



Juliana Martinelli Meneghel

**Análise Experimental da Aderência entre o Concreto e
Compósitos com Tecido de Fibras de Carbono**

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
Junho de 2005

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.



Juliana Martinelli Meneghel

Análise experimental da aderência entre o concreto e compósitos com tecido de fibras de carbono

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.

Prof. Giuseppe Barbosa Guimarães, D.Sc.

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Emil de Souza Sánchez Filho, D.Sc.

Co-orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Profa. Marta de Souza Lima Velasco, D.Sc.

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Robson Luiz Gaiofatto, D.Sc.

Universidade Católica de Petrópolis

Profa. Maria Elisabeth da Nóbrega Tavares, D.Sc.

Universidade Estadual do Rio de Janeiro

Prof. José Eugênio Leal.

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de Junho de 2004.

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

Juliana Martinelli Meneghel

Graduou-se em Engenharia Civil na UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora). Na UFJF, desenvolveu projetos de Iniciação Científica na área de Aderência entre Elementos Estruturais de Concreto e Compósitos de Fibras de Carbono. Na PUC-Rio desenvolveu seu trabalho de pesquisa com ênfase em Concreto Armado.

Ficha Catalográfica

Meneghel, Juliana Martinelli

Análise experimental da aderência entre o concreto e compósitos com tecido de fibras de carbono / Juliana Martinelli Meneghel; orientadores: Giuseppe Barbosa Guimarães, Emil de Souza Sánchez Filho. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, 2005.

203 f.; 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, Argeu e Dalva e ao meu noivo Thiago,
pelo amor, apoio e paciência.

Agradecimentos

Ao professor Giuseppe Guimarães, pela orientação e cooperação recebidos ao longo da realização deste trabalho.

Ao co-orientador, professor Emil de Souza Sanchez Filho, pela paciência, compreensão e apoio.

Aos meus pais e às minhas irmãs Manuela e Natália pelo apoio, carinho e compreensão ao longo destes dois anos de trabalho.

Ao meu noivo Thiago pelo amor, apoio, paciência, compreensão e companheirismo.

Aos meus tios Alair e Dirce e meu primo Roberto por terem me recebido com tanto carinho em sua casa.

Aos funcionários Euclídes, José Nilson, Evandro e Aroldo pela cooperação e ajuda na realização deste trabalho.

Aos meus amigos, em especial à Patrícia, Juliana, Marcélia, Leandro e Julio que tanto contribuíram com este trabalho e pelo sufoco e alegria que passamos juntos.

À RHEOTEC, em especial ao Prof. Robson Luiz Gaiofatto, pelo fornecimento de todo o tecido de fibra de carbono e resinas necessário e essencial para essa pesquisa.

À CAPES pelo apoio financeiro.

E a todos que contribuíram de alguma forma para que esse trabalho se realizasse.

Resumo

Meneghel, Juliana Martinelli; Guimarães, Giuseppe Barbosa; Sanchez Filho, Emil de Souza. **Análise Experimental da Aderência entre o Concreto e Compósitos com Tecido de Fibras de Carbono**. Rio de Janeiro, 2005. 203p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

É descrito neste trabalho um programa experimental sobre a aderência entre os compósitos com tecido de fibras de carbono e o concreto. Este programa experimental consistiu em ensaios de tração-compressão de corpos-de-prova compostos de dois blocos de concreto (móvel e fixo) colados por tiras de tecido de fibra de carbono coladas nos lados opostos desses blocos. Foram ensaiados nove corpos-de-prova, com três resistências à compressão aos 28 dias de 20,5 *MPa*, 28,7 *MPa* e 38,1 *MPa* e duas larguras do tecido iguais a 50 *mm* e 100 *mm*. Todos os corpos-de-prova foram concretados, instrumentados e ensaiados no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio. O objetivo deste trabalho foi estudar a influência da resistência do concreto e da largura do tecido de fibra de carbono sobre a resistência de aderência do sistema. Os resultados mostraram que a resistência de aderência pode ser considerada independente da resistência do concreto e da largura do tecido. Foi obtido, neste estudo, um valor característico de 1,45 *MPa* para a resistência de aderência.

Palavras-chave

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

Abstract

Meneghel, Juliana Martinelli; Guimarães, Giuseppe Barbosa; Sánchez Filho, Emil de Souza (Advisors). **Experimental Analysis on Bond Between Concrete and Carbon Fiber Composites Fabric**. Rio de Janeiro, 2005. 203p. MSc. Dissertation – Civil Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

An experimental study on the bond between carbon fiber fabric composites and concrete is described in this work. This experimental program consisted of tension-compression tests of specimens with two concrete blocks (movable and fixed) jointed by carbon fiber fabric strips bonded on two opposite sides of these blocks. Nine specimens, with three concrete compressive strength of $20,5\text{ MPa}$, $28,7\text{ MPa}$ and $38,1\text{ MPa}$ at 28 days and two fabric width of 50 mm and 100 mm , were tested. All specimens had the same geometrical characteristics. All the specimens were cast, instrumented and tested in the Structural and Materials Laboratory at PUC-Rio. The objective of this work was to study the influence of concrete strength and the width of the fabric on the bond strength of the system. The results showed that the ultimate bond strength may be considered independent of concrete strength and of the width of the fabric. A characteristic value of 1.45 MPa was found for the bond strength.

Keywords

Structural Strengthening; Concrete; Carbon Fiber Composites; Bond.

Sumário

1 Introdução	34
1.1. Histórico	34
1.2. Objetivos	35
1.3. Conteúdo	36
 2 Revisão Bibliográfica	 38
2.1. Introdução	38
2.2. Reforço Estrutural com Compósitos de Fibras de Carbono	38
2.2.1. Materiais Compósitos	40
2.2.2. Compósitos de Fibras de Carbono	40
2.2.3. Resinas Epóxi	43
2.3. Aderência entre o Substrato de Concreto e o CFC	45
2.3.1. Conceitos Fundamentais	45
2.3.2. Parâmetros que Influenciam a Aderência	47
2.3.2.1. Comprimento de Ancoragem do CFC	47
2.3.2.2. Resistência à Compressão do Concreto	49
2.3.2.3. Tipos de Adesivo e Tratamento da Superfície de Concreto	49
2.3.3. Equação Diferencial da Aderência entre o Concreto e o CFC	53
2.3.3.1. Lei $\tau \times s$ Bi-Linear	57
2.3.3.1.1. Ensaio de Aderência com Tração e Compressão	59
2.3.3.1.2. Ensaio de Aderência com Tração e Tração	63
2.3.4. Estudos sobre a Aderência	64
2.3.4.1. CHAJES et al. (1996)	64
2.3.4.2. NEUBAUER e ROSTÁSY (1999)	66
2.3.4.3. KURIHARA et al. (2000)	70
2.3.4.4. NAKABA et al. (2001)	73
2.3.4.5. CHEN e TENG (2001)	80
2.3.4.6. ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001)	86

2.3.4.7. Outros Estudos	88
3 Programa Experimental	94
3.1. Introdução	94
3.2. Materiais	95
3.2.1. Concreto	95
3.2.1.1. Resistência à Compressão Simples do Concreto	96
3.2.1.2. Módulo de Elasticidade do Concreto	99
3.2.2. Tecido de Fibra de Carbono	103
3.2.2.1 Ensaio de Resistência à Tração do Compósito de Fibra de Carbono	104
3.2.2.2. Materiais Necessários para a Aplicação do Tecido de Fibra de Carbono	107
3.2.2.2.1. Resina de Imprimação	108
3.2.2.2.2. Resina Epoxídica	109
3.3. Confeção dos Corpos-de-Prova	110
3.3.1. Formas	110
3.3.2. Corpos-de-Prova de Concreto	111
3.3.3. Concretagem	111
3.3.4. Colagem do Tecido de Fibra de Carbono	112
3.3.5. Instrumentação dos Corpos-de-Prova	113
3.4. Descrição dos Ensaio	116
3.4.1. Montagem	116
4 Apresentação e Análise dos Resultados	119
4.1 Introdução	119
4.2 Cargas e Modos de Ruptura	119
4.3 Deformações ao Longo do Comprimento de Ancoragem	126
4.4 Tensões de Aderência x Deformações do CFC	130
4.5 Tensões de Aderência ao Longo do Comprimento de Ancoragem	140
4.6 Tensões Últimas de Aderência	146
4.7 Fator de Efetividade das Tensões no CFC	150
4.8 Tensões de Aderência x Deslocamento Relativo entre o CFC e o	

Concreto	152
5 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	155
5.1 Conclusões	155
5.2 Sugestão para Trabalhos Futuros	156
Referências Bibliográficas	158
Anexo A Análise Granulométrica dos Agregados Graúdo e Miúdo	162
Anexo B Determinação das Massas Específicas dos Agregados Graúdo e Miúdo	166
Anexo C Determinação do Módulo de Elasticidade do Concreto	168
C.1. Dados Obtidos no Ensaio do Módulo de Elasticidade	168
C.1.1. Corpos de Prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$	168
C.1.2. Corpos de Prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$	172
C.1.3. Corpos de Prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$	178
Anexo D Ensaio de Resistência à Tração do CFC	185
Anexo E Gráficos dos Ensaio	191
E.1. L50-R25-1 (Piloto)	191
E.2. L50-R25-2	192
E.3. L50-R35-1	193
E.4. L50-R35-2	195
E.5. L50-R45-1	196
E.6. L50-R45-2	198
E.7. L100-R25	199
E.8. L100-R35	201
E.9. L100-R45	202

Lista de figuras

Figura 1.1 – Esquema simplificado do ensaio de tração-compressão.	35
Figura 2.1 – Obras recuperadas utilizando reforço com CFC; Fonte: www.mbrace.com (2004).	39
Figura 2.2 – Representação de um material compósito em reforço estrutural.	40
Figura 2.3 – Diagrama tensão-deformação específica, para diversos tipos de fibra; adaptada de ARAÚJO (2002 a).	41
Figura 2.4 – Chapas pultrudadas; adaptada de LIMA (2001).	42
Figura 2.5 – Tecido de fibra de carbono; www.mbrace.com (2004).	42
Figura 2.6 – Fios de fibra de carbono; adaptada de LIMA (2001).	43
Figura 2.7 – Distribuições da tensão de aderência e tensão normal ao longo do comprimento do laminado de PRF; adaptada do ACI 440 F (2000).	45
Figura 2.8 – Gráfico tensão média de aderência x comprimento de aderência; adaptada de CHAJES et al. (1996).	48
Figura 2.9 – Gráfico tensão média de aderência x comprimento de aderência para dois tipos de CFC; adaptada de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).	48
Figura 2.10 – Gráfico carga de ruptura x comprimento de aderência; adaptada de CHAJES et al. (1996).	48
Figura 2.11 – Gráfico tensão média de aderência x resistência à compressão do concreto; adaptada de CHAJES et al. (1996).	49
Figura 2.12 – Gráfico tensão média de aderência x resistência à compressão do concreto; adaptada de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).	49
Figura 2.13 – Parâmetros geométricos e mecânicos para a análise da	

aderência entre o CFC e o substrato de concreto.	53
Figura 2.14 – Parâmetros para a análise da distorção do adesivo.	54
Figura 2.15 – Ensaio de aderência CFC-concreto: a) ensaio T-C; b) ensaio T-T.	57
Figura 2.16 – Parâmetros para a análise do comportamento de uma lei bi-linear: diagrama $\tau \times s$.	57
Figura 2.17 – Sistema mecânico para a Região I.	58
Figura 2.18 – Sistema mecânico para a Região II.	59
Figura 2.19 – Parâmetros para a análise da aderência na Região II para o ensaio de T-C.	62
Figura 2.20 – Energia de fratura $G_{I,efet}$ do modo I; adaptada de NEUBAUER e ROSTÁSY (1999).	68
Figura 2.21 – Corpo-de-prova e equipamento para o ensaio de torque; adaptada de KURIHARA et al. (2000).	70
Figura 2.22 – Corpo-de-prova para o ensaio de aderência; adaptada de NAKABA et al. (2001).	73
Figura 2.23 – Posicionamento dos ERE; adaptada de NAKABA et al. (2001).	75
Figura 2.24 – Tensão de aderência x deslocamento; adaptada de NAKABA et al. (2001).	79
Figura 2.25 – Relação entre a tensão de aderência máxima e a resistência à compressão do concreto; adaptada de NAKABA et al. (2001).	80
Figura 2.26 – Relação tensão de aderência – deslocamento: (a) triangular; (b) decréscimo linear; adaptada de YUN e WU apud CHEN e TENG (2001).	81
Figura 2.27 – Corpos-de-prova para o ensaio de aderência; (a) Com uma chapa colada; (b) com duas chapas coladas; adaptada de CHEN e TENG (2001).	84

Figura 2.28 – Corpo-de-prova (medidas em mm); dos ensaios de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).	86
Figura 3.1 – Diagrama resistência x idade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.	98
Figura 3.2 – Diagrama resistência x idade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.	98
Figura 3.3 – Diagrama resistência x idade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$.	98
Figura 3.4 – Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.	100
Figura 3.5 – Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.	101
Figura 3.6 – Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$.	101
Figura 3.7 – Sistema de aplicação das cargas e corpo-de-prova após o ensaio.	102
Figura 3.8 – Tecido de fibra de carbono com destaque para o sentido das fibras.	103
Figura 3.9 – Verso do tecido de fibra de carbono com destaque para a costura (em contato com o concreto).	103
Figura 3.10 – Dimensões dos corpos-de-prova para ensaio de tração; adaptada da norma ASTM D 3039/3039M.	105
Figura 3.11 – Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova de CFC.	106
Figura 3.12 – Corpos-de-prova de tecidos de fibra de carbono revestidos com resina epóxi.	107
Figura 3.13 – Ensaio dos corpos-de-prova de compósitos de fibra de carbono com placas de alumínio nas extremidades: (a) vista frontal do	

corpo-de-prova antes do ensaio; (b) ruptura do corpo-de-prova.	107
Figura 3.14 – Resina de imprimação: (a) preparação; (b) mistura pronta para a aplicação.	109
Figura 3.15 – Resina epóxi: (a) componentes A e B; (b) preparação da resina para a aplicação.	110
Figura 3.16 – Formas de aço para a confecção dos corpos-de-prova de concreto.	111
Figura 3.17 – Corpos-de-prova de concreto (medidas em cm).	111
Figura 3.18 – Posicionamento dos corpos-de-prova para a colagem do CFC.	112
Figura 3.19 – Posicionamento dos extensômetros elétricos, mecânicos no corpo-de-prova L50-R25-1/piloto (medidas em mm).	114
Figura 3.20 – Posicionamento dos extensômetros elétricos no tecido e no concreto nos corpos-de-prova do grupo A exceto o L50-R25-1/piloto (medidas em mm).	115
Figura 3.21 – Posicionamento dos extensômetros elétricos no tecido e no concreto nos corpos-de-prova do grupo B (medidas em mm).	115
Figura 3.22 – Posicionamento dos LVDT nos corpos-de-prova.	116
Figura 3.23 – Equipamento do ensaio de tração-compressão.	117
Figura 3.24 – Esquema do ensaio.	118
Figura 4.1 – Cargas de ruptura dos corpos-de-prova.	121
Figura 4.2 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto do corpo-de-prova L50-R25-1/piloto.	122
Figura 4.3 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto do corpo-de-prova L50-R25-2.	123
Figura 4.4 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova L50-R35-1.	121
Figura 4.5 – Detalhe do descolamento do tecido do corpo-de-prova L50-	

R35-1.	123
Figura 4.6 – Ruptura por arrancamento parcial do substrato de concreto do corpo-de-prova L50-R35-2; detalhe do arrancamento.	123
Figura 4.7 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova L50-R45-1.	124
Figura 4.8 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto do corpo-de-prova L50-R45-2; detalhe do arrancamento.	124
Figura 4.9 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto do corpo-de-prova L100-R25.	124
Figura 4.10 – Ruptura do tecido no início da ancoragem do corpo-de-prova L100-R35.	125
Figura 4.11 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova L100-R45; detalhe do descolamento com rompimento do tecido.	125
Figura 4.12 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R25-1/ensaio piloto.	126
Figura 4.13 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R25-2.	126
Figura 4.14 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R35-1.	127
Figura 4.15 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R35-2.	127
Figura 4.16 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R45-1.	128
Figura 4.17 – Curva deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R45-2.	128
Figura 4.18 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L100-R25.	129
Figura 4.19 – Deformação x distância ao longo do comprimento de	

ancoragem para o corpo-de-prova L100-R35.	129
Figura 4.20 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L100-R45.	130
Figura 4.21 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L50-R25-1/ piloto.	131
Figura 4.22 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L50-R25-2.	131
Figura 4.23 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L50-R35-1.	132
Figura 4.24 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L50-R35-2.	132
Figura 4.25 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova L50-R45-1.	133
Figura 4.26 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L50-R45-2.	133
Figura 4.27 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L100-R25.	134
Figura 4.28 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L100-R35.	134
Figura 4.29 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L100-R45.	135
Figura 4.30 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo A referente ao trecho 0-1.	136
Figura 4.31 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo B referente ao trecho 0-1.	136
Figura 4.32 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo A referente ao trecho 1-2.	137
Figura 4.33 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo B referente ao trecho 1-2.	137

Figura 4.34 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo A referente ao trecho 2-3.	138
Figura 4.35 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo B referente ao trecho 2-3.	138
Figura 4.36 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo A referente ao trecho 3-4.	139
Figura 4.37 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo B referente ao trecho 3-4.	139
Figura 4.38 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R25-2.	140
Figura 4.39 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R35-1.	141
Figura 4.40 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R35-2.	141
Figura 4.41 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R45-1.	142
Figura 4.42 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R45-2.	142
Figura 4.43 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L100-R25.	143
Figura 4.44 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R35.	143
Figura 4.45 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L100-R45.	144
Figura 4.46 – Gráfico comparativo entre as cargas aplicadas e as calculadas.	145
Figura 4.47 – Resistência de aderência (equação 4.1) x largura do tecido.	147
Figura 4.48 – Resistência de aderência (equação 4.2) x largura do	

tecido.	147
Figura 4.49 – Resistência de aderência (equação 4.1) x resistência do concreto.	149
Figura 4.50 – Resistência de aderência (equação 4.2.) x resistência do concreto.	149
Figura 4.51 – Fator de efetividade das tensões no CFC para todos os corpos-de-prova.	152
Figura 4.52 – Posicionamento dos extensômetros para o cálculo dos deslocamentos relativos entre o CFC e o concreto.	153
Figura 4.53 – Curva tensão de aderência x deslocamento para os corpos-de-prova do grupo A.	154
Figura 4.54 – Curva tensão de aderência x deslocamento para os corpos-de-prova do grupo B.	154
Figura C.1 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.	169
Figura C.2 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP2 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.	171
Figura C.3 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP3 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.	172
Figura C.4 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.	174
Figura C.5 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP2 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.	176
Figura C.6 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP3 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.	178
Figura C.7 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$.	181
Figura C.8 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP2 dos	

corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$.	183
Figura C.9 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP3 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$.	184
Figura D.1 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP1.	185
Figura D.2 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP2.	186
Figura D.3 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP3.	187
Figura D.4 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP4.	188
Figura D.5 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP5.	189
Figura D.6 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP6.	190
Figura E.1 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L50-R25-1.	191
Figura E.2 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L50-R25-1.	191
Figura E.3 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L50-R25-2.	192
Figura E.4 – Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-prova L50-R25-2.	192
Figura E.5 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L50-R25-2.	193
Figura E.6 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L50-R35-1.	193
Figura E.7 – Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-prova L50-R35-1.	194
Figura E.8 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L50-R35-1.	194
Figura E.9 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L50-R35-2.	195
Figura E.10 – Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-	

prova L50-R35-2.	195
Figura E.11 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L50-R35-2.	196
Figura E.12 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L50-R45-1.	196
Figura E.13– Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-prova L50-R45-1.	197
Figura E.14 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L50-R45-1.	197
Figura E.15 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L50-R45-2.	198
Figura E.16 – Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-prova L50-R45-2.	198
Figura E.17 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L50-R45-2.	199
Figura E.18 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L100-R25.	199
Figura E.19 – Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-prova L100-R25.	200
Figura E.20 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L100-R25.	200
Figura E.21 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L100-R35.	201
Figura E.22 – Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-prova L100-R35.	201
Figura E.23 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L100-R35.	202
Figura E.24 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L100-R45.	202

Figura E.25 – Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-prova L100-R45. 203

Figura E.26 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L100-R45. 203

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Resultados para a tensão de aderência utilizando-se diversos tipos de adesivo e tratamento da superfície; adaptada de KURIHARA et al. (2000).	51
Tabela 2.2 – Resultados para diferentes tipos de adesivo; adaptada de CHAJES et al. (1996).	52
Tabela 2.3 – Resultados para diferentes tipos de tratamento da superfície; adaptada de CHAJES et al. (1996).	52
Tabela 2.4 – Rugosidade da superfície dos substratos de concreto; adaptada de KURIHARA et al. (2000).	72
Tabela 2.5 – Propriedades das fibras; adaptado de NAKABA et al. (2001).	74
Tabela 2.6 – Propriedades do concreto e da argamassa utilizados na confecção dos corpos-de-Prova; adaptada de NAKABA et al. (2001).	74
Tabela 2.7 - Resultados dos ensaios; adaptada de NAKABA et al. (2001).	76
Tabela 2.8 – Resultados experimentais para a carga máxima na face onde ocorreu a ruptura; adaptada de NAKABA et. al (2001).	77
Tabela 2.9 – Dados de ensaios provenientes da literatura; adaptada de CHEN e TENG (2001).	85
Tabela 2.10 – Dados de ensaios provenientes da literatura; adaptada de CHEN e TENG, (2001).	85
Tabela 2.11 – Resultados experimentais de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).	87
Tabela 2.12 – Resultados experimentais de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).	87
Tabela 2.13 – Razão entre as resistências de aderência experimentais e as calculadas; daptada de CHAJES et al. (1996).	93
Tabela 3.1 – Consumo de material por m^3 de concreto.	96
Tabela 3.2 – Valores do abatimento do tronco de cone em mm.	96

Tabela 3.3 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.	97
Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.	97
Tabela 3.5 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$.	97
Tabela 3.6 – Resultado do ensaio do módulo de elasticidade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.	100
Tabela 3.7 – Resultado do ensaio do módulo de elasticidade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.	100
Tabela 3.8 – Resultado do ensaio do módulo de elasticidade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$.	101
Tabela 3.9 – Comparações do módulo de elasticidade secante encontrado no ensaio com o prescrito pela NBR 6118.	102
Tabela 3.10 – Geometria dos corpos-de-prova recomendada para ensaio de tração em materiais compósitos de fibras de carbono; adaptada da ASTM D3039/3039M.	105
Tabela 3.11 – Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos-de-prova de CFC.	106
Tabela 4.1 – Cargas e modos de ruptura.	120
Tabela 4.2 – Análise estatística das cargas de ruptura.	121
Tabela 4.3 – Comparação entre as cargas aplicadas e as cargas dadas pela curva tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem.	145
Tabela 4.4 – Análise estatística das resistências de aderência dos corpos-de-prova considerados para a verificação da influência da largura do tecido.	146
Tabela 4.5 – Análise estatística das resistências de aderência dos corpos-de-prova considerados para a verificação da influência da resistência do concreto.	148
Tabela 4.6 – Valor característico da resistência de aderência.	150
Tabela 4.7 – Fator de efetividade das tensões no CFC para os corpos-de-	

prova do grupo A.	151
Tabela 4.8 – Fator de efetividade das tensões no CFC para os corpos-de-prova do grupo B.	152
Tabela 4.9 – Fator de efetividade das tensões no CFC para todos os corpos-de-prova.	153
Tabela A.1 – Valores dos resíduos passantes e retidos para o agregado graúdo.	163
Tabela A.2 – Valores resíduos passantes e retidos para o agregado miúdo.	164
Tabela C.1 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.	168
Tabela C.2 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP2 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.	169
Tabela C.3 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP3 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.	171
Tabela C.4 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.	172
Tabela C.5 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP2 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.	174
Tabela C.6 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP3 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.	176
Tabela C.7 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$.	178
Tabela C.8 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP2 dos corpos-de-prova com	

$f_{c,dosagem} = 45 MPa$. 181

Tabela C.9 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP3 dos corpos-de-prova com

$f_{c,dosagem} = 45 MPa$. 183

Tabela D.1 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração do CFC para o CP1. 185

Tabela D.2 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração do CFC para o CP2 186

Tabela D.3 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração do CFC para o CP3. 187

Tabela D.4 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração do CFC para o CP4. 188

Tabela D.5 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração do CFC para o CP5. 189

Tabela D.6 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração do CFC para o CP6. 190

Lista de Símbolos

Romanos

A	Área
A_c	Área da seção transversal do concreto
A_f	Área da seção transversal do tecido de fibra de carbono
A_m	Área da seção transversal do concreto
b	Largura
b_a	Largura do adesivo
b_c	Largura do elemento de concreto
b_f	Largura do CFC
b_ℓ	Largura do CFC
b_p	Largura do CFC
C_F	Coeficiente
CFC	Compósito de fibra de carbono
d	Diâmetro
$D_{máx}$	Dimensão máxima característica do agregado
dx	Elemento diferencial
E	Módulo de elasticidade
E_{cs}	Módulo de elasticidade secante do concreto
E_f	Módulo de elasticidade do CFC
E_ℓ	Módulo de Elasticidade do CFC
E_m	Módulo de elasticidade do concreto

E_p	Módulo de elasticidade do CFC
F	Força aplicada no CFC
F_1 e F_2	Forças
F_u	Carga última
f_c	Resistência à compressão do concreto
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
f_{ct}	Resistência à tração da superfície de concreto
f_{ctm}	Resistência à tração média da superfície de concreto
f_p	Resistência última do PRF ou da lâmina de aço no escoamento
f_{real}	Resistência à compressão do concreto encontrada no ensaio do módulo de elasticidade
f_t	Resistência à tração
f_{tf}	Resistência à tração do CFC
G_a	Módulo de elasticidade transversal do adesivo
G_F	Energia de fratura total
$G_{F,B}$	Energia total de fratura relativa às fissuras inclinadas devidas à força cortante
$G_{I,B}$	Energia relativa ao modo II de fratura relativa à fissura proveniente da força cortante cortante
$G_{I,efet}$	Energia efetiva relativa ao modo I de fratura
$G_{I,f}$	Energia relativa ao modo I de fratura devida à fricção das faces da fissura
G_{II}	Energia relativa ao modo II de fratura
$G_{II,efet}$	Energia efetiva relativa ao modo II de fratura
I_p	Momento de inércia do CFC
k	Coeficiente

K_b	Coeficiente que considera a influência da largura relativa do compósito sobre a largura do elemento de concreto
k_p	Fator geométrico relacionado com a largura da chapa colada e a largura do elemento de concreto
L	Comprimento; Leitura do frasco (volume ocupado pelo conjunto água – agregado miúdo)
L_b	Comprimento de aderência
L_e	Comprimento de aderência efetivo
L_{efet}	Comprimento de aderência efetivo
L_{jd}	Comprimento de aderência linear
ℓ	Comprimento
ℓ	Comprimento de ancoragem
ℓ_0	Distância inicial entre dois pontos onde são obtidas as medidas de deformações específicas
ℓ_t	Comprimento de ancoragem vinculado à aderência
$\ell_{t,máx}$	Comprimento de ancoragem máximo vinculado à aderência
MF	Módulo de finura
M_t	Momento de torção
N	Força normal
N_c	Força de compressão no concreto
N_f	Força de tração no tecido de CFC
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_b	Peso do agregado graúdo
P_{carga}	Carga de tração no PRF

$P_{máx}$	Carga máxima aplicada no CFC
$P_{m,i-1}$	Força aplicada na seção “ $i-1$ ” do PRF
P_{rec}	Peso do recipiente
PRF	Polímero reforçado com fibra
P_u	Carga de ruptura
R	Força de aderência por unidade de comprimento
R_a	Valor absoluto médio da variação da altura da superfície do substrato de concreto
R_{σ}	Tensões Normais
$R_{\sigma,u}$	Valor máximo para as tensões normais
R_z	Diferença da altura média entre cinco picos mais altos e cinco vales mais profundos do comprimento da amostra medida para a determinação da rugosidade da superfície do substrato de concreto
s	Deslocamento relativo entre o CFC e o concreto
s_{f1}	Deslocamento linear da região I
s_{f2}	Deslocamento linear da região II
s_f	Deslocamento da fibra
s_f'	Derivada do deslocamento da fibra
$s'_{f,I}$	Derivada do deslocamento da fibra para a região I
s_f''	Derivada segunda do deslocamento da fibra
$s_{f,II}$	Deslocamento da fibra para a região II
$s''_{f,II}$	Derivada segunda do deslocamento da fibra para região II
s_i	Deslocamento relativo entre o concreto e o PRF na seção i
s_{i-1}	Deslocamento relativo entre o concreto e o PRF na seção $i-1$

s_{ℓ}	Deslocamento relativo na direção da força normal atuante no compósito
$s_{máx}$	Deslocamento relativo a $\tau_{b,máx}$
T_u	Força de aderência última
$T_{u,máx}$	Valor máximo para a força de aderência última
t_a	Espessura do adesivo
t_f	Espessura do compósito de fibra de carbono
t_{ℓ}	Espessura do CFC
t_p	Espessura do CFC
u_c	Deslocamento do substrato de concreto
u_c''	Derivada segunda do deslocamento do substrato de concreto
u_f	Deslocamento do CFC
u_f'	Derivada do deslocamento da fibra
V_{rec}	Volume do recipiente
x_c	Coordenada de um ponto no substrato de concreto
x_f	Coordenada de um ponto na fibra
x_p	Coordenada relativa ao trecho no qual o adesivo deforma-se em regime plástico
w	Largura do compósito
z_1	Coordenada do nível médio da superfície do substrato de concreto

Gregos

α	Ângulo; Coeficiente que relaciona a energia de fratura total, G_F , com a energia total de fratura das fissuras inclinadas devidas ao cortante $G_{F,B}$
α_t	Coeficiente adimensional que relaciona a rigidez do compósito com a rigidez do elemento de concreto
α_y	Ângulo que relaciona o efeito da largura do compósito com a do elemento de concreto
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
$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta x}$	Gradiente de deformação específica entre dois extensômetros consecutivos no CFC
$\Delta \ell_b$	Distância entre os pontos onde são obtidas as medidas
δ_1	Deslocamento correspondente à tensão máxima de aderência
δ_c	Deslocamento do concreto
δ_f	Deslocamento do CFC
δ_f	Deslocamento máximo
$\delta_{f,i}$	Deslocamento do CFC na seção i
$\delta_{m,i}$	Deslocamento do conjunto concreto, epóxi e barra de aço na seção i
ε	Deformação específica
ε_c	Deformação específica do concreto
ε_f	Deformação específica do 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 $i-1$
$\varepsilon_{m,i}$	Deformação específica do conjunto concreto, epóxi e barra de aço na seção i
$\varepsilon_{m,i-1}$	Deformação específica do conjunto concreto, epóxi e barra de aço na seção $i-1$
ε_n	Deformação específica correspondente à tensão σ_n
ε_0	Deformação específica correspondente à leitura ℓ_0
ε_p	Deformação específica última do PRF ou da lâmina de aço no escoamento
γ	Massa específica do agregado miúdo
γ_a	Distorção no adesivo
γ_b	Massa específica aparente do agregado graúdo
γ'	Derivada da distorção do adesivo
γ''	Derivada segunda da distorção do adesivo
λ	Coeficiente
ρ	Peso unitário
ρ_f	Taxa geométrica da armadura de CFC
σ	Tensão
σ_B	Resistência à compressão do concreto
σ_c	Tensão normal no concreto
σ_{db}	Tensão de ruptura no compósito
σ_f	Tensão normal no tecido de CFC
σ_{inf}	Tensão inferior correspondente à $0,5MPa$
σ_n	Tensão considerada para o cálculo do módulo secante
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_{f1}	Tensão de aderência para a região I
τ_{II}	Tensão de aderência para a região II
τ_ℓ	Tensão tangencial de aderência no compósito
$\tau_{máx}$	Tensão tangencial máxima
$\tau_{média}$	Tensão de aderência média
τ_u	Tensão de aderência média na ruptura
ψ	Ângulo que expressa a razão de intensidade da tensão crítica para os modos I e II de energia de fratura
ν	Deslocamento vertical da fissura devido à força cortante
ν_B	Componente vertical do deslocamento proveniente da fricção das faces rugosas da fissura devido à ação da força cortante
ν_{efet}	Deslocamento vertical efetivo
ν_{fu}	Componente vertical última do deslocamento proveniente da fricção das faces rugosas da fissura no CFC

1

Introdução

1.1. Histórico

A necessidade cada vez maior de efetuar a reabilitação de estruturas que apresentam manifestações patológicas faz com que os profissionais da área busquem continuamente aperfeiçoar os meios tradicionais utilizados para este fim e investigar novos materiais que apresentem vantagens técnicas e econômicas.

O desenvolvimento desses novos materiais e sua aplicação à construção civil permitiram um grande avanço dessa técnica de reforço. Contudo, alguns pontos básicos do comportamento de reforços externos colados com resinas ainda necessitam de estudos mais conclusivos e requerem uma avaliação crítica desses materiais e técnicas, de modo a torná-los viáveis de aplicação no Brasil, em conformidade com as normas e prática de dimensionamento e detalhamento estruturais nacionais.

Um desses pontos básicos é a aderência entre o reforço e o substrato de concreto. Pelo seu caráter primordial na concepção dessa técnica, a aderência requer um estudo mais aprofundado de seu comportamento conjunto com a estrutura a ser reforçada, fundamentado em modelos e leis de aderência mais precisos, no que tange à análise das tensões de aderência entre o reforço e o substrato de concreto.

Contudo, existem vários modelos e leis de aderência que se baseiam, em geral, em ensaios de corpos-de-prova com uma ou duas tiras de material compósito coladas e tracionadas, obtendo-se uma tensão tangencial de aderência para esse material.

Dentre estes modelos destacam-se o de NEUBAUER e ROSTÁSY (1999) que formularam uma análise energética da aderência entre o substrato de concreto e o reforço colado externamente, o de KURIHARA et al. (2000) que desenvolveram um método de ensaio denominado ensaio de torque, que visa medir a tensão de aderência entre a interface do material de reforço e o substrato

de concreto e o de NAKABA et al. (2001) que realizaram experimentos com corpos-de-prova colados com tecido de fibras de carbono para a obtenção das tensões de aderência do sistema concreto-compósito.

1.2. Objetivos

Quando se emprega para o reforço de estruturas de concreto armado um sistema compósito estruturado com fibras de carbono (CFC), o qual será colado nas faces superior ou inferior das peças, deve-se garantir a aderência perfeita para esse material colado. O substrato no qual ele é aderido está sob tensões decorrentes de esforços solicitantes.

Salienta-se que a ligação mais fraca do concreto-sistema CFC ocorre no concreto. A rigidez e a resistência à tração do substrato de concreto são fatores limitadores, que podem ocasionar a ruptura frágil desse sistema. Neste caso o concreto não absorve as tensões e o compósito se descola, podendo ocorrer um desprendimento total da camada de concreto.

A falta de aderência do CFC ocasionando o seu descolamento ocorre, geralmente, devido a uma deficiência da área de colagem do reforço, quer seja devido a procedimentos inadequados, ou com a utilização de uma espessura excessiva da camada do adesivo.

Este estudo tem como objetivo delinear os parâmetros fundamentais que afetam os resultados de ensaios de corpos-de-prova usados para o estudo da aderência entre o CFC e o substrato de concreto, os quais devem representar de maneira adequada o comportamento de um reforço executado num elemento estrutural, em função do ensaio de aderência (tração-compressão) de corpos-de-prova constituídos de dois blocos de concreto (móvel e fixo) ligados por tiras de tecidos de CFC coladas em duas laterais opostas. (Figura 1.1).

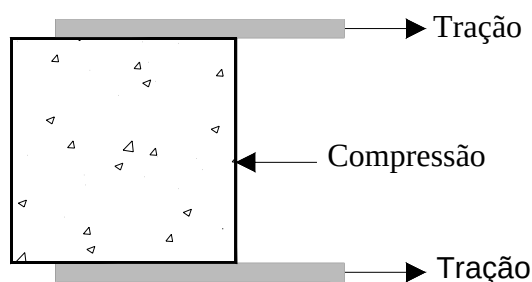


Figura 1.1 – Esquema simplificado do ensaio de tração-compressão.

Neste trabalho é desenvolvida uma análise experimental de nove corpos-de-prova de concreto com três resistências do concreto e duas larguras do tecido diferentes, para a verificação da influência destas nas tensões últimas de aderência. Nos ensaios foram medidas as deformações específicas do tecido e do concreto, foram calculadas as tensões de aderência, deformações específicas médias e deslocamentos entre o CFC e o concreto, desenhando-se curvas deformações x distâncias ao longo do comprimento de ancoragem, tensão de aderência x distâncias ao longo do comprimento de ancoragem, tensão de aderência x deformação do tecido e tensão de aderência x deslocamento relativo entre o CFC e o concreto, entre outras análises.

1.3. Conteúdo

No capítulo 2, é realizada uma revisão bibliográfica, onde se faz uma apresentação resumida do sistema de reforço com compósitos de fibra de carbono (CFC) e seus constituintes, dos parâmetros que influenciam a aderência do sistema concreto-CFC, da formulação da equação diferencial da aderência e de alguns estudos teóricos e experimentais sobre a aderência entre o substrato de concreto e o CFC, assim como resultados de ensaios utilizados para a sua determinação.

No capítulo 3 é descrito o Programa Experimental realizado. São mostrados o detalhamento dos corpos-de-prova, os materiais empregados, o esquema de instrumentações, o sistema de aplicação de carga e todas as etapas necessárias para execução dos ensaios dos corpos-de-prova.

No capítulo 4 são relatados e analisados os resultados dos ensaios dos corpos-de-prova, como os modos de ruptura, as cargas de ruptura, as tensões de aderência, deformações e deslocamentos.

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

Nos Anexos estão as seguintes informações:

- Anexo A – análise granulométrica dos agregados graúdo e miúdo utilizados no concreto dos corpos-de-prova.
- Anexo B – determinação das massas específicas dos agregados graúdo e miúdo.
- Anexo C – determinação do módulo de elasticidade do concreto.
- Anexo D – ensaio de resistência à tração do CFC.
- Anexo E – gráficos dos ensaios dos corpos-de-prova.

2

Revisão Bibliográfica

2.1.

Introdução

A eficiência do sistema de reforço com compósitos de fibra de carbono e o estabelecimento de critérios de dimensionamento requerem uma maior compreensão dos mecanismos de aderência que envolvem esse tipo de reforço. O dimensionamento do reforço e a resistência da ligação concreto-adesivo-compósito são definidores do comportamento estrutural do elemento a ser reforçado (ARAÚJO 2002, b).

Este capítulo apresenta de forma resumida o sistema de reforço com compósitos de fibra de carbono (CFC) e seus constituintes, os parâmetros que influenciam a aderência do sistema concreto-CFC, uma formulação da equação diferencial da aderência entre o concreto e o CFC e alguns estudos teóricos e experimentais sobre a aderência entre o substrato de concreto e o CFC e ensaios utilizados para a sua determinação.

2.2.

Reforço Estrutural com Compósitos de Fibras de Carbono

Pesquisas iniciais sobre reforço de estruturas de concreto armado com adição de chapas metálicas coladas com resina epóxica foram realizadas na década de 60. Esta técnica, eficiente e de custo relativamente baixo, tem as desvantagens da corrosão do aço, da baixa resistência ao fogo e, em função do peso e tamanhos comerciais das chapas, da necessidade de escoras e dificuldade de manipulação.

Portanto, essas chapas foram substituídas pelos compósitos de fibra de carbono (CFC), pois esses materiais, quando comparados com o aço de construção, para elementos com dimensões geométricas iguais, possuem um quarto do peso, resistência à tração oito a dez vezes superior, e são mais finos, logo, são mais eficientes e econômicos, pois seu custo-benefício é maior.

O sistema de reforço com CFC é indicado para aplicações em vigas, lajes, paredes, silos, reservatórios, túneis e demais elementos estruturais que necessitam de acréscimo na capacidade de carga e que tenham flechas excessivas, etc.

Esses compósitos são apropriados para o reforço de estruturas de concreto armado devido ao alto desempenho das fibras de carbono, permitindo uma significativa redução nas dimensões dos elementos de reforço, além de sua elevada resistência à tração e módulo de elasticidade da ordem de grandeza do módulo de elasticidade do aço.

As características dessa técnica também incorporam algumas vantagens na execução, como o acréscimo insignificante na carga permanente e uma espessura mínima. A boa flexibilidade permite adaptação a várias formas, e a facilidade de aplicação traz economia de custos e redução nos tempos de paralisação, além de ser um material não corrosivo, o que garante durabilidade e nenhuma manutenção.

Segundo LIMA (2001), além destas vantagens, há algumas incertezas referentes ao desempenho do reforço em determinadas situações. De acordo com a literatura corrente, a mais perigosa para a sanidade do mesmo seria a exposição do adesivo a elevadas temperaturas, fato que pode ocasionar a degradação do compósito.

A Figura 2.1 ilustra algumas recuperações realizadas com a utilização de reforço com compósitos de fibra de carbono.



Figura 2.1 – Obras recuperadas utilizando reforço com CFC; Fonte: www.mbrace.com (2004).

2.2.1. Materiais Compósitos

Os materiais compósitos são constituídos de uma matriz termoplástica (adesivo) ou matriz com cura térmica (termofixos), fibras contínuas dispostas aleatoriamente ou em direções definidas, e apresentam as seguintes particularidades: a resistência da matriz é menor que a das fibras, sendo que essas devem resistir as cargas para obter-se um ganho maior na resistência do compósito (Figura 2.2). O inconveniente que deve ser realçado é a ruptura brusca das fibras. A função da matriz (adesivo) é manter as fibras orientadas aderidas ao substrato e transmitir as ações externas para as mesmas por meio de tensões tangenciais (tensões de aderência entre a matriz e as fibras).

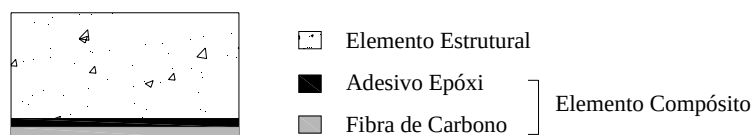


Figura 2.2 – Representação de um material compósito em reforço estrutural.

2.2.2. Compósitos de Fibras de Carbono

A técnica da colagem de laminados ou tecidos de materiais compósitos às estruturas é relativamente nova, surgiu no mercado por volta de 1980 e mostra-se atrativa face à sua facilidade de execução, manutenção das dimensões iniciais dos elementos, prazo e custos.

Dentre os compósitos mais utilizados e que apresentam maiores resultados como reforço em elementos de concreto armado estão os de fibra de carbono (CFC).

As fibras de carbono resultam do processo de carbonização de fibras de polímeros, como o poliacrilonitril, sendo suas características mecânicas diretamente dependentes da estrutura molecular obtida. Dependendo do tipo de tratamento da fibra básica que inclui carbonização, grafitização e oxidação, é possível fabricar fibras de carbono com diversas configurações de resistência e algumas delas podem chegar a ser várias vezes mais resistentes que o aço. A produção dessas fibras exige exposição ao ar das fibras base, seguida de

processamento a altas temperaturas (da ordem de 1000°C a 1500°C para as fibras de carbono). Essa característica confere à fibra uma tensão admissível de tração da ordem de 3550 MPa para uma deformação específica de 1,5%.

As fibras de carbono são caracterizadas por uma combinação de baixo peso, alta resistência e grande rigidez. O seu alto módulo de elasticidade e alta resistência dependem do grau de orientação das fibras, ou seja, do paralelismo entre os eixos destas.

Esses compósitos apresentam uma curva tensão-deformação específica linear até a ruptura, caracterizando um comportamento de ruptura frágil, sem apresentar patamar de escoamento, ou seja, não possui um escoamento definido como o do aço estrutural (Figura 2.3).

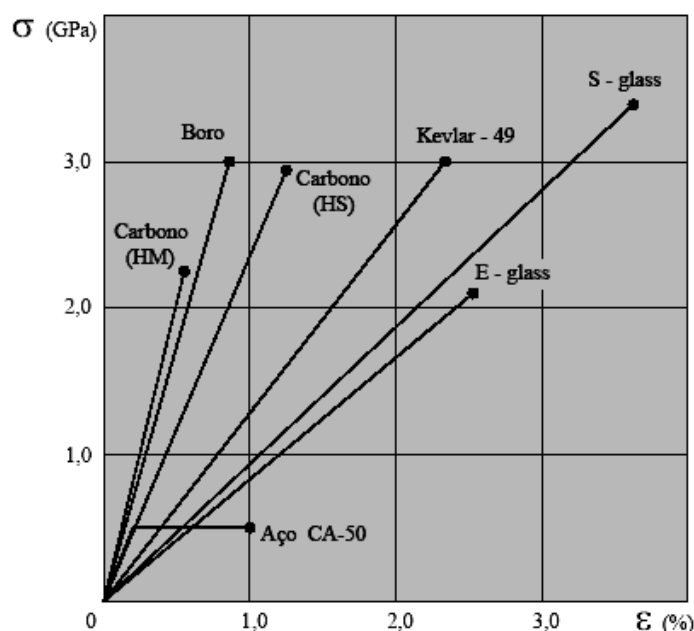


Figura 2.3 – Diagrama tensão-deformação específica, para diversos tipos de fibra; adaptada de ARAÚJO (2002 a).

Os CFC utilizados em reforço estrutural apresentam-se sob diversas formas, sendo que no momento são fabricados três tipos (BEBER et al. (2000)):

- Chapas Pultrudadas: são chapas de fibras de carbono de alta resistência, impregnadas com resina epóxi, que resultam em perfis contínuos que assumem diversas formas e que são colados à superfície do elemento estrutural (Figura 2.4).



Figura 2.4 – Chapas pultrudadas; adaptada de LIMA (2001).

- Tecidos de fibra de carbono: são tecidos pré-impregnados (“prepreg”), previamente alinhados, com espessura similar a do papel de parede, colados à superfície com resina epóxi seguindo exatamente a curvatura do elemento permitindo sua aplicação em “cantos vivos” (Figura 2.5).

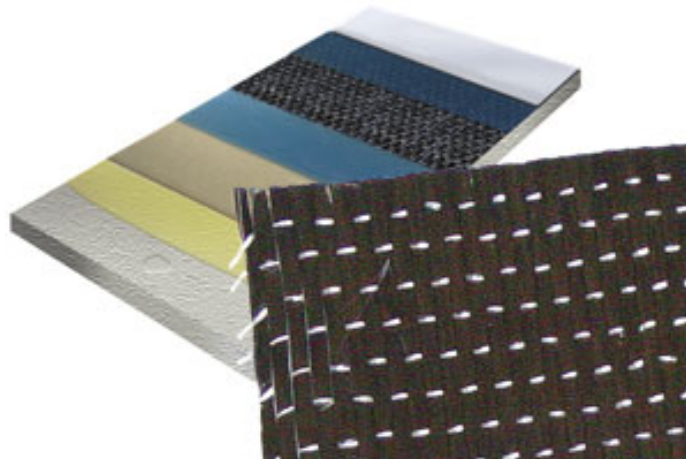


Figura 2.5 – Tecido de fibra de carbono; www.mbrace.com (2004).

- Fios de fibra de carbono: são enrolados sob tensão e consiste em filamentos colados na superfície do elemento estrutural (Figura 2.6).

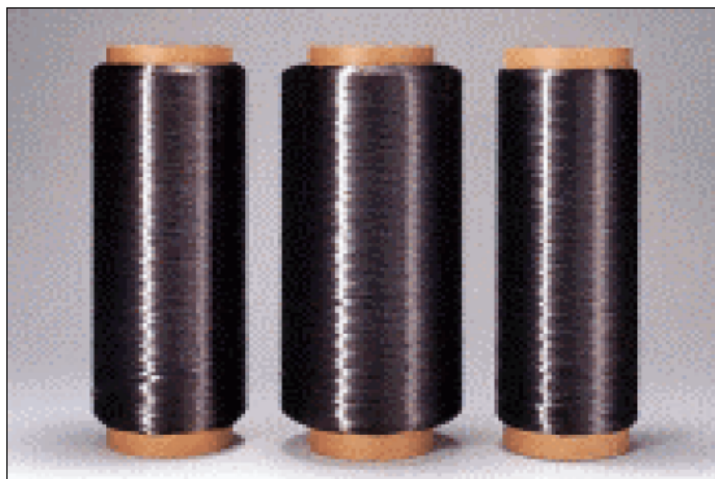


Figura 2.6 – Fios de fibra de carbono; adaptada de LIMA (2001).

A qualidade do produto e da resina a serem utilizados, a preparação cuidadosa da superfície que receberá o material e a execução correta da colagem no substrato de concreto, influem diretamente no bom desempenho dos reforços executados com CFC.

A larga aplicação desse material em diversos países da Europa, EUA, Japão e também no Brasil, vêm comprovando sua viabilidade técnica e comercial. O fator mais importante a ser considerado não seja o custo do material em si, mas o custo benefício da reabilitação de uma estrutura, considerando-se a expectativa de vida útil dessa reabilitação e o custo de outras alternativas.

2.2.3. Resinas Epóxi

As resinas epóxi (etoxileno) são as que contêm o grupo epoxílico e são derivadas da epicloridrina e bisfenol A. A primeira é proveniente de gases do petróleo e a segunda da condensação de fenol com acetona. Essas resinas começaram a ser produzidas em 1946.

As resinas epóxi de modo análogo ao cimento Portland, por si só não apresentam características físicas para utilização prática, devendo ser combinadas em sistemas com outros materiais. Para tanto, são utilizados catalisadores que contêm em suas moléculas hidrogênio ativo, que reage com as resinas gerando uma “formulação epóxi”.

Cada formulação epóxi possui propriedades físicas e químicas bem definidas. Dentre elas pode-se destacar a sua resistência à tração, variando de

30 *MPa* a 90 *MPa*, e à compressão variando de 120 *MPa* a 210 *MPa*, excelente adesão ao concreto, rompendo sempre por tração fora da área colada, com um intervalo de tempo, para adquirir resistência, variando de 30 minutos à 10 horas, sendo que a resistência máxima é obtida aos sete dias, e a retração inferior é inferior à do concreto (ARAÚJO (2002a)).

As resinas epóxi possuem alongamento de 1,6% e módulo de elasticidade de 4,3 *GPa*.

A resina epóxi tem como finalidades atuar como adesivo, ou seja, fazer com que o material atinja sua resistência própria em uma hora, apresentando excelente resistência química, alta capacidade de liga e resistência final muito elevada; garantir a aderência do compósito ao substrato de concreto, transferindo as tensões tangenciais deste para o substrato, de modo a estabelecer a integridade do arranjo compósito-epóxi-concreto; atuar como selante, para uso com diversos materiais de construção, possuindo durabilidade e elasticidade muito maiores do que os materiais usuais (MACHADO (2004)).

Dentre as resinas sintéticas utilizadas na construção, tais como as resinas acrílicas, as de poliéster, as poliuretânicas, as resinas epóxi são as mais utilizadas em reforços e recuperações de estruturas de concreto, devido a uma série de vantagens que essas apresentam sobre as outras. Dentre as vantagens dessas resinas, enfatiza-se as suas excelentes propriedades de aderência, resistência e durabilidade, além da compatibilidade que esses materiais possuem com o concreto.

O epóxi puro, formado por resina e catalisador, é o material utilizado no reforço e recuperação de estruturas de concreto. Por ser um material isolante, influencia na estrutura dando a ela uma maior resistência à ruptura do conjunto compósito-concreto, uma vez que esses dois materiais apresentam coeficientes de dilatação térmica diferentes. A camada de epóxi não deve exceder a 3 *mm* de espessura para que o seu endurecimento no interior da pasta não seja reduzido, prejudicando assim o reforço realizado. Na prática a sua espessura final fica no máximo em torno de 1 *mm*.

A escolha do tipo de adesivo é fundamental, pois o comportamento mecânico do reforço depende do mesmo.

2.3.

Aderência entre o Substrato de Concreto e o CFC

Este item apresenta os conceitos fundamentais, os parâmetros que influenciam a aderência, a formulação da equação diferencial da aderência entre o concreto e o CFC e alguns estudos teóricos e experimentais encontrados na literatura sobre a aderência entre o concreto e os compósitos de fibra de carbono, assim como os ensaios utilizados para a sua determinação.

2.3.1.

Conceitos Fundamentais

A aderência entre o compósito de fibra de carbono (CFC) e o concreto é fundamental para a efetivação do reforço estrutural de peças de concreto utilizando-se esse tipo de material, donde faz-se necessário um estudo mais aprofundado sobre este fenômeno.

A distribuição das tensões de aderência de um elemento estrutural submetido à flexão é influenciada pelas tensões normais perpendiculares à área de aderência, que são causadas por efeitos dos momentos fletores e pela transferência das forças nas fissuras existentes nas extremidades do compósito.

A distribuição geral das tensões tangenciais de aderência e da tensão normal ao longo do laminado de PRF colado ao concreto é mostrada na Figura 2.7.

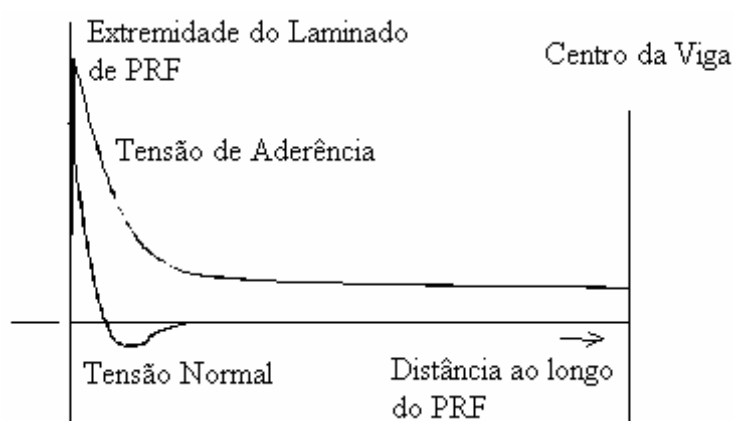


Figura 2.7 – Distribuições da tensão de aderência e tensão normal ao longo do comprimento do laminado de PRF; adaptada do ACI 440 F (2000).

Para níveis baixos de cargas as tensões de aderência estão principalmente concentradas na extremidade do reforço, mas com o aumento do carregamento estas se propagam ao longo deste.

A ação da aderência entre o concreto e o reforço pode ser caracterizada pela relação tensões de aderência x deslocamento, face ao fato de que as tensões de aderência são transferidas entre o concreto e o reforço face ao deslocamento entre esses dois materiais.

Os modelos e leis de aderência existentes fundamentam-se, em geral, em ensaios de corpos-de-prova com um ou dois laminados ou tiras coladas, tracionadas em conjunto com o corpo-de-prova (este também pode ser submetido à compressão), o que não reflete o verdadeiro comportamento do reforço colado externamente em elementos estruturais submetidos à flexão simples. Portanto, as leis de aderência x deslocamento do compósito, fundamentadas em resultados de ensaios buscam representar esse fenômeno, o qual por sua complexidade dificulta a elaboração de um modelo teórico consistente, visto a dificuldade de se padronizar um ensaio que represente a realidade física do elemento estrutural fissurado.

Para a determinação e caracterização da aderência são utilizados diversos tipos de ensaios de aderência, dentre eles podem ser destacados os ensaios de tração-tração, ensaio de tração-compressão, ensaios de arrancamento (pull-off) e de torque realizados por KURIHARA et al. (2000), os quais serão analisados posteriormente.

Nos ensaios de tração pura a tensão de aderência tende a diminuir quando a área de aderência aumenta. Isso ocorre devido ao fato da tensão de aderência não ser distribuída ao longo de toda a área do comprimento de aderência, e sim na região da extremidade carregada do CFC, ou na fissura. Isto para comprimentos não maiores do que 100 mm. Em cada método de ensaio a ruptura ocorre na parte mais fraca do sistema, que pode ser o adesivo, o concreto, o CFC ou a combinação destes.

2.3.2.

Parâmetros que Influenciam a Aderência

Este item apresenta alguns parâmetros que influenciam as tensões de aderência entre o CFC e o concreto. Salienta-se que existem outros parâmetros influenciadores, mas só serão mencionados neste item os quatro descritos a seguir.

2.3.2.1.

Comprimento de Ancoragem do CFC

O CFC é considerado um material frágil e apresenta uma baixa ductilidade, com ruptura brusca sem apresentar patamar de escoamento, portanto, o uso de ancoragem entre o concreto e os CFC tem função importante em projetos de reforço (NAKABA et al. (2001)).

Analisando-se os comportamentos das deformações específicas e das cargas de ruptura, observa-se que a aderência é totalmente alcançada para comprimentos de aderência menores, mas resistem a cargas de rupturas menores.

Quando o comprimento de ancoragem aumenta, a força da ruptura tende a ser maior, e a tensão de aderência média diminui, sendo necessário confirmar a segurança do CFC, ou buscar um comprimento de aderência adequado para evitar a ruptura brusca do tipo frágil (CHAJES et al. (1996)).

Como a força de tração dos CFC é transferida ao concreto, não existe tensão de aderência entre as regiões descoladas. Isso significa que quando o comprimento de aderência excede a um comprimento crítico (igual ao comprimento de aderência efetivo) da ordem de 100 *mm*, a carga de fratura permanece constante (NAKABA et al. (2001)).

As Figuras 2.8 e 2.9, obtidas de resultados experimentais de CHAJES et al. (1996) ilustram o comportamento das tensões de aderência em função de comprimentos de aderência variáveis.

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

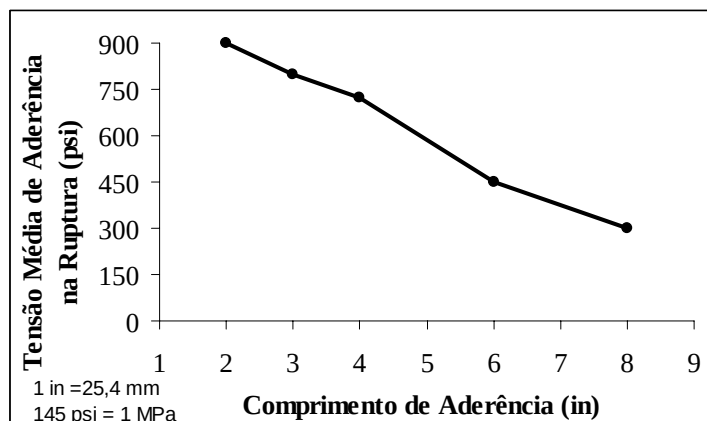


Figura 2.8 – Gráfico tensão média de aderência x comprimento de aderência; adaptada de CHAJES et al. (1996).

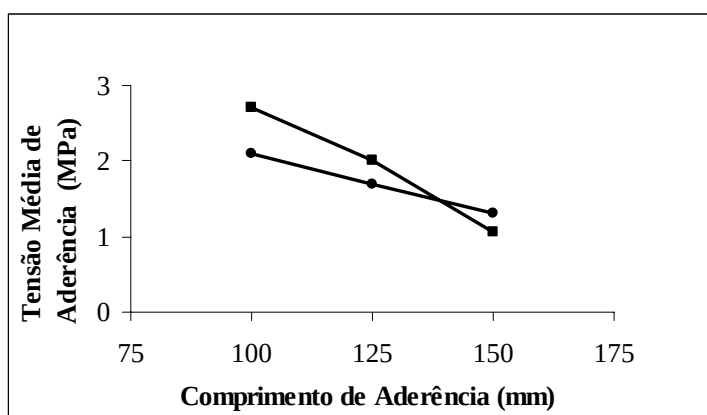


Figura 2.9 – Gráfico tensão média de aderência x comprimento de aderência para dois tipos de CFC; adaptada de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).

A Figura 2.10 mostra que para comprimentos de aderência menores as cargas de ruptura são menores, e a partir de um certo comprimento esta se torna constante.

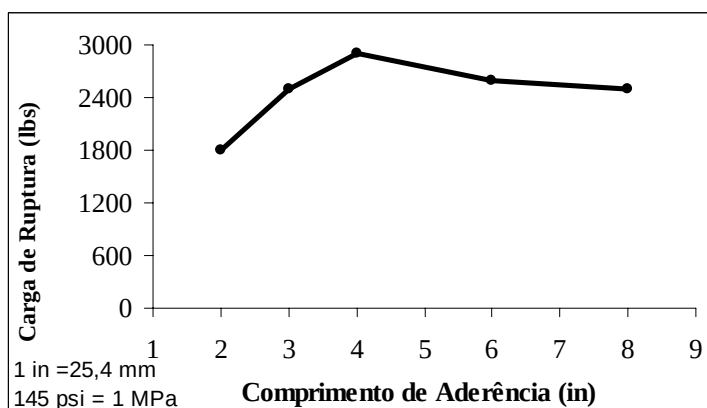


Figura 2.10 – Gráfico carga de ruptura x comprimento de aderência; adaptada de CHAJES et al. (1996).

2.3.2.2.

Resistência à Compressão do Concreto

As Figuras 2.11 e 2.12 ilustram gráficos tensão média de aderência x resistência à compressão do concreto obtida em ensaios realizados por CHAJES et al. (1996) e ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001). Nestes gráficos, observa-se que as tensões de aderência aumentam quando a resistência à compressão do concreto aumen

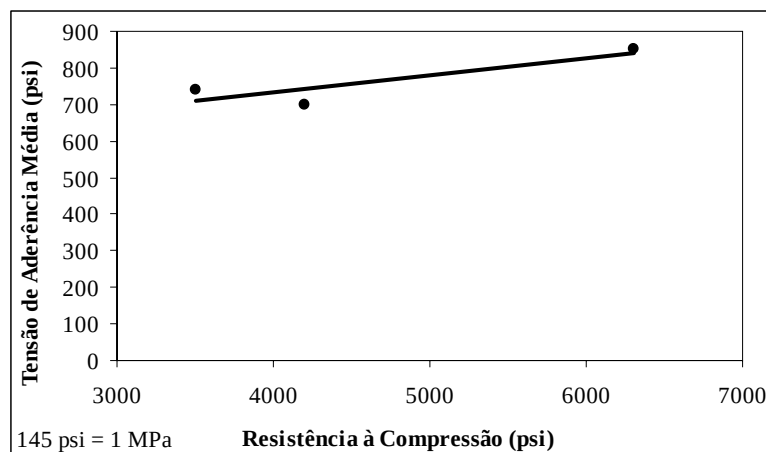


Figura 2.11 – Gráfico tensão média de aderência x resistência à compressão do concreto; adaptada de CHAJES et al. (1996).

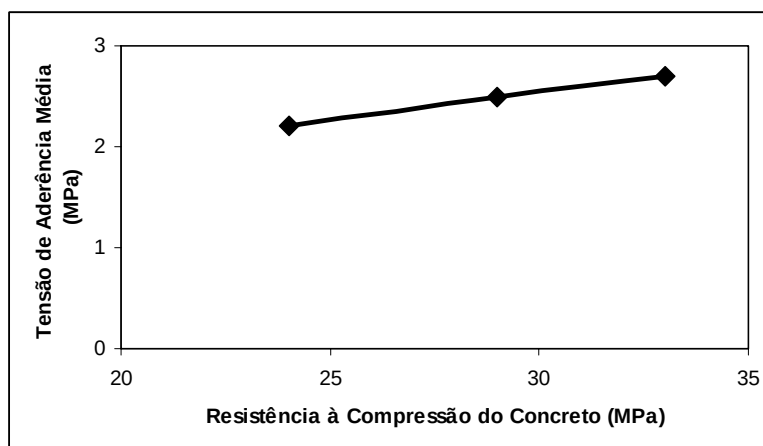


Figura 2.12 – Gráfico tensão média de aderência x resistência à compressão do concreto; adaptada de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).

2.3.2.3.

Tipos de Adesivo e Tratamento da Superfície de Concreto

KURIHARA et al. (2000) realizaram experimentos com diversos tipos de adesivo e tratamento da superfície de concreto para verificar a influência destes na aderência entre o concreto e o CFC. Os adesivos utilizados por esses autores

foram resina epóxi, argamassa de polímero de cimento modificado e argamassa de cimento e os tratamentos foram: sem tratamento, fragmentação, jato de ar e trituração.

Os resultados desses ensaios mostraram que existe uma excelente tensão de aderência entre a resina epóxi e o substrato de concreto, que é maior do que a tensão média obtidos para concretos de boa qualidade e resistência usual.

O desenvolvimento da tensão de aderência da resina epóxi é muito rápido quando comparado com a argamassa de polímero de cimento modificado, sendo necessário somente um dia para a tensão tangencial de aderência da resina epóxi exceder o valor da tensão tangencial de aderência do concreto. O rápido desenvolvimento da tensão tangencial de aderência é uma vantagem, pois elementos estruturais reforçadas podem ser liberados mais cedo para utilização.

Quando a argamassa de polímero de cimento modificado é usada como adesivo, os tipos de ruptura variam de rupturas de aderência na interface em idades menores até rupturas no concreto depois de três dias. A tensão tangencial de aderência aumenta com a idade da argamassa de polímero de cimento modificado.

O desenvolvimento da tensão tangencial de aderência para argamassa de polímero de cimento modificado, não é tão rápido quanto ao da resina epóxi, sendo necessários dez dias, e é menor que esse, e depende do grau de rugosidade da superfície. A argamassa de polímero de cimento modificado também possui uma elevada tensão tangencial de aderência, mas apresenta rupturas na interface.

Os corpos-de-prova colados com argamassa de cimento romperam na interface em 100% dos ensaios.

A argamassa de cimento possui valores relativamente menores para a tensão tangencial de aderência, donde ocorrem rupturas na interface. O desenvolvimento da tensão de aderência da argamassa de cimento é muito lento e pequeno.

A resistência do conjunto CFC – concreto depende da qualidade do concreto ao longo da superfície em que o compósito está colado, sendo que as propriedades dessa superfície não podem ser indicativos de resistência para toda a estrutura.

As superfícies tratadas com fragmentação possuem maior rugosidade, seguidas pela superfície tratada com jato de ar, trituração e sem tratamento.

Em geral, nos substratos tratados com jato de ar ou água, uma grande proporção de rupturas ocorre na interface.

A relação entre a rugosidade da superfície e a tensão tangencial de aderência obtida em corpos-de-prova, usando argamassa de cimento como adesivo, mostra que a relação entre a rugosidade da superfície e essa tensão é uma relação linear.

A influência da rugosidade do substrato de concreto na tensão tangencial de aderência é muito significativa quando se utiliza argamassa de cimento como adesivo. Existe uma relação linear entre a rugosidade da superfície do substrato de concreto e essa tensão na argamassa de cimento, sendo que quanto mais elevado for o grau de rugosidade da superfície, mais elevado é o valor deste parâmetro.

Para a argamassa de polímero de cimento modificado existem algumas influências da rugosidade na tensão de aderência. Para corpos-de-prova colados com resina epóxi, a influência da rugosidade nessa tensão não foi observada nos ensaios de KURIHARA et al. (2000), sendo que os mesmos não são conclusivos.

A Tabela 2.1 mostra os resultados obtidos por KURIHARA et al. (2000) para a tensão de aderência utilizando diversos tipos de adesivo e tratamento da superfície.

Tabela 2.1 – Resultados para a tensão de aderência utilizando-se diversos tipos de adesivo e tratamento da superfície; adaptada de KURIHARA et al. (2000).

<i>Adesivo</i>	<i>Idade do Adesivo (dias)</i>	<i>Tratamento da Superfície</i>	<i>$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)</i>
<i>Epóxi</i>	8	<i>Sem Tratamento</i>	3,96
		<i>Trituração</i>	4,55
		<i>Fragmentação</i>	5,08
		<i>Jato de Ar</i>	4,71
<i>Argamassa de Polímero de Cimento Modificado</i>	10	<i>Sem Tratamento</i>	4,29
		<i>Trituração</i>	6,13
		<i>Fragmentação</i>	5,33
		<i>Jato de Ar</i>	5,16
<i>Argamassa de Cimento</i>	24	<i>Sem Tratamento</i>	0,73
		<i>Trituração</i>	1,11
		<i>Fragmentação</i>	1,12
		<i>Jato de Ar</i>	1,45

Nota-se que corpos-de-prova colados com argamassa de polímero de cimento modificado e superfície tratada com fragmentação possuem maiores tensões de aderência.

CHAJES et al. (1996) utilizaram Sikadur 31, Sikadur 32, Tyrite e Fusor como adesivo e superfície sem tratamento, abrasão mecânica e trituração para

obter a rugosidade adequada para o recebimento do reforço e obtiveram os resultados mostrados nas Tabelas 2.2 e 2.3.

Tabela 2.2 – Resultados para diferentes tipos de adesivo; adaptada de CHAJES et al. (1996).

<i>Tipo do Adesivo</i>	<i>Resistência à Compressão do Concreto (MPa)</i>	<i>Tensão Média de Aderência na Ruptura (MPa)</i>
<i>Sikadur 31</i>	47,00	5,49
<i>Sikadur 32</i>	43,58	5,44
<i>Tyrite</i>	43,58	4,62
<i>Fusor</i>	43,58	5,43

Tabela 2.3 – Resultados para diferentes tipos de tratamento da superfície; adaptada de CHAJES et al. (1996).

<i>Preparação da Superfície</i>	<i>Resistência à Compressão do Concreto (MPa)</i>	<i>Tensão Média de Aderência na Ruptura (MPa)</i>
<i>Superfície sem Tratamento</i>	36	4,37
<i>Trituração</i>	47	5,13
<i>Abrasão Mecânica</i>	47	5,49

Observa-se que as tensões médias de aderência são maiores para corpos-de-prova colados com Sikadur 31 e superfície tratada com abrasão mecânica.

A análise dos resultados dos ensaios realizados por CHAJES et al. (1996) e KURIHARA et al. (2000) concluíram que as tensões de aderência variam de acordo com os diversos tipos de adesivo usados para a colagem do CFC e com os variados tipos de tratamento da superfície para se obter uma rugosidade adequada para melhorar a aderência.

2.3.3.

Equação Diferencial da Aderência entre o Concreto e o CFC

A formulação teórica do comportamento da aderência CFC-concreto é fundamentada na deformação da camada de adesivo e no sistema mecânico de transferência de forças entre os três materiais, (Figura 2.13) (SÁNCHEZ et. al (2004)).

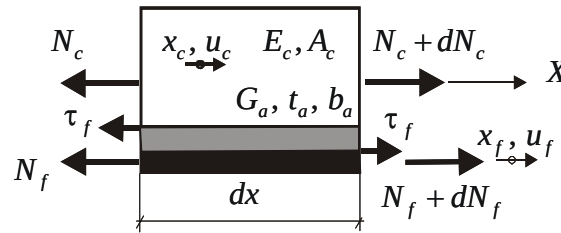


Figura 2.13 – Parâmetros geométricos e mecânicos para a análise da aderência entre o CFC e o substrato de concreto.

Definindo-se $n_f = \frac{E_f}{E_c}$ como a relação entre os módulos de elasticidade do

CFC e do concreto, $\rho_f = \frac{A_f}{A_c}$ como a taxa geométrica da armadura de CFC, sendo

A_f e A_c as áreas do CFC e do concreto, respectivamente e $A_f = t_f b_f$, onde b_f é a largura, e t_f a espessura do CFC.

As tensões tangenciais τ , denominadas de tensões de aderência, que produzem uma distorção γ no adesivo (Figura 2.14), surgem entre o adesivo de espessura t_a , com módulo de elasticidade transversal G_a e o CFC, e entre o adesivo e o substrato de concreto. Essas tensões tangenciais resultam em forças tangenciais nas interfaces desses elementos, as quais em conjunto com as forças normais (N) atuantes no CFC e no concreto permitem formular o equilíbrio do conjunto, seguindo-se para um trecho de comprimento elementar dx (Figura 2.14).

- equilíbrio na direção longitudinal:

$$dN_f = -dN_c \quad (2.1)$$

- equilíbrio no CFC:

$$dN_f = A_f d\sigma_f = t b_f dx \quad (2.2)$$

logo

$$\frac{dN_f}{dx} = t b_f \quad (2.3)$$

➤ equilíbrio no substrato de concreto:

$$dN_c = A_c d\sigma_c = -dN_f = -t b_f dx \quad (2.4)$$

$$\frac{dN_c}{dx} = -t b_f \quad (2.5)$$

Admitindo-se o regime de pequenas deformações tem-se para a análise da distorção no adesivo (Figura 2.14).

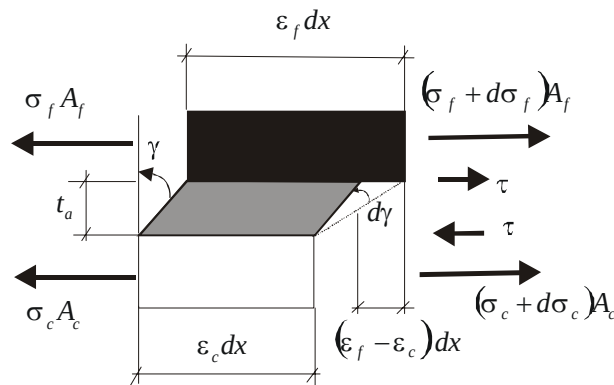


Figura 2.14 – Parâmetros para a análise da distorção do adesivo.

$$t_a d\gamma \cong (\varepsilon_f - \varepsilon_c) dx \quad (2.6)$$

Sendo $(\varepsilon_f - \varepsilon_c)$ representa a deformação específica relativa entre o CFC e o substrato de concreto, logo:

$$\frac{d\gamma}{dx} = \gamma' = \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_c}{t_a} \quad (2.7)$$

Admitindo-se que os materiais tenham comportamento elástico e linear segue-se:

$$\gamma' = \frac{1}{t_a E_f} (\sigma_f - n_f \sigma_c) \quad (2.8)$$

Supondo-se que a função que representa a distorção seja contínua e possua pelo menos duas derivadas contínuas tem-se:

$$\gamma'' = \frac{1}{t_a E_f} \left(\frac{d\sigma_f}{dx} - n_f \frac{d\sigma_c}{dx} \right) \quad (2.9)$$

As equações 2.3 e 2.6 resultam numa equação diferencial de 2ª ordem, linear e homogênea:

$$\gamma'' - \frac{\tau b_f}{t_a E_f A_f} (1 - n_f \rho_f) = 0 \quad (2.10)$$

A equação 2.10 pode ser expressa em termos do deslocamento relativo entre o CFC e o substrato de concreto, definindo-se u_f e u_c como os deslocamentos do CFC e do substrato de concreto, respectivamente, tem-se:

$$s_f = u_f - u_c \quad (2.11)$$

Admitindo-se que esses deslocamentos sejam funções contínuas da variável x , e que possuam pelo menos duas derivadas contínuas, obtém-se:

$$\begin{cases} \varepsilon_f = \frac{du_f}{dx} = u_f' \\ \varepsilon_c = \frac{du_c}{dx} = u_c' \end{cases} \quad (2.12)$$

$$s_f' = u_f' - u_c' \quad (2.13)$$

Pela lei de Hooke tem-se:

$$\begin{cases} \frac{du_f}{dx} = u_f' = \frac{N_f}{E_f A_f} \\ \frac{du_c}{dx} = u_c' = \frac{N_c}{E_c A_c} \end{cases} \quad (2.14)$$

Sendo N_f e N_c as forças no CFC e no concreto, respectivamente, tem-se:

$$s_f' = \frac{N_f}{E_f A_f} - \frac{N_c}{E_c A_c} \quad (2.15)$$

A derivada em relação a x fornece:

$$s_f'' = \frac{1}{E_f A_f} \frac{dN_f}{dx} - \frac{1}{E_c A_c} \frac{dN_c}{dx} \quad (2.16)$$

Substituindo-se nessa equação as expressões 2.1 e 2.2 tem-se:

$$s_f'' - \left(\frac{1}{E_f A_f} + \frac{1}{E_c A_c} \right) b_f \tau = 0 \quad (2.17)$$

Resultando:

$$s_f'' - \left(\frac{1 + n_f \rho_f}{E_f A_f} \right) b_f \tau = 0 \quad (2.18)$$

A tensão tangencial τ depende do deslocamento s_f , logo é plausível admiti-la como uma função $\tau(s_f) = f(s_f)$ que possa ser calibrada experimentalmente, donde:

$$s_f'' - \left(\frac{1 + n_f \rho_f}{E_f A_f} \right) b_f f(s_f) = 0 \quad (2.19)$$

Essa equação diferencial de 2ª ordem, linear e homogênea, apresenta como soluções diversos tipos de funções $f(s_f)$. Essas funções são denominadas leis de aderência em termos de deslocamento, $\tau \times s$, e dependem do tipo de ensaio, (Figura 2.15).

- a) com tração no CFC e compressão no concreto (ensaios T-C);
- b) com tração no CFC e tração no concreto (ensaios T-T).

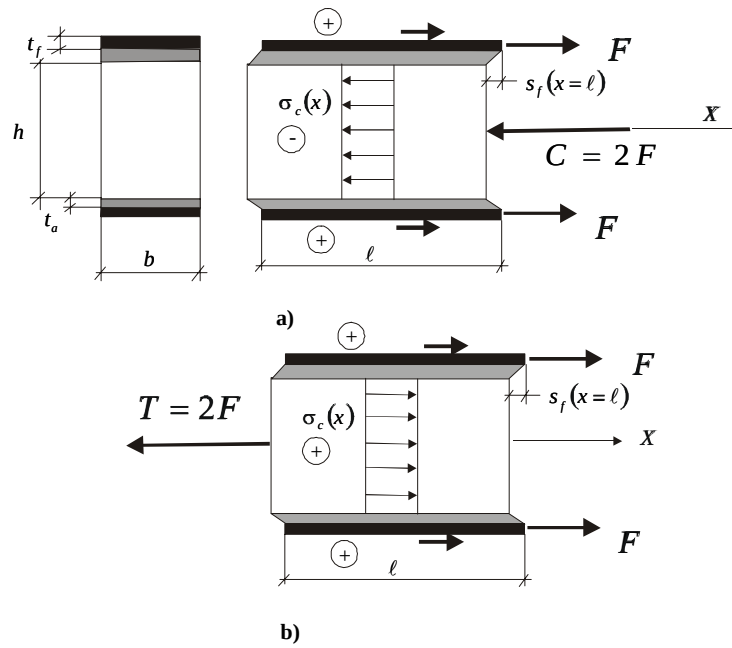


Figura 2.15 – Ensaio de aderência CFC-concreto: a) ensaio T-C; b) ensaio T-T.

2.3.3.1.

Lei $\tau \times s$ Bi-Linear

➤ Equação Diferencial em Termos dos Deslocamentos

A solução da equação 2.19 para uma lei de aderência bi-linear é efetuada admitindo-se o regime de pequenas deformações e os parâmetros mostrados na Figura 2.16.

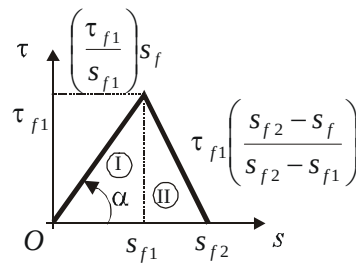


Figura 2.16 – Parâmetros para a análise do comportamento de uma lei bi-linear: diagrama $\tau \times s$;

➤ distorção do adesivo:

$$\operatorname{tg} \gamma_a = \frac{s_{f1}}{t_a} \cong \gamma_a \quad (2.20)$$

Região I: trecho elástico linear com tensões e deslocamentos crescentes (Figura 2.17).

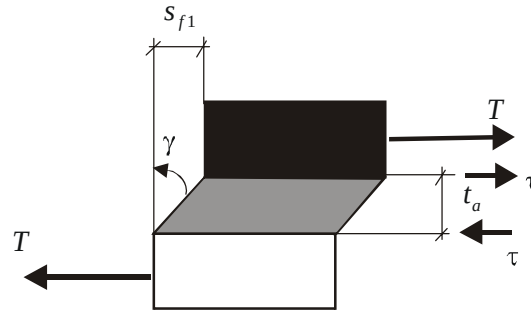


Figura 2.17 – Sistema mecânico para a Região I.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\tau_{f1}}{s_{f1}} = \frac{\gamma_a G_a}{s_{f1}} = \frac{G_a}{t_a} \quad (2.21)$$

$$\tau = \tau_{f1} \frac{s_f}{s_{f1}} = \frac{G_a}{t_a} s_f \quad (2.22)$$

onde G_a é o módulo de elasticidade transversal do adesivo.

Substituindo-se a equação 2.22 na equação 2.19 obtém-se a seguinte equação para a região I:

$$s_f'' - \left(\frac{1 + n_f \rho_f}{E_f A_f} \right) \frac{G_a b_f}{t_a} s_f = 0 \quad (2.23)$$

Definindo-se:

$$k^2 = \left(\frac{1 + n_f \rho_f}{E_f A_f} \right) \frac{G_a b_f}{t_a} \quad (2.24)$$

Resulta:

$$s_f'' - k^2 s_f = 0 \quad (2.25)$$

Sendo a solução geral dada por:

$$s_f(x) = A \cdot \sinh(kx) + B \cdot \cosh(kx) \quad (2.26)$$

Onde as constantes A e B serão determinadas por meio das condições de contorno, realçando-se que são dependentes do tipo de ensaio de aderência, T-T ou T-C.

Região II: Para o ponto de tensões máximas têm-se as coordenadas $(s_f = s_{f1}; \tau_{f1})$, as tensões tangenciais são decrescentes com o acréscimo dos deslocamentos (Figura 2.18), então:

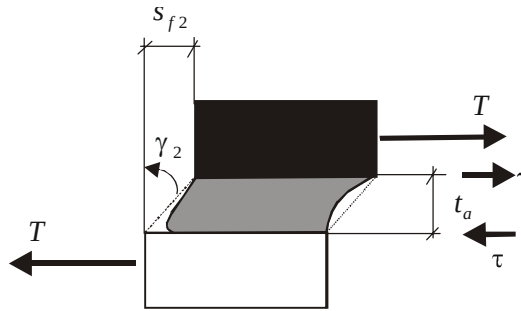


Figura 2.18 – Sistema mecânico para a Região II.

$$\tau = \tau_{f1} \left(\frac{s_{f2} - s_f}{s_{f2} - s_{f1}} \right) \quad (2.27)$$

2.3.3.1.1.

Ensaio de Aderência com Tração e Compressão

Região I: Para o ensaio de aderência com tração e compressão (Figura 2.15 (a)) tem-se as seguintes condições de contorno em cada face do corpo-de-prova:

$$x = 0 \quad \begin{cases} N_c = 0 \\ N_f = 0 \end{cases} \quad x = \ell \quad \begin{cases} N_c = -F \\ N_f = F \end{cases} \quad \text{em cada face} \quad (2.28)$$

Onde ℓ é o comprimento do corpo-de-prova, F é a força aplicada no CFC, e sabendo-se que:

$$s'_f(x) = A \cdot k \cosh(kx) + B \cdot k \sinh(kx) = \frac{N_f}{E_f A_f} - \frac{N_c}{E_c A_c} \quad (2.29)$$

Tem-se para $x = 0$:

$$s'_f(x=0) = 0 \quad \therefore \quad A = 0 \quad (2.30)$$

E para $x = \ell$ segue-se utilizando-se a equação 2.26

$$s_f(x = \ell) = B \cosh(k\ell) \quad (2.31)$$

$$B = \frac{s_f(x = \ell)}{\cosh(k\ell)} \quad (2.32)$$

A solução geral da equação 2.26 é dada por:

$$s_f(x) = s_f(x = \ell) \cdot \frac{\cosh(kx)}{\cosh(k\ell)} \quad (2.33)$$

A segunda condição de contorno fornece:

$$s'_f(x = \ell) = \frac{F}{E_f A_f} - \frac{(-F)}{E_c A_c} = F \left(\frac{1 + n_f \rho_f}{E_f A_f} \right) \quad (2.34)$$

$$s'_f(x = \ell) = s_f(x = \ell) \cdot k \cdot \frac{\sinh(k\ell)}{\cosh(k\ell)} \quad (2.35)$$

Igualando-se essas duas equações segue-se:

$$F \left(\frac{1 + n_f \rho_f}{E_f A_f} \right) = s_f(x = \ell) \cdot k \cdot \frac{\sinh(k\ell)}{\cosh(k\ell)} \quad (2.36)$$

Reescrevendo-se a equação 2.24 como:

$$\frac{k^2 t_a}{G_a b_f} = \left(\frac{1 + n_f \rho_f}{E_f A_f} \right) \quad (2.37)$$

Substituindo-se essa expressão na equação anterior obtém-se o deslocamento no extremo do CFC, dado por:

$$s_f(x = \ell) = \frac{F t_a}{G_a b_f} \cdot k \cdot \frac{\cosh(k\ell)}{\sinh(k\ell)} \quad (2.38)$$

Substituindo-se a equação 2.38 na 2.33 tem-se:

$$s_f(x) = \frac{F t_a k}{G_a b_f} \cdot \frac{\cosh(kx)}{\sinh(k\ell)} \quad (2.39)$$

Sabendo-se que $N_c = -N_f$, a expressão para as forças no CFC e no substrato de concreto é obtida considerando-se a equação 2.37 é:

$$s'_f(x) = \frac{N_f}{E_f A_f} (1 + n_f \rho_f) \quad (2.40)$$

O que leva a:

$$s'_f(x) = N_f \frac{k^2 t_a}{G_a b_f} \quad (2.41)$$

Derivando-se a equação 2.39 tem-se:

$$s'_f(x) = \frac{F t_a}{G_a b_f} \cdot k^2 \cdot \frac{\sinh(kx)}{\sinh(k\ell)} \quad (2.42)$$

Que comparada com a expressão anterior resulta:

$$N_f(x) = -N_c(x) = F \cdot \frac{\sinh(kx)}{\sinh(k\ell)} \quad (2.43)$$

Derivando-se a equação 2.43 e comparando-a com a equação 2.3, tem-se a lei de variação das tensões tangenciais ao longo da interface CFC-substrato de concreto:

$$\tau(x) = \frac{F k}{b_f} \cdot \frac{\cosh(kx)}{\sinh(k\ell)} \quad (2.44)$$

Região II: A reta que exprime o ramo descendente da relação $\tau \times s$, mostrado na Figura 2.16, é dada por:

$$\tau_{II}(x) = \frac{G_a \lambda^2}{t_a} \cdot [s_{f2} - s_{f,II}(x)] \quad (2.45)$$

sendo

$$\lambda^2 = \frac{s_{f1}}{s_{f2} - s_{f1}} \quad (2.46)$$

Com os parâmetros mostrados na Figura 2.19, tem-se para $x \geq x_p$, definindo-se x_p como a coordenada relativa ao trecho no qual o adesivo deforma-se em regime plástico, sendo a equação diferencial da aderência escrita como:

$$s_{f,II}'' - \left[\frac{1}{E_f A_f} + \frac{1}{E_c A_c} \right] b_f \cdot \tau_{II} = 0 \quad (2.47)$$

Substituindo-se nessa equação a equação 2.45:

$$s_{f,II}''(x) + k^2 \lambda^2 s_{f,II}(x) = k^2 \lambda^2 s_{f2} \quad (2.48)$$

Que é uma equação diferencial de 2ª ordem não-homogênea cuja solução é dada por:

$$s_{f,II}(x) = C \cdot \text{sen}(k\lambda x) + D \cdot \cos(k\lambda x) + s_{f2} \quad (2.49)$$

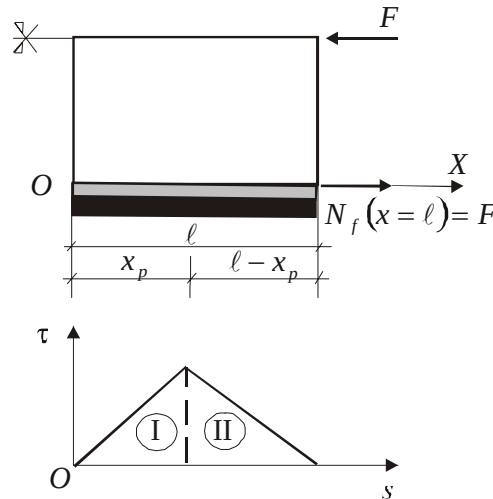


Figura 2.19 – Parâmetros para a análise da aderência na Região II para o ensaio de T-C.

As condições de contorno dessa equação, para o ensaio T-C, são:

$$\begin{cases} s_{f,II}(x = x_p) = s_{f1} \\ s'_{f,I}(x = x_p) = s'_{f,II}(x = x_p) \end{cases} \quad (2.50)$$

Onde os índices I e II referem-se às regiões situadas sob as retas que traduzem a lei $\tau \times s$ ((SÁNCHEZ et. al (2004))), seguindo-se:

$$\tau_{II}(x) = \frac{G_a \lambda^2}{t_a} \cdot (s_{f2} - s_{f1}) \cdot \left\{ \cos[k\lambda(x - x_p)] - \lambda \cdot \tanh(kx_p) \cdot \sin[k\lambda(x - x_p)] \right\} \quad (2.51)$$

2.3.3.1.2.

Ensaio de Aderência com Tração e Tração

Região I: As condições de contorno para esse caso são (Figura 2.15 (b)):

$$\begin{aligned} x = 0 & \begin{cases} N_c(x = 0) = F \\ N_f(x = 0) = 0 \end{cases} \\ x = \ell & \begin{cases} N_c(x = 0) = 0 \\ N_f(x = 0) = F \end{cases} \end{aligned} \quad (2.52)$$

Donde segue-se:

$$s'_f(x) = Ak \cosh(kx) + Bk \sinh(kx) = \frac{N_f}{E_f A_f} - \frac{N_c}{E_c A_c} \quad (2.53)$$

Então

$$\tau = \frac{Fk}{b_f \sinh(k\ell)} \cdot \frac{\cosh(kx) + n_f \rho_f \{ \cosh[k(\ell - x)] \}}{1 + n_f \rho_f} \quad (2.54)$$

Região II:

Sabendo-se que:

$$\tau_{II}(x) = \frac{G_a \lambda^2}{t_a} \cdot [s_{f2} - s_{f,II}(x)] \text{ para } x \geq x_p \quad (2.55)$$

Representa o ramo descendente da relação $\tau \times s$, onde:

$$\lambda^2 = \frac{s_{f1}}{s_{f2} - s_{f1}} \quad (2.56)$$

$$s''_{f,II} - \left[\frac{1}{E_f A_f} + \frac{1}{E_c A_c} \right] \cdot b_f \tau_{II} = 0 \quad (2.57)$$

Então (SÁNCHEZ et. al, 2004):

$$\tau_{II}(x) = \frac{G_a \lambda^2}{t_a} \cdot \left[\frac{F}{E_c t_c b \lambda^3 k} \cdot \text{sen}(k \lambda x) + \frac{\tau_{f1} t_a}{G_a \lambda^2} \cdot \frac{\cos(k \lambda x)}{\cos(k \lambda x_p)} - \frac{F}{E_c t_c b \lambda^3 k} \cdot \text{tg}(k \lambda x_p) \cdot \cos(k \lambda x) \right] \quad (2.58)$$

2.3.4. Estudos sobre a Aderência

Neste item são apresentados alguns estudos sobre a aderência entre o concreto e o CFC, analisando-se alguns parâmetros que influenciam a aderência e alguns tipos de ensaios encontrados na literatura.

2.3.4.1. CHAJES et al. (1996)

CHAJES et al. (1996) apresentaram resultados de ensaios de aderência com corpos-de-prova cúbicos de concreto colados com chapa de material compósito, com enfoque na resistência do conjunto concreto-epóxi-chapa e na transferência de forças entre o concreto e a chapa.

Foram analisados os efeitos da preparação da superfície de concreto, o tipo de adesivo, a resistência à compressão do concreto sobre a resistência média do sistema.

Para a caracterização da transferência de forças entre o concreto e a chapa analisaram os efeitos de diversos comprimentos de aderência da chapa e foram utilizados os mesmos corpos-de-prova que foram utilizados para a obtenção da resistência do sistema concreto-CFC, sendo estes corpos-de-prova submetidos a cargas aumentadas continuamente até a ruptura destes.

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

Considerando-se esses comportamentos, algumas premissas podem ser 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 CHAJES et al. (1996), por meio das deformações específicas medidas, a força na chapa de material compósito é calculada usando-se o módulo de elasticidade e a área da seção transversal da chapa.

As tensões tangenciais médias de aderência foram calculadas para cada medida de deformação específica por meio da seguinte equação:

$$\tau = \frac{F_1 - F_2}{w\Delta L} \quad (2.59)$$

onde

F_1 e F_2 – forças no compósito para duas medidas de deformação específica;

w – largura do compósito;

ΔL – distância entre dois pontos nos quais foram obtidas as deformações específicas.

A força de aderência por unidade de comprimento R , entre duas medidas de deformação específica, é calculada por:

$$R = \tau w = \frac{F_1 - F_2}{\Delta L} \quad (2.60)$$

Fundamentada em representações idealizadas para o mecanismo de transferência de forças, a carga última T_u , do conjunto concreto-compósito, com um comprimento de aderência L_b , foi obtida por meio das equações:

$$T_u = RL_b \quad L_b < L_{jd} \quad (2.61)$$

$$T_u = RL_{jd} \quad L_b \geq L_{jd} \quad (2.62)$$

onde

L_{jd} – comprimento de aderência linear para o conjunto.

Segundo CHAJES et al. (1996) são necessários experimentos adicionais e trabalhos analíticos para o desenvolvimento da relação da aderência entre o conjunto concreto-compósito, que considere a influência dos efeitos da resistência variável do concreto, ductilidade do adesivo e propriedades do compósito.

2.3.4.2.**NEUBAUER e ROSTÁSY (1999)**

As formulações clássicas sobre a aderência concreto-CFC são, em geral, efetuadas e fundamentadas em leis de tensão de aderência $\times$ deslocamento, que às vezes são a própria essência da formulação proposta, obtendo-se relações entre a teoria e os experimentos para a tensão de aderência e para o comprimento de ancoragem do CFC.

A diferença básica entre as diversas formulações dessa natureza está na adoção de um tipo específico de lei $\tau \times s$, e no tipo de análise: elástica linear ou não linear. Alguns modelos adotam uma lei $\tau \times s$ que serve de fundamento para uma formulação que considera parâmetros energéticos, tal como a energia de fratura dos materiais.

Os modelos de aderência existentes, derivados de ensaios de aderência pura, são baseados nos mecanismos de fratura para a ruptura do concreto.

O modelo de aderência do reforço ao concreto a seguir analisado, idealizado por NEUBAUER e ROSTÁSY (1999), apresenta uma análise energética da aderência entre o substrato de concreto e o CFC e foi obtido originalmente para chapas de aço coladas. Esse modelo também é válido para os CFC, o que foi confirmado pelas análises dos resultados de ensaios de aderência em corpos-de-prova com lâminas traspassadas, sendo baseado nos mecanismos de fratura do concreto.

São válidas as seguintes premissas para esse modelo:

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

O parâmetro G_F é independente de ℓ_t , que não deve exceder um certo valor $\ell_{t,máx}$.

Admitindo-se a resistência à tração da superfície de concreto f_{ct} , G_F pode ser expressa de acordo com a seguinte equação:

$$G_F = K_b^2 C_F f_{ct} \quad (2.63)$$

O fator $K_b > 1$ considera a influência da largura relativa do compósito sobre a largura do elemento de concreto, e usualmente não excede a $K_b = 1,3$. O fator C_F contém todos os efeitos secundários.

De acordo com NEUBAUER e ROSTÁSY (1999), os resultados de ensaios mostram que $\ell_{t,máx}$ não favorece o acréscimo da capacidade última de carga T_u , sendo a expressão para o carga última $T_{u,máx}$, dada por:

$$T_{u,máx} = b_\ell K_b \sqrt{2G_F E_\ell t_\ell} = 0,64 K_b b_\ell \sqrt{E_\ell t_\ell f_{ctm}} \quad (2.64)$$

Para a obtenção do comprimento de ancoragem $\ell_{t,máx}$, devido à $T_{u,máx}$, tem-se a seguinte equação:

$$\ell_{t,máx} = 2 \sqrt{\frac{2G_F E_\ell t_\ell}{\tau_{II}^2}} = \sqrt{\frac{E_\ell t_\ell}{2 f_{ctm}}} \quad (mm) \quad (2.65)$$

Onde E_ℓ, t_ℓ, b_ℓ são o módulo de elasticidade, espessura e largura do CFC, respectivamente, e f_{ctm} é a resistência média à tração do concreto.

A energia de fratura de aderência no concreto é um misto do modo de fratura, constituído de componentes do modo I 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 resulta da direção da força de tração no CFC. Desse modo, um modelo simplificado para a aderência é admitido como um modo II puro, e G_F representa a energia de fratura total constituída pelos componentes do modo I e modo II.

Para um concreto com $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$, $f_{ctm} = 1,8 \text{ MPa}$ e $K_b = 1,29$, NEUBAUER e ROSTÁSY (1999) obtiveram o seguinte valor para a energia total de fratura $G_F = 1,29^2 \times 0,202 \times 1,8 \times 10^3 = 605 \text{ J/m}^2$.

NEUBAUER e ROSTÁSY (1999), analisam o efeito das fissuras inclinadas devidas ao cortante sobre a resistência do conjunto concreto-CFC.

A energia total da fratura, denominada $G_{F,B}$, devida às fissuras inclinadas provenientes da ação da força cortante escreve-se:

$$G_{F,B} = G_{I,efet} + G_{II} \quad (2.66)$$

onde

$G_{I,efet}$ – energia efetiva relativa ao modo I de fratura;

G_{II} – energia relativa ao modo II de fratura.

A Figura 2.20 ilustra o comportamento da energia efetiva de fratura $G_{I,efet}$ do modo I.

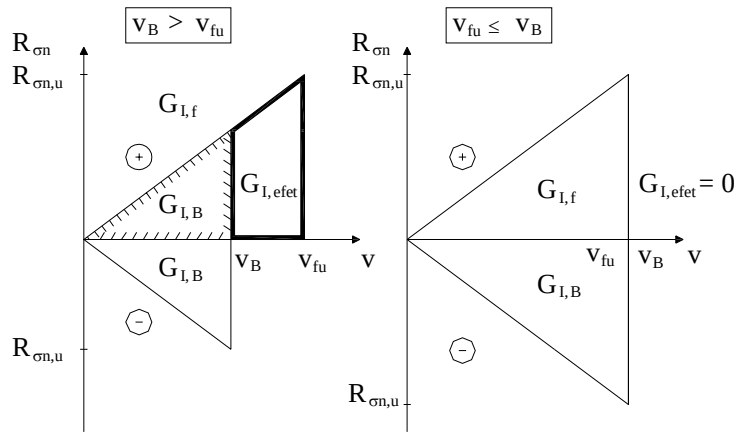


Figura 2.20 – Energia de fratura $G_{I,efet}$ do modo I; adaptada de NEUBAUER e ROSTÁSY (1999).

Para vigas a energia efetiva $G_{I,efet}$ é dada por:

$$G_{I,efet} = \pm \frac{4G_{II,efet}v^2}{W^2} \begin{cases} v_{efet} > 0; G_{I,efet} > 0 \\ v_{efet} \leq 0; G_{I,efet} = 0 \end{cases} \quad (2.67)$$

O deslocamento vertical efetivo v_{efet} é dado por:

$$v_{efet} = \frac{v_{fu}^2 - v_B^2}{v_{fu}} \quad (2.68)$$

Sendo v_{fu} a componente vertical última do deslocamento proveniente da fricção das faces rugosas da fissura no CFC e v_B a componente vertical do deslocamento proveniente da fricção das faces rugosas da fissura devido à ação da força cortante (Figura 2.20).

A componente G_{II} da energia de fratura total da fissura devido ao cortante é igual ao do ensaio de aderência, sendo obtida pela seguinte expressão:

$$G_{II} = \frac{\operatorname{tg}^2 \psi}{\operatorname{tg}^2 \psi + 1} G_F \quad (2.69)$$

A carga última $T_{u,máx}$, dada pela expressão 2.64, obtida por meio do ensaio de aderência, pode ser modificada pelo uso de $G_{F,B}$ (energia total da fratura), de acordo com a equação 2.66. A mesma consideração é válida para o comprimento de ancoragem $\ell_{t,máx}$ donde seguem-se:

$$T_{u,máx} = \alpha 0,64 K_b b_\ell \sqrt{E_\ell t_\ell f_{ctm}} \quad (N) \quad (2.70)$$

$$\ell_{t,máx} = \alpha \sqrt{\frac{E_\ell t_\ell}{2 f_{ctm}}} \quad (mm) \quad (2.71)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{G_{F,B}}{G_F}} \quad (2.72)$$

➤ Tipos de Ruptura

Os resultados dos ensaios de aderência de NEUBAUER e ROSTÁSY (1999) mostraram uma predominância significativa de rupturas interlaminares dos compósitos. Nesses ensaios a ruptura ao longo de todo o comprimento de ancoragem prevalece. O principal problema das fraturas mecânicas é que a força transversal de tração do CFC excede à do concreto. A questão a ser resolvida é saber qual tipo de ruptura governa a aderência.

A ruptura interlaminar do compósito é um modo de fratura misto. Se o trajeto da fissura de aderência for mais saliente no compósito do que no concreto, a fissura irá torcer o compósito, e então se propagará num trajeto interlaminar.

Segundo NEUBAUER e ROSTÁSY (1999) a propagação da fissura no concreto é energeticamente mais evidente do que no compósito. A energia de fratura total num concreto de $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$ é $G_F = 605 \text{ J/m}^2$, menor do que no

compósito, donde a fratura interlaminar do compósito não é local, como tem sido confirmado por ensaios de aderência.

2.3.4.3. KURIHARA et al. (2000)

KURIHARA et al. (2000) desenvolveram dois tipos de ensaio para a obtenção das tensões de aderência entre o concreto e o reforço: ensaio de torque e ensaio de arrancamento.

Os dados resultantes desses dois ensaios permitiram analisar os tipos de ruptura, os efeitos dos diversos tipos de tratamento da superfície de concreto e dos tipos de adesivo sobre a tensão de aderência e da rugosidade da superfície de concreto.

➤ Ensaio de Torque

Os instrumentos do ensaio de torque e os corpos-de-prova estão ilustrados na Figura 2.21.

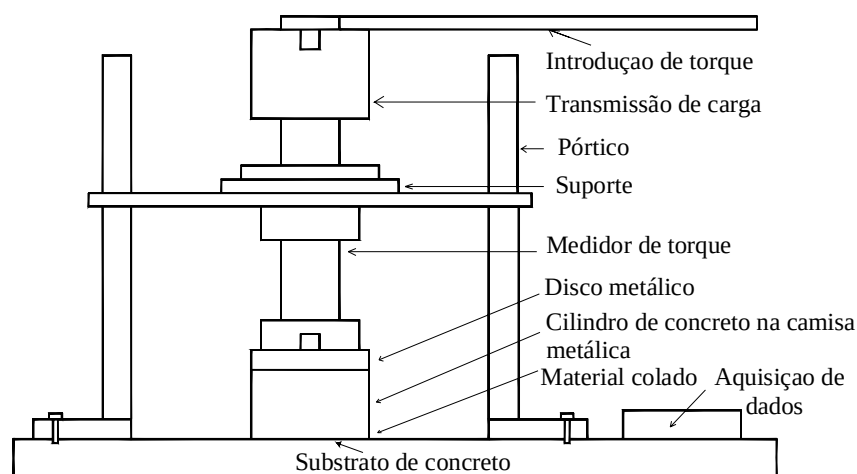


Figura 2.21 – Corpo-de-prova e equipamento para o ensaio de torque; adaptada de KURIHARA et al. (2000).

A concepção desse ensaio proposto é criar tensões puras de cisalhamento na interface dos corpos-de-prova por meios da aplicação de um torque. O torque aplicado aos corpos-de-prova é produzido por um disco metálico fixado ao topo de um cilindro de concreto. O torque é medido pela locação de um medidor no disco metálico, e os dados registrados são usados para gravar os diversos

momentos de torque, e um outro medidor fixado no cume registra o valor máximo desse momento.

Teoricamente as tensões de torção distribuídas ao longo da seção transversal do cilindro de concreto equilibram o momento de torque. A tensão de cisalhamento máxima ocorre na circunferência da seção transversal sendo expressa pela equação:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{16M_t}{\pi d^3} \quad (2.73)$$

onde

M_t – momento de torque;

d – diâmetro do núcleo parcial.

➤ Ensaio de Arrancamento (pull-off)

A maioria de ensaios utilizados para medir as tensões de aderência é realizada em laboratório, e somente o ensaio de arrancamento (pull-off) realizado por KURIHARA et al. (2000), que mede a tensão de aderência por tração, é usado no campo.

Os instrumentos utilizados para o ensaio de arrancamento são um disco de aço com uma sonda no centro, colado aos corpos-de-prova e fixado à sonda por um parafuso. A carga é aplicada pela rotação de uma manivela, que submete a sonda a uma força de tração por meio da pressão do óleo, antes da ruptura do corpo-de-prova ocorrer. A tensão de tração máxima é obtida pela divisão da força de ruptura pela área da seção transversal do corpo-de-prova.

Em cada método de ensaio a ruptura ocorre na parte mais fraca do sistema, que pode ser o adesivo, o cilindro de concreto, o substrato ou a combinação destes. Pelo exame do plano de ruptura efetua-se uma estimativa da porcentagem de fissuras que ocorreram na interface, no cilindro de concreto e no substrato. Se a ruptura ocorrer em outro local obtém-se o limite mínimo da tensão tangencial de aderência.

Neste ensaio foram medidas as rugosidades da superfície de concreto que foram obtidas por meio de um medidor de deslocamento a laser. O sensor gera continuamente um raio laser, e as variações de altura do perfil da superfície são medidas e registradas no computador em intervalos de 0,3 mm. Os dados são

obtidos em cinco diferentes locações em cada substrato. As expressões usadas para a rugosidade da superfície são R_z e R_a ; sendo R_z a diferença da altura média entre cinco picos mais altos e cinco vales mais profundos do comprimento da amostra medida; R_a é a média do valor absoluto da variação da altura da superfície, e z_1 é a medida do nível médio da superfície.

Os substratos dos corpos-de-prova a serem ensaiados devem ter suas superfícies tratadas mecanicamente. Esses tratamentos mecânicos são: trituração, fragmentação e jato de ar.

Os substratos de concreto e os cilindros de concreto são ensaiados ao mesmo tempo. Após a cura, os substratos são tratados mecanicamente e depois recebem um jato de ar para limpá-los. O adesivo é usado para colar o disco de aço na superfície do topo dos cilindros de concreto (do lado em que os cilindros são fechados pelos tubos de aço).

Após o nivelamento dos substratos de concreto, obtêm-se as medidas da rugosidade da superfície usando-se o medidor de deslocamentos a laser. Os adesivos são aplicados em camadas muito finas sobre os substratos de concreto e nas bases dos cilindros. Os cilindros são então colados aos substratos de concreto. Os corpos-de-prova são curados até atingirem a idade desejada para serem ensaiados.

A Tabela 2.4 mostra os resultados de alguns valores relativos à rugosidade das superfícies, considerando-se o tipo de tratamento aplicado às mesmas (KURIHARA et al. (2000)).

As superfícies tratadas com fragmentação possuem maior rugosidade, seguida pela superfície tratada com jato de ar, trituração e sem tratamento.

Tabela 2.4 – Rugosidade da superfície dos substratos de concreto; adaptada de KURIHARA et al. (2000).

<i>Tratamento Mecânico da Superfície</i>	<i>R_a (mm)</i>	<i>R_z (mm)</i>
<i>Sem Tratamento</i>	0,025	0,056
<i>Trituração</i>	0,028	0,103
<i>Jato de Ar</i>	0,113	0,490
<i>Fragmentação</i>	0,288	1,640

2.3.4.4. NAKABA et al. (2001)

NAKABA et al. (2001) realizaram experimentos com corpos-de-prova reforçados com laminados de PRF utilizados para se obter diretamente as tensões de aderência do sistema concreto-compósito (Figura 2.22).

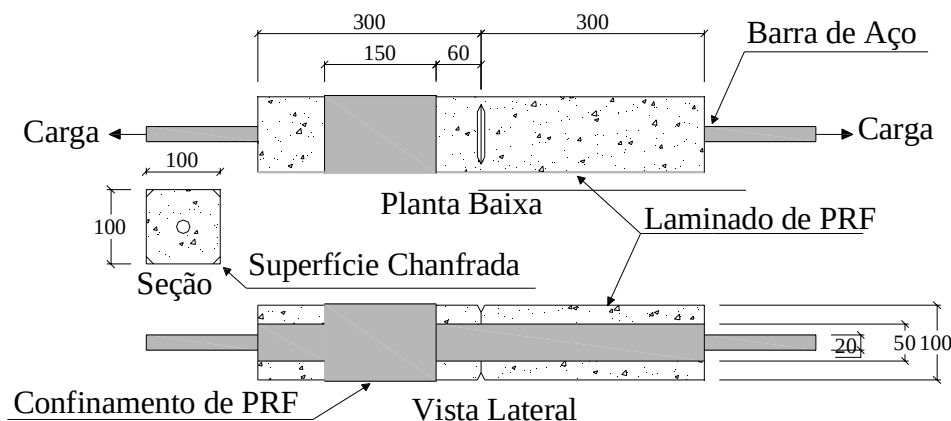


Figura 2.22 – Corpo-de-prova para o ensaio de aderência; adaptada de NAKABA et al. (2001).

Os corpos-de-prova adotados por NAKABA et al. (2001) consistem em um bloco de concreto de dimensões $100 \times 100 \times 600 \text{ mm}$ com um chanfro no centro, duas barras de aço e laminados de polímeros reforçados com fibras (PRF).

O comprimento de ancoragem vinculado à aderência utilizado foi de 300 mm e a largura do laminado foi 50 mm para todos os corpos-de-prova ensaiados. As espessuras dos laminados variaram de $0,1$ a $0,4 \text{ mm}$ (Figura 2.22).

O sistema de reforço com laminados de PRF utilizado para este ensaio consiste em fibras impregnadas com resina epóxi, com uma preparação inicial do substrato de concreto utilizando-se “primer” e “putty” (argamassa muito fina de epóxi utilizada para remover as irregularidades da superfície de concreto).

Os laminados de PRF são colados nos dois lados opostos do corpo-de-prova, sendo que um dos lados foi reforçado com PRF confinado (Figura 2.22), admitindo-se a ocorrência de delaminação do laminado somente do lado oposto onde os extensômetros elétricos de resistência estão posicionados. Uma vez que a força de tração é transferida do PRF ao concreto, não existe tensão de aderência entre regiões descoladas.

As propriedades das fibras utilizadas foram obtidas pelo fabricante (Tabela 2.5). Para verificar a influência da qualidade do substrato. Foram confeccionados corpos-de-prova de concreto e de argamassa cujas resistências são mostradas na Tabela 2.6.

Tabela 2.5 – Propriedades das fibras; adaptado de NAKABA et al. (2001).

<i>Tipo de Fibra</i>	<i>Espessura t_f, mm</i>	<i>Peso Unitário ρ, g/m²</i>	<i>Resistência à Tração f_t, MPa</i>	<i>Módulo de Elasticidade E_f, MPa</i>
Fibra de Carbono Padrão (FCP)	0,167	150/300	4200	261,1
Fibra de Carbono com Alta Rigidez (FCAR)	0,165	300	4400	425,1
Aramida	0,193	285	2800	124,5

Tabela 2.6 – Propriedades do concreto e da argamassa utilizados na confecção dos corpos-de-Prova; adaptada de NAKABA et al. (2001).

<i>Tipo de CP</i>	<i>Resistência à Compressão (MPa)</i>	<i>Resistência ao Cisalhamento (MPa)</i>
Concreto (50 MPa)	57,6	3,25
Argamassa	47,1	4,65
Argamassa	50,9	4,08
Concreto (24 MPa)	23,8	1,98

Cada corpo-de-prova foi acoplado a uma máquina universal de ensaio e submetido a uma força de tração pura, causando cisalhamento direto nos laminados. A velocidade de aplicação do carregamento foi de 1 mm / min .

O deslocamento total e a largura da fissura no centro do corpo-de-prova foram medidos usando extensômetros elétricos de resistência (Figura 2.23). A distribuição da deformação específica foi obtida de 20 valores de deformação específica medidas em um lado do laminado (face do extensômetro) em intervalos de 15 mm , e uma medida no lado oposto, no centro do CP.

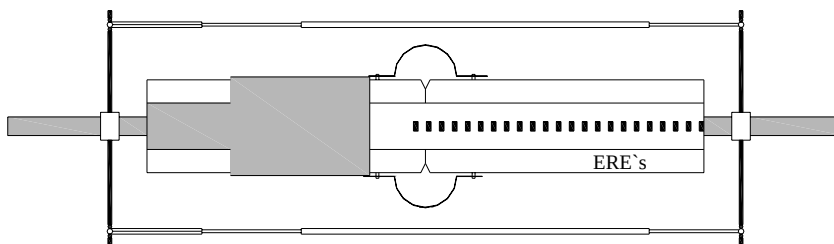


Figura 2.23 – Posicionamento dos ERE; adaptada de NAKABA et al. (2001).

Todos os corpos-de-prova foram supostamente submetidos a uma força de tração pura até a ruptura total do sistema, mas não é possível evitar o momento causado pela excentricidade entre o topo e a base quando os corpos-de-prova forem submetidos ao carregamento. Por isso, a carga máxima não será considerada igualmente distribuída nos dois laminados. A carga máxima na face onde ocorreu a ruptura foi calculada como: a carga máxima na face onde ocorreu a ruptura é obtida multiplicando-se a carga máxima pela deformação específica na face onde ocorreu a ruptura dividindo esse produto pela soma da deformação específica na face onde ocorreu a ruptura com a deformação específica na face onde não ocorreu a ruptura.

A Tabela 2.7 mostra a carga máxima, a carga última e os respectivos deslocamentos de todos os corpos-de-prova ensaiados, e os tipos de ruptura e a face onde eles ocorreram. A Tabela 2.8 mostra os resultados médios da carga máxima onde a ruptura ocorreu.

Tabela 2.7 - Resultados dos ensaios; adaptada de NAKABA et al. (2001).

<i>Corpos-de-prova</i>	<i>Tipos de Fibras</i>	<i>Carga Máxima (kN)</i>	<i>Deslocam. (mm)</i>	<i>Carga Última (kN)</i>	<i>Deslocam. (mm)</i>	<i>Tipos de Ruptura</i>
Concreto (50 MPa)	FCPAR	51,26	0,824	51,26	0,824	Fissura na face do extensômetro
	FCPMR	37,81	1,02	37,81	1,02	Ruptura
	FCPBR	24,39	2,78	23,87	2,981	Fissura na face do extensômetro
	FCAR	38,98	1,316	37,75	1,476	Ruptura fora da face do extensômetro
	FA	25,52	1,764	25,52	1,813	Fissura fora da face do extensômetro
Argamassa (50 MPa)	FCPAR	41,28	0,719	41,28	0,719	Fissura na face do extensômetro
	FCPMR	30,7	0,958	30,49	1,529	Fissura fora da face do extensômetro
	FCPBR	17,51	2,14	17,5	2,14	Fissura na face do extensômetro
	FCAR	33,12	1,41	33,12	1,41	Fissura na face do extensômetro e ruptura fora da face do extensômetro
	FA	25,51	2,597	25,14	2,665	Fissura na face do extensômetro
Concreto (24 MPa)	FCPMR	28,18	1,369	27,82	1,644	Fissura fora da face do extensômetro

Tabela 2.8 – Resultados experimentais para a carga máxima na face onde ocorreu a ruptura; adaptada de NAKABA et al. (2001).

<i>Corpos-de-Prova</i>	<i>Tipos de Fibra</i>	<i>Carga Máxima Experimental (kN)</i>	<i>Rigidez $t_f E_f$ (kN / mm)</i>	<i>Máximo da Tensão de Aderência Média (MPa)</i>	<i>Deslocam. (mm)</i>	<i>Carga Analítica (kN)</i>
Concreto (50 MPa)	FA	11,79	24,04	7,173	0,063	12,56
	FCAR	21,60	70,14	9,129	0,060	20,81
	FCPMR	16,35	43,60	7,494	0,072	16,68
	FCPAR	25,63	87,19	6,790	0,060	22,99
	FCPBR	11,48	21,80	7,328	0,072	11,99
Argamassa (50 MPa)	FA	12,43	24,04	6,497	0,066	12,35
	FCAR	16,37	70,14	7,710	0,046	20,41
	FCPMR	15,70	43,60	6,253	0,067	16,37
	FCPAR	22,29	87,19	6,834	0,063	22,51
	FCPBR	9,35	21,80	7,438	0,059	11,78
Concreto (24 MPa)	FCPMR	15,71	43,60	6,989	0,052	15,24

➤ Relação Tensão de Aderência Local x Deslocamento

NAKABA et al. (2001), formulou o estudo da aderência por meio de uma lei da tensão de aderência local x deslocamento obtida dos resultados de análises algébricas ou numéricas, que permite determinar um comprimento de aderência efetivo para o FRP.

Essa formulação consiste em obter a força de tração 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, donde:

$$\tau_{b,i} = \frac{(\varepsilon_{f,i} - \varepsilon_{f,i-1}) t_f E_f}{\Delta \ell_b} \quad (i = 2 \rightarrow 20) \quad (2.74)$$

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 PRF;

E_f – módulo de elasticidade do PRF;

$\Delta\ell_b$ – 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 laminado (ou da extremidade carregada do corpo-de-prova) para a seção i . Assume-se que o deslocamento relativo entre o concreto e o laminado na extremidade livre do laminado é nulo. O deslocamento é calculado usando-se as seguintes equações:

$$s_i = s_{i-1} + (\delta_{f,i} - \delta_{m,i}) \quad (i = 2 \rightarrow 20, s_i = 0) \quad (2.75)$$

$$\delta_{f,i} = \frac{\varepsilon_{f,i} - \varepsilon_{f,i-1}}{2} \cdot \Delta\ell_b + \varepsilon_{f,i-1} \cdot \Delta\ell_b \quad (2.76)$$

$$\delta_{m,i} = \frac{\varepsilon_{m,i-1} - \varepsilon_{m,i}}{2} \cdot \Delta\ell_b + \varepsilon_{m,i} \cdot \Delta\ell_b \quad (2.77)$$

$$\varepsilon_{m,i} = \frac{P_{m,i-1} - 2 \cdot \tau_{b,i} \cdot b \cdot \Delta\ell_b}{A_m E_m} \quad (2.78)$$

$$\varepsilon_{m,1} = \frac{P_{m,1}}{A_m E_m}, P_{m,1} = P_{carga} \quad (2.79)$$

onde

$\delta_{m,i}$ – deformação do conjunto concreto, epóxi e barra de aço na seção i ;

$\varepsilon_{m,i}$ – deformação específica do conjunto concreto, epóxi e barra de aço na seção i ;

$P_{m,i}$ – força aplicada do conjunto concreto, epóxi e barra de aço na seção i ;

b – largura do laminado;

P_{carga} – força de tração;

$A_m E_m$ – rigidez do conjunto concreto, epóxi e barra de aço.

Após a obtenção de todos os dados, é desenhado um gráfico tensão de aderência local x deslocamento para cada intervalo de medidas do extensômetro, para todos os corpos-de-prova. As curvas tendem para uma forma parabólica (Figura 2.24):

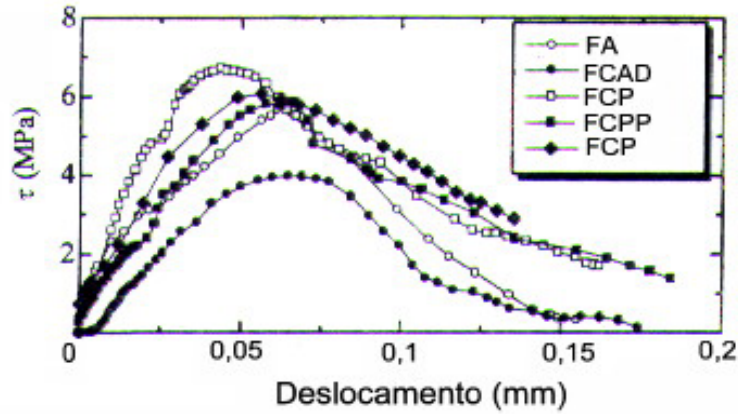


Figura 2.24 – Tensão de aderência x deslocamento; adaptada de NAKABA et al. (2001).

Apresenta-se um modelo que permite determinar a relação entre a tensão de aderência local x deslocamento, $\tau_b \times s$, seguindo-se:

$$\frac{\tau_b}{\tau_{b,máx}} = \frac{s}{s_{máx}} \cdot \frac{n}{(n-1) + \left(\frac{s}{s_{máx}}\right)^n} \quad (2.80)$$

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

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

Os parâmetros $n=3$, $\tau_{b,máx}$ e $s_{máx}$ são obtidos diretamente da relação experimental $\tau_b \times s$. O valor de n é calculado pelo método dos mínimos quadrados, usando-se uma relação $\tau_b \times s$ normalizada. A tensão de aderência local máxima varia no intervalo $5,6 \text{ MPa} \leq \tau_{b,máx} \leq 9,01 \text{ MPa}$, e o deslocamento no intervalo $0,052 \text{ mm} \leq s \leq 0,087 \text{ mm}$, donde se tem $n \cong 3$. Esses valores não têm uma relação definida para o PRF, e a tensão de aderência

$\tau_{b,máx}$ mostra uma tendência a aumentar quando a resistência a compressão do concreto aumenta (Figura 2.25):

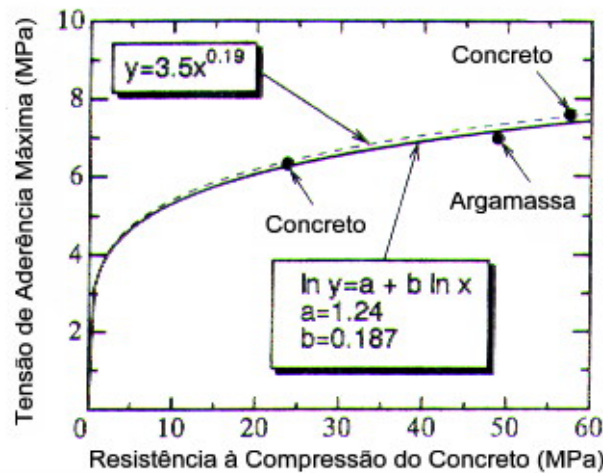


Figura 2.25 – Relação entre a tensão de aderência máxima e a resistência à compressão do concreto; adaptada de NAKABA et al. (2001).

A relação entre o valor máximo da tensão de aderência, entre o concreto e o compósito, e a tensão de aderência máxima entre o concreto e o compósito é dada por:

$$\frac{\tau_b}{\tau_{b,máx}} = \frac{s}{s_{máx}} \cdot \frac{n}{(n-1) + \left(\frac{s}{s_{máx}}\right)^n} \quad (2.81)$$

$$\tau_{b,máx} = 3,5\sigma_B^{0,19} \quad (2.82)$$

onde

σ_B – resistência a compressão do concreto em *MPa* .

2.3.4.5. CHEN e TENG (2001)

CHEN e TENG (2001) propuseram um modelo de aderência pela combinação da análise da mecânica da fratura com dados experimentais e observaram que a relação tensão de aderência x deslocamento para chapas de PRF coladas ao concreto pode ser representada por uma relação triangular como mostra a Figura 2.26a.

Para a aderência entre o concreto e o PRF os valores típicos para o deslocamento são $\delta_1 = 0,02\text{ mm}$ para a tensão de aderência máxima e $\delta_f = 0,02\text{ mm}$ na ruptura. Um modelo em que a relação tensão de aderência x deslocamento diminui linearmente também pode ser utilizado (Figura 2.26b).

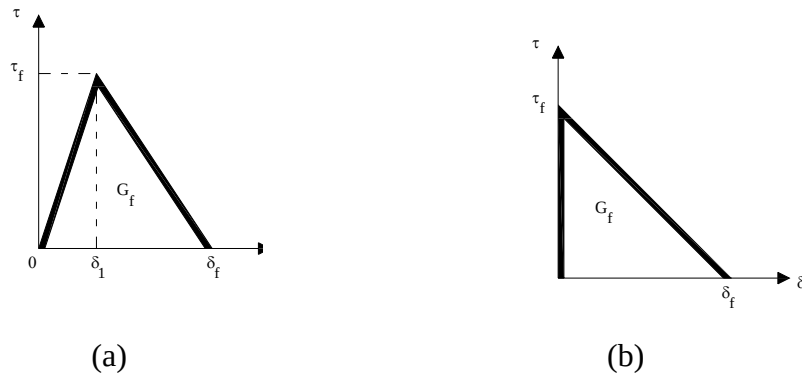


Figura 2.26 – Relação tensão de aderência – deslocamento: (a) triangular; (b) decréscimo linear; adaptada de YUN e WU apud CHEN e TENG (2001).

As deficiências dos modelos existentes indicam a necessidade do desenvolvimento de um novo modelo para projetos práticos de reforço de estruturas de concreto armado. Esse modelo deve ser capaz de avaliar as principais características da ação da resistência última da aderência e do comprimento de aderência efetivo. Esses dois parâmetros foram calculados usando-se a solução da Mecânica da Fratura Não Linear (MFNL), pelas seguintes equações:

$$P_u = \begin{cases} \frac{\tau_f b_p}{\lambda} & \text{se } L \geq L_e \\ \left(\frac{\tau_f b_p}{\lambda} \right) \text{sen}(\lambda L) & \text{se } L < L_e \end{cases} \quad (2.83)$$

onde

$$L_e = \frac{\pi}{2\lambda} \quad (2.84)$$

$$\lambda^2 = \frac{\tau_f}{\delta_f E_p t_p} (1 + \alpha_y) \quad (2.85)$$

Esses autores observaram que o coeficiente α_y da equação 2.85 é pequeno para considerações práticas. Esse termo é baseado na hipótese de que a distribuição de tensão em toda a seção transversal do elemento de concreto é uniforme, que também ocorre na chapa de PRF. Contudo, a razão entre a largura do compósito e a largura do elemento de concreto, $\frac{b_p}{b_c}$ tem um efeito significativo sobre a resistência última da aderência. Se a largura do compósito for menor do que a do elemento de concreto, a transferência de forças do compósito para o concreto leva a uma distribuição de tensões não uniforme ao longo da largura do elemento de concreto. Uma pequena largura do compósito b_p , comparada com a largura do elemento de concreto b_c , pode resultar em tensões tangenciais maiores no adesivo durante a ruptura, atribuídas à contribuição do concreto fora da área de aderência.

CHEN e TENG (2001) mostram que a resistência última da aderência é linearmente relacionada à β_p .

$$\beta_p = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_p}{b_c}}{1 + \frac{b_p}{b_c}}} \quad (2.86)$$

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.

Várias observações 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 $\sqrt{f'_c}$. Portanto, o comprimento de aderência efetivo L_e da equação 2.84 é calculado aproximadamente por:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{\sqrt{f'_c}}}, \quad \text{mm} \quad (2.87)$$

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

Considerando-se as hipóteses relatadas anteriormente, esses autores propuseram um modelo simples da resistência última da aderência fundamentado nas equações 2.83, 2.84 e 2.85 e em dados experimentais:

$$P_u = 0,427 \beta_p \beta_L \sqrt{f'_c} b_p L_e, \quad N \quad (2.88)$$

sendo

$$\beta_L = \begin{cases} 1 & \text{se } L \geq L_e \\ \text{sen} \left[\frac{\pi L}{2L_e} \right] & \text{se } L < L_e \end{cases} \quad (2.89)$$

Os parâmetros β_p e L_e são definidos pelas expressões 2.86 e 2.87, respectivamente.

Para projetos de reforço, o conhecimento da tensão é mais importante do que a carga aplicada no CFC. Substituindo-se a expressão 2.87 e $\sigma_{db} = \frac{P_u}{b_p t_p}$ na expressão 2.88, tem-se a tensão de ruptura no compósito:

$$\sigma_{db} = 0,427 \beta_p \beta_L \sqrt{\frac{E_p \sqrt{f'_c}}{t_p}} = 0,4 \beta_p \beta_L \sqrt{\frac{E_p \sqrt{f_{cu}}}{t_p}} \quad (2.90)$$

Onde a resistência à compressão do concreto, utilizando-se corpos-de-prova cúbicos é $f_{cu} = 1,25 f'_c$, sendo f'_c a resistência obtida em corpos-de-prova cilíndricos.

A razão entre a tensão no compósito e a resistência à tração do CFC na ruptura é obtida por meio de:

$$\frac{\sigma_{db}}{f_p} = \frac{0,427 \beta_p \beta_L}{E_p \varepsilon_p} \sqrt{\frac{E_p \sqrt{f'_c}}{t_p}} = \frac{0,427 \beta_p \beta_L}{\varepsilon_p} \sqrt{\frac{\sqrt{f'_c}}{E_p t_p}} \quad (2.91)$$

onde

ε_p – deformação específica última do PRF ou da lâmina de aço no escoamento;

f_p – resistência última do PRF ou da lâmina de aço no escoamento.

A equação proposta nesse modelo de aderência é recomendada para o uso em projetos. Sendo que o coeficiente na expressão 2.88, 0,427 é reduzido para 0,315. Logo a expressão 2.88 fica:

$$P_u = \frac{0,315\beta_p\beta_L\sqrt{f'_c}b_pL_e}{\gamma_b} = \frac{0,3\beta_p\beta_L\sqrt{f_{cu}}b_pL_e}{\gamma_b} \quad (2.92)$$

Seguindo-se para a tensão última no compósito para:

$$\sigma_{db} = \frac{0,315\beta_p\beta_L}{\gamma_b} \sqrt{\frac{E_p\sqrt{f'_c}}{t_p}} = \frac{0,3\beta_p\beta_L}{\gamma_b} \sqrt{\frac{E_p\sqrt{f_{cu}}}{t_p}} \quad (2.93)$$

➤ Ensaio Realizado por CHEN e TENG (2001)

Os corpos-de-prova utilizados neste ensaio são blocos retangulares de concreto, com uma ou duas chapas de CFC coladas nos dois lados opostos (Figura 2.27). As dimensões e resistência das chapas e dos blocos de concreto, o comprimento de ancoragem, a carga de ruptura aplicada e os tipos de ruptura estão mostrados nas Tabelas 2.9 e 2.10. Os dados referentes à tabela são obtidos de ensaios provenientes da literatura.

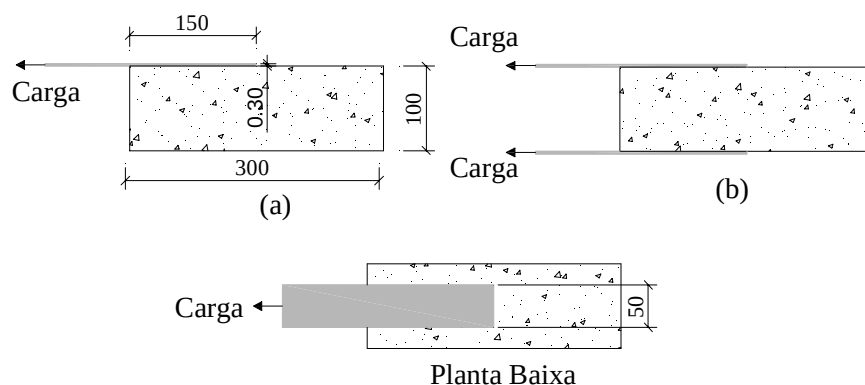


Figura 2.27 – Corpos-de-prova para o ensaio de aderência; (a) Com uma chapa colada; (b) com duas chapas coladas; adaptada de CHEN e TENG (2001).

Tabela 2.9 – Dados de ensaios provenientes da literatura; adaptada de CHEN e TENG (2001).

Corpo-de-prova (n°)	Concreto			Chapa			
	Largura (b_c)	Espessura (t_c)	Resistência à Compressão (f'_c)	Tipo	Espessura (t_p)	Largura (b_p)	Comprimento de Ancoragem (L)
1	228,6	152,4	36,1	PRFG	1,016	25,4	76,2
2	228,6	152,4	47,1	PRFG	1,016	25,4	76,2
3	228,6	152,4	47,1	PRFG	1,016	25,4	76,2
4	228,6	152,4	47,1	PRFG	1,016	25,4	76,2
5	100	100	40,8	FCP	0,11	50	75
6	100	100	40,8	FCP	0,11	50	150
7	100	100	43,3	FCP	0,11	50	300
8	100	100	43,3	FCP	0,165	50	75
9	200	200	44,7	PRFC	1,25	50	100
10	200	200	44,7	PRFC	1,25	50	200
11	200	200	44,7	PRFC	1,25	50	300
12	200	200	44,7	PRFC	1,25	50	400

Tabela 2.10 – Dados de ensaios provenientes da literatura; adaptada de CHEN e TENG, (2001).

Carga de Ruptura (N)	Tipo de Ruptura
8,462	Fratura do Concreto
9,931	Fratura do Concreto
10,638	Fratura do Concreto
10,638	Fratura do Concreto
5,8	Delaminação da Chapa
9,2	Delaminação da Chapa
11,95	Delaminação da Chapa
10	Delaminação da Chapa
17,3	Fratura do Concreto
27,5	Fratura do Concreto
35,1	Fratura do Concreto
26,9	Fratura do Concreto

Tabela 2.11 – Resultados experimentais de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).

<i>Corpo-de-Prova</i>	<i>Resistência à Compressão do Concreto (MPa)</i>	<i>Tipo de CFC / nº de camadas</i>	<i>Comprimento de Ancoragem (L) (mm)</i>
<i>CF – 1</i>	24	1/1	100
<i>CF – 2</i>	24,8	1/1	100
<i>CF – 3</i>	33,1	1/1	150
<i>CF – 4</i>	33,1	1/2	100
<i>CF – 5</i>	32,7	2/2	100
<i>CF – 6</i>	36,5	2/1	150
<i>CF – 7</i>	29,7	2/2	100

Os resultados experimentais obtidos por ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001) são mostrados na Tabela 2.12.

Tabela 2.12 – Resultados experimentais de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).

<i>Corpo-de-Prova</i>	<i>Carga Última de Ruptura (kN)</i>	<i>Tensão Média de Aderência (MPa)</i>	<i>Tensão Máxima de Aderência (MPa)</i>
<i>CF – 1</i>	44,0	2,2	5,0
<i>CF – 2</i>	40,2	2,0	4,9
<i>CF – 3</i>	40,9	1,4	4,3
<i>CF – 4</i>	51,8	2,6	3,6
<i>CF – 5</i>	56,5	2,8	6,3
<i>CF – 6</i>	33,5	1,1	3,6
<i>CF – 7</i>	49,2	2,5	5,6

A tensão de aderência média e a tensão máxima de aderência do sistema CFC – concreto são calculadas segundo as seguintes equações:

$$\tau_{média} = \frac{P}{2bL} \quad (2.94)$$

$$\tau_{máx} = E_f t_f \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta x} \quad (2.95)$$

onde

P – carga total de ruptura (N);

b – largura do CFC (mm);

L – comprimento de ancoragem do CFC (mm);

E_f – módulo de elasticidade do CFC (MPa);

t_f – espessura do CFC (*mm*);

$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta x}$ – gradiente de deformação entre dois extensômetros consecutivos no CFC.

A resistência do conjunto CFC-concreto está relacionada com a resistência a compressão do concreto, e é dada pela expressão:

$$\tau_u = 0,25 \left(f'_c \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.96)$$

2.3.4.7. Outros Estudos

Os estudos a seguir transcritos constam em TENG et al. (2002), e tratam principalmente sobre o cálculo das tensões de aderência e do comprimento de ancoragem do CFC.

➤ Hiroguki e Wu

Hiroyuki e Wu conduziram vários experimentos com corpos-de-prova com duas chapas de fibras de carbono coladas em elementos de concreto, e obtiveram a seguinte relação entre o comprimento de aderência L e a tensão de aderência média durante a ruptura τ_u :

$$\tau_u = 5,88 L^{-0,699} \quad (2.97)$$

➤ Tanaka

$$\tau_u = 6,3 - \ln L \quad (2.98)$$

onde

L – comprimento de aderência dado em *mm* .

A capacidade de carga última P_u é dada pela multiplicação de τ_u pela largura b_p , e pelo comprimento L da área de aderência.

➤ Maeda

Maeda desenvolveu um modelo que considera a tensão última de aderência e o comprimento efetivo de aderência:

$$\tau_u = 110,2 \times 10^{-6} E_p t_p \quad (2.99)$$

$$L_{efet} = e^{6,13 - 0,580 E_p t_p} \quad (2.100)$$

Esse modelo é válido para $L > L_{efet}$, onde L_{efet} é o comprimento efetivo de aderência, com as unidades em mm e MPa , onde E_p , t_p são o módulo de elasticidade e espessura do CFC, respectivamente.

➤ Niedemeier e Blaschko

HOLZENKÄMPFEER (1994) desenvolveu uma formulação teórica-experimental fundamentada em conceitos da Mecânica da Fratura Não-Linear (MFNL), usando uma lei $\tau_b \times s$ bilinear para chapas de aço coladas com epóxi. A forma modificada por Niedemeier, Blaschko *apud* TENG et al. (2002) calcula a capacidade máxima de carga utilizando-se:

$$P_u = \begin{cases} 0,78b_p \sqrt{2G_f E_p t_p} & \text{para } L \geq L_e \\ 0,78b_p \sqrt{2G_f E_p t_p} \frac{L}{L_e} \left(2 - \frac{L}{L_e}\right) & \text{para } L < L_e \end{cases} \quad (2.101)$$

O comprimento efetivo de aderência L_{efet} , e a energia de fratura G_f são dados por:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{4 f_{ctm}}} \quad mm \quad (2.102)$$

$$G_f = c_f k_p^2 f_{ctm} \quad N.mm/mm^2 \quad (2.103)$$

Sendo $f_{ctm} (MPa)$ a tensão de tração média do concreto determinada pelo ensaio de arrancamento (*pull-off*), c_f é uma constante determinada por uma análise linear usando-se resultados de ensaios com duas chapas coladas, ou similar, k_p é o fator geométrico relacionado com a largura da chapa colada $b_p (mm)$ e a largura do elemento de concreto $b_c (mm)$, onde:

$$k_p = \sqrt{1,125 \frac{2 - b_p / b_c}{1 + b_p / 400}} \quad (2.104)$$

➤ Täljsten

Por meio da análise da MFNL, Täljsten *apud* TENG et al. (2002) desenvolveu um modelo similar, onde:

$$P_u = \sqrt{\frac{2E_p t_p G_f}{1 + \alpha_t}} b_p \quad (2.105)$$

$$\alpha_t = \frac{E_p t_p}{E_c t_c} \quad (2.106)$$

sendo

E_c – módulo de elasticidade;

t_c – espessura do elemento de concreto.

➤ Yuan

Yuan e Wu e Yuan et al. *apud* TENG et al. (2002) estudaram a resistência de aderência entre o CFC e o concreto usando a Mecânica da Fratura Linear e Mecânica da Fratura Não-Linear. Esses autores propuseram uma equação que inclui o efeito das larguras da chapa e do elemento de concreto, sendo:

$$\alpha_y = \frac{b_p E_p t_p}{b_c E_c t_c} \quad (2.107)$$

A capacidade máxima de carga é expressa por:

$$P_u = \frac{\tau_f b_p}{\lambda_2} \cdot \frac{\delta_f}{\delta_f - \delta_1} \text{sen} \lambda_2 a \quad (2.108)$$

Sendo a obtido pela resolução da equação:

$$\text{tg}[\lambda_1(L - a)] = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \text{tg} \lambda_2 a \quad (2.109)$$

$$\lambda_1^2 = \frac{\tau_f}{\delta_1 E_p t_p} (1 + \alpha_y) \quad \text{e} \quad \lambda_2^2 = \frac{\tau_f}{(\delta_f - \delta_1) E_p t_p} (1 + \alpha_y) \quad (2.110)$$

onde

τ_f – tensão máxima na curva tensão de aderência-deslocamento;

δ_1 – deslocamento;

δ_f – deslocamento máximo.

Define-se o comprimento efetivo de aderência como um valor correspondente à 97% da capacidade de carga se L for infinito:

$$L_e = a_0 + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{\lambda_1 + \lambda_2 \text{tg} \lambda_2 a_0}{\lambda_1 - \lambda_2 \text{tg} \lambda_2 a_0} \quad (2.111)$$

$$a_0 = \frac{1}{2\lambda_2} \text{sen}^{-1} \left(0,97 \sqrt{\frac{\delta_f - \delta_1}{\delta_f}} \right) \quad (2.112)$$

➤ Van Gemert

Assumindo uma distribuição triangular da tensão de cisalhamento no comprimento de aderência total, Van Gemert *apud* TENG et al. (2002) propôs a seguinte fórmula para o cálculo da carga máxima:

$$P_u = 0,5b_p L f_{ctm} \quad (2.113)$$

A equação 2.113 pode ser utilizada para qualquer carga P maior do que a resistência à tração total do compósito. Essa premissa é conceitualmente

desnecessária, e contradiz o fato de que qualquer comprimento de aderência adicional não aumenta a capacidade máxima de carga.

Varastehpour e Hamelin *apud* TENG et al. (2002) admitem a seguinte expressão para a tensão de aderência média:

$$\tau_{méd} = \frac{\tau_{máx}^{descolamento}}{2} = \frac{2,7}{1 + k_1 \tan 33^\circ} \quad (2.114)$$

$$k_1 = t_p \sqrt[4]{\frac{k_a}{4E_p I_p}} \quad k_a = E_a \frac{b_a}{t_a} \quad (2.115)$$

onde

b_a – largura do CFC;

t_a – espessura do CFC;

E_a – módulo de elasticidade do CFC;

I_p – momento de inércia do CFC.

A Equação 2.115 é baseada em dados de ensaios experimentais limitados e não inclui a resistência do concreto, por isso sua aplicabilidade é limitada.

Kalifa et al. *apud* TENG et al. (2002) propuseram uma modificação no modelo de Maeda e incluíram o efeito da resistência do concreto, seguindo-se:

$$\tau_u = \frac{110,2}{10^6} \left(\frac{f'_c}{42} \right) E_p t_p \quad (2.116)$$

A Tabela 2.13 compara os resultados de ensaios de alguns desses modelos, onde observa-se que o modelo de NEUBAUER e RÓSTASY (1997) foi o que apresentou o menor valor para a tensão de aderência, mas possui um menor coeficiente de variação.

Tabela 2.13 – Razão entre as resistências de aderência experimentais e as calculadas; adaptada de CHAJES et al. (1996).

<i>Modelo</i>	<i>Chapas de PRF</i>		
	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Coef. de Variação</i>
<i>Hiroguki e Wu (1997)</i>	2,87	0,95	33%
<i>Tanaka (1996)</i>	2,92	1,65	56%
<i>Van Gemert (1980)</i>	2,19	1,12	51%
<i>Chaallal et al. (1998)</i>	1,81	0,89	49%
<i>Kalifa et al. (1998)</i>	1,07	0,24	23%
<i>Neubauer e Róstasy (1997)</i>	0,82	0,15	18%

3

Programa Experimental

3.1.

Introdução

Este estudo experimental tem como objetivo avaliar a aderência entre o concreto e compósitos de tecido de fibra de carbono por meio de ensaios tração-compressão de corpos-de-prova constituídos 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 no concreto e no tecido de fibra de carbono, e calculadas as tensões de aderência e os deslocamentos relativos entre o concreto e o compósito.

Foram ensaiados nove corpos-de-prova identificados conforme a seguinte nomenclatura: L50-R25-1(piloto), L50-R25-2, L50-R35-1, L50-R35-2, L50-R45-1, L50-R45-2, L100-R25, L100-R35e L100-R45. A letra L significa a largura do tecido da lateral instrumentada que foi de 50mm e 100mm e a letra R significa a resistência pretendida à compressão dos corpos-de-prova na idade do ensaio. Os números 1 e 2 no final da nomenclatura indicam que foram ensaiados dois corpos-de-prova iguais. Para melhor descrição dos corpos-de-prova, estes foram divididos em dois grupos: grupo A, referente aos corpos-de-prova com largura da lateral instrumentada do tecido igual a 50mm e grupo B, referente aos corpos-de-prova com largura da lateral instrumentada do tecido igual a 100mm .

Todos os corpos-de-prova tinham dimensões de 200 mm x 200 mm x 200 mm e comprimentos de ancoragem de 150 mm.

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados na confecção dos corpos-de-prova, as características desses elementos, os esquemas de concretagem e de instrumentação dos corpos-de-prova, os dispositivos de ensaio, os sistemas de aplicação da carga e de leitura das deformações, a descrição das etapas de aplicação do tecido, além de todas as etapas dos ensaios.

3.2. Materiais

3.2.1. Concreto

O concreto dos corpos-de-prova foi dosado pelo método do ACI – American Concrete Institute para alcançar resistências à compressão de 25 *MPa*, 35 *MPa* e 45 *MPa* com o objetivo principal de se obter valores diferindo de aproximadamente 10 *MPa*.

Os traços, em massa, dos concretos dos corpos-de-prova foram: 1: 2,59 : 3,07, 1:1,77 : 2,37 e 1:1,22 : 1,88 (cimento : areia : agregado graúdo), com relação água cimento de 0,62, 0,48 e 0,38 respectivamente.

O cimento empregado no preparo do concreto foi o CII F32. A areia era de rio, lavada, com massa específica de $2,60 \text{ g/cm}^3$, e módulo de finura de 2,86 obtidos por meio de análise feita no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC-Rio, de acordo com a NBR 9776 e NBR 7217. O agregado graúdo era de gnaíse, brita 1, com dimensão máxima característica de 19 mm, módulo de finura de 6,95, massa específica absoluta de $2,63 \text{ g/cm}^3$ e massa específica aparente de $1,61 \text{ g/cm}^3$, também obtidas no laboratório de acordo com a NBR 7217 e NBR 9937. A análise granulométrica e a determinação das massas específicas dos agregados graúdo e miúdo encontram-se nos Anexos A e B, respectivamente.

O concreto foi misturado mecanicamente numa betoneira com capacidade de 100ℓ, de forma a se obter $0,12 \text{ m}^3$ de material para cada dosagem. Foram necessárias duas betonadas para cada concretagem dos corpos-de-prova.

O consumo por metro cúbico de concreto dos materiais empregados e os valores de abatimento do tronco de cone para cada betonada são dados nas Tabelas 3.1 e 3.2, respectivamente.

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

<i>Material</i>	<i>Quantidade / m^3</i>		
	$f_{c,dosagem} = 25 \text{ MPa}$	$f_{c,dosagem} = 35 \text{ MPa}$	$f_{c,dosagem} = 45 \text{ MPa}$
Cimento CII F32	323 kg	417 kg	526 kg
Areia	835 kg	737 kg	644 kg
Brita 1	990 kg	990 kg	990 kg
Água	148 ℓ	165 ℓ	171 ℓ

Tabela 3.2 – Valores do abatimento do tronco de cone em mm.

<i>Betonada</i>	<i>Abatimento de Tronco de Cone (mm)</i>		
	$f_{c,dosagem} = 25 \text{ MPa}$	$f_{c,dosagem} = 35 \text{ MPa}$	$f_{c,dosagem} = 45 \text{ MPa}$
1º	90	90	60
2º	95	95	40

3.2.1.1.

Resistência à Compressão Simples do Concreto

Foram realizados, para cada dosagem, ensaios de compressão simples em 15 corpos-de-prova cilíndricos. Os corpos-de-prova, com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, foram moldados em obediência à NBR 5738/1994. Após sete dias os corpos-de-prova foram desformados. Os ensaios de resistência à compressão do concreto foram realizados aos sete e 28 dias e no dia de cada ensaio. Como os ensaios foram realizados com mais de 120 dias após as concretagens e as resistências tiveram pouca variação, foi feita uma média das resistências obtidas nos ensaios dos corpos-de-prova com mesma resistência. 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 à compressão simples são mostrados nas Tabelas 3.3, 3.4 e 3.5, e nos diagramas resistência x dias de concretagem apresentados nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3.

Tabela 3.3 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 \text{ MPa}$.

<i>Ensaio dos Corpos-de-Prova</i>	<i>Idade do Concreto (dias)</i>	<i>Quantidade de Corpos-de-prova</i>	<i>$f_{c,médio}$ (MPa)</i>
	7	3	16,5
	28	3	20,5
L50-R25-1	129	3	26,6
L50-R25-2	183	3	26,6
L100-R25	215	3	26,6

Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 \text{ MPa}$.

<i>Ensaio dos Corpos-de-Prova</i>	<i>Idade do Concreto (dias)</i>	<i>Quantidade de Corpos-de-prova</i>	<i>$f_{c,médio}$ (MPa)</i>
	7	3	21,7
	28	3	28,7
L50-R35-1	183	3	34,6
L50-R35-2	191	3	34,6
L100-R35	219	3	34,6

Tabela 3.5 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 \text{ MPa}$.

<i>Ensaio dos Corpos-de-Prova</i>	<i>Idade do Concreto (dias)</i>	<i>Quantidade de Corpos-de-prova</i>	<i>$f_{c,médio}$ (MPa)</i>
	7	3	30,9
	28	3	38,1
L50-R45-1	183	3	44,9
L50-R45-2	184	3	44,9
L100-R45	206	3	44,9

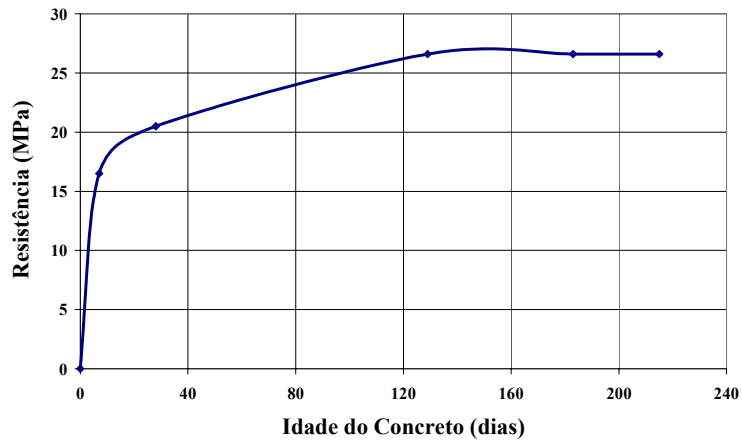


Figura 3.1 – Diagrama resistência x idade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.

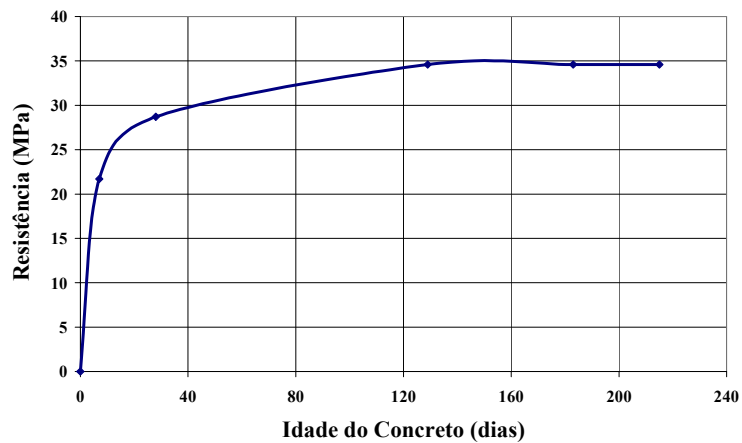


Figura 3.2 – Diagrama resistência x idade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.

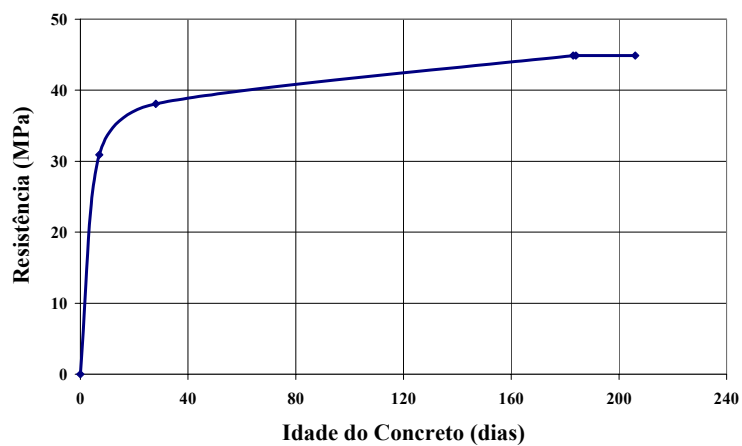


Figura 3.3 – Diagrama resistência x idade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$.

3.2.1.2.**Módulo de Elasticidade do Concreto**

Para determinação do módulo de deformação estática (módulo de elasticidade do concreto) foram moldados três corpos-de-prova de concreto em obediência à NBR 5738/1994, com dimensões $100\text{mm} \times 200\text{mm}$ para cada dosagem. Nestes ensaios, as deformações foram medidas por meio de dois extensômetros elétricos com comprimento de 67 mm , colados à meia altura do corpo-de-prova em posições diametralmente opostas.

Este ensaio, realizado em obediência à NBR 8522, consiste na aplicação de carregamento crescente preestabelecido em função da resistência à compressão do concreto medida previamente.

O procedimento utilizado para a determinação do módulo de elasticidade do concreto é o correspondente à simulação de uma estrutura em seu primeiro carregamento (Plano de carga tipo III), sendo calculado somente o módulo de deformação secante de acordo com a equação 3.1, sendo este o módulo correspondente a $0,3 f_c$, dado por:

$$E = \frac{\sigma_n - \sigma_{\text{inf}}}{\varepsilon_n - \varepsilon_0} \quad (3.1)$$

onde:

E – 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 leitura ℓ_0 ;

$\sigma_{\text{inf}} = 0,5\text{MPa}$.

De acordo com a NBR 8522, somente devem ser considerados válidos os resultados de ensaios de corpos-de-prova cujas resistências f_{real} não diferem mais de 20 % das resistências previstas f_c .

Os resultados dos ensaios são apresentados nas Tabelas 3.6, 3.7 e 3.8, e os gráficos tensão x deformação específica dos corpos-de-prova válidos para cada concretagem são mostrados nas Figuras 3.4, 3.5 e 3.6.

Tabela 3.6 – Resultado do ensaio do módulo de elasticidade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.

Corpos-de-Prova	Carga de Ruptura P (kN)	Tensão de Ruptura σ (MPa)	Deformação Específica na Ruptura ϵ_c (‰)	Carga para $0,3 f_c$ (kN)	Tensão para $0,3 f_c$ (MPa)	Deformação Específica $0,3 f_c$ (‰)	Módulo de Elasticidade Secante E_{cs} (GPa)
2	162,96	20,75	3,10	48,27	6,14	0,28	18,52
3	141,91	18,07	3,10	48,32	6,15	0,31	18,02
Média	152,43	19,41	3,10	48,30	6,15	0,30	18,27

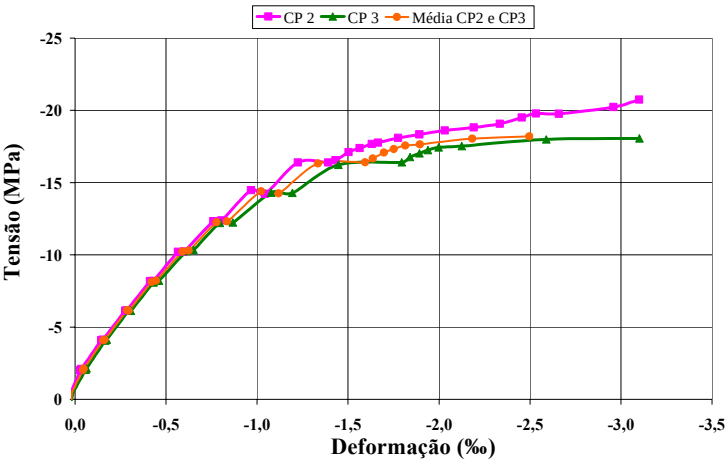


Figura 3.4 – Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.

O CP1 não foi considerado, pois sua f_{real} estava abaixo de 20 % das resistência prevista f_c .

Tabela 3.7 – Resultado do ensaio do módulo de elasticidade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.

Corpos-de-prova	Carga de Ruptura P (kN)	Tensão de Ruptura σ (MPa)	Deformação Específica na Ruptura ϵ_c (‰)	Carga para $0,3 f_c$ (kN)	Tensão para $0,3 f_c$ (MPa)	Deformação Específica $0,3 f_c$ (‰)	Módulo de Elasticidade Secante E_{cs} (GPa)
1	218,48	27,82	2,11	64,57	8,22	0,33	23,03
2	228,13	29,05	1,72	63,58	8,09	0,29	25,23
3	196,27	24,99	2,02	63,55	8,09	0,31	23,52
Média	214,29	27,29	1,95	63,90	8,13	0,31	23,93

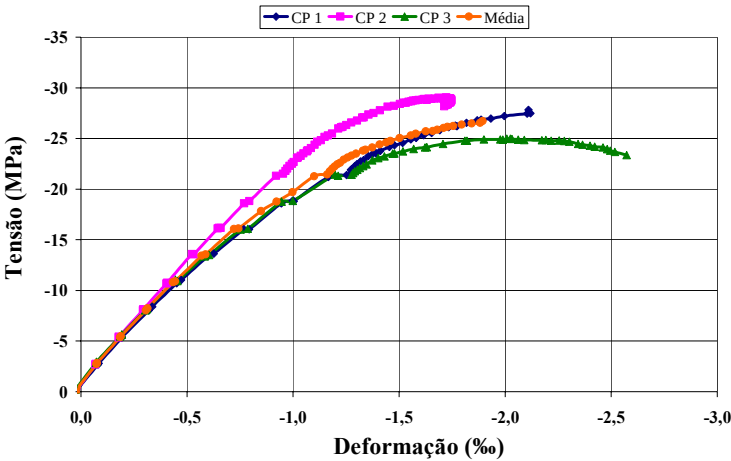


Figura 3.5 – Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.

Tabela 3.8 – Resultado do ensaio do módulo de elasticidade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$.

Corpos-de-prova	Carga de Ruptura P (kN)	Tensão de Ruptura σ (MPa)	Deformação Específica na Ruptura ϵ_c (‰)	Carga para $0,3 f_c$ (kN)	Tensão para $0,3 f_c$ (MPa)	Deformação Específica $0,3 f_c$ (‰)	Módulo de Elasticidade Secante E_{cs} (GPa)
1	323,49	41,19	2,72	88,99	11,33	0,45	22,88
2	295,14	37,58	2,36	89,14	11,35	0,47	23,03
3	288,32	36,71	2,61	89,05	11,34	0,46	22,42
Média	302,32	38,49	2,56	89,06	11,33	0,46	22,78

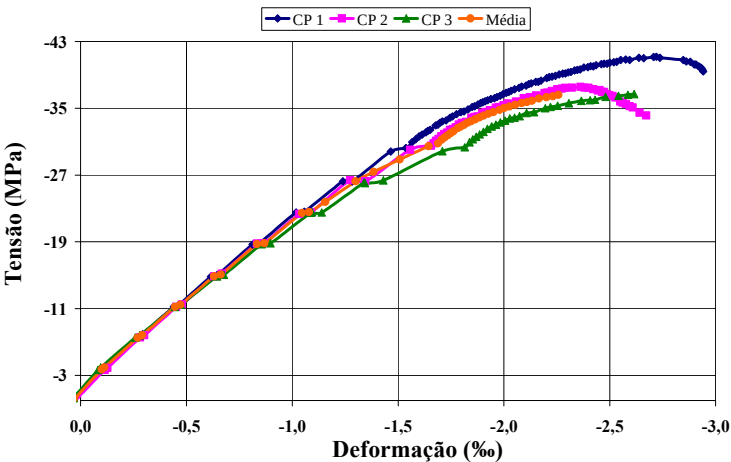


Figura 3.6 – Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$.

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

$$E_{cs} = 0,85 \times 5600 \sqrt{f_c} \quad (MPa) \quad (3.2)$$

A Tabela 3.9 mostra uma comparação dos resultados obtidos no ensaio com os valores calculados pela NBR 6118.

Tabela 3.9 – Comparações do módulo de elasticidade secante encontrado no ensaio com o prescrito pela NBR 6118.

Corpos-de-Prova ($f_{c,28\text{ dias}}$)	Módulo de Elasticidade Secante (Ensaio) E_{cs} (GPa) (aos 28 dias)	Módulo de Elasticidade Secante (NBR 6118) E_{cs} (GPa) (aos 28 dias)
$f_{c,dosagem} = 25\text{ MPa}$	18,27	20,97
$f_{c,dosagem} = 35\text{ MPa}$	23,93	24,87
$f_{c,dosagem} = 45\text{ MPa}$	22,78	29,53

O esquema do ensaio, da aplicação das cargas e das medidas de deformações é mostrado na Figura 3.7.



Figura 3.7 – Sistema de aplicação das cargas e corpo-de-prova após o ensaio.

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

3.2.2. Tecido de Fibra de Carbono

Foram utilizados tecidos de fibra de carbono (Tec-Fiber) fornecidos pela Rheotec Aditivos de Concreto Ltda, do tipo N-300 (Figuras 3.8 e 3.9), com as seguintes características, fornecidas pelo fabricante:



Figura 3.8 – Tecido de fibra de carbono com destaque para o sentido das fibras.

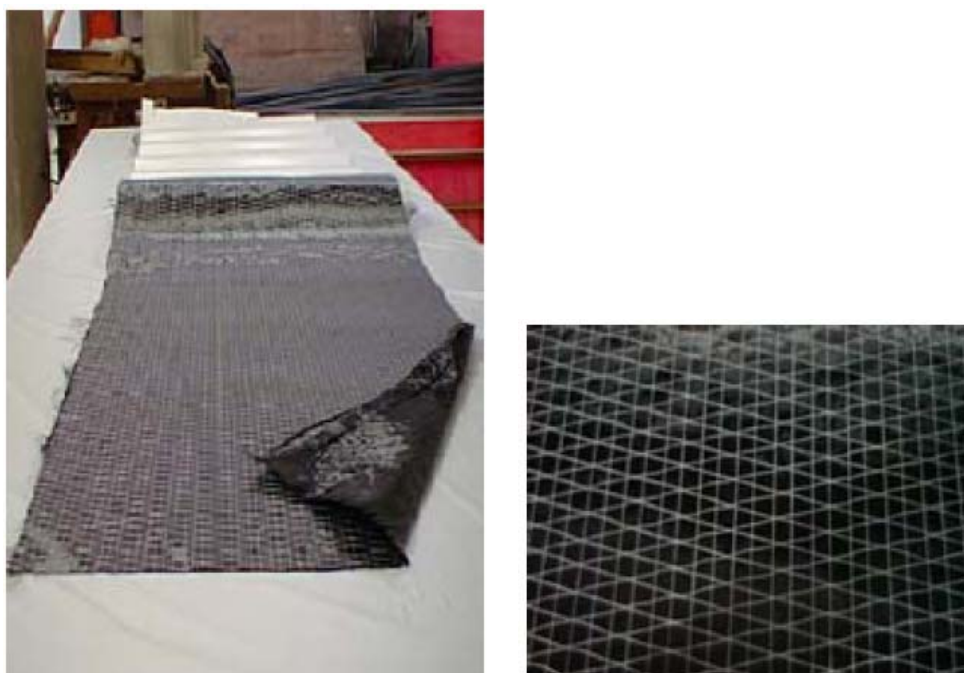


Figura 3.9 – Verso do tecido de fibra de carbono com destaque para a costura (em contato com o concreto).

- Largura da faixa = 500 mm ;
- Espessura = $0,165\text{ mm}$;
- Área da seção transversal = $82,5\text{ mm}^2$;
- Deformação específica na ruptura = $1,55\%$;
- Resistência à tração = 3.550 MPa ;
- Módulo de elasticidade = 235 GPa ;
- Peso do material (folha) = 300 g/m^2

Para a colagem dos CFC aos corpos-de-prova foram utilizadas tiras de $760\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ e $760\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ para a lateral instrumentada, $1160\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ e $1160\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ para a lateral oposta à instrumentada. No total foram utilizados $1,674\text{ m}^2$ de tecido.

3.2.2.1

Ensaio de Resistência à Tração do Compósito de Fibra de Carbono

O método de ensaio empregado foi o da 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 3.10, e a Tabela 3.10 apresentam algumas destas dimensões em função da orientação das fibras.

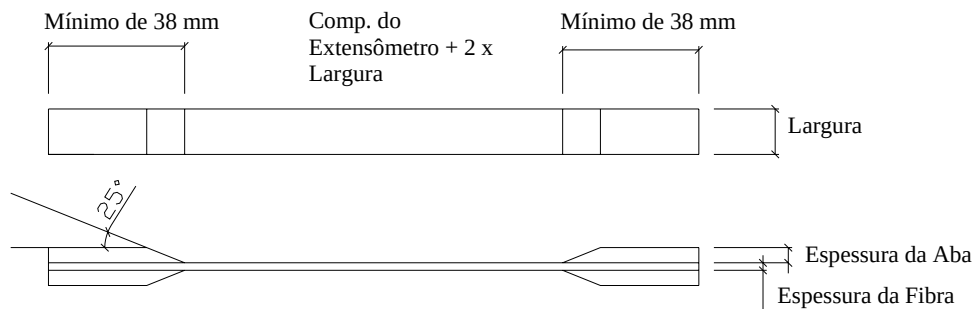


Figura 3.10 – Dimensões dos corpos-de-prova para ensaio de tração; adaptada da norma ASTM D 3039/3039M.

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

Orientação das Fibras	Largura (mm)	Comp. (mm)	Espessura (mm)	Comp. Aba (mm)	Espessura Aba (mm)	Ângulo Aba (°)
0° Unidirecional	15	250	1,0	56	1,5	7 ou 90
90° Unidirecional	25	175	2,0	25	1,5	90
Fios Descontínuos	25	250	2,5	-	-	-

Os corpos-de-prova unidirecionais devem ser confeccionados com abas de alumínio (*tabs*), com o objetivo de evitar o surgimento de falhas prematuras quando da aplicação das cargas.

Foram ensaiados à tração seis corpos-de-prova de tecido unidirecional de fibra de carbono revestidos com resina epóxi, com 25mm de largura, 250mm de comprimento e abas de alumínio de 25mm de largura por 60mm 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.

Os ensaios foram realizados na máquina universal AMSLER com capacidade de 20kN, no Laboratório de Ensaios Mecânicos do ITUC - Instituto de Tecnologia da PUC-Rio.

De acordo com a norma ASTM D 3039 / D 3039M, o cálculo da resistência à tração do compósito de fibras de carbono é dado por:

$$f_{tf} = \frac{F_{máx}}{A} \quad (3.3)$$

onde

f_{tf} – resistência à tração (MPa);

$F_{m\acute{a}x}$ carga máxima aplicada (N);

A – área do corpo-de-prova (mm^2).

O módulo de elasticidade é calculado a partir do gráfico tensão x deformação específica do CFC (Figura 3.11), sendo igual ao coeficiente angular do trecho linear do mesmo.

Os resultados do ensaio constam na Tabela 3.11, e as Figuras 3.12 e 3.13 mostram o esquema de ensaio e os corpos-de-prova ensaiados, respectivamente.

Dois corpos-de-prova foram descartados, pois os resultados destes ficaram discrepantes em relação aos outros.

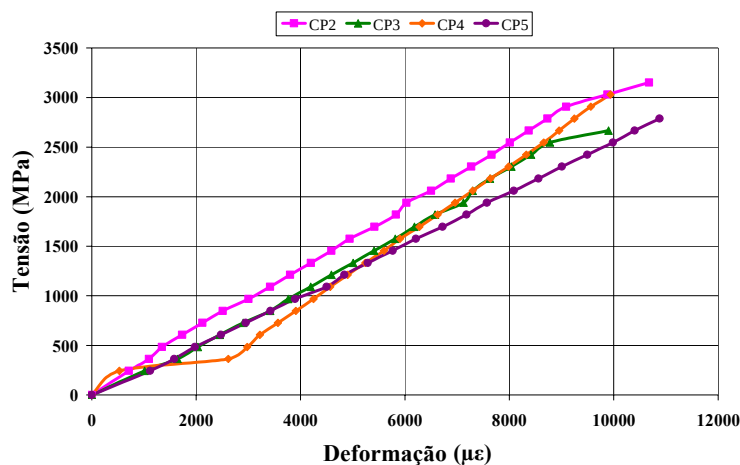


Figura 3.11 – Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova de CFC.

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

<i>Corpos-de-prova</i>	<i>Carga $F_{m\acute{a}x}$ (N)</i>	<i>Resistência f_{tf} (MPa)</i>	<i>Módulo de Elasticidade E_f (GPa)</i>
2	13.500	3.272,73	309,2
3	11.500	2.787,88	304,2
4	12.500	3.030,30	361,8
5	11.500	2.787,88	260,1
Média	12.250	2969,70	308,8



Figura 3.12 – Corpos-de-prova de tecidos de fibra de carbono revestidos com resina epóxi.



Figura 3.13 – Ensaio dos corpos-de-prova de compósitos de fibra de carbono com placas de alumínio nas extremidades: (a) vista frontal do corpo-de-prova antes do ensaio; (b) ruptura do corpo-de-prova.

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

3.2.2.2.

Materiais Necessários para a Aplicação do Tecido de Fibra de Carbono

Para a aplicação do tecido de fibra de carbono, obedecendo-se ao sistema correto de impregnação, devem-se utilizar quatro produtos que permitem a correta aplicação do reforço. Os quatro produtos são:

- Argamassa de reparo.
- Resina de imprimação.

- Argamassa epoxídica.
- Resina epoxídica.

Dois destes produtos, a argamassa de reparo e a argamassa epoxídica, dependendo das condições da superfície, são dispensáveis. A argamassa de reparo se torna necessária se houver significativas irregularidades na superfície. A argamassa epoxídica promove a regularização final da superfície. Em superfícies sem muitas irregularidades o uso dessas argamassas se torna dispensável.

Na aplicação do tecido de fibra de carbono no substrato de concreto dos corpos-de-prova não houve a necessidade de regularizar as superfícies que receberiam o tecido, portanto, a aplicação foi feita utilizando-se somente a resina de imprimação e a resina epoxídica.

3.2.2.2.1. Resina de Imprimação

Após a limpeza da superfície do corpo-de-prova foi aplicada a Tec-Poxi PR da Rheotec Aditivos de Concreto Ltda. (Figura 3.14). Esta resina é responsável pela perfeita aderência da camada de resina epoxídica ao substrato, e é de uso obrigatório neste sistema de aplicação. Algumas de suas propriedades para 100 gramas da mistura dos componentes A + B, a 22° C são:

- 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).
- Peso específico: $1,050 \text{ g} / \text{cm}^3$.
- 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.



(a)



(b)

Figura 3.14 – Resina de imprimação: (a) preparação; (b) mistura pronta para a aplicação.

3.2.2.2.2

Resina Epoxídica

Foi aplicada a Tec-Poxi da Rheotec (Figura 3.15), resina epoxídica responsável pela perfeita aderência do reforço com tecido de fibra de carbono e o substrato de concreto, transferindo as tensões do reforço para esse. Essa resina é uma componente básica deste sistema de reforço.

Algumas das suas propriedades, numa quantidade de 100 gramas da mistura dos componentes A + B, temperatura de 22° C , são:

- Componente A: azul.
- Componente B: levemente amarelado.
- Mistura A+B: azul transparente.
- Proporção dos componentes: 72% de componente A e 28 % de componente B (em peso).
- Viscosidade: 70 a 80 s (CF 4).

- Peso específico: $1,055 \text{ g} / \text{cm}^3$.
- 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.
- Aderência: $1,5 \text{ MPa}$.
- Alongamento por ruptura = $0,300 \text{ mm} / \text{mm}$.
- Resistência à tração: $55 \pm 3,0 \text{ MPa}$ 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.



(a)



(b)

Figura 3.15 – Resina epóxi: (a) componentes A e B; (b) preparação da resina para a aplicação.

3.3. Confecção dos Corpos-de-Prova

3.3.1. Formas

As formas dos corpos-de-prova foram feitas de aço, compostas de cinco peças que se encaixam, presas com quatro parafusos (Figura 3.16).

Nas superfícies internas das formas foram aplicadas camadas de desmoldantes, de modo a promover a vedação das mesmas e facilitar o processo de desmoldagem.



Figura 3.16 – Formas de aço para a confecção dos corpos-de-prova de concreto.

3.3.2. Corpos-de-Prova de Concreto

Para a realização dos ensaios foram utilizados corpos-de-prova compostos por dois blocos iguais (móvel e fixo) de concreto, com dimensões de $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$, cujas resistências à compressão aos 28 dias foram de $20,5\text{ MPa}$, $28,7\text{ MPa}$ e $38,1\text{ MPa}$, respectivamente (Figura 3.17).

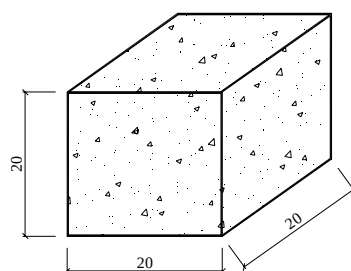


Figura 3.17 – Corpos-de-prova de concreto (medidas em cm).

3.3.3. Concretagem

Os corpos-de-prova foram concretados no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio (LEM/DEC).

O lançamento do concreto foi realizado de forma manual, e o adensamento deu-se por meio de vibrador de imersão com diâmetro de $25,4\text{ mm}$ durante e

imediatamente após o lançamento do concreto nas formas. Não foi realizado nenhum processo especial de cura.

Após sete dias de cada concretagem os corpos-de-prova foram desformados e permaneceram em condições ambientes no laboratório até as datas dos ensaios.

3.3.4. Colagem do Tecido de Fibra de Carbono

Os blocos dos corpos-de-prova - móvel e fixo - foram posicionados em cantoneiras fixadas num pórtico para que estes ficassem alinhados, de modo que os eixos das tiras de tecido ficassem no mesmo plano (Figura 3.18).

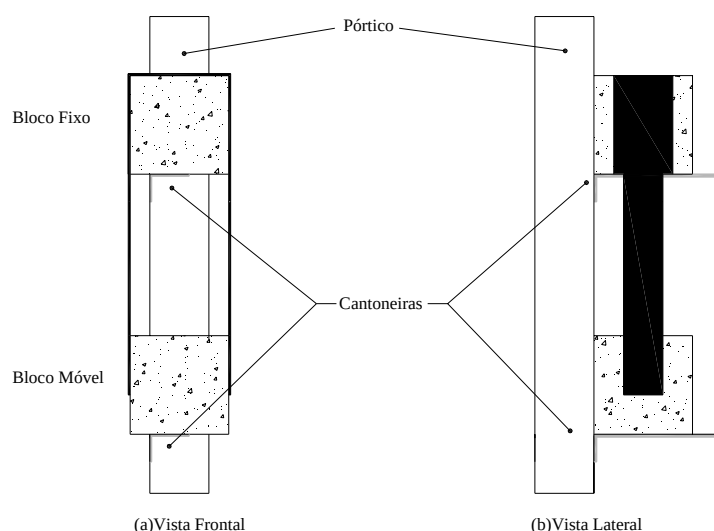


Figura 3.18 – Posicionamento dos corpos-de-prova para a colagem do CFC.

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

Com a superfície pronta para receber o tecido, realizou-se a imprimação do substrato. O primer é um epóxi que permite um alto poder de impregnação devido a 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 tecido.

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 no concreto, e, simultaneamente, uma camada de resina no tecido que foi aplicado, finalizando a formação do compósito. Fez-se então a aplicação do tecido na estrutura, de modo a se retirar todo o ar aprisionado. Após a aplicação do tecido foi necessário esperar seis dias, tempo esse indicado pela empresa que forneceu o material, para que o ensaio pudesse ser realizado.

Antes da cura da resina (seis dias), os corpos-de-prova foram acoplados à estrutura de ensaio, os extensômetros elétricos de resistência, os mecânicos (somente no corpo-de-prova L50-R25-1/piloto) e os LVDT foram instalados nos mesmos.

3.3.5. Instrumentação dos Corpos-de-Prova

O comportamento estrutural dos corpos-de-prova foi acompanhado durante os ensaios por medições das deformações no tecido de fibra de carbono e no concreto por meio de extensômetros elétricos de resistência, por meio de medições do deslocamento dos corpos-de-prova com LVDT e a leitura das cargas aplicadas realizadas por intermédio de uma célula de carga com capacidade para 100 kN.

O corpo-de-prova piloto (L50-R25-1) foi instrumentado com sete extensômetros de resistência na face lateral da fibra de 50mm de largura, com espaçamento de 23mm entre eles. Sete medidas de deformação específica no concreto foram efetuadas por meio de extensômetros mecânicos. Os extensômetros elétricos no tecido foram numerados de 0 a 6 a partir da extremidade esquerda do comprimento de ancoragem do tecido (Figura 3.19). Logo, a lateral instrumentada do tecido possuiu seis trechos, denominados trecho 0-1, trecho 1-2, trecho 2-3, trecho 3-4, trecho 4-5 e trecho 5-6, onde foram calculadas as tensões de aderência e as deformações médias.

Este teste piloto foi realizado para prever a carga de ruptura, o funcionamento dos extensômetros e o deslocamento do corpo-de-prova.

A Figura 3.19 mostra o posicionamento dos extensômetros elétricos e mecânicos no tecido e no concreto.

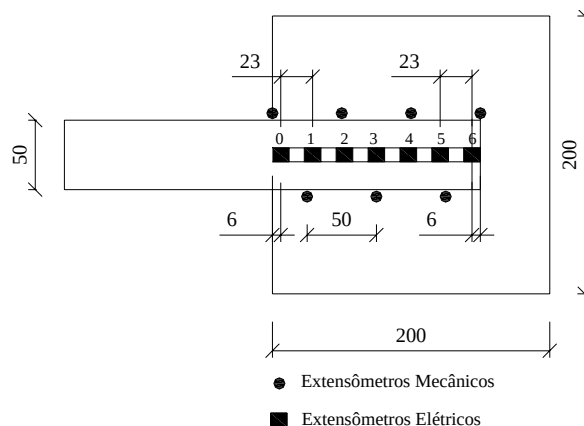


Figura 3.19 – Posicionamento dos extensômetros elétricos, mecânicos no corpo-de-prova L50-R25-1/piloto (medidas em mm).

Como os dois últimos extensômetros não mediram deformações no tecido, decidiu-se diminuir de sete para cinco extensômetros, posicionados ao longo do comprimento de ancoragem com igual espaçamento. Permaneceu-se com o extensômetro da extremidade direita da ancoragem para confirmar a ausência ou não de deformação nesta extremidade nos outros corpos-de-prova.

Os extensômetros mecânicos não forneceram deformações no concreto, talvez por serem imprecisos, portanto, decidiu-se substituí-los por dois extensômetros elétricos posicionados no concreto nas duas extremidades do comprimento de ancoragem do tecido (Figura 3.20).

Os corpos-de-prova L50-R25-2, L50-R35-1, L50-R35-2, L50-R45-1 e L50-R45-2 (grupo A) foram instrumentados com cinco extensômetros elétricos de resistência na face lateral da fibra de 5 cm de largura, com espaçamento de 3,5 cm entre eles, e dois no concreto com espaçamento de 11,7 cm (Figura 3.20).

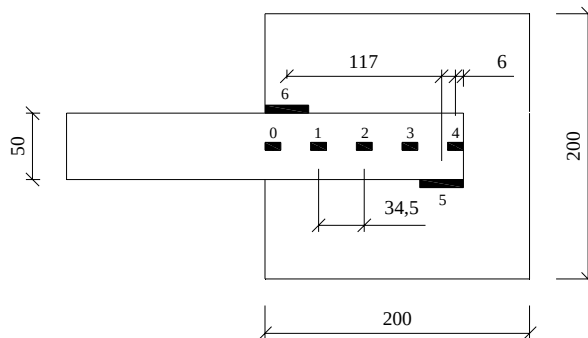


Figura 3.20 – Posicionamento dos extensômetros elétricos no tecido e no concreto nos corpos-de-prova do grupo A exceto o L50-R25-1/piloto (medidas em mm).

Os extensômetros elétricos colados no tecido, para os corpos-de-prova do grupo A, foram numerados de 0 a 4 a partir da extremidade esquerda do comprimento de ancoragem do tecido, e os extensômetros do concreto foram numerados de 5 a 6 (Figura 3.20). Logo, a lateral instrumentada do tecido possuiu quatro trechos onde foram calculadas as tensões de aderência, deformações médias no CFC e os deslocamentos.

Como não foram lidas deformações no extensômetro 5 (extremidade não carregada) do concreto nos corpos-de-prova anteriores, decidiu-se que esse extensômetro seria retirado dos demais corpos-de-prova.

Os corpos-de-prova do grupo B (L100-R25, L100-R35 e L100-R45) foram instrumentados com cinco extensômetros elétricos de resistência na face lateral do tecido de 10 cm de largura, com espaçamento de 3,5 cm entre eles e um extensômetro no concreto. O sistema de numeração dos trechos foi igual ao dos corpos-de-prova do grupo A (Figura 3.21).

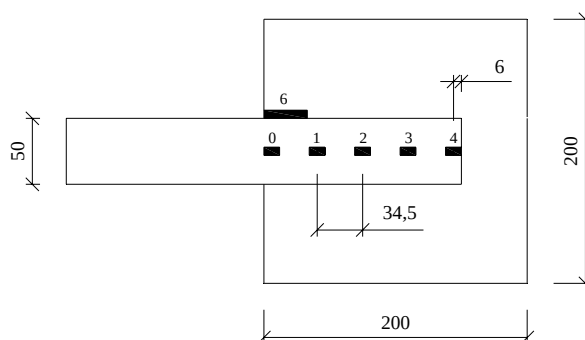


Figura 3.21 – Posicionamento dos extensômetros elétricos no tecido e no concreto nos corpos-de-prova do grupo B (medidas em mm).

Todos os corpos-de-prova tiveram o mesmo posicionamento dos LVDT (Figura 3.22).

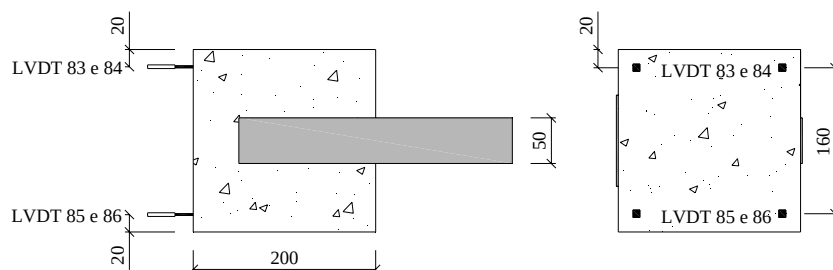


Figura 3.22 – Posicionamento dos LVDT nos corpos-de-prova.

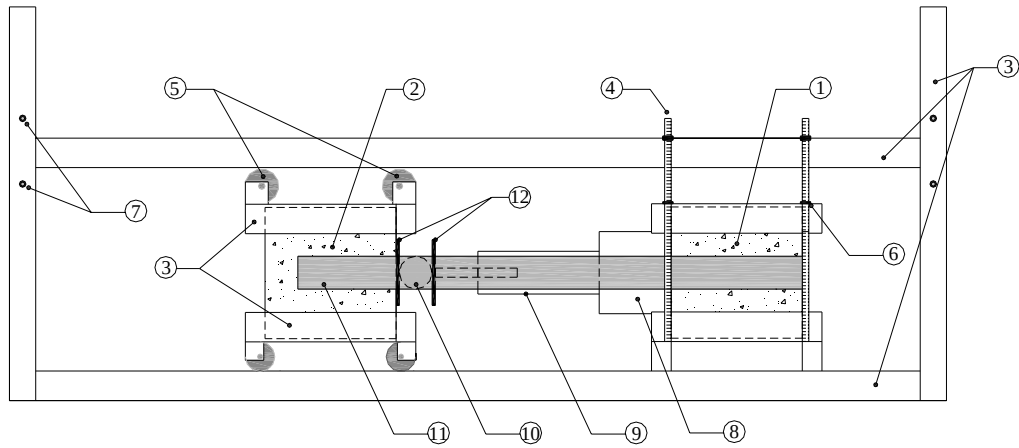
3.4. Descrição dos Ensaios

3.4.1. Montagem

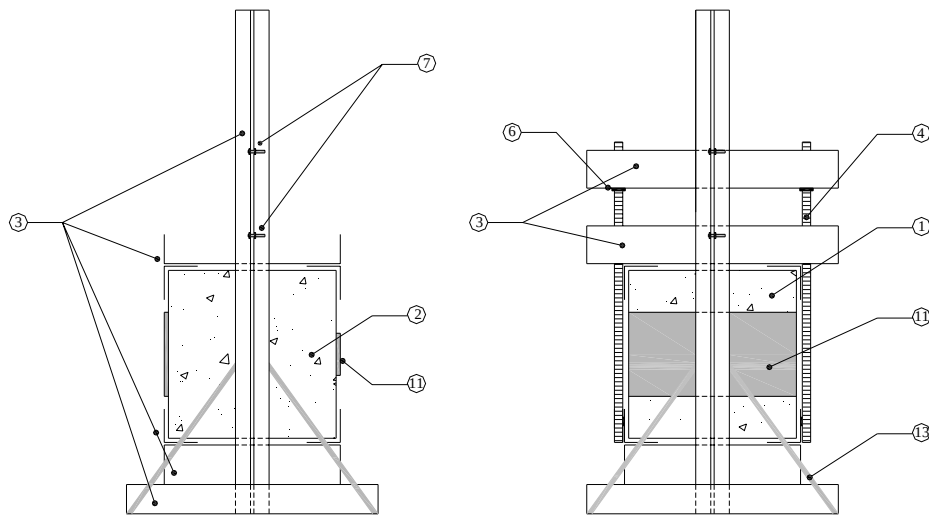
O aparato empregado nos ensaios é formado de cantoneiras metálicas e roldanas. Tem a característica de permitir o deslocamento do bloco móvel (Figura 3.23) ao longo de um eixo de mesma direção da carga que é aplicada no centro dos blocos de concreto. O bloco fixo serve de apoio para o macaco hidráulico de 120 *kN* e para a célula de carga 100 *kN*. A carga aplicada pelo macaco é transferida para as tiras do tecido de fibra de carbono através dos blocos de concreto.

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

A Figura 3.24 mostra um corpo-de-prova pronto para ser ensaiado.



(a) Vista frontal.

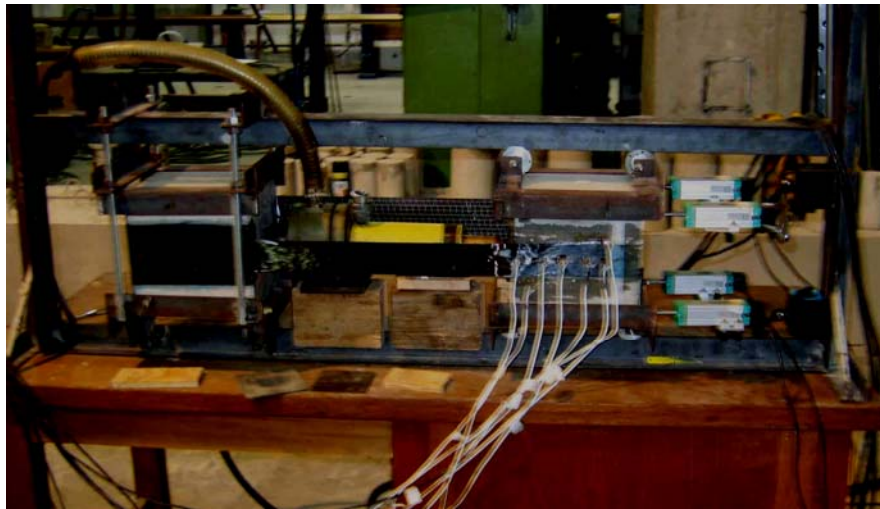


(b) Vistas laterais.

Legenda:

- | | | | |
|-------------------|-------------------|---------------------|--------------------|
| ① Bloco Fixo | ⑤ Roldanas | ⑨ Macaco Hidráulico | ⑬ Barra de Fixação |
| ② Bloco Móvel | ⑥ Porcas | ⑩ Rótula | |
| ③ Cantoneiras | ⑦ Parafusos | ⑪ CFC | |
| ④ Barra Rosqueada | ⑧ Célula de Carga | ⑫ Chapas de Aço | |

Figura 3.23 – Equipamento do ensaio de tração-compressão.



(a) Vista Frontal



(b) Vista Posterior

Figura 3.24 – Esquema do ensaio.

Foi realizado o mesmo ensaio utilizando chapas metálicas com as mesmas áreas transversais das tiras de tecido de fibra de carbono para a verificação da distribuição exata das cargas na lateral em estudo. Estas chapas foram instrumentadas com dois extensômetros de resistência posicionados nas duas laterais opostas, entre os dois blocos. Verificou-se que as cargas foram igualmente distribuídas entre as duas chapas metálicas, portanto, o mesmo pode ser aplicado às tiras de tecido do ensaio.

4 Apresentação e Análise dos Resultados

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios dos nove corpos-de-prova. São determinadas as tensões de aderência e os deslocamentos relativos entre o concreto e o CFC. São mostrados gráficos tensão de aderência x deformação do CFC, tensão de aderência x deslocamento, deformação do CFC x distância ao longo do comprimento de ancoragem e tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem.

Constam no Anexo E os diagramas de carga x deformação do CFC para todos os extensômetros, carga x deformação no concreto e carga x deslocamento do bloco móvel.

Os parâmetros analisados foram comparados considerando-se as diversas resistências à compressão e a variação da largura do tecido.

Como mencionado no item 3.1, para melhor descrição dos corpos-de-prova, estes foram divididos em dois grupos: grupo A, formado pelos corpos-de-prova com largura do tecido igual a 50 mm e o grupo B, formado pelos corpos-de-prova com largura do tecido igual a 100 mm .

4.2 Cargas e Modos de Ruptura

A Tabela 4.1 e a Figura 4.1 mostram as cargas e modos de ruptura dos corpos-de-prova, onde F_u é a carga de ruptura (carga atuando na lateral do tecido em estudo). O incremento de carga aplicada nos corpos-de-prova foi de 1 kN . A Tabela 4.2 mostra a análise estatística das cargas de ruptura.

Tabela 4.1 – Cargas e modos de ruptura.

<i>Grupo</i>	<i>Corpos-de-Prova</i>	<i>F_u (kN)</i>	<i>Resistência à Compressão do Concreto (MPa)*</i>	<i>Largura do Tecido (mm)</i>	<i>Duração do Ensaio (min)</i>	<i>Modos de Ruptura</i>
A	L50-R25-1	9,55	26,5	50	50	Arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.2)
	L50-R25-2	12,00	26,5	50	40	Arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.3)
	L50-R35-1	12,58	34,6	50	40	Descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem (Figuras 4.4 e 4.5)
	L50-R35-2	12,77	34,6	50	30	Arrancamento parcial do substrato de concreto (Figura 4.6)
	L50-R45-1	8,81	44,9	50	30	Descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem (Figura 4.7)
	L50-R45-2	11,69	44,9	50	40	Arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.8)
B	L100-R25	21,03	26,5	100	40	Arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.9)
	L100-R35	30,64	34,6	100	80	Ruptura do tecido no início da ancoragem (Figura 4.10)
	L100-R45	25,27	44,9	100	50	Descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem (Figura 4.11)

* Obtida no dia do ensaio.

Tabela 4.2 – Análise estatística das cargas de ruptura.

<i>Grupo</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão (s)</i>	<i>Coefficiente de Variação (CV) (%)</i>
A	11,23	1,65	14,7
B	25,64	4,82	18,8

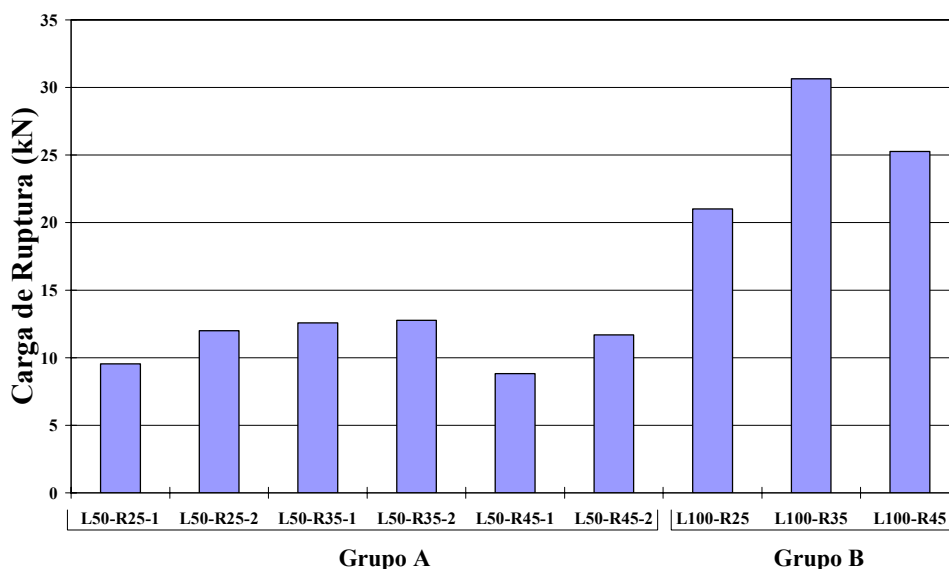


Figura 4.1 – Cargas de ruptura dos corpos-de-prova.

A carga de ruptura do corpo-de-prova L50-R45-1 foi 27,5% menor do que a média das cargas de ruptura dos outros corpos-de-prova do grupo A. O menor valor da carga foi devido a uma falha de colagem do corpo-de-prova.

O valor médio das cargas de ruptura dos corpos-de-prova do grupo B foi 2,28 maiores do que os do grupo A.

As cargas de ruptura dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35MPa$ foram maiores do que as cargas dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25MPa$ e $f_{c,dosagem} = 45MPa$, tanto para os corpos-de-prova do grupo A, quanto para os do grupo B (Figura 4.1).

Analisando-se somente os corpos-de-prova do grupo A, os valores das cargas de ruptura apresentam $s = 1,65$ e $CV = 14,7\%$. Os corpos-de-prova do grupo B apresentam $s = 4,82$ e $CV = 18,8\%$, portanto, este grupo apresenta maior dispersão, mas, em geral, os valores do CV para os dois grupos apresentam baixa

dispersão, pois são menores que 20%, donde são valores aceitáveis (valores utilizados por estatísticos).

Os corpos-de-prova do grupo A apresentaram cargas de ruptura com dispersão menor do que as do grupo B.

A Figura 4.1 mostra que as cargas de ruptura não apresentaram variação considerável. Isto leva a supor que F_u não depende do f_c do concreto dos corpos-de-prova.

As Figuras 4.2 a 4.11 ilustram os modos de ruptura dos corpos-de-prova.



Figura 4.2 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto do corpo-de-prova L50-R25-1/piloto.

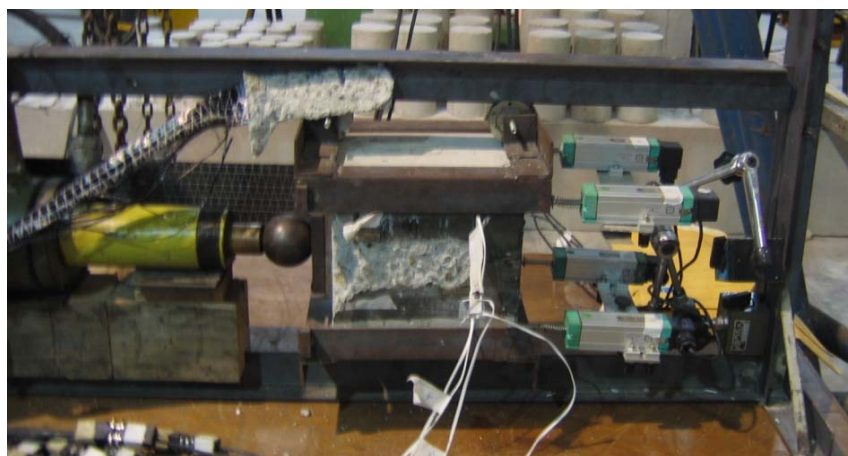


Figura 4.3 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto do corpo-de-prova L50-R25-2.



Figura 4.4 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova L50-R35-1.



Figura 4.5 – Detalhe do descolamento do tecido do corpo-de-prova L50-R35-1.



Figura 4.6 – Ruptura por arrancamento parcial do substrato de concreto do corpo-de-prova L50-R35-2; detalhe do arrancamento.



Figura 4.7 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova L50-R45-1.



Figura 4.8 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto do corpo-de-prova L50-R45-2; detalhe do arrancamento.

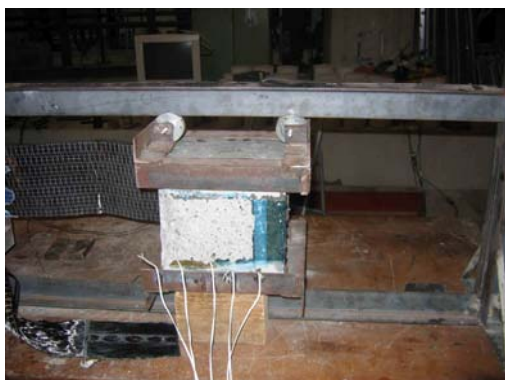


Figura 4.9 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto do corpo-de-prova L100-R25.

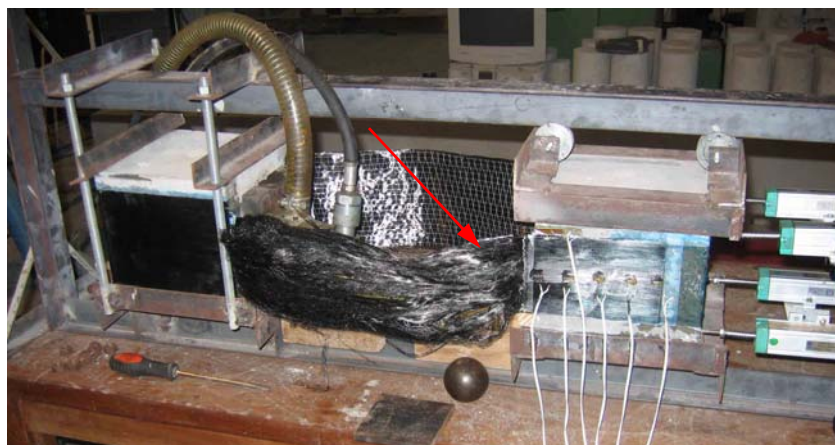


Figura 4.10 – Ruptura do tecido no início da ancoragem do corpo-de-prova L100-R35.

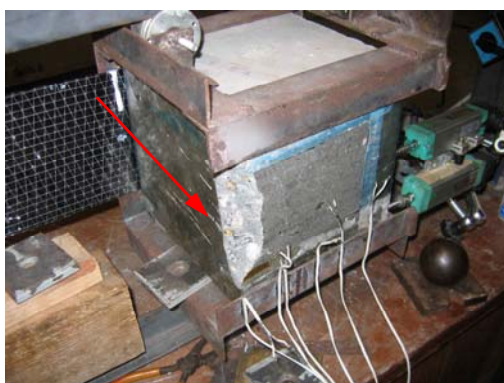


Figura 4.11 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova L100-R45; detalhe do descolamento com rompimento do tecido.

Quando a carga no corpo-de-prova L50-R25-1/piloto atingiu 5 *kN*, ocorreu uma interrupção no fornecimento de energia no laboratório, prejudicando o ensaio.

O corpo-de-prova L100-R35 também teve um descarregamento quando a carga atingiu 27,53 *kN* devido à problemas no equipamento, portanto, o tempo deste ensaio de 80 minutos foi devido a este problema.

4.3

Deformações ao Longo do Comprimento de Ancoragem

Neste item são analisadas as deformações ao longo de todo o comprimento de ancoragem do CFC para diversos estágios de carregamento (Figuras 4.12 a 4.20).

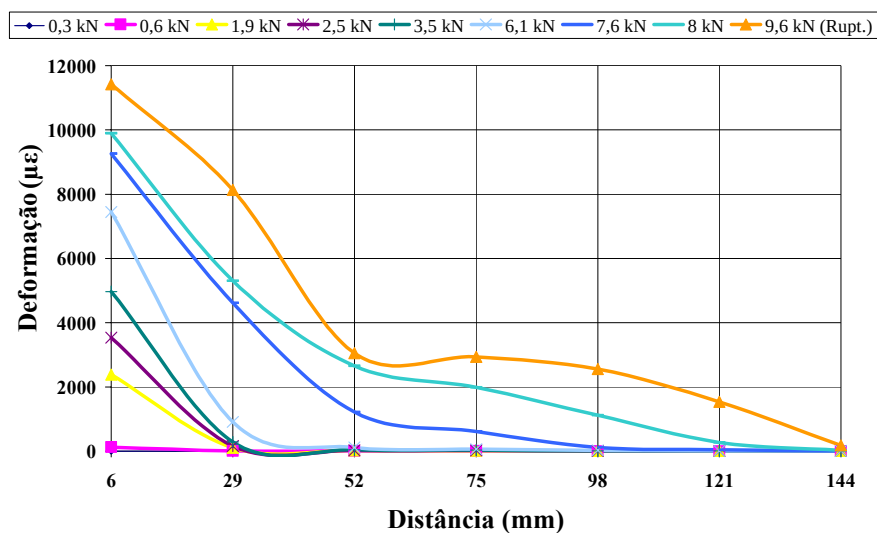


Figura 4.12 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R25-1/ensaio piloto.

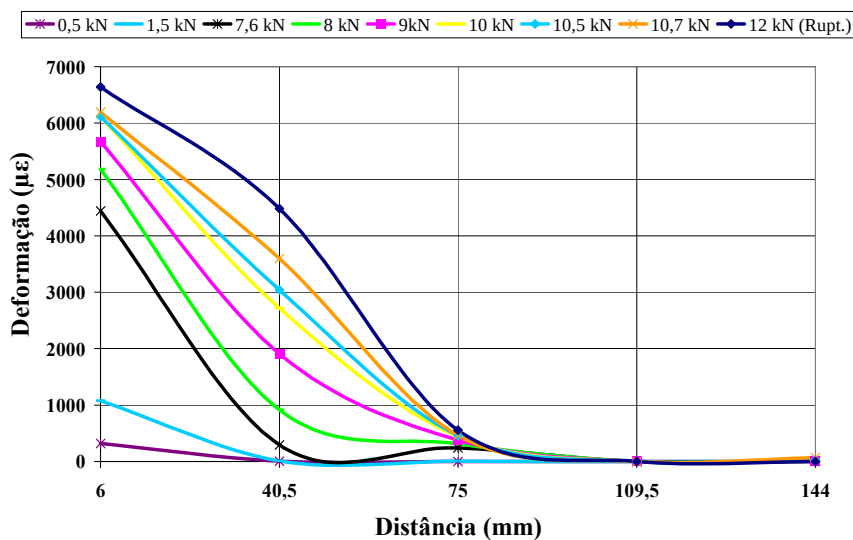


Figura 4.13 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R25-2.

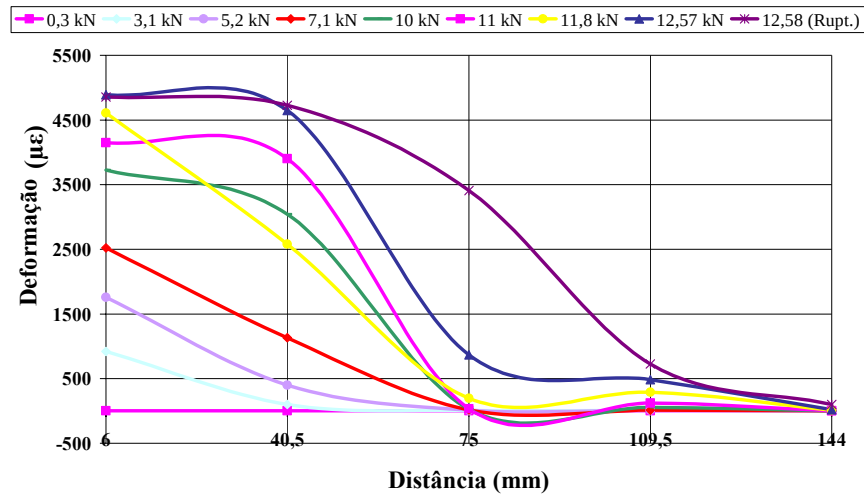


Figura 4.14 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R35-1.

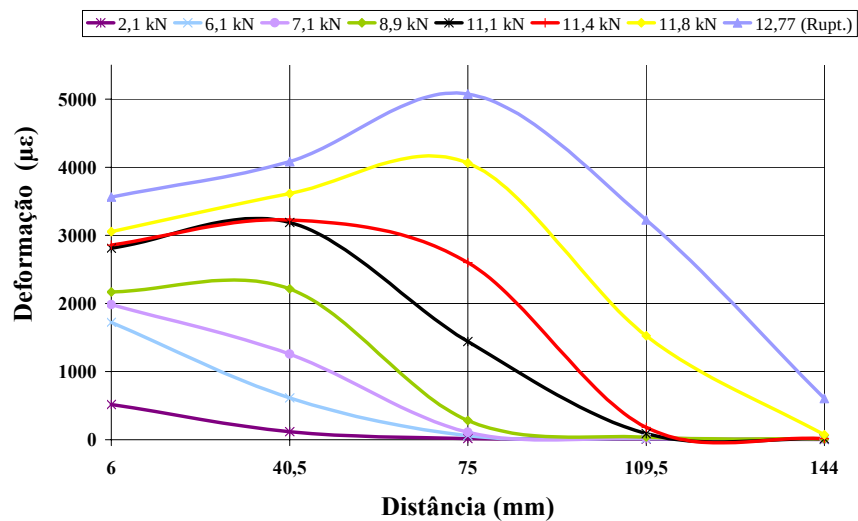


Figura 4.15 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R35-2.

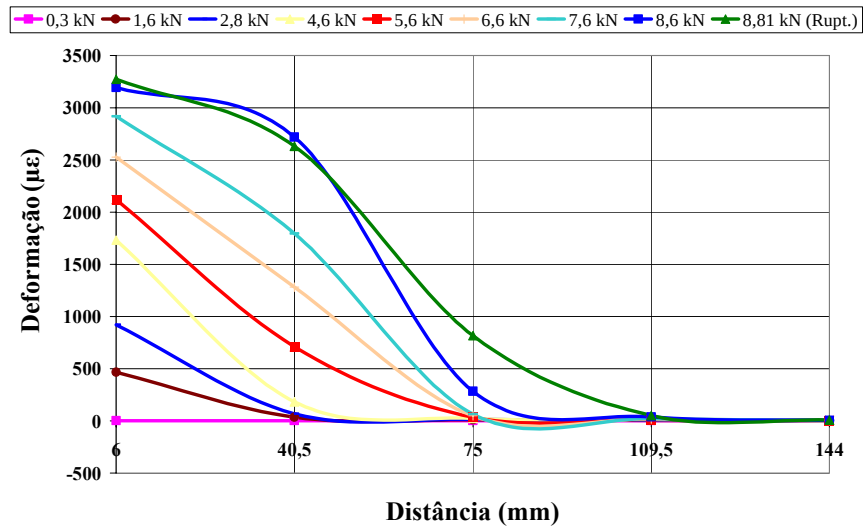


Figura 4.16 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R45-1.

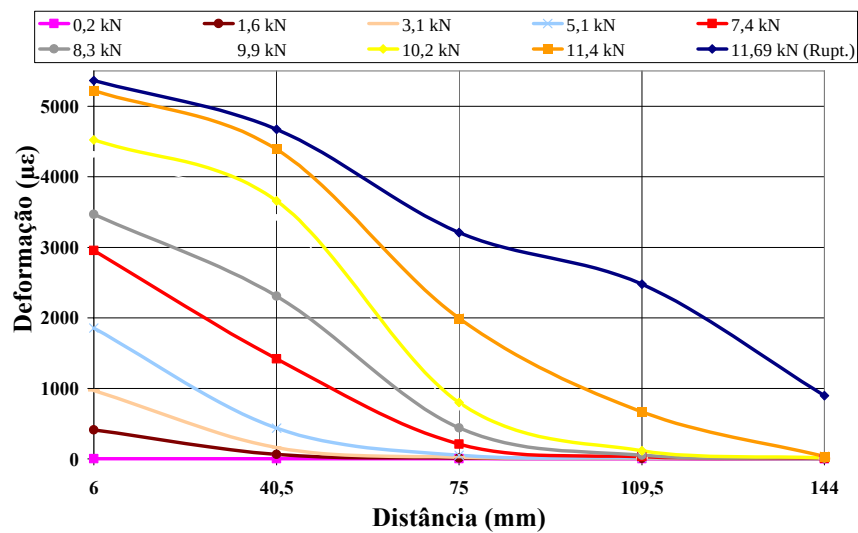


Figura 4.17 – Curva deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R45-2.

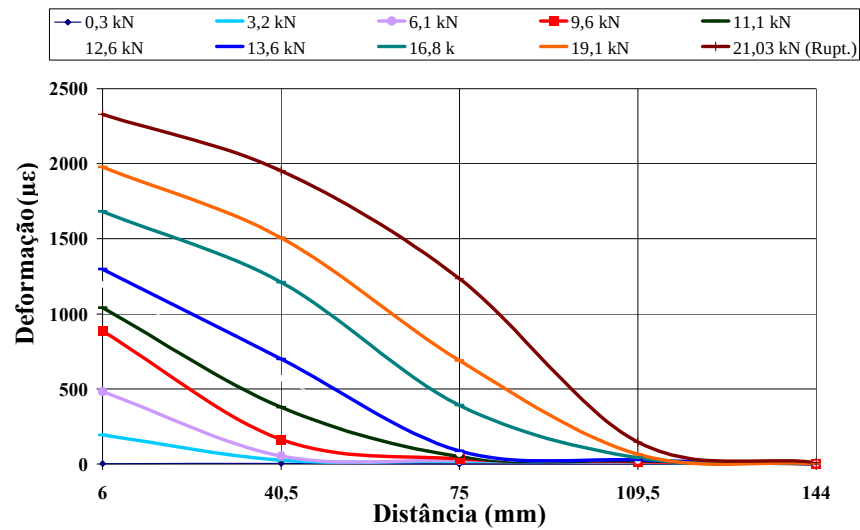


Figura 4.18 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L100-R25.

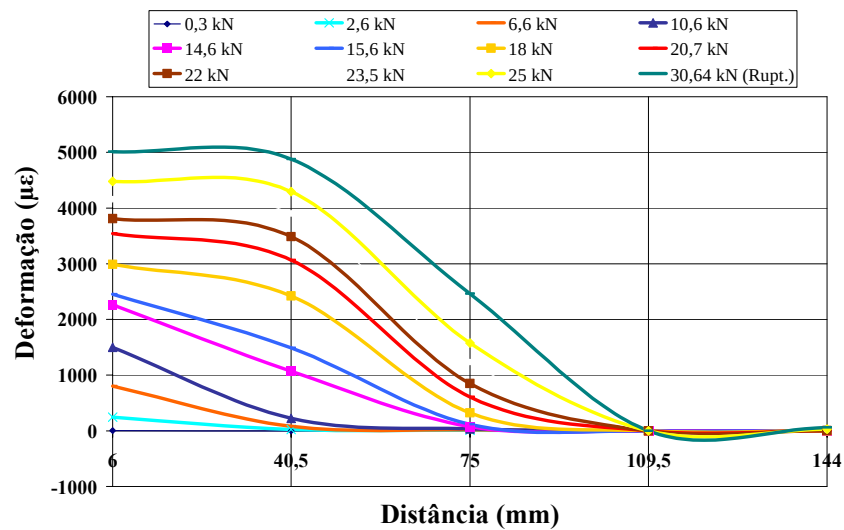


Figura 4.19 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L100-R35.

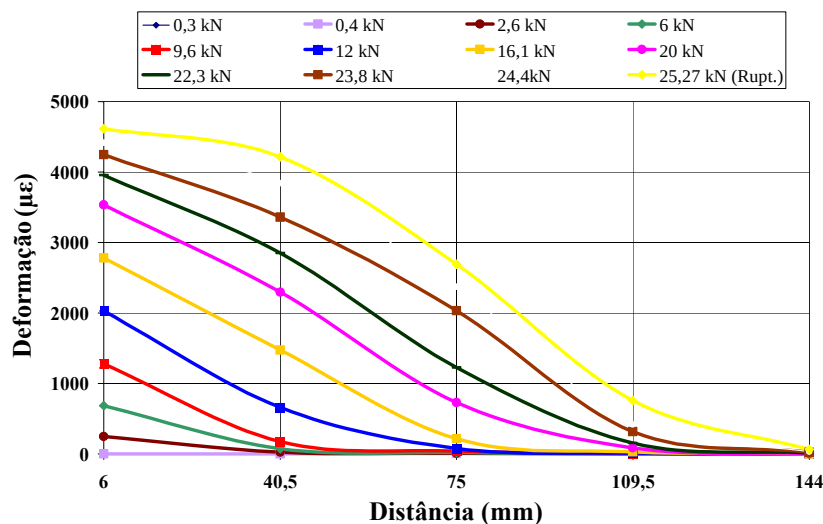


Figura 4.20 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L100-R45.

As maiores deformações, como esperado, ocorreram na extremidade carregada do comprimento de ancoragem (correspondente ao extensômetro 0) para todos os corpo-de-prova, exceto para o corpo-de-prova L50-R35-2, no qual, para cargas próximas à de ruptura, as maiores deformações foram lidas pelo extensômetro 2.

Com o aumento do carregamento as deformações ocorreram na sequência da localização dos extensômetros ao longo do comprimento de ancoragem, apresentando comportamento similar, exceto para o corpo-de-prova L50-R35-2, que apresentou comportamento anômalo, talvez por problemas na leitura das deformações (Figura 4.15).

4.4

Tensões de Aderência x Deformações do CFC

As tensões de aderência são calculadas em função das deformações ε_f do tecido pela seguinte expressão:

$$\tau_b = \frac{(\varepsilon_{f,i} - \varepsilon_{f,i-1}) t_f E_f}{\ell_0} \quad (4.1)$$

onde

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

$\varepsilon_{f,i}, \varepsilon_{f,i-1}$ – deformação do tecido de CFC na seção i e na seção $i-1$, respectivamente, considerando a seqüência 0,1,2,3 e 4 dos extensômetros;

t_f – espessura do tecido de fibra de carbono;

E_f – módulo de elasticidade do CFC;

ℓ_0 – distância entre os pontos onde são obtidas as medidas de deformações.

As Figuras 4.21 a 4.29 mostram as curvas tensões de aderência x deformação do tecido para cada corpo-de-prova.

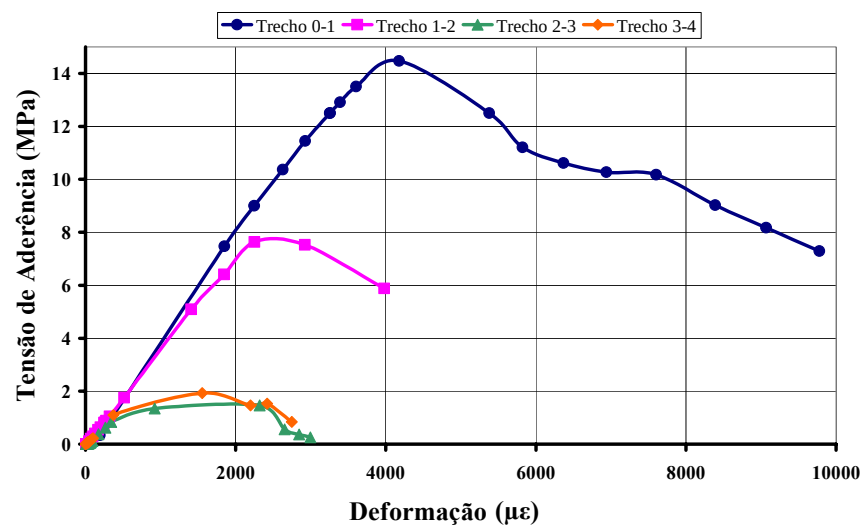


Figura 4.21 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L50-R25-1/ piloto.

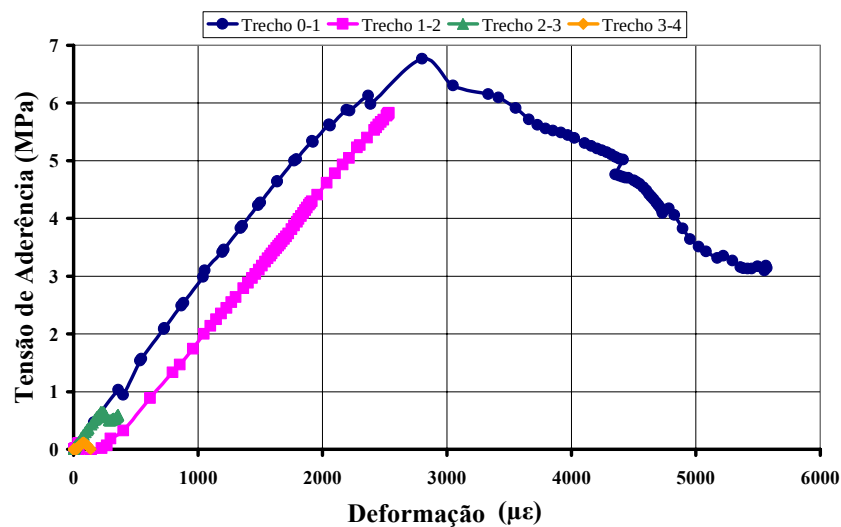


Figura 4.22 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L50-R25-2.

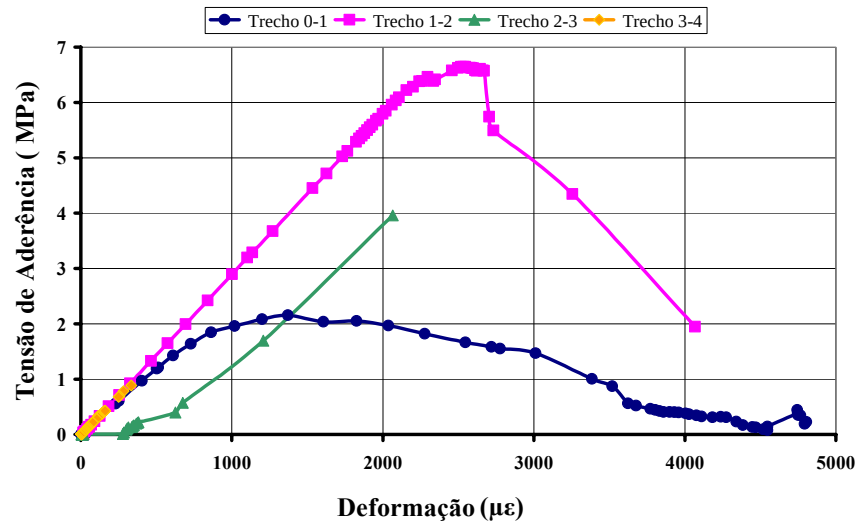


Figura 4.23 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L50-R35-1.

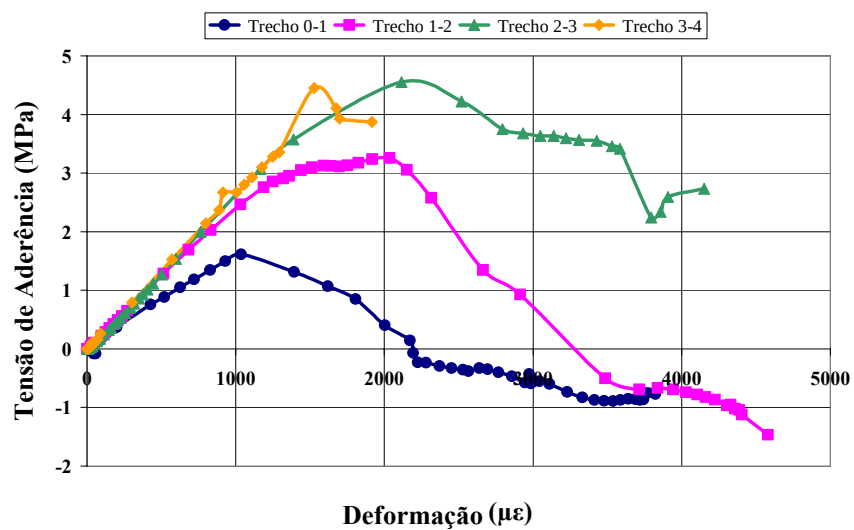


Figura 4.24 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L50-R35-2.

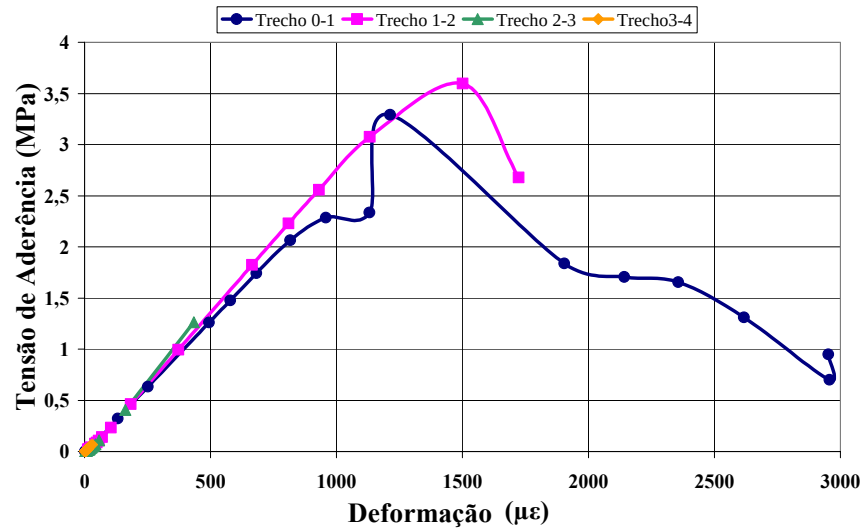


Figura 4.25 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L50-R45-1.

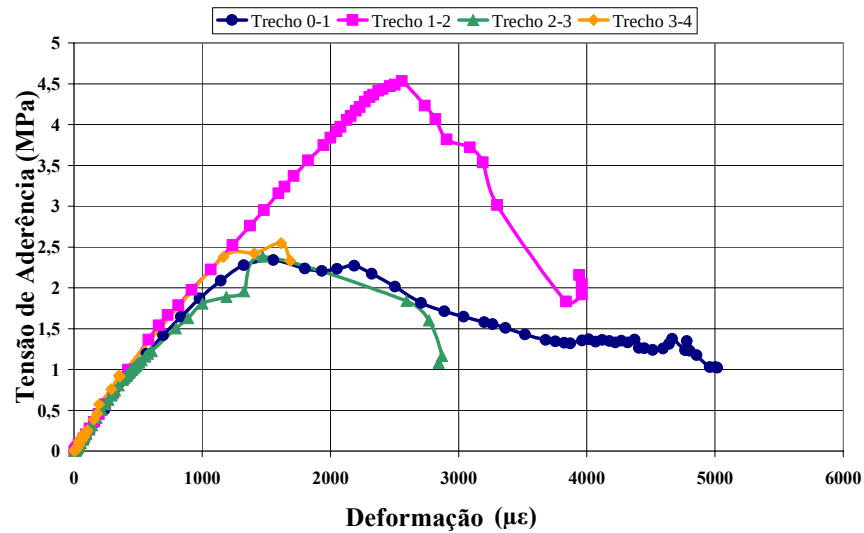


Figura 4.26 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L50-R45-2.

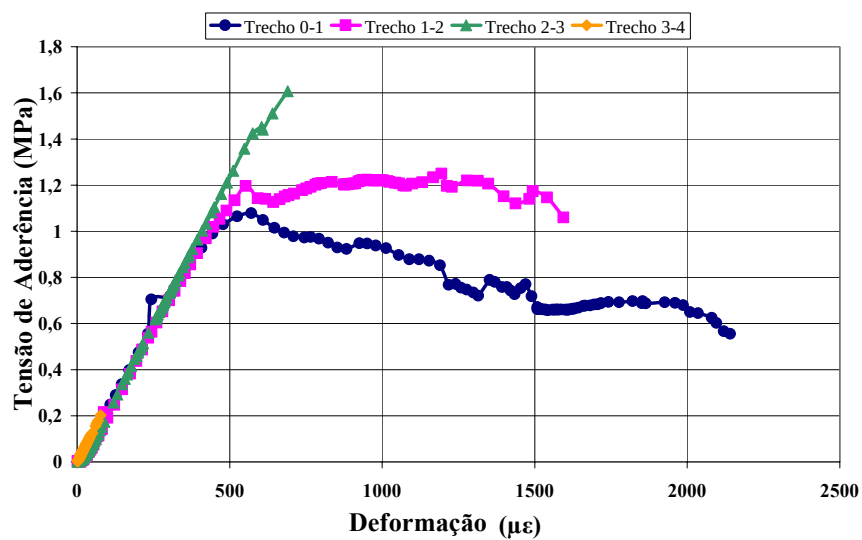


Figura 4.27 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L100-R25.

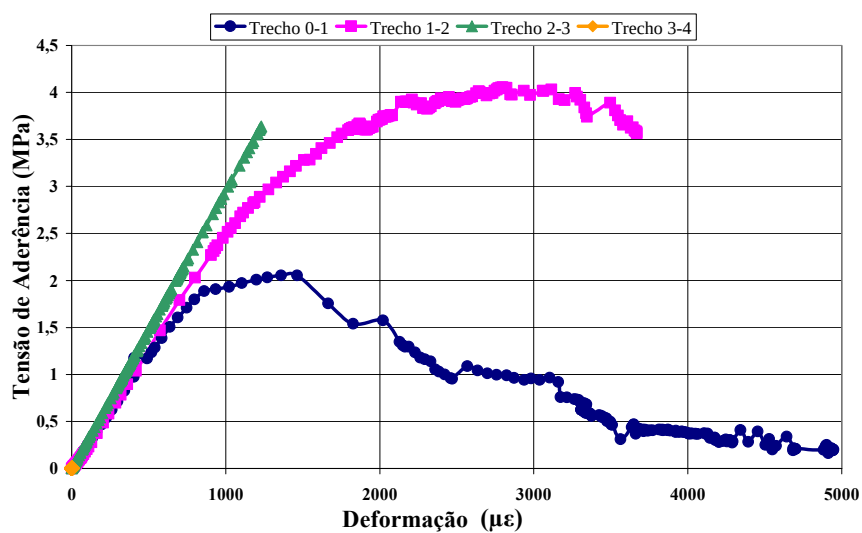


Figura 4.28 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L100-R35.

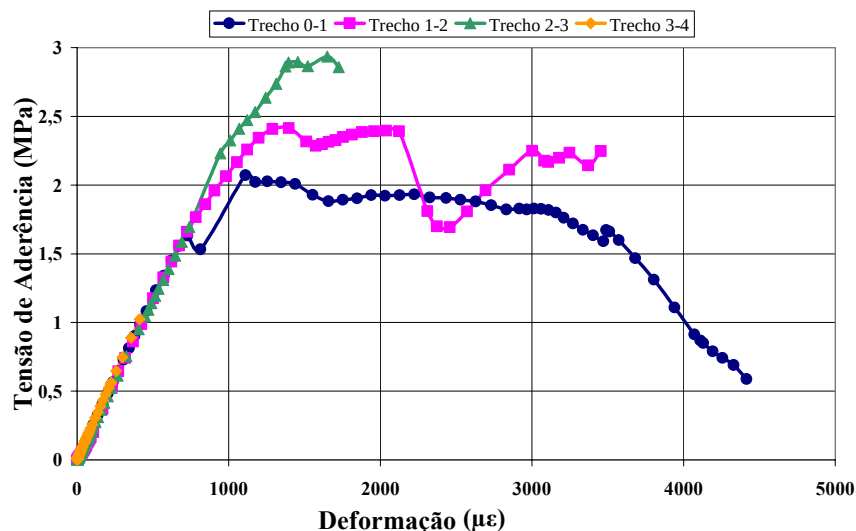


Figura 4.29 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L100-R45.

Os corpos-de-prova do grupo A, ou seja, L50-R25-1 e L50-R25-2, apresentaram maiores tensões de aderência no trecho 0-1. Nos corpos-de-prova L50-R35-1, L50-R45-1 e L50-R45-2, as maiores tensões de aderência ocorreram no trecho 1-2. Somente no corpo-de-prova L50-R35-2, as maiores tensões de aderência ocorreram no trecho 2-3.

Nos corpos-de-prova do grupo B, ou seja, L100-R25 e L100-R45 as maiores tensões de aderência ocorreram no trecho 2-3, e no corpo-de-prova L100-R35, as maiores tensões de aderência ocorreram no trecho 1-2.

As maiores deformações ocorreram no trecho 0-1, com exceção do corpo-de-prova L50-R35-2, onde essas foram maiores no trecho 1-2.

As menores tensões de aderência e deformações ocorreram no trecho 3-4, com exceção do corpo-de-prova L50-R35-2.

O corpo-de-prova L50-R35-2 apresentou, em alguns de seus trechos, valores negativos para as tensões de aderência, porque as deformações nos extensômetros posteriores foram maiores que as deformações nos extensômetros anteriores. Este fato não tem explicação plausível, pois os canais dos extensômetros foram corretamente ligados.

As Figuras 4.30 a 4.37 mostram as curvas tensão de aderência x deformação do CFC para cada trecho, comparando cada grupo de corpos-de-prova.

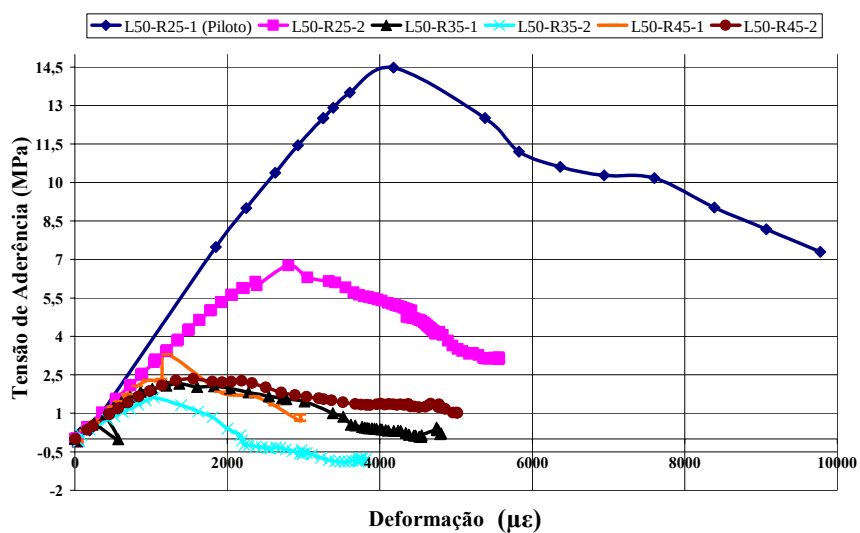


Figura 4.30 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo A referente ao trecho 0-1.

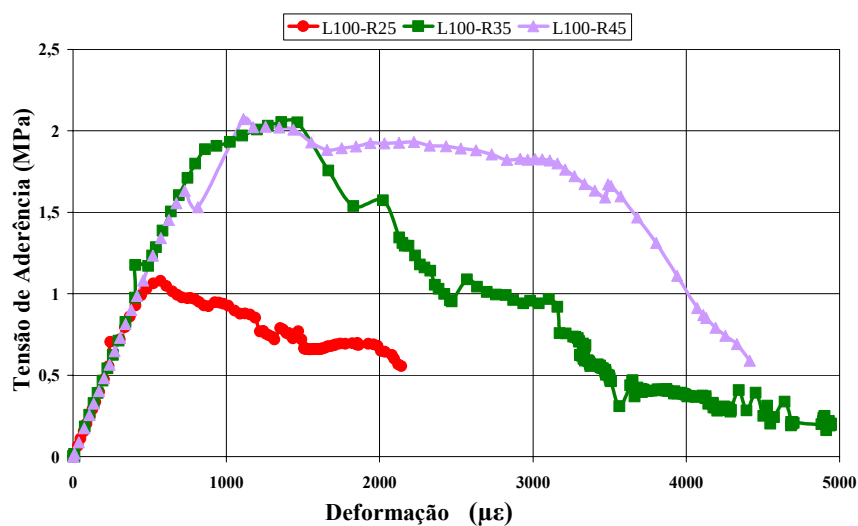


Figura 4.31 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo B referente ao trecho 0-1.

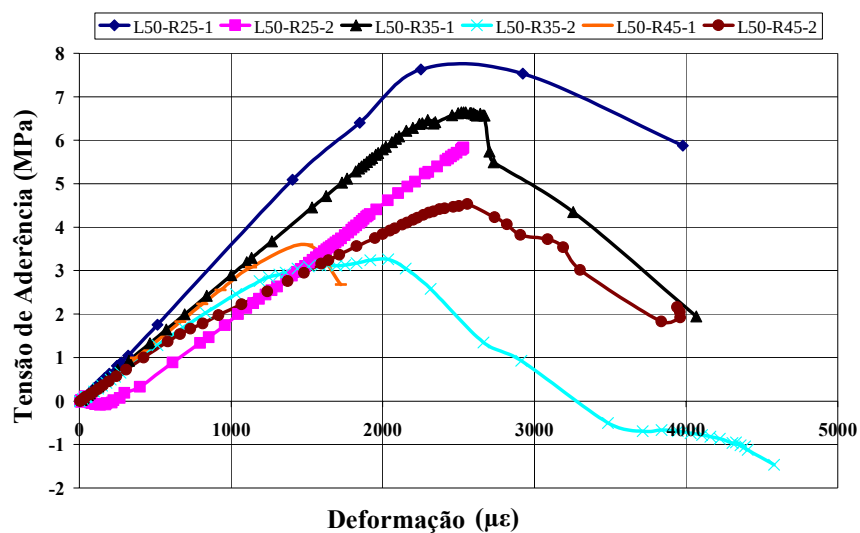


Figura 4.32 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo A referente ao trecho 1-2.

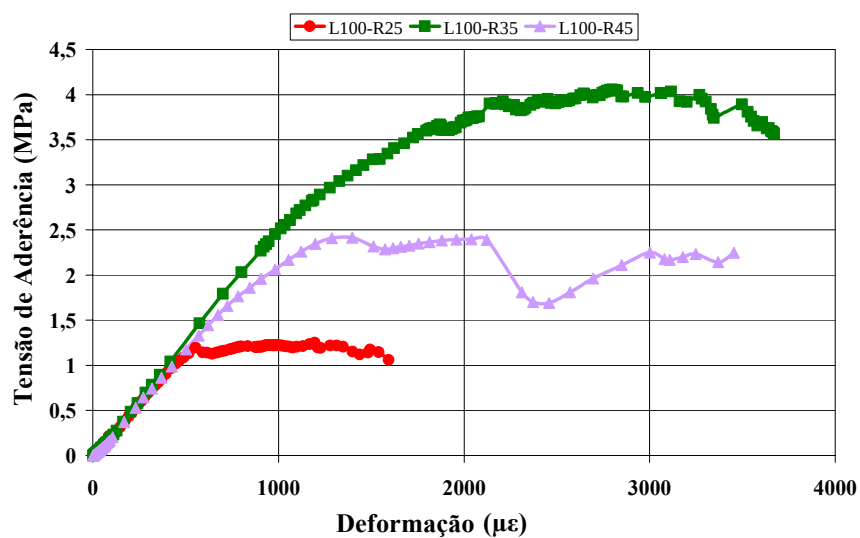


Figura 4.33 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo B referente ao trecho 1-2.

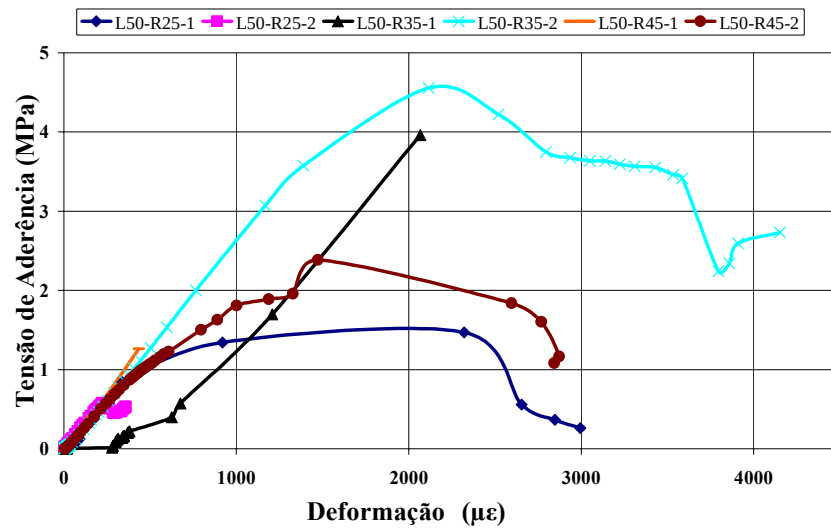


Figura 4.34 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo A referente ao trecho 2-3.

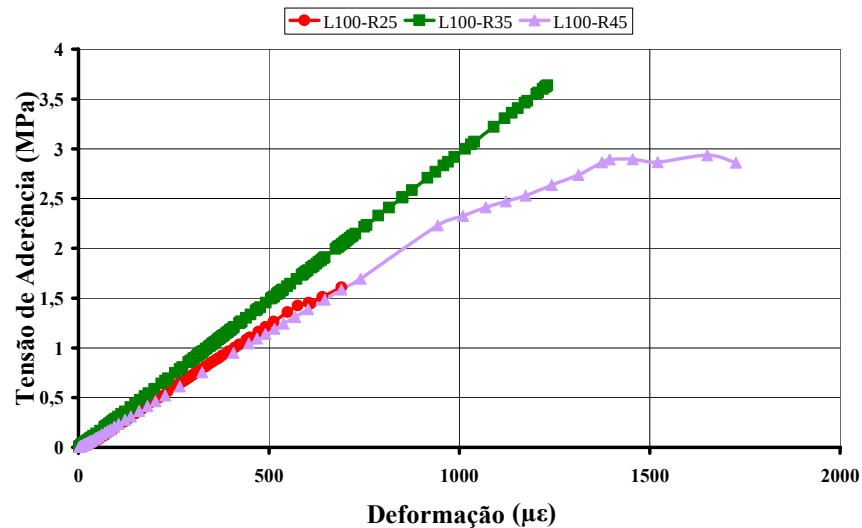


Figura 4.35 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo B referente ao trecho 2-3.

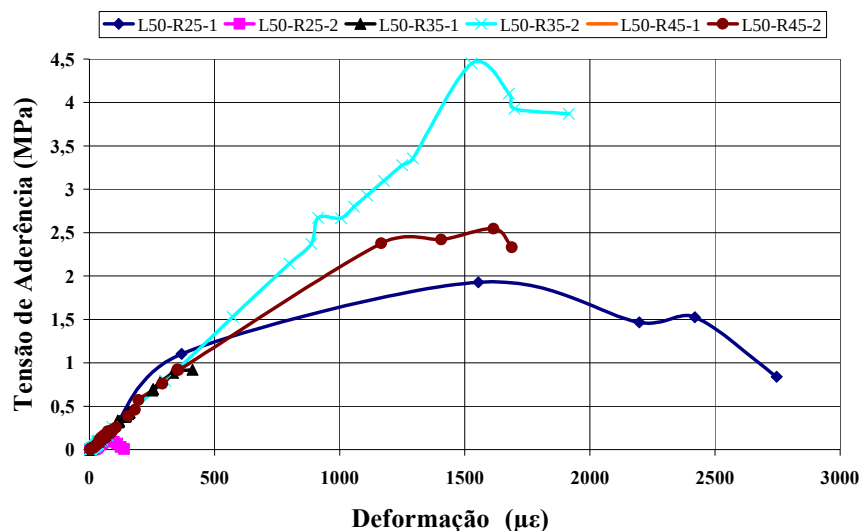


Figura 4.36 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo A referente ao trecho 3-4.

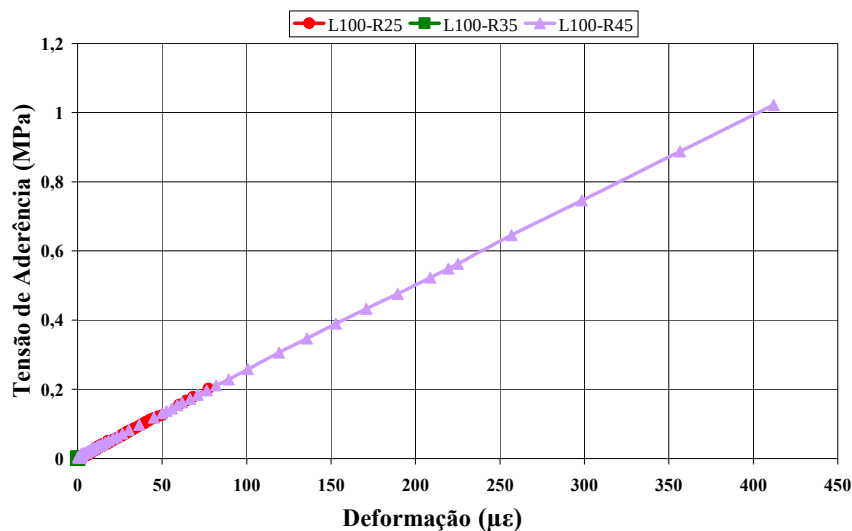


Figura 4.37 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo B referente ao trecho 3-4.

Os corpos-de-prova L50-R25-2 e L50-R35-1, nos trechos 2-3 e 3-4 e todos os corpos-de-prova do grupo B no trecho 3-4, não apresentaram deformações significativas.

No trecho 0-1, os corpos-de-prova L50-R25-1 e L50-R25-2 apresentaram curvas $\tau_b \times \varepsilon_f$ similares mas com valores distintos para as tensões de aderência e deformações. Os demais corpos-de-prova do grupo A, também no trecho 0-1, apresentaram curvas similares com valores para as tensões de aderência e deformações da mesma magnitude (Figura 4.30).

Os corpos-de-prova L50-R25-1 e L50-R45-2 apresentaram curvas similares no trecho 2-3 (Figura 4.34).

Os corpos-de-prova do grupo B e os corpos-de-prova do grupo A, nos demais trechos não apresentaram curvas com aspecto regular.

4.5

Tensões de Aderência ao Longo do Comprimento de Ancoragem

Neste item são analisadas as tensões de aderência ao longo de todo o comprimento de ancoragem do CFC para alguns estágios de carregamento (Figuras 4.38 a 4.45).

O corpo-de-prova L50-R25-1/piloto foi descartado, pois este apresentou resultados discrepantes em relação aos outros provavelmente devido ao fato de que sua execução foi interrompida na metade do carregamento (falta de energia), podendo ter ocorrido descolamento do tecido já nesta fase, resultando em valores de deformações muito altos (vide Figuras 4.12 e 4.21).

Os extensômetros 0,1,2,3 e 4 estão posicionados nas abscissas 6 mm, 40,5 mm, 75 mm, 109,5 mm e 144 mm e as tensões de aderência (calculadas pela equação 4.1) estão representadas no ponto médio entre dois extensômetros consecutivos.

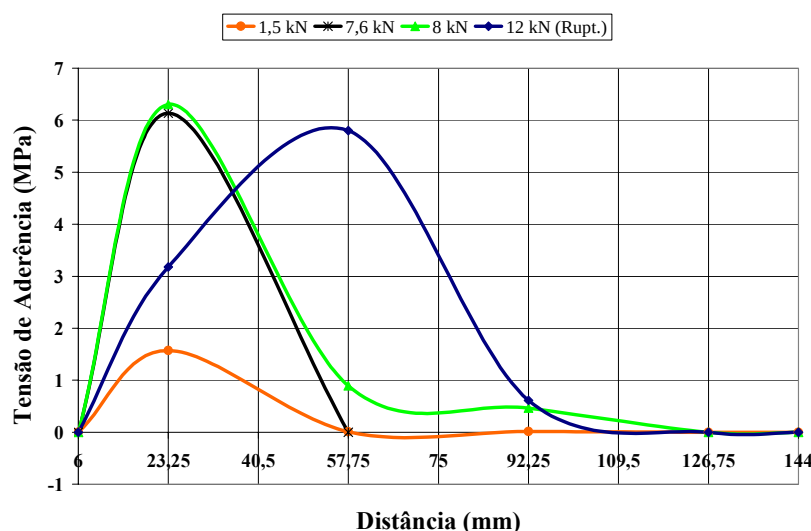


Figura 4.38 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R25-2.

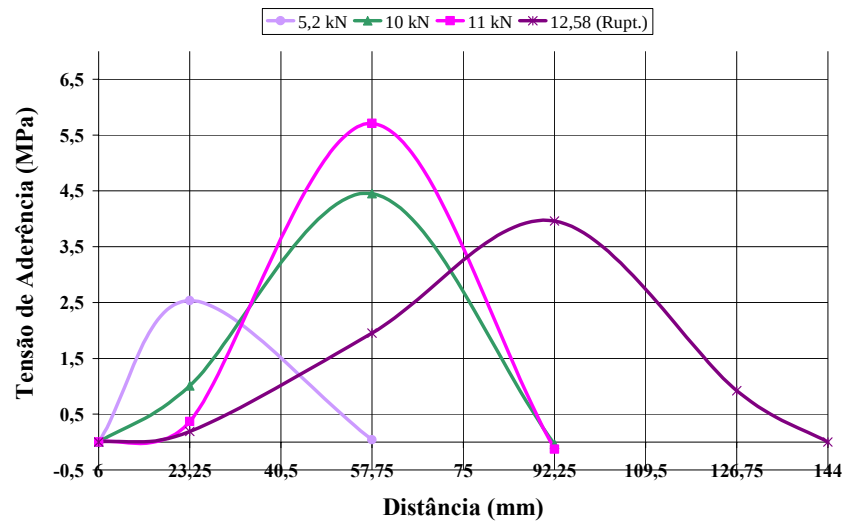


Figura 4.39 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R35-1.

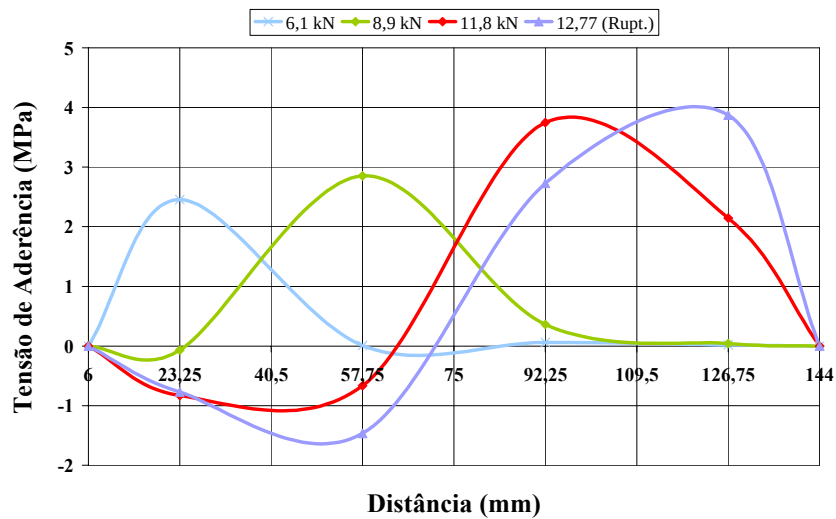


Figura 4.40 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R35-2.

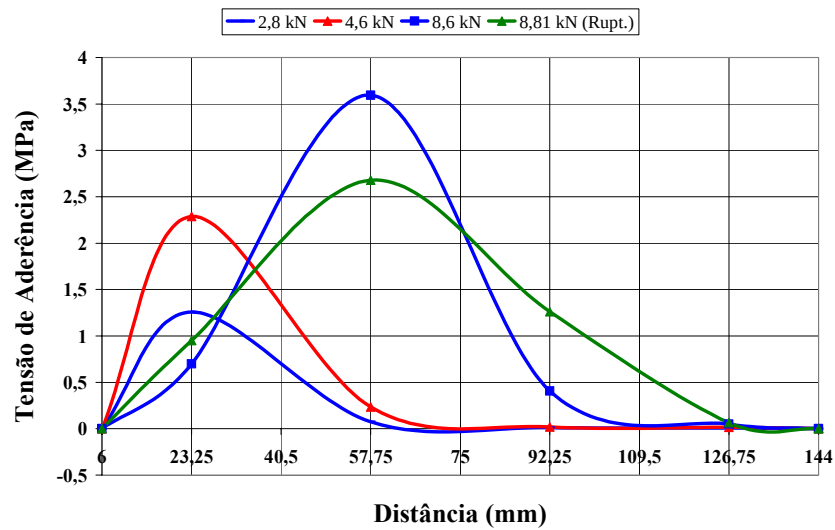


Figura 4.41 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R45-1.

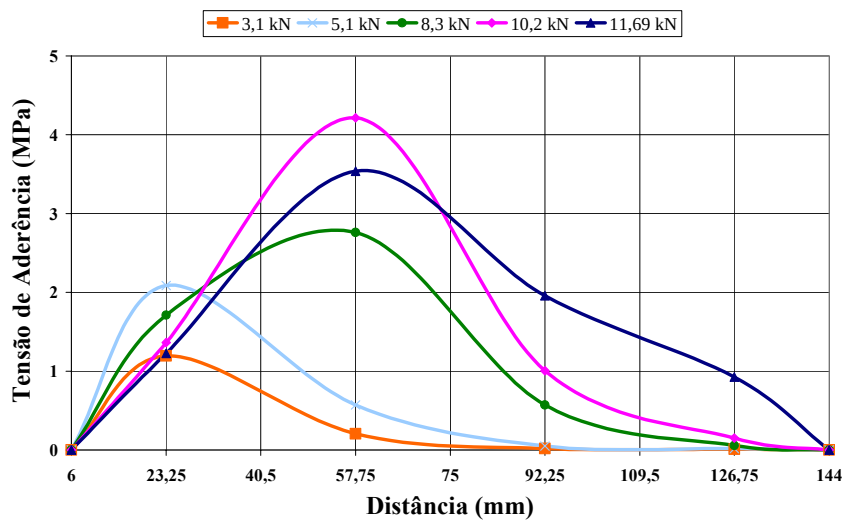


Figura 4.42 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R45-2.

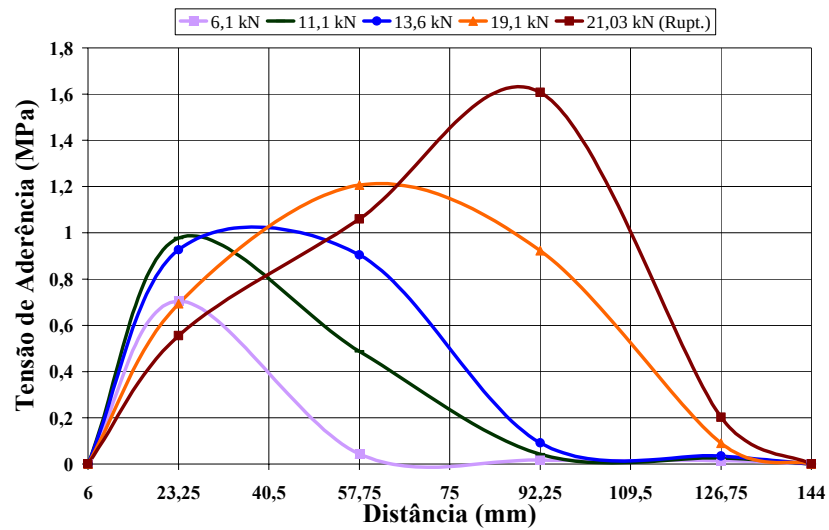


Figura 4.43 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L100-R25.

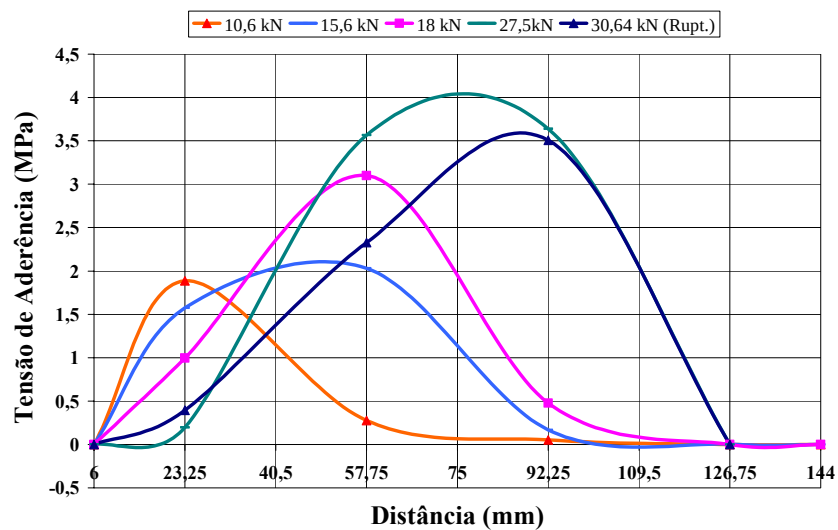


Figura 4.44 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R35.

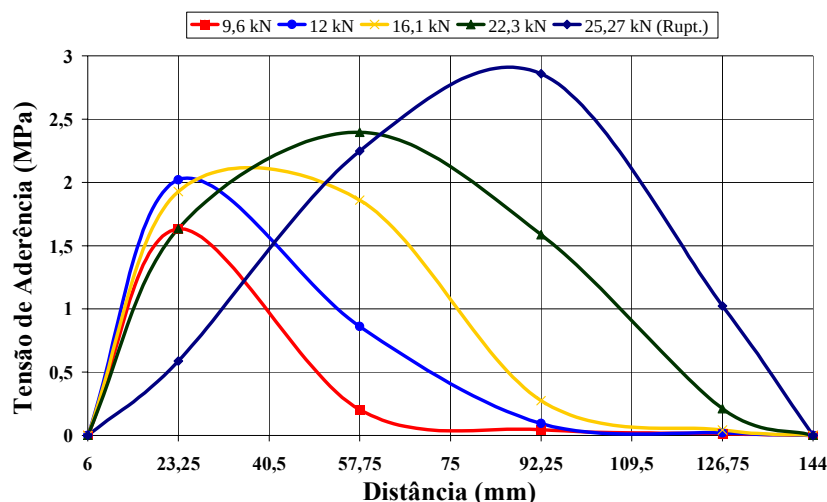


Figura 4.45 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L100-R45.

Em termos gerais, as tensões de aderência, apresentaram um comportamento típico, no qual, com o aumento do carregamento, estas tensões aumentaram e os pontos de tensão máxima se deslocaram ao longo do comprimento de ancoragem do tecido.

Analisando-se as curvas tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem, conclui-se que há um comprimento de ancoragem efetivo no qual as tensões de aderência estão realmente distribuídas. O valor deste comprimento foi de 120 mm (média dos comprimentos de ancoragem efetivos de cada corpo-de-prova válido). Este comprimento foi obtido observando-se nos gráficos para cada corpo-de-prova válido até que ponto havia valores de tensões de aderência significativos.

Na adoção do comprimento de ancoragem efetivo e nas análises posteriores, não foram considerados os seguintes corpos-de-prova: L50-R25-1, pelo motivo citado anteriormente, o L50-R35-2, por apresentar comportamento anômalo para cargas próximas à de ruptura (Figuras 4.15 e 4.40) e o L100-R25 (Figuras 4.18 e 4.43) no qual foram observadas tensões de aderências e deformações muito baixas em relação aos outros corpos-de-prova.

A Tabela 4.3 e a Figura 4.46 mostram uma comparação entre as cargas aplicadas nos corpos-de-prova e as cargas calculadas pela integral da curva tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem. Foram obtidos

valores muito próximos entre as cargas aplicadas e as calculadas, o que mostra a consistência dos resultados e a validade dos ensaios.

Tabela 4.3 – Comparação entre as cargas aplicadas e as cargas dadas pela curva tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem.

<i>Grupos</i>	<i>Corpos-de-Prova</i>	<i>F_u (aplicada) (kN)</i>	<i>F_u (curvas) (kN)</i>
A	L50-R25-1*	-	-
	L50-R25-2	12,00	14,95
	L50-R35-1	12,58	12,41
	L50-R35-2*	-	-
	L50-R45-1	8,81	8,60
	L50-R45-2	11,69	11,78
B	L100-R25*	-	-
	L100-R35	30,64	28,60
	L100-R45	25,27	22,48

*Corpos-de-prova descartados na análise.

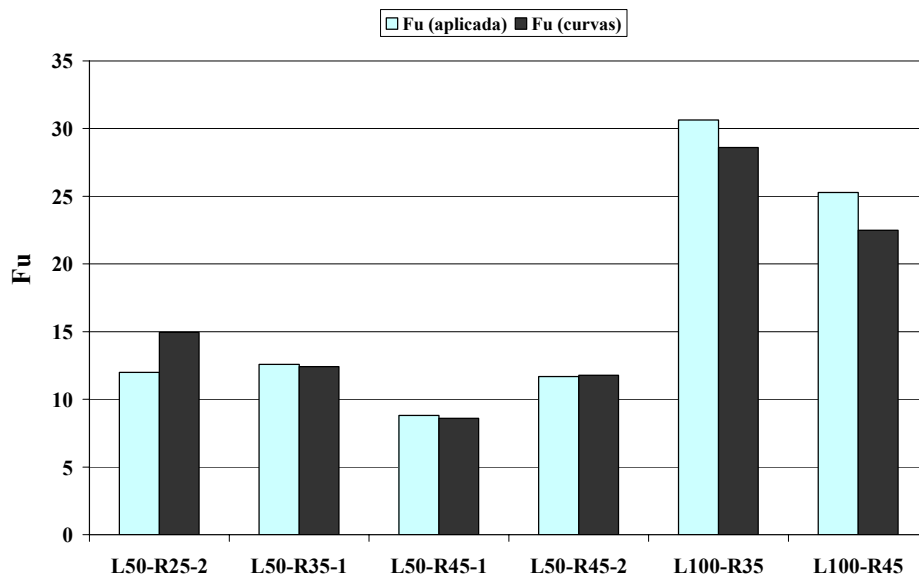


Figura 4.46 – Gráfico comparativo entre as cargas aplicadas e as calculadas.

4.6 Tensões Últimas de Aderência

As tensões últimas de aderência são tensões ao longo da área do tecido colada ao concreto (considerando-se o comprimento de ancoragem efetivo) e podem ser calculadas pela equação 4.1, por meio da média ponderada das tensões últimas calculadas em todos os trechos do comprimento de ancoragem efetivo, e pela seguinte expressão:

$$\tau_{bu} = \frac{F_u}{\ell_{b,efet} \cdot b_f} \quad (4.2)$$

onde

F_u – carga última;

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

b_f – largura do CFC.

A Tabela 4.4 mostra uma análise estatística das tensões últimas de aderência (calculadas pelas equações 4.1 e 4.2) dos corpos-de-prova considerados para a verificação da influência da largura do tecido.

Tabela 4.4 – Análise estatística das tensões últimas de aderência dos corpos-de-prova considerados para a verificação da influência da largura do tecido.

<i>Grupo</i>	<i>Corpos-de-Prova</i>	<i>Tensões Últimas de Aderência τ_{bu} (MPa)</i>	
		<i>Equação 4.1</i>	<i>Equação 4.2</i>
A	L50-R25-1*	-	-
	L50-R25-2	2,85	2,00
	L50-R35-1	1,85	2,10
	L50-R35-2*	-	-
	L50-R45-1	1,42	1,47
	L50-R45-2	1,48	1,95
B	L100-R25*	-	-
	L100-R35	2,13	2,55
	L100-R45	1,78	2,11
Média		1,92	2,03
Desvio Padrão (s)		0,52	0,35
Coefficiente de Variação (CV) (%)		27,4	17,2

*Corpos-de-prova descartados na análise.

Os valores das tensões últimas de aderência calculadas pela equação 4.1 apresentam $s = 0,52$ e $CV = 27,4\%$. Esses altos índices de dispersão foram,

provavelmente, devido ao posicionamento inadequado dos extensômetros ou instrumentação insuficiente no tecido.

Os valores das tensões últimas de aderência calculadas pela equação 4.2, considerando-se todos os corpos-de-prova, apresentam $s = 0,35$ e $CV = 17,2\%$. O valor do CV apresenta baixa dispersão, pois é menor do que 20%, portanto, é um valor aceitável.

As Figuras 4.47 e 4.48 mostram que as tensões últimas de aderência não dependem da largura do tecido, tanto para as tensões calculadas pela equação 4.1, quanto para as calculadas pela equação 4.2.

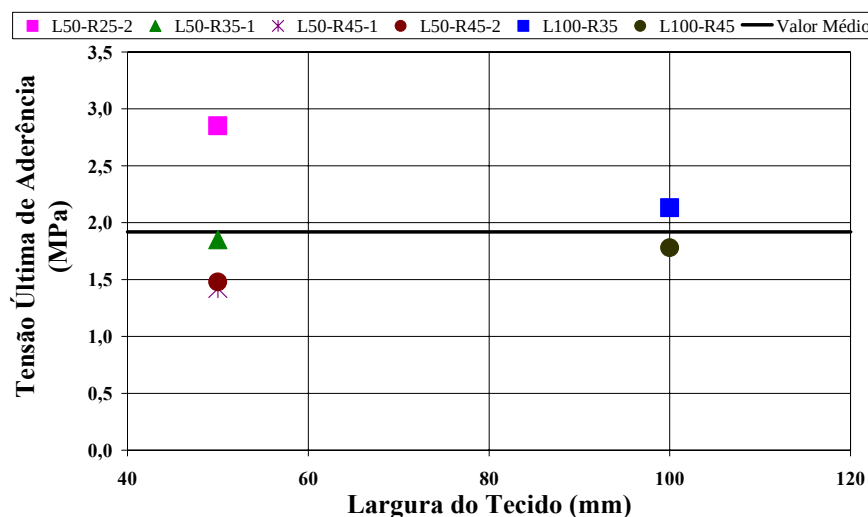


Figura 4.47 – Tensão última de aderência (equação 4.1) x largura do tecido.

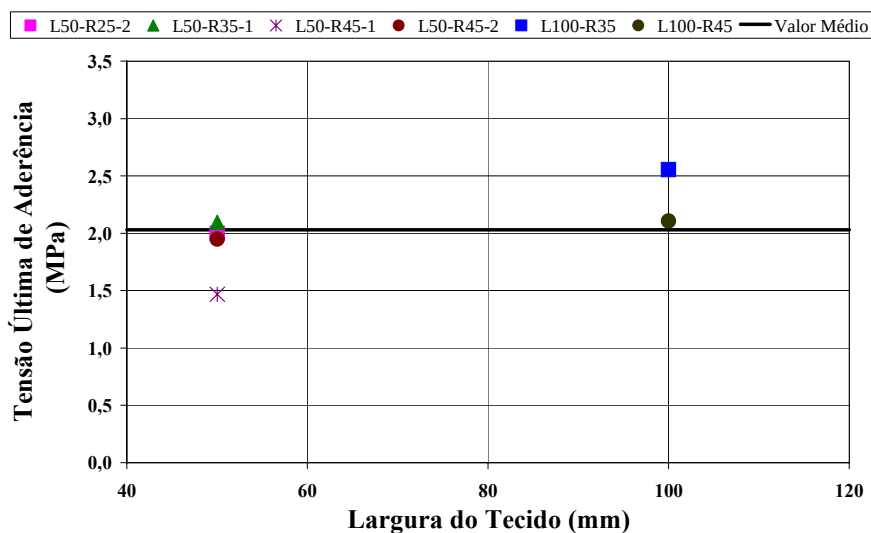


Figura 4.48 – Tensão última de aderência (equação 4.2) x largura do tecido.

A Tabela 4.5 mostra uma análise estatística das tensões últimas de aderência (calculadas pelas equações 4.1 e 4.2) dos corpos-de-prova considerados para a verificação da resistência do concreto. Para esta verificação, foram descartados, além dos corpos-de-prova citados anteriormente (L50-R25-1, L50-R35-2 e L100-R25), o corpo-de-prova L100-R35 que apresentou ruptura do tecido.

Tabela 4.5 – Análise estatística das tensões últimas de aderência dos corpos-de-prova considerados para a verificação da influência da resistência do concreto.

<i>Grupo</i>	<i>Corpos-de-Prova</i>	<i>Tensões Últimas de Aderência τ_{bu} (MPa)</i>	
		<i>Equação 4.1</i>	<i>Equação 4.2</i>
A	L50-R25-1*	-	-
	L50-R25-2	2,85	2,00
	L50-R35-1	1,85	2,10
	L50-R35-2*	-	-
	L50-R45-1	1,42	1,47
	L50-R45-2	1,48	1,95
B	L100-R25*	-	-
	L100-R35	-	-
	L100-R45	1,78	2,11
Média		1,88	1,92
Desvio Padrão (s)		0,58	0,26
Coefficiente de Variação (CV) (%)		30,7	13,7

*Corpos-de-prova descartados na análise.

Os valores das tensões últimas de aderência calculadas pela equação 4.1 apresentam $s = 0,58$ e $CV = 30,7\%$. O valor do índice de dispersão CV é considerado alto.

Os valores das tensões últimas de aderência calculadas pela equação 4.2 apresentam $s = 0,26$ e $CV = 13,7\%$. O valor do CV apresenta baixa dispersão, pois é menor do que 20%, portanto, é um valor aceitável.

As Figuras 4.49 e 4.50 mostram que as tensões últimas de aderência não dependem da resistência do concreto, tanto para as tensões obtidas pela equação 4.1, quanto para as obtidas pela equação 4.2.

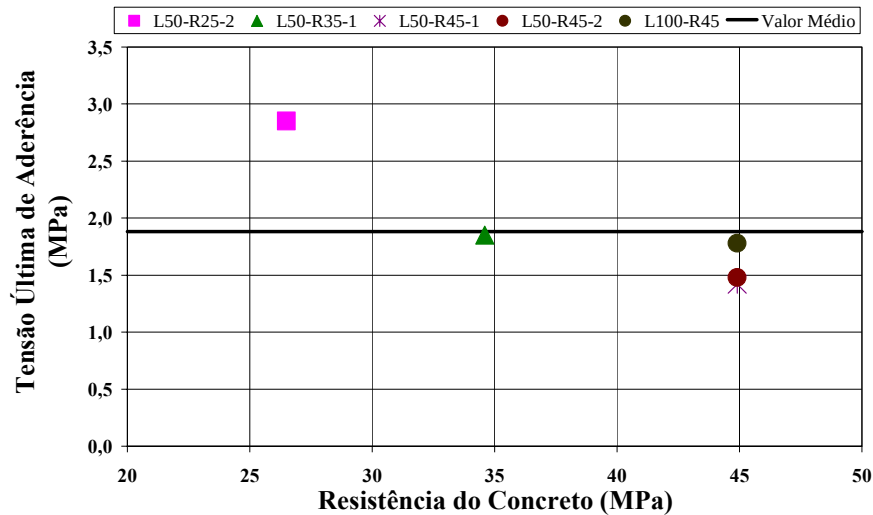


Figura 4.49 – Tensão última aderência (equação 4.1) x resistência do concreto.

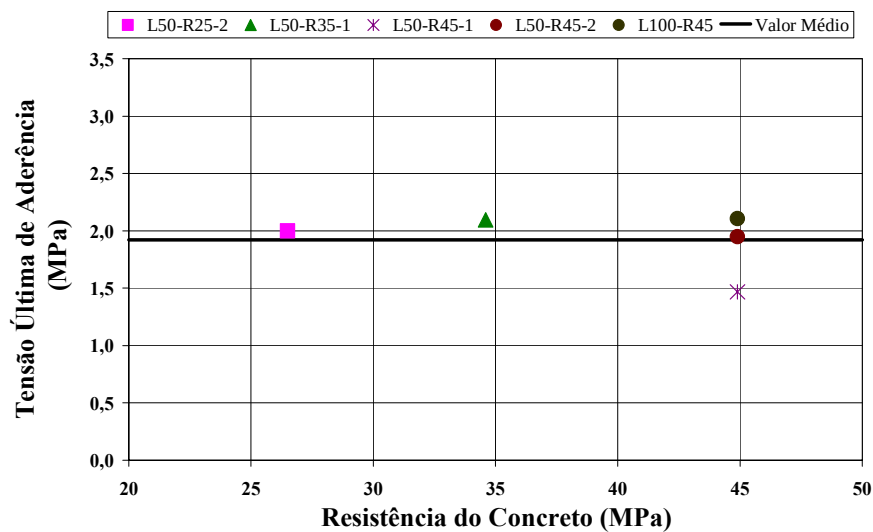


Figura 4.50 – Tensão última de aderência (equação 4.2.) x resistência do concreto.

Considerando-se as verificações das influências da largura do tecido e da resistência do concreto (Tabelas 4.4 e 4.5) nas tensões últimas de aderência, adota-se para o cálculo em projeto, um valor inicial da tensão de aderência característica dada pela seguinte expressão:

$$\tau_{bk} = \tau_{bu,m} - 1,65s \quad (4.3)$$

onde

$\tau_{bu,m}$ – valor médio das tensões últimas de aderência calculadas pelas equações

4.1 e 4.2;

s – desvio padrão.

Tabela 4.6 – Tensão de aderência característica.

Variáveis	$\tau_{bu,m}$ (MPa)		Desvio Padrão (s)		Tensão de Aderência Característica τ_{bk} (MPa)	
	Equação 4.1	Equação 4.2	Equação 4.1	Equação 4.2	Equação 4.1	Equação 4.2
Largura do Tecido (b_f)	1,92	2,03	0,52	0,35	1,06	1,45
Resistência do Concreto (f_c)	1,88	1,92	0,58	0,26	0,92	1,49

O valor recomendado para a tensão de aderência característica é 1,45 MPa, considerando-se as tensões calculadas pela equação 4.2 (menor valor a favor da segurança), pois estas apresentaram menores índices de dispersão. Salienta-se que é necessária a realização de mais ensaios para que esse valor seja confirmado.

4.7

Fator de Efetividade das Tensões no CFC

O fator de efetividade das tensões no CFC foi calculado como sendo a razão entre os valores das tensões últimas de tração no CFC obtidas no ensaio de aderência, e as resistências obtidas em ensaios de tração direta realizados em corpos-de-prova de CFC como descrito no item 3.2.2.1. As Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 e a Figura 4.51 mostram os valores do fator de efetividade.

Tabela 4.7 – Fator de efetividade das tensões no CFC para os corpos-de-prova do grupo A.

Corpos-de-Prova	Fator de Efetividade
L50-R25-1*	-

L50-R25-2	0,50
L50-R35-1	0,52
L50-R35-2*	-
L50-R45-1	0,37
L50-R45-2	0,49
Média	0,47
Desvio Padrão (s)	0,07
Coefficiente de Variação (CV) (%)	14,9

*Corpos-de-prova descartados na análise.

Tabela 4.8 – Fator de efetividade das tensões no CFC para os corpos-de-prova do grupo B.

<i>Corpos-de-Prova</i>	<i>Fator de Efetividade</i>
L100-R25*	-
L100-R35	0,64
L100-R45	0,53
Média	0,58
Desvio Padrão (s)	0,08
Coefficiente de Variação (CV) (%)	13,6

*Corpo-de-prova descartados na análise.

Tabela 4.9 – Fator de efetividade das tensões no CFC para todos os corpos-de-prova.

<i>Corpos-de-Prova</i>	<i>Fator de Efetividade</i>
L50-R25-1*	-
L50-R25-2	0,50
L50-R35-1	0,52
L50-R35-2*	-
L50-R45-1	0,37
L50-R45-2	0,49
L100-R25*	-
L100-R35	0,64
L100-R45	0,53
Média	0,51
Desvio Padrão (s)	0,09
Coefficiente de Variação (CV) (%)	17,2

*Corpos-de-prova descartados na análise.

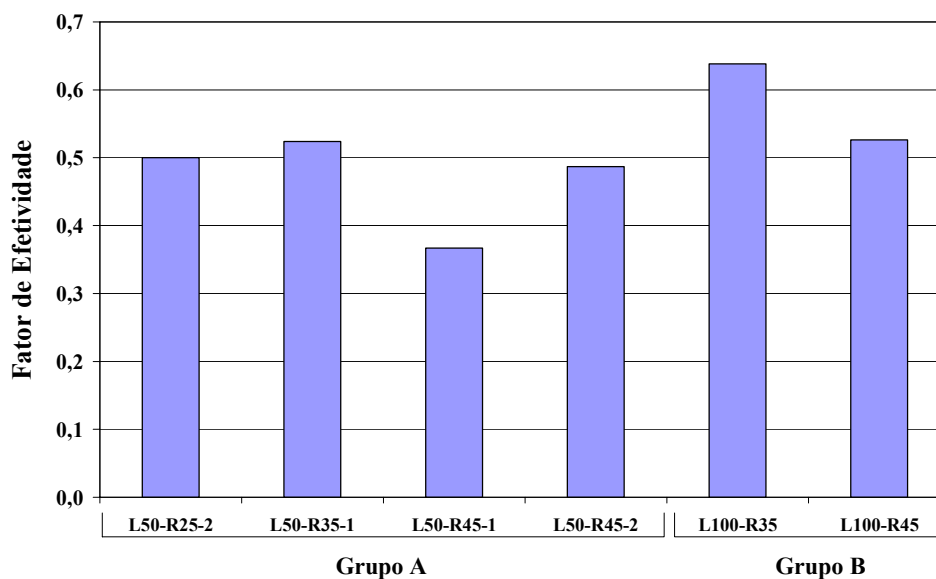


Figura 4.51 – Fator de efetividade das tensões no CFC para todos os corpos-de-prova.

O valor médio do coeficiente de efetividade dos corpos-de-prova do grupo B foi 23,4% maior que os do grupo A.

Os valores do fator de efetividade das tensões no CFC considerando-se todos os corpos-de-prova apresentam $s = 0,09$ e $CV = 17,2$. Analisando-se somente os corpos-de-prova do grupo A, os valores do fator de efetividade apresentam $s = 0,07$ e $CV = 14,9\%$. Os corpos-de-prova do grupo B apresentam $s = 0,08$ e $CV = 13,6\%$, portanto, quando analisados separadamente, este grupo apresenta menor dispersão, mas, em geral, os valores do CV para os dois grupos apresentam baixa dispersão, pois são menores que 20%, portanto são valores aceitáveis.

4.8

Tensões de Aderência x Deslocamento Relativo entre o CFC e o Concreto

As tensões de aderência foram calculadas utilizando-se a equação 4.1 descrita no item 4.4. Os deslocamentos relativos foram calculados utilizando-se a seguinte expressão:

$$s = \delta_f + \delta_c \quad (4.4)$$

$$\delta_f = \frac{\varepsilon_{f,i} - \varepsilon_{f,i-1}}{2} \ell_0 \quad (4.5)$$

$$\delta_c = \frac{\varepsilon_{c,i} - \varepsilon_{c,i-1}}{2} \ell_0 \quad (4.6)$$

sendo

δ_f – deslocamento do CFC;

δ_c – deslocamento do concreto;

ℓ_0 – distância entre os pontos onde são obtidas as medidas de deformações específicas.

Considerou-se um deslocamento no concreto na seção ao longo do comprimento de ancoragem (extensômetros 5 e 6) e um deslocamento no tecido considerando-se os extensômetros das duas extremidades do comprimento de ancoragem, para diversas cargas (extensômetros 0 e 4) como mostra a Figura 4.52.

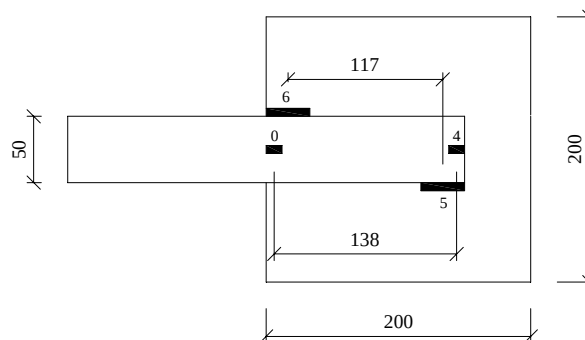


Figura 4.52 – Posicionamento dos extensômetros para o cálculo dos deslocamentos relativos entre o CFC e o concreto.

Como os corpos-de-prova do grupo B não tiveram o extensômetro 5 do concreto, a deformação neste foi considerada zero para o cálculo do deslocamento no concreto.

As Figuras 4.53 e 4.54 mostram curvas tensão de aderência x deslocamento relativo entre o CFC e o concreto.

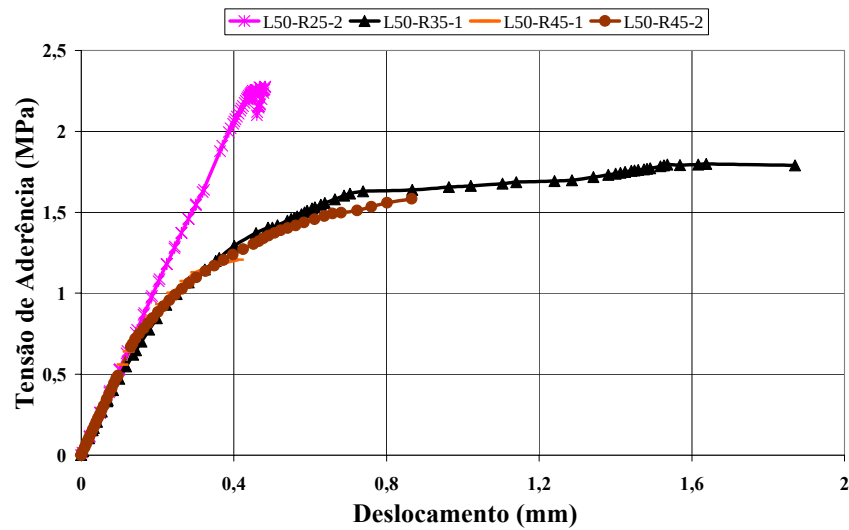


Figura 4.53 – Curva tensão de aderência x deslocamento para os corpos-de-prova do grupo A.

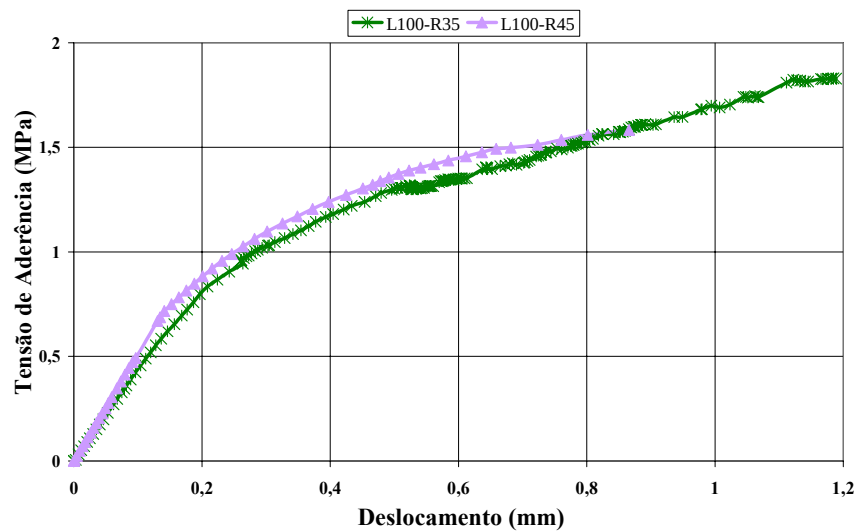


Figura 4.54 – Curva tensão de aderência x deslocamento para os corpos-de-prova do grupo B.

Os corpos-de-prova do grupo B tiveram curvas tensão de aderência x deslocamento mais regulares que os corpos-de-prova do grupo A.

5

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

5.1

Conclusões

Este programa experimental estudou alguns parâmetros, como a resistência à compressão do concreto e a 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 as mesmas características geométricas, com três resistências à compressão e duas largura do tecido diferentes.

O comportamento estrutural dos corpos-de-prova colados com tecido de fibra de carbono é afetado por muitas variáveis, porém, o principal interesse deste estudo foi a avaliação da aderência por meio da análise de curvas deformações do CFC x distância ao longo do comprimento de ancoragem, tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem, tensão de aderência x deformação do CFC e tensão de aderência x deslocamento relativo entre o CFC e o concreto.

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

- Há um comprimento de ancoragem efetivo no qual as tensões de aderência estão realmente distribuídas. O valor deste comprimento para estes ensaios foi de 120 *mm*.
- As equações 4.1 e 4.2, utilizadas para o cálculo das tensões últimas de aderência (tensões médias ao longo da área do tecido colado ao concreto), podem ser adotadas e comparadas, pois apresentaram valores para essas tensões consistentes e muito próximos, tanto para a análise feita para a verificação da influência da largura do tecido, quanto para a análise da verificação da resistência do concreto.

- A largura do tecido não influencia as tensões últimas de aderência, tanto para as resistências calculadas pela equação 4.1, quanto para as calculadas pela equação 4.2.
- As tensões últimas de aderência não dependem da resistência do concreto, no intervalo estudado, tanto para as tensões calculadas pela equação 4.1, quanto para as calculadas pela equação 4.2.
- O valor característico da tensão última de aderência obtida neste trabalho foi de $\tau_{bk} = 1,45 \text{ MPa}$. Ressaltando-se a necessidade de novos ensaios para corroborar esse valor proposto.

5.2

Sugestão para Trabalhos Futuros

São sugeridos os seguintes estudos:

- Estudar a aderência utilizando-se camadas de tecidos inclinadas com ângulo de inclinação maior que 10° .
- Realizar o mesmo ensaio de tração-compressão utilizando-se duas e três camadas de tecido. A aderência rege todos os modelos de análise e dimensionamento (flexão, força cortante, torção). Aumentar as camadas apenas eleva a força, mas a área para cálculo da tensão de aderência continua a mesma, pois depende apenas da área de colagem.
- Realizar o mesmo ensaio de tração-compressão utilizando-se uma camada de tecido com carregamento abrupto (carregamento de impacto).
- Realizar o mesmo ensaio de tração-compressão utilizando-se uma camada de tecido com carga e descarga (carregamento cíclico).

- Utilizar diversos tipos de adesivo para a colagem do tecido ao concreto.
- Realizar tratamentos na superfície de concreto tais como escarificação, para verificar o comportamento da tensão de aderência.
- Recomenda-se a realização do ensaio de tração-tração com os mesmos parâmetros do ensaio de tração-compressão, para permitir uma melhor avaliação da aderência, comparando-se os resultados obtidos nos dois ensaios.
- Utilizar, além das larguras do tecido iguais a 5cm e 10cm, larguras de 7,5cm e 15cm.
- Realizar novos ensaios usando-se a metodologia empregada neste trabalho para diminuir algumas dúvidas, e validar os valores propostos para a tensão de aderência.

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.

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.

[A] ARAÚJO, A. C. N. **Estudo experimental do reforço à flexão de vigas de concreto armado utilizando compósitos com tecidos de fibras de carbono.** Dissertação de Mestrado, 163p. Puc-Rio, Rio de Janeiro, 2002.

[B] ARAÚJO, C. M. **Reforço de vigas de concreto à flexão e ao cisalhamento com tecidos de fibra de carbono.** Dissertação de Mestrado, 153p. COPPE/UFRJ, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 5738: **Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto.** Rio de Janeiro, 1994.

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

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 6118: **Projeto de estruturas de concreto – procedimentos.** Rio de Janeiro, 2003.

BEBER, A. J.; CAMPOS FILHO, A.; CAMPAGNOLO, J. L. **Reforço de estruturas de concreto com tecidos de fibra de carbono**. XXIX Jornadas Sudamericanas Ingenieria Estructural. CD-ROM. Uruguay, 2000.

BEBER, A.J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**; Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre, 2003.

CARRAZEDO, R. **Mecanismos de confinamento e suas implicações no reforço de pilares de concreto por encamisamento com compósitos de fibras de carbono**. Dissertação de Mestrado, 163p. USP, São Carlos, 2002.

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.

EL-REFAIE, S.A.; ASHOUR, A.F. e GARRITY, S.W. **Flexural strength of continuous reinforced concrete beams with externally bonded carbon fiber – reinforced polymer reinforcement**: Repair, rehabilitation and maintenance of concrete structures and innovations in design and construction. Proceedings of fourth international conference. Seoul, Korea, 2000. P.959-978.

Fib. **Externally bonded FRP reinforcement for RC structures**: Bulletin 14; Lausanne, Switerzland, 2001. P. 28-58.

FIORELLI, J. **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira**. Dissertação de Mestrado, 168p. USP, São Carlos , 2002.

JANSZE, W. **Strengthening of reinforced concrete members in bending by externally bonded steel plates**. Delft University Press, The Netherlands, 1997.

KANAKUBO, T.; FURUTA, T.; FUKYAMA, H. **Bond strength between fiber – reinforced polymer laminates and concrete**. Proceedings of the sixth international conference. Cambridge, U.K., 2003. V.1. P. 133-142.

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.

LIMA, R. C. A. **Investigação dos efeitos de temperaturas elevadas em reforços estruturais com tecidos de fibra de carbono**. Dissertação de Mestrado, 140p. UFRGS, Porto Alegre, 2001.

MACHADO, M. G. **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, 2004.

MBrace. **Catálogo Eletrônico dos Produtos**; www.mbrace.com (2004).

MENEGHEL, J. M. **Aderência das chapas de fibra de carbono em elementos estruturais reforçados à flexão**. Trabalho de Iniciação Científica, 65p. UFJF, Juiz de Fora, 2002.

MILLER, B. e NANNI, A. **Bond between CFRP sheets and concrete**. **Proceeding, ASCE 5th Materials Congress**, Cincinnati, OH, 1999, P.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. P.59-62.

RHEOTEC; **Catálogo Eletrônico dos Produtos**; www.rheotec.com.br (2004).

SÁNCHEZ, E. **Notas sobre o reforço estrutural com chapas de fibras de carbono**. *Engenharia Estudo e Pesquisa*, v.4, n.1, P.67-73. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2001.

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 P. 28-39.

SÁNCHEZ, E.; BARBOSA, M.T.G.; VELASCO, M.S.L.; EINSFELD, R.A.; FERREIRA, T.V.B. **Equação diferencial da aderência entre materiais compósitos de fibra de carbono e o concreto**; Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural. CD-ROM. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina, 2004.

SÁNCHEZ, E.; MENEGHEL, J. M. **Análise dos tipos de ruptura e da tensão de aderência entre o substrato de concreto e o CFC em vigas de concreto armado reforçadas à flexão**. V Congresso de Engenharia Civil. Juiz de Fora, 2002.

TENG, J. G.; CHEN, J. F.; SMITH, S. T.; LAM, L. **Bond strength of FRP-to-concrete joints**. FRP strengthened RC structures. Great Britain: Ed. John Wiley & Sons, 2002.

Anexo A

Análise Granulométrica dos Agregados Graúdo e Miúdo

A determinação da composição granulométrica dos agregados graúdo e miúdo para concreto foi realizada de acordo com a NBR 7217. Foram determinados o módulo de finura e a dimensão máxima característica dos agregados. A quantidade de material utilizado foi de 3000 *g* de brita e 1000 *g* de areia, respectivamente.

As Tabelas A.1 e A.2 mostram os valores dos resíduos passantes e retidos nas peneiras utilizadas no ensaio para a brita e a areia:

Tabela A.1 – Valores resíduos passantes e retidos para o agregado graúdo.

Peneiras	Malha (mm)	Resíduos		Resíduo Acumulado (%)	
		(g)	(%)	Passado	Retido
• 3"	76,2				
2"	50,8				–
• 3/2"	38,1				
1"	25,4			100	–
• 3/4"	19,1	55	1,8	98,2	1,8
1/2"	12,7	2088	69,6	28,6	71,4
• 3/8"	9,52	680	22,7	5,9	94,1
1/4"	6,35				–
• 4	4,76	170	5,7	0,2	99,8
• 8	2,38				99,8
• 16	1,19				99,8
• 30	0,59				99,8
• 50	0,297				99,8
• 100	0,149				99,8
200	0,074				–
Fundo	–	7	0,2	0	
Totais		3000	100		694,7

Tabela A.2 – Valores resíduos passantes e retidos para o agregado miúdo.

<i>Peneiras</i>	<i>Malha (mm)</i>	<i>Resíduos</i>		<i>Resíduo Acumulado (%)</i>	
		<i>(g)</i>	<i>(%)</i>	<i>Passado</i>	<i>Retido</i>
• 3"	76,2				
2"	50,8				–
• 3/2"	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	34	3,4	96,6	3,4
• 8	2,38	59	5,9	90,7	9,2
• 16	1,19	138	13,8	76,9	23
• 30	0,59	411	41,1	35,8	64,1
• 50	0,297	245	24,5	11,3	88,6
• 100	0,149	92	9,2	2,1	97,8
200	0,074	17	1,7	0,4	–
Fundo	–	4	0,4	0	
Totais		1000	100		286,1

➤ Cálculo do Módulo de Finura

O cálculo do módulo de finura do agregado foi feito somando-se todas as porcentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal, e dividindo-se esta soma por 100 %.

- Agregado graúdo

$$MF = \frac{694,7}{100} = 6,95$$

- Agregado miúdo

$$MF = \frac{286}{100} = 2,86$$

➤ **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 graúdo

$$D_{máx} = 19mm$$

- Agregado miúdo

$$D_{máx} = 4,76mm$$

Anexo B

Determinação das Massas Específicas dos Agregados Graúdo e Miúdo

➤ Massa Específica do Agregado Miúdo

A massa específica do agregado miúdo foi obtida por meio do Frasco de Chapman de acordo com a NBR 9776, e calculada segundo a seguinte expressão:

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (\text{B.1})$$

onde

γ – massa específica do agregado miúdo (expressa em g/cm^3);

L – leitura do frasco (volume ocupado pelo conjunto água – agregado miúdo).

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 392 cm^3 , obtendo-se o seguinte valor para a massa específica:

$$\gamma = \frac{500}{392 - 200} = 2,60\text{ g/cm}^3$$

➤ Massa Específica Absoluta do Agregado Graúdo

A massa específica absoluta da brita foi obtida utilizando-se o vaso sifonado com capacidade de 5000 ml , sendo que a massa inicial utilizada foi de 1000 g . Colocou-se água até a marca de 1000 cm^3 do frasco, e a leitura feita foi de 1380 cm^3 , obtendo-se o seguinte valor para a massa específica:

$$\gamma = \frac{1000}{1380 - 1000} = 2,63\text{ g/cm}^3$$

➤ **Massa Específica Aparente do Agregado Graúdo**

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

$$V_{rec} = 15 \times 31,5 \text{ cm}^3 = 14883,75 \text{ cm}^3$$

$$P_{rec} = 17,2 \text{ kg}$$

$$P_b = 31,1 - 7,2 = 23,9 \text{ kg} = 23900 \text{ g}$$

$$\gamma_b = \frac{23900}{14883,75} = 1,61 \text{ g/cm}^3$$

Anexo C

Determinação do Módulo de Elasticidade do Concreto

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

As tabelas a seguir mostram as deformações obtidas nos dois extensômetros e sua média, o carregamento aplicado de acordo com a NBR 8522, as tensões e o módulo de elasticidade secante para cada corpo-de-prova utilizado nos ensaios. Foram utilizados três corpos-de-prova cilíndricos para cada série.

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

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

C.1.

Dados Obtidos no Ensaio do Módulo de Elasticidade

C.1.1.

Corpos-de-Prova com $f_{c,dosagem} = 25 \text{ MPa}$

➤ CP1

Tabela C.1 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 \text{ MPa}$.

<i>Leituras</i>	<i>Carga P (kN)</i>	<i>Tensão σ_c (MPa)</i>	<i>Deformação Média ε_c (‰)</i>	<i>Tensão ($\sigma_n - \sigma_{inf}$) (MPa)</i>	<i>Deformação ($\varepsilon_n - \varepsilon_{inf}$) (‰)</i>	<i>Módulo de Elasticidade Secante E_c (GPa)</i>
	-0,483	-0,061	0,019			
0,5	-4,636	-0,590	0,005			
	-4,442	-0,566	0,005			
0,1 f_c	-16,05	-2,044	-0,073	-1,494	-0,080	18,69
	-16,48	-2,099	-0,077			
0,2 f_c	-31,87	-4,059	-0,206	-3,495	-0,215	16,28

	-32,10	-4,088	-0,213			
0,3 f_c	-48,49	-6,174	-0,375	-5,648	-0,391	14,45
	-49,29	-6,276	-0,396			
0,4 f_c	-64,73	-8,242	-0,592	-7,687	-0,618	12,44
	-65,09	-8,288	-0,634			
0,5 f_c	-79,18	-10,082	-0,883	-9,626	-0,948	10,16
	-81,10	-10,326	-1,002			
0,6 f_c	-96,95	-12,345	-1,525	-11,775	-1,698	6,93
	-97,07	-12,360	-1,862			
Ruptura	-102,2	-13,020	-2,986	-10,662	-2,098	5,08

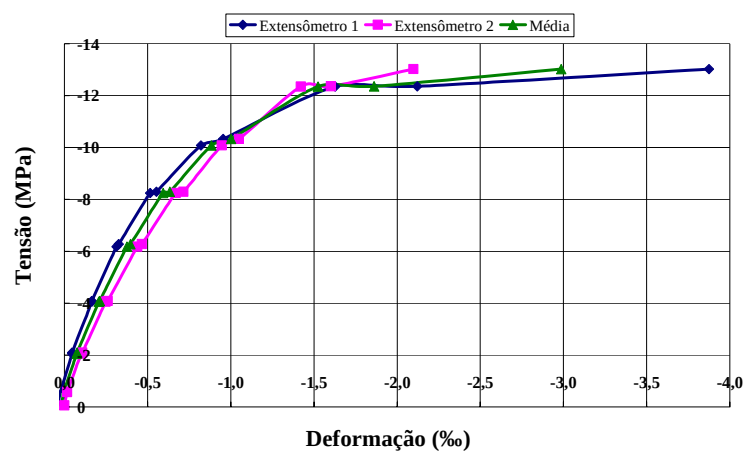


Figura C.1 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 \text{ MPa}$.

➤ CP2

Tabela C.2 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP2 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 \text{ MPa}$.

<i>Leituras</i>	<i>Carga P (kN)</i>	<i>Tensão σ_c (MPa)</i>	<i>Deformação Média ε_c (‰)</i>	<i>Tensão $(\sigma_n - \sigma_{inf})$ (MPa)</i>	<i>Deformação $(\varepsilon_n - \varepsilon_{inf})$ (‰)</i>	<i>Módulo de Elasticidade Secante E_c (GPa)</i>
	-47,8	-0,061	0,022			
	-44	-0,056	0,021			
0,5	-439,9	-0,560	0,019			
	-470,4	-0,599	0,020			
0,1 f_c	-1588	-2,022	-0,029	-1,466	-0,051	28,46
	-1655	-2,107	-0,034			
0,2 f_c	-3205	-4,082	-0,144	-3,505	-0,168	20,85

	-3239	-4,125	-0,153			
0,3 f_c	-4820	-6,138	-0,276	-5,543	-0,299	18,52
	-4827	-6,146	-0,283			
0,4 f_c	-6423	-8,178	-0,413	-7,589	-0,441	17,21
	-6437	-8,197	-0,430			
0,5 f_c	-8013	-10,203	-0,566	-9,620	-0,602	15,98
	-8038	-10,235	-0,599			
0,6 f_c	-9683	-12,329	-0,760	-11,758	-0,801	14,68
	-9726	-12,384	-0,803			
0,7 f_c	-11368	-14,475	-0,967	-13,753	-1,025	13,42
	-11175	-14,229	-1,044			
0,8 f_c	-12874	-16,392	-1,224	-15,795	-1,328	11,90
	-12876	-16,395	-1,391			
	-12995	-16,546	-1,431	-16,230	-1,487	10,92
	-13440	-17,112	-1,503			
	-13658	-17,390	-1,564	-16,939	-1,617	10,47
	-13889	-17,685	-1,631			
	-13950	-17,762	-1,665	-17,331	-1,740	9,96
	-14214	-18,098	-1,776			
	-14400	-18,335	-1,892	-17,873	-1,982	9,02
	-14615	-18,608	-2,032			
	-14783	-18,823	-2,191	-18,355	-2,283	8,04
	-14989	-19,085	-2,335			
	-15319	-19,506	-2,455	-19,041	-2,514	7,57
	-15530	-19,775	-2,534			
	-15523	-19,765	-2,660	-19,403	-2,829	6,86
	-15895	-20,239	-2,959			
Ruptura	-16295	-20,748	-3,100	-19,411	-2,993	6,49

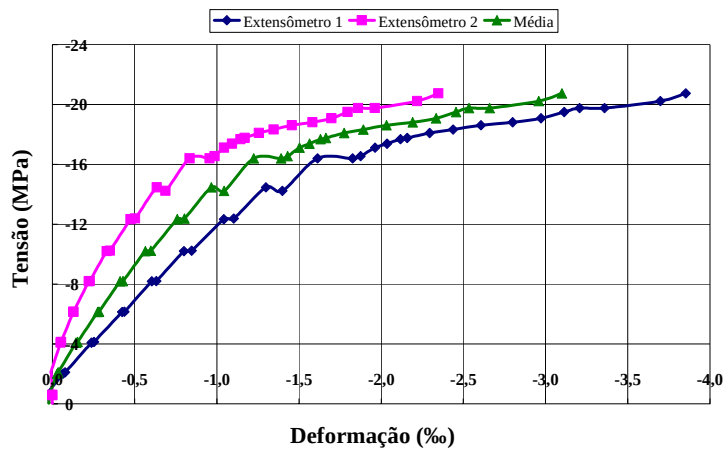


Figura C.2 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP2 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 \text{ MPa}$.

➤ CP3

Tabela C.3 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP3 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 \text{ MPa}$.

Leituras	Carga P (kN)	Tensão σ_c (MPa)	Deformação Média ε_c (%)	Tensão $(\sigma_n - \sigma_{inf})$ (MPa)	Deformação $(\varepsilon_n - \varepsilon_{inf})$ (%)	Módulo de Elasticidade Secante E_c (GPa)
	0,150	0,019	0,021			
	0,127	0,016	0,020			
0,5	-4,256	-0,542	0,010			
	-4,583	-0,584	0,007			
0,1 f_c	-16,10	-2,051	-0,058	-1,529	-0,069	22,28
	-16,75	-2,133	-0,063			
0,2 f_c	-31,93	-4,066	-0,166	-3,534	-0,179	19,78
	-32,41	-4,127	-0,174			
0,3 f_c	-48,49	-6,175	-0,297	-5,589	-0,310	18,02
	-48,13	-6,129	-0,306			
0,4 f_c	-63,49	-8,085	-0,432	-7,586	-0,454	16,70
	-64,49	-8,212	-0,460			
0,5 f_c	-80,64	-10,268	-0,614	-9,747	-0,641	15,22
	-81,30	-10,352	-0,650			
0,6 f_c	-95,81	-12,200	-0,796	-11,655	-0,840	13,88
	-96,10	-12,236	-0,867			
0,7 f_c	-112,4	-14,315	-1,078	-13,741	-1,145	12,00
	-112,2	-14,293	-1,195			
0,8 f_c	-127,5	-16,240	-1,447	-15,764	-1,630	9,67

	-128,9	-16,413	-1,795			
	-131,7	-16,775	-1,841	-16,342	-1,875	8,72
	-133,7	-17,033	-1,892			
	-135,5	-17,256	-1,939	-16,786	-1,977	8,49
	-136,9	-17,441	-1,998			
	-137,7	-17,535	-2,126	-17,203	-2,366	7,27
	-141,3	-17,997	-2,590			
Ruptura	-141,9	-18,068	-3,102	-17,148	-3,350	5,12

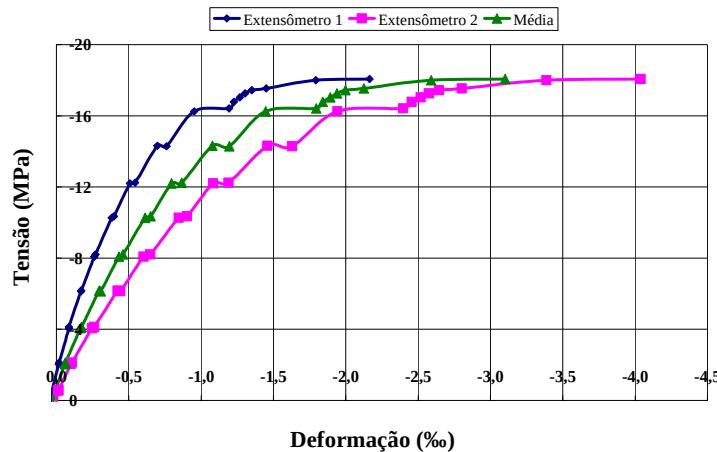


Figura C.3 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP3 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 \text{ MPa}$.

C.1.2.

Corpos-de-Prova com $f_{c,dosagem} = 35 \text{ MPa}$

➤ CP1

Tabela C.4 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 \text{ MPa}$.

Leituras	Carga P (kN)	Tensão σ_c (MPa)	Deformação Média ε_c (%)	Tensão $(\sigma_n - \sigma_{inf})$ (MPa)	Deformação $(\varepsilon_n - \varepsilon_{inf})$ (%)	Módulo de Elasticidade Secante E_c (GPa)
	-0,120	-0,015	0,015			
	-0,090	-0,011	0,015			
0,5	-4,379	-0,558	0,005			
	-4,750	-0,605	0,003			
0,1 f_c	-20,96	-2,670	-0,080	-2,153	-0,085	25,25
	-21,98	-2,799	-0,083			
0,2 f_c	-42,00	-5,348	-0,192	-4,787	-0,196	24,43
	-42,32	-5,389	-0,192			
0,3 f_c	-63,10	-8,035	-0,320	-7,640	-0,332	23,03

	-66,03	-8,407	-0,336			
0,4 f_c	-84,05	-10,702	-0,451	-10,286	-0,465	22,10
	-86,64	-11,031	-0,473			
0,5 f_c	-105,2	-13,395	-0,599	-12,930	-0,616	20,98
	-107,0	-13,627	-0,626			
0,6 f_c	-126,0	-16,051	-0,768	-15,464	-0,784	19,72
	-125,9	-16,040	-0,793			
0,7 f_c	-146,0	-18,590	-0,944	-18,177	-0,985	18,45
	-148,1	-18,868	-0,998			
	-147,7	-18,816	-1,003			
0,8 f_c	-166,3	-21,186	-1,166	-20,915	-1,234	16,95
	-168,0	-21,394	-1,253			
	-172,0	-21,910	-1,272			
	-175,2	-22,313	-1,292			
	-176,4	-22,466	-1,301			
	-178,6	-22,746	-1,318			
	-179,5	-22,858	-1,332			
	-182,6	-23,252	-1,354			
	-183,9	-23,424	-1,373			
	-185,0	-23,556	-1,391			
	-186,7	-23,774	-1,411			
	-189,7	-24,163	-1,454			
	-191,1	-24,339	-1,478			
	-192,8	-24,559	-1,517			
	-195,6	-24,905	-1,556			
	-196,7	-25,046	-1,580			
	-198,8	-25,316	-1,615			
	-200,5	-25,533	-1,653			
	-202,7	-25,819	-1,692			
	-205,0	-26,104	-1,733			
	-206,4	-26,288	-1,764			
	-205,8	-26,206	-1,773			
	-208,4	-26,546	-1,817			
	-210,4	-26,793	-1,867			
	-211,0	-26,869	-1,886			
	-211,8	-26,979	-1,932			
	-213,6	-27,205	-1,996			
	-215,7	-27,471	-2,103			
	-215,8	-27,480	-2,118			
Ruptura	-218,2	-27,818	-2,110			

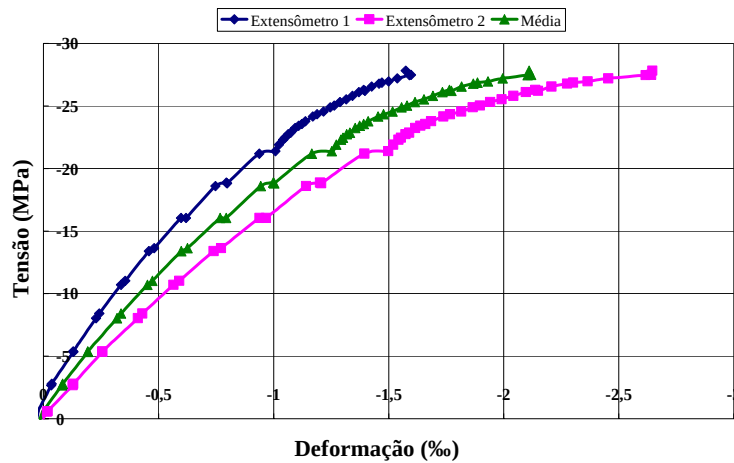


Figura C.4 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 \text{ MPa}$.

➤ CP2

Tabela C.5 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP2 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 \text{ MPa}$.

Leituras	Carga P (kN)	Tensão σ_c (MPa)	Deformação Média ε_c (%)	Tensão $(\sigma_n - \sigma_{inf})$ (MPa)	Deformação $(\varepsilon_n - \varepsilon_{inf})$ (%)	Módulo de Elasticidade Secante E_c (GPa)
	0,157	0,020	0,015			
	0,195	0,025	0,014			
0,5	-3,869	-0,493	0,007			
	-4,620	-0,588	0,006			
0,1 f_c	-21,02	-2,677	-0,069	-2,173	-0,076	28,76
	-21,59	-2,750	-0,069			
0,2 f_c	-42,06	-5,356	-0,178	-4,846	-0,185	26,20
	-42,54	-5,417	-0,178			
0,3 f_c	-63,25	-8,054	-0,292	-7,555	-0,299	25,23
	-63,90	-8,136	-0,293			
0,4 f_c	-83,89	-10,682	-0,403	-10,179	-0,411	24,74
	-84,48	-10,756	-0,406			
0,5 f_c	-106,6	-13,578	-0,523	-13,025	-0,533	24,43
	-106,4	-13,554	-0,530			
0,6 f_c	-126,5	-16,118	-0,644	-15,617	-0,658	23,74
	-127,0	-16,183	-0,650			
	-127,0	-16,171	-0,659			
0,7 f_c	-146,0	-18,601	-0,770	-18,166	-0,788	23,04
	-147,7	-18,811	-0,793			

0,8 f_c	-167,5	-21,328	-0,920	-20,880	-0,943	22,13
	-168,9	-21,513	-0,953			
	-171,1	-21,797	-0,964			
	-173,1	-22,041	-0,973			
	-175,1	-22,307	-0,983			
	-176,7	-22,505	-0,995			
	-178,1	-22,682	-1,003			
	-181,1	-23,064	-1,018			
	-181,4	-23,107	-1,023			
	-182,8	-23,287	-1,036			
	-184,7	-23,518	-1,049			
	-186,2	-23,717	-1,066			
	-187,1	-23,825	-1,069			
	-188,9	-24,055	-1,084			
	-191,4	-24,380	-1,101			
	-193,8	-24,675	-1,114			
	-194,9	-24,820	-1,132			
	-197,4	-25,142	-1,149			
	-198,7	-25,302	-1,164			
	-200,2	-25,490	-1,184			
	-204,0	-25,976	-1,213			
	-205,6	-26,107	-1,226			
	-205,4	-26,155	-1,233			
	-206,8	-26,332	-1,251			
	-208,8	-26,587	-1,275			
	-210,3	-26,783	-1,302			
	-212,5	-27,059	-1,326			
	-212,8	-27,094	-1,334			
	-214,9	-27,373	-1,355			
	-216,1	-27,515	-1,379			
	-218,0	-27,769	-1,409			
	-221,0	-28,141	-1,446			
	-221,6	-28,226	-1,475			
	-223,2	-28,419	-1,504			
	-224,1	-28,539	-1,521			
	-224,0	-28,524	-1,531			
	-224,9	-28,647	-1,544			
	-225,1	-28,668	-1,558			
	-225,6	-28,732	-1,565			
	-225,8	-28,757	-1,578			
	-226,3	-28,819	-1,592			
	-226,4	-28,831	-1,611			
	-227,0	-28,914	-1,618			
	-226,2	-28,802	-1,631			
	-227,3	-28,944	-1,638			
	-226,9	-28,898	-1,653			

	-227,2	-28,938	-1,667			
	-228,0	-29,040	-1,686			
	-227,4	-28,960	-1,696			
	-226,9	-28,901	-1,709			
Ruptura	-228,1	-29,046	-1,721			

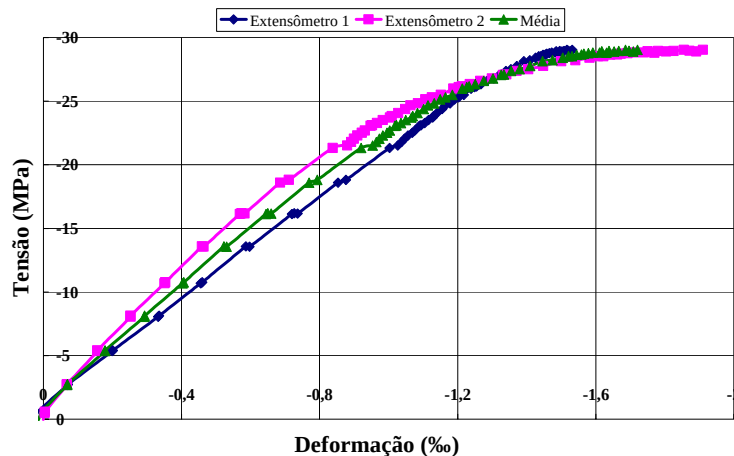


Figura C.5 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP2 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 \text{ MPa}$.

➤ CP3

Tabela C.6 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP3 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 \text{ MPa}$.

Leituras	Carga P (kN)	Tensão σ_c (MPa)	Deformação Média ε_c (%)	Tensão ($\sigma_n - \sigma_{inf}$) (MPa)	Deformação ($\varepsilon_n - \varepsilon_{inf}$) (%)	Módulo de Elasticidade Secante E_c (GPa)
	0,57	0,073	0,016			
	0,57	0,073	0,015			
0,5	-4,15	-0,528	0,012			
	-5,06	-0,644	0,011			
0,1 f_c	-22,35	-2,846	-0,070	-2,32	-0,08	27,96
	-23,22	-2,957	-0,072			
0,2 f_c	-42,85	-5,456	-0,184	-4,96	-0,20	24,84
	-44,34	-5,645	-0,192			
0,3 f_c	-63,11	-8,035	-0,303	-7,51	-0,32	23,52
	-63,98	-8,147	-0,312			
0,4 f_c	-86,85	-11,058	-0,445	-10,40	-0,46	22,55
	-85,78	-10,922	-0,454			

0,5 f_c	-104,9	-13,357	-0,583	-12,85	-0,60	21,25
	-106,1	-13,519	-0,603			
0,6 f_c	-125,8	-16,024	-0,752	-16,37	-0,84	19,52
	-126,3	-16,090	-0,785			
0,7 f_c	-147,3	-18,762	-0,945	-18,22	-0,98	18,53
	-148,0	-18,846	-0,998			
0,8 f_c	-168,4	-21,449	-1,197	-20,79	-1,22	17,10
	-167,3	-21,312	-1,212			
	-168,2	-21,415	-1,275			
	-169,6	-21,599	-1,283			
	-170,9	-21,768	-1,291			
	-172,1	-21,914	-1,303			
	-173,4	-22,082	-1,314			
	-175,0	-22,284	-1,331			
	-176,2	-22,441	-1,346			
	-179,3	-22,838	-1,373			
	-181,0	-23,053	-1,401			
	-182,5	-23,247	-1,430			
	-184,5	-23,501	-1,470			
	-184,8	-23,529	-1,477			
	-186,3	-23,731	-1,517			
	-188,2	-23,973	-1,568			
	-189,4	-24,120	-1,622			
	-189,6	-24,149	-1,631			
	-192,2	-24,471	-1,707			
	-194,5	-24,775	-1,810			
	-194,6	-24,784	-1,819			
	-195,6	-24,914	-1,900			
	-195,6	-24,906	-1,977			
	-195,3	-24,877	-1,989			
	-196,1	-24,978	-2,008			
Ruptura	-196,2	-24,987	-2,023			

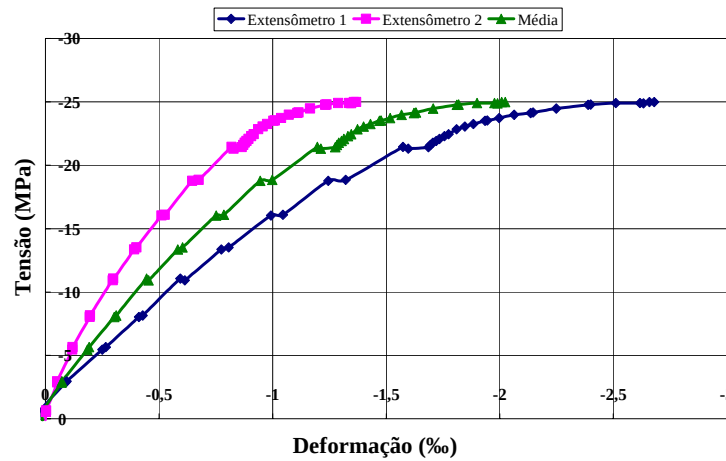


Figura C.6 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP3 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 \text{ MPa}$.

C.1.3.

Corpos-de-Prova com $f_{c,dosagem} = 45 \text{ MPa}$

➤ CP1

Tabela C.7 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 \text{ MPa}$.

Leituras	Carga P (kN)	Tensão σ_c (MPa)	Deformação Média ε_c (‰)	Tensão ($\sigma_n - \sigma_{inf}$) (MPa)	Deformação ($\varepsilon_n - \varepsilon_{inf}$) (‰)	Módulo de Elasticidade Secante E_c (GPa)
	-1,41	-0,180	0,026			
	-1,41	-0,180	0,027			
0,5	-4,11	-0,524	0,021			
	-4,41	-0,561	0,017			
0,1 f_c	-30,25	-3,852	-0,104	-3,389	-0,129	26,29
	-31,50	-4,010	-0,115			
0,2 f_c	-58,95	-7,506	-0,269	-7,179	-0,301	23,87
	-62,34	-7,937	-0,293			
0,3 f_c	-88,17	-11,226	-0,440	-10,788	-0,472	22,88
	-89,81	-11,435	-0,464			
0,4 f_c	-116,6	-14,846	-0,616	-14,388	-0,650	22,15
	-117,9	-15,016	-0,645			
0,5 f_c	-146,7	-18,686	-0,812	-18,195	-0,847	21,49
	-147,5	-18,790	-0,842			
0,6 f_c	-177,0	-22,536	-1,018	-22,040	-1,057	20,86

	-177,7	-22,629	-1,056			
0,7 f_c	-206,2	-26,264	-1,239	-25,709	-1,281	20,07
	-206,0	-26,240	-1,284			
0,8 f_c	-234,2	-29,825	-1,465	-29,500	-1,520	19,40
	-237,6	-30,259	-1,537			
	-243,2	-30,975	-1,566			
	-245,8	-31,299	-1,583			
	-248,4	-31,634	-1,600			
	-250,1	-31,854	-1,613			
	-252,1	-32,110	-1,631			
	-253,7	-32,306	-1,641			
	-254,7	-32,429	-1,651			
	-258,7	-32,943	-1,677			
	-259,4	-33,033	-1,688			
	-261,3	-33,277	-1,699			
	-262,5	-33,425	-1,709			
	-263,5	-33,549	-1,727			
	-266,1	-33,884	-1,746			
	-267,2	-34,026	-1,757			
	-269,3	-34,299	-1,776			
	-271,3	-34,547	-1,795			
	-271,9	-34,626	-1,811			
	-273,8	-34,863	-1,831			
	-276,2	-35,176	-1,851			
	-276,9	-35,265	-1,862			
	-278,5	-35,466	-1,877			
	-279,7	-35,624	-1,889			
	-280,5	-35,718	-1,900			
	-281,5	-35,853	-1,911			
	-282,5	-35,970	-1,923			
	-283,5	-36,106	-1,939			
	-284,3	-36,202	-1,955			
	-285,4	-36,349	-1,966			
	-286,6	-36,495	-1,982			
	-288,2	-36,697	-1,994			
	-289,5	-36,861	-2,010			
	-290,2	-36,953	-2,022			
	-291,4	-37,105	-2,034			
	-292,8	-37,288	-2,050			
	-294,2	-37,461	-2,072			
	-295,2	-37,594	-2,084			
	-296,3	-37,736	-2,104			
	-297,6	-37,899	-2,117			
	-298,3	-37,985	-2,129			
	-299,8	-38,180	-2,150			

	-299,7	-38,160	-2,163			
	-301,0	-38,325	-2,175			
	-303,4	-38,633	-2,202			
	-304,1	-38,728	-2,214			
	-304,8	-38,810	-2,227			
	-305,3	-38,879	-2,244			
	-306,9	-39,079	-2,261			
	-307,4	-39,151	-2,278			
	-307,7	-39,182	-2,291			
	-308,6	-39,293	-2,303			
	-309,0	-39,350	-2,316			
	-310,4	-39,532	-2,334			
	-310,9	-39,590	-2,347			
	-311,4	-39,650	-2,360			
	-313,3	-39,891	-2,378			
	-313,7	-39,943	-2,396			
	-314,5	-40,046	-2,409			
	-314,3	-40,022	-2,422			
	-315,3	-40,156	-2,435			
	-316,4	-40,285	-2,459			
	-316,7	-40,333	-2,473			
	-316,8	-40,339	-2,487			
	-317,7	-40,462	-2,500			
	-318,3	-40,530	-2,519			
	-318,6	-40,572	-2,533			
	-320,3	-40,788	-2,552			
	-320,9	-40,866	-2,575			
	-320,4	-40,799	-2,593			
	-322,5	-41,072	-2,637			
	-321,9	-40,989	-2,660			
	-323,2	-41,162	-2,707			
Ruptura	-323,4	-41,188	-2,720			

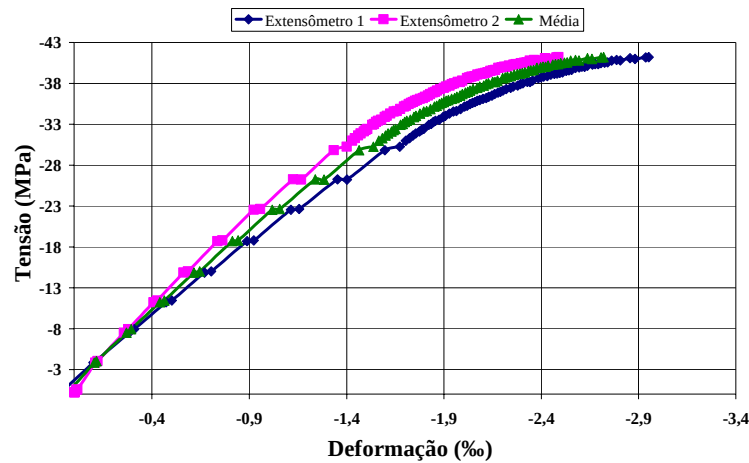


Figura C.7 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 \text{ MPa}$.

➤ CP2

Tabela C.8 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP2 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 \text{ MPa}$.

Leituras	Carga P (kN)	Tensão σ_c (MPa)	Deformação Média ε_c (%)	Tensão $(\sigma_n - \sigma_{inf})$ (MPa)	Deformação $(\varepsilon_n - \varepsilon_{inf})$ (%)	Módulo de Elasticidade Secante E_c (GPa)
	-0,26	-0,033	0,025			
	-0,29	-0,037	0,024			
0,5	-3,92	-0,499	0,005			
	-4,85	-0,617	0,002			
0,1 f_c	-28,85	-3,674	-0,115	-3,235	-0,124	26,09
	-30,73	-3,913	-0,127			
0,2 f_c	-59,15	-7,531	-0,282	-7,104	-0,295	24,09
	-61,20	-7,793	-0,302			
0,3 f_c	-87,99	-11,203	-0,452	-10,792	-0,469	23,03
	-90,30	-11,497	-0,479			
0,4 f_c	-116,8	-14,874	-0,632	-14,474	-0,653	22,18
	-119,3	-15,190	-0,667			
0,5 f_c	-147,6	-18,792	-0,833	-18,255	-0,853	21,40
	-147,9	-18,833	-0,866			
0,6 f_c	-175,5	-22,341	-1,033	-21,905	-1,073	20,42
	-177,1	-22,550	-1,087			
	-176,7	-22,497	-1,088			
0,7 f_c	-207,3	-26,392	-1,273	-25,768	-1,312	19,63

	-206,2	-26,260	-1,346			
$0,8 f_c$	-235,8	-30,029	-1,557	-29,717	-1,610	18,46
	-239,7	-30,522	-1,656			
	-242,1	-30,820	-1,668			
	-244,2	-31,098	-1,679			
	-246,2	-31,350	-1,692			
	-248,6	-31,651	-1,704			
	-250,6	-31,910	-1,719			
	-252,1	-32,097	-1,732			
	-254,6	-32,415	-1,745			
	-255,4	-32,522	-1,759			
	-257,0	-32,718	-1,773			
	-259,6	-33,054	-1,786			
	-261,1	-33,250	-1,800			
	-262,1	-33,378	-1,820			
	-265,8	-33,841	-1,846			
	-266,8	-33,974	-1,861			
	-267,4	-34,045	-1,876			
	-270,3	-34,412	-1,897			
	-271,4	-34,556	-1,913			
	-273,1	-34,772	-1,934			
	-275,4	-35,059	-1,962			
	-276,3	-35,174	-1,977			
	-277,8	-35,369	-1,998			
	-279,4	-35,570	-2,019			
	-281,3	-35,815	-2,057			
	-284,4	-36,214	-2,094			
	-285,3	-36,330	-2,124			
	-286,9	-36,524	-2,153			
	-289,2	-36,827	-2,192			
	-289,7	-36,886	-2,205			
	-291,1	-37,070	-2,226			
	-292,8	-37,280	-2,253			
	-293,5	-37,374	-2,274			
	-294,2	-37,460	-2,291			
	-294,4	-37,483	-2,321			
Ruptura	-295,1	-37,579	-2,362			

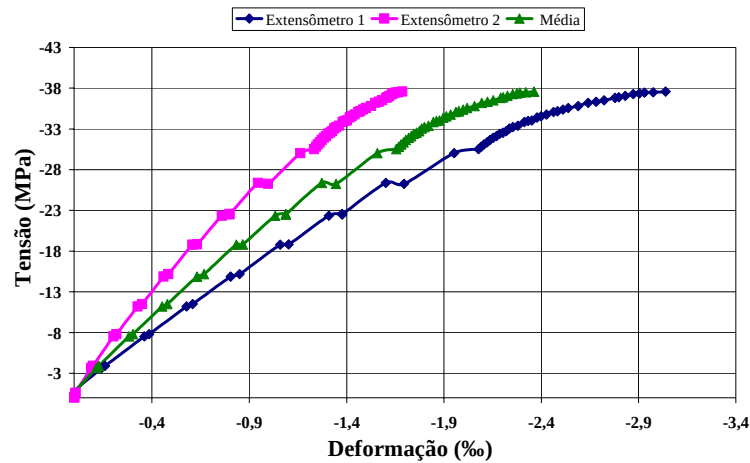


Figura C.8 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP2 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 \text{ MPa}$.

➤ CP3

Tabela C.9 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP3 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 \text{ MPa}$.

Leituras	Carga P (kN)	Tensão σ_c (MPa)	Deformação Média ε_c (%)	Tensão $(\sigma_n - \sigma_{inf})$ (MPa)	Deformação $(\varepsilon_n - \varepsilon_{inf})$ (%)	Módulo de Elasticidade Secante E_c (GPa)
	0,39	0,050	0,023			
	0,37	0,047	0,022			
0,5	-4,02	-0,512	0,021			
	-5,29	-0,674	0,020			
0,1 f_c	-28,80	-3,667	-0,082	-3,215	-0,109	29,38
	-31,02	-3,950	-0,096			
0,2 f_c	-59,13	-7,529	-0,259	-7,076	-0,290	24,41
	-61,33	-7,809	-0,280			
0,3 f_c	-87,99	-11,203	-0,445	-10,745	-0,479	22,42
	-90,11	-11,473	-0,473			
0,4 f_c	-116,9	-14,879	-0,645	-14,376	-0,681	21,11
	-118,3	-15,059	-0,676			
0,5 f_c	-146,9	-18,710	-0,856	-18,181	-0,897	20,27
	-148,0	-18,838	-0,897			
0,6 f_c	-176,7	-22,504	-1,087	-21,939	-1,127	19,47
	-177,2	-22,559	-1,093			
	-177,0	-22,534	-1,139			
0,7 f_c	-205,1	-26,120	-1,339	-25,585	-1,391	18,39

	-204,5	-26,043	-1,343			
	-207,1	-26,371	-1,430			
$0,8 f_c$	-234,5	-29,861	-1,709	-29,501	-1,782	16,55
	-238,2	-30,326	-1,815			
	-243,0	-30,943	-1,837			
	-245,7	-31,279	-1,853			
	-248,0	-31,574	-1,869			
	-250,4	-31,886	-1,886			
	-252,8	-32,184	-1,903			
	-255,7	-32,551	-1,922			
	-257,8	-32,829	-1,942			
	-259,5	-33,035	-1,962			
	-261,7	-33,316	-1,983			
	-263,4	-33,533	-2,005			
	-265,4	-33,796	-2,028			
	-266,2	-33,892	-2,051			
	-267,6	-34,072	-2,074			
	-270,6	-34,453	-2,107			
	-271,4	-34,552	-2,141			
	-275,0	-35,010	-2,196			
	-276,3	-35,177	-2,220			
	-277,4	-35,317	-2,254			
	-279,7	-35,612	-2,307			
	-282,1	-35,919	-2,366			
	-282,5	-35,975	-2,407			
	-283,0	-36,038	-2,430			
	-285,7	-36,373	-2,480			
	-286,7	-36,508	-2,541			
	-287,7	-36,637	-2,586			
Ruptura	-288,3	-36,710	-2,615			

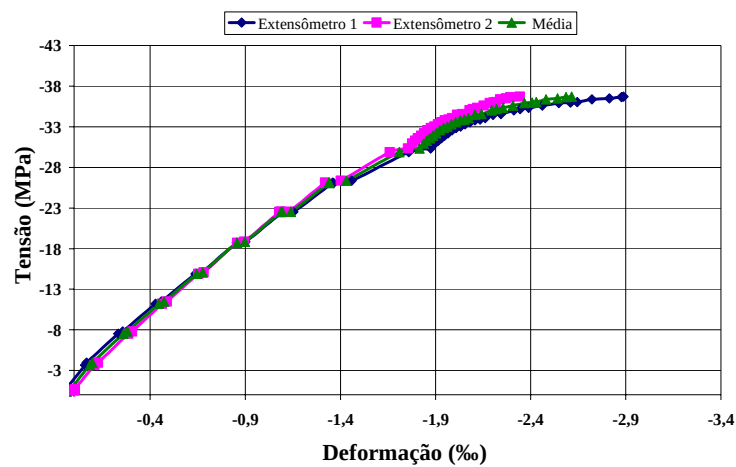


Figura C.9 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP3 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 \text{ MPa}$.

Anexo D

Ensaio de Resistência à Tração do CFC

Este anexo mostra por meio de tabelas e gráficos os dados obtidos do ensaio de resistência à tração do CFC.

➤ CP1

Tabela D.1 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração do CFC para o CP1.

<i>Carga</i> <i>P</i> (<i>kN</i>)	<i>Tensão</i> σ_f (<i>MPa</i>)	<i>Deformação</i> <i>Específica</i> ε_f ($\mu\varepsilon$)
2	484,85	97
4	969,70	235
6	1454,55	419
8	1939,39	553
10	2424,24	655
11	2666,67	683
12	2909,09	725
13	3151,52	755

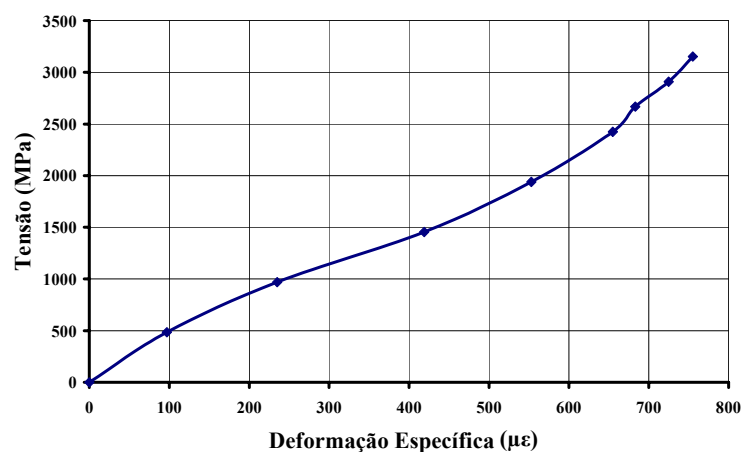


Figura D.1 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP1.

Este corpo-de-prova foi descartado, pois os valores das deformações específicas foram insignificantes.

➤ CP2

Tabela D.2 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração do CFC para o CP2

<i>Carga P (kN)</i>	<i>Tensão σ_f (MPa)</i>	<i>Deformação Específica ε_f ($\mu\varepsilon$)</i>
1	242,42	710
1,5	363,64	1100
2	484,85	1348
2,5	606,06	1735
3	727,27	2120
3,5	848,48	2510
4	969,70	3000
4,5	1090,91	3420
5	1212,12	3800
5,5	1333,33	4200
6	1454,55	4590
6,5	1575,76	4940
7	1696,97	5420
7,5	1818,18	5830
8	1939,39	6030
8,5	2060,61	6500
9	2181,82	6880
9,5	2303,03	7270
10	2424,24	7660
10,5	2545,45	8010
11	2666,67	8370
11,5	2787,88	8730
12	2909,09	9090
12,5	3030,30	9880
13	3151,52	10680
13,5	3272,73	

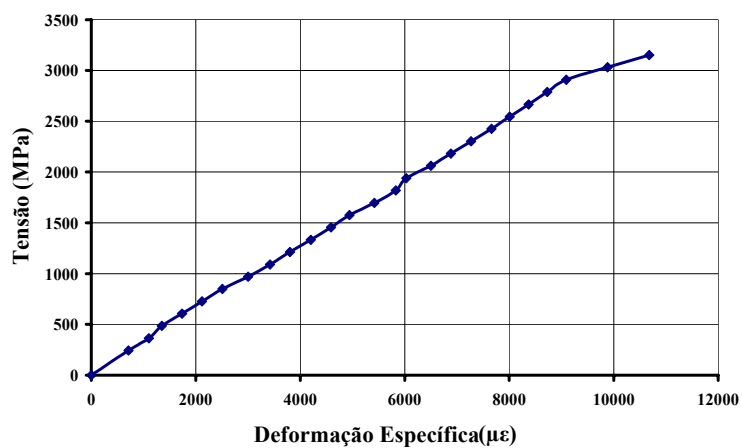


Figura D.2 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP2.

➤ CP3

Tabela D.3 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração do CFC para o CP3.

<i>Carga P (kN)</i>	<i>Tensão σ_f (MPa)</i>	<i>Deformação Específica ε_f ($\mu\varepsilon$)</i>
1	242,42	1012
1,5	363,64	1642
2	484,85	2032
2,5	606,06	2455
3	727,27	2904
3,5	848,48	3416
4	969,70	3768
4,5	1090,91	4195
5	1212,12	4590
5,5	1333,33	5008
6	1454,55	5406
6,5	1575,76	5812
7	1696,97	6182
7,5	1818,18	6576
8	1939,39	7124
8,5	2060,61	7298
9	2181,82	7630
9,5	2303,03	8040
10	2424,24	8416
10,5	2545,45	8780
11	2666,67	9902
11,5	2787,88	

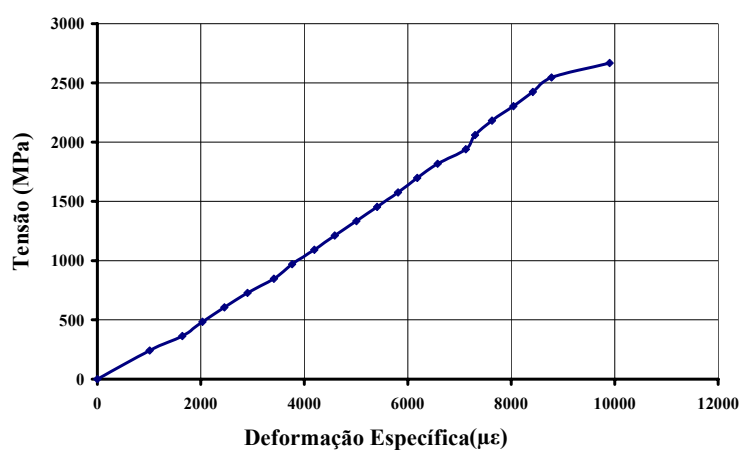


Figura D.3 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP3.

➤ CP4

Tabela D.4 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração do CFC para o CP4.

<i>Carga P (kN)</i>	<i>Tensão σ_f (MPa)</i>	<i>Deformação Específica ε_f ($\mu\varepsilon$)</i>
1	242,42	532
1,5	363,64	2618
2	484,85	2980
2,5	606,06	3224
3	727,27	3564
3,5	848,48	3908
4	969,70	4246
4,5	1090,91	4568
5	1212,12	4904
5,5	1333,33	5243
6	1454,55	5598
6,5	1575,76	5906
7	1696,97	6278
7,5	1818,18	6624
8	1939,39	6958
8,5	2060,61	7300
9	2181,82	7636
9,5	2303,03	7984
10	2424,24	8326
10,5	2545,45	8660
11	2666,67	8954
11,5	2787,88	9248
12	2909,09	9560
12,5	3030,3	9938

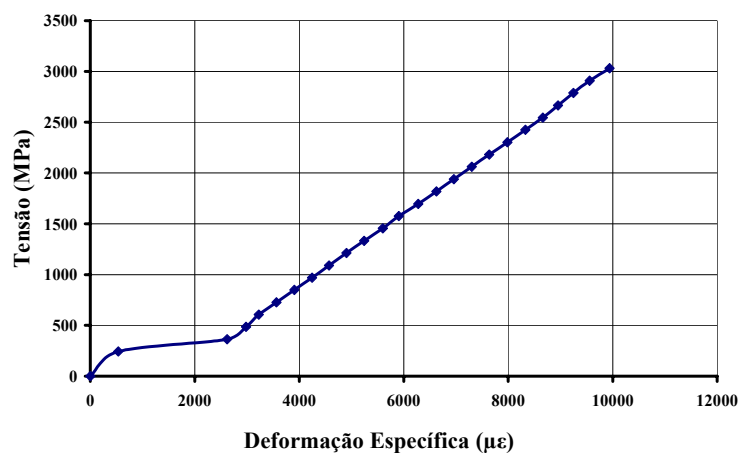


Figura D.4 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP4.

➤ CP 5

Tabela D.5 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração do CFC para o CP5.

<i>Carga P (kN)</i>	<i>Tensão σ_f (MPa)</i>	<i>Deformação Específica ε_f ($\mu\varepsilon$)</i>
1	242,42	1116
1,5	121,22	1578
2	242,43	1974
2,5	363,64	2478
3	484,85	2952
3,5	606,06	3422
4	727,28	3896
4,5	848,49	4500
5	969,70	4838
5,5	1090,91	5290
6	1212,13	5764
6,5	1333,34	6212
7	1454,55	6722
7,5	1575,76	7180
8	1696,97	7570
8,5	1818,19	8086
9	1939,40	8558
9,5	2060,61	9008
10	2181,82	9494
10,5	2303,03	9988
11	2424,25	10400
11,5	2545,46	10876

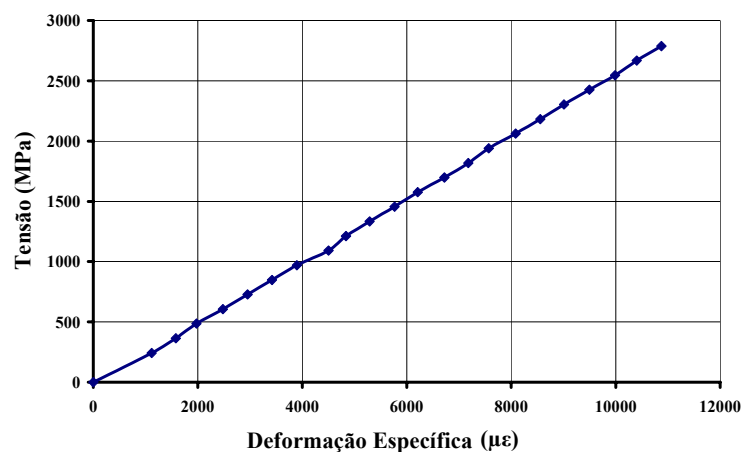


Figura D.5 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP5.

➤ CP 6

Tabela D.6 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração do CFC para o CP6.

<i>Carga P (kN)</i>	<i>Tensão σ_f (MPa)</i>	<i>Deformação Específica ε_f ($\mu\varepsilon$)</i>
1	242,42	70
1,5	363,64	272
2	484,85	588
3	727,27	800
3,5	848,48	958
4	969,70	1092
4,5	1090,91	1314
5	1212,12	1476
5,5	1333,33	1662
6	1454,55	1858
6,5	1575,76	2046
7	1696,97	2230
7,5	1818,18	2444
8	1939,39	2648
8,5	2060,61	2816
9	2181,82	2996
9,5	2303,03	3190
10	2424,24	3382
10,5	2545,45	3604
11	2666,67	3800
11,5	2787,88	3988
12	2909,09	4090

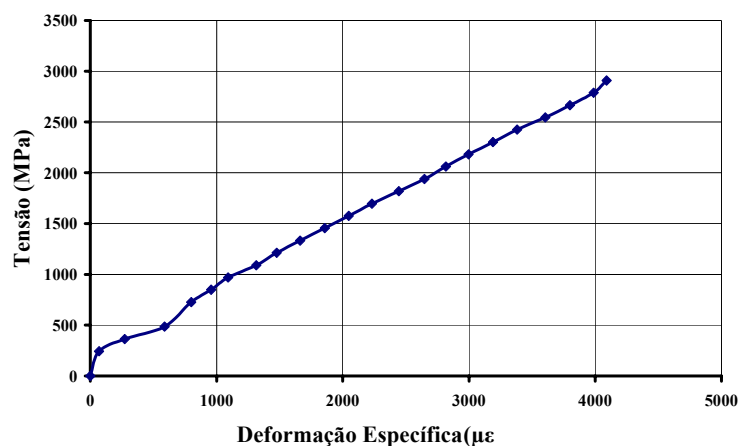


Figura D.6 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP6.

Este corpo-de-prova foi descartado, pois o valor do módulo de elasticidade foi muito acima do que os dos outros corpos-de-prova.

Anexo E

Gráficos dos Ensaio

E.1. L50-R25-1 (Piloto)

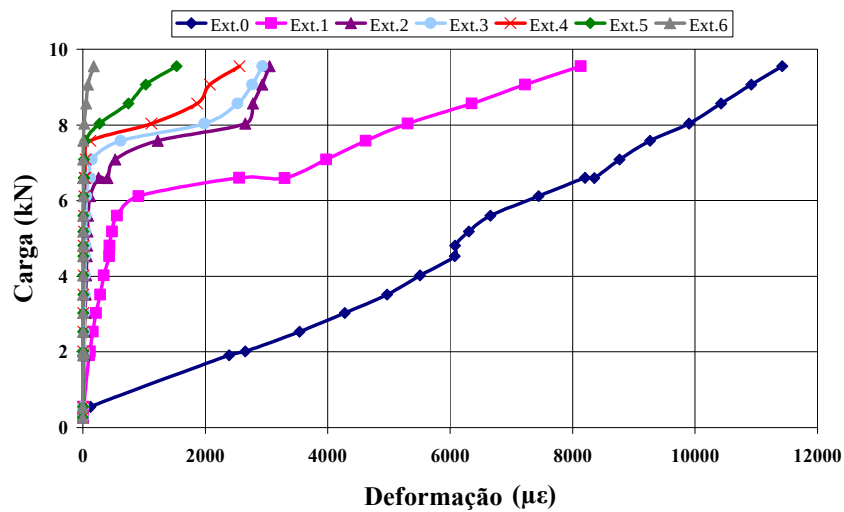


Figura E.1 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L50-R25-1.

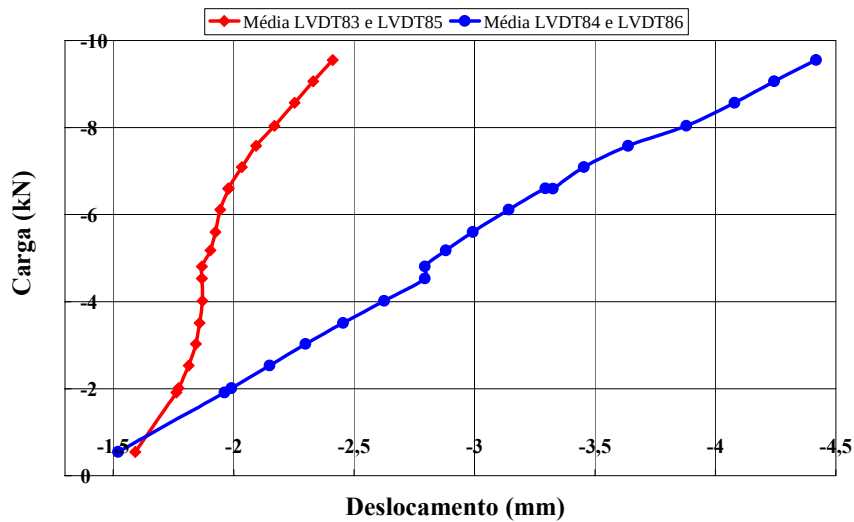


Figura E.2 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L50-R25-1.

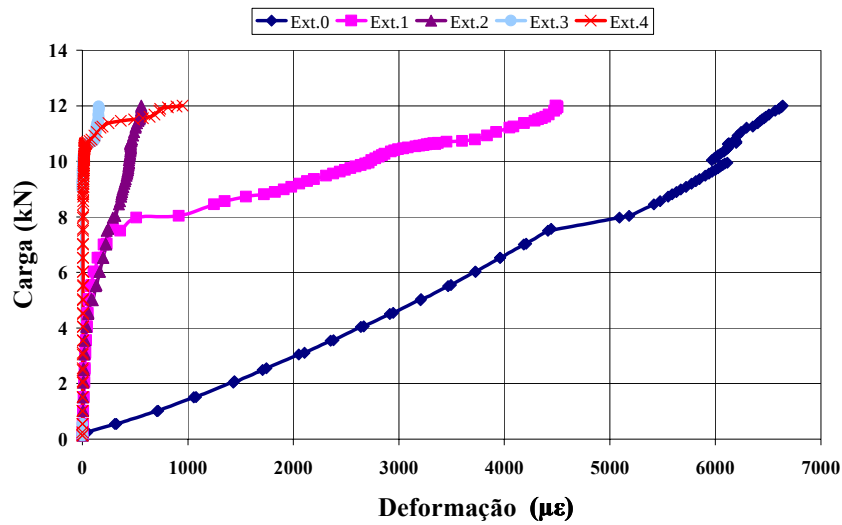
E.2.
L50-R25-2

Figura E.3 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L50-R25-2.

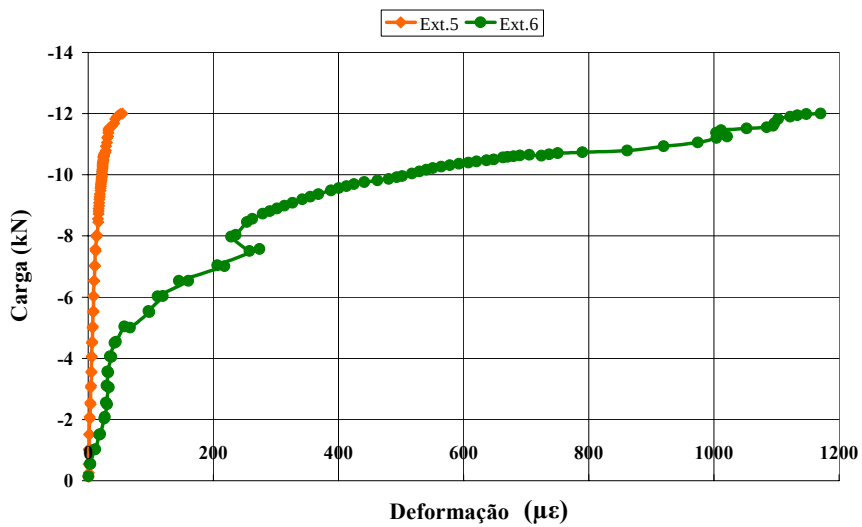


Figura E.4 – Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-prova L50-R25-2.

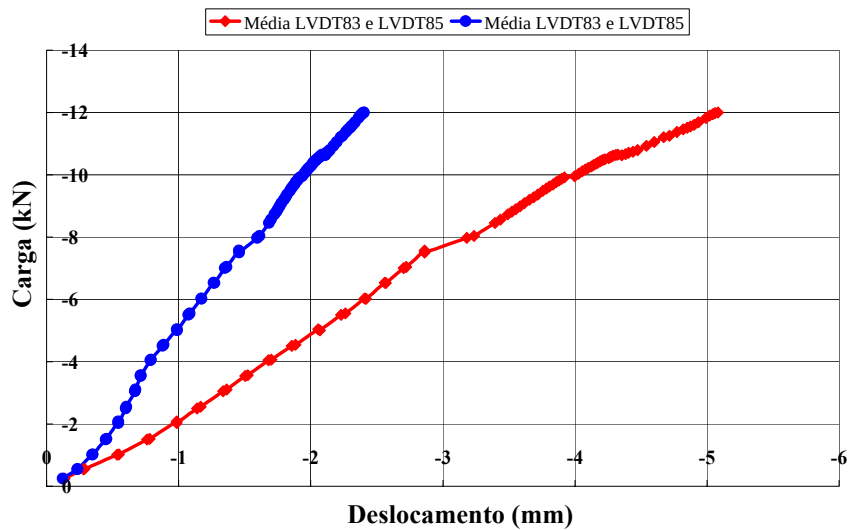


Figura E.5 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L50-R25-2.

E.3. L50-R35-1

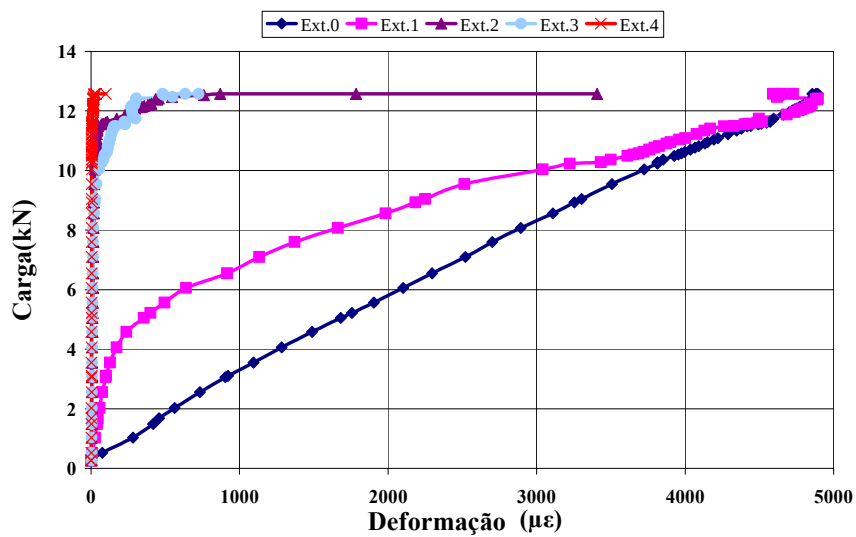


Figura E.6 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L50-R35-1.

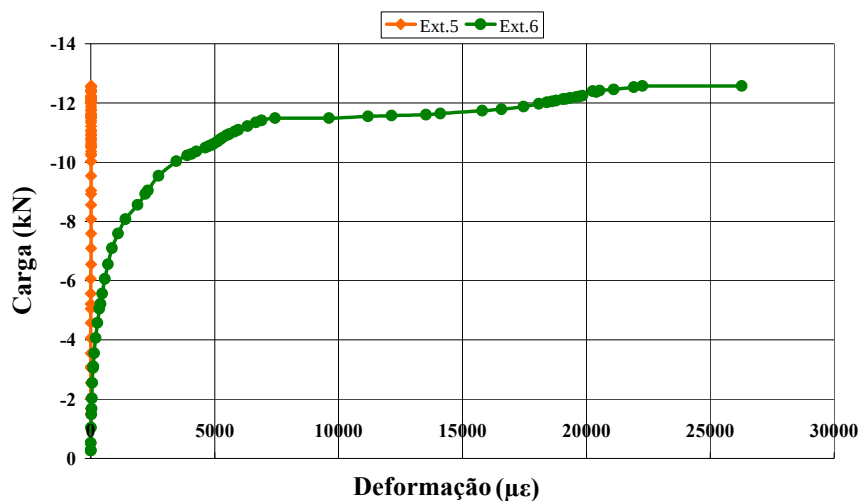


Figura E.7 – Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-prova L50-R35-1.

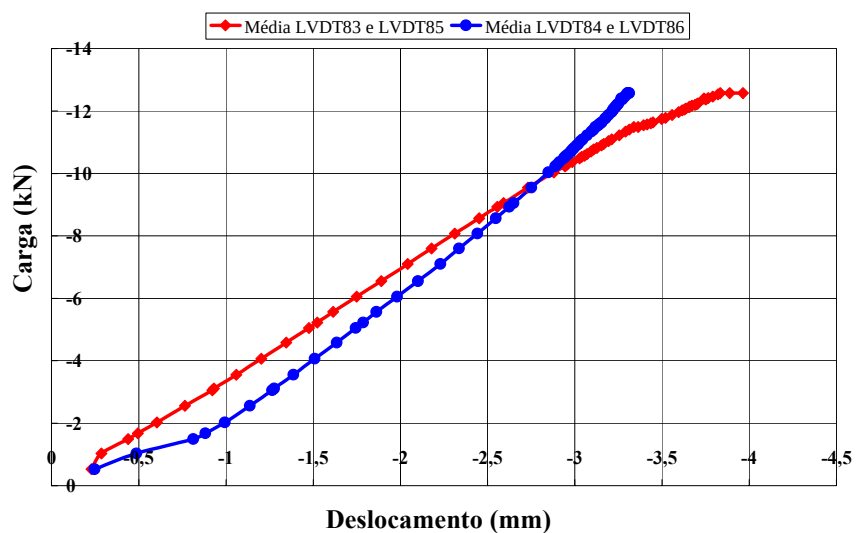


Figura E.8 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L50-R35-1.

E.4. L50-R35-2

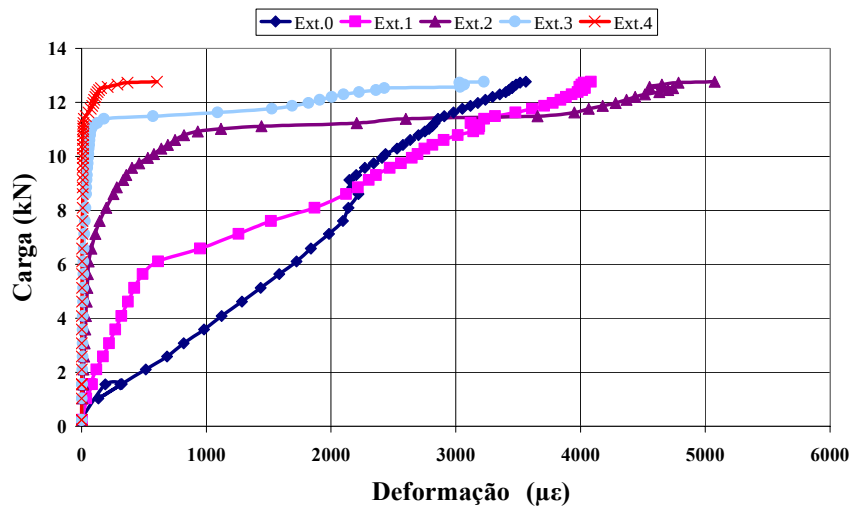
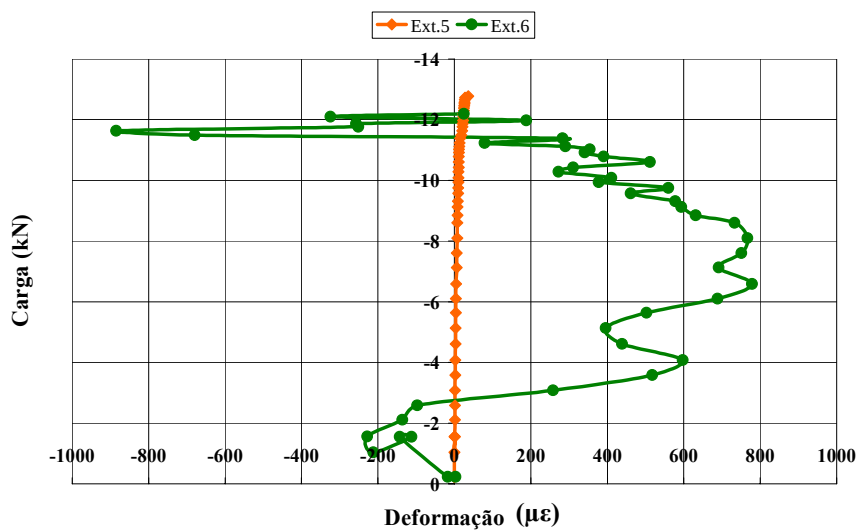


Figura E.9 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo - de-prova L50-R35-2.



* Problema na ligação do extensômetro 6, perda das leituras.

Figura E.10 – Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-prova L50-R35-2.

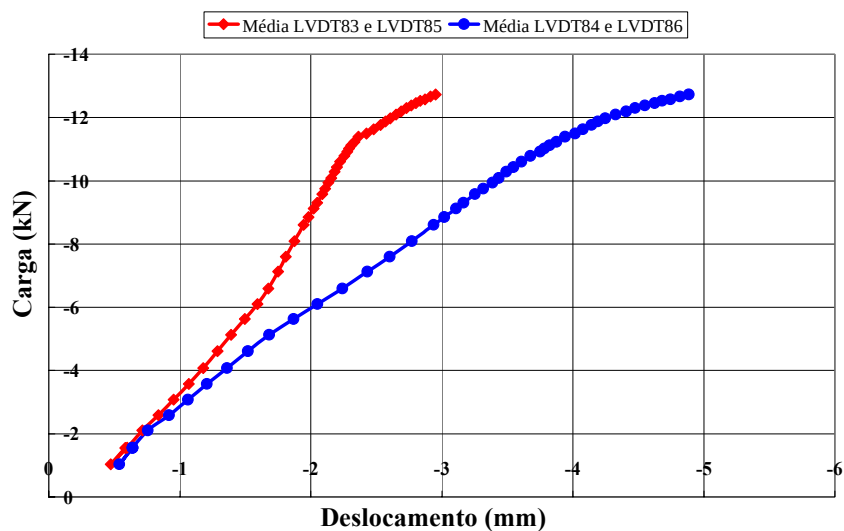


Figura E.11 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L50-R35-2.

E.5. L50-R45-1

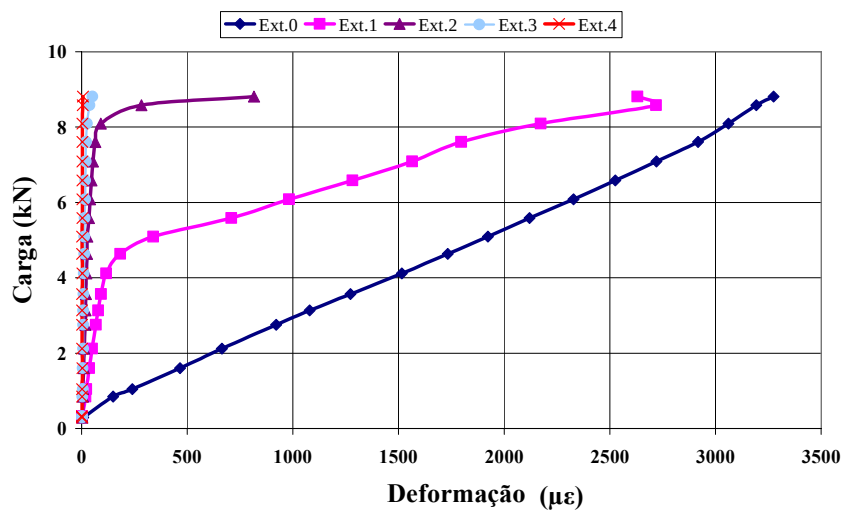


Figura E.12 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L50-R45-1.

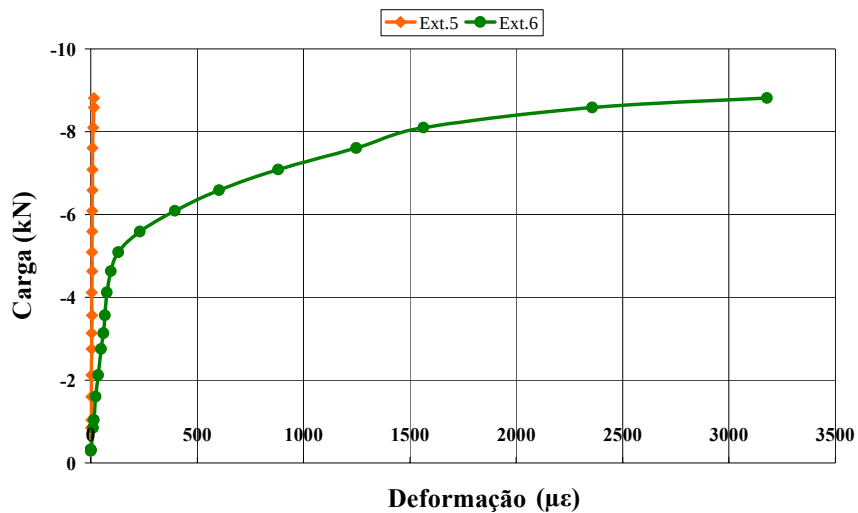


Figura E.13 – Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-prova L50-R45-1.

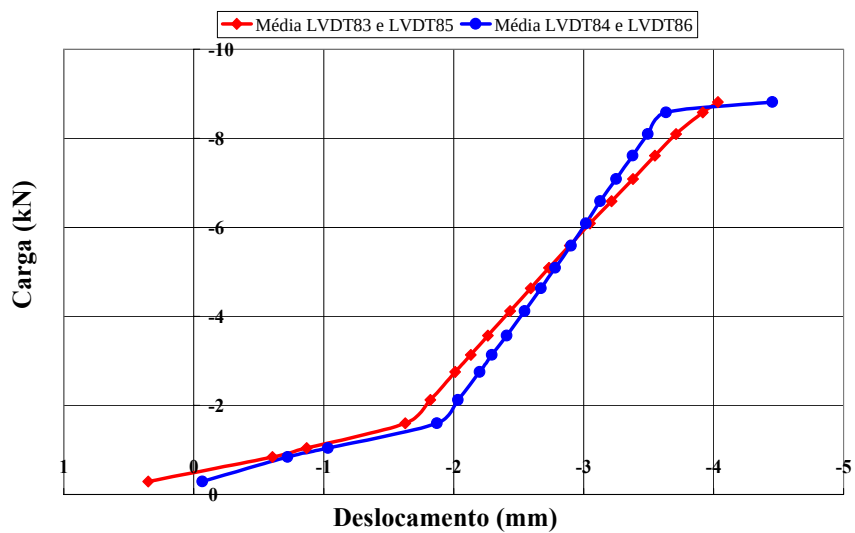


Figura E.14 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L50-R45-1.

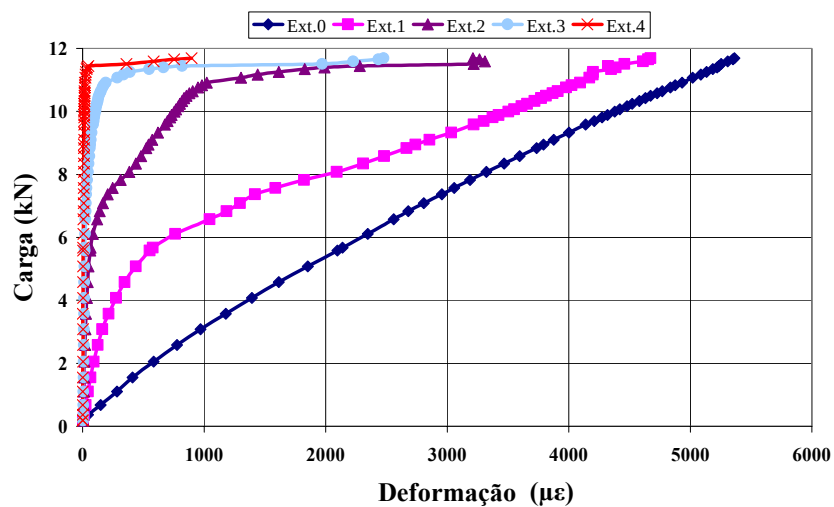
E.6.
L50-R45-2

Figura E.15 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L50-R45-2.

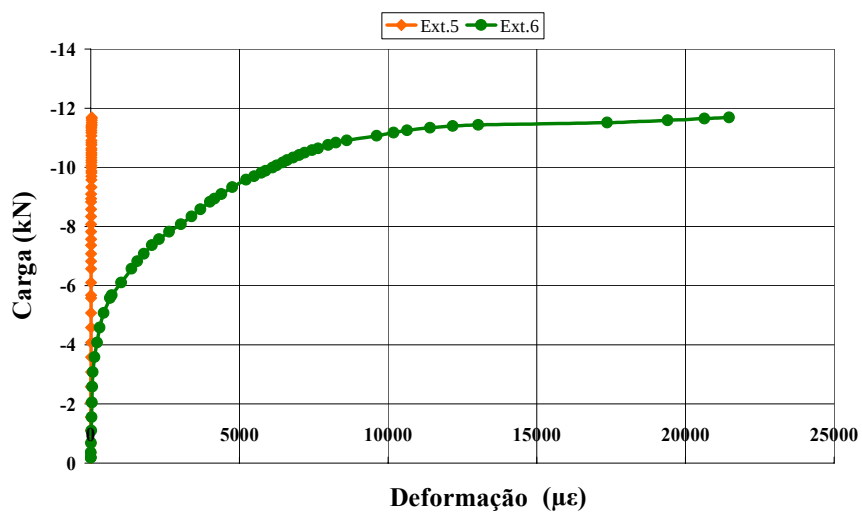


Figura E.16 – Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-prova L50-R45-2.

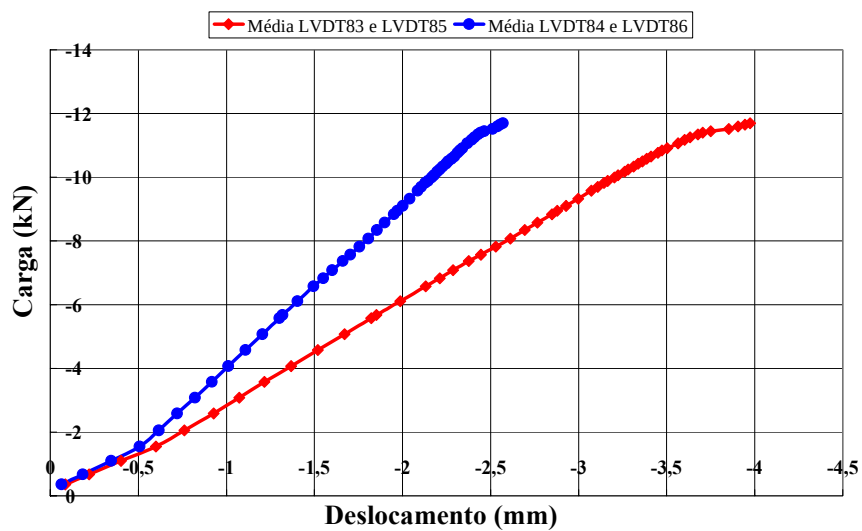


Figura E.17 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L50-R45-2.

E.7. L100-R25

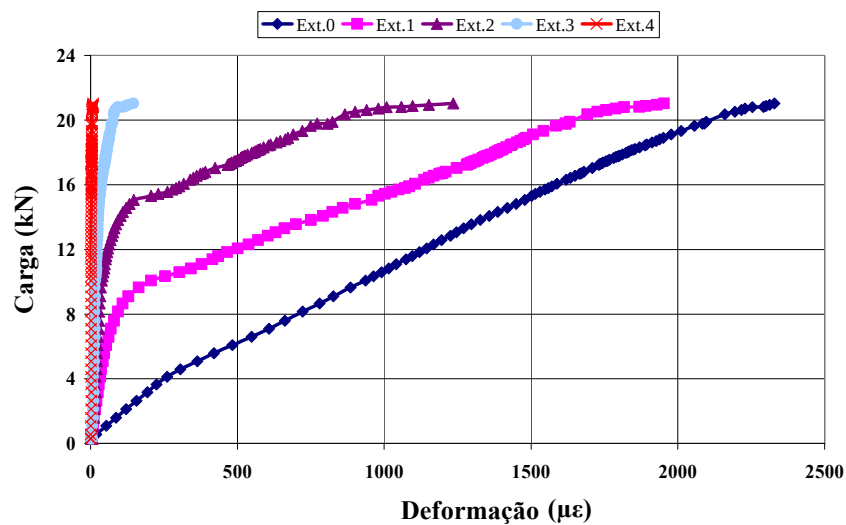


Figura E.18 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L100-R25.

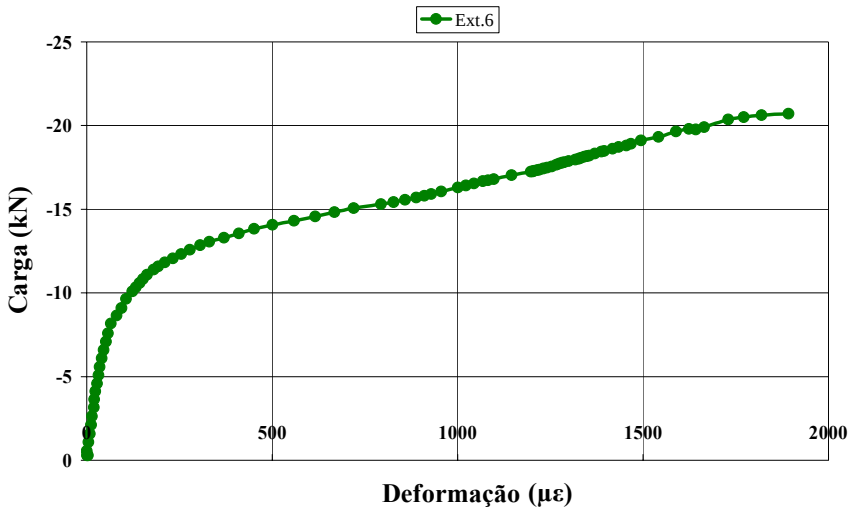


Figura E.19 – Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-prova L100-R25.

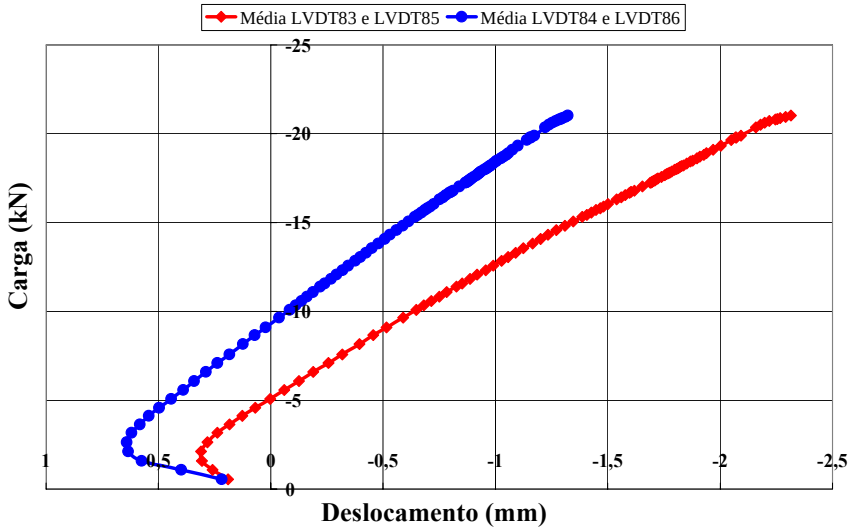
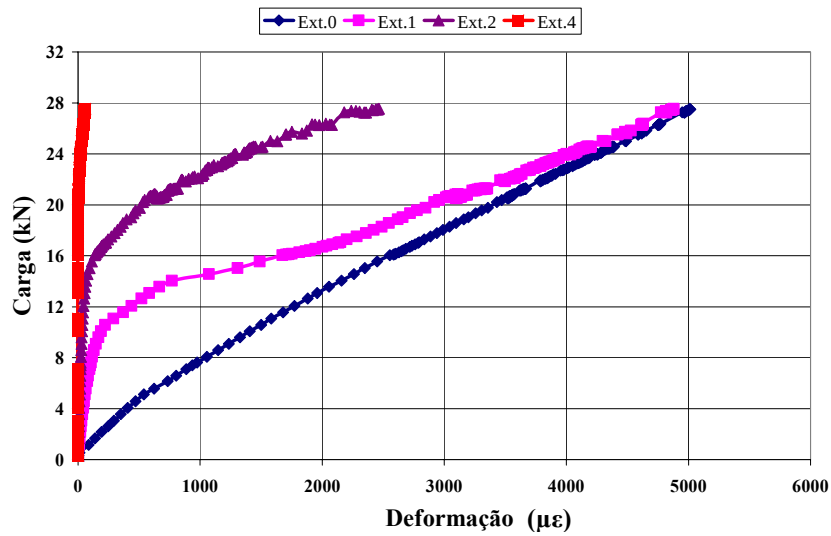


Figura E.20 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L100-R25.

E.8. L100-R35



* Problema na ligação do extensômetro 3, perda das leituras.

Figura E.21 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L100-R35.

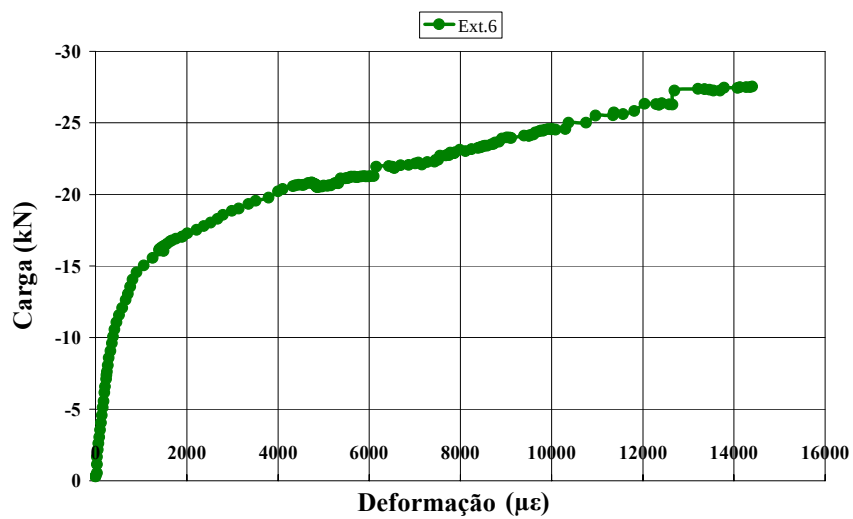


Figura E.22 – Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-prova L100-R35.

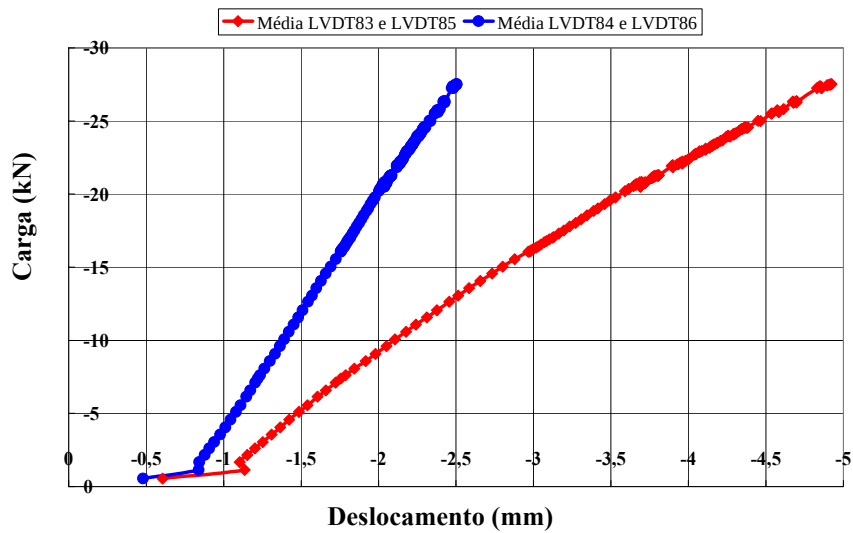


Figura E.23 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L100-R35.

E.9. L100-R45

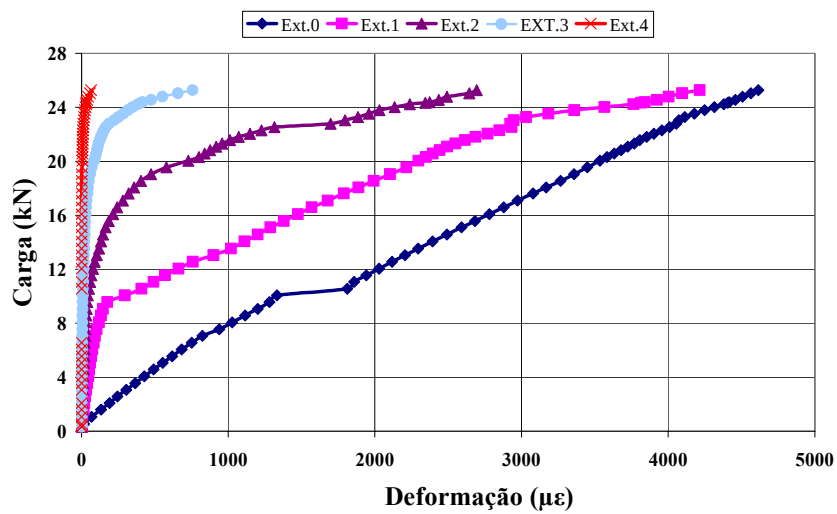


Figura E.24 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L100-R45.

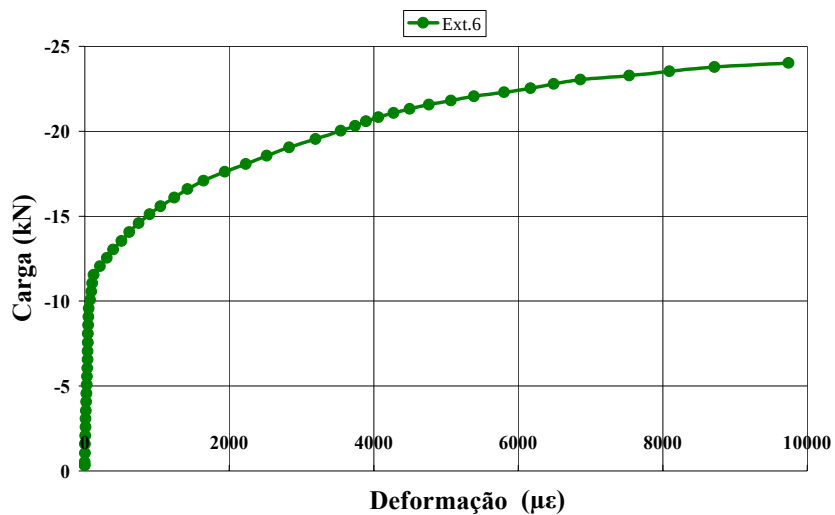


Figura E.25 – Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-prova L100-R45.

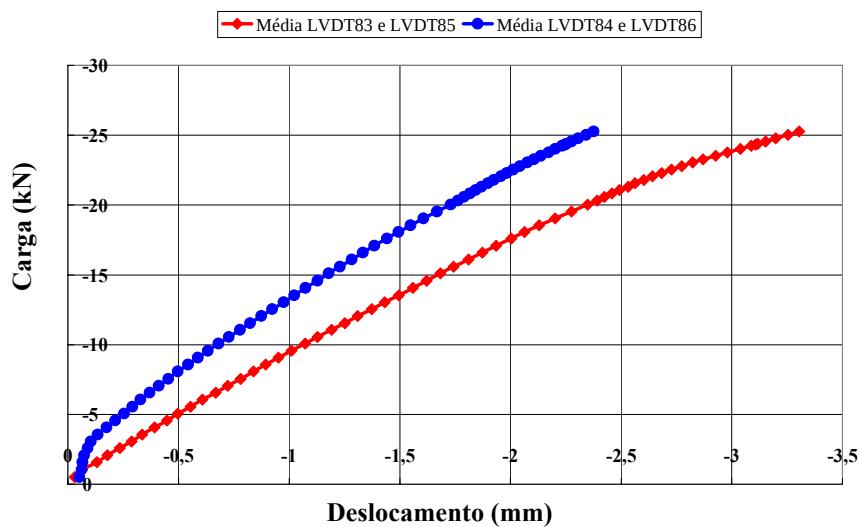


Figura E.26 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L100-R45.

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](#)