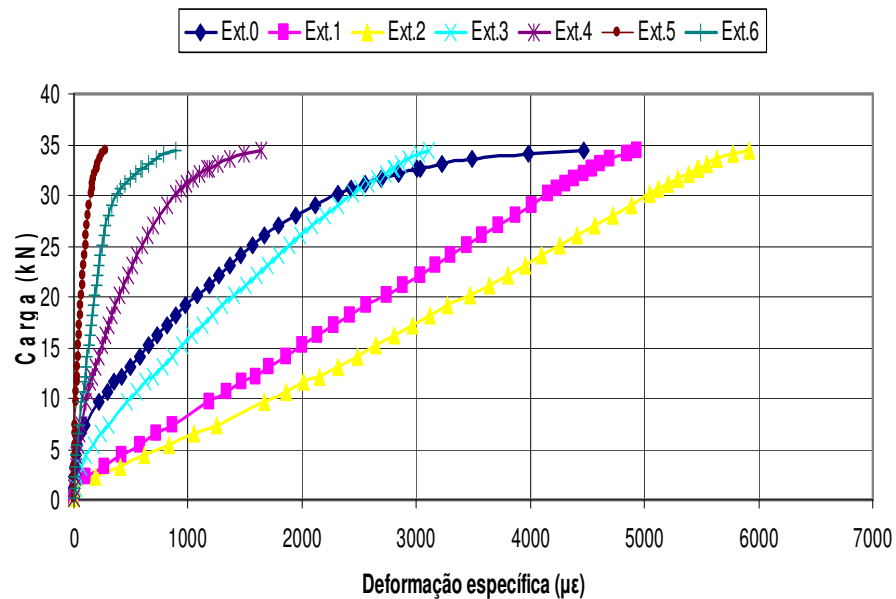


Figura D.15 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCRI-2.

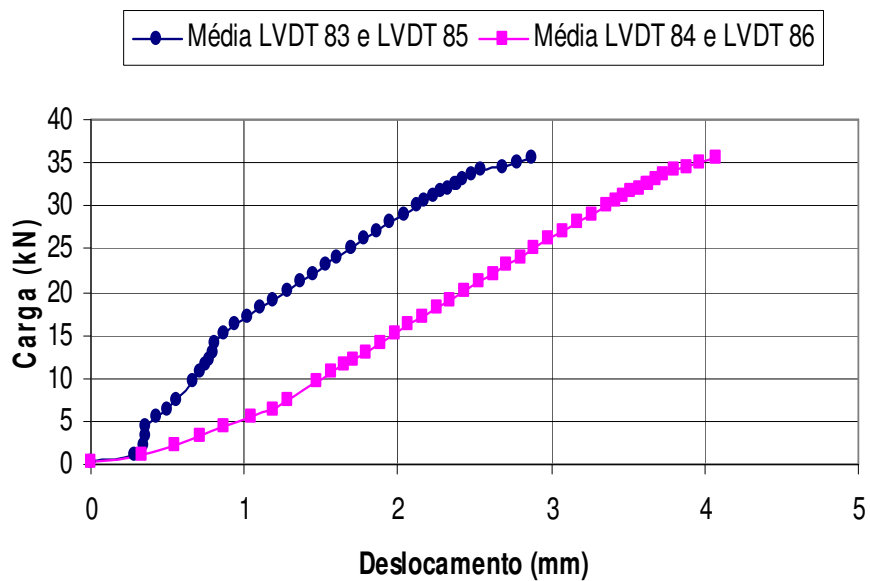


Figura D.16 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCRI-2.

D.9
Resultado do ensaio MCRI-3

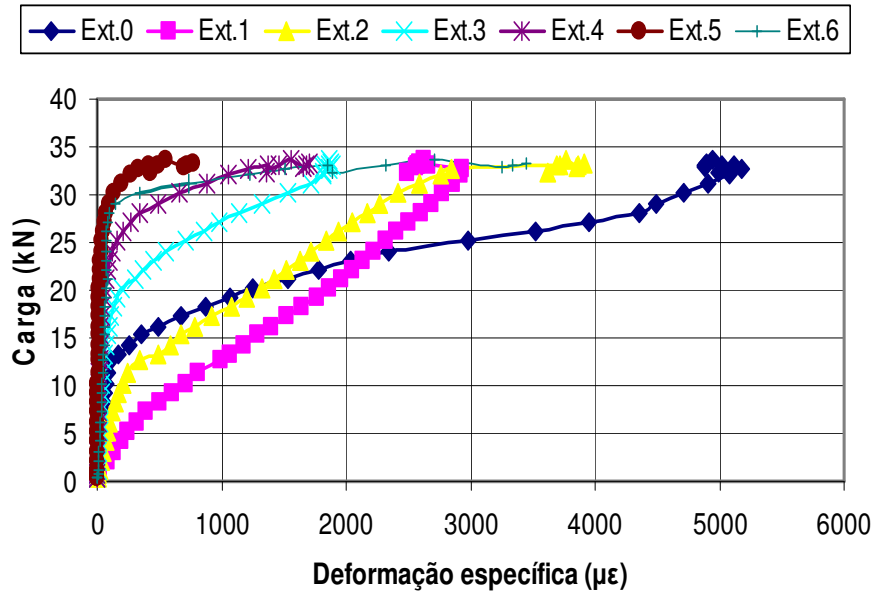


Figura D.17 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCRI-3.

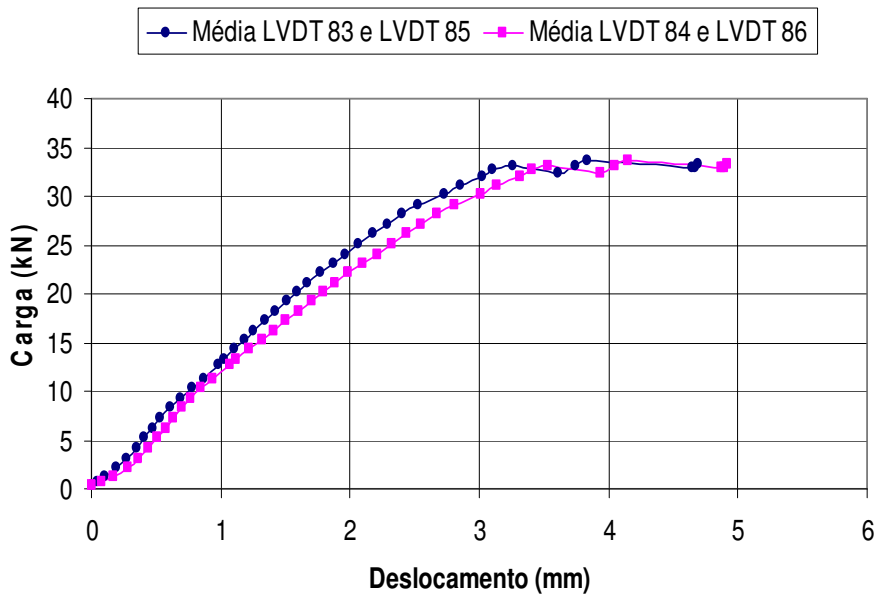


Figura D.18 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCRI-3.

D.10
Resultado do ensaio MCRII-1

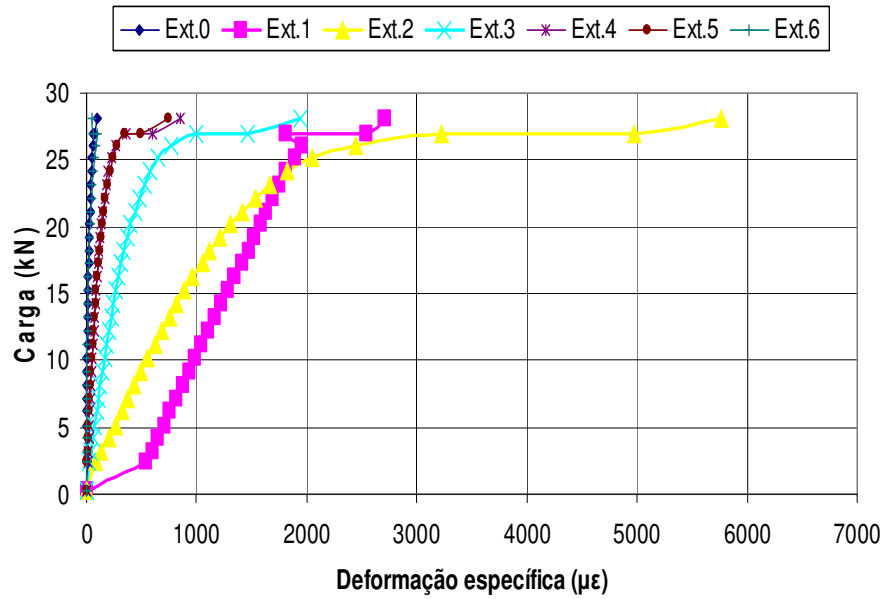


Figura D.19 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCRII-1.

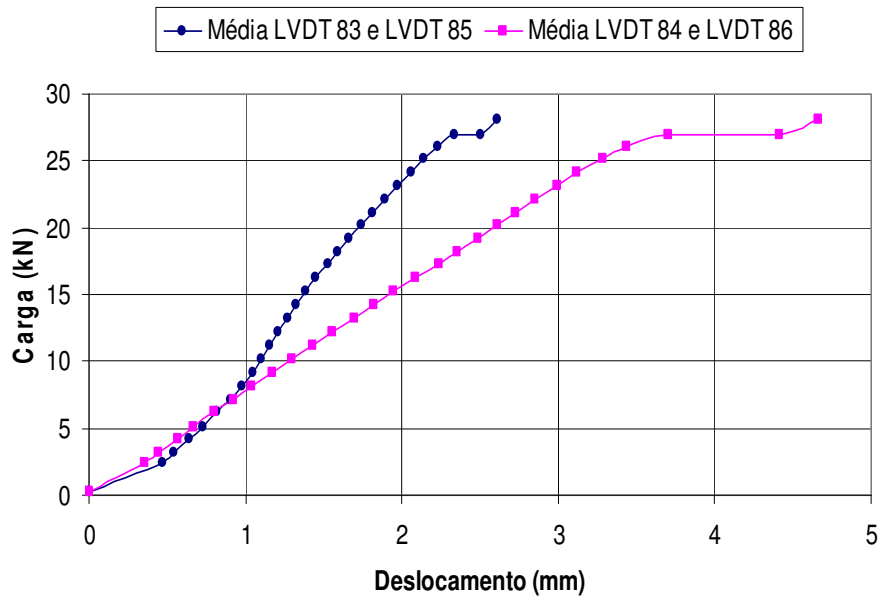


Figura D.20 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCRII-1.

D.11
Resultado do ensaio MCRII-2

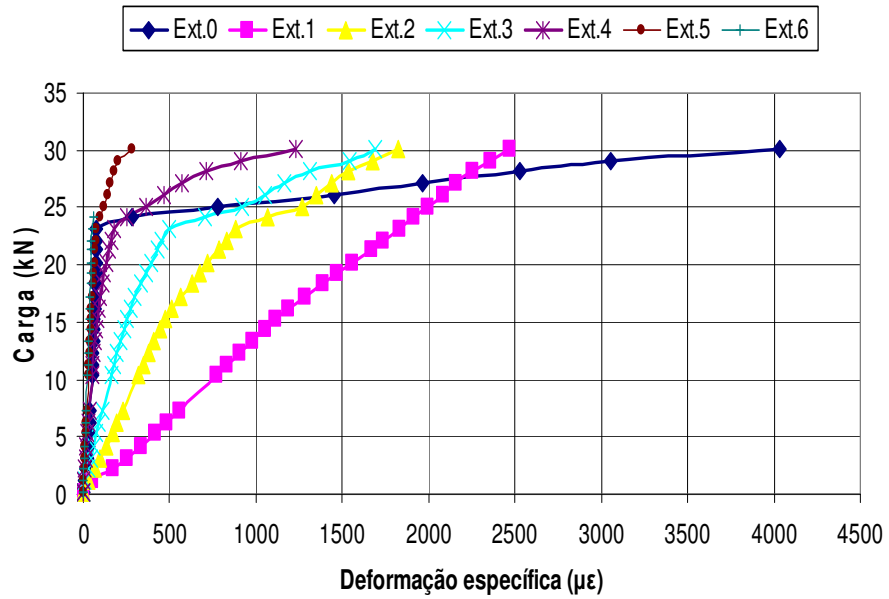


Figura D.21 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCRII-2.

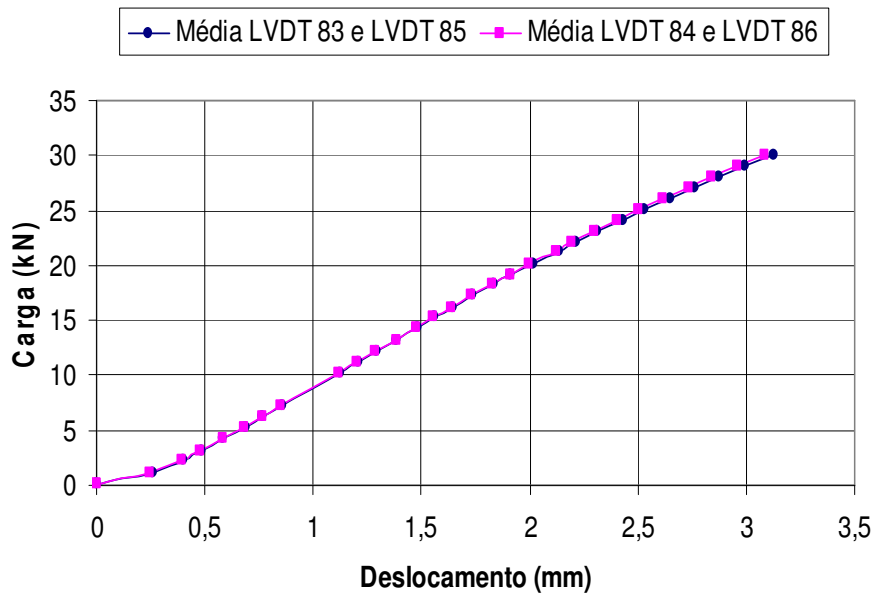


Figura D.22 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCRII-2.

D.12
Resultado do ensaio MCRIII-1

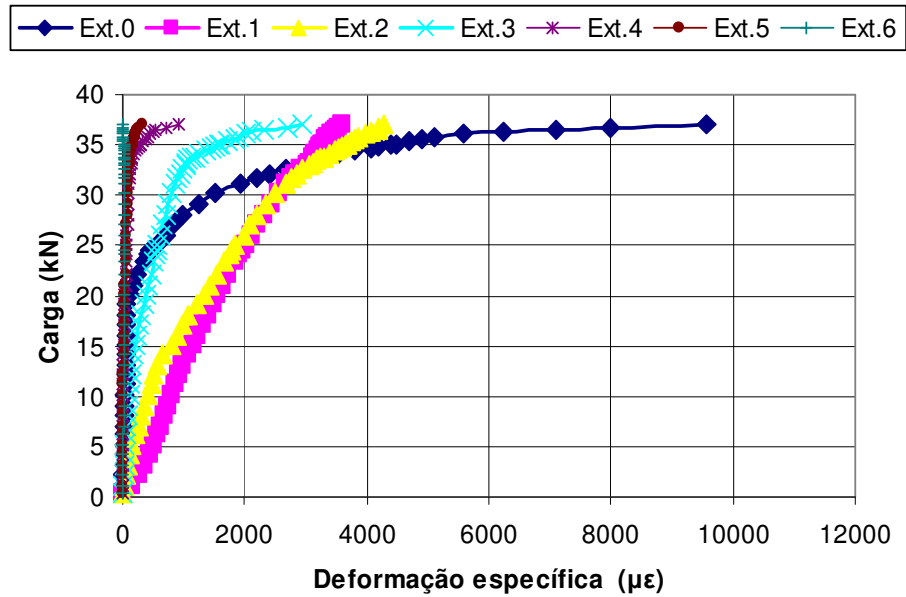


Figura D.23 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCRIII-1.

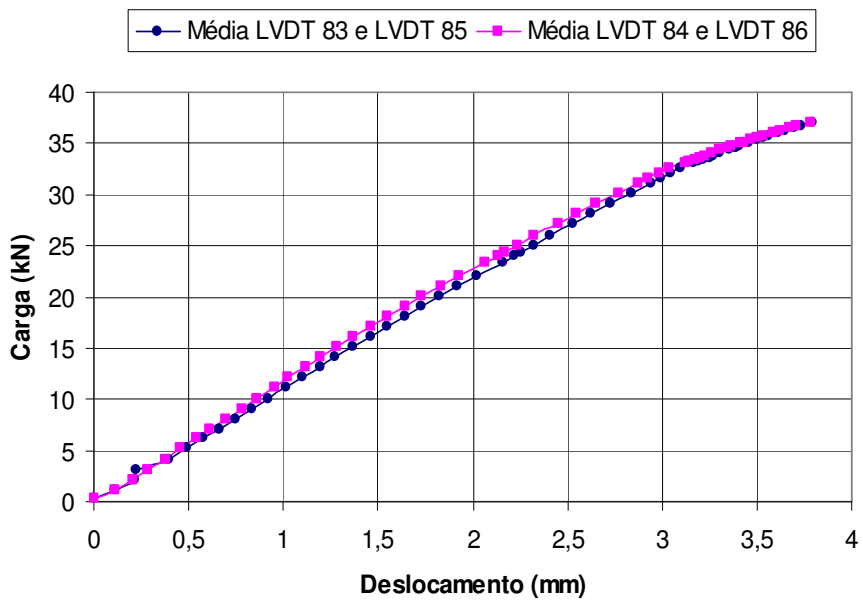


Figura D.24 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCRIII-1.

D.13
Resultado do ensaio MCRIII-2

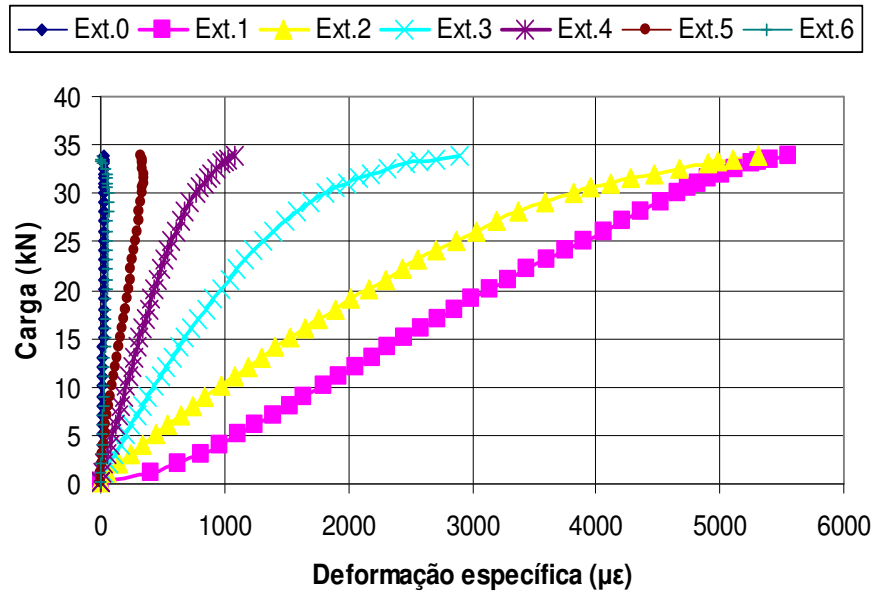


Figura D.25 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCRIII-2.

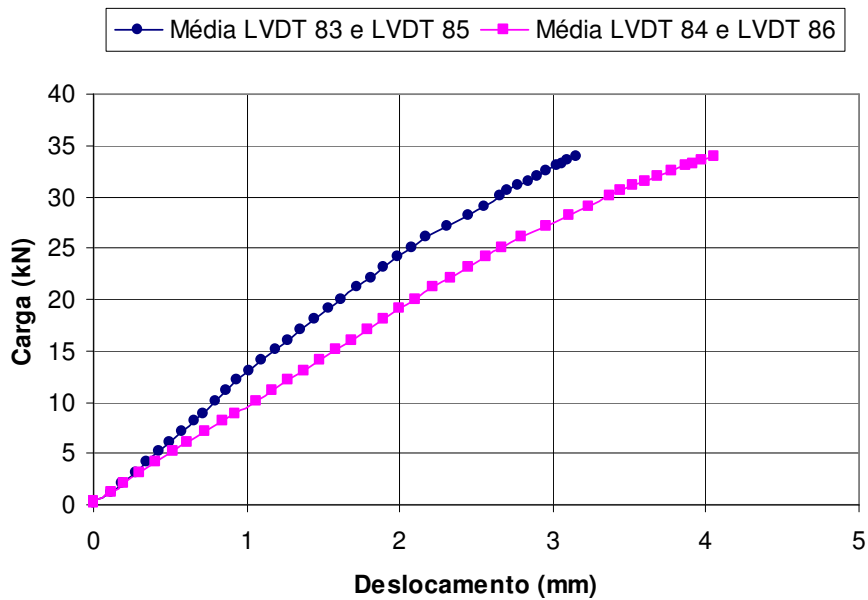


Figura D.26 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCRIII-2.

D.14 Resultado do ensaio CDLI-1

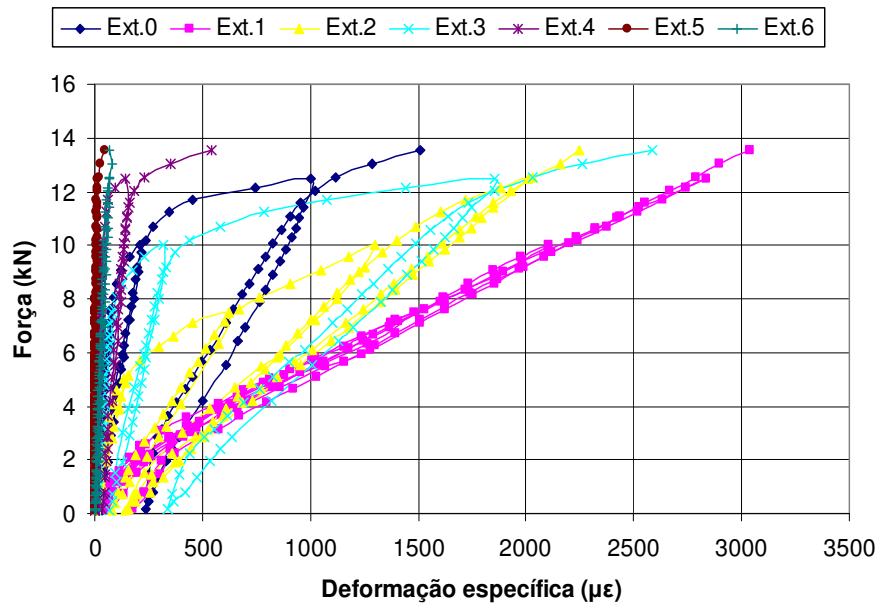


Figura D.27 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova CDLI-1.

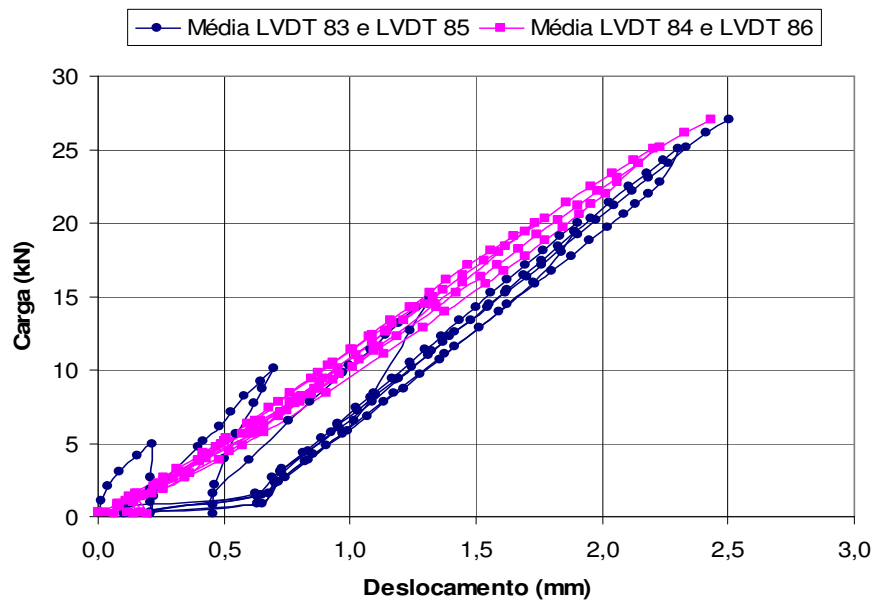


Figura D.28 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova CDLI-1.

D.15
Resultado do ensaio CDLII-1

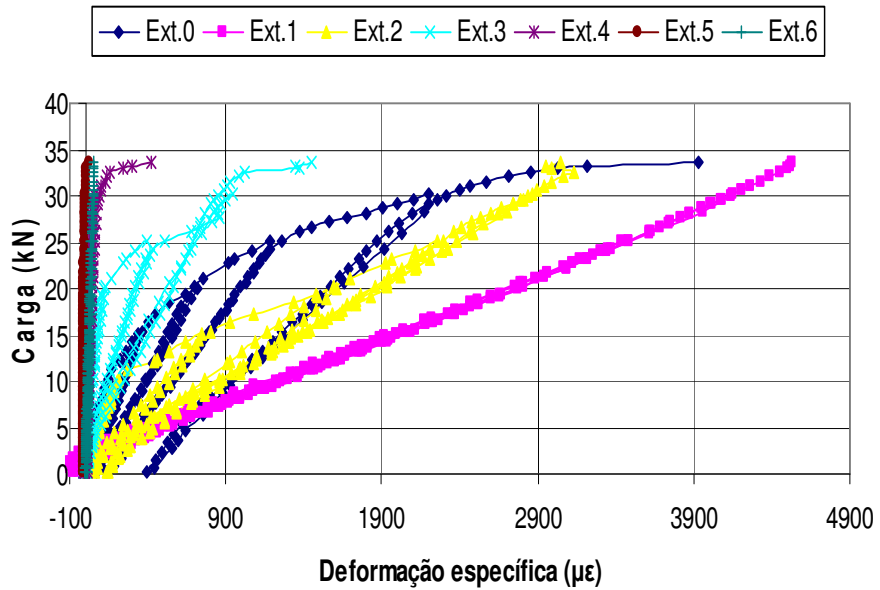


Figura D.29 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova CDLII-1.

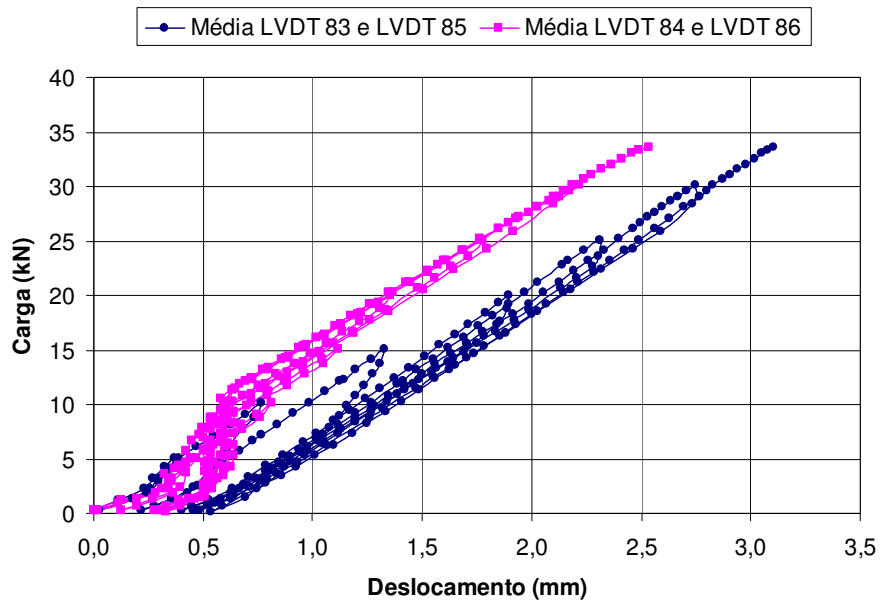


Figura D.30 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova CDLII-1.

D.16 Resultado do ensaio CDLIII-1

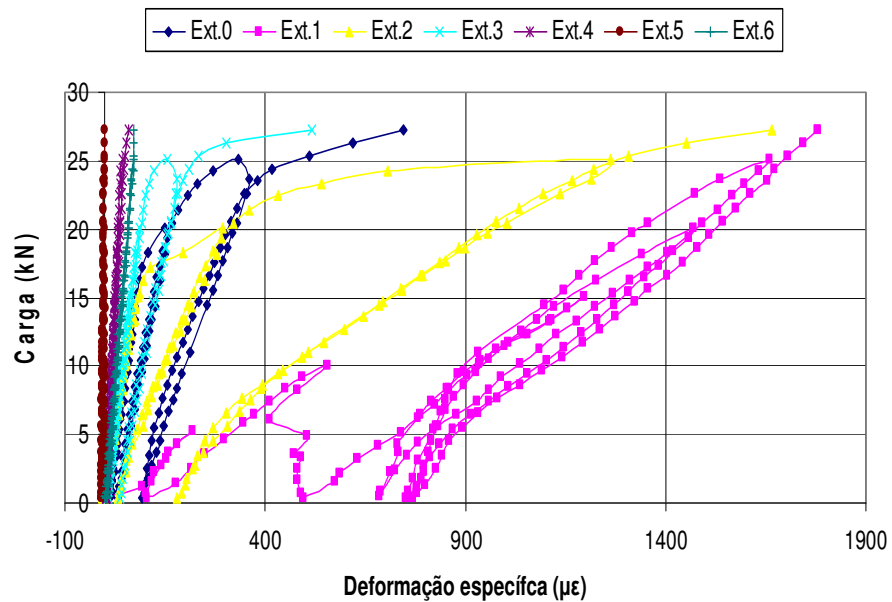


Figura D.31 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova CDLIII-1.

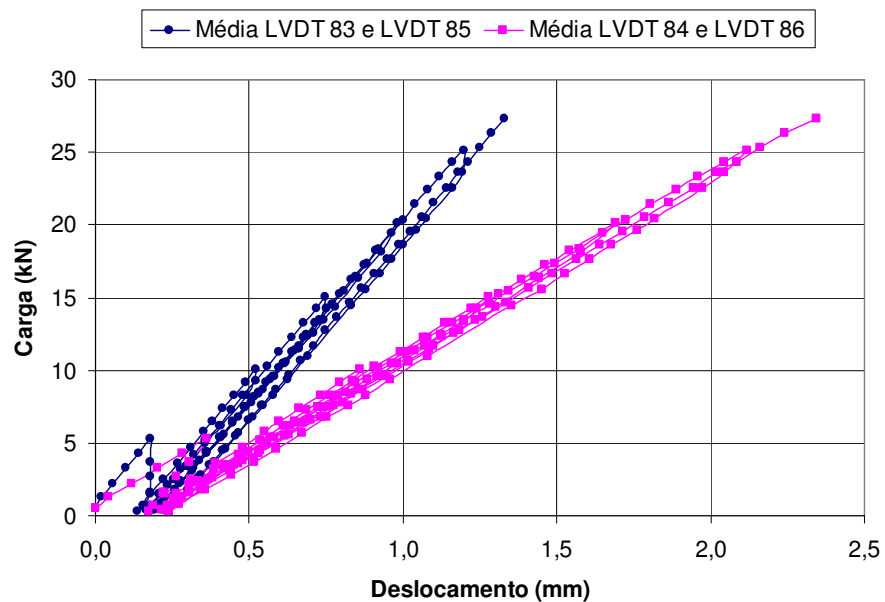


Figura D.32 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova CDLIII-1.

D.17
Resultado do ensaio CDRII-1

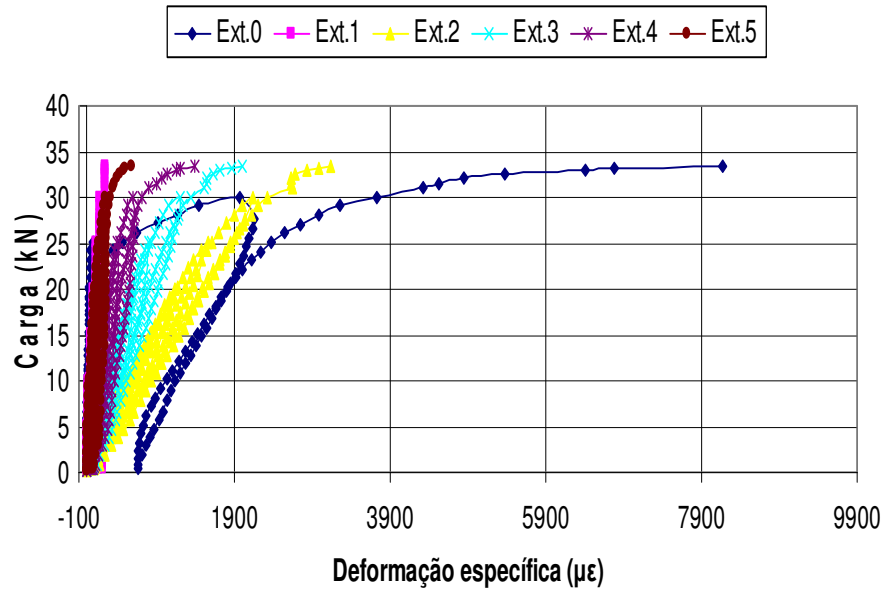


Figura D.33 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova CDRII-1.

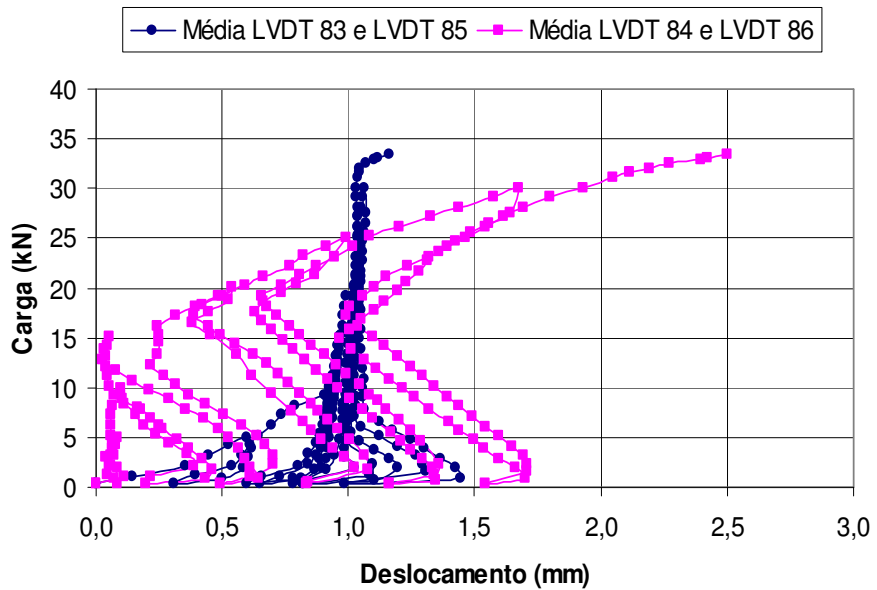


Figura D.34 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova CDRII-1.

D.18 Resultado do ensaio CDRIII-1

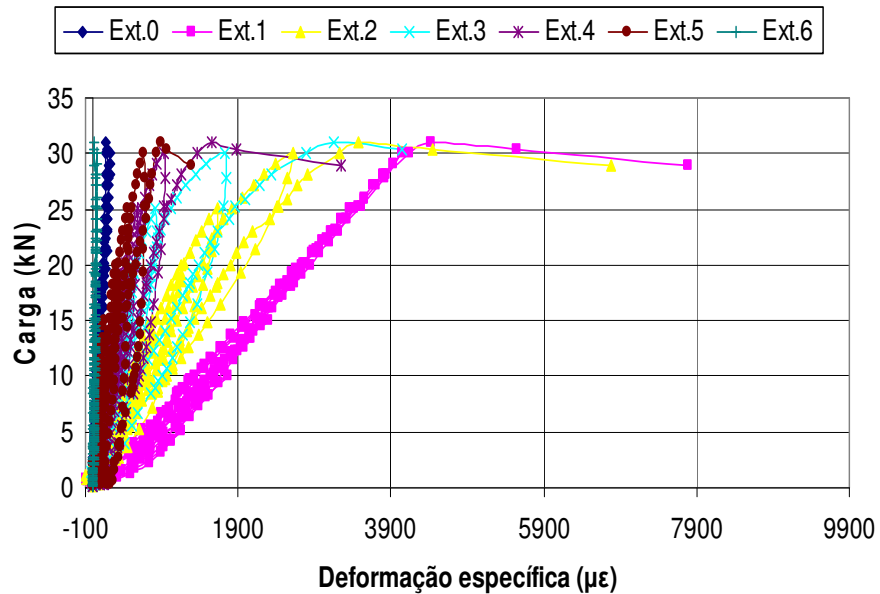


Figura D.35 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova CDRIII-1.

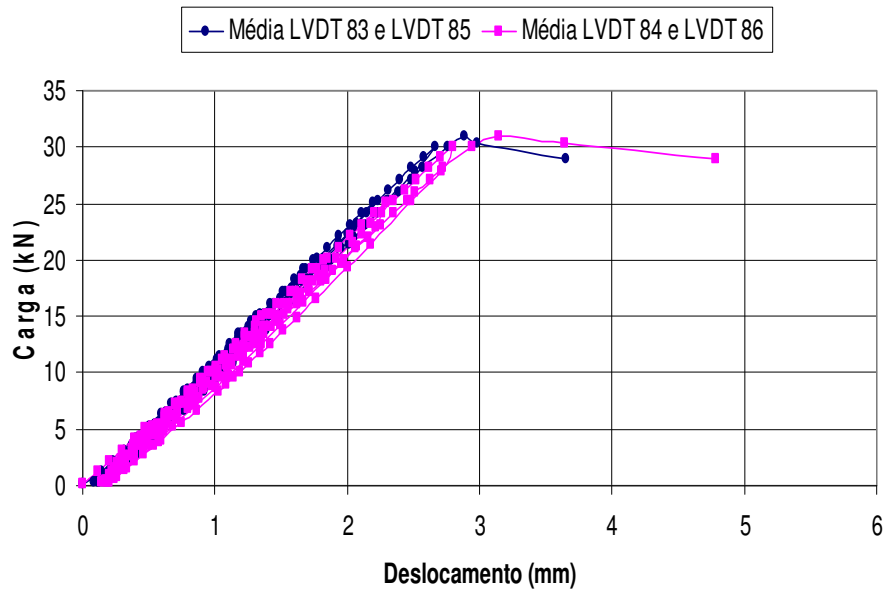


Figura D.36 – Gráfico a carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova CDRIII-1.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)