

**ADERÊNCIA ENTRE CONCRETO E BARRAS LISAS DE POLÍMERO
REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO**

WEVERTHON VIEIRA BEIRAL

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

DEZEMBRO, 2012

ADERÊNCIA ENTRE CONCRETO E BARRAS LISAS DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO

WEVERTHON VIEIRA BEIRAL

"Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção de título de Mestre em Engenharia Civil".

Orientador: Prof. Sergio Luis González Garcia

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

DEZEMBRO, 2012

ADERÊNCIA ENTRE CONCRETO E BARRAS LISAS DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO

WEVERTHON VIEIRA BEIRAL

"Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção de título de Mestre em Engenharia Civil".

Comissão Examinadora:

Prof. Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares Tavares (D. Sc.) - UERJ

Prof. Luiz Antonio Vieira Carneiro (D. Sc.) - IME

Prof. Dylmar Penteado Dias (D. Sc.) – UENF (Co-orientador)

Prof. Sergio Luis González Garcia (D. Sc.) - UENF (Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus, acima de tudo;

Aos Professores D.Sc. Sergio Luis González Garcia e D.Sc. Dylmar Penteado Dias, pela orientação no decorrer deste trabalho e ao Tenente Coronel do IME D.Sc. Luiz Antonio Vieira Carneiro.

A FAPERJ e a PIBIC-UENF, pelo apoio financeiro, sem o qual seria muito difícil seguir adiante na realização desse trabalho;

Aos professores do LECIV, pelos ensinamentos e estímulos que muito contribuíram com meu desenvolvimento pessoal e da pesquisa, em especial a professora Vânia José Karam;

Aos professores Sérgio Tibana e Fernando Saboya Albuquerque Jr., pelo total apoio. A empresa COGUMELO, pela disponibilidade e fornecimento de material durante toda a realização desse trabalho;

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas e de Geotecnia do LECIV-UENF; José Renato, Miessy, André Luis, Milton e Vanuza, e aos técnicos do LAMAV-UENF; Carlan, Rômulo Leite e Ewerton Meyck, aos amigos de i.c. Paulo Pandino e Hiago.

A minha grande amiga Laura Rebel Moreira Alves que soube como ninguém me dá forças nos momentos difíceis;

Ao meu grande amigo José Luiz Ernandes por ter me aguentado este tempo todo para tornar a parte textual do trabalho bem apresentável e ao Noelço Dias Jr.;

A todos os amigos do LECIV e do LAMAV, como Mário Lucas e Zumira pelo ajuda e apoio, incluindo todas as funcionárias da copa que me forneceram cafezinho;

Aos meus amigos do Porto do Açú que estiveram comigo nesta caminhada, Dario Passos, Sérgio, Antonio Lendini, Kelly Paixão, Perene Matias, Rosiane Oliveira, Bruno Camacho, Flávio Rodriguez, Nelson dos Santos Rodriguez;

Aos grandes amigos da empresa AGF, Otaviano Domício de Souza Neto e Moisés Duarte Soares;

E finalmente a minha família, pelo apoio, incentivo, paciência e carinho em todos os momentos de minha a vida, aos meus pais Celço Alves Beiral e Eucimar Vieira Beiral, meus irmãos Hellen Jannisy e Wellington e em especial a minha avó Jacyr Santana.

Resumo

O concreto armado é um material muito comum nas construções, porém a sua resistência à tração é muito limitada. Barras de aço com as quais o concreto armado é composto tem sido uma armadura eficaz e eficiente até certo ponto. No entanto, há vários fatores que podem levar a fissuras no concreto e à corrosão das armaduras. Recentemente, uma nova tecnologia parece ser uma alternativa promissora em substituição das armaduras de aço para o concreto, os chamados PRFV ou “Polímeros Reforçados por Fibra de Vidro”. Este trabalho teve por finalidade analisar o comportamento da aderência entre barras lisas de PRFV (Fibra de Vidro Impregnada por Polímero) e o concreto, por meio de uma revisão bibliográfica e ensaio de arrancamento seguindo o modelo padrão da RILEM-FIP-CEB (1973) conhecido como *Pull Out Test*. Foram utilizados concreto convencional com dois tipos de resistência à compressão, 47 MPa e 58 MPa. Foram consideradas as influências dos parâmetros como a resistência à compressão do concreto, os diâmetros das barras de PRFV e o componente das barras (fibra e matriz). As análises foram baseadas nas curvas que descrevem o comportamento da perda de aderência entre o concreto e a barra de PRFV, das tensões de arrancamento da barra de PRFV do maciço de concreto e das características apresentadas pelos corpos de prova no decorrer e no final do ensaio. Nos modelos experimentais de arrancamento pode-se perceber a influência dos parâmetros analisados. Obteve-se neste trabalho uma caracterização físico-química das barras analisadas, identificando dois tipos de fibra, tipo C e E, e como matriz a resina poliéster isoftálica. Nos ensaios de aderência do concreto-barra lisa de PRFV, notou-se o efeito do diâmetro, da resistência à compressão e do componente das barras lisas. Na comparação dos resultados obtidos com os existentes na literatura, notou-se a grande dispersão de resultados da literatura, referente à tensão máxima *versus* deslocamento, observando tensões máximas muito inferiores aos da literatura consultada.

Palavras-chave: barras de PRFV, aderência barra-concreto, concreto convencional, *pull out test*, arrancamento, lisa.

Abstract

The concrete is a very common material in construction, but its tensile strength is quite limited. Steel bars with which the reinforced concrete compressive a reinforcement has been effective and efficient to a certain extent. However, there are several factors that can lead to cracks in the concrete and reinforcement corrosion. Recently, a new technology seems to be a promising alternative in place of steel reinforcement for concrete, GFRP, or so-called "Fiber Reinforced Polymer Glass". This work was intended to analyze the behavior of bond between smooth bars of Fiber Reinforced Polymer Glass and concrete, through a literature review and testing pull out following the standard model RILEM-CEB-FIP (1973) known as Pull Out Test. Were used conventional with concrete two types of compressive strength, 47 MPa and 58 MPa. Were considered the influences of parameters such as the compressive strength of the concrete, the diameters of the bars and the FRP component of the bars (fiber and matrix). The analyzes were based on curves that describe the behavior of the loss of bond between GRP bars and concrete and characteristics slip by specimens during and at the end of the test. In experimental models pull out can see the influence of the parameters analyzed. Obtained in this work a physico-chemical characterization of the bars analyzed, identifying two types of fiber, type C and E, and as matrix, isophthalic polyester resin. Bond tests of concrete-FRP smooth bar, it was noted the effect of diameter, the compressive strength of the bars and the component smooth bars. Comparing the results with those reported in the literature, it was noted the large dispersion results in the literature, concerning the stress maximum *versus* slip observing maximum stress much lower to the literature.

Keywords: Concrete, GFRP, Steel, Reinforcement, Beam, Shear, Hybrid

Índice

Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de figuras	x
Lista de tabelas.....	xvi
1. Introdução	1
1.1. Considerações iniciais.....	1
1.2. Objetivo	2
1.3. Justificativa.....	2
1.4. Estrutura da Dissertação	4
2. Revisão bibliográfica	6
2.1 Desenvolvimento histórico	6
2.2 Propriedades e características das barras de PRF	8
2.3 Aplicações das barras de PRF no concreto	13
2.4 Aderência entre concreto e armadura de PRFV	17
2.4.1 Considerações iniciais.....	17
2.4.2 Fenômenos de aderência.....	19
2.4.3 Aderência por adesão	20
2.4.4 Aderência por atrito	21
2.4.5 Aderência mecânica.....	22
2.4.6 Fatores que influenciam o comportamento da aderência das barras de PRFV.....	23
2.4.7 Ensaio da aderência.....	26
2.4.8 Avaliação da aderência concreto-barras de PRF com diferentes normas.....	Erro! Indicador não definido.
2.5 Estudos teóricos-experimentais da aderência concreto-barras	36
2.5.1 Aderência concreto-barras de aço	36

2.5.2	Aderência concreto-barras de PRF	38
2.6	Considerações finais.....	54
3.	Programa experimental	55
3.1	Materiais para o ensaio de arrancamento.....	55
3.1.1	Dosagem dos concretos.....	57
3.1.2	Mistura dos materiais constituintes do concreto.....	57
3.1.3	Caracterização mecânica do concreto	58
3.1.4	Caracterizações físicas e químicas das barras de PRFV.....	59
3.2	Ensaio de arrancamento para Concreto-Barras de PRFV	75
3.2.1	Fôrmas.....	75
3.2.2	Corpos de prova.....	76
3.2.3	Moldagem e cura.....	77
3.2.4	Ensaio de arrancamento	78
3.2.5	Instrumentação.....	80
3.2.1	Resultados dos ensaios de arrancamento (<i>Pull Out</i>)	80
3.2.2	Análise dos resultados	86
	Efeito do diâmetro da barra	87
	Efeito da resistência do concreto.....	89
	Efeito do tipo de fibra.....	91
4.	Comparação dos resultados obtidos com os existentes na literatura.....	93
4.1	Efeito do diâmetro da barra.....	93
4.2	Efeito da resistência do concreto	95
4.3	Efeito do tipo de fibra	98
5.	Conclusões e recomendações	99
6.	Referências Bibliográficas	101

Lista de figuras

Figura 2.1 - Seção transversal do compósito de PRFV (ACI 440R, 1996).	7
Figura 2.2 - Modelos de armaduras de PRFV e PRFC disponíveis no mercado (FICO, 2007).	8
Figura 2.3 - Curvas características de tensão-deformação (ACI 440 R, 1996).	11
Figura 2.4 - Montagem da armadura de PRFV (ACI 440R, 1996).	13
Figura 2.5 - Armaduras de PRF utilizadas em hospitais de MRI (ACI 440R, 1996).	14
Figura 2.6 - Edifício hospitalar MRI, San Antonio, Texas (ACI 440R, 1996)...	14
Figura 2.7 - Construção de lajes pré-moldadas, Atlanta, Geórgia (ACI 440R, 1996).	15
Figura 2.8 - Colocação de lajes pré-moldadas, Atlanta, Geórgia (ACI 440R, 1996).	15
Figura 2.9 - Sistema Railway de levitação Magnética, Japão (FIB – TASK GROUP 9.3, 2007).	15
Figura 2.10 - A primeira passarela de concreto somente com armadura de PRFV (FIB – TASK GROUP 9.3, 2007).	16
Figura 2.11 - Curva típica de tensão de aderência média versus deslizamento (achillides,1998 apud FIB 9.3, 2003).	18
Figura 2.12 - Deformação do concreto após a formação de fissuras (GOTO, 1971).	19
Figura 2.13 - Aderência por adesão (FUSCO, 1995).	20
Figura 2.14 - Acabamento da superfície de fios e barras lisas (FUSCO, 1995).	21
Figura 2.15 - Aderência por atrito (FUSCO,1995).	21
Figura 2.16 - Aderência mecânica (FUSCO, 1995).	22
Figura 2.17 - Geometria de uma barra nervurada e a interação mecânica entre a barra e o concreto (TEPFERS, 1979).	22
Figura 2.18 - Disposição geral do ensaio de arrancamento (RILLEM, 1973).	28
Figura 2.19 - Ensaio de arrancamento com anel circunferencial.	29
Figura 2.20 - (a, b,c) Ensaio de flexão em vigas (CEB BC5,1993).	30

Figura 2.21 - Corpo de prova para ensaio de extremo de viga.....	32
Figura 2.22 - Desenho esquemático do corpo de prova.	32
Figura 2.23 - Esquema geral de ensaio desenvolvido pela usp (FUSCO, 1995).....	33
Figura 2.24 - Ensaio de tirantes de concreto (FRANÇA, 2004).	34
Figura 2.25 - Prisma para o ensaio de arrancamento (REHM, 1979).....	35
Figura 2.26 - Prismas para ensaio de arrancamento com barras horizontais (ASTM C-234, 1991).	35
Figura 2.27 - Diagrama esquemático da deformação do concreto ao redor da barra após a formação das fissuras internas causadas por tensões principais de tração (GOTO, 1971).	36
Figura 2.28 - Detalhe da forma para o ensaio de arrancamento (COUTO, 2007).....	39
Figura 2.29 - Modelo montado para execução do ensaio de arrancamento (COUTO. 2007).....	39
Figura 2.30 - (a,b) Modelos de PRFV utilizados (LEE <i>et al.</i> , 2007).	41
Figura 2.31 - Barras ranhuradas de PRFV e de aço com diferentes configurações superficiais (HAO QING-DUO <i>et al</i> , 2007).	44
Figura 2.32 - Curvas tensão-deslocamento de diferentes tipos de barras (HAO QING-DUO <i>et al</i> , 2007).....	45
Figura 2.33 - Curvas tensão-deslocamento com diferentes componentes (HAO QING-DUO <i>et al</i> , 2007).	45
Figura 2.34 - Curvas tensão-deslocamento com diferentes com diferentes diâmetros (HAO QING-DUO <i>et al</i> , 2007).....	45
Figura 2.35 - Curvas tensão-deslocamento com diferentes com diferentes texturas superficiais (HAO QING-DUO <i>et al</i> , 2007).....	45
Figura 2.36 - Curvas tensão-deslocamento com diferentes espaçamentos de ranhuras (HAO QING-DUO <i>et al</i> , 2007).	46
Figura 2.37 - Curvas tensão-deslocamento com diferentes alturas de ranhuras (HAO QING-DUO <i>et al</i> , 2007).	46
Figura 2.38 - Curvas tensão-deslocamento com diferentes larguras nas ranhuras (HAO QING-DUO <i>et al</i> , 2007).	46
Figura 2.39 - Modelos de barras ensaiadas (BAENA <i>et al.</i> , 2009).	50

Figura 2.40 - Barras ensaiadas na pesquisa (HARAJILI <i>et al</i> , 2011).....	51
Figura 2.41 – <i>Set up</i> do ensaio (HARAJILI <i>et al</i> , 2011).	52
Figura 3.1 - Ensaio de tração na flexão.	59
Figura 3.2 - Ensaio de tração por compressão diametral.	59
Figura 3.3 - Ensaio à compressão simples.	59
Figura 3.4 - Barras de PRFV.	59
Figura 3.5 - Processo de preparação das amostras.	60
Figura 3.6 - Amostras no MEV.....	60
Figura 3.7 – Resultados da microscopia de varredura de forma qualitativa e quantitativa do modelo da barra de diâmetro 6,4 mm; a) pontos analisados, aumento de 1000X; b) microscopia para identificação do tipo de fibra e resina, aumento de 1500X; c) microscopia para teor de fibra, aumento de 200X; d) qualitativo do ponto 4.	62
Figura 3.8 – Resultados da microscopia de varredura de forma qualitativa e quantitativa do modelo da barra de diâmetro 6,6 mm; a) pontos analisados, aumento de 100X; b) microscopia para identificação do tipo de fibra e resina, aumento de 1500X; c) microscopia para teor de fibra, aumento de 200X; d) qualitativo do ponto 3.	63
Figura 3.9 – Resultados da microscopia de varredura de forma qualitativa e quantitativa do modelo da barra de diâmetro 7,1 mm; a) pontos analisados, aumento de 1000X; b) microscopia para identificação do tipo de fibra e resina, aumento de 1500X; c) microscopia para teor de fibra, aumento de 200X; d) qualitativo do ponto 1.	64
Figura 3.10 – Resultados da microscopia de varredura de forma qualitativa e quantitativa do modelo da barra de diâmetro 7,3 mm; a) pontos analisados, aumento de 1000X; b) microscopia para identificação do tipo de fibra e resina, aumento de 1500X; c) microscopia para teor de fibra, aumento de 200X; d) qualitativo do ponto 3.	65
Figura 3.11 – Resultados da microscopia de varredura de forma qualitativa e quantitativa do modelo da barra de diâmetro 8,3 mm; a) pontos analisados, aumento de 1000X ; b) microscopia para identificação do tipo de fibra e resina, aumento de 1500X; c) microscopia para teor de fibra, aumento de 200X; d) qualitativo do ponto 1.	66

Figura 3.12 – Resultados da microscopia de varredura de forma qualitativa e quantitativa do modelo da barra de diâmetro 8,6 mm; a) pontos analisados, aumento de 1000X; b) microscopia para identificação do tipo de fibra e resina, aumento de 1500X; c) microscopia para teor de fibra, aumento de 200X; d) qualitativo do ponto 1.	67
Figura 3.13 – Resultados da microscopia de varredura de forma qualitativa e quantitativa do modelo da barra de diâmetro 9,7 mm; a) pontos analisados; b) microscopia para identificação do tipo de fibra e resina; c) microscopia para teor de fibra; d) qualitativo do ponto 3.	68
Figura 3.14 – Amostras das barras de PRFV para o ensaio de <i>FTIR</i>	70
Figura 3.15 – Aparelho para o ensaio de <i>FTIR</i>	70
Figura 3.16 – Espectros de <i>FTIR</i> de resina poliéster isoftálica na barra de diâmetro 6,4 mm.	70
Figura 3.17 – Espectros de <i>FTIR</i> de resina poliéster isoftálica na barra de diâmetro 6,6 mm.	71
Figura 3.18 – Espectros de <i>FTIR</i> de resina poliéster isoftálica na barra de diâmetro 7,1 mm.	71
Figura 3.19 – Espectros de <i>FTIR</i> de resina poliéster isoftálica na barra de diâmetro 7,3 mm.	72
Figura 3.20 – Espectros de <i>FTIR</i> de resina poliéster isoftálica na barra de diâmetro 8,3 mm.	72
Figura 3.21 – Espectros de <i>FTIR</i> de resina poliéster isoftálica na barra de diâmetro 8,6 mm.	73
Figura 3.22 – Espectros de <i>FTIR</i> de resina poliéster isoftálica na barra de diâmetro 9,7 mm.	73
Figura 3.23 – Espectros de <i>FTIR</i> de resina poliéster isoftálica apresentadas nas amostras de PRFV.	74
Figura 3.24 – Representação do poliéster isoftálica.	74
Figura 3.25 - Detalhamento da fôrma nos ensaios de arrancamento.	76
Figura 3.26 - Detalhe interno da fôrma do corpo de prova.	76
Figura 3.27- Corpos de prova ensaiados (a) 58 MPa e de (b) 47 MPa	77
Figura 3.28 - Concretagem dos corpos de prova.....	77

Figura 3.29 - Processo de fabricação dos corpos de prova: preparação das fôrmas (a); concretagem dos corpos de prova (b).....	78
Figura 3.30 – Primeiro dia após concretagem dos corpos de prova.....	78
Figura 3.31 – Esquema para o ensaio de arrancamento: (a) corpo de prova na prensa e placa metálica; (b) sistema de aquisição de dados.....	79
Figura 3.32 – Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento dos corpos de prova da série Conc47B6,4.....	81
Figura 3.33 – Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento dos corpos de prova da série Conc47B8,3.....	81
Figura 3.34 – Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento dos corpos de prova da série Conc58B6,4.....	82
Figura 3.35 – Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento dos corpos de prova da série Conc58B6,6.....	82
Figura 3.36 – Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento dos corpos de prova da série Conc58B8,3.....	83
Figura 3.37 – Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento dos corpos de prova da série Conc58B8,6.....	83
Figura 3.38 – Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento da média dos corpos de prova das séries Conc47B6,4, e Conc47B8,3.....	84
Figura 3.39 – Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento da média dos corpos de prova das séries Conc47B6,4, Conc47B6,6, Conc47B8,3 e Conc47B8,6.	84
Figura 3.40– Curvas tensão <i>veusus</i> deslocamento da média dos corpos de prova da série Conc58B6,6.....	86
Figura 3.41 – Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento de barras com diferentes diâmetros das séries Conc47B6,4, e Conc47B8,3.....	88
Figura 3.42 – Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento de barras com diferentes diâmetros das séries Conc58B6,4, Conc58B6,6 e Conc58B8,3.	88
Figura 3.43 – Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento de barras com diferentes resistências à compressão do concreto das séries Conc58B6,4 e Conc47B6,4.....	89
Figura 3.44 – Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento de barras com diferentes resistências à compressão do concreto das séries Conc58B6,6 e Conc47B6,4.....	90
Figura 3.45 – Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento de barras com diferentes resistências à compressão do concreto das séries Conc58B8,3 e Conc47B8,3.....	90

Figura 3.46 – Curvas tensão vs deslocamento de barras com diferentes tipos de fibra das séries Conc58B8,3 e Conc58B8,6.....	92
Figura 4.1 – Dados de tensão máxima <i>versus</i> deslocamento de corpos de prova com diferentes diâmetros de barras lisas e PRFV-WH (com ranhuras) presentes na literatura.....	94
Figura 4.2 – Dados de tensão máxima <i>versus</i> deslocamento de corpos de prova com diferentes diâmetros com barras lisas e PRFV-CS (revestidas com areia), presentes na literatura.....	95
Figura 4.3 - Tensão máxima de aderência <i>versus</i> deslocamento de corpos de prova com diferentes resistências à compressão do concreto, com barras de diâmetros de 8,6 mm e 9 mm presentes na literatura.	96
Figura 4.4 - Tensão máxima de aderência <i>versus</i> deslocamento de corpos de prova com diferentes resistências à compressão do concreto, com barras de diâmetros de 6 mm, 6,4 mm, 6,5 mm e 6,6 mm, presentes na literatura.	97
Figura 4.5 - Tensão máxima de aderência <i>versus</i> deslocamento de corpos de prova com diferentes resistências à compressão do concreto, com barras de diâmetros de 8,6 mm, 8,3 mm e de 8mm, presentes na literatura.	97
Figura 4.6 - Tensão máxima de aderência <i>versus</i> deslocamento de corpos de prova com diferentes fibras, presentes na literatura.....	98

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Resumo do comparativo em valores das propriedades das barras de PRF comparadas com as do aço (ACI 440.1R, 2006).	10
Tabela 2.2 - Propriedades das fibras de vidro utilizadas na fabricação das barras de PRFV (Adaptado da FIB TG 9.3 – 2003).....	12
Tabela 2.3 – Resistência de aderência máxima e o deslocamento (COUTO, 2007).	39
Tabela 2.4 – Amostras ensaiadas (LEE <i>et al.</i> , 2007).....	41
Tabela 2.5 – Resistência de aderência e o deslocamento correspondente (LEE <i>et al.</i> , 2007).	42
Tabela 2.6 – Resultados das amostras dos ensaios de arrancamento (HAO QING-DUO <i>et al.</i> , 2007).	44
Tabela 2.7 – Resultados experimentais das amostras de arrancamento A/B do concreto C2 (BAENA <i>et al.</i> , 2009).	48
Tabela 2.8 - Resultados experimentais das amostras de arrancamento C/D/E do concreto C2 (BAENA <i>et al.</i> , 2009).	49
Tabela 2.9- Resultados experimentais das amostras de arrancamento do concreto C1 (BAENA <i>et al.</i> , 2009).	49
Tabela 2.10- Resultados experimentais das amostras de arrancamento do concreto C1 (BAENA <i>et al.</i> , 2009) (continuação).	50
Tabela 3.1 - Composição granulométrica do agregado miúdo.	56
Tabela 3.2 - Composição granulométrica do agregado graúdo.	56
Tabela 3.3 - Propriedades físicas dos agregado miúdo e graúdo.....	56
Tabela 3.4 - Propriedades físicas dos agregado miúdo e graúdo.....	57
Tabela 3.5 - Ensaios de caracterização do concreto.	58
Tabela 3.6 - Propriedades mecânicas dos corpos de prova obtida aos 45 dias.	58
Tabela 3.7 - Percentual em peso dos elementos químicos da barra de diâmetro 6,4 mm.	62
Tabela 3.8 - Percentual em peso dos elementos químicos da barra de diâmetro 6,6 mm.	63

Tabela 3.9 - Percentual em peso dos elementos químicos da barra de diâmetro 7,1 mm.	64
Tabela 3.10 - Porcentagem da média dos pontos dos elementos analisados da barra de diâmetro 7,3 mm.	65
Tabela 3.11 - Porcentagem da média dos pontos dos elementos analisados da barra de diâmetro 8,3 mm.	66
Tabela 3.12 - Porcentagem da média dos pontos dos elementos analisados da barra de diâmetro 8,6 mm.	67
Tabela 3.13 - Porcentagem da média dos pontos dos elementos analisados da barra de diâmetro 9,7 mm.	68
Tabela 3.14 - Faixas de composição das fibras de vidro comerciais - porcentagem em peso, (ACI 440R, 1996).	69
Tabela 3.15 - Características físicas e químicas da barras de PRFV avaliadas, em peso.	69
Tabela 3.16 - Características dos corpos de prova.	79
Tabela 3.17 - Instrumentos e equipamentos de utilizados no ensaio de arrancamento.	80
Tabela 3.18 - Valores de tensões de aderência para 0,1mm de deslocamento ($\tau_{0,1}$) e de tensão máxima ($\tau_{m\acute{a}x}$).	85

Lista de abreviaturas e símbolos

a	comprimento da viga
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
AR	Álcali-resistente
ASTM	<i>American Society for Testing and Material</i>
Bt	<i>Beam Test</i>
C_b	perímetro da circunferência equivalente da barra de PRF
CEB	<i>Comité Euro-Internacional du Béton</i>
CPP	<i>Concrete Protection Products</i>
CS	<i>Sand Coated</i>
CSA	<i>Canadian Standards Association</i>
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>
f'_c	resistência à compressão do concreto
f_b	resistência de aderência
f_{c45}	resistência à compressão do concreto aos 45 dias
f_{ct}	resistência à tração simples do concreto
f_{ct, sp}	resistência à tração na flexão
f_{ct,sp}	resistência à tração por compressão diametral
FIB	<i>Fédération Internationale Du Béton</i>
F_t	Intensidade da força que solicita a barra

FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectrometry</i>
L	Comprimento de ancoragem
L_b	comprimento de aderência
l_p	comprimento de plastificação
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformers</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira Registrada
∅	diâmetro da barra em mm
POT	<i>Pull-Out Test</i>
PRF	Polímero Reforçado com Fibra
PRFC	Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono
PRFV	Polímero Reforçado com Fibra de Vidro
R_{st}	Força de tração na armadura em Newton;
S	deslocamento
s*	deslocamento no extremo não carregado
TG	<i>Task Group</i>
u	Perímetro da barra
WH	<i>Helically Wrapped</i>
X_m	distância média entre fissuras
z	distância entre a resultante de tração e a resultante de compressão
ρ	relação entre a área de aço e o concreto
τ_{0,1}	resistência de aderência efetiva

$\tau_{\text{máx}}$	tensão máxima de aderência
α_L	Direção longitudinal
α_T	Direção transversal
τ_b	Tensão de aderência média
τ_m	tensão média de aderência
$\tau_{\text{máx}} * (\text{MPa})^{0.5}$	tensão de aderência considerando a influência da resistência à compressão do concreto (f'_c)
τ_r	resistência de aderência residual

1. Introdução

1.1. Considerações iniciais

Nos últimos vinte e cinco anos têm-se assistido a um interesse crescente em relação aos materiais de alto desempenho, tais como concreto de alta resistência, aço de alta resistência e materiais compósitos, dentre outros. Este interesse, inicialmente, estava concentrado na obtenção de resistências mais elevadas e, conseqüentemente, possíveis ganhos em relação a custos.

Porém, é sabido que a durabilidade de um material de uma estrutura é fator crucial na determinação do custo total de uma estrutura ao longo de sua vida útil e, assim, a durabilidade vem ganhando destaque nas pesquisas relativas ao concreto armado.

Em estruturas de concreto armado existem muitos problemas relativos ao custo de manutenção e vida útil, em virtude de problemas relacionados à durabilidade. A utilização de barras não metálicas pode amenizar esse problema para as estruturas citadas acima.

Muitas cidades e capitais são localizadas no litoral brasileiro a qual utiliza-se estes compósitos de PRFV; como exemplo, temos a utilização de passarelas em plataformas fixas de petróleo. Portanto, estudos têm sido realizados no Brasil com uso das barras de PRFV como armadura para estruturas em concreto armado.

A aderência entre as barras de aço e o concreto tem sido estudada há várias décadas, e uma extensa quantidade de trabalhos experimentais e teóricos foram publicados neste sentido. No entanto, as formulações utilizadas nas normas de projeto de estruturas em concreto armado não fazem menção ao uso de outros materiais para armadura, que não seja o aço. Com a introdução das barras de PRFV ou Polímero Reforçado com Fibra de Vidro, utilizadas como armadura para estruturas de concreto, fez surgir a necessidade do desenvolvimento de normas abrangendo o uso de armaduras compostas por diferentes materiais.

Segundo BAKIS *et al.* (1998), a aderência entre as barras de PRF e o concreto é controlada pelas propriedades da barra de PRF, diferente da aderência entre as barras de aço nervuradas e o concreto, onde a resistência à compressão do concreto é o parâmetro controlador.

1.2. Objetivo

O objetivo principal desta pesquisa foi estudar o comportamento da aderência entre barras lisas de fibra de vidro impregnada por polímero (PRFV) e o concreto, por meio de ensaios físicos de arrancamento.

Caracterizar física e quimicamente diferentes tipos de barras lisas de PRFV, analisar a influência do diâmetro, da resistência à compressão do concreto, do tipo de fibra no comportamento do diagrama tensão de aderência versus deslocamento, e por último, avaliar os resultados obtidos nesta pesquisa com os da literatura consultada com relação à tensão máxima de aderência *versus* deslocamento para que se possa está utilizando estas barras lisas como armadura transversal em estruturas de concreto armado.

1.3. Justificativa

Segundo o ACI 440 1R (ACI, 2006), o termo compósito pode ser aplicado a qualquer combinação de dois ou mais materiais separados por uma interface identificável entre eles.

As barras de compósitos são usadas como armadura para o concreto, da mesma forma que as barras de aço, principalmente em áreas onde os ambientes são agressivos para o aço. Sujeito à corrosão, por íons de cloreto, o aço aumenta de volume de 2,5 até 5 vezes seu tamanho original, fissurando, dessa forma, o concreto, que normalmente apresenta baixa resistência à tração e boa resistência à compressão.

A aplicação de barras de compósitos é exatamente igual à aplicação de barras de aço em qualquer concreto. A diferença está em que o aço não minimiza o problema da corrosão, ou seja, quando a corrosão atinge o aço, ocorre fissuração do concreto e obriga a execução de reparos e manutenção. As barras de compósitos dispensam reparos e manutenção e dão vida longa ao concreto. A única diferença está no cálculo estrutural a ser feito, pois as seções de barras de aço não são iguais às seções das barras de compósitos para uma mesma peça de concreto. Como referência, esse cálculo pode ser regido pela ACI 440 1R (ACI, 2006). Outra vantagem é que as barras de compósitos dispensam cobrimentos maiores de concreto, exigidos para barras de aço instaladas em ambientes agressivos.

Em resumo, as principais vantagens das barras poliméricas de fibras de vidro são:

- alta resistência à tração (o dobro da resistência do aço);
- menor peso (um quarto do peso do aço, proporcionando instalações mais rápidas e menores custos de envio);
- resistente à corrosão;
- resistente à água do mar, cloretos, a maioria dos produtos químicos, sais e chuvas ácidas;
- material não condutor de eletricidade;
- transparência aos campos magnéticos e frequências de rádio;
- menor espaço para armazenamento na obra;
- menor custo de mão-de-obra;
- redução de custos de reparação e manutenção;
- maior longevidade das obras de construção civil;
- menor custo de transporte.

A substituição da armadura metálica por armadura não-metálica em algumas construções é uma tendência em países como EUA, Japão, Canadá e Inglaterra. No Brasil ainda não existem obras com este tipo de armadura, mas poderia ser uma substituição vantajosa no que diz respeito à crescente corrosão das armaduras no litoral brasileiro.

No entanto, os reduzidos dados experimentais sobre barras de PRF ainda não avaliam exatamente o comportamento dessas barras juntamente com o concreto. São necessários inúmeros estudos a fim de se obter uma norma de projeto de estruturas em concreto armado e normas que incluam disposições relacionadas ao reforço em elementos estruturais com armadura não-metálica, já que as normas que tratam de armadura de aço não podem ser usadas diretamente, tendo em vista que estas barras possuem diferentes propriedades mecânicas e conformação superficial.

Recentemente no Brasil algumas indústrias iniciaram a produção e comercialização de barras e telas de PRF. Porém, não existem normas brasileiras que abordam o assunto. Em função disto, surge a necessidade de maiores informações a respeito das propriedades deste material e de seu comportamento quando associado ao concreto.

Desse modo, a busca por informações a respeito das propriedades das barras não-metálicas e, principalmente, do comportamento da aderência entre estas barras e o concreto justificam esta pesquisa. A avaliação das características de aderência das armaduras de PRF é de primeira importância no projeto de peças do concreto armado.

1.4. Estrutura da Dissertação

No primeiro capítulo foi feita uma introdução com a abordagem geral do assunto, destacando a relevância do desenvolvimento do trabalho, além de expor a justificativa e os objetivos buscados com a produção deste trabalho. Os demais capítulos foram organizados de forma a promover um maior conhecimento sobre o comportamento da aderência concreto-barras de PRFV.

No segundo capítulo encontra-se a revisão bibliográfica, etapa que aprofundou e expandiu os conhecimentos essenciais para nortear a realização de todas as etapas do trabalho. Neste capítulo, são apresentadas o histórico da utilização do material na construção civil e algumas obras realizadas em diversos países e as propriedades mecânicas e características das barras de PRF com ênfase nas barras de PRFV. Ainda neste capítulo é apresentado o comportamento da aderência, mostrando os principais mecanismos e mobilização, dando enfoque à aderência entre as barras de PRFV e o concreto. Na aderência concreto-barras de PRFV são mostrados os fenômenos de aderência, os fatores influentes, os principais ensaios de aderência das barras de aço realizados no meio científico, podendo ser extrapolados para as barras de PRF, a avaliação de normas internacionais desta aderência e por fim os estudos teóricos-experimentais da aderência concreto-barras de aço e PRFV.

No terceiro e quarto capítulos, há a descrição de todos os aspectos relativos ao programa experimental: são apresentados os materiais utilizados, a caracterização dos materiais, as metodologias empregadas nos ensaios, a instrumentação utilizada e preparação dos modelos para ensaios de arrancamento (produção de formas, produção dos concretos e corpos de prova) e por fim a análise dos resultados.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões dos resultados alcançados, analisando-os com as informações obtidas na revisão bibliográfica, além de algumas sugestões para trabalhos futuros.

No sexto capítulo abordam-se as referências utilizadas no desenvolvimento do trabalho.

2. Revisão bibliográfica

A seguir, serão abordados aspectos importantes sobre os Polímeros Reforçados com Fibras (PRF), tais como: seu desenvolvimento histórico, suas principais propriedades e características, suas aplicações no concreto, procedimentos para avaliar a aderência do concreto com barras de aço e PRF, segundo diferentes normas e estudos teóricos – experimentais realizados neste sentido.

2.1 Desenvolvimento histórico

A utilização dos compósitos de PRF (Polímero Reforçado por Fibra) se expandiu ao final da Segunda Guerra Mundial. Estes foram utilizados nas indústrias eletrônicas, aeroespacial e automobilística durante várias décadas, mas sua aplicação na Engenharia Civil, como armadura para o concreto armado, é relativamente recente (UMOTO *et al.*, 2002).

A expansão do sistema rodoviário nos Estados Unidos na década de 1950 aumentou a necessidade de manutenção anual das estradas; além disso, a aplicação de sal se tornou comum em pontes durante o período de neve. Como resultado disso, a armadura de aço, presente nessas estruturas, ficou submetida à corrosão. Várias pesquisas foram realizadas com a finalidade de solucionar o problema, incluindo cobertura galvanizada, concreto polimérico, cobertura com epóxi e barras de PRFV (Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro). No entanto, as barras de PRFV não foram consideradas uma solução economicamente viável até o final da década de 1970 (ACI 440 1R, 2006).

A indústria norte-americana “Marshall Vega” desenvolveu barras de PRFV como armaduras para estruturas de concreto. Inicialmente, as barras de PRFV foram consideradas uma alternativa de substituição das barras de aço em concretos poliméricos, devido a não compatibilidade entre os coeficientes de expansão térmica do concreto polimérico e das barras de aço (ACI 440 1R, 2006).

Nos anos de 1980 ocorreu a demanda por barras não metálicas na América do Norte, principalmente em obras hospitalares onde são necessários materiais não condutores magnéticos e, com isso, as barras de PRF se tornaram uma solução para este tipo de construção. Em virtude do maior estudo e conhecimento das

propriedades das barras não metálicas, este tipo de armadura passou a ser usada em outros tipos de construção, especialmente, estruturas costeiras, pistas de decolagem dos aeroportos e laboratórios eletrônicos (BROWN e BARTHOLOMEW, 1996 *apud* ACI 440 1R, 2006).

Nesta busca por novos materiais, os PRF's começaram a ser empregados, pela primeira vez, para armar estruturas de concreto na década de 1950 (SILVA *et al.*, 2000). Já o seu desenvolvimento como armaduras para utilização em concreto deu-se em 1960, na forma de PRFV (Polímero Reforçado com Fibra de Vidro), sem muito sucesso, tendo sido retomadas as pesquisas neste assunto depois de vinte anos.

Apenas há alguns anos atrás, o mercado da construção começou a usar, como armaduras estruturais, os chamados PRF's, geralmente em combinação com outros tipos de materiais de construção, como madeira, aço e concreto.

Os PRF's apresentam-se na forma de barras, cabos de protensão, lâminas, mantas ou folhas flexíveis, perfis, etc.

O uso de PRFV surgiu como uma solução para prevenção da deterioração do concreto, como as decorrentes das fissurações provocadas pela expansão devido à corrosão do aço. Estes materiais compósitos são constituídos por fibras e matriz, cada uma com características mecânicas distintas. A função das fibras é de servir como reforço mecânico da matriz (resina), que podem ser de poliéster, vinil-éster ou epóxi. Referente à capacidade das barras, a matriz não contribui de maneira significativa, mas faz, no entanto, com que as fibras tensionadas se mantenham estáveis. As matrizes são importantes na proteção contra a abrasão e ataques químicos. Na Figura 2.1, é apresentada a seção transversal do compósito de PRFV.

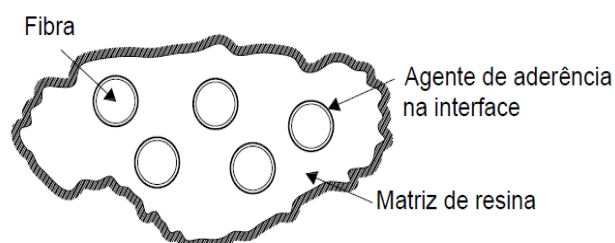


Figura 2.1 - Seção transversal do compósito de PRFV (ACI 440R, 1996).

A seguir apresentam-se algumas propriedades e características das barras de PRF.

2.2 Propriedades e características das barras de PRF

Os PRF's possuem várias propriedades aprimoradas, em relação aos materiais tradicionais, tais como: a alta relação resistência-peso, a alta relação rigidez-peso, a flexibilidade no projeto, a não-corrosividade, a alta resistência à fadiga e a facilidade de aplicação. Os compósitos de PRF têm chamado atenção, também, para o uso em estruturas protendidas, pois possuem alta resistência à tração, baixa fluência e módulo de elasticidade moderado. Como os PRFs são não magnéticos, não corrosivos e resistentes a vários tipos de produtos químicos, eles têm sido cada vez mais utilizados no reforço externo das atuais estruturas de concreto. A Figura 2.2 apresenta algumas das diferentes configurações de armaduras de PRF'S disponíveis no mercado.

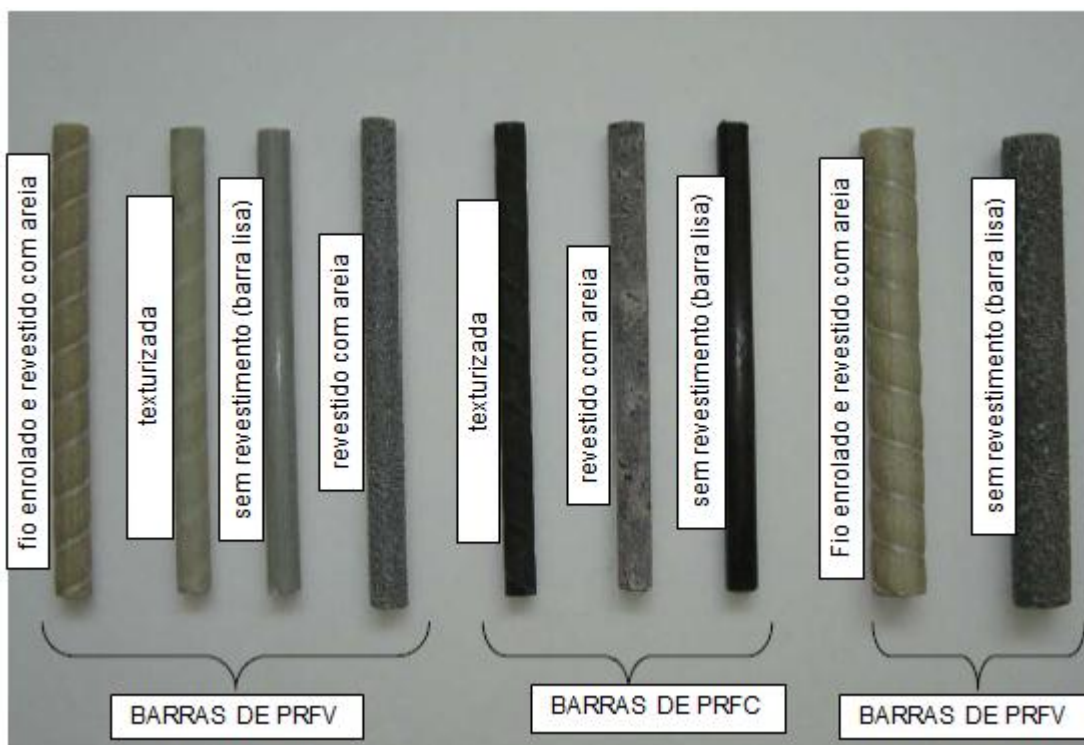


Figura 2.2 - Modelos de armaduras de PRFV e PRFC disponíveis no mercado (FICO, 2007).

Uma breve descrição a respeito das propriedades físicas e mecânicas pertinentes às barras de PRFV serão feitas a seguir, comparando-as com as de aço:

Resistência à tração: Barras de PRFV são fortemente anisotrópicas, com eixo longitudinal sendo geralmente o mais forte. Barras de PRFV apresentam maior resistência à tração do que as barras de aço. A resistência à tração é em função do

diâmetro da barra. Pesquisas relataram que a resistência à tração diminui com aumento do diâmetro da barra. As fibras localizadas perto do centro da seção transversal das barras não estão submetidas a tensões, como as fibras que estão perto da superfície exterior destas barras. Esse fenômeno resulta em redução da resistência e eficiência em barras corrugadas de diâmetro maiores. Fibras de vidro não são relativamente afetadas por altas ou baixas temperaturas. No entanto, a resistência à tração das barras de PRFV é afetada por temperaturas elevadas. Pesquisas mostram resultados de perda de resistência à tração de cerca de 30, 45, 60 e 70% de referência de resistência à tração, para temperaturas de 100, 200, 300°C e 400°C, respectivamente (BENMOKRANE *et al.*, 1995).

Resistência à compressão: Geralmente, a resistência à compressão das barras de PRFV é muito inferior à resistência à tração destas barras, sendo aproximadamente 40% a 60% da resistência à tração. No entanto, a resistência à compressão das barras de PRFV não é uma preocupação principal para a maioria das aplicações. Resistência à compressão maior é esperada para barras de resistência à tração maior (CHAALAL *et al.*, 1995).

Módulo de Elasticidade: Barras de PRFV apresentam comportamento elástico-linear até a ruptura. O módulo de elasticidade à tração das barras de PRFV é muito menor do que do aço, aproximadamente, 25%. O módulo de elasticidade à compressão das barras de PRFV é muito menor do que o módulo de elasticidade à tração, aproximadamente, 83% a 89%. O módulo de elasticidade à tração típica das barras de PRFV está no intervalo de 41 GPa a 55 GPa (EHSANI *et al.*, 1993).

Peso: O peso específico das barras de PRFV é de aproximadamente um quarto do peso das barras de aço. Isso facilita o transporte e o manuseio (BENMOKRANE *et al.*, 1995).

Não condutividade e expansão térmica: Barras de PRFV têm excelentes propriedades isolantes elétricas e magnéticas. Portanto, podem ser usadas para aplicações onde é requerido isolamento elétrico e magnético. O coeficiente de dilatação térmica das barras de PRFV é muito semelhante ao do aço, portanto, podem ser usadas para estruturas de concreto (AITEIN *et al.*, 1991).

Fluência: As fibras de vidro possuem excelente resistência à fluência; no entanto, isto não é verdade para a maioria das resinas. Portanto, o volume e a orientação das fibras de vidro têm grande influência sobre o comportamento da fluência das barras de PRFV. Foi relatado que, para um tipo de barra de PRFV, as

deformações adicionais causadas pela fluência são em torno de 3% das deformações elásticas iniciais (NANNI *et al.*, 1993).

Resistência à fadiga: A resistência à fadiga das armaduras de PRFV é geralmente menor do que a do aço. No entanto, barras de PRFV não são afetadas pela fadiga quando tensionadas não mais que 50% da sua resistência última. Na Tabela 2.1, são mostrados valores das propriedades físicas e mecânicas das barras de aço em comparação com as barras de PRF (MALLICK *et al.*, 1988).

Tabela 2.1 - Resumo do comparativo em valores das propriedades das barras de PRF comparadas com as do aço (ACI 440.1R, 2006).

Propriedades das barras de PRF		Aço	PRFV	PRFC	PRFA
Densidade das barras (g/cm ³)		7,9	1,25 a 2,10	1,50 a 1,60	1,25 a 1,40
Coeficiente de expansão térmica (x10 ⁻⁶ /°C)	Direção longitudinal, α_L	11,7	6,00 a 10,00	9,00 a 0	-6,00 a -2,00
	Direção transversal, α_T	11,7	21,0 a 23,0	74,0 a 104,0	60,0 a 80,0
Tensão / Escoamento (MPa)		276 a 517	-----	-----	-----
Resistência / Tração (MPa)		483 a 690	483 a 1600	600 a 3690	1720 a 2540
Módulo de elasticidade (GPa)		200	35 a 51	120 a 580	41 a 125,0
Deformação de escoamento (%)		0,14 a 0,25	-----	-----	-----
Deformação de Ruptura (%)		6,0 a 12,0	1,2 a 3,1	0,5 a 1,7	1,9 a 4,4

Apesar de algumas hipóteses de cálculo para as barras de aço no concreto serem também aplicadas para as barras em PRFV, deve-se observar que não há patamar de escoamento nas barras de PRFV, ou seja, diferente do aço, as barras de PRFV possuem ruptura frágil. A Figura 2.3 apresenta algumas curvas características de tensão vs deformação de diversas fibras sintéticas comparadas ao aço, para armadura estrutural e para protensão.

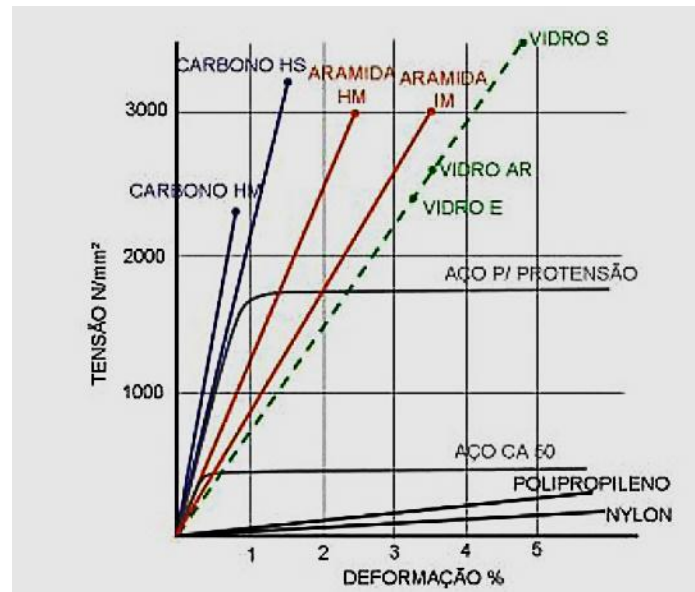


Figura 2.3 - Curvas características de tensão-deformação (ACI 440 R, 1996).

Em termos de ductilidade, que representa o nível de deformação plástica antes da ruptura do material, o comportamento tensão *versus* deformação do aço passivo apresenta o escoamento quando submetido a tensões de tração que causem deformações aproximadamente superiores a 2%. O PRFV apresenta um comportamento tensão vs deformação elástico-linear até próximo da tensão última, resultando na ruptura brusca, ou seja, sem patamar de escoamento. Segundo LEES E BURGOYNE (1999), a diferença no comportamento tensão vs deformação do aço e do PRFV impede a aplicação do tradicional conceito de ductilidade em estruturas de concreto armado que recebem esse tipo de armadura, pois este conceito tradicional parte do princípio de que um material com elevada deformação plástica ou material dúctil não apresenta ruptura frágil, mas o PRFV, além de ser dúctil, apresenta-se como um material de ruptura frágil.

Em relação à aderência, as barras de PRFV possuem propriedades anisotrópicas e propriedades mecânicas distintas das do aço, o que acaba influenciando o comportamento da aderência.

A ruptura da aderência para as barras de PRFV pode-se desenvolver na interface das sucessivas camadas de fibra, podendo ocorrer cisalhamento de toda ou de parte da superfície rugosa da barra. O aumento da resistência do concreto não influencia, de maneira significativa, a resistência de aderência; esta depende apenas das propriedades da barra. A grande quantidade de parâmetros que

influenciam este comportamento da aderência o torna ainda não totalmente compreendida.

No que se refere ao valor, o alto custo relativo do PRFV em relação a outros materiais convencionais pode ser considerado como a principal limitação para a sua maior utilização. É interessante observar que, quando os custos são considerados durante a vida útil das estruturas, a durabilidade oferecida por esses materiais pode torná-los competitivos para um grande número de utilizações. BAZIN (2002) estimou que, em termos comparativos, pode-se considerar que a madeira tem um custo médio de US\$1,35/kg; o concreto, de cerca de US\$ 2,70/kg; e o aço, de US\$ 4.5/kg, enquanto os compósitos poderiam atingir US\$ 6,80/kg.

As fibras comercialmente disponíveis mais utilizadas para a fabricação das barras de PRFV são as fibras de Vidro-S, Vidro-E e vidro álcali-resistente ou Vidro-AR, cujas propriedades estão descritas na Tabela 2.2.

A fibra de vidro-E tem o menor custo de todas as comercialmente disponíveis em fibras para armadura, e é usada para fins gerais. A resistência elétrica, a resistência ácida e o baixo custo são importantes. O Vidro-S tem maior resistência, rigidez e deformação final do que o Vidro-E, mas é mais caro e mais suscetível à degradação em ambientes alcalinos que o Vidro-E. O tipo de fibra de vidro álcali-resistente (AR) desenvolvida para minimizar o peso e a perda de resistência em meio alcalino, pois como se sabe, a fibra de vidro é uma matéria-prima normalmente muito atacada pelo ambiente alcalino do concreto. Então, nesses casos de ataques alcalinos permanentes, a fibra AR tem grande importância. Nestas fibras AR, são usadas resinas éster-vinílicas, tanto no núcleo como na capa externa.

Tabela 2.2 - Propriedades das fibras de vidro utilizadas na fabricação das barras de PRFV
(Adaptado da FIB TG 9.3 – 2003).

Tipo de fibra	Densidade (kg/m ³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformação última (%)	Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	Coefficiente de Poisson
Vidro-E	2500	3450	72,4	2,4	5	0,22
Vidro-S	2500	4580	85,4	3,3	2,9	0,22
Vidro álcali-resistente	2270	1800-3500	70-76	2,0-3,0	-	-

Algumas observações importantes a respeito das barras retas e aos estribos de fibra de vidro em projetos estruturais são:

- as barras retas são amarradas nos trechos de curvaturas por traspasse;
- os estribos são fornecidos como armadura pré-conformada de aço e no caso de aplicação em geometrias simples, os estribos são incorporados à armadura longitudinal de forma monolítica;
- as barras de PRFV não podem ser dobradas e são manufaturadas pela empresa conforme o pedido do cliente.

2.3 Aplicações das barras de PRF no concreto

Alguns exemplos de aplicações de barras de PRF no concreto são descritos a seguir:

Edifício Universitário em San Antonio, Texas – EUA: barras de PRFV foram usadas no perímetro parede/vigas. O projeto, no qual foi requerido um ambiente estrutural não-ferroso, foi construído em 1986 e nele incluído vigas mestras e lajes em uma direção. As vigas mestras foram projetadas para suportar cargas pontuais concentradas máximas de, aproximadamente, 40 kN. A Figura 2.4 apresenta a montagem da armadura de PRF utilizada na parede e vigas.



Figura 2.4 - Montagem da armadura de PRFV (ACI 440R, 1996).

Edifícios hospitalares em San Antonio, Texas – EUA: em 1985, barras de PRFV foram usadas na construção de colunas e vigas para uma Unidade de Ressonância Magnética. As Figuras 2.5 e 2.6 mostram as armaduras de PRF montadas utilizadas nos Edifícios hospitalares MRI (Unidade de Ressonância Magnética) e um edifício hospitalar de MRI, respectivamente.



Figura 2.5 - Armaduras de PRF utilizadas em hospitais de MRI (ACI 440R, 1996).

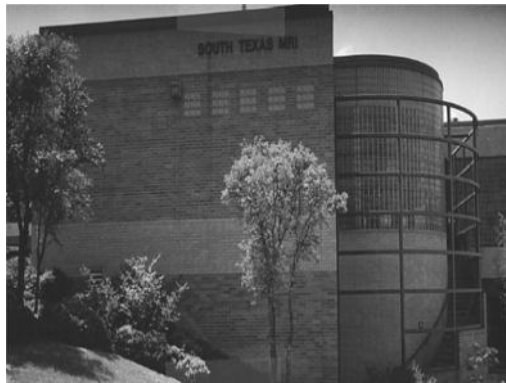


Figura 2.6 - Edifício hospitalar MRI, San Antonio, Texas (ACI 440R, 1996).

Os hospitais possuem equipamentos de tomografia, onde tem sido constatado que a influência eletromagnética das barras de aço nas estruturas em que há estes equipamentos acaba afetando os resultados dos exames. Com o uso das armaduras de PRFVs, evita-se este inconveniente.

Lajes pré-moldadas de canal Atlanta, Geórgia-EUA: *Quality Precast Limited Inc.*, desenvolveu uma laje não-ferrosa de canal armadas com barras de PRFV. Estas lajes de canal estão de acordo com uma especificação de aquisição federal dos EUA para uma carga de serviço de 3 kN e um fator de segurança de 4. As placas são concebidas utilizando as propriedades especiais das barras de PRFV. Elas estão sendo usadas atualmente em aplicações industriais sujeitas às condições ambientais severas como alta umidade, altas temperaturas, e atmosfera corrosiva. Algumas destas aplicações em: telhado, pavimentos, paredes especiais, lajes, tanques, caixas e sistemas de trincheiras. Nas Figuras 2.7 e 2.8 são apresentadas, respectivamente, a construção e colocação de lajes pré-moldadas.

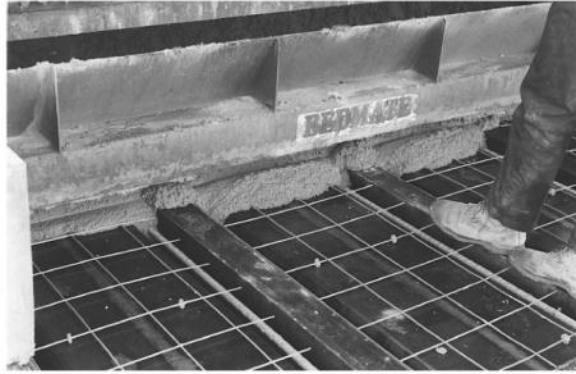


Figura 2.7 - Construção de lajes pré-moldadas, Atlanta, Geórgia (ACI 440R, 1996).



Figura 2.8 - Colocação de lajes pré-moldadas, Atlanta, Geórgia (ACI 440R, 1996).

Sistema Railway de Levitação Magnética, Japão: No Japão, a maior parte nos trabalhos iniciais sobre o uso de compósitos em concreto foi impulsionada pelas pesquisas sobre o sistema de levitação magnética ferroviária, Maglev, vide Figura 2.9.



Figura 2.9 - Sistema Railway de levitação Magnética, Japão (FIB – TASK GROUP 9.3, 2007).

Passarela de concreto armada com barras de PRFV, Reino unido: em 1996 um projeto da EUROCRETE implantou a primeira passarela de concreto armada totalmente com barras de PRFV, Figura 2.10.



Figura 2.10 - A primeira passarela de concreto somente com armadura de PRFV (FIB – TASK GROUP 9.3, 2007).

Em resumo, as principais áreas de aplicação das barras de fibra de vidro são:

- onde existirem agentes químicos corrosivos;
- em construções onde a areia utilizada como agregado de concreto é salina;
- em obras construídas perto de água salgada;
- onde o fator peso seja determinante;
- onde se requeira baixa condutividade elétrica;
- onde se requeira transparência magnética;
- onde se use sal para derreter gelo.

Segundo o ACI – 440 R (1996), nos últimos anos, tem-se visto o aumento contínuo no uso de obras de grande porte e de edificações, essencialmente aquelas próximas do ambiente de maresia, com o uso de barras de PRFV, nos Estados Unidos e no Canadá, o que infelizmente ainda não é uma realidade expressiva no Brasil, devido ao baixo número de empresas comerciais que produzem estes materiais, sendo que algumas delas ainda estão em fase de implantação.

2.4 Aderência entre concreto e armadura de PRFV

2.4.1 Considerações iniciais

Muitos trabalhos tem sido realizados nas últimas décadas para investigar o comportamento mecânico de estruturas de concreto armado com PRF, (NANNI,1993); (YONIZAWA *et al.*, 1993). Pesquisas experimentais consideráveis tem sido conduzidas para entender o comportamento de aderência especificamente de barras de PRF em concreto. Isto inclui ensaios em vigas e amostras de arrancamento utilizando diversos tipos e tamanhos de barras (BAKIS *et al.*,1983); (HONMA *et al.*,1989); (SOROUSHIAN *et al.*, 1991); (COX *et al.*, 1992); (DANIALI, 1992); (FAORO, 1992); (MALVAR,1992); (TEPFERS *et al.*, 1992); (EHSANI *et al.*, 1993); (KANACUBO *et al.*, 1993); (LARALDE E RODRIGUEZ, 1993); (MAKITANI *et al.*, 1993); (MASHIMA e IWAMOTO, 1993); (AL- ZAHARANI, 1995); (BOOTHBY *et al.*, 1995); (HATTORI *et al.*, 1995); (NOGHABAI, 1995); (ROSSETI *et al.*, 1995); (COSENZA *et al.*, 1996); (AL-ZAHARANI, 1996); (AL-ZAHARANIET, 1999); (A-DULAJIAN *et al.*, 1996); (BENMOKRANE *et al.*,1996); (TOMOSAWA E NAKASUJI, 1997); (TIGHIOURT *et al.*, 1998), (GUO E COX, 1999); (VIJAY E GANGARAO, 1999); (FOCCACCHI *et al.*, 2000). A maior parte destas pesquisas envolveu ensaios de arrancamento. O foco deste esforço foi compreender os mecanismos resistentes gerados em ensaios de arrancamento para formular leis constitutivas de aderência-deslizamento, que determinam critérios de projeto, resistência de aderência e rigidez das barras de PRF e aço. A maioria destes ensaios foram feitos sob carregamento monotônico, apenas poucas pesquisas têm sido feitas com o uso de carregamentos cíclicos (BAKIS *et al.*, 1998); (DEN UIJL, 1995); (KATZ, 2000).

A introdução das barras de PRFV, utilizadas como armadura para estrutura de concreto, tem levado a estudos das propriedades físicas e mecânicas destas barras para conhecer os mecanismos de transferência de tensões entre a armadura e o concreto. Parâmetros como o processo de fabricação, a conformação superficial, o tipo e porcentagem das fibras e resinas contidas nas barras afetam as propriedades da aderência entre as barras de PRFV e o concreto.

O estudo da tensão de aderência é útil para que se possa compreender o comportamento mecânico e o desempenho das estruturas em concreto armado, especialmente sob o ponto de vista da fissuração, condições de trabalho e situações

limites. A partir delas, são fixadas as hipóteses de cálculo, as disposições dos elementos construtivos, e demais aspectos construtivos que garantem a segurança das estruturas, como por exemplo, o comprimento de ancoragem (ALCANTARA et al., 2004).

O comportamento de barras com superfície rugosa (deformada) será descrito a seguir por meio da curva de tensão de aderência vs deslocamento para barras solicitada monotonicamente, representada na Figura 2.11.

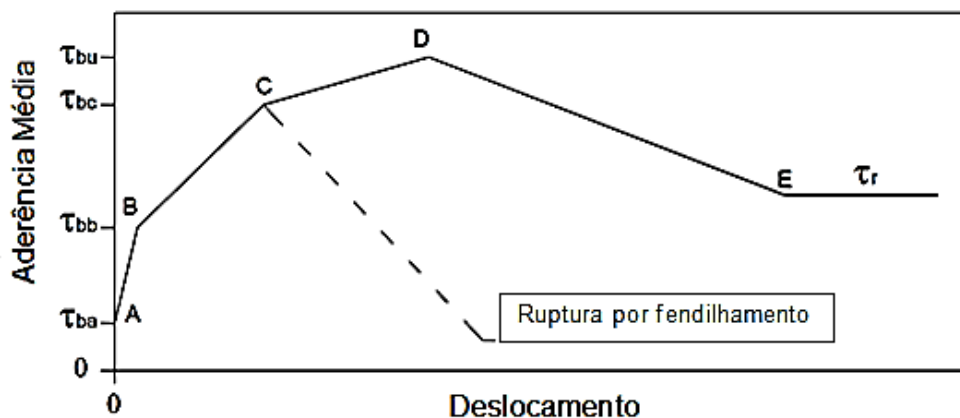


Figura 2.11 - Curva típica de tensão de aderência média versus deslizamento (achillides,1998 apud FIB 9.3, 2003).

onde:

Trecho 0A: não é observado deslocamento da barra neste estágio, tendo como a adesão química entre os dois materiais, o mecanismo que resiste à ação externa.

Trecho AB: com o aumento do carregamento há a mudança do mecanismo de aderência e da ruptura da adesão. O deslocamento na extremidade solicitada da barra aumenta gradualmente, e as deformações superficiais da barra desenvolvem tensões tangenciais em virtude da reação do concreto adjacente (COUTO, 2007). Microfissuras transversais no concreto se iniciam na ponta da barra com deformações que permitem um maior deslocamento das barras, vide Figura 2.12. O início destas microfissuras transversais nas barras de PRF começa relativamente atrasada em relação às barras de aço, pois a conformação superficial destas barras de PRF é mais amena que as nervuras das barras de aço.

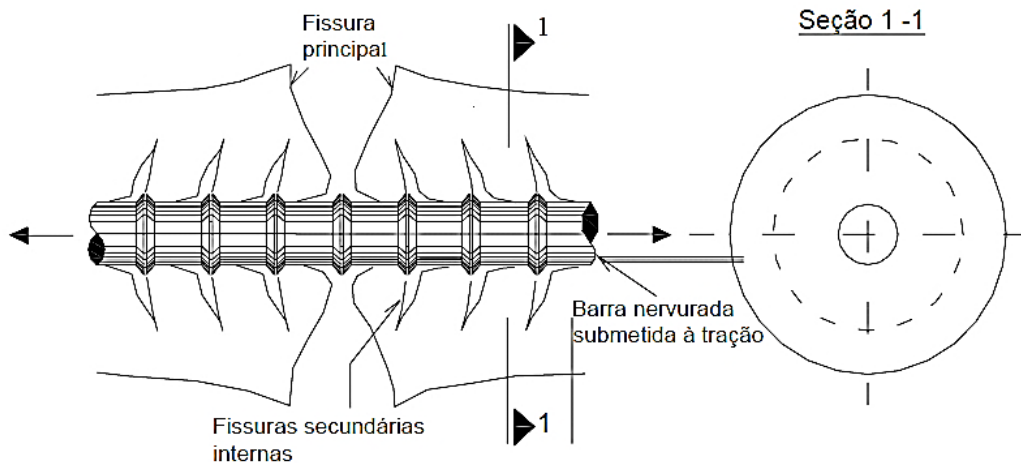


Figura 2.12 - Deformação do concreto após a formação de fissuras (GOTO, 1971).

Trecho BC: neste estágio a tensão de aderência e o deslocamento na barra aumentam consideravelmente fazendo com que diminua a rigidez da ligação.

Trecho CD: neste estágio, ambas as extremidades se deslocam e a resistência de aderência é significativamente reduzida. Ainda dependendo da magnitude da resistência do concreto comparado com a resistência ao cisalhamento da rugosidade superficial da barra (COUTO, 2007).

Trecho DE : depois de atingida a máxima tensão de aderência, o mecanismo de resistência entre as deformações superficiais da barra e o concreto e quebra, ruptura diminuindo consideravelmente a tensão de aderência (COUTO, 2007). A resistência de aderência residual (τ_r) depende da resistência de atrito e da interface de ruptura. A rugosidade da interface de ruptura determina a magnitude de τ_r .

2.4.2 Fenômenos de aderência

A existência do concreto armado é decorrente da solidariedade entre seus materiais constituintes, as barras da armadura e o concreto. Essa solidariedade ou aderência impede que haja deslocamento relativo entre a armadura e o concreto adjacente, sendo esta responsável pela transferência das tensões e pela compatibilidade das deformações entre os dois materiais (FUSCO, 1995).

A solidariedade entre a armadura e o concreto é garantida pela existência de aderência entre os dois materiais. Na realidade, essa aderência é composta por diversas parcelas, que decorrem de diferentes fenômenos que intervêm na ligação entre os dois materiais. Conforme a literatura técnica, três parcelas possuem grande

importância, sendo elas a adesão, o atrito e o engrenamento da ligação ou aderência mecânica (FUSCO, 1995), sendo descritas a seguir esquematicamente estas parcelas.

2.4.3 Aderência por adesão

Esta parcela de aderência ocorre devido a ligações físico-químicas na interface entre a barra e a pasta de cimento durante as suas reações de pega, e aparece no entanto uma certa resistência R_{b1} (*bond* = aderência), na qual se caracteriza por uma resistência de adesão que se opõe à separação dos dois materiais. Para pequenos deslocamentos relativos entre a barra e a massa de concreto que a envolve, essa ligação é desfeita, o que será visto mais adiante no presente trabalho que devido a este conceito não esteve presente este tipo de parcela de aderência. A Figura 2.13 ilustra um exemplo de ligação por aderência, onde para separar os dois materiais é necessário aplicar uma ação representada pela força F_{b1} . A aderência depende da limpeza da superfície e da rugosidade das barras, o que não é suficiente para uma boa aderência, tendo em vista que é destruída no caso de pequenos deslocamentos das barras. A Figura 2.14 apresenta as condições de rugosidade das barras lisas.

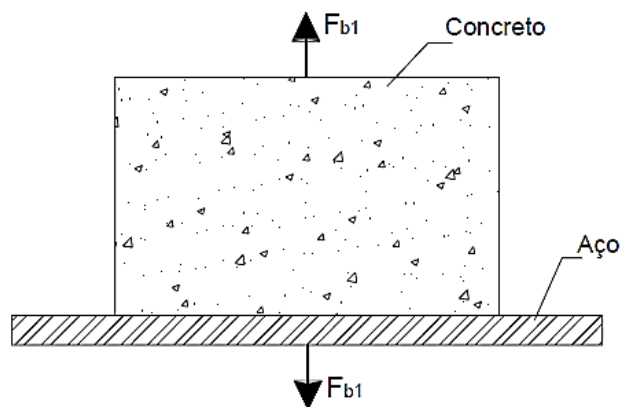


Figura 2.13 - Aderência por adesão (FUSCO, 1995).

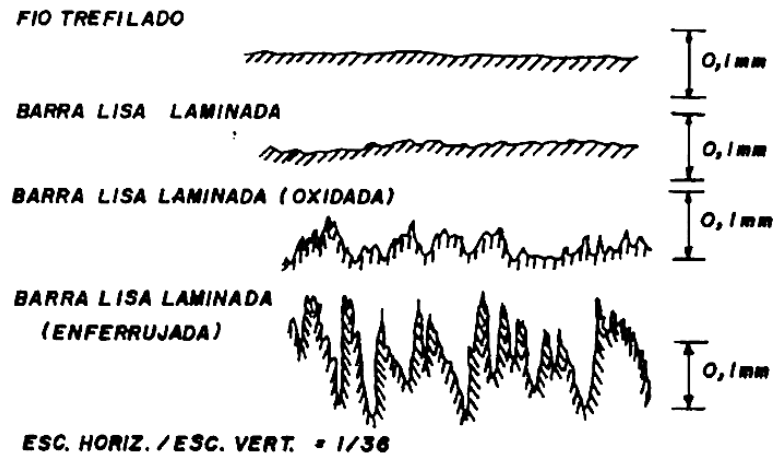


Figura 2.14 - Acabamento da superfície de fios e barras lisas (FUSCO, 1995).

2.4.4 Aderência por atrito

A aderência por atrito se manifesta, segundo FUSCO (2005), devido as forças de atrito que há entre os materiais, existindo a tendência ao deslocamento relativo entre eles, no caso a barra e o concreto. Essas forças de atrito dependem da rugosidade superficial da barra e da compressão uniformemente distribuída, exercida pelo concreto sobre a barra (pressão transversal p_t) em virtude da sua retração. A presença de barra inibe parcialmente as deformações de retração do concreto o que faz surgir a pressão transversal que provoca o acréscimo de aderência. A ação de forças de tração e compressão.

A aderência por atrito pode ser verificada por meio do ensaio de arrancamento, apresentado na Figura 2.15.

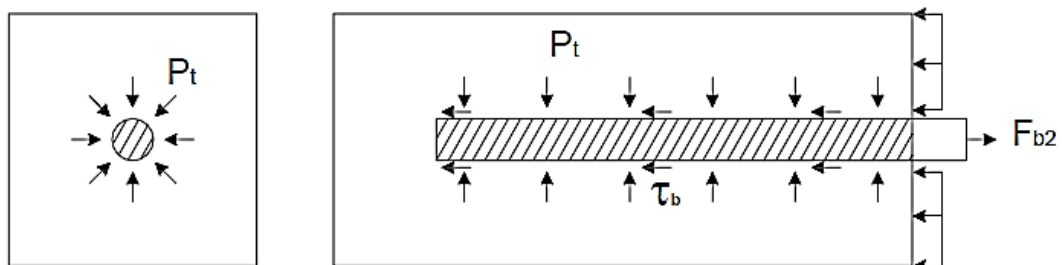


Figura 2.15 - Aderência por atrito (FUSCO, 1995).

2.4.5 Aderência mecânica

A aderência mecânica é decorrente da presença de saliências na superfície da barra, que funcionam como peças de apoio, mobilizando tensões de compressão no concreto, vide Figura 2.16. Este tipo de ligação é dependente da forma, altura, inclinação das nervuras e da distância entre elas. Através de intertravamento mecânico, do tipo de encaixe entre o concreto e as nervuras das barras, formam-se “consoles de concreto” que são solicitados ao corte e à compressão antes que a barra possa deslizar no concreto, conforme ilustrado na Figura 2.17. A aderência mecânica é o tipo de ligação mais confiável, pois contribui de maneira fundamental para a solidarização dos dois materiais e possibilita melhor aproveitamento das resistências.

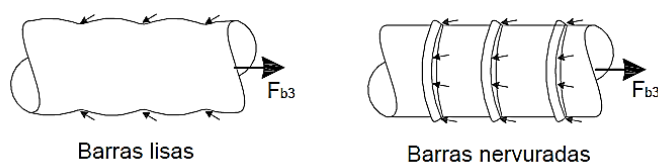


Figura 2.16 - Aderência mecânica (FUSCO, 1995).

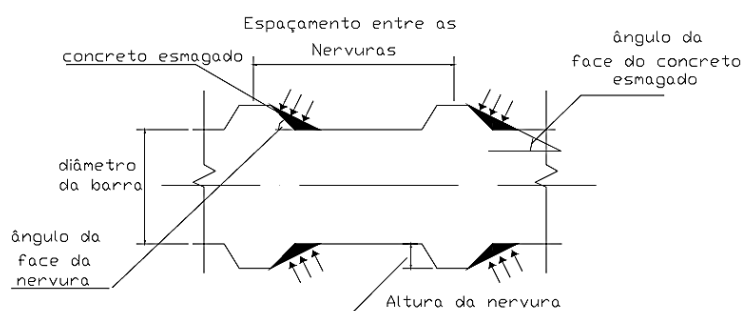


Figura 2.17 - Geometria de uma barra nervurada e a interação mecânica entre a barra e o concreto (TEPFERS, 1979).

Nos elementos estruturais em concreto armado submetido à flexão, a tensão de tração é transferida para a barra por meio da aderência entre o concreto e a barra. A aderência entre a barra de FRP e o concreto adjacente à barra é similar ao comportamento encontrado quando se utilizam barras de aço e dependem do tipo de barra de FRP, módulo de elasticidade, conformação superficial e forma da barra (ACI 440 1 R, 2003).

O efeito da aderência mecânica segundo FUSCO (2005), além das barras ranhuradas, está presente também nas barras lisas, em virtude das irregularidades superficiais do processo de laminação o que faz com que nestas barras a aderência mecânica e a aderência por atrito praticamente são as mesmas, ou seja, se confundem.

De acordo com o mesmo, não é possível determinar cada parcela de aderência isoladamente, e a separação da aderência em três parcelas é simplesmente esquemática.

2.4.6 Fatores que influenciam o comportamento da aderência das barras de PRFV.

Estes fatores se comportam de modo diferente nas barras de PRF em relação as de aço, por estas barras possuírem diferentes propriedades mecânicas e capacidade de resistência anisotrópica. Os parâmetros mais importantes são: a forma da seção transversal da barra, conformações superficiais, pequeno módulo de elasticidade na direção longitudinal, módulo de elasticidade transversal, efeito do coeficiente de Poisson, posição das barras na seção transversal do elemento de concreto, ancoragem de barras dobradas, cobrimento do concreto, coeficiente de dilatação térmica, condições ambientais, diâmetro da barra, resistência à compressão do concreto, armadura transversal, comprimento das fissuras e retração, pressão de confinamento, efeito barra - parte superior, comprimento de ancoragem, e mudança de temperatura. Alguns destes parâmetros serão estudados a seguir:

- **Forma da seção transversal da barra**

Segundo ACHILLIDES *et al.* (1997) apud FIB T.G. 9.3 (2003), barras de seção quadrada apresentam melhores resistências de aderência comparando-as com as barras de seção circular, devido aos ângulos na seção transversal que aumentam o efeito de cunha.

- **Conformações superficiais das barras**

As conformações superficiais (rugosidades) das barras de PRF consistem em: resina, em fibras reforçando resinas ou em resinas contendo fibras contínuas na direção longitudinal (COUTO, 2007).

Barras com maiores rugosidades possuem grande resistência de aderência sob boas condições de confinamento. O tamanho e inclinação das curvas, além de determinar a magnitude da aderência, também determinam a magnitude das forças de tração responsáveis pelo fendilhamento do concreto (FIB T.G. 9.3,2003).

A transferência de força entre as barras de PRF e o concreto é principalmente devida à aderência química e atrito entre o concreto e a barra, sendo que no concreto a deformação superficial é mínima. MAKINATI *et al.* (1993), MALVAR (1994), e NANNI *et al.* (1995) estudaram o efeito da deformação superficial sobre a resistência de aderência das amostras de concreto com PRF através de ensaios de arrancamento, concluindo que a deformação da superfície da barra tem uma influência sobre a resistência de aderência.

- **Pequeno módulo de elasticidade na direção longitudinal**

Segundo ACHILLIDES (1998) *apud* FIB T.G. 9.3 (2003) e PILAKOUTAS & GUADAGNINI (s.d), as barras com pequeno módulo de elasticidade (barras de PRFV, $E = 45\text{GPa}$) desenvolvem menores resistências de aderência que as barras com maiores módulos de elasticidade (barras de PRFC – Polímeros Reforçados com Fibras de carbono, $E = 115\text{ GPa}$).

- **Posição das barras na seção transversal do elemento de concreto**

Durante a colocação das barras no concreto, ar, água e partículas finas migram para cima através do concreto derramado. Este fenômeno pode causar uma redução significativa da resistência de aderência sob a armadura horizontal colocada perto da parte superior do concreto derramado. Ensaios têm mostrado que a resistência de aderência das barras na parte superior é cerca de 66% do que as barras colocadas na parte inferior. “Barra na parte superior” é tipicamente uma barra horizontal, com mais de 30 cm de distância da superfície de concreto. De modo a

refletir o efeito adverso desta posição de moldagem, um fator de modificação (denominado “fator de modificação de localização da barra”) de 1,3 é recomendado pelo manual (ACI 440.1R, 2003).

- **Efeito do cobrimento do concreto**

O cobrimento de concreto para uma armadura influencia o mecanismo de ruptura de aderência em virtude do seu efeito de confinamento, embora este aspecto seja menos importante para as barras de diâmetros maiores. Este efeito é semelhante ao observado em elementos de concreto armado com barras de aço. Pesquisas tem mostrado a dependência da ruptura de aderência em relação ao cobrimento de concreto em duas formas: ruptura por separação e ruptura por arrancamento. A primeira pode ocorrer quando o cobrimento do concreto é igual ou inferior a duas vezes o diâmetro da barra, enquanto a última pode ocorrer se o cobrimento excede duas vezes o diâmetro da barra (EHSANI *et al.*,1996). O manual (ACI 440 1R, 2003) recomenda o cobrimento mínimo igual ao diâmetro da barra. Para cobrimento de concreto maior que o diâmetro da barra, o manual recomenda os fatores de modificação para cobrimento de concreto.

- **Diâmetro das barras**

Barras com diâmetros maiores apresentam em geral menores resistências de aderência que barras de diâmetros pequenos. Isto acontece devido ao efeito “*shear lag*” , quando uma barra de PRF está submetida à força axial de arrancamento, podem ocorrer deformações diferenciais entre as fibras situadas no centro da barra e as próximas da superfície, resultando em uma distribuição não uniforme de tensões normais na seção transversal da barra (COUTO, 2007).

- **Resistência à compressão**

O efeito da resistência à compressão do concreto não é totalmente entendido para amostras com barras de PRF, uma vez que há apenas dados limitados disponíveis para estas amostras. NANNI *et al.* (1995) investigou o efeito da resistência do concreto sobre o comportamento de aderência utilizando amostras

com ensaio *pull out* e descobriu que a resistência do concreto não tem qualquer influência sobre a resistência de aderência. No entanto MALVAR (1994) descobriu que um aumento na resistência do concreto resulta num aumento na resistência de aderência.

- **Comprimento de ancoragem**

O aumento do comprimento de ancoragem de uma barra irá aumentar a força total de aderência entre o concreto e a barra; quanto ao aço, quando a resistência de aderência aumenta, a eficácia do comprimento de aderência diminui, portanto a relação de ganho com o aumento deste comprimento reduz. Mais estudos são necessários para quantificar este efeito.

2.4.7 Ensaio da aderência

Ensaio padrão para avaliação da aderência entre as barras de PRFV e o concreto não existe no Brasil, por isso recorre-se aos ensaios comumente realizados com barras de aço. No entanto, é necessário um ensaio padrão de aderência, para que os resultados permitam avaliar adequadamente a resistência de aderência, visto que muitos ensaios, segundo COUTO (2007), não conseguem representar, de forma adequada e eficiente, o comportamento da aderência.

Atualmente, pode-se encontrar na literatura técnica, diversos tipos de ensaios de caracterização das relações constitutivas entre tensão de aderência e deslizamento da barra dentro da massa de concreto.

De acordo com JAAFAR (2000), muitos destes ensaios, pela forma como foram idealizados, não permitem obter a curva de distribuição real das tensões de aderência ao longo da área de contato da barra com o concreto. O resultado dos ensaios é uma distribuição uniforme de tensões cuja intensidade é obtida dividindo-se a carga aplicada pela área de contato.

Neste item serão abordados alguns ensaios de arrancamento com barras de aço, os quais podem ser utilizados também para as barras de PRFV.

- **Ensaio de Arrancamento Direto: “PULL –OUT TEST (POT)”**

Este ensaio de arrancamento direto é normalizado pela (RILEM doc7.II128 , 1973) e também está referido na ASTM C234 (1991), com todo detalhamento necessário a sua execução como ensaios de laboratório. Na Figura 2.18 pode ser visualizada a disposição geral deste ensaio de arrancamento.

Este ensaio é o mais tradicional dos ensaios de aderência e consiste em extrair uma barra de aço posicionada no centro de um corpo de prova de concreto com um comprimento de aderência igual a 5 vezes o diâmetro da barra, colocado sobre placas de apoio de uma máquina de ensaio. Em uma de suas extremidades é aplicada a carga e na outra são lidos os deslizamentos. Além do trecho da barra sem aderência, pode-se minimizar o atrito entre a placa e apoio e o corpo de prova colocando-se uma borracha entre a placa e o prisma.

As vantagens deste ensaio são que, além do baixo custo e simplicidade, ele dá uma idéia clara do conceito de ancoragem, isto é, o comprimento que está embebido no concreto é o que define o próprio comprimento de ancoragem. Outras vantagens também são a simplicidade do prisma e a possibilidade de uma visualização do comprimento mínimo de ancoragem.

Tem como desvantagem que os resultados obtidos servem apenas para pesquisas comparativas ou estudos qualitativos, pois a forma de solicitar o corpo de prova não reproduz as condições reais de solicitação das barras de aço quando projetadas as finalidades de uso.

É importante analisar a normalização do ensaio, pois alguns ítems como o tamanho, a forma, dimensões do prisma, comprimento de ancoragem e direção da concretagem podem alterar substancialmente os resultados.

A validade do ensaio de arrancamento para efeitos de capacidade de ancoragem das barras é questionada, tendo em vista as diferenças existentes entre o panorama de tensões obtido neste tipo de ensaio e o correspondente às regiões de ancoragem das armaduras de peças de concreto armado. No ensaio de arrancamento, surge uma componente de compressão longitudinal. Em zonas de ancoragem de armadura de tração de vigas submetidas à flexão, essa componente não existe, (FUSCO,1975).

Apesar disso, este ensaio tem sido empregado mundialmente para estudar as variáveis que interferem na aderência, tomando-se um ensaio clássico,

regulamentado por normas e organismos internacionais como o RILEM (Recomendação RC 6). Não há restrições quanto a sua utilização, e existem na bibliografia técnica relatos de sua aplicação em vários tipos de concretos e barras de diâmetros variados (ELIGEHAUSEN, 1983), (BARBOSA, 2002).

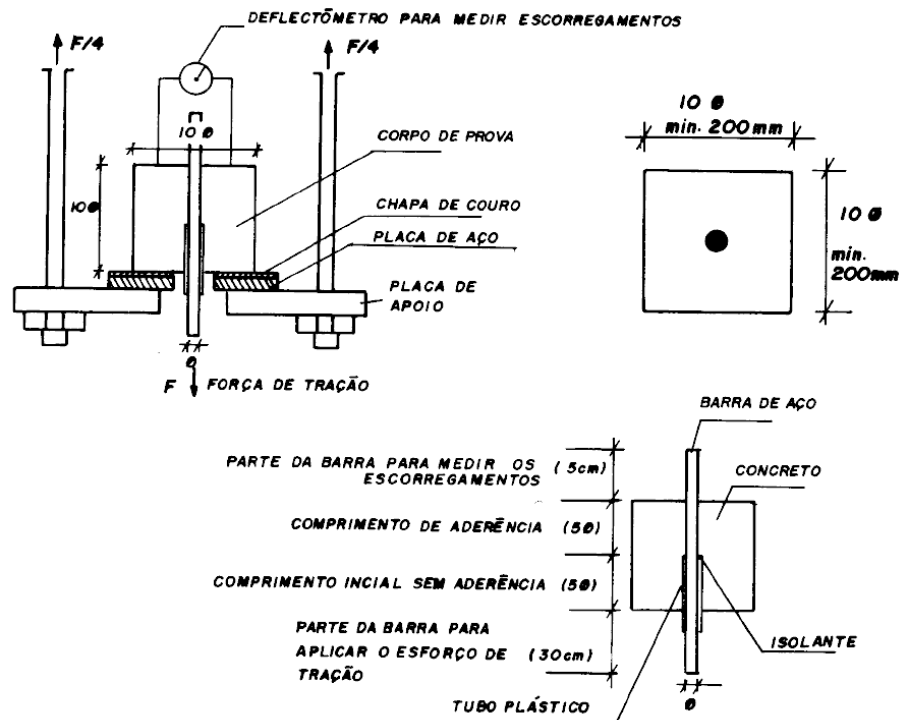


Figura 2.18 - Disposição geral do ensaio de arrancamento (RILLEM, 1973).

A tensão de aderência medida no ensaio de arrancamento é a tensão média visto a dificuldade em medir a variação desta ao longo do comprimento de ancoragem, e pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\tau_b = \frac{F_t}{u.l} \quad (2.1)$$

Sendo:

τ_b – Tensão de aderência média;

F_t – intensidade da força que solicita a barra;

u – Perímetro da barra;

L – Comprimento de ancoragem.

- **Ensaio de Arrancamento com Anel Circunferencial – “Ring Pull – Out Test”**

Como no caso do “Pull-Out-Test”, este ensaio consiste na extração de uma barra de aço concretada no interior de um corpo de prova que se apóia contra placas de uma máquina de ensaio, ilustrada na Figura 2.19. A diferença entre eles é que no “Ring Pull-Out-Test” o corpo de prova é cilíndrico no qual fica envolvido por um anel metálico que abraça o comprimento mergulhado; este anel é instrumentado com “strain-gauges” que possibilitam medir, além das deformações ocorridas no anel, a tração exercida em um dos extremos da barra e os escorregamentos.

Este ensaio permite a medição direta da componente de fendilhamento e das forças de aderência, sendo que as informações obtidas são mais completas do que no ensaio convencional.

Vários outros ensaios derivam do ensaio de arrancamento regulamentado pelo RILEM, por exemplo, os ensaios relatados por (ROTÁSY, 1988), onde a barra é posicionada nos cantos do corpo de prova, com o objetivo de avaliar a influência do revestimento na aderência.

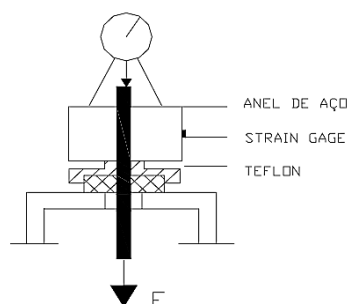
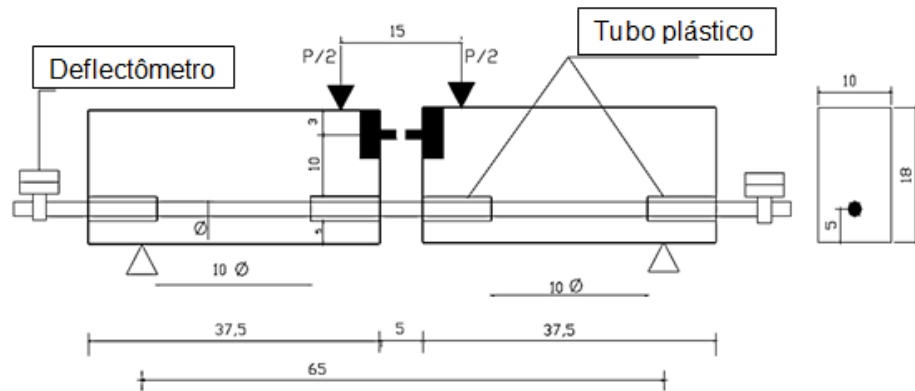


Figura 2.19 - Ensaio de arrancamento com anel circunferencial.

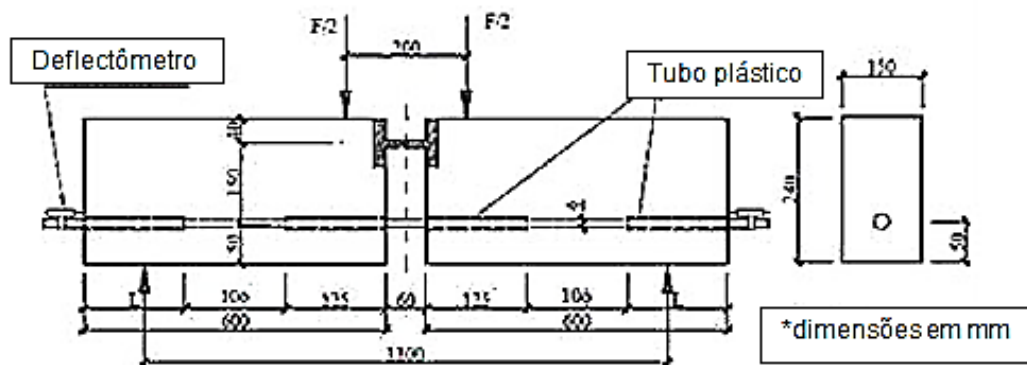
- **Ensaio de Flexão – “Beam Test (Bt)”**

O “Beam Test” consiste em um corpo de prova constituído de dois blocos paralelepípedos, ligados em sua parte inferior pela barra de aço destinada ao estudo de aderência e em sua parte superior por uma rótula metálica, conforme ilustrado nas Figuras 2.20 (a) e (b). A viga assim constituída é solicitada à flexão simples, sobre dois apoios, por duas forças concentradas de mesma magnitude que agem a distâncias iguais dos apoios. Nos extremos das barras colocam-se defletores, a fim de que possam ser medidos os deslocamentos relativos da

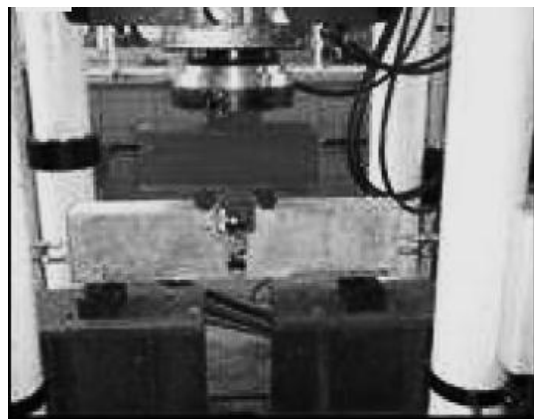
barra em relação ao concreto. A ancoragem é limitada ao comprimento especificado, com a ajuda de tubos plásticos que eliminam a aderência nos trechos desejados. No tipo da (a) são ensaiadas barras com diâmetro variando de 16mm e 32mm, já no tipo (b,c) são ensaiadas barras com diâmetro variando de 10 mm a 16mm.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.20 - (a, b,c) Ensaio de flexão em vigas (CEB BC5,1993).

A resistência de aderência pode ser calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$R_{st} = \frac{F}{4} \times \frac{a}{z} \quad (2.2)$$

$$\tau_b = \frac{R_{st}}{\pi \cdot \emptyset \cdot L} \quad (2.3)$$

Sendo:

τ_b - resistência de aderência em MPa;

R_{st} – força de tração na armadura em Newton;

a – comprimento da viga;

z – distância entre a resultante de tração e a resultante de compressão;

\emptyset – diâmetro em mm;

L – comprimento de aderência em mm.

- **Ensaio de Aderência tipo “Push-Out Test”**

A principal característica deste ensaio é que a barra contida no corpo de prova de concreto sofre deslizamento por uma força de compressão e não tração. Em virtude da dilatação lateral da barra no interior do concreto, os resultados deste ensaio são superiores ao tradicional.

- **Ensaio de Extremo de Viga – “Beam End Test”**

Este ensaio representa a situação de aderência que existe entre uma fissura de flexão-cisalhamento e o extremo de uma viga simplesmente apoiada. Consiste em tracionar uma barra posicionada na parte inferior de uma peça prismática, e a reação que simula a zona de compressão da viga, é aplicada na parte superior do corpo de prova, ilustrada na Figura 2.21. O momento criado é equilibrado por outro par de forças que atuam perpendicularmente à barra e simulam a reação de apoio e o esforço de corte que seria transmitido através do concreto. Segundo RIBEIRO (1985) *apud* BARBOSA (2001), ele fornece as mesmas informações que o ensaio de viga, com a vantagem de redução do tamanho do corpo de prova. Este ensaio representa um progresso sobre o tradicional “*Pul-Out-Test*”, visto que estabelece um gradiente de deformações ao longo da altura do corpo de prova mais realista.

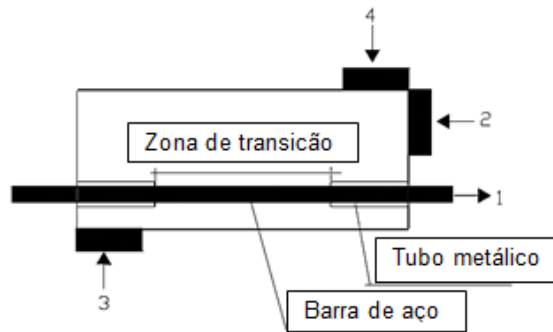


Figura 2.21 - Corpo de prova para ensaio de extremo de viga.

Onde:

- 1 - é a força de tração na barra;
- 2 - é a placa de reação que simula a zona de compressão de viga;
- 3 - é a placa de reação de apoio;
- 4 - é a placa de reação que simula o esforço cortante que seria transmitido através do concreto.

• Ensaio das Quatro Barras

O ensaio das quatro barras, testado por DUCATTI (1993), consiste de uma emenda por traspasse, ligando três barras a uma central e envolvidas por um cilindro de concreto. O objetivo principal deste ensaio é eliminar a interferência das tensões de compressão, impostas ao concreto no ensaio de arrancamento tradicional.

Neste ensaio a barra central é tracionada e o cilindro de concreto é mantido imóvel pela força de reação exercida pelas outras três barras dispostas nos vértices de um triângulo, como mostra a Figura 2.22.

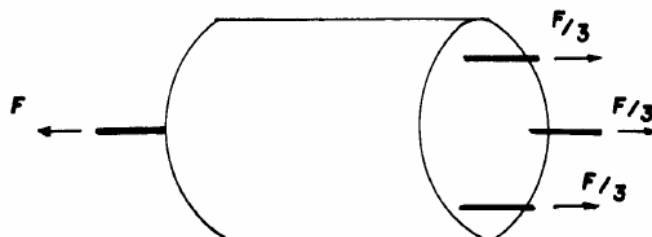


Figura 2.22 - Desenho esquemático do corpo de prova.

A medida dos deslocamentos da barra central em relação ao concreto é feita por meio de transdutores indutivos de deslocamentos (ou por meio de extensômetros) fixados ao concreto. As deformações da barra central são medidas por extensômetros elétricos ao longo do comprimento da barra central.

Fusco (1995) mostra ensaios desenvolvidos na Universidade de São Paulo para estudo da ancoragem de emenda, como pode ser visto na Figura 2.23.

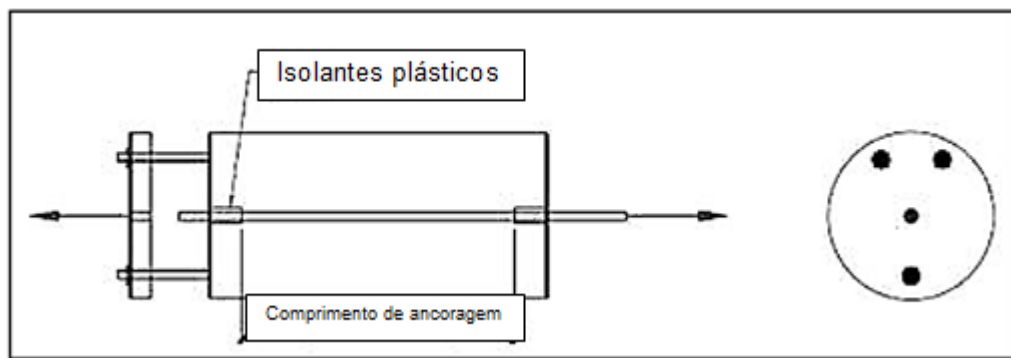


Figura 2.23 - Esquema geral de ensaio desenvolvido pela USP (FUSCO, 1995).

- **Ensaio de Conformação Superficial ou Ensaio de Tirante de Concreto.**

Este ensaio, especificado pela NBR 7477 (ABNT, 1982), consiste em exercer um esforço de tração aos dois extremos de uma barra mergulhada no centro do corpo de prova de concreto prismático, com o objetivo de avaliar a aderência entre o concreto e o aço. Em geral, estes ensaios se destinam ao estudo da fissuração e reproduzem muito bem as condições reais de solicitação das barras na região tracionada de vigas fletidas (FRANÇA, 2004).

Através da avaliação do afastamento e abertura das fissuras verificadas, este ensaio permite a determinação do chamado coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados à armadura de concreto armado, de acordo com a NBR 7477 (ABNT, 1982). Enquanto barras lisas apresentam fissuras de maior abertura e mais afastadas entre si, barras nervuradas apresentam fissuras mais próximas e com menor abertura (FRANÇA, 2004). A Figura 2.24 apresenta o ensaio específico.

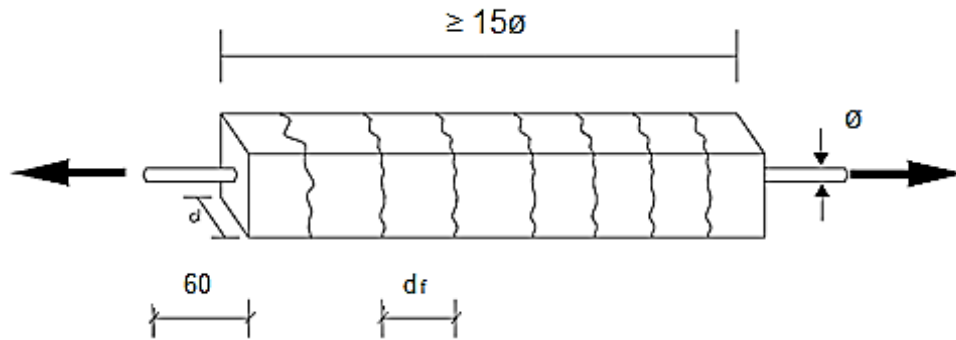


Figura 2.24 - Ensaio de tirantes de concreto (FRANÇA, 2004).

Segundo CASTRO (2000) a partir do cálculo do espaçamento médio entre as fissuras determina-se a tensão média de aderência das barras de aço em concretos de diferentes classes de resistência aplicando-se a Equação 2.4.

$$\tau_m = 0,375 \times \frac{f_{ct}}{X_m} \times \frac{\phi}{\rho} \quad (2.4)$$

onde:

τ_m = tensão média de aderência;

f_{ct} = resistência à tração simples do concreto;

X_m = distância média entre fissuras;

ϕ = diâmetro da barra;

$\rho = A_s/A_c$

- **Ensaio de arrancamento segundo (RHEM,1979)**

O prisma para este ensaio de arrancamento consiste em um cubo de concreto com uma barra centrada, possuindo dois trechos sem aderência (nas duas extremidades do prisma), como está ilustrado na Figura 2.25 (COUTO, 2007). O valor do comprimento de aderência é uma vez o diâmetro da barra.

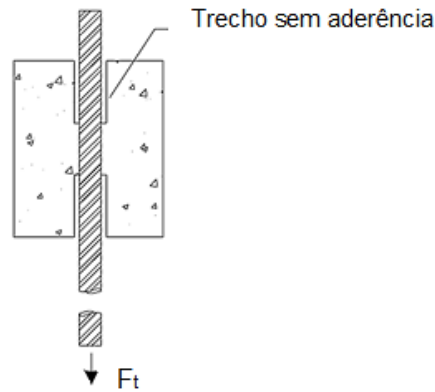


Figura 2.25 - Prisma para o ensaio de arrancamento (REHM, 1979).

- **Ensaio de arrancamento ASTM C-234 (1991)**

O prisma deste ensaio pode ser feito com concreto moldado na direção transversal às barras. Este prisma tem dimensões de 150mm x 150mm x 300mm, com o maior eixo na direção vertical. As duas barras devem ser embutidas em cada prisma, perpendicular ao maior eixo e paralelas e equidistantes das faces. Na direção vertical, uma barra precisa ser localizada com seu eixo a 75 mm do fundo do prisma e a outra com seu eixo a 225mm do fundo do prisma (COUTO, 2007). Uma ranhura precisa ser feita em cada uma das faces opostas do prisma, paralelas às barras e na metade do prisma. Essas ranhuras têm no mínimo 13 mm de profundidade, e servem para facilitar o rompimento do prisma em duas partes passando pelo plano de enfraquecimento.

De acordo com a ASTM Practices E 4 (s.d.), a velocidade de aplicação da força não pode ser maior do que 20 KN/min ou controlando-se o deslocamento em 1,3 mm/min. Na Figura 2.26 é apresentado o prisma para o ensaio de arrancamento.

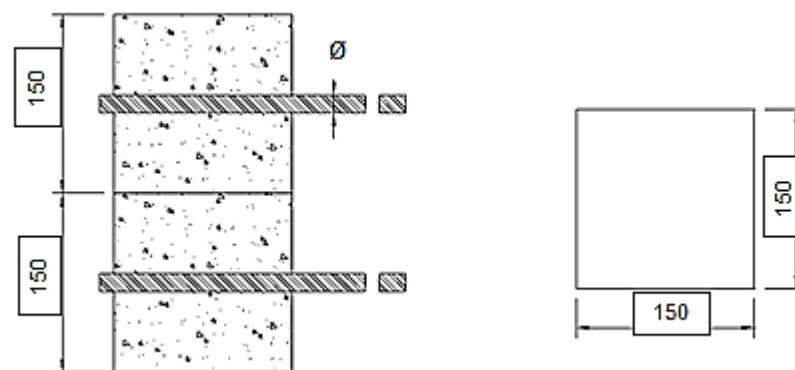


Figura 2.26 - Prismas para ensaio de arrancamento com barras horizontais (ASTM C-234, 1991).

2.5 Estudos teóricos-experimentais da aderência concreto-barra

2.5.1 Aderência concreto-barras de aço

DUCATTI (1993) descreve a aderência como uma tensão de cisalhamento entre a superfície de uma armadura de aço e o concreto que a envolve.

Foi observado que o deslizamento no início do carregamento era causado em parte pela deformação elástica do concreto; entretanto, para cargas mais altas, ele é causado pelo esmagamento do concreto em frente às nervuras.

Nas barras lisas (sem nervuras), ocorre ruptura por arrancamento e a aderência ocorre principalmente devido adesão química entre a pasta de cimento e a barra. Quando a adesão química é rompida surge uma resistência aos deslizamento devido ao atrito. Quando esta resistência se torna esgotada, o fendilhamento não é generalizado, mas a barra é arrancada deixando atrás de si um orifício quase intacto dentro do concreto, conforme mostrado na Figura 2.27.

Nas barras nervuradas, criadas para desenvolver maior aderência do que as lisas, o fenômeno da aderência tem natureza fundamentalmente diferente. Embora nessas barras se desenvolvam também a adesão e o atrito, a resistência aos deslizamentos se deve principalmente à resistência que o concreto oferece às pressões que sobre ele são exercidas pelas nervuras, ou seja, nas barras nervuradas a aderência depende principalmente da ação mecânica entre o concreto e as nervuras.

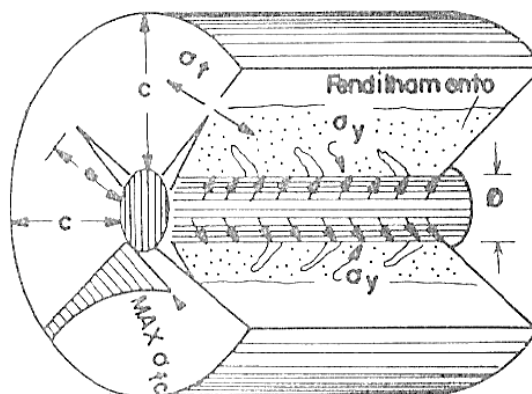


Figura 2.27 - Diagrama esquemático da deformação do concreto ao redor da barra após a formação das fissuras internas causadas por tensões principais de tração (GOTO, 1971).

VIEIRA (1994) estudou o efeito do estado superficial de barras de aço. Foi observado que nas barras lisas, onde a resistência de aderência está ligada à adesão. Esta adesão tem influência significativa sobre a aderência. Conforme o CEB 151 (1982), as barras lisas contaminadas com desmoldante praticamente não apresentam aderência. No entanto conforme o CEB 118 (1979) a oxidação na barra proporciona um aumento na resistência de aderência.

Nas barras nervuradas, onde a adesão representa uma pequena parcela da resistência da aderência, o estado superficial da barra não influencia essa resistência.

BARBOSA (2002) avaliou o comportamento da aderência utilizando concretos de diferentes classes de resistência com barras de aço fabricadas no Brasil de seção circular com sete diâmetros diferentes (6,3 mm, 8 mm, 10 mm, 12,5 mm, 16mm, 20 mm e 25,0 mm) e barras de aço de seção quadrada com três tamanhos de lado (6,3 mm, 8,0 mm, e 10mm). Neste estudo, foram utilizados cinco classes de resistência à compressão do concreto (20 MPa, 40 MPa, 60 MPa, 80 MPa, 100 MPa). Dois tipos de ensaio de aderência foram realizados: ensaio de tirantes (tração simétrica) e ensaio de arrancamento, para cada dimensão de barra e para cada classe de resistência do concreto. A autora chegou às seguintes conclusões:

- quando aumenta a resistência do concreto, a tensão de aderência também aumenta;
- à medida que aumenta o diâmetro da barra, a tensão de aderência aumenta. Constatou-se que a aderência das barras de seção quadrada possuem um comportamento próximo à de seção circular, apesar de possuírem uma tensão de aderência (média e máxima) ligeiramente inferior;
- o ensaio de arrancamento superestima os valores de tensão de aderência, quando comparado aos resultados obtidos no ensaio de tirantes;
- os modelos teóricos propostos ao estudo da aderência aço-concreto, de maneira geral, não foram adequados aos materiais brasileiros. Observou-se que nenhum deles consegue, ao mesmo tempo e com exatidão, considerar todos os fatores que influenciam o comportamento de aderência, ocasionando uma deficiência nesses modelos.

2.5.2 Aderência concreto-barras de PRF

COUTO (2007) analisou o comportamento da aderência entre barras de PRFV e o concreto, através de ensaios de arrancamento de acordo com os procedimentos descritos pela RILEM-FIP-CEB (1973). Foi considerada a influência da resistência à compressão do concreto e o diâmetro das barras de PRFV. Foram utilizadas barras de PRFV Aslan 100, da empresa Hughes Brothers, com diâmetro de 9 mm e de 16 mm. Estas barras são compostas por fibras de vidro e matriz polimérica de vinil-éster. Nos modelos de arrancamento para cada classe de resistência à compressão do concreto foram ensaiados cinco corpos de prova, totalizando 30 ensaios. Foram utilizados concreto de resistência à compressão de 30 MPa, 60 MPa e 80 MPa.

Buscou comparar o comportamento da aderência das barras de PRFV com o concreto e das barras de aço com concreto, e também verificar as equações para previsão da resistência à aderência segundo Códigos e equações propostas por alguns pesquisadores, para estruturas armadas com barras de aço e barras de PRFV. As Figuras 2.28 e 2.29 mostram a fôrma dos modelos de arrancamento. Na Tabela 2.3 pode ser visualizado os resultados dos corpos de provas ensaiados das barras de PRFV.

Observou-se, nos modelos experimentais de arrancamento, a influência das propriedades mecânicas e da conformação superficial das barras de PRFV no comportamento da aderência, apresentando menores resistências à aderência quando comparados às barras de aço de diâmetro similar. O valor da resistência de aderência encontrado foi maior que o valor proposto por alguns Códigos.

Comparando o comportamento à aderência nos modelos de arrancamento com barras de PRFV e com barras de aço, foi verificado que os modelos com barras de PRFV apresentaram menor resistência à aderência e maior deslocamento último que os modelos com barras de aço. Com isto, acabou sendo comprovado o fato de que a resistência à aderência entre as barras de PRFV e o concreto é controlada pela parcela de aderência por atrito, diferentemente dos modelos com barra de aço, cuja parcela que exerceu maior influência era a aderência mecânica.



Figura 2.28 - Detalhe da forma para o ensaio de arrancamento (COUTO, 2007).



Figura 2.29 - Modelo montado para execução do ensaio de arrancamento (COUTO, 2007).

Tabela 2.3 – Resistência de aderência máxima e o deslocamento (COUTO, 2007).

Amostras ensaiadas	Resultados dos ensaios	
	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	s (mm)
C30B9-1	5,4	0,6
C30B9-2	9,8	1,2
C30B9-3	4,4	0,6
C30B9-4	4	1,4
C30B9-5	4,2	1,6
C30B16-1	7,8	2
C30B16-2	6	0,7
C30B16-3	11,2	2
C30B16-4	10,2	5,3
C30B16-5	10,1	5,1
C60B9-1	8	1,3
C60B9-2	12,2	2,1
C60B9-3	4	0,7
C60B9-4	10,1	3
C60B9-5	12	5
C60B16-1	13,8	4,2
C60B16-2	1,4	3,2
C60B16-3	16	2
C60B16-4	14,2	1,7
C60B16-5	14,9	0,7
C80B9-1	13,4	3
C80B9-2	11	5,3
C80B9-3	10,5	1,3
C80B9-4	13,4	3
C80B9-5	11	0,8
C80B16-1	19	1,2
C80B16-2	17,5	1,28
C80B16-3	18,2	0,55
C80B16-4	16	0,55
C80B16-5	18,8	0,4

onde:

C30 é a resistência à compressão do concreto de 30 MPa;

B9 é o diâmetro da barra de 9 mm;

os números 1,2,3,4 e 5 é a identificação do corpo de prova;

s é o deslocamento

Os modelos com barras de PRFV apresentaram uma ruptura peculiar, definida por um aumento significativo do deslocamento sem incremento na tensão de aderência. Em relação a resistência à compressão dos concretos, pode-se verificar que a resistência de aderência não apresentou variação significativa entre os modelos de corpos de prova com resistência à compressão de 60 MPa e de 80 MPa, mas nos modelos das séries de resistência à compressão de 30 MPa ocorreu. Foi constatado, com este estudo, que a utilização de barras de PRFV é viável.

A resistência de aderência foi sensivelmente superior nos concretos de alta resistência quando comparados com o concreto de resistência à compressão de 30 MPa. Foi constatado também, que nos modelos de corpos de prova em que se utilizaram barras de diâmetro de 16 mm a resistência de aderência foi maior.

A série C30B16 se caracterizou pela ruptura por arrancamento da barra, já nas séries C60B16 e C80B16 ocorreu ruptura combinada.

Porém, em virtude da sua menor resistência à aderência quando comparados com as barras de aço, necessita um maior comprimento de ancoragem para que a estrutura se comporte de maneira adequada.

LEE *et al.* (2007), estudaram a resistência de aderência interfacial de barras de PRFV de diâmetro de 12,7 mm em concreto de alta resistência através do ensaio de *Pull Out*. O programa experimental constou de 54 amostras de cubo de concreto preparados de acordo com a norma (CSA S802, 2002). Dois parâmetros foram considerados nesta pesquisa experimental: a resistência à compressão do concreto (de 25,6 MPa a 92,4 MPa) e do tipo de barra (aço, PRFV revestida de areia, e PRFV de fio enrolado helicoidalmente. Nas Tabelas 2.4 e 2.5 são apresentadas as amostras ensaiadas e as resistências máximas de aderência com seus deslocamentos, respectivamente. As Figura 2.30 a e b, apresentam os modelos de barras de PRFV e o *set up*, respectivamente, onde no modelo CS (*Sand-Coated*) a sua superfície foi revestida com areia e o modelo WH (*helically wrapped*) possui a sua superfície com fio enrolado helicoidalmente.

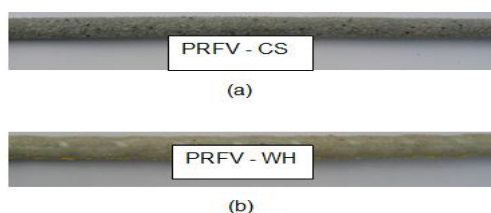


Figura 2.30 - (a,b) Modelos de PRFV utilizados (LEE *et al.*, 2007).Tabela 2.4 – Amostras ensaiadas (LEE *et al.*, 2007).

Barras ranhuradas	Nº de Amostras	Resistência à compressão do concreto (MPa)					
		25,6	35,3	40,6	56,3	75,7	92,4
Aço	1	F25A1	F35A1	F40A1	F55A1	F75A1	F90 A1
	2	F25A2	F35A2	F40A2	F55A2	F75A2	F90 A2
	3	F25A3	F35A3	F40A3	F55A3	F75A3	F90 A3
PRFV-CS	1	F25B1	F35B1	F40B1	F55B1	F75B1	F90B1
	2	F25B2	F35B2	F40B2	F55B2	F75B2	F90B2
	3	F25B3	F35B3	F40B3	F55B3	F75B3	F90B3
PRFV-WH	1	F25C1	F35C1	F40C1	F55C1	F75C1	F90C1
	2	F25C2	F35C2	F40C2	F55C2	F75C2	F90C2
	3	F25C3	F35C3	F40C3	F55C3	F75C3	F90C3

Tabela 2.5 – Resistência de aderência e o deslocamento correspondente (LEE *et al.*, 2007).

Amostras		$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	Sm (mm) (deslocamento)
F25	F25A1	24,59	0,66
	F25A2	22,77	0,56
	F25A3	24,79	0,47
	F25B1	20,4	0,31
	F25B2	18,7	0,47
	F25B3	20,17	0,4
	F25C1	17,67	5,5
	F25C2	20,41	4,7
F25C3	18,59	3,71	
F40	F40A1	25,36	0,83
	F40A2	28,49	1,08
	F40A3	27,44	1,08
	F40B1	19,34	0,58
	F40B2	23,6	0,25
	F40B3	20,59	0,43
	F40C1	22,62	4,83
	F40C2	20,87	5,1
F40C3	20,99	4,6	
F75	F75A1	37,53	1,63
	F75A2	35,5	-
	F75A3	34,9	-
	F75B1	23,36	0,009
	F75B2	24,67	0,08
	F75B3	25,2	0,15
	F75 C1	23,03	3,53
	F75C2	25	3,57
F75C3	23,02	4,81	
F35	F35A1	26,65	1,13
	F35A2	24,85	1,03
	F35A3	26,2	1,02
	F35B1	23,92	0,3
	F35B2	-	-
	F35B3	19,09	0,68
	F35C1	19,2	7
	F35C2	19,7	3
F35C3	20,28	5,7	
F55	F55A1	29,28	0,72
	F55A2	30,28	0,74
	F55A3	31,31	1,08
	F55B1	22,15	0,21
	F55B2	19,39	0,39
	F55B3	22,63	0,43
	F55C1	21,45	5,15
	F55C2	18,51	6,81
F55C3	19,9	3,09	
F90	F90A1	39,96	-
	F90A2	39,2	0,4
	F90A3	40,4	1,05
	F90B1	23,38	0,1
	F90B2	25,44	0,1
	F90B3	26,2	0,13
	F90C1	25,05	0,38
	F90C2	28,05	0,35
F90C3	25,2	0,5	

As conclusões observadas com base nos resultados dos ensaios desta pesquisa foram:

- a resistência de aderência das barras de PRFV aumentou à medida que a resistência do concreto aumentou;
- o aumento da resistência de aderência das barras de PRFV no que diz respeito à resistência do concreto foi muito menor do que as barras de aço;
- as amostras mostraram que a ruptura da aderência das barras de aço foi causada por esmagamento do concreto contra a face das nervuras, enquanto a ruptura de aderência das barras de PRFV ocorreu não só no concreto, mas também nas barras por delaminação da camada rica em resina exterior a partir do núcleo da fibra;
- a área média da camada delaminada da barra de PRFV aumentou com o aumento da resistência à compressão do concreto.

HAO QING-DUO *et al.* (2007) estudaram a resistência de aderência de barras ranhuradas de PRFV com diferentes geometrias.

Baseadas nos critérios da *Canadian Standards Association - CSA* (Associação de Normas Canadense), 105 amostras foram ensaiadas por arrancamento ou *Pull Out* para investigar o efeito de diferentes geometrias de ranhuras na resistência de aderência das barras de PRFV incorporado ao concreto. Cada barra foi colocada em um cubo de concreto de 150 mm com um comprimento quatro vezes o diâmetro da armadura. Os parâmetros experimentais foram: o tipo de barra, o componente da barra, a textura superficial da barra, a altura da ranhura, espaçamento da ranhura e a largura da ranhura. A Figura 2.31 mostra as barras ranhuradas de PRFV e de aço com diferentes configurações. Já nas Figuras de 2.32 à 2.38, são mostradas as curvas de tensão vs deslocamento das amostras ensaiadas conforme HAO QING-DUO *et al.* (2007). Na Tabela 2.6 apresenta os resultados de *Pull Out*.

Comparando com as barras de aço, as barras de PRFV apresentaram menor resistência de aderência apenas cerca de 65% a 87%, já o deslocamento no carregamento final das barras de PRFV foram maior. Esta diferença na aderência foi atribuída às diferentes geometrias de ranhuras nas superfícies de cada tipo de barra, vide Figura 2.31.

Dois tipos de barras exibiram comportamento de aderência similar. Considerando o efeito nas diferenças das alturas das ranhuras, o efeito do

componente das barras ranhuradas no comportamento de aderência não foi favorável. A razão para este fenômeno é que as propriedades físicas e mecânicas das ranhuras não melhoram com a variação do componente das barras ranhuradas, vide Figura 2.33. As barras das séries **A** continham fibras de vidro **E** e resina poliéster com volume de fibra de 72%, já as barras das séries **C** continham fibras de vidro **E** e resina epóxi e o volume de fibra era de 64%.

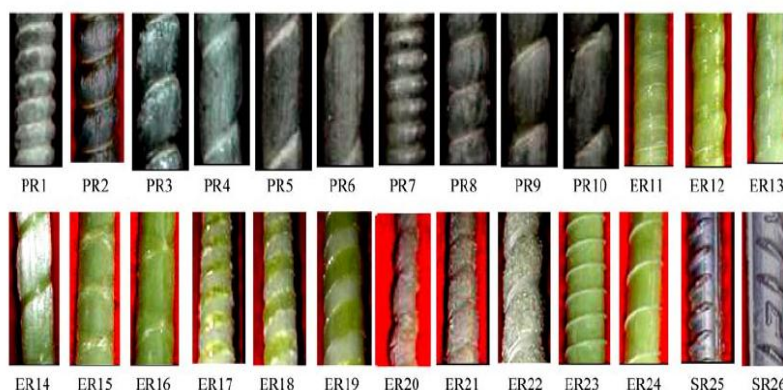


Figura 2.31 - Barras ranhuradas de PRFV e de aço com diferentes configurações superficiais (HAO QING-DUO *et al*, 2007).

Tabela 2.6 – Resultados das amostras dos ensaios de arrancamento (HAO QING-DUO *et al*, 2007).

Notação das amostras	Parâmetros dos ensaios			Resultados dos ensaios	
	RS (mm)	RH (mm)	f'c (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	s (mm)
A-10@5#0,06	5	6%d	28,5	13,17	1,82
A-10@10#0,06	10	6%d	28,5	13,96	2,37
A-10@15#0,06	15	6%d	28,5	13,22	3,36
A-10@20#0,06	20	6%d	28,5	10,66	3,85
A-10@25#0,06	25	6%d	28,5	10,46	4,42
A-10@30#0,06	30	6%d	28,5	10,64	4,68
A-10@10#0,04	10	4%d	28,5	11,74	1,74
A-10@10#0,05	10	5%d	28,5	13,42	2,25
A-10@10#0,07	10	7%d	28,5	13,62	2,56
A-10@10#0,08	10	8%d	28,5	10,26	1,86
A-10@10#0,09	10	9%d	28,5	12,83	2,19
B-12@6#0,05	6	5%d	28,5	9,23	1,34
B-12@12#0,05	12	5%d	28,5	11,61	2,49
B-12@18#0,05	18	5%d	28,5	10,83	4,18
B-12@24#0,05	24	5%d	28,5	9,39	4,40
B-12@12#0,03	12	3%d	28,5	8,07	3,39
B-12@12#0,04	12	4%d	28,5	10,83	3,08
B-12@12#0,06	12	6%d	28,5	12,99	2,74
B-12@12#0,07	12	7%d	28,5	10,06	2,63

Tabela 2.6 – Resultados das amostras dos ensaios de arrancamento (HAO QING-DUO et al, 2007) (continuação).

Notação das amostras	Parâmetros dos ensaios			Resultados dos ensaios	
	RS (mm)	RH (mm)	f'c (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	s (mm)
C-10@10#0,03	10	3,2%d	26,3	10,92	2,62
C-10@15#0,03	15	2,5%d	26,3	10,31	3,85
C-10@20#0,02	20	2%d	26,3	9,90	3,61
C-10@25#0,01	25	1,4%d	26,3	8,65	3,34
C-10@20#0,02	20	2,1%d	26,3	9,83	1,66
C-10@25#0,03	25	2,8%d	26,3	12,25	3,42
D-8@8#0,03	8	3,2%d	27,4	13,34	3,03
D-8@12#0,06	12	5,5%d	27,4	16,84	5,70
D-8@16#0,06	16	5,8%d	27,4	18,97	4,71
E-6.5@21#0,05	21	4,9%d	27,4	21,21	2,34
E-9.5@17#0,08	17	8,1%d	27,4	18,44	0,60
E-12.7@15#0,08	15	7,5%d	27,4	11,57	3,32
F-10@10#0,07	10	6,8%d	26,3	7,65	2,48
F-10@15#0,08	15	7,9%d	26,3	7,01	4,16
G-10@7#0,1	7	10%d	27,4	21,25	1,08
G-12@8#0,09	8	10,5%d	27,4	20,70	1,24

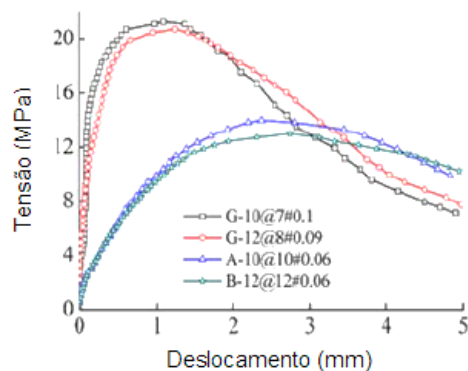


Figura 2.32 - Curvas tensão-deslocamento de diferentes tipos de barras (HAO QING-DUO et al, 2007).

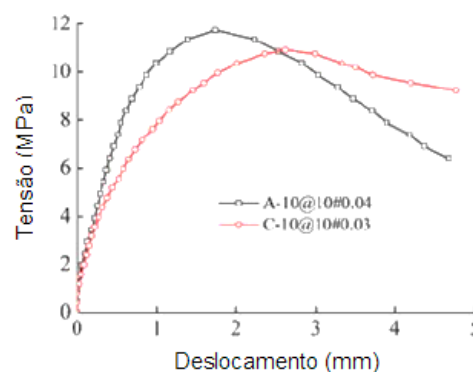


Figura 2.33 - Curvas tensão-deslocamento com diferentes componentes (HAO QING-DUO et al, 2007).

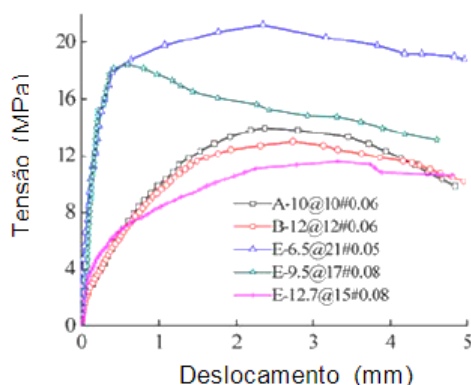


Figura 2.34 - Curvas tensão-deslocamento com diferentes com diferentes diâmetros (HAO QING-DUO et al, 2007).

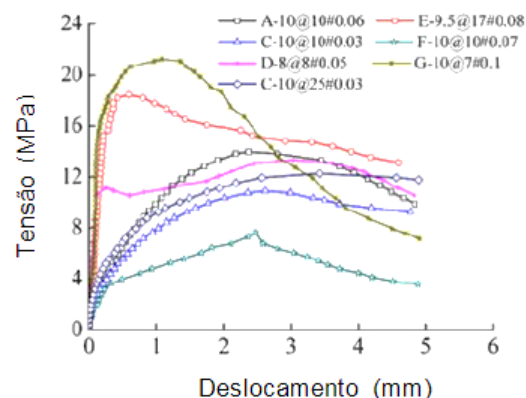


Figura 2.35 - Curvas tensão-deslocamento com diferentes com diferentes texturas superficiais (HAO QING-DUO et al, 2007).

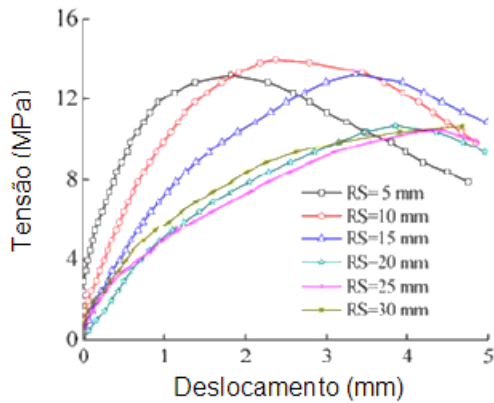


Figura 2.36 - Curvas tensão-deslocamento com diferentes espaçamentos de ranhuras (HAO QING-DUO *et al*, 2007).

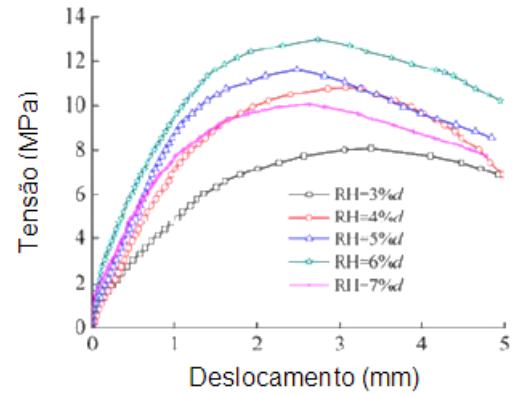


Figura 2.37 - Curvas tensão-deslocamento com diferentes alturas de ranhuras (HAO QING-DUO *et al*, 2007).

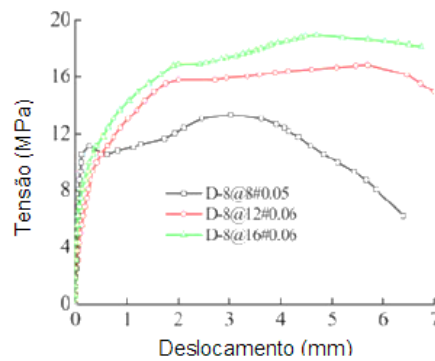


Figura 2.38 - Curvas tensão-deslocamento com diferentes larguras nas ranhuras (HAO QING-DUO *et al*, 2007).

Notação exemplificada:

A-10@5#0,06

A = é um dos grupos segundo processo de fabricação (A, B, C, D, E, F e G);

10 = é o diâmetro;

5 = é o espaçamento das barras ranhuradas (RS);

0,06 = altura das ranhuras em percentual de *d* (RH), 6% do diâmetro da barra;

τ = é a tensão máxima de aderência;

s – é o deslocamento;

f_c - é a resistência à compressão do concreto.

A resistência de aderência diminuiu com o aumento do diâmetro, mas o deslocamento no carregamento final aumentou quando o diâmetro das barras aumentou, vide Figura 2.34.

A resistência de aderência das séries **D** e **F** foi menor que das outras séries, e o deslocamento no carregamento final foi maior do que nas outras séries, vide Figura 2.35. As barras de PRFV das séries **A** e **E** apresentaram geometrias de ranhuras semelhantes, mas as barras da série **E** eram revestidas por areia. A resistência de aderência das barras da série **E** foi maior que as da série **A**, o que indica que o tratamento por revestimento de areia (*sand coated*), foi uma forma eficaz de melhorar o comportamento de aderência concreto barra de PRFV. O espaçamento ótimo das ranhuras das barras de PRFV foi o mesmo que o diâmetro da barra, e a altura ótima foi de 6% do diâmetro da barra.

O espaçamento das ranhuras aumentou de 1 a 3 vezes o diâmetro das barras com a área relativa das ranhuras diminuindo, e o deslocamento no carregamento final na ruptura aumentou duas vezes, vide Figura 2.36.

Nos corpos de prova da série **B**, foi observado que com o aumento da altura de 3% a 6% do diâmetro, a rigidez inicial da aderência na curva aumentou, e a resistência de aderência no pico das barras ranhuradas melhorou cerca de 60%. Porém, a tendência de melhoria foi interrompida quando a altura da ranhura aumentou para 7% do diâmetro da barra. Tanto a resistência de aderência no pico como a rigidez inicial diminuiu. A inclinação da curva depois do ponto de pico foi também maior do que da barra com a altura de 6% do diâmetro. Portanto, a barra de PRFV ranhurada com uma altura de ranhura de 6% do diâmetro da barra desenvolveu a maior resistência de aderência no pico e o menor deslocamento para uma determinada carga, vide Figura 2.37.

Nos corpos de prova da série **D**, a largura das ranhuras das barras foi de 2, 6 e 10 mm. Foi observado que com o aumento da largura de 2 a 6 mm, a rigidez inicial diminuía na curva, mas a resistência de aderência no pico das barras melhorou aproximadamente 42%, vide Figura 2.38. Portanto todo o supracitado; é difícil de avaliar o comportamento da aderência das barras ranhuradas com diferentes larguras de ranhuras, e são necessários mais pesquisas para determinar a largura ideal para barras ranhuradas de PRFV.

BAENA *et al.* (2009) estudaram 88 amostras de arrancamento concreto-barras de aço, de fibra de vidro e de carbono, preparadas conforme a norma ACI 440 3R (ACI, 2004) e a CSA S 806 (CSA, 2002). Foram utilizadas barras de aço, de PRFC e de PRFV, nas quais as barras de aço possuía comprimento de ancoragem

constante. Foi analisada a influência da superfície das barras, do diâmetro e da resistência do concreto na resistência de aderência. A Figura 2.39 mostra os modelos de barras utilizados. Nas Tabelas 2.7 e 2.8 são mostradas as resistências de aderência e seus respectivos deslocamentos dos ensaios de arrancamento das amostras do concreto C2 e na Tabela 2.9 do concreto C1.

Tabela 2.7 – Resultados experimentais das amostras de arrancamento A/B do concreto C2 (BAENA et al., 2009).

Amostras	f'c (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	s* (mm)	$\tau_{\text{máx}}^*$ (MPa) ^{0,5}
A-C/R1-#3-1-C2	54,93	24,325	0,128	3,282
A-C/R1-#3-2-C2	54,93	27,860	0,194	4,029
A-C/R1-#3-3-C2	54,93	26,170	0,216	3,531
A-C/R1-#4-1-C2	54,93	20,667	0,100	2,789
A-C/R1-#4-2-C2	54,93	19,508	0,052	2,632
A-C/R1-#4-3-C2	54,93	19,613	-	2,646
A-G/R2-#3-1-C2	53,54	15,466	-	2,114
A-G/R2-#3-2-C2	53,11	17,454	0,079	2,395
A-G/R2-#3-3-C2	53,11	16,011	0,040	2,197
A-G/R2-#4-1-C2	53,11	16,775	0,122	2,302
A-G/R2-#4-2-C2	53,11	15,441	0,059	2,119
A-G/R2-#4-3-C2	53,54	15,060	0,057	2,058
A-G/R2-#5-1-C2	53,11	22,156	0,294	3,040
A-G/R2-#5-2-C2	53,11	21,594	0,242	2,963
A-G/R2-#5-3-C2	53,54	22,649	-	3,095
A-G/R2-#6-1-C2	53,11	15,978	-	2,193
A-G/R2-#6-2-C2	53,54	15,082	0,061	2,061
A-G/R2-#6-3-C2	53,11	14,734	0,055	2,022
B-C/R3-#3-1-C2	54,93	13,485	0,123	2,039
B-C/R3-#3-2-C2	54,93	13,021	0,119	1,788
B-C/R3-#3-3-C2	54,93	9,070	0,171	1,255
B-C/R3-#4-1-C2	54,93	11,637	0,083	1,570
B-C/R3-#4-2-C2	54,93	9,940	0,178	1,586
B-C/R3-#4-3-C2	54,93	9,334	0,189	1,766
B-G/R4-#3-1-C2	49,55	22,987	0,230	3,266
B-G/R4-#3-2-C2	53,65	21,661	-	2,957
B-G/R4-#3-3-C2	53,65	20,777	0,297	2,837
B-G/R4-#4-1-C2	49,55	15,336	0,547	2,179
B-G/R4-#4-2-C2	53,65	17,353	0,522	2,369
B-G/R4-#4-3-C2	49,55	18,261	0,283	2,594
B-G/R4-#5-1-C2	49,55	17,948	4,833	2,550
B-G/R4-#5-2-C2	49,55	16,850	5,709	2,394
B-G/R4-#5-3-C2	49,55	17,289	5,609	2,456
B-G/R4-#6-1-C2	53,65	14,323	3,403	1,955
B-G/R4-#6-2-C2	53,65	14,582	3,733	1,991
B-G/R4-#6-3-C2	53,65	15,049	3,558	2,055

Tabela 2.8 - Resultados experimentais das amostras de arrancamento C/D/E do concreto C2 (BAENA et al., 2009).

Amostras	f'_c (MPa)	τ_{\max} (MPa)	s^* (mm)	τ_{\max}^* (MPa) ^{0,5}
C-G/R5-8-2-C2	56,30	17,697	0,206	2,359
C-G/R5-12-1-C2	50,50	14,541	0,148	2,046
C-G/R5-12-2-C2	56,30	15,753	0,261	2,099
C-G/R5-16-1-C2	58,20	15,468	0,261	2,028
C-G/R5-16-2-C2	56,30	15,660	0,345	2,087
D-G/R6-8-1-C2	47,89	29,673	3,385	4,288
D-G/R6-8-2-C2	46,15	26,250	4,738	3,864
D-G/R6-12-1-C2	47,89	24,667	4,067	3,564
D-G/R6-12-2-C2	47,89	27,158	2,881	3,924
D-G/R6-16-1-C2	46,15	19,553	5,577	2,878
D-G/R6-16-2-C2	47,89	21,634	3,068	3,126
D-G/R6-19-1-C2	46,15	17,164	2,710	2,527
D-G/R6-19-2-C2	46,15	15,953	3,539	2,348
E-S/R7-10-1-C2	49,54	29,856	0,783	4,242
E-S/R7-10-2-C2	49,99	28,335	0,285	4,008
E-S/R7-12-1-C2	49,99	29,052	0,803	4,109
E-S/R7-12-2-C2	49,99	28,920	1,381	4,090
E-S/R7-16-1-C2	58,20	27,111	1,228	3,554
E-S/R7-16-2-C2	50,50	25,403	1,189	3,575
E-S/R7-20-1-C2	49,46	22,342	0,321	3,177
E-S/R7-20-2-C2	49,54	14,642	0,098	2,080

Tabela 2.9- Resultados experimentais das amostras de arrancamento do concreto C1 (BAENA et al., 2009).

Amostras	f'_c	τ_{\max} (MPa)	s^* (mm)	τ_{\max}^* (MPa) ^{0,5}
A-C/R1-#3-1-C1	27,80	17,113	0,375	3,246
A-C/R1-#3-2-C1	27,80	15,771	0,365	2,991
A-C/R1-#4-1-C1	29,34	12,865	0,145	2,375
A-C/R1-#4-2-C1	26,50	14,131	0,171	2,745
A-G/R2-#4-1-C1	26,70	11,057	0,242	2,140
A-G/R2-#4-2-C1	26,70	11,343	0,260	2,195
A-G/R2-#5-1-C1	28,30	12,169	0,197	2,288
A-G/R2-#5-2-C1	26,70	12,029	0,208	2,328
B-C/R3-#3-1-C1	26,50	9,302	0,053	1,807
B-C/R3-#3-2-C1	31,30	16,972	0,044	3,034
B-C/R3-#4-1-C1	30,70	6,062	0,167	1,094
B-C/R3-#4-2-C1	31,30	8,365	0,157	1,495

Tabela 2.10- Resultados experimentais das amostras de arrancamento do concreto C1 (BAENA *et al.*, 2009) (continuação).

Amostras	f'_c	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	s^* (mm)	$\tau_{m\acute{a}x}^*$ (MPa) ^{0,5}
B-G/R4-#4-1-C1	30,00	9,888	5,028	1,805
B-G/R4-#4-2-C1	28,30	9,787	4,189	1,840
B-G/R4-#5-1-C1	30,00	10,477	1,907	1,913
B-G/R4-#5-2-C1	28,30	12,235	4,947	2,300
C-G/R5-8-1-C1	29,66	12,754	0,271	2,342
C-G/R5-8-2-C1	29,66	12,234	0,352	2,246
C-G/R5-12-1-C1	27,16	9,089	0,242	1,744
C-G/R5-12-2-C1	29,34	8,484	0,290	1,566
C-G/R5-16-1-C1	26,67	11,698	0,327	2,265
C-G/R5-16-2-C1	27,16	9,844	0,334	1,889
D-G/R6-8-1-C1	29,34	19,420	-	3,585
D-G/R6-8-2-C1	29,34	14,853	3,345	2,742
D-G/R6-12-1-C1	30,00	15,832	2,631	2,891
D-G/R6-12-2-C1	29,34	17,453	4,088	3,222
E-S/R7-12-1-C1	26,50	12,547	0,974	2,437
E-S/R7-12-2-C1	30,70	15,584	2,085	2,813
E-S/R7-16-1-C1	27,16	13,296	1,349	2,551
E-S/R7-16-2-C1	29,66	17,159	1,312	3,151

onde:

s^* = é o deslocamento no extremo não carregado;

$\tau_{m\acute{a}x}^*$ (MPa)^{0,5} = representa a tensão de aderência considerando a influência da resistência à compressão do concreto (f'_c);

$$\tau_{m\acute{a}x}^* = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{\sqrt{f'_c}} \quad (2.13)$$

F-FT/RT-D-N-C

F – são os grupo (A,B,C,D e E);

FT - Tipo de fibra (G-vidro, C- carbono, S-aço);

RT – Tipo de barra (R1, R2, R3, ...);

D –Diâmetro nominal (mm);

N – número da amostra

C – concreto.

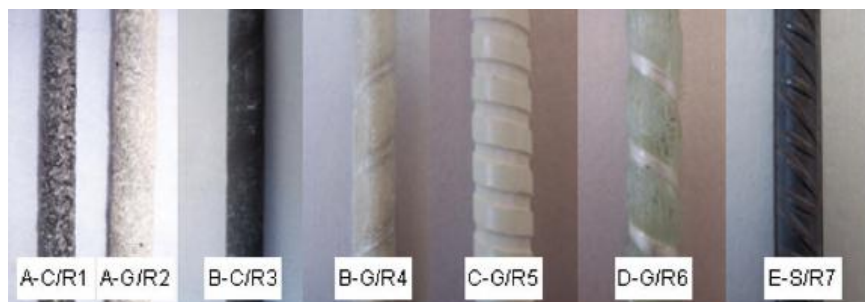


Figura 2.39 - Modelos de barras ensaiadas (BAENA *et al.*, 2009).

Com base nos resultados desta pesquisa tem-se as seguintes conclusões:

- verificou que a influência da superfície no comportamento de aderência confirma a existência de diferentes mecanismos de aderência para diferentes tratamentos superficiais;
- foi confirmada a tendência de que as barras ranhuradas com diâmetros maiores apresentavam menor resistência de aderência;
- os valores obtidos de deslocamentos para as barras de PRFV foram maiores que nas barras de PRFC;
- foi observado o aumento da resistência de aderência e mudança do modo de ruptura com a variação de resistência à compressão do concreto.

HARAJILI *et al.* (2011) estudaram o comportamento da aderência de barras de PRFV fazendo uma avaliação experimental e comparando-as com as orientações da norma ACI 440 (ACI, 2006).

O desenvolvimento da resistência e o arrancamento da aderência local responsável pelo deslizamento de barras poliméricas reforçadas por fibra de vidro (PRFV), foram experimentalmente investigadas usando amostras de vigas e ensaios de arrancamento. Dois tipos de barras de PRFV de 12 mm de diâmetro foram avaliadas, com fio enrolado (*Thread Wrapped*) e com ranhuras. Os parâmetros de ensaios incluíam o cobrimento do concreto, o comprimento da ancoragem, a área de confinamento do aço para as amostras de viga, e a resistência à compressão do concreto das amostras de arrancamento. Vigas armadas com aço também foram ensaiadas para comparação. A Figura 2.40 apresenta os tipos de barras utilizadas na pesquisa. Na Figura 2.41 pode ser visualizado o *set up* do ensaio.



Figura 2.40 - Barras ensaiadas na pesquisa (HARAJILI *et al.*, 2011).

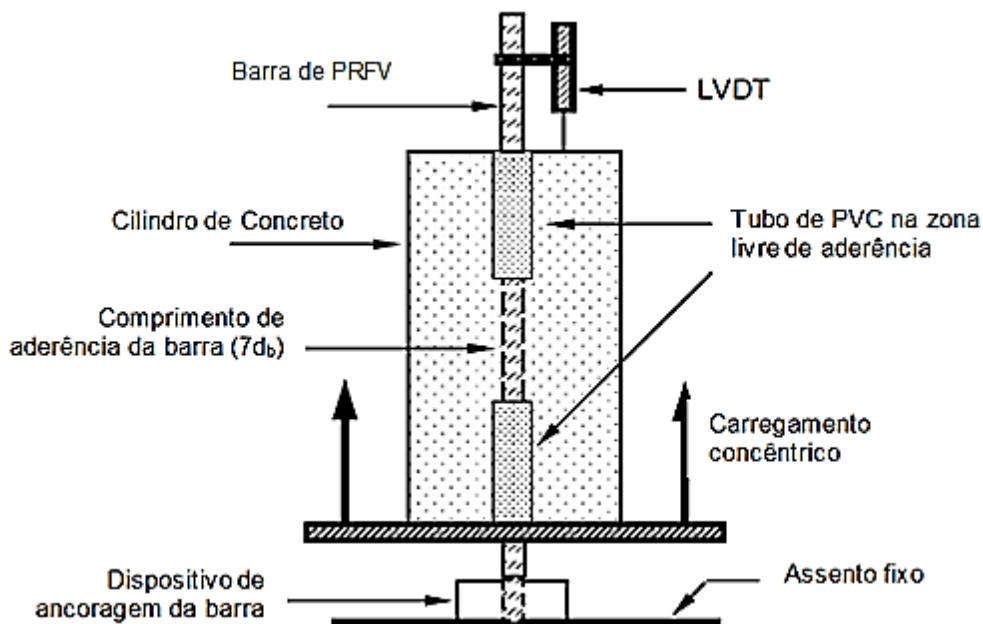


Figura 2.41 – Set up do ensaio (HARAJILI *et al*, 2011).

Baseados nos resultados desta pesquisa as conclusões seguintes podem ser descritas:

- verificou-se que a resistência de aderência das barras de PRFV era largamente dependente das condições de superfície das barras;
- o arrancamento local responsável pela tensão da aderência *versus* deslocamento das barras corrugadas de PRFV é intrinsecamente semelhante ao das barras de aço relatados na literatura;
- a resistência de aderência de ambos os tipos de barras de PRFV investigadas, foi cerca de 2 a 3 vezes menor do que as de aço;
- as previsões sobre o desenvolvimento/ancoragem de ambos os tipos de barras de PRFV de acordo com a norma do Comitê da ACI440 (ACI, 2006), não foi conservativo em comparação com os dados do ensaio. Além disso em contradição com a norma corrente da ACI440 (ACI,2006), o uso da armadura transversal aumentou a resistência de aderência consideravelmente de 15 a 30 %;
- apoiado nos resultados do estudo experimental presente, a adoção de uma expressão comum para o cálculo do desenvolvimento/força da resistência das barras de PRFV, independente das condições de superfície das barras, tal como atualmente propostas pelo Comitê ACI 440, pode levar a previsões não conservadoras. Portanto, recomenda-se que a ACI 440 revise a sua equação de modo a fazer a avaliação do desenvolvimento do comprimento de ancoragem mais

conservador ou então adotar uma abordagem mais racional, classificando os diferentes tipos de barras de PRFV em relação a resistência de aderência dependentes de suas deformações superficiais.

TASTANI *et al.* (2011) estudaram a aderência de barras de PRFV em concreto, fazendo uma avaliação experimental e interpretação analítica.

O programa experimental foi constituído de 30 amostras de arrancamento de tensão direta com pequenas ancoragens. Os parâmetros considerados foram a rugosidade, o diâmetro da barra, o efeito do tamanho expresso pela constante de cobrimento e a pressão externa de confinamento exercida sobre o comprimento de ancoragem por aderência externamente transversal das barras de PRFV. Um modelo analítico de tensão vs deslocamento de uma barra de PRFV foi obtido a partir de princípios primários e calibrados com os dados de ensaios da presente investigação. A Equação 2.13 exemplifica.

$$f_b = \frac{1}{L_b} \left(\int_0^{l_p} f_b^{\max} dx + \int_{l_p}^{L_b} f_b(x) dx \right) \quad (2.14)$$

onde:

f_b = é a resistência de aderência;

L_b = comprimento de aderência;

l_p = comprimento de plastificação;

Usando o modelo calibrado, valores de projeto para aderência e deslocamento foram estimados com referência ao modelo do Estado Limite da norma de aderência. O modelo analítico formulado baseou-se na solução matemática das equações diferenciais de campo e foi usado para a interpretação experimental encontrada, e para obter os pontos marcantes de um local característico de aderência-deslizamento para os tipos de barras consideradas.

As principais conclusões da pesquisa experimental foram como se segue:

- a resistência de aderência local de barras de PRFV ancoradas em um campo de tensão era da ordem de $f_b = 6^{-10}$ MPa, isto é, inferior que os valores relatados na literatura internacional, os quais são obtidos a partir de ensaios de arrancamento local;
- barras do tipo CPP (fabricante *Concrete Protection Products, U.S.*) foram danificadas por descamação, por causa da resistência ao cisalhamento alto pelo

cobrimento do concreto excedido o correspondente a resistência na interface entre a areia de revestimento na interface entre a areia de cobertura e do núcleo da barra. Barras do tipo Aslan 100 (fabricante *Hughes Brothers Inc, U.S.*) demonstraram somente danos de abrasão na superfície externa;

- a tendência geral relatada na (FIB, 2000), que diâmetro de barra maior produz uma resistência de aderência menor, foi confirmada apenas nas amostras do tipo CPP. Barras do tipo Aslan demonstraram somente danos de abrasão na superfície externa.

2.6 Considerações finais

A conclusões comuns a que chegaram vários pesquisadores foi que o comportamento da aderência e os mecanismos de rupturas das barras de PRF são significativamente diferentes dos de barras de aço em concretos semelhantes. No entanto, reconhecendo que os resultados das pesquisas são baseados em ensaios com barras de diâmetros específicos, fabricantes selecionados, comprimentos de ancoragem específicos, intervalo selecionado de temperaturas e condições ambientais (temperatura ambiente normalmente, condições de congelamento e descongelamento em câmara climática). Nota-se que nem todos estes parâmetros tem sido investigados suficientemente para chegar a conclusões definitivas que possa ser aplicadas a diferentes tipos de barras de PRFV comercialmente disponíveis.

É importante salientar que não é possível fazer uma substituição direta de barras de aço pelas de PRFV sem aplicar os princípios da Norma de projeto apropriada ACI440.1R (ACI, 2006) para o dimensionamento estrutural. Devido à falta de padrões bem estabelecidos para uma grande variedade de barras de PRFV que estão sendo comercializadas hoje e por estas barras de PRFV possuírem propriedades anisotrópicas e mecânicas distintas das de aço, o que influencia e muito no comportamento da aderência concreto-barras, e pelo comportamento de aderência destas barras possuírem vários parâmetros que os influenciam, faz-se necessária uma melhor compreensão das propriedades mecânicas e do comportamento da aderência, a fim de que se tenha uma abordagem racional para a concepção das estruturas armadas e reforçadas por PRFV.

3. Programa experimental

Dando continuidade a uma série de estudos sobre aderência entre concreto e barras de PRFV, este trabalho teve como objetivo o estudo experimental do comportamento da aderência entre concreto e barras lisas de PRFV. Este estudo experimental foi realizado utilizando ensaios de arrancamento padronizados pela RILEM/FIP/CEB (1973) adaptando a forma padrão cúbica à forma cilíndrica.

Após a realização dos ensaios de arrancamento, foram analisados e discutidos os resultados.

O programa experimental foi dividido nas seguintes etapas:

- ensaios preliminares para determinar as propriedades dos materiais constituintes do concreto e dos corpos de prova cilíndricos do concreto;
- obtenção dos traços de concretos, com classes de resistência à compressão de 47 MPa e 58 MPa;
- ensaio para a determinação das propriedades das barras de PRFV;
- ensaios de arrancamento das barras de PRFV em corpos de prova cilíndricos de concreto.

Para a realização deste projeto, foram usadas as instalações do Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) e do Instituto Militar de Engenharia (IME).

3.1 Materiais para o ensaio de arrancamento

Cimento

Na dosagem do concreto foi utilizado o cimento Mauá CII E-32 (cimento com adição de escória) .

Agregado

O agregado miúdo empregado consistiu em uma areia quartzosa proveniente do Rio Paraíba do Sul e o agregado graúdo de gnaiss britado, com dimensão máxima de 19 mm. Foram executados ensaios de caracterização para determinação da massa específica e distribuição granulométrica dos agregados. Foi obtida por

meio do frasco de Chapman a massa específica aparente do agregado miúdo, segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009).

Já a massa específica do agregado graúdo, bem como sua massa específica aparente e absorção de água, foram obtidas conforme a NBR NM 53 (ABNT, 2009).

A determinação da composição granulométrica dos agregados miúdos e graúdo para concreto foi obtida através do peneiramento, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Além disso, foram obtidos o módulo de finura e a dimensão máxima característica do respectivo agregado. As composições granulométricas dos agregado miúdo e graúdo estão apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2, respectivamente. Na Tabela 3.3 podem ser vistas algumas importante propriedades dos agregados miúdo e graúdo.

Tabela 3.1 - Composição granulométrica do agregado miúdo.

Peneira (mm)	Porcentagem retida	Porcentagem retida acumulada
4,8	0,4	0,4
2,4	1,8	2,18
1,2	10,4	12,6
0,6	7,6	20,2
0,3	29,6	49,8
0,15	47	96,8
Fundo	3,16	100
Módulo de finura		1,82

Tabela 3.2 - Composição granulométrica do agregado graúdo.

Peneira (mm)	Porcentagem retida	Porcentagem retida acumulada
25	0	0
19	5	5
12,5	69	74
9,5	17	91
6,3	5	96
4,8	0,9	96,9
2,4	0,4	97,4
Fundo	2,62	100
Dimensão máxima		19 mm

Tabela 3.3 - Propriedades físicas dos agregado miúdo e graúdo.

Agregado miúdo	Módulo de finura = 1,82
	Massa específica = 2591 kg/m ³
	Massa unitária em estado solto = 1391 kg/m ³
Agregado graúdo	Dimensão máxima característica = 19 mm
	Massa específica = 2700 kg/m ³
	Massa unitária em estado solto = 1424 kg/m ³

Água

A água utilizada na produção foi proveniente da rede de abastecimento de água Águas do Paraíba S/A, responsável pela distribuição no Município de Campos dos Goytacazes-RJ.

Superplastificante

Foi utilizado superplastificante Glenium 51, da marca Degussa.

3.1.1 Dosagem dos concretos

A dosagem dos materiais foi realizada segundo o método descrito pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) adaptado do método da ACI (American Concrete Institute), para agregados brasileiros. Foram utilizadas duas resistências à compressão do concreto, de 47 e 58 MPa, para esta última foi adicionado superplastificante. O consumo de materiais por metro cúbico de concreto e os respectivos traços, em massa, estão resumidos na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Propriedades físicas dos agregado miúdo e graúdo.

Consumo de material por m ³ de concreto (kg/m ³)	Resistência à compressão do concreto aos 45 dias (MPa)	
	47	58
Cimento	444	478
Areia	648	860
Brita	1096	905,3
Água	200	164,4
Superplastificante	-	4,4
Traço em massa	1:1,46:2,47:0,45	1:1,80:1,89:0,34:0,0092

3.1.2 Mistura dos materiais constituintes do concreto

A mistura dos materiais constituintes do concreto foi feita na ordem descrita abaixo, em betoneira de eixo inclinado:

- mistura durante 3 minutos de 2/3 da brita e da água com cimento;
- adição de areia com o restante da água e da brita, misturando por mais 3 minutos e também colocando-se superplastificante.

3.1.3 Caracterização mecânica do concreto

Após a caracterização dos materiais isoladamente para a obtenção de suas propriedades, foram determinadas as propriedades conjuntas dos materiais supracitados. Foram confeccionados seis corpos de prova para os ensaios de compressão simples, tração na flexão tração por compressão diametral, para ensaiá-los simultaneamente à etapa de realização dos ensaios de arrancamento das barras de PRFV em cilindros de concreto. Os corpos de prova foram desmoldados com 24 horas após a concretagem e curados (imersão em água) até a data do ensaio de arrancamento. As Tabelas 3.5 e 3.6 mostram, respectivamente, os ensaios mencionados anteriormente e os resultados das propriedades obtidas no estado endurecido dos corpos de prova do concreto ensaiados aos 45. Já nas Figuras 3.1 a 3.3, são mostrados os ensaios realizados.

Tabela 3.5 - Ensaio de caracterização do concreto.

ENSAIOS	Dimensão dos corpos de prova (mm)	Idade dos ensaios (dias)	Norma	Quantidade	Forma dos corpos de prova
Resistência à compressão	100 x 200	45	NBR 5739 (ABNT, 2007)	6	Cilíndricos
Resistência à tração na flexão	100 x 100 x 400	45	NBR 12142 (ABNT, 2010)	6	Prismáticos
Resistência à tração por compressão diametral	100 x 200	45	NBR 7222 (ABNT, 2010)	6	Cilíndricos

Tabela 3.6 - Propriedades mecânicas dos corpos de prova obtida aos 45 dias.

Tipos	f_{c45} (MPa)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	f_t (MPa)
Conc47	47	2,9	2,4
Conc58	58	3,1	3,0

onde:

f_{c45} = é a resistência à compressão do concreto aos 45 dias;

$f_{ct,sp}$ = é a resistência à tração por compressão diametral

$f_{ct, sp}$ = é a resistência à tração na flexão.



Figura 3.1 - Ensaio de tração na flexão.



Figura 3.2 - Ensaio de tração por compressão diametral.



Figura 3.3 - Ensaio à compressão simples.

3.1.4 Caracterizações físicas e químicas das barras de PRFV

Com o objetivo de conhecer o efeito dos componentes (tipo e quantidade de fibra e tipo de resina) das barras utilizadas (diâmetros 9,7 mm, 8,6 mm, 8,3 mm, 7,3 mm, 7,1 mm, 6,6 mm e 6,4 mm) no estudo de aderência concreto-barra e da resistência à tração foram realizadas algumas análises. Para determinar o tipo e a quantidade de fibra foi feita uma análise química semi-qualitativa e semi-quantitativa pontual, via MEV-EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*), respectivamente. Para determinar o tipo de resina, foram feitas análises de espectroscopia no infravermelho por Transformada de Fourier (*FTIR – Fourier Transform Infrared Spectrometry*). A Figura 3.4 mostra as barras utilizadas. Observa-se que uma das barras era ranhurada (diâmetro 9,7mm) e as restantes eram lisas.

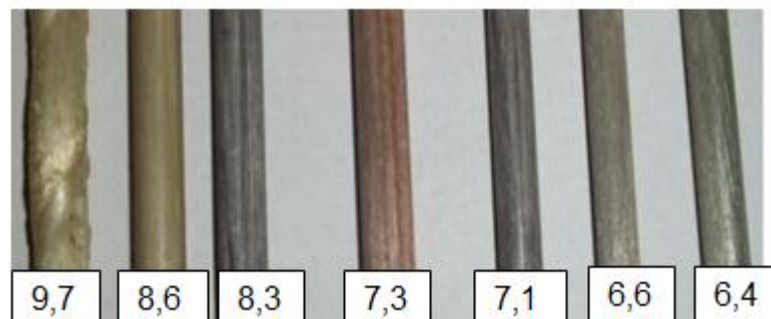


Figura 3.4 - Barras de PRFV.

Para a realização do ensaio via MEV-EDS foram inicialmente preparadas amostras dos sete modelos de barras, constando de duas etapas: limpeza das

amostras no aparelho de ultrassom (ver Figura 3.5 (a) e (b)) e metalização das amostras com o metal pesado ouro-paládio, as quais são apresentadas na Figura 3.5 (c). O MEV é apresentado nas Figuras 3.6 (a) e (b).



a) Aparelho de ultrassom



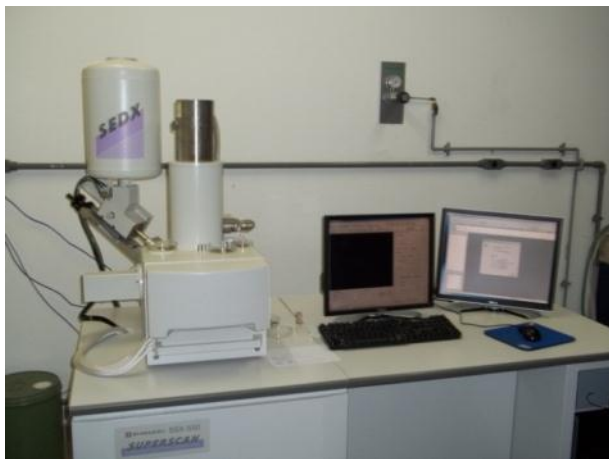
b) Limpeza das amostras



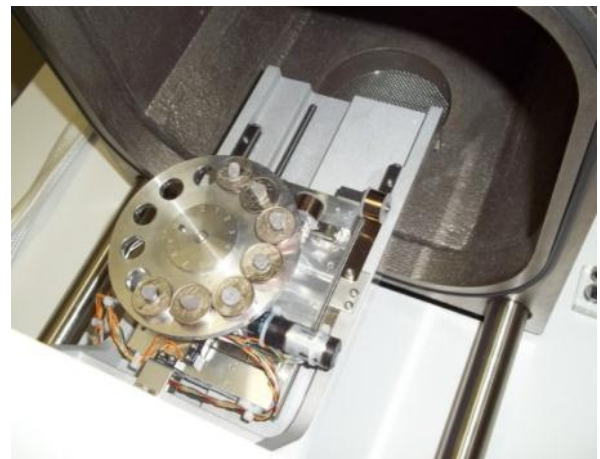
c) Metalização das amostras com ouro-paládio

Figura 3.5 - Processo de preparação das amostras.

Neste ensaio, o MEV rastreia a superfície da amostra com um feixe de elétrons que, conseqüentemente, é refletido ou retro-espalhado, coletado e mostrado à mesma taxa de varredura sobre um tubo de raios catódicos, semelhante à tela de uma televisão, (COSTA, 2005).



a) Aparelho de microscopia eletrônica de varredura utilizado



b) Visualização das amostras das barras de PRFV no MEV

Figura 3.6 - Amostras no MEV.

A análise qualitativa dos modelos de barras foi obtida através do MEV, sendo realizada em alguns pontos. E para a análise quantitativa, determinaram-se os

percentuais em peso dos elementos químicos constituintes de cada ponto e em seguida foi feita uma média destes elementos químicos. Mostram-se nas Figuras 3.7 a 3.13, para barras de diferentes diâmetros, os resultados da Microscopia de Varredura de forma qualitativa e nas Tabelas 3.7 a 3.13 de forma quantitativa.

Na análise semi-qualitativa foram encontrados traços de carbono, sendo estes provenientes da fita adesiva utilizada para fixar as amostras. Os elementos químicos não encontrados nas tabelas dos quantitativos e apresentados nos gráficos são provenientes da resina na superfície das fibras. Através da Tabela 3.14, foi identificado o tipo de fibra comercial de cada uma das barras avaliadas. Os resultados das características físicas e químicas de todas as barras são apresentados na Tabela 3.15.

Outro processo utilizado foi o de identificação do tipo de resina. Foram feitas análises de espectroscopia por infravermelho (*FTIR – Fourier Transform Infrared Spectrometry*, Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier).

São apresentadas nas Figuras 3.14 e 3.15 as amostras preparadas para o ensaio *FTIR* e o aparelho utilizado para este ensaio respectivamente. Nas Figuras 3.16 a 3.22 são mostrados os espectros separadamente das barras de diferentes diâmetros.

- Barra Ø 6,4 mm

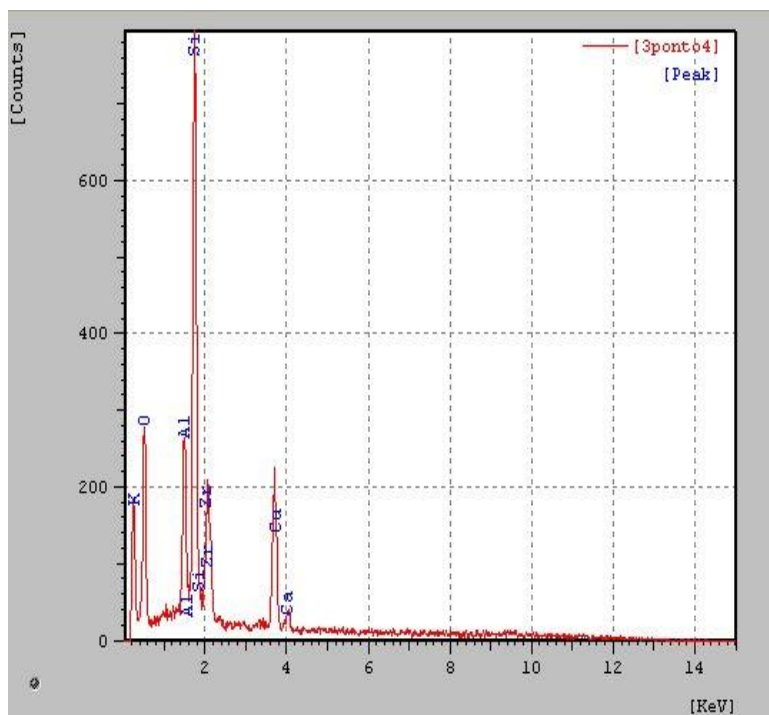
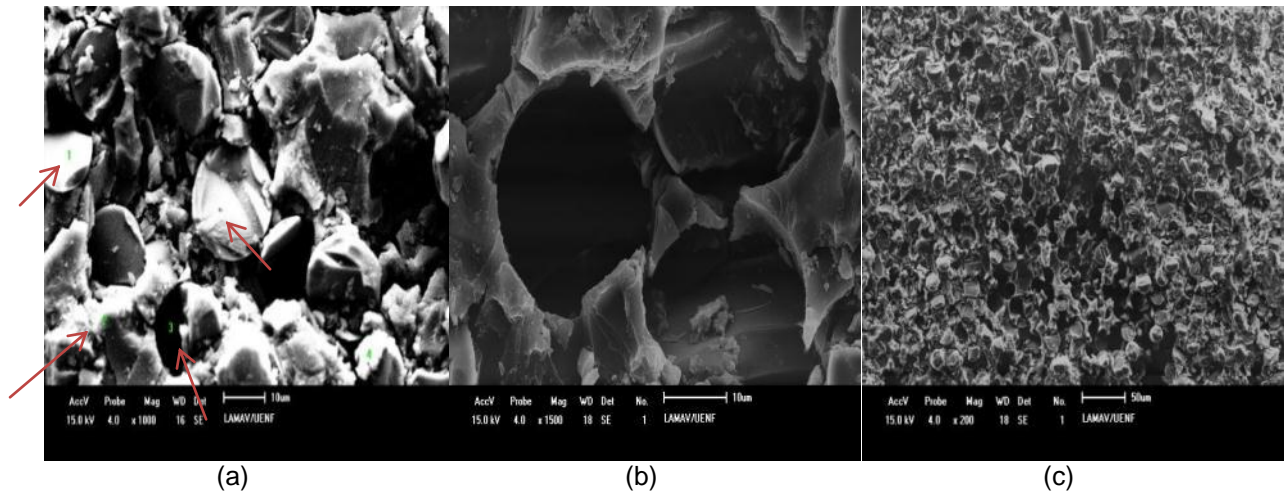


Tabela 3.7 - Percentual em peso dos elementos químicos da barra de diâmetro 6,4 mm.

Elemento	Porcentagem em peso
Si	66,16
Al	5
Ca	16,58
K	10

(d)

Figura 3.7 – Resultados da microscopia de varredura de forma qualitativa e quantitativa do modelo da barra de diâmetro 6,4 mm; a) pontos analisados, aumento de 1000X; b) microscopia para identificação do tipo de fibra e resina, aumento de 1500X; c) microscopia para teor de fibra, aumento de 200X; d) qualitativo do ponto 4.

- Barra \varnothing 6,6 mm

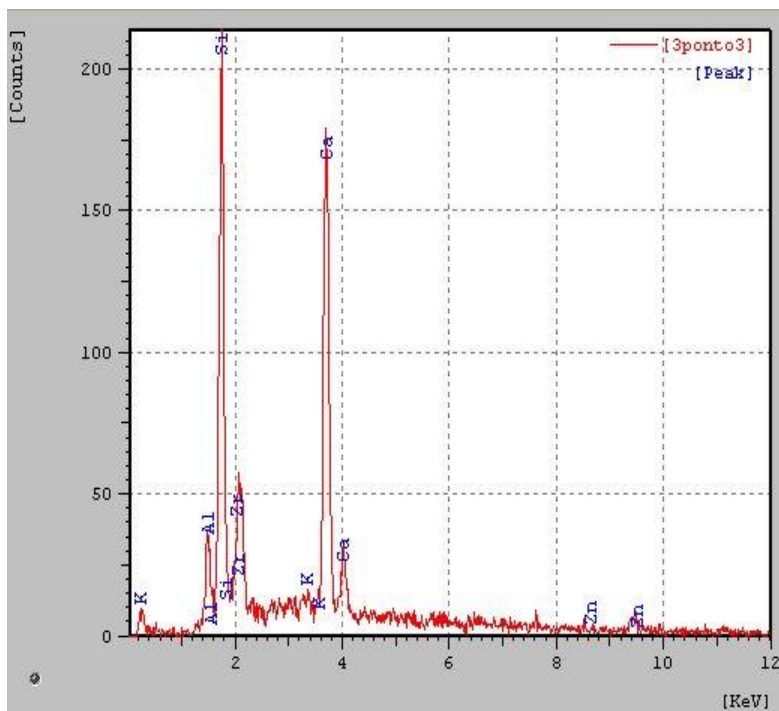
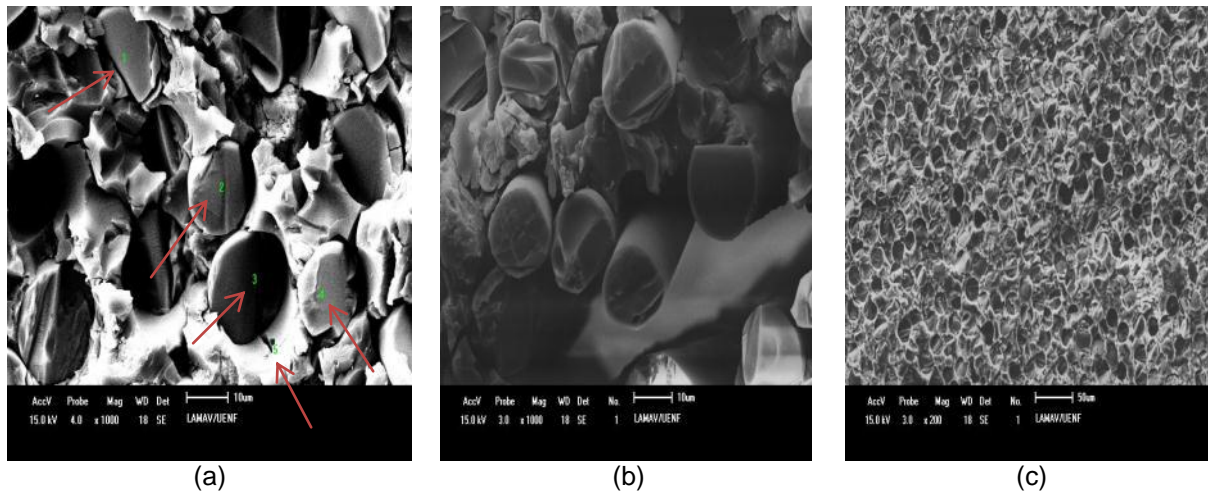


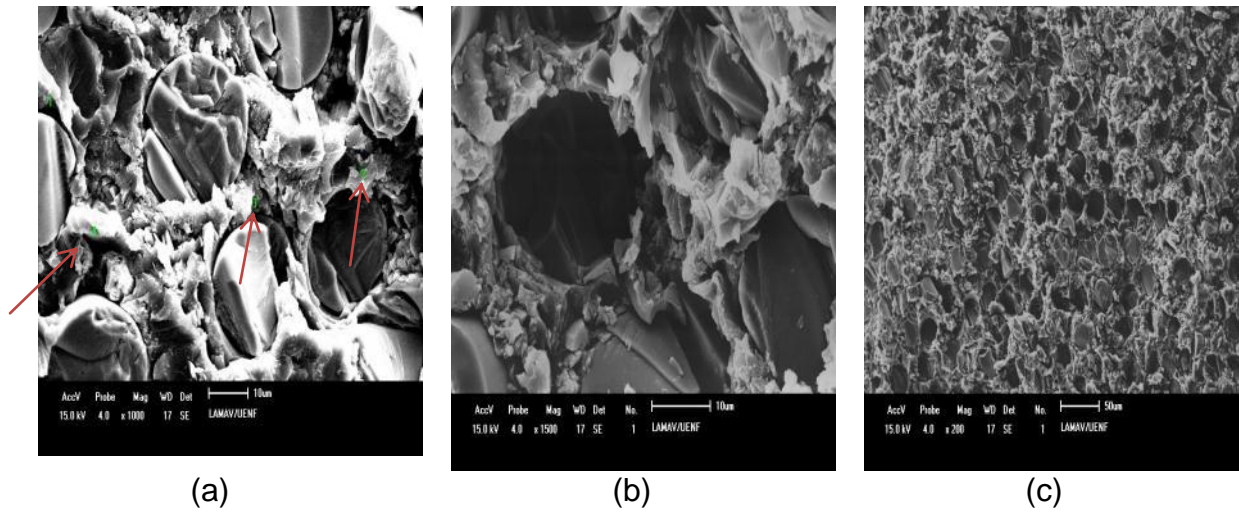
Tabela 3.8 - Percentual em peso dos elementos químicos da barra de diâmetro 6,6 mm.

Elemento	Porcentagem em peso
Si	67,78
Al	5
Ca	23,13
K	10

(d)

Figura 3.8 – Resultados da microscopia de varredura de forma qualitativa e quantitativa do modelo da barra de diâmetro 6,6 mm; a) pontos analisados, aumento de 100X; b) microscopia para identificação do tipo de fibra e resina, aumento de 1500X; c) microscopia para teor de fibra, aumento de 200X; d) qualitativo do ponto 3.

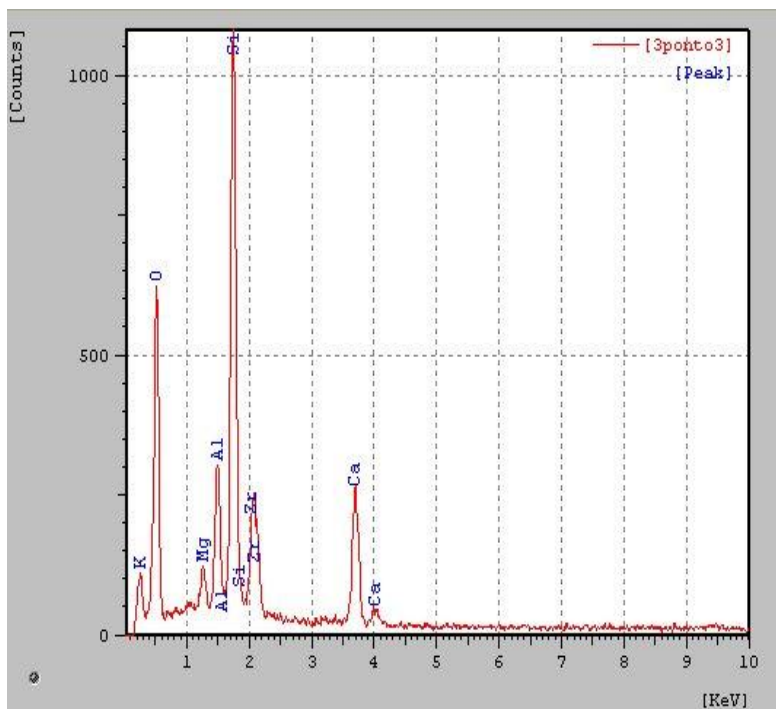
- Barra \varnothing 7,1 mm



(a)

(b)

(c)



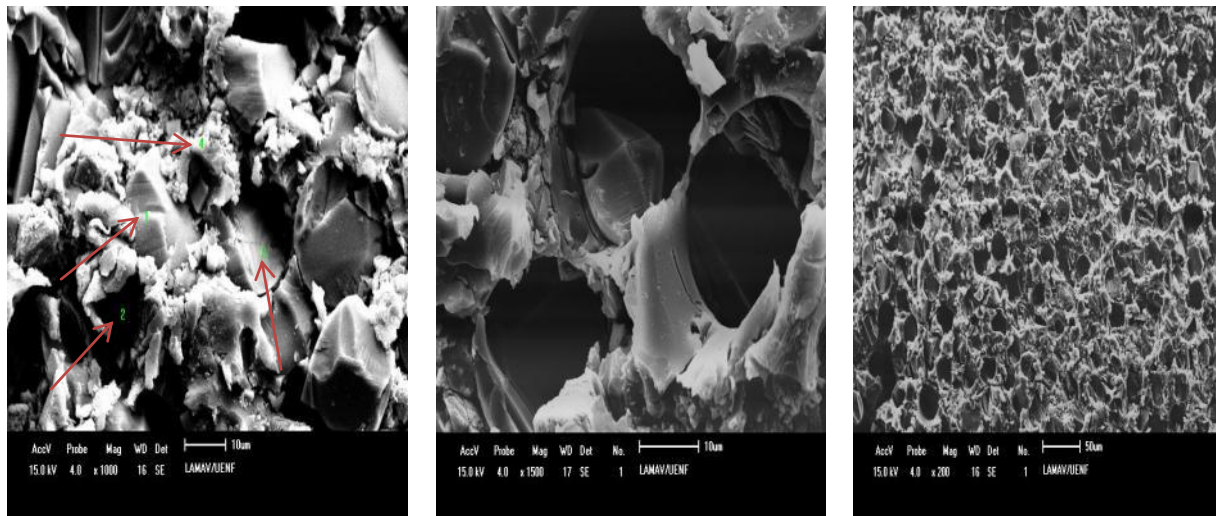
(d)

Tabela 3.9 - Percentual em peso dos elementos químicos da barra de diâmetro 7,1 mm.

Elemento	Porcentagem em peso
Si	66,38
K	10
Na	10
Mg	2
Al	5
Ca	25

Figura 3.9 – Resultados da microscopia de varredura de forma qualitativa e quantitativa do modelo da barra de diâmetro 7,1 mm; a) pontos analisados, aumento de 1000X; b) microscopia para identificação do tipo de fibra e resina, aumento de 1500X; c) microscopia para teor de fibra, aumento de 200X; d) qualitativo do ponto 1.

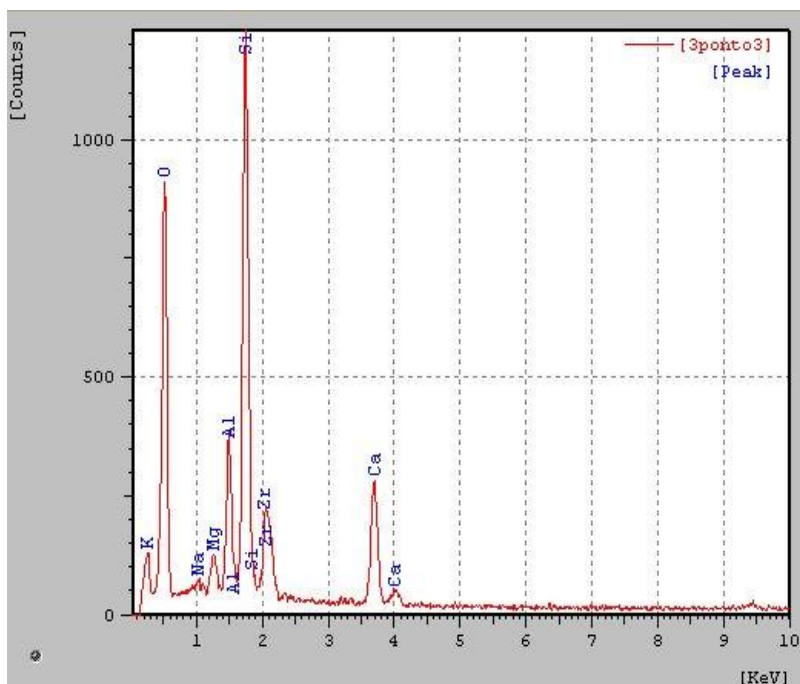
- Barra Ø 7,3 mm



(a)

(b)

(c)



(d)

Tabela 3.10 - Porcentagem da média dos pontos dos elementos analisados da barra de diâmetro 7,3 mm.

Elemento	Porcentagem em peso
Si	54
Mg	1,19
Ca	22,12
Al	15
K	1,5

Figura 3.10 – Resultados da microscopia de varredura de forma qualitativa e quantitativa do modelo da barra de diâmetro 7,3 mm; a) pontos analisados, aumento de 1000X; b) microscopia para identificação do tipo de fibra e resina, aumento de 1500X; c) microscopia para teor de fibra, aumento de 200X; d) qualitativo do ponto 3.

- Barra Ø 8,3 mm

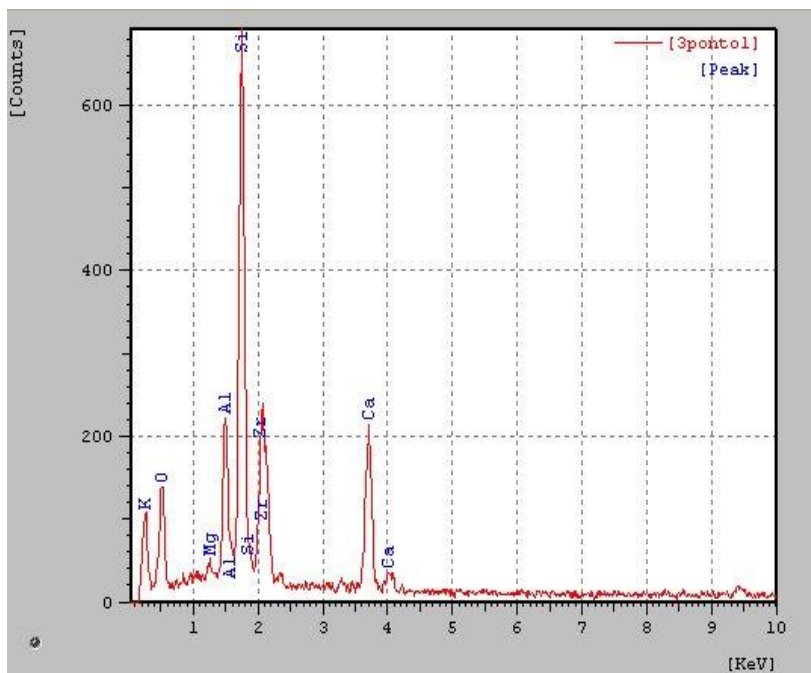
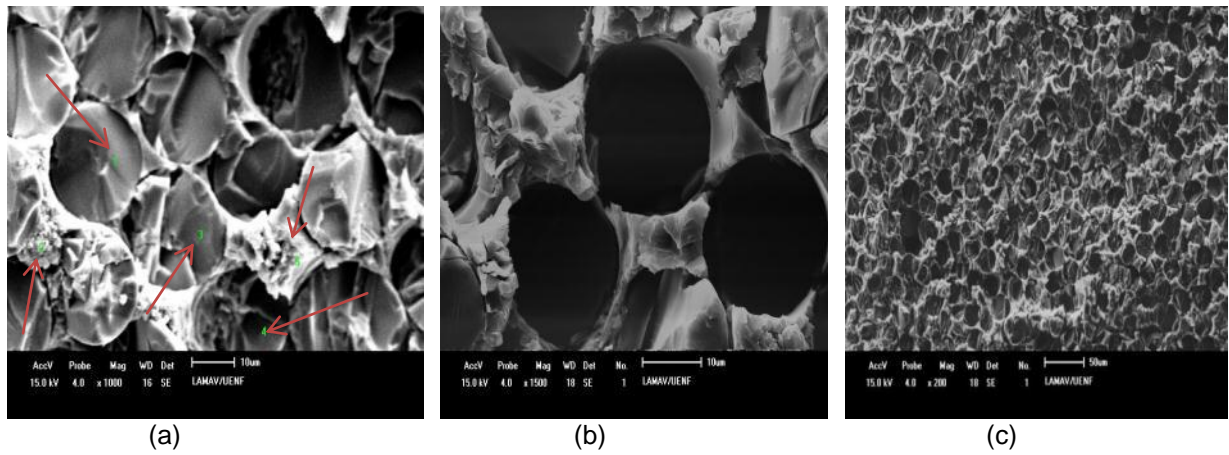


Tabela 3.11 - Porcentagem da média dos pontos dos elementos analisados da barra de diâmetro 8,3 mm.

Elemento	Porcentagem em peso
K	9,5
Si	66
Al	5
Ca	22,12
Mg	2

Figura 3.11 – Resultados da microscopia de varredura de forma qualitativa e quantitativa do modelo da barra de diâmetro 8,3 mm; a) pontos analisados, aumento de 1000X ; b) microscopia para identificação do tipo de fibra e resina, aumento de 1500X; c) microscopia para teor de fibra, aumento de 200X; d) qualitativo do ponto 1.

- Barra Ø 8,6 mm

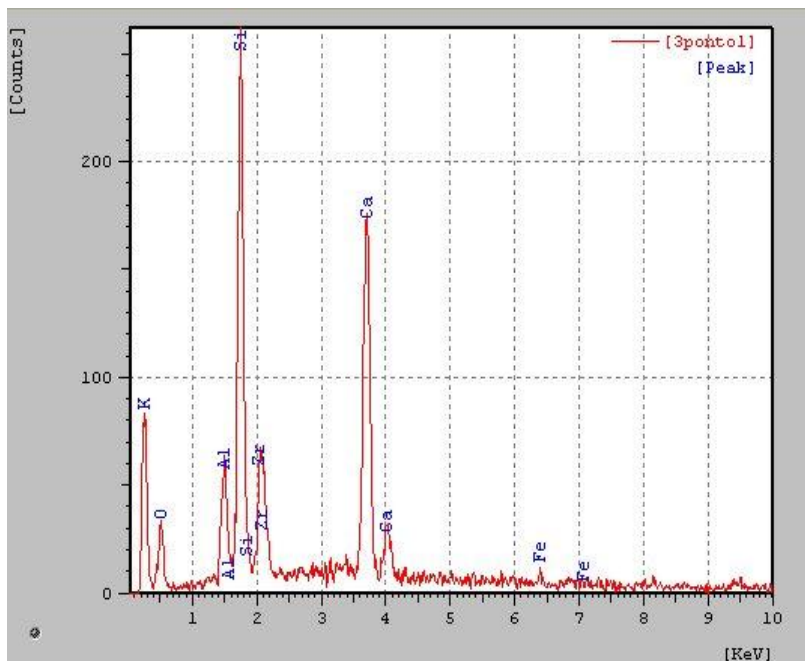
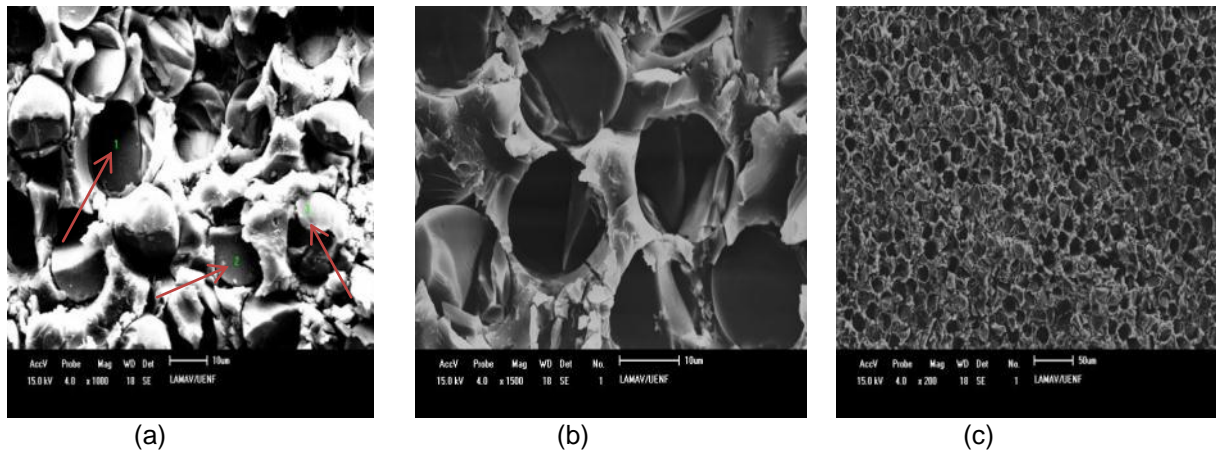


Tabela 3.12 - Porcentagem da média dos pontos dos elementos analisados da barra de diâmetro 8,6 mm.

Elemento	Porcentagem em peso
K	1,5
Si	53
Al	13,3
Ca	16

(d)

Figura 3.12 – Resultados da microscopia de varredura de forma qualitativa e quantitativa do modelo da barra de diâmetro 8,6 mm; a) pontos analisados, aumento de 1000X; b) microscopia para identificação do tipo de fibra e resina, aumento de 1500X; c) microscopia para teor de fibra, aumento de 200X; d) qualitativo do ponto 1.

- Barra Ø 9,7 mm

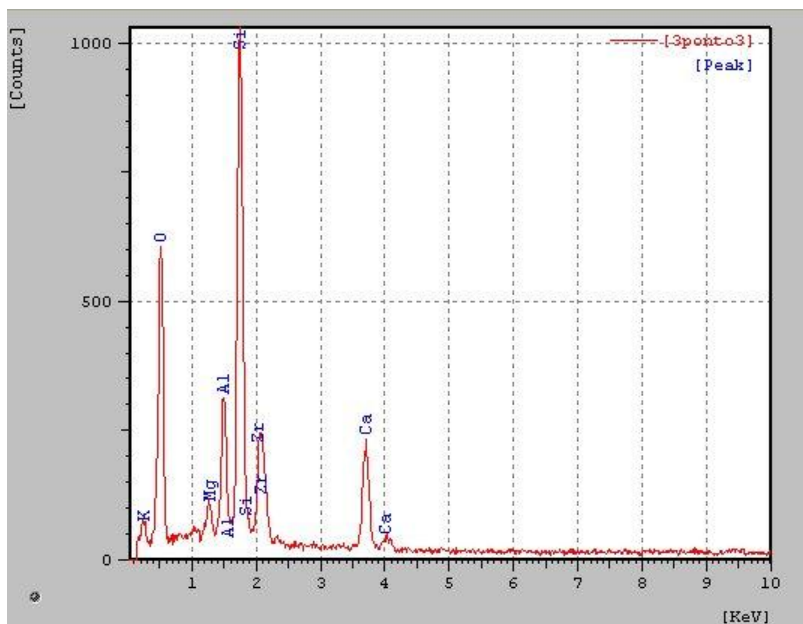
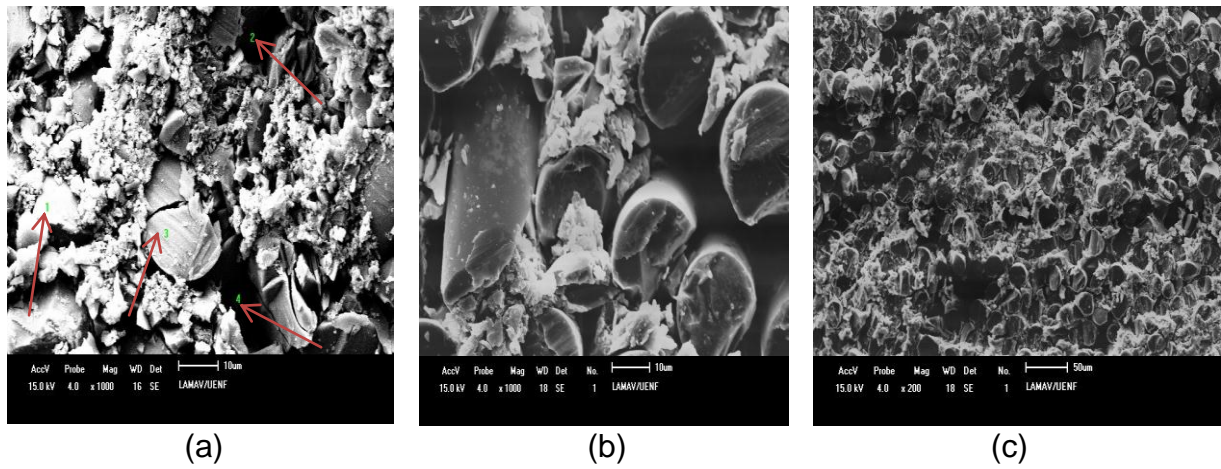


Tabela 3.13 - Porcentagem da média dos pontos dos elementos analisados da barra de diâmetro 9,7 mm.

Elemento	Porcentagem em peso
Si	55
Mg	1,7
Al	13
Ca	17,3

Figura 3.13 – Resultados da microscopia de varredura de forma qualitativa e quantitativa do modelo da barra de diâmetro 9,7 mm; a) pontos analisados; b) microscopia para identificação do tipo de fibra e resina; c) microscopia para teor de fibra; d) qualitativo do ponto 3.

Tabela 3.14 - Faixas de composição das fibras de vidro comerciais - porcentagem em peso, (ACI 440R, 1996).

Composição	Faixa de vidro - E	Faixa de vidro - S	Faixa de vidro - C
Dióxido de silício	52 - 56	65	64 - 68
Óxido de alumínio	12 - 16	25	3 - 5
Óxido bórico	5 - 10	-	4 - 6
Óxido de sódio e óxido de potássio	0 - 2	-	7 - 10
Óxido de magnésio	0 - 5	10	2 - 4
Óxido de cálcio	16 - 25	-	11 - 25
Óxido de bário	-	-	0 - 1
Óxido de Zinco	-	-	-
Óxido de titânio	0 - 1.5	-	-
Óxido de zircônio	-	-	-
Óxido de ferro	0 - 0.8	-	-
Ferro	0 - 1	-	-

Tabela 3.15 - Características físicas e químicas da barras de PRFV avaliadas, em peso.

Barra	Tipo de fibra	Teor de fibras (%)	Teor de resina (%)
6,4	FIBRA C	34,98	65,02
6,6	FIBRA C	58,46	41,54
7,1	FIBRA C	43,51	56,49
7,3	FIBRA E	52,03	47,97
8,3	FIBRA C	83,88	16,12
8,6	FIBRA E	90,22	9,78
9,7	FIBRA E	91,84	8,16



Figura 3.14 – Amostras das barras de PRFV para o ensaio de *FTIR*.



Figura 3.15 – Aparelho para o ensaio de *FTIR*.

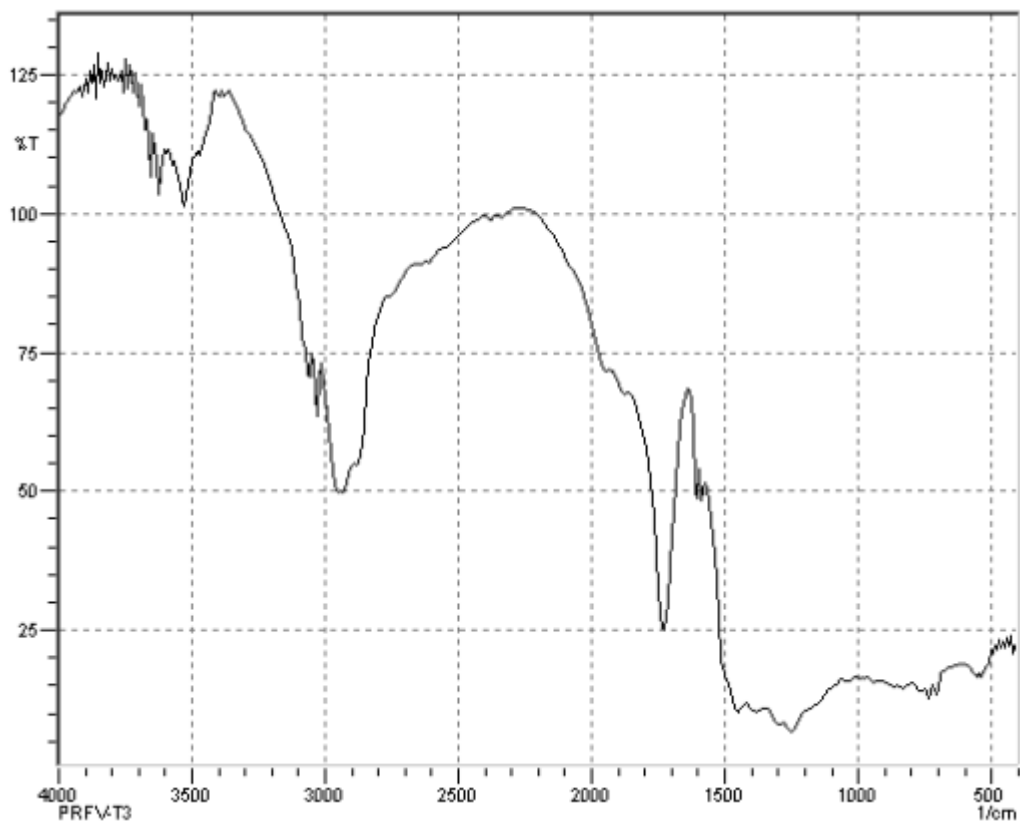


Figura 3.16 – Espectros de *FTIR* de resina poliéster isoftálica na barra de diâmetro 6,4 mm.

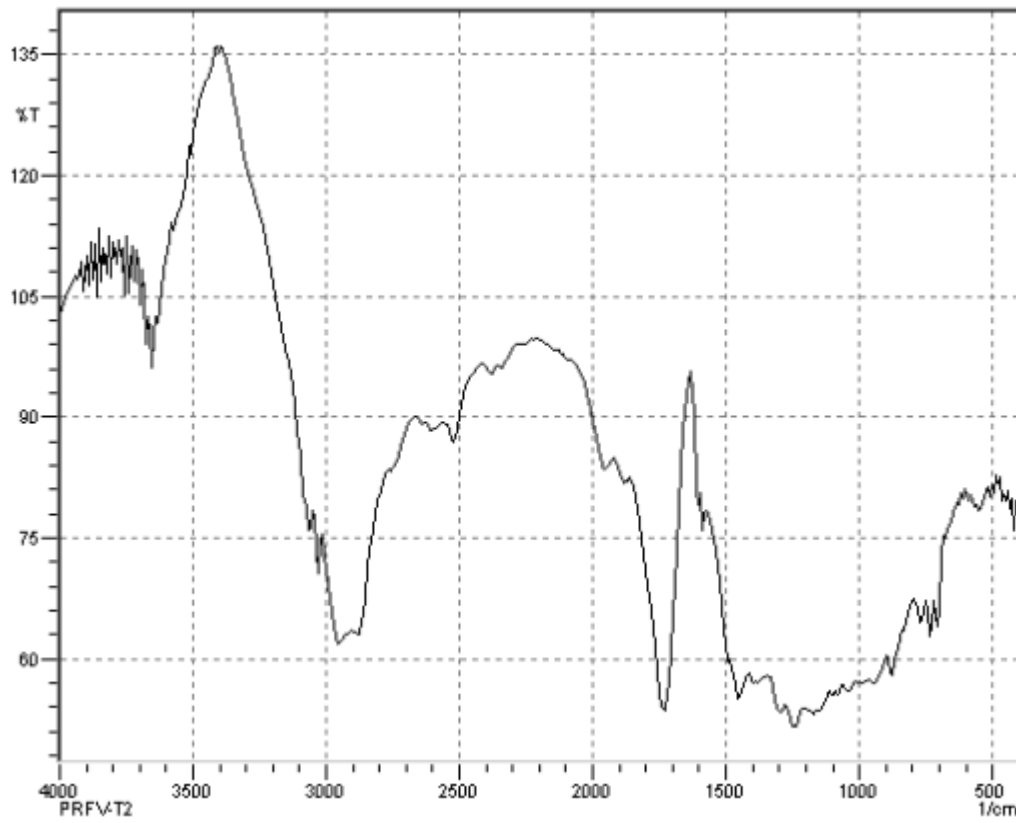


Figura 3.17 – Espectros de *FTIR* de resina poliéster isoftálica na barra de diâmetro 6,6 mm.

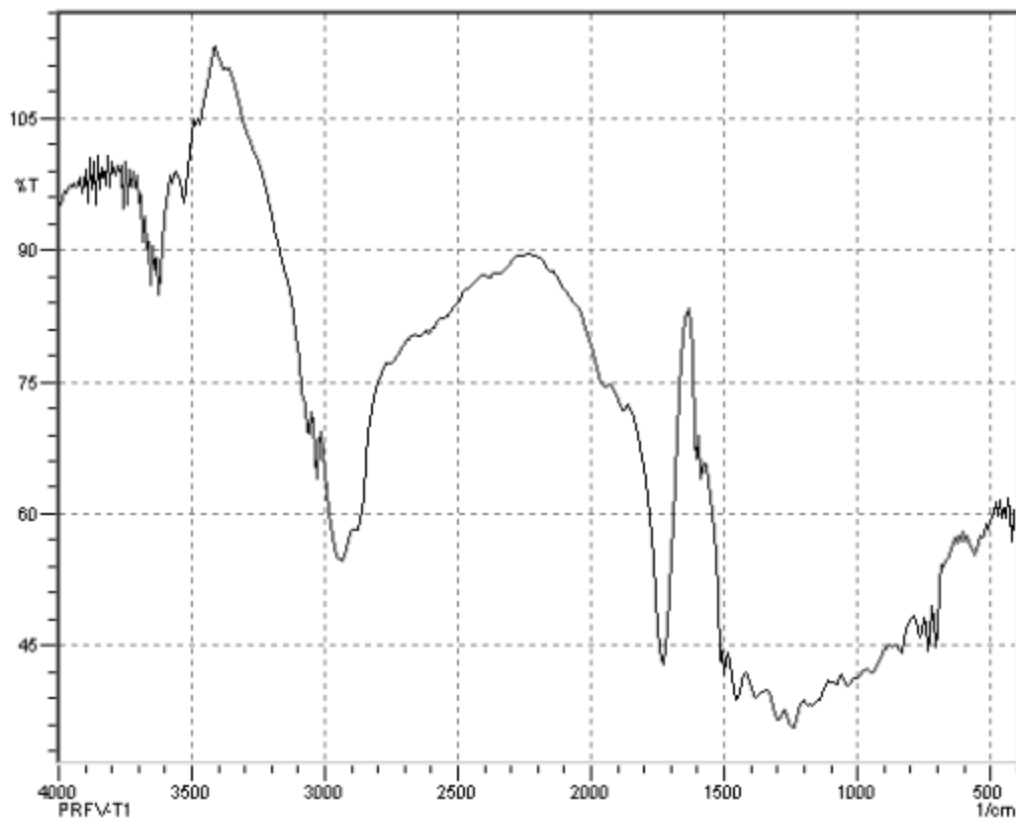


Figura 3.18 – Espectros de *FTIR* de resina poliéster isoftálica na barra de diâmetro 7,1 mm.

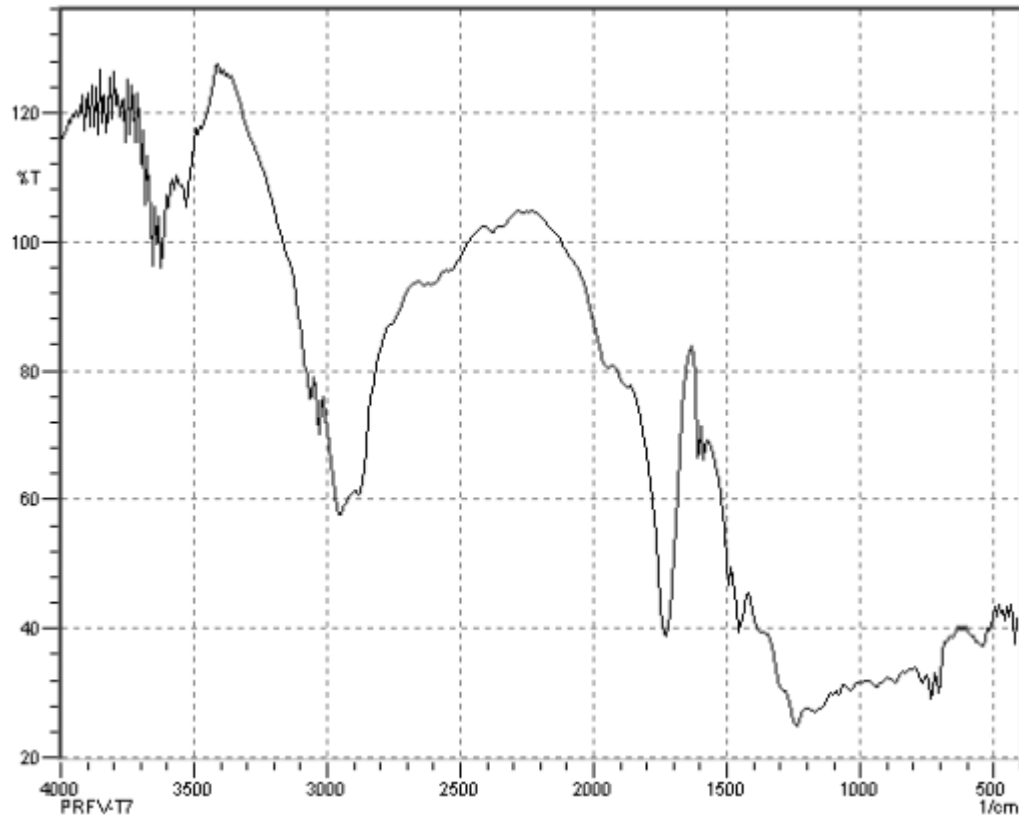


Figura 3.19 – Espectros de *FTIR* de resina poliéster isoftálica na barra de diâmetro 7,3 mm.

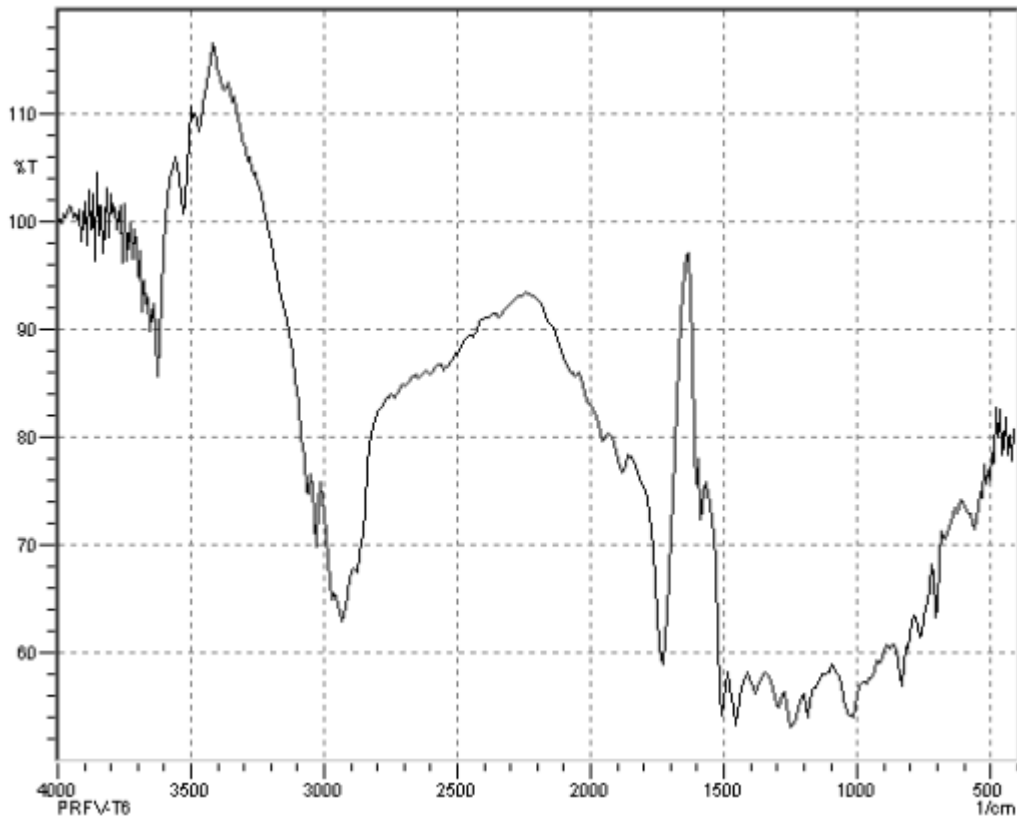


Figura 3.20 – Espectros de *FTIR* de resina poliéster isoftálica na barra de diâmetro 8,3 mm.

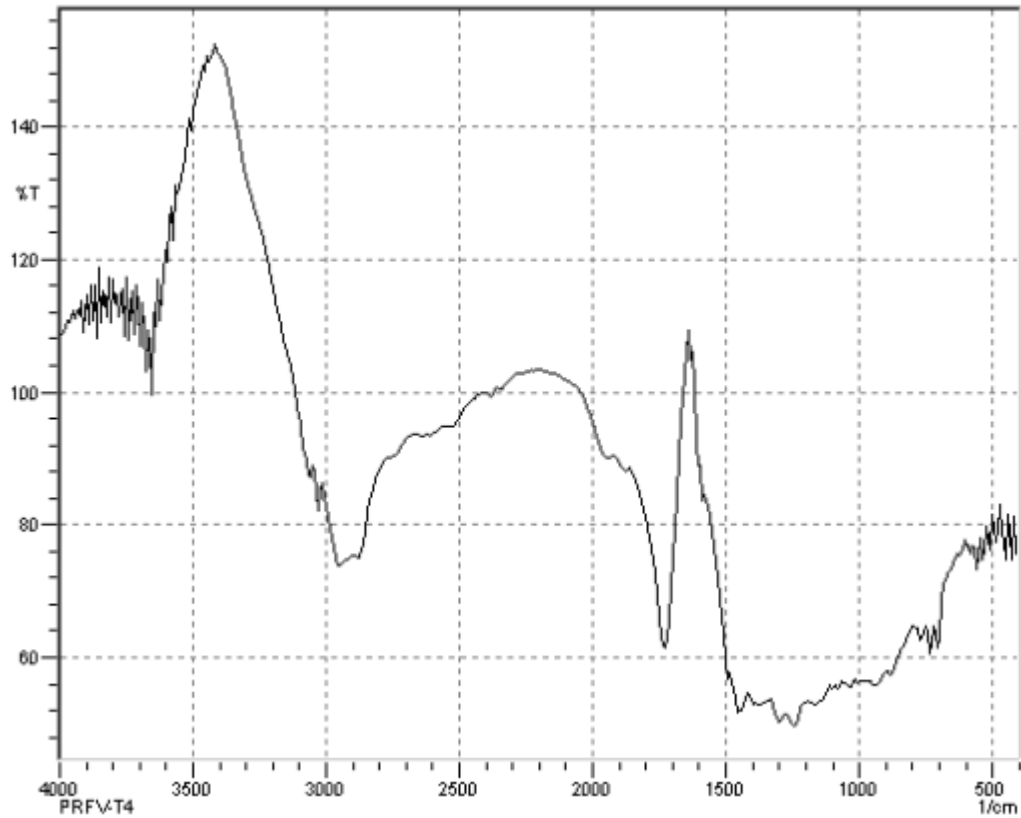


Figura 3.21 – Espectros de *FTIR* de resina poliéster isoftálica na barra de diâmetro 8,6 mm.

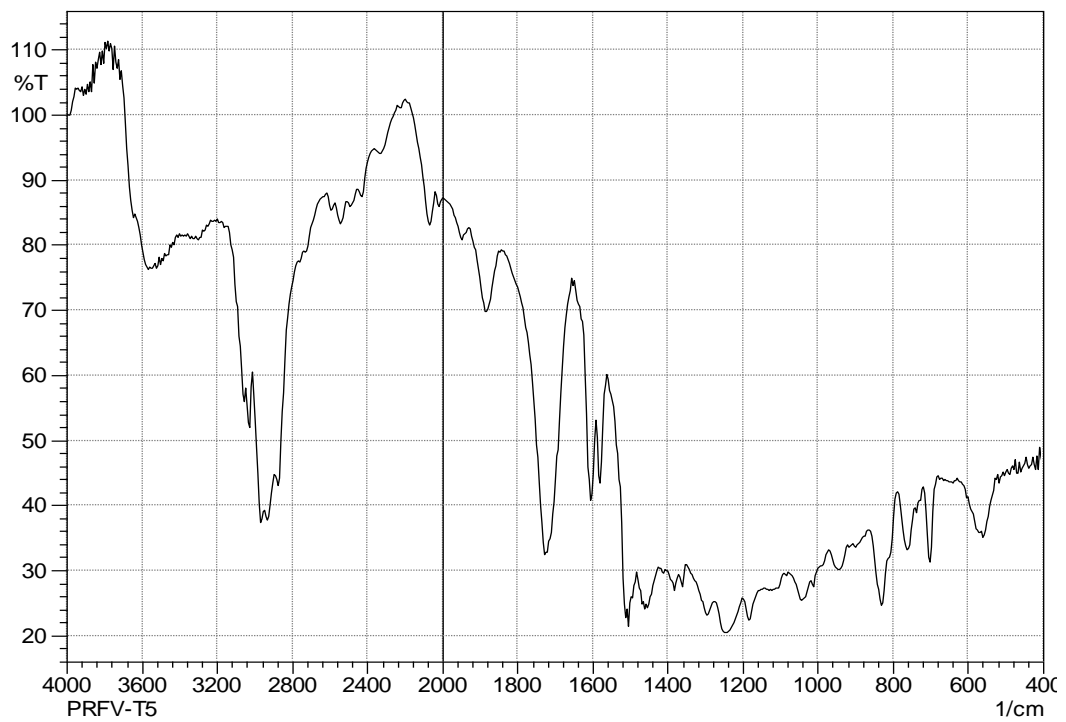


Figura 3.22 – Espectros de *FTIR* de resina poliéster isoftálica na barra de diâmetro 9,7 mm.

Na Figura 3.23, apresentam-se todos os espectros resultantes da análise através do ensaio *FTIR*. A partir destes espectros e usando os padrões do aparelho, conclui-se que todas as barras foram fabricadas com resina poliéster isoftálica.

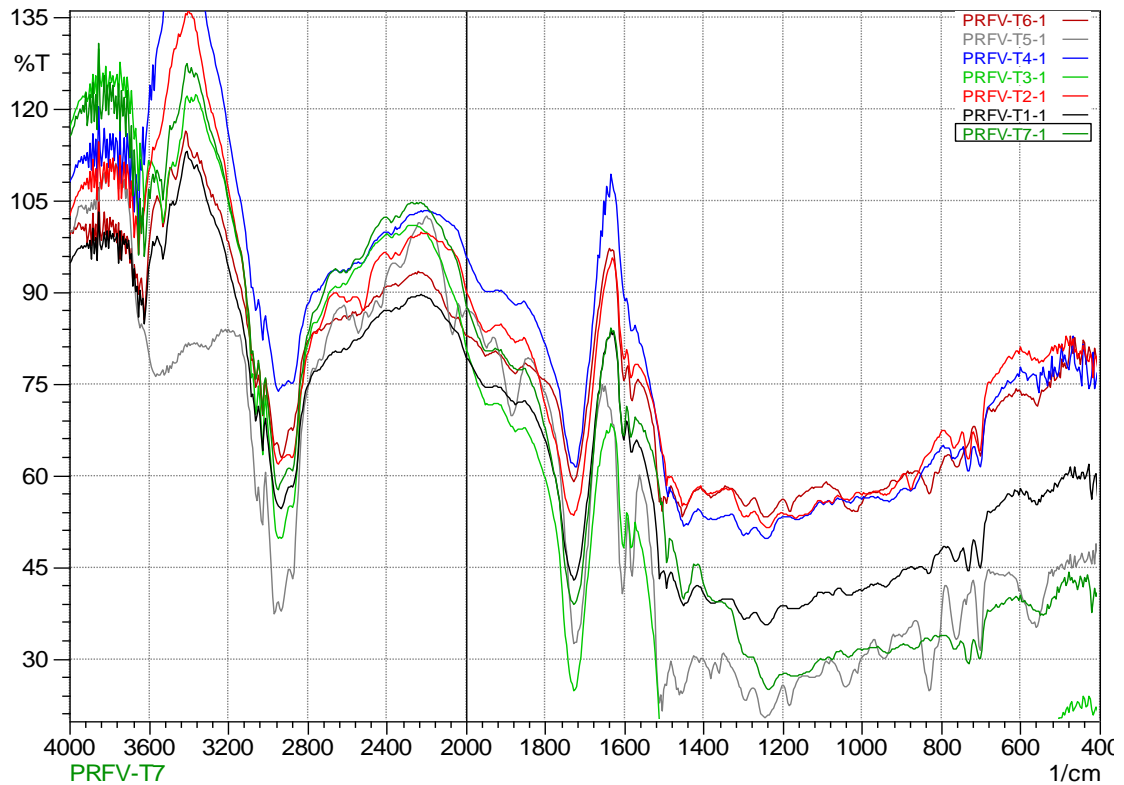


Figura 3.23 – Espectros de *FTIR* de resina poliéster isoftálica apresentadas nas amostras de PRFV.

A cadeia polimérica encontra-se na Figura 3.24.

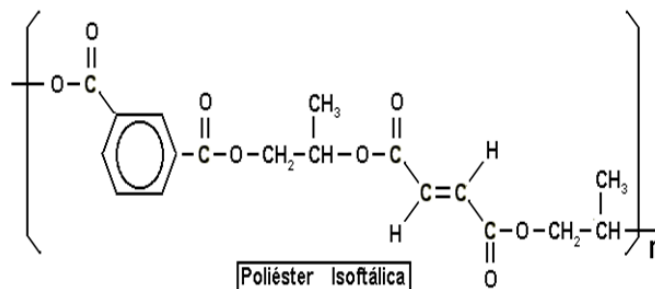


Figura 3.24 – Representação do poliéster isoftálica.

3.2 Ensaios de arrancamento para Concreto-Barras de PRFV

Nos ítems anteriores foi feita a caracterização do componente das barras (fibra e resina) com o objetivo de estudar a aderência do concreto-barra de PRFV e avaliar a influência do diâmetro e do tipo de fibra (C e E) na aderência barra-concreto. A seguir apresenta-se a análise experimental do comportamento da aderência entre as barras de PRFV e o concreto através de ensaios de arrancamento conforme a RILEM/FIP/CEB (1973). Foi utilizado neste caso o modelo cilíndrico adaptado ao modelo prismático padronizado pela RILEM/FIP/CEB (1973).

Para a realização dos ensaios e a utilização das barras descritas nos ítems anteriores foram utilizados concretos com resistência à compressão de aproximadamente 47 MPa e 58 MPa.

3.2.1 Fôrmas

Para a moldagem dos corpos de prova de arrancamento, foram seguidos procedimentos de COUTO (2007) nos casos onde foram utilizadas fôrmas cilíndricas de tubos de PVC. O fundo é constituído por uma base de madeira com um orifício central preso ao tubo de PVC por parafusos radiais. Foi fixado na parte superior um sarrafo de madeira para garantir que a barra ficasse centralizada no tubo. O trecho não aderente da barra é composto de uma mangueira de plástico, correspondente a uma distância de cinco vezes o diâmetro da barra utilizada. O detalhamento da fôrma pode ser observado na Figura 3.25 e o detalhe interno da fôrma pode ser visto na Figura 3.26.

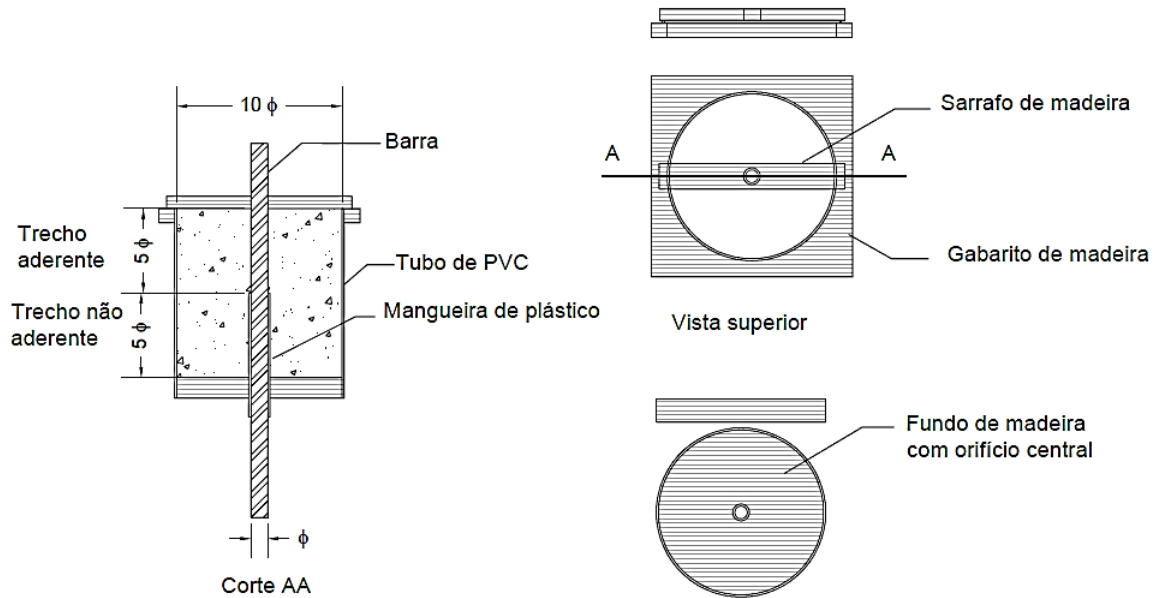


Figura 3.25 - Detalhamento da fôrma nos ensaios de arrancamento.



Figura 3.26 - Detalhe interno da fôrma do corpo de prova.

3.2.2 Corpos de prova

Para a determinação da aderência concreto-barras de PRFV foram ensaiados três corpos de prova para cada tipo específico de barra conforme a ACI 440 3R (2004). Os corpos de provas utilizados para o ensaio de arrancamento são apresentados na Figura 3.27. Das barras caracterizadas foram escolhidos os diâmetros de 6,4 mm, 6,6 mm, 8,3 mm e 8,6 mm.



Figura 3.27- Corpos de prova ensaiados (a) 58 MPa e de (b) 47 MPa

3.2.3 Moldagem e cura

Os cilindros de concreto foram moldados na direção vertical. O concreto foi lançado em três camadas e vibrado externamente e após um dia da moldagem, os corpos de prova foram desmoldados e em seguida curados em tanque de água até a data do ensaio de arrancamento. As Figuras 3.27 a 3.29 mostram a concretagem, moldagem e o primeiro dia após concretagem dos corpos de prova de arrancamento para ensaio de aderência, respectivamente.



Figura 3.28 - Concretagem dos corpos de prova.

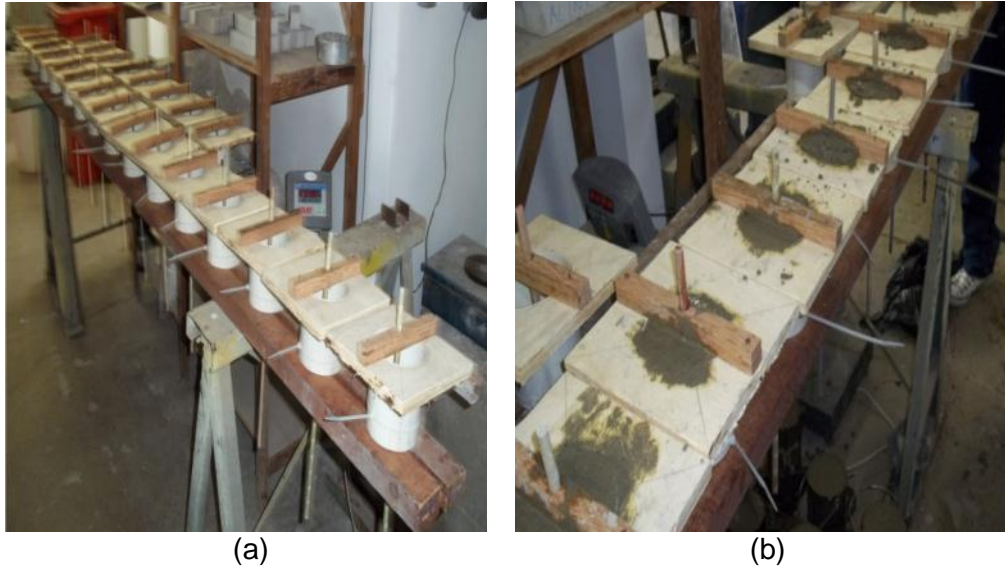


Figura 3.29 - Processo de fabricação dos corpos de prova: preparação das fôrmas (a); concretagem dos corpos de prova (b).



Figura 3.30 – Primeiro dia após concretagem dos corpos de prova

3.2.4 Ensaio de arrancamento

Os ensaios de arrancamento foram realizados aos 50 dias de idade do concreto. O cilindro de concreto foi apoiado em uma placa metálica com um orifício central para permitir a passagem da barra; e esta; por sua vez, foi presa pelo dispositivo de alumínio encaixado na garra da máquina INSTRON. A placa metálica foi ligada à prensa INSTRON por quatro hastes metálicas. A Figura 3.31 ilustra o esquema do ensaio de arrancamento.



Figura 3.31 – Esquema para o ensaio de arrancamento: (a) corpo de prova na prensa e placa metálica; (b) sistema de aquisição de dados.

Os corpos de prova foram instrumentados com *LVDT's* na extremidade não solicitada. Já a velocidade de aplicação da carga foi de 0,010 mm/s para todas as barras. A Tabela 3.16 apresenta um resumo dos ensaios de arrancamento.

Tabela 3.16 - Características dos corpos de prova.

Nomenclatura	Resistência do concreto aos 50 dias (MPa)	Diâmetro da barra de PRFV (mm)	Número de repetições
Conc47B6,4	47	6,4	3
Conc47B6,6		6,6	3
Conc47B8,3		8,3	3
Conc58B6,4	58	6,4	3
Conc58B6,6		6,6	3
Conc58B8,3		8,3	3
Conc58B8,6		8,6	3

*Conc47 e Conc58 = correspondem à classe de resistência à compressão do concreto aos 45 dias e B6,6 a B8,6 = correspondem aos diâmetros das barras (6,6 à 8,6).

3.2.5 Instrumentação

Os instrumentos e equipamentos utilizados para o ensaio de arrancamento estão apresentados na Tabela 3.17.

Tabela 3.17 - Instrumentos e equipamentos de utilizados no ensaio de arrancamento.

Ítens	Tipo	Marca	Características	Finalidade
Máquina de ensaio servo-hidráulica	Modelo 5582	INSTRON	Controle de deslocamento do pistão	Aplicação da força no ensaio de arrancamento
Sistema de aquisição de dados	Sistema ADS2000	LYNX Tecnologia	-----	Aquisição e processamento automático de dados
Transdutor de deslocamento (LVDT)	DTH - A -10	KYOWA	Curso: 10 mm Resolução: 0,001 mm	Medição dos deslocamentos nos ensaios de arrancamento

3.2.1 Resultados dos ensaios de arrancamento (*Pull Out*)

Nas Figuras 3.32 a 3.37 são mostradas as curvas tensão *versus* deslocamento dos resultados dos corpos de prova ensaiados de cada série com diferentes diâmetros e resistência do concreto. Nas Figuras 3.38 e 3.39 são apresentadas as curvas tensão *versus* deslocamento dos quatro tipos de barras, elas são resultados da média de três corpos de prova.

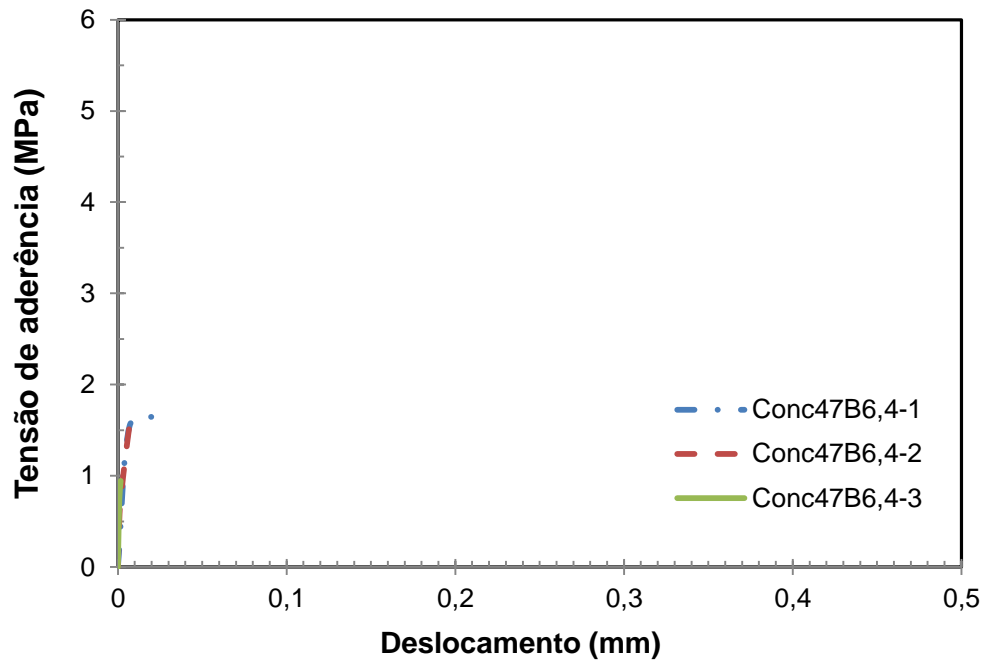


Figura 3.32 – Curvas tensão *versus* deslocamento dos corpos de prova da série Conc47B6,4.

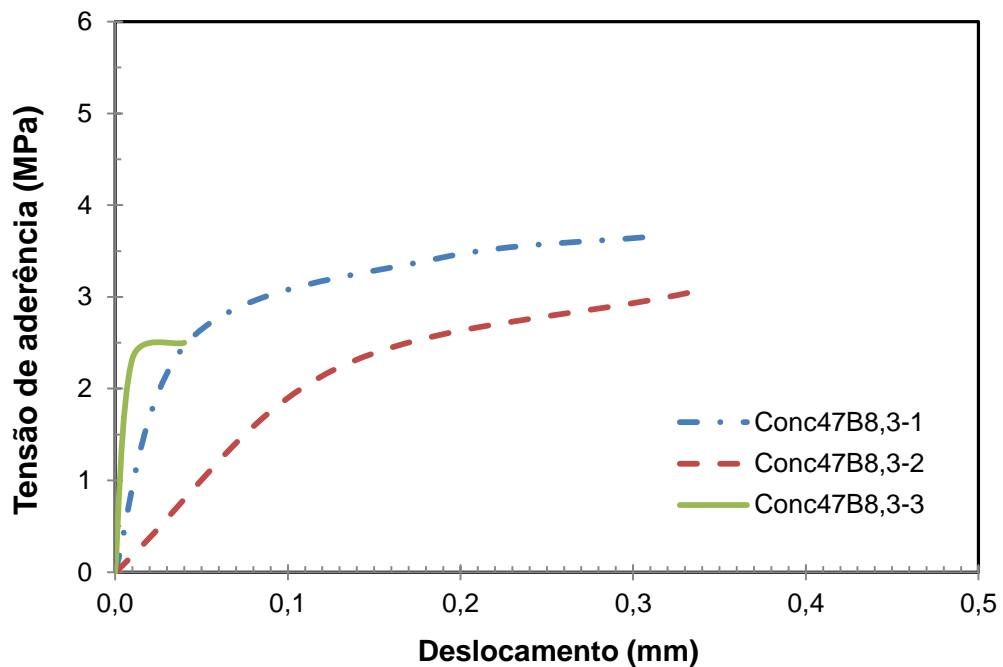


Figura 3.33 – Curvas tensão *versus* deslocamento dos corpos de prova da série Conc47B8,3.

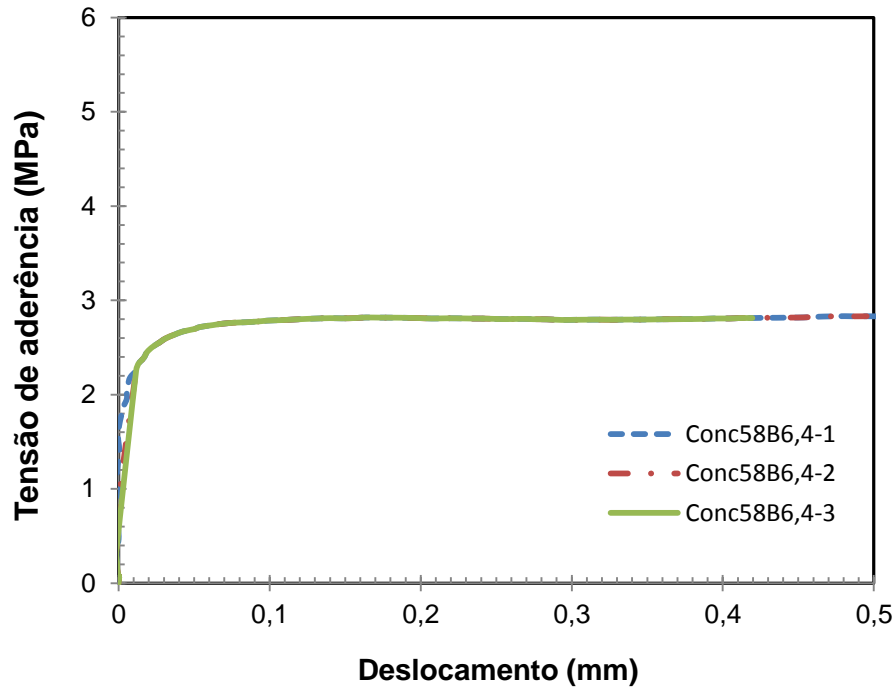


Figura 3.34 – Curvas tensão *versus* deslocamento dos corpos de prova da série Conc58B6,4.

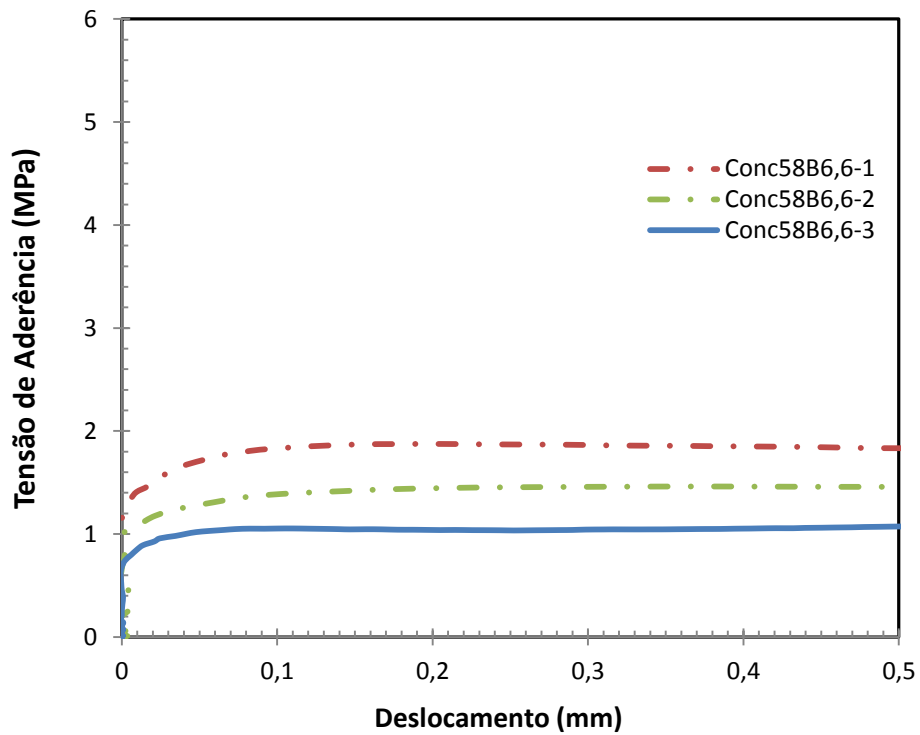


Figura 3.35 – Curvas tensão *versus* deslocamento dos corpos de prova da série Conc58B6,6.

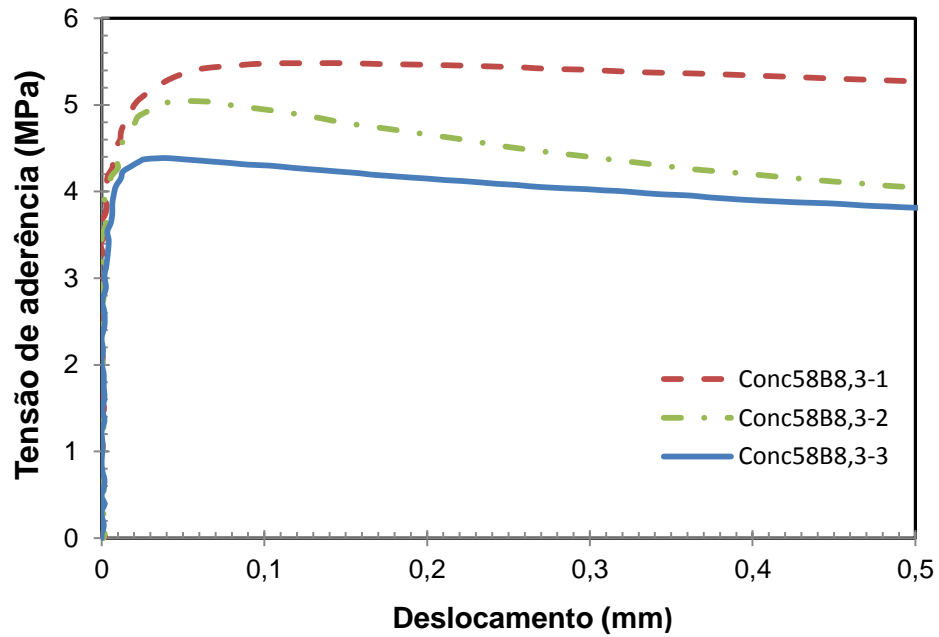


Figura 3.36 – Curvas tensão *versus* deslocamento dos corpos de prova da série Conc58B8,3.

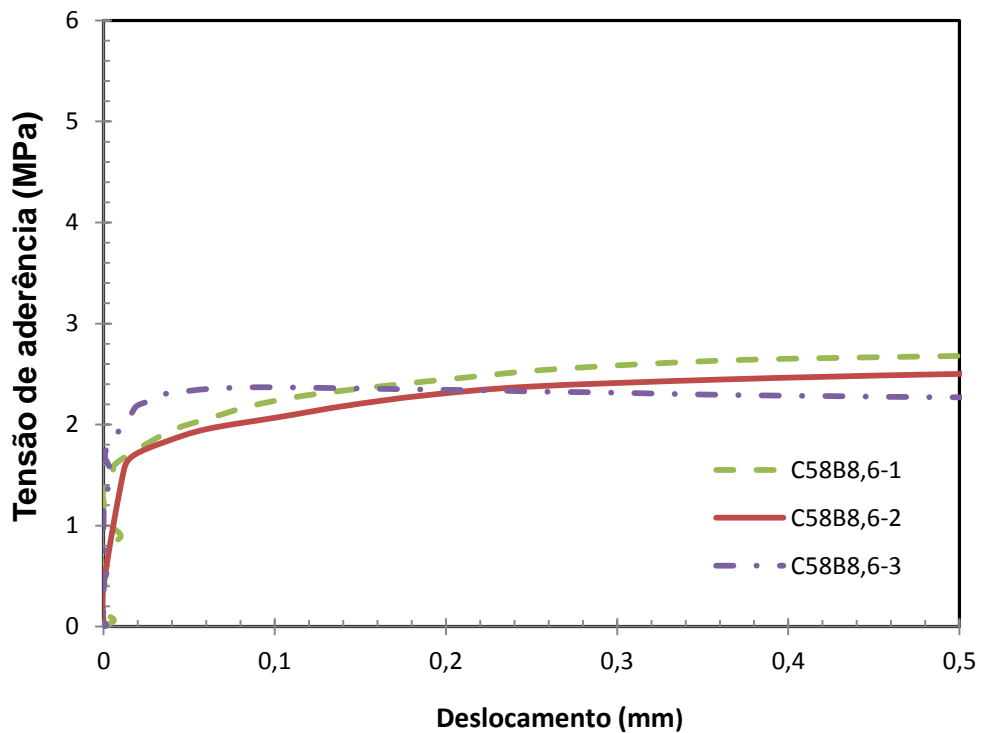


Figura 3.37 – Curvas tensão *versus* deslocamento dos corpos de prova da série Conc58B8,6.

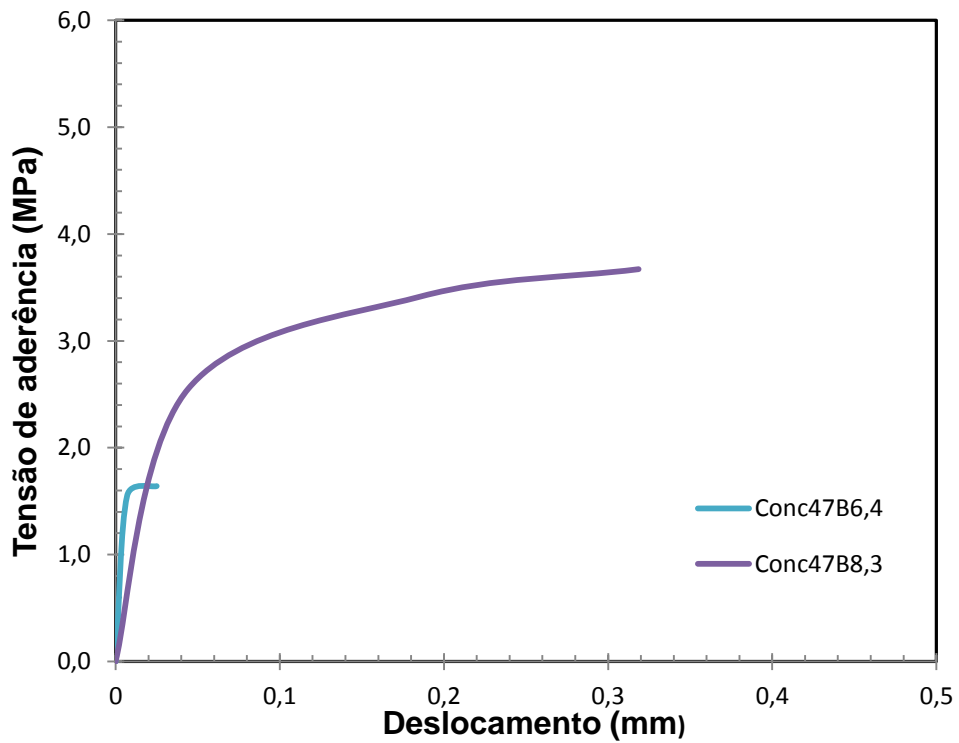


Figura 3.38 – Curvas tensão *versus* deslocamento da média dos corpos de prova das séries Conc47B6,4, e Conc47B8,3.

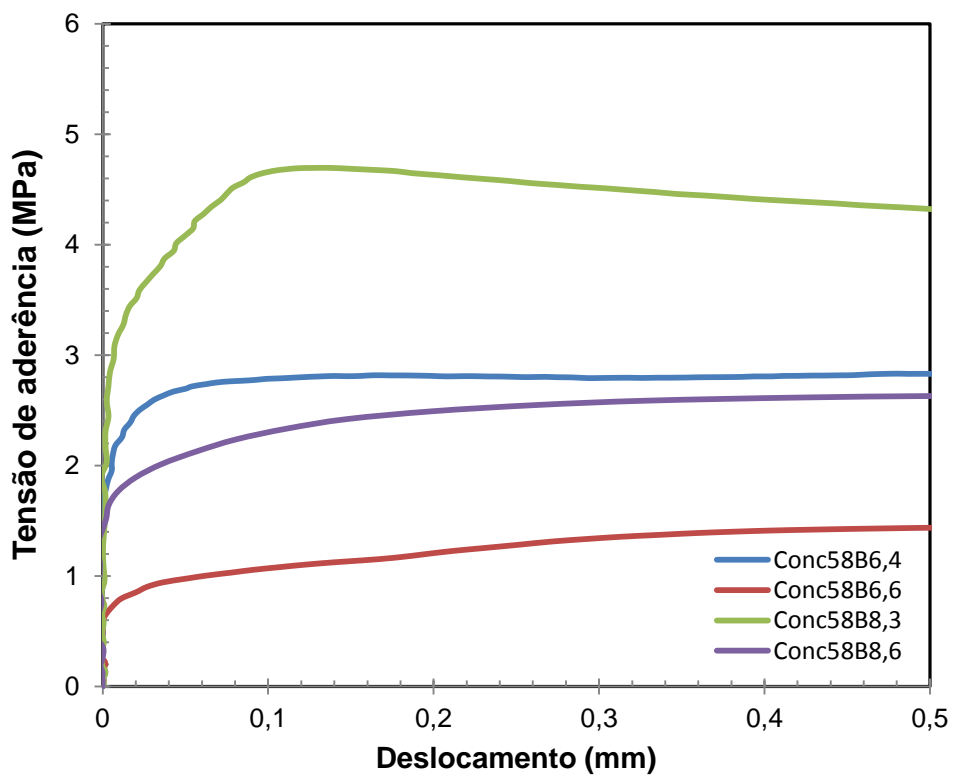


Figura 3.39 – Curvas tensão *versus* deslocamento da média dos corpos de prova das séries Conc47B6,4, Conc47B6,6, Conc47B8,3 e Conc47B8,6.

A tensão média de aderência apresentada nas Figuras 3.32 à 3.39 foi calculada de acordo com a Equação 3.1, em que é definida como a força de cisalhamento por unidade de superfície de área das barras e, conseqüentemente, foram plotadas as curvas tensão de aderência *versus* deslocamento; que foram calculadas em ambas extremidades livres e deslocamentos nas extremidades carregadas.

$$\tau_b = \frac{F}{C_b L} \quad (3.1)$$

onde:

τ_b = é a tensão ou resistência média de aderência, MPa;

F = é a carga de tração ou de arrancamento, N;

$C_b = \pi \cdot d$ = é o perímetro da circunferência equivalente da barra de PRF, onde d é o diâmetro da barra, mm;

L = comprimento de ancoragem ou de aderência.

Tendo em vista a grande dispersão dos valores de aderência, recomenda-se, para o dimensionamento um valor bastante afastado da resistência efetiva (COUTO, 2007). O valor recomendado então para o dimensionamento é de $\tau_{0,1}$, que após chegar a este deslocamento de 0,1 mm, as barras começam a adquirir variabilidade significativa de valores de aderência. Na Tabela 3.18 apresentam-se os valores de $\tau_{0,1}$ e $\tau_{m\acute{a}x}$ dos corpos de prova.

Tabela 3.18 - Valores de tensões de aderência para 0,1mm de deslocamento ($\tau_{0,1}$) e de tensão máxima ($\tau_{m\acute{a}x}$).

Modelos	$\tau_{0,1}$ (MPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)
Conc47B6,4	1,1	1,2
Conc47B8,3	0,2	3,1
Conc58B6,4	2,8	2,9
Conc58B6,6	1,1	1,4
Conc58B8,3	4,6	4,7
Conc58B8,6	2,4	2,6

Segundo LEONHARDT e MONING, define-se como valor de cálculo para resistência de aderência $\tau_{0,1}$ a tensão de aderência para o qual ocorre deslocamento da extremidade livre das barras de 0,1 mm em relação ao concreto. A Figura 3.41 mostra como foram determinados estes valores.

Na realidade a resistência efetiva, ou seja, tensão máxima ($\tau_{m\acute{a}x}$), é muito maior que o valor de cálculo, especialmente nos casos de barras com aderência mecânica, alcançando até o dobro desse valor e deslocamentos de 1 mm.

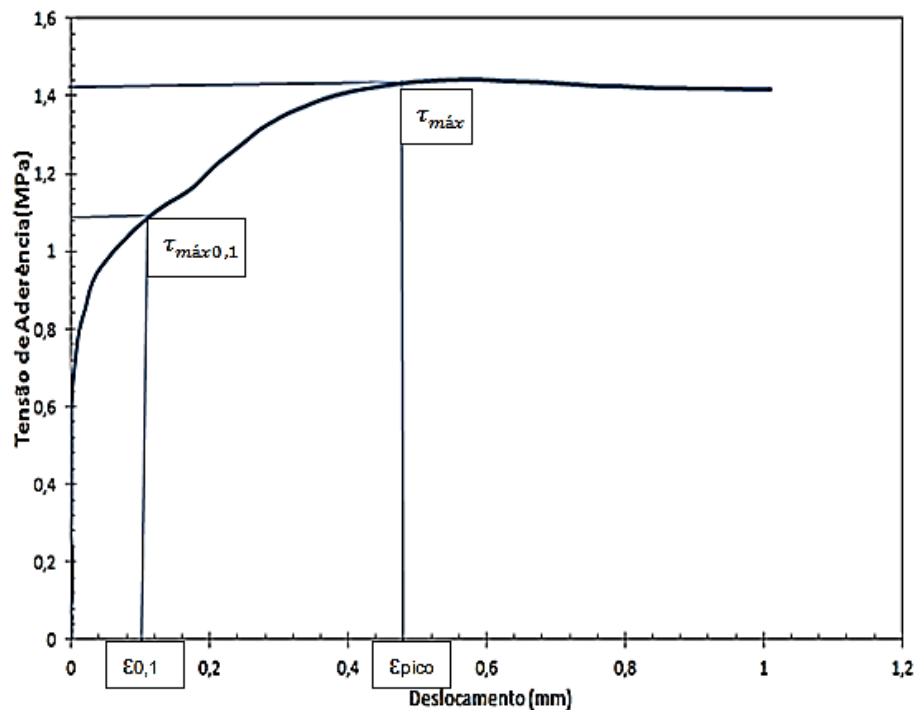


Figura 3.40– Curvas tensão *versus* deslocamento da média dos corpos de prova da série Conc58B6,6.

3.2.2 Análise dos resultados

No presente estudo do comportamento da aderência concreto-barras foi analisada a influência dos seguintes efeitos: efeito do diâmetro da barra, o efeito dos componentes das barras e efeito da resistência à compressão do concreto.

3.2.2.1 Modo de ruptura

Foi observado ruptura interna no concreto, porém muito pequena devido ao fato da utilização de barras lisas e barras com baixa rugosidades.

3.2.2.2 Efeitos analisados

Efeito do diâmetro da barra

As curvas de tensão de aderência *versus* deslocamento dos corpos de prova de cada série com diferentes diâmetros são apresentadas nas Figuras 3.41 e 3.42, mostrando o efeito do diâmetro na aderência.

Nota-se nas Figuras 3.39 e 3.40 bem como nas Figuras 3.41 e 3.42 e Tabela 6.3 a influência do diâmetro na tensão de aderência *versus* deslocamento, onde a maioria dos resultados mostrou que corpos de prova com barras de maiores diâmetros tiveram menor tensão de aderência e maiores deslocamentos no carregamento final. Isto coincide com pesquisas realizadas nesta área (COUTO, 2007), pois a resistência ao cisalhamento entre as sucessivas linhas de fibras e a superfície da barra pode influenciar consideravelmente, devido as deformações diferenciais entre as fibras situadas no centro da barra e as próximas da superfície. Isto resulta em uma distribuição não uniforme de tensões normais na seção transversal da barra. Este efeito é conhecido na literatura como *shearlag*, mas isso não aconteceu em todos os casos, como, por exemplo, quando se compara a média da série dos modelos Conc58B6,6-1 e Conc58B8,3-1 na Figura 3.42, e Conc47B6,4-1 e Conc47B8,3-1 na Figura 3.41, pois barras lisas podem apresentar grande variabilidade em sua resistência de aderência. Neste estudo se fez presente até mesmo na própria série, ou seja, nas séries de mesmos diâmetros.

A menor resistência de aderência para maiores diâmetros em algumas barras também pode ser explicada pela saída de água no concreto. Quanto maior o diâmetro das barras, maior é a quantidade de saída de água debaixo da armadura, com criação de um número maior de vazios ou poros (QING-DUO *et al.*, 2007). Este vazio reduz o contato entre a armadura e o concreto e, portanto, a tensão de aderência é menor.

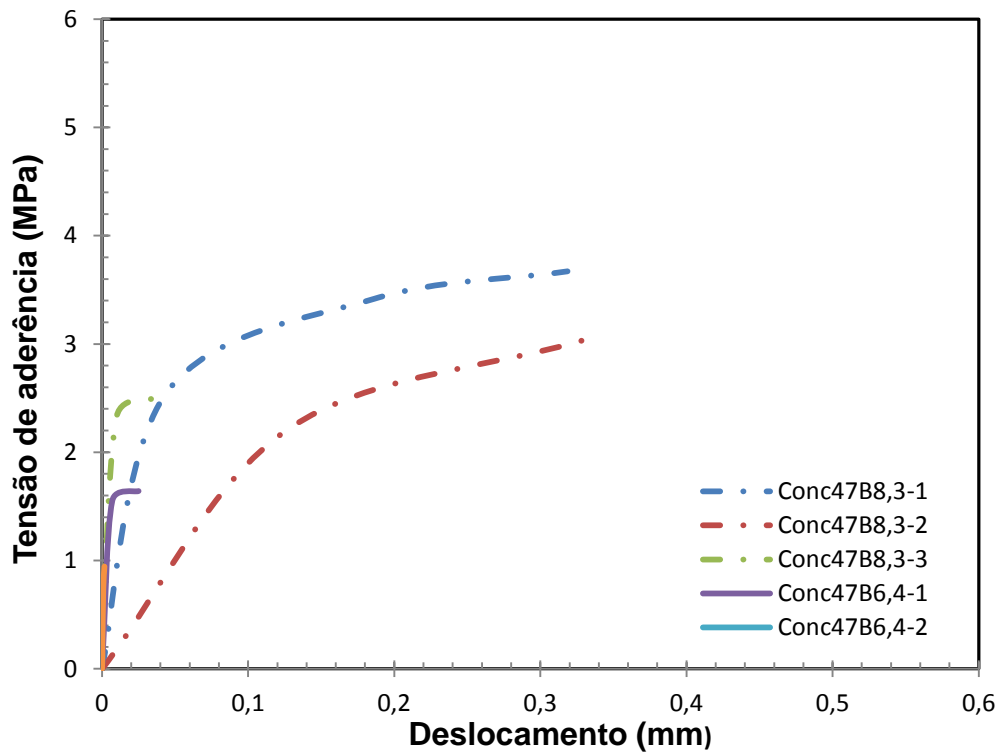


Figura 3.41 – Curvas tensão *versus* deslocamento de barras com diferentes diâmetros das séries Conc47B6,4, e Conc47B8,3.

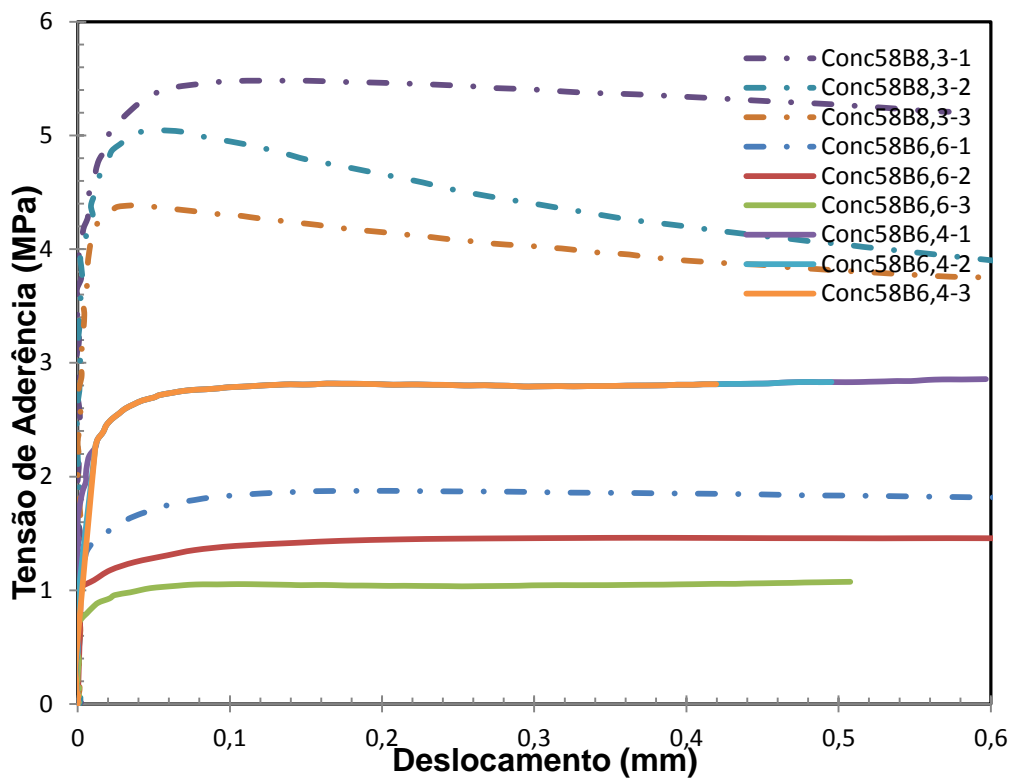


Figura 3.42 – Curvas tensão *versus* deslocamento de barras com diferentes diâmetros das séries Conc58B6,4, Conc58B6,6 e Conc58B8,3.

Efeito da resistência do concreto

As curvas de tensão de aderência *versus* deslocamento dos corpos de prova de cada série, com diferentes resistências à compressão do concreto são apresentadas nas Figuras 3.43 a 3.45, mostrando o efeito desta resistência na aderência. Na Figura 3.44 foram utilizadas para análise as barras de diâmetro 6,6 mm e 6,4mm, por serem de dimensões próximas

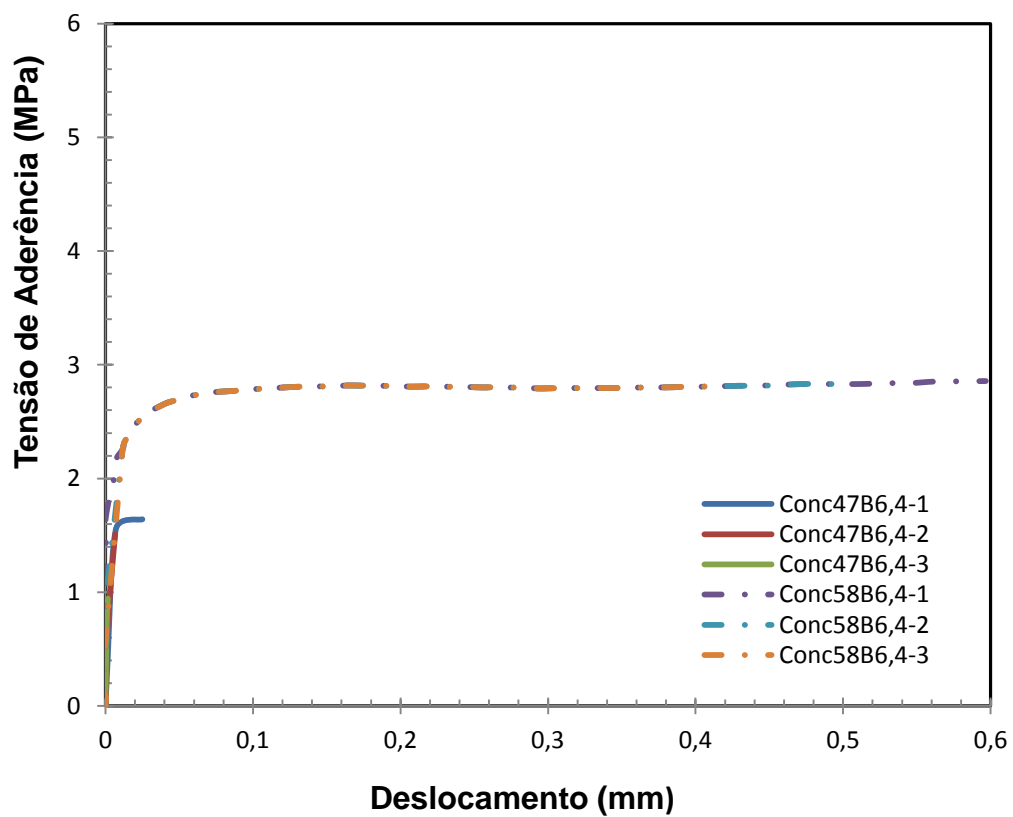


Figura 3.43 – Curvas tensão *versus* deslocamento de barras com diferentes resistências à compressão do concreto das séries Conc58B6,4 e Conc47B6,4.

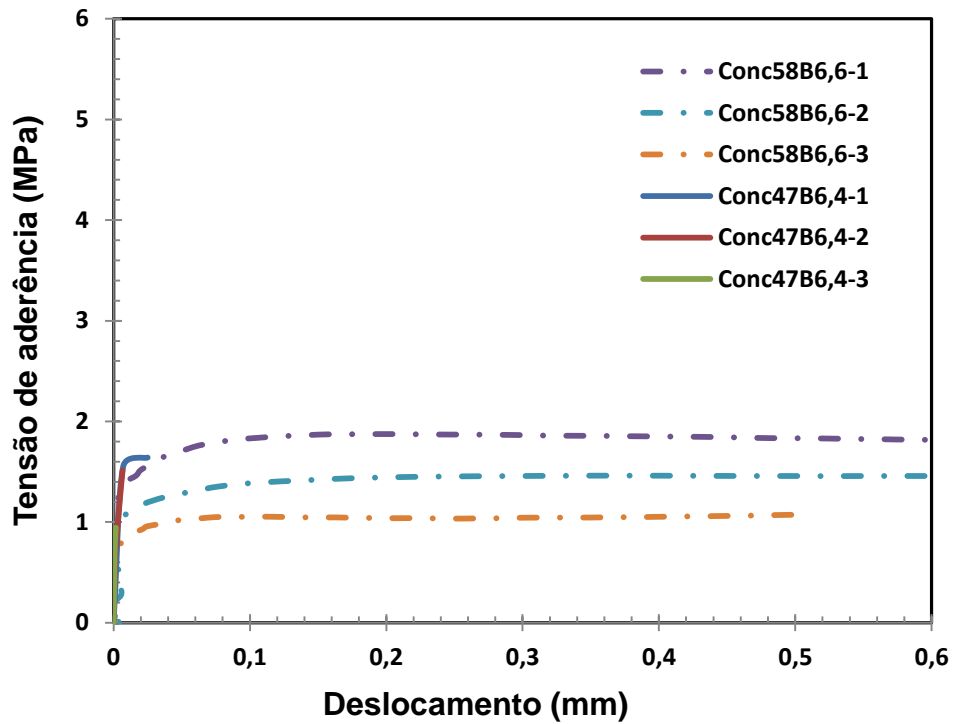


Figura 3.44 – Curvas tensão *versus* deslocamento de barras com diferentes resistências à compressão do concreto das séries Conc58B6,6 e Conc47B6,4.

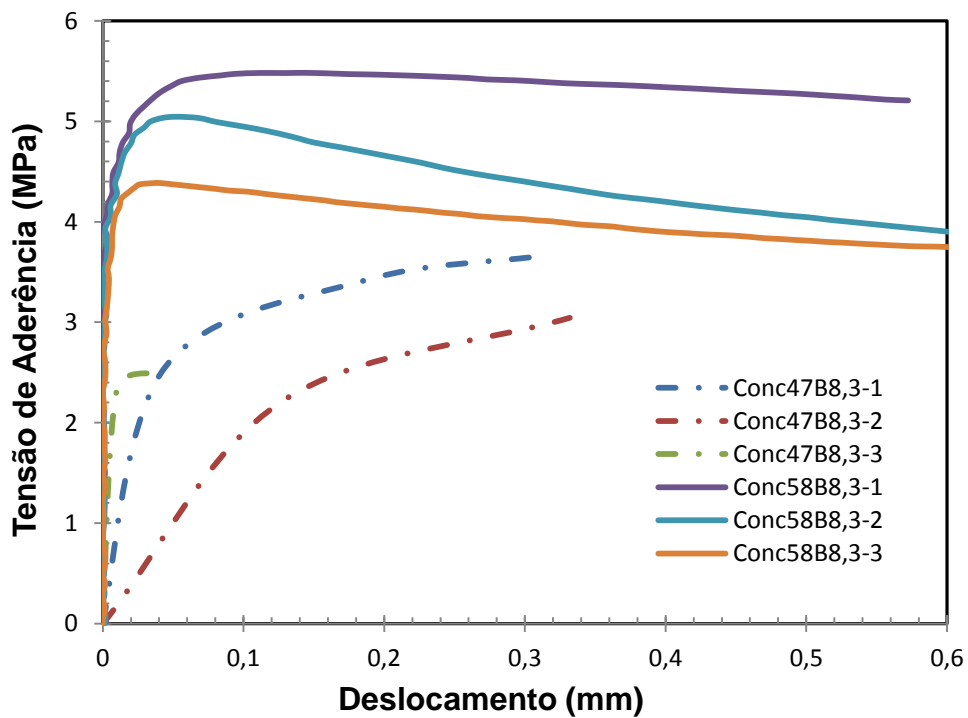


Figura 3.45 – Curvas tensão *versus* deslocamento de barras com diferentes resistências à compressão do concreto das séries Conc58B8,3 e Conc47B8,3.

Para os concretos com alta resistência à compressão (58MPa), o valor da resistência de aderência, em geral, foi superior aos modelos com resistência à compressão mais baixa (47 MPa) (Figura 3.43), na qual as séries Conc47B6,4 obtiveram menores tensões máximas de aderência quando comparadas com as séries Conc58B6,4. Isto também ocorreu na Figura 3,45 para as séries Conc47B8,3 e Conc58B8,3. Porém, na Figura 3.43 isto não se fez presente, tendo em vista que na série do corpo de prova Conc47B6,4-1 e Conc47B6,4-2 a aderência concreto-barra foi mais alta quando comparada com a série Conc58B6,6-2, coerente com algumas literaturas, tais como NANNI *et al.* (1995) e MALVAR (1994).

Efeito do tipo de fibra

As curvas de tensão de aderência *versus* deslocamento dos corpos de prova com barras de diferentes tipos de fibras são apresentadas na Figura 3.46, mostrando o efeito destas fibras na aderência concreto-barra.

O tipo de fibra das barras 8,3 e 8,6 mm são do tipo C e do tipo E, respectivamente. Nota-se na Figura 3.44 que os diâmetros analisados são aproximadamente iguais e possuem a mesma resina (poliéster isoftálica), embora dois diferentes tipos de fibras.

Observa-se que a barra composta com fibra tipo C apresentou maior tensão de aderência que a com tipo E. Isto mostra que o tipo de fibra melhora a textura da barra. É importante mencionar que as barras de diâmetro 8,3 e 8,6mm foram escolhidas por ter dimensões próximas.

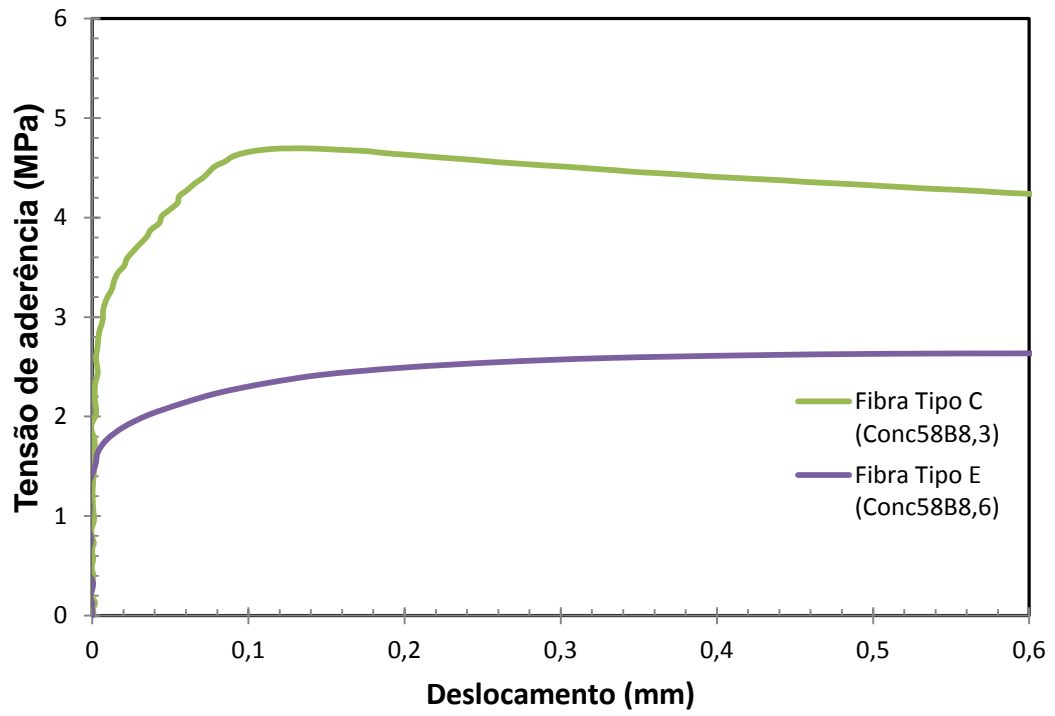


Figura 3.46 – Curvas tensão vs deslocamento de barras com diferentes tipos de fibra das séries Conc58B8,3 e Conc58B8,6

4. Comparação dos resultados obtidos com os existentes na literatura

4.1 Efeito do diâmetro da barra

As tensões máximas de aderência *versus* deslocamento dos corpos de prova de diferentes diâmetros são apresentadas nas Figuras 4.1 e 4.2. Na Figura 4.1 foram comparados diâmetros de barras PRFV-WH (com ranhuras) da literatura, com diâmetros de barras lisas do presente trabalho. Foram utilizados diâmetros de 19 mm, 16 mm, 12,7 mm, 12 mm, 9 mm, 8,6 mm, 8,3 mm, 6,6 mm, 6,4, 6 mm, 5 mm, 4 mm e 3mm. Com a finalidade de eliminar o efeito da resistência do concreto, as tensões tagenciais foram normalizadas utilizando Equação 2.13, obtida por BAENA *et al.* (2009).

Conforme esperado, em todos os corpos de prova do presente trabalho, as tensões máximas se encontraram abaixo dos valores da literatura, isto devido ao fato de se tratar de barras lisas em comparação com as barras de PRFV-WH (com ranhuras). Mesmo com diâmetros menores apresentados por alguns corpos de prova da literatura, a ranhura das barras fez com que proporcionasse uma tensão máxima de aderência maior do que as obtidas no presente trabalho, exceto para os corpos de prova Conc58B8,3 e Conc47B8,3, que apresentaram tensões máximas de aderências superiores devido ao comportamento atípico do corpo de prova de COUTO (2007) em relação aos demais (Figura 3.47). É importante observar que o corpo de prova Conc58B8,3 do presente trabalho apresentou tensão máxima de aderência próxima ao de COUTO (2007) - C30B9.

Na Figura 4.2 foram comparados diâmetros de barras PRFV-CS (revestidas com areia) da literatura com diâmetros de barras lisas do presente trabalho. Foram utilizados diâmetros de 12,7 mm, 8,6 mm, 8,3 mm, 6,6 mm, 6,4 mm, 6 mm, 5 mm, 4 mm, 3 mm. Pode-se verificar visto que os corpos de prova do presente trabalho apresentaram tensões máximas de aderência bem inferiores as da literatura, alcançando no máximo 0,8 MPa.

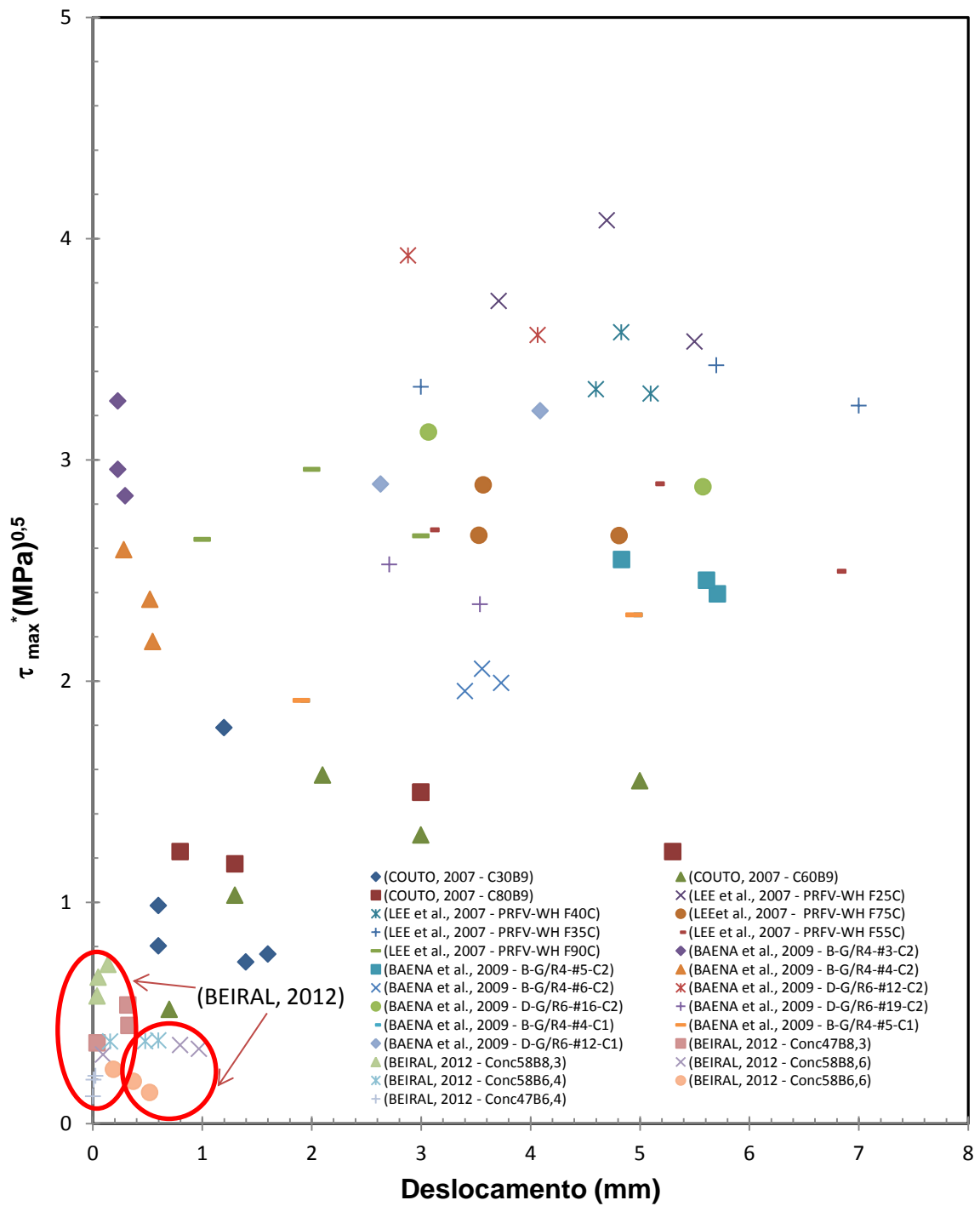


Figura 4.1 – Dados de tensão máxima *versus* deslocamento de corpos de prova com diferentes diâmetros de barras lisas e PRFV-WH (com ranhuras) presentes na literatura.

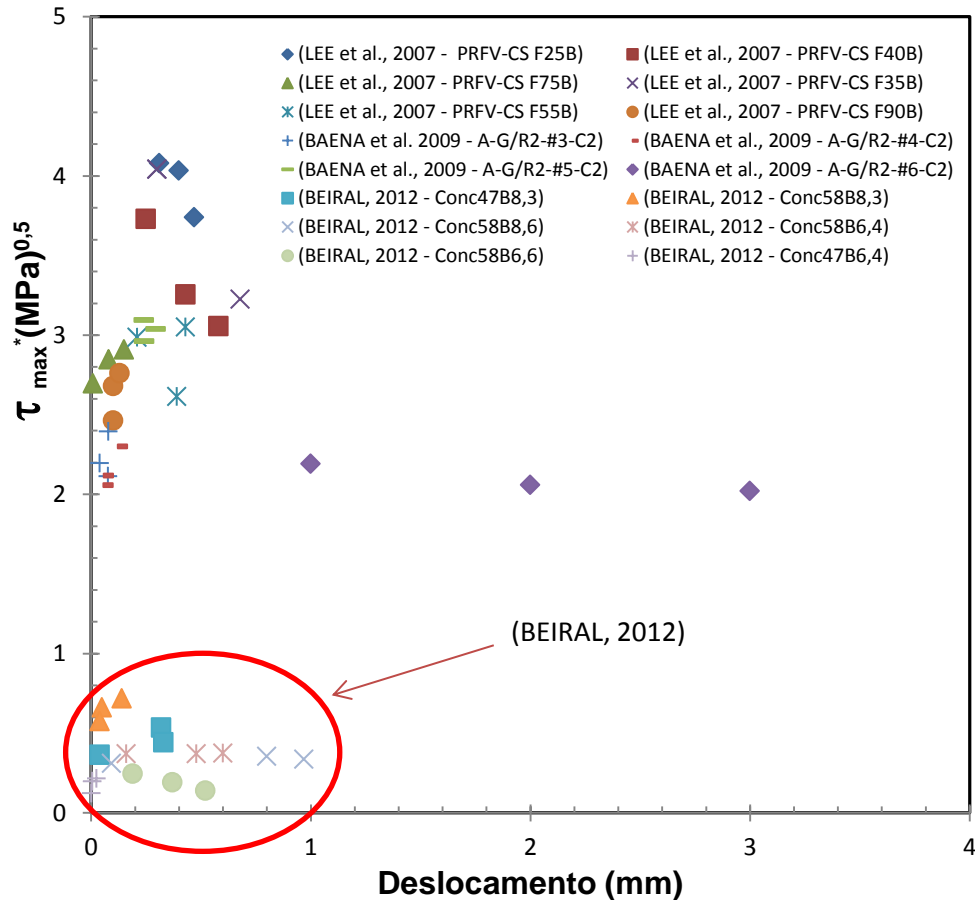


Figura 4.2 – Dados de tensão máxima *versus* deslocamento de corpos de prova com diferentes diâmetros com barras lisas e PRFV-CS (revestidas com areia), presentes na literatura.

4.2 Efeito da resistência do concreto

As tensões máximas de aderência *versus* deslocamento dos corpos de prova com diferentes resistências à compressão do concreto são apresentadas nas Figuras 4.3 a 4.5. Foram escolhidos barras com texturas semelhantes nos corpos de prova da literatura.

Na Figura 4.3 foram comparados corpos de prova com barras lisas de resistência à compressão de 30, 60 e 80 MPa da literatura com barras lisas de resistência à compressão de 58 MPa do presente trabalho. Foram escolhidos os diâmetros de 8,6 e 9 mm por terem dimensões próximas. Nota-se que o corpo de prova Conc58B8,6 obteve tensão máxima próxima do corpo de prova de COUTO (2007) – C30B9, alcançando 3 MPa e 4 MPa, respectivamente. A tensão máxima dos outros corpos de prova da literatura foi bem diferente.

Na Figura 4.4 foram escolhidos os diâmetros de 6 mm, 6,4 mm, 6,5 mm e 6,6mm por terem também dimensões próximas, comparando corpos de prova de resistência à compressão de 47 MPa, 58 MPa, 53,11 MPa e 27,4 MPa.

Na Figura 4.5 foram escolhidos os diâmetros de 8 mm, 8,3 mm e 8,6 mm por terem dimensões próximas, comparando corpos de prova de resistência à compressão de 27,4 MPa, 47 MPa, 47,89 MPa, 58MPa.

Das Figuras 4.4 e 4.5, nota-se um distanciamento considerável entre as tensões máximas da literatura e as do presente trabalho.

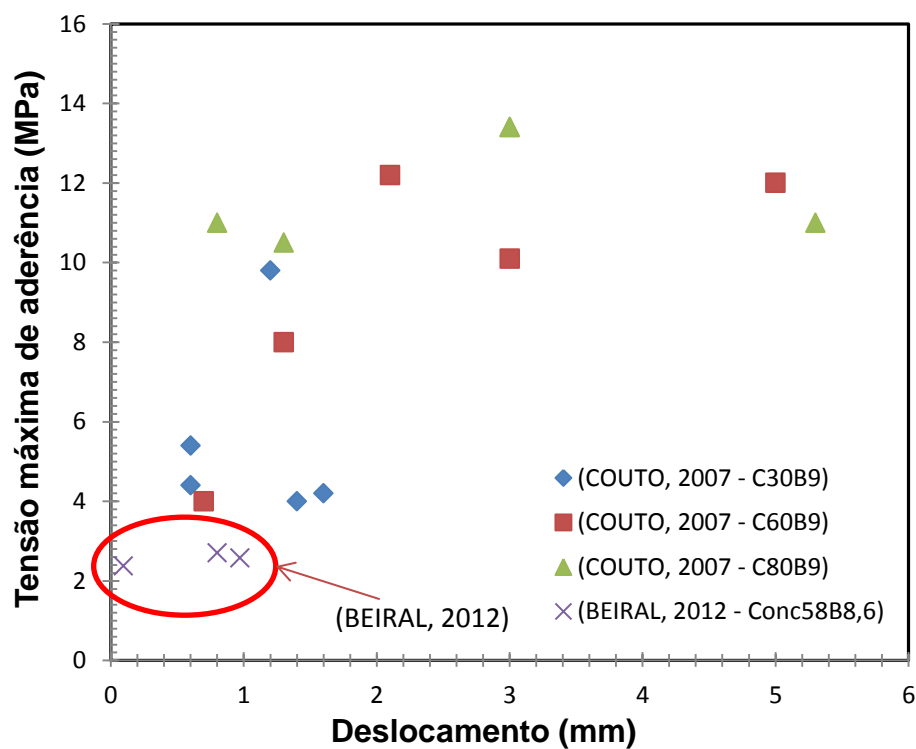


Figura 4.3 - Tensão máxima de aderência *versus* deslocamento de corpos de prova com diferentes resistências à compressão do concreto, com barras de diâmetros de 8,6 mm e 9 mm presentes na literatura.

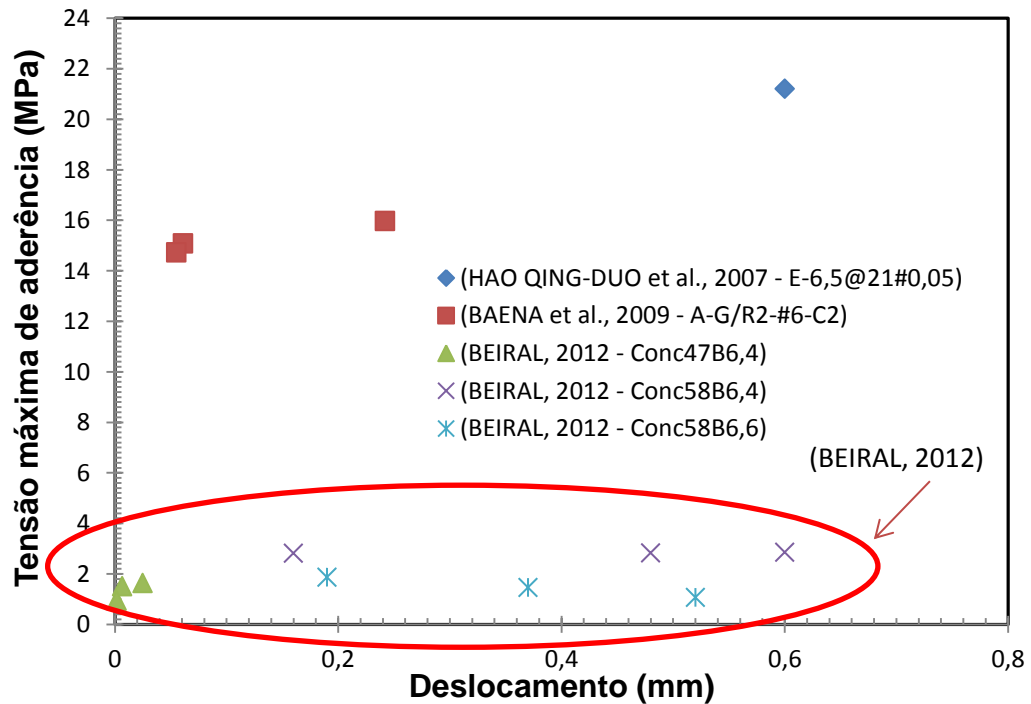


Figura 4.4 - Tensão máxima de aderência *versus* deslocamento de corpos de prova com diferentes resistências à compressão do concreto, com barras de diâmetros de 6 mm, 6,4 mm, 6,5 mm e 6,6 mm, presentes na literatura.

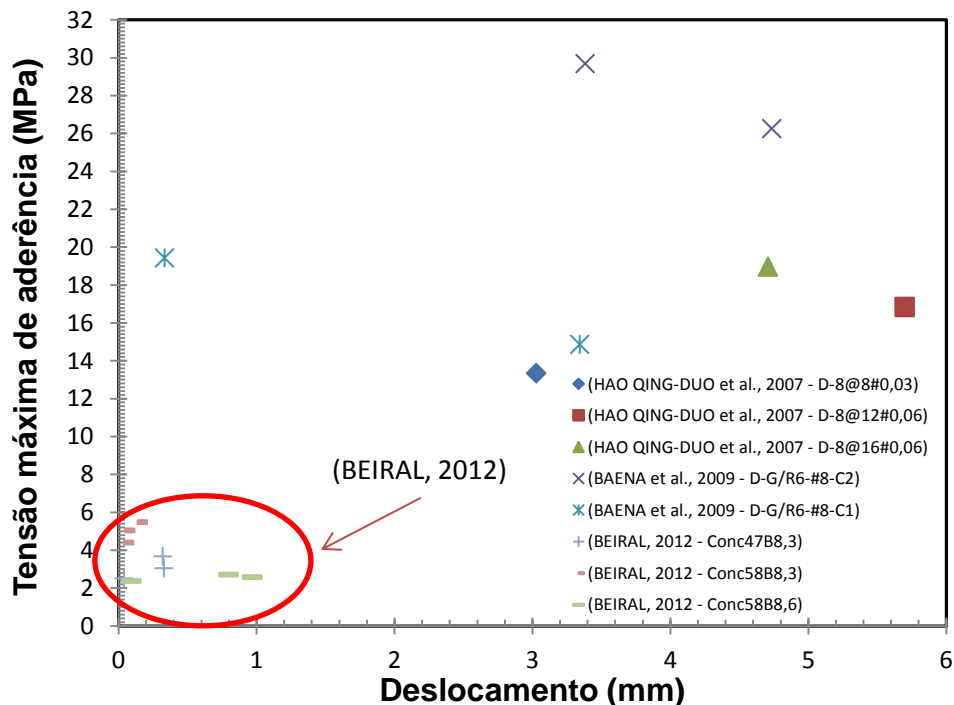


Figura 4.5 - Tensão máxima de aderência *versus* deslocamento de corpos de prova com diferentes resistências à compressão do concreto, com barras de diâmetros de 8,6 mm, 8,3 mm e de 8mm, presentes na literatura.

4.3 Efeito do tipo de fibra

As tensões máximas de aderência *versus* deslocamento dos corpos de prova com diferentes tipos de fibras são apresentadas na Figura 4.6. Foram escolhidas barras com diâmetros de 8 mm, 8,3 mm e 8,6mm por terem dimensões próximas e texturas superficiais semelhantes. Os corpos de prova do presente trabalho com diâmetro de 8,3 mm continham fibras tipo C e com diâmetro de 8,6 mm tipo E. Já os corpos de prova da literatura tinham fibras tipo E.

Nota-se distanciamento significativo entre as tensões máximas da literatura e as do presente trabalho. No corpo de prova Conc58B8,3 a maior tensão máxima foi de 5,8 MPa e o corpo de prova de HAO QING-DUO *et al.* (2007) – D-8@16#0,06 foi de 18,8 MPa..

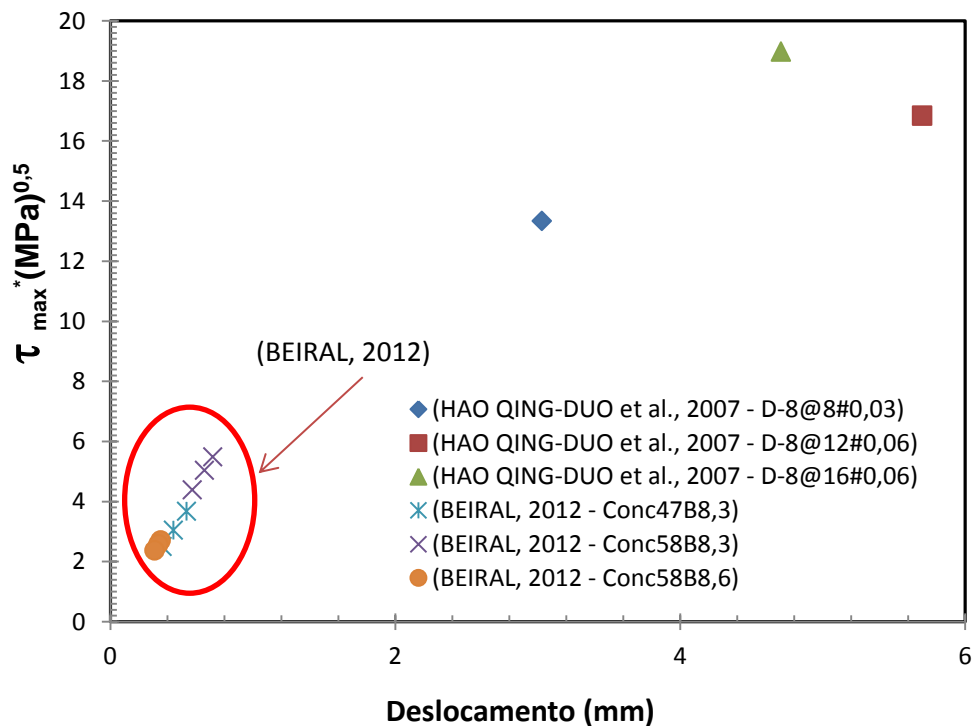


Figura 4.6 - Tensão máxima de aderência *versus* deslocamento de corpos de prova com diferentes fibras, presentes na literatura.

5. Conclusões e recomendações

De acordo com os resultados obtidos no programa experimental foi possível concluir:

a) com relação à caracterização física e química das barras de PRFV

- ✓ as análises de MEV-EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) e Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (*FTIR – Fourier Transform Infrared Spectrometry*) foram muito eficientes na identificação do tipo e quantidade de fibra, assim como na identificação da resina;
- ✓ embora as barras tenham um mesmo fabricante, notou-se muita variabilidade nas porcentagens em peso de fibra e resinas;
- ✓ foram identificados dois tipos de fibra, tipo C e E, e como matriz a resina poliéster isoftálica;
- ✓ foram identificados os teores em porcentagens de fibras;

b) com relação à aderência do concreto-barra lisa de PRFV

- ✓ constatou-se na bibliografia consultada a inexistência de ensaios desta natureza (aderência concreto-barra lisa), sendo inédito o estudo realizado;
- ✓ a resistência de aderência do concreto-barra lisa de PRFV foi superior no concreto de resistência à compressão de 58 MPa quando comparado ao concreto de 47 MPa;
- ✓ a tensão máxima de aderência do concreto-barra lisa de PRFV foi baixa, já que o principal mecanismo de aderência é pela adesão da superfície da barra e o concreto;
- ✓ os ensaios mostraram a influência do diâmetro na resistência de cisalhamento e elevada variabilidade dos resultados, bem como se constatou o efeito *shear leag*;
- ✓ os ensaios mostraram a influência do tipo de barra na resistência de aderência concreto-barra lisa;

c) comparação dos resultados obtidos com os existentes na literatura

- ✓ notou-se nos dados analisados da literatura uma grande dispersão nos resultados de tensão máxima *versus* deslocamentos isto, provavelmente devido-a diferença de superfície de barras, diâmetros e condições de ensaio das barras analisadas;
- ✓ foi observado nos resultados obtidos neste trabalho (aderência concreto barras lisas de PRFV) com os da literatura, que em todos os efeitos analisados (diâmetro, resistência do concreto à compressão e o tipo de fibra da barra) as tensões máximas de aderência foram bem inferiores que as da literatura; isto era de esperado já que as barras analisadas neste trabalho tinham superfície lisa, e as barras da literatura todas tinham algum tipo de superfície ranhurada, proporcionando a estas últimas uma tensão máxima de aderência bem superior, ou seja, independente de diâmetro, resistência à compressão do concreto e do formato e dos corpos de prova, concluindo que barras com texturas superficiais com algum mecanismo de aderência mecânico (ranhuras, revestimento com areia) proporcionará sempre uma diferença significativa de tensões máximas de aderência com relação às barras lisas.

Recomenda-se a realização de estudos utilizando-se outros diâmetros, diferentes resistências à compressão do concreto, ensaios com barras de diferentes composições e ensaios de tração das barras de PRFV, e outros fatores que influenciam na resistência de aderência entre concreto e barra de PRFV.

6. Referências Bibliográficas

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1982), Agregado no estado solto - Determinação da massa unitária: NBR 7251. Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1982), Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armadura de concreto armado: NBR 7477. São Paulo.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1998), Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone: NBR NM 67. Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2003), Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação: NBR 8522. Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2003), Determinação da composição granulométrica de agregados miúdos e graúdos: NBR NM 248 . Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2006), Agregados-determinação da massa unitária e do volume de vazios: NBR NM 45. Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2007), Concreto-Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 5739. Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2009), Agregados para concreto: NBR 7211. Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2009), Determinação da absorção e massa específica de agregado graúdo: NBRNM 53. Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2009), Determinação da massa específica aparente dos agregados miúdos por meio do frasco de Chapman: NBR NM 52. Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2010), Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos: NBR 12142. Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2010), Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos: NBR7222. Rio de Janeiro.

ACHILLIDES, Z.; PILAKOUTAS, K. (2004), Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions, *Journal of Composites for Construction*, vol. 8, n. 2.

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1996) 440 R. State-of-the-Art on Fiber Reinforced for Concrete Structures. Detroit.

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2003) 440 1R-03, Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars, *Reported by ACI Committee, Farmington Hills, MI.*

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2004) 440 3R. Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures. Detroit.

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2005), 318R-05 - Building code requirements for structural concrete and commentary, Farmington Hills - MI.

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2006) 440 1R. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. Detroit.

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2008) 318. Building Code Requirements for Structural Concrete. Detroit.

AITEIN, P.C., BENMOKRANE, B., HOUDE, J., CHALLAL, O. (1991), Use of a New Glass-Fiber Rod as Reinforcement for concrete structures. In *Proc. ACI Int. Conf. on Evaluation and Rehabilitation of Concrete Structures and Innovation in Design*, Hong Kong, ed V.M. Malhotra, n.1, SP-128, pp. 515-528.

ALSAYED , S.H., AL-SALLOUM, Y.A., ALMUSALLAM, T.H., (1997), Shear design of GFRP bars. *Proceedings of the Third Internacional Symposium on Non-Metalic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Sapporo, Japan, v. 2, pp. 285-292.

ALSAYED, S.H., AI-SALLOUM, Y.A., ALMUSSALAM, T.H. (2000), Performance of glass fiber reinforced plastic bars as a reinforcing material for concrete structures. *Composites Structures*, Arábia Saudita, v. 31, pp. 554-567.

ASHOUR, A.F (2006), Flexural and shear capacities of concrete beams reinforced fibre reinforced polymer (FRP) bars, *Composites Structures*, Cairo – Egito, v. 56, pp. 63-71.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1991) C234. Standard test method for comparing concretes on the basis of the bond developed with reinforced esteel. Philadelphia.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2006) ASTM D7205 / D7205M – 06. Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars.

BAENA, M., TORRES, I., BARRIS, C. (2009), Experimental study of bond between concrete and FRP bars using a pull-out test, *Composites*, v.40, pp. 784-787.

BAENA, M.,TORRES, L.,TURON, A., BARRIS, C. (2009), Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test, *Composites: Part B* 40, pp. 784–797.

BAKIS, C.E., UPPULURI, V.S, BOOTHBY, T.E. (1983), Analysis of Bonding Mechanisms of Smooth and Lugged FRP Rods Embedded in Concrete, *Composites Sci. Tech*, ed. 58, pp. 1307-1319.

BAKIS, C.E.; UPPULURI, V.S.; NANNI, A.; BOOTHBY, T.E. (1998), Analysis of bonding mechanisms of smooth and lugged FRP rods embedded in concrete”, *Composites Science and Technology*, v. 58, pp.1307-1319.

BARBOSA, M.T.G. (2002), Avaliação do comportamento da aderência em concretos de diferentes classes de resistência. Tese de (Doutorado) – COPPE Universidade Federal do Rio de Janeiro, pp. 203.

BARBOSA, M.T.G. (2002), Avaliação do comportamento da aderência em concretos de diferentes classes de resistência. Tese de (Doutorado) - Rio de Janeiro-RJ, COPPE Universidade federal do Rio de Janeiro - RJ, pp 203.

BASF - THE CHEMICAL COMPANY (2008), Catálogo MBRACE EG 900. Valley Park Drive Shakopee – USA. 4p.

BEIRAL, WEVERTHON V. *et al.* (2012), Avaliação de fatores que influenciam na aderência concreto-barras de polímeros reforçado com fibra de vidro, 54º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON.

BEIRAL, WEVERTHON V. *et al.* 2012), Behavior analysis of a shear in beams with armed bar hybrid (steel and grp) and reinforced with frp bars, *Internacional Conference Durable Structures from Construction to Rehabilitation*, Lisbon-Portugal.

BENMOKRANE, B.,CHAALLAI, O., MASMOUDI, R. (1995), Glass fibre reinforced plastic (GFRP) rebars for concrete structures. *Construction and Building Materials*, Canadá, v. 9, n. 6, pp. 353-364.

BROWN e BARTHOLOMEW (1996), Long Term Deflections of GFRP-Reinforced Concrete Beams, Proceedings of the First International Conference on *Composites in Infrastructure (ICCI-96)*, H. Saadatmanesh and M. R. Ehsani, eds., Tucson, Ariz., pp. 389-400.

CAROLINE, M. A. (2002), Reforço de vigas de concreto à flexão e ao cisalhamento com tecidos de fibra de carbono. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Rio de Janeiro - RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 153p.

CASTRO, P.F. (2000), Notas sobre estudo da aderência aço-concreto, Universidade Federal Fluminense, Niterói-Rio de Janeiro.

CEB-FIP (1993), Model Code 1990, Design Code, Comité Euro-Internacional du Béton. *Thomas Telford Services Ltd*, London.

CHALLAL O. e BENMOKRANE, B. (1993), Physical and Mechanical Performance of an Innovative Glass-Fiber-Reinforced Plastic Rod for Concrete and Grouted Anchorages. *Canadá J. Civ Eng* 1993, 20(2), pp. 254-268.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON (1979), Reinforcement, bond and anchorage, *Paris.Bulletin d'information*, 118.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON (1982), Bond action and bond behavior of reinforcement, *Paris.Bulletin d'information*, 151.

COUTO, I. A. (2007), Comportamento da aderência entre o concreto e barras de fibra de vidro impregnada por polímero. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -São Paulo – SP, Pontifícia Universidade Católica - PUC, 141p..

DEITZ, D.H., HARICK, I.E., GESUND, H., ACI (1999), One-way slabs reinforced with glass fiber reinforced polymer reinforcing bars. *Proceeding of the ACI 4th International Symposium*.Detroit, pp. 279-286.

DUCATTI, V.A. (1993), Concreto de elevado desempenho: estudo da aderência com a armadura. Tese de (Doutorado) – São Paulo-SP, Escola Politécnica- Universidade de São Paulo, pp. 259.

EHSANI M.R., SAADDATMANESH, M., AND TAO, S., Bond behavior and design recommendations for fiber-glass reinforcing bars, *Proc. ICCI '96*.

EHSANI, M.R., SAADATMANESH, H., TAO, S. (1993), Bond of GFRP Rebars to ordinary-strength Concrete. *International Symposium on Fiber Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures*, Vancouver, Canadá, pp. 333-345.

EHSANI, M.R., SAADATMANESH, M., TAO, S. (1996a) Design recommendation for bond of GFRP rebars to concrete, *J. Struct. Eng.*, 247-257.

ELIGEHAUSEN, R.; POPOV, E.P.; BERTERO, V.V. (1983). Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations. *Report no UCB/EERC- 83/23*, University of California - Berkeley.

FIB – FÉDÉRATION INTERNACIONAL DU BÉTON (2003) FIB 9.3 TASK GROUP. FRP (Fiber Reinforced Polymer) Reinforcement for Concrete Structures.

FIB – FÉDÉRATION INTERNACIONAL DU BÉTON (2007) FIB 9.3 TASK GROUP. FRP (Fiber Reinforced Polymer) Reinforcement for Concrete Structures.

FIB BULLETIN 10 (FIB). (2000), Bond of reinforcement in concrete, *Rep. by former CEB Task Group 2.5, Ch.7/TG 4.2/WP 7, International Federation for Concrete*, Lausanne - Switzerland.

FRANÇA, H.V. (2004), Aderência aço-concreto – Uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha. Dissertação de (Mestrado), Ilha Solteira - SP UNESP.

FUSCO, P. B. (1975), Estruturas de concreto: solicitações normais. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, pp. 464.

FUSCO, P. B. (1995), Técnica de Armar as Estruturas de Concreto, PINI, São Paulo-SP.

GARCIA, S.L.G., BEIRAL, WEVERTON V., PALACIOS, R.E.L. (2012), Evaluación de la adherencia hormigón – barras de polímeros reforzados com fibra de vidrio, *16º Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura*, Habana-Cuba.

GOTO, Y. (1971), Cracks formed in concrete around deformed tension bars, *Journal of the ACI*, pp.244-251.

GRACE, N.F., SOLIMAN, A.K., ABDEL – SAYED , G., SALEH, K. R. (1998), Behavior and ductility of simple and continuous FRP reinforced beams, *Journal Composites for Construction*, v. 2, n. 4, Egito, pp. 186-194.

HARAJLI, M., ABOUNIAJ, M. (2010), Bond performance of GFRP bars in tension: experimental evaluation and assessment of ACI 440 guidelines, *Journal of Composites for Construction ASCE*, pp. 659-668.

HONMA, M., MARUYAMA, T. (1989), Bond Properties of Carbon Fiber Reinforced Plastic Rods at Elevated Temperatures, *Proc. Arch. Inst. of Japan Convention, C (in Japanese)*.

JAAFAR, Rachid K. (2000), Bond in reinforced concrete. Dissertação de mestrado, University of Cambridge, Department of Engineering, Cambridge .

JSCE (1997), Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fibre reinforcing materials, *Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials*, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo-Japan.

LEE, J.Y., KIM, J.Y., KIM, T.J., YI, C.K., PARK, J.S., YOU, Y.C., PARK, Y.H. (2008), Interfacial bond strength of glass fiber reinforced polymer bars in high-strength concrete. *Composites: Part B* 39, 258-270.

Lees, J. M., Burgoyne, C. J.(1999), Experimental Study of Influence of Bond on Flexural Behavior of Concrete Beams Pretensioned with Aramid Fiber Reinforced Plastics, *ACI Structural Journal*, v. 96, n. 3, pp. 377-385, May-June.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. (1977), Construções de Concreto: Princípios Básicos do Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado, *Interciência*, Rio de Janeiro- RJ, Brasil, vol. 1.

MAKITANI, E., IRISAWA, I., NISHIURA, N. (1993), Investigation of bond in concrete member with fiber reinforced plastic bars, *Proc. Intl. Symp. Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures, ACI SP-138*, Vancouver.

MALLICK, P.K. (1988), *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design*, New York, 469p.

MALVAR, L. J. (1994), Bond stress-slip characteristics of FRP rebars, TR-2013-SHR, *Naval Facilities Engineering Service Center*, Port Hueneme.

MALVAR, L.J. (1994), Bond stress-slip characteristics of FRP rebars, *Rep. TR-2013 SHR, CA: Naval Facilities Engineering Service Center*, Port Hueneme.

MICALI, R. M. (2010), Análise teórica de vigas pré-moldadas de concreto com armadura de aço e de Polímero Reforçado com Fibra de Vidro em meio altamente agressivo. Tese (mestrado em Engenharia Mecânica) – São Carlos – SP, Universidade de São Paulo, 150p.

MICHALUK, C., RISKALLA, S., TADROS, G., BENMOKRAME, B., ACI (1998), Flexural behavior of one-way concrete slabs reinforced by fibre reinforced by reinforced plastic reinforcement, *ACI Struct*, pp.353-364.

NANNI, A, AL-ZAHARANI, M.M., AL-DULAIJAN, S.U., BAKIS, C.E., BOOTHBY, T.E. (1995), Bond of FRP reinforcement to concrete: experimental results, *Proc. 2nd Intl. RILEM Symp. (FRPRCS-2)*.

NANNI, A. (1993), Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications, *Developments in Civil Engineering*, St. Louis, Vol.42.

NANNI, A., DOLAN, C.W. (1993), Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures, *International Symposium*, American Concrete Institute (ACI), SP-138, 977 p..

PILAKOUTAS, K.; GUADAGNINI, R. M. (S.D.), Design guidelines for FRP reinforced concrete, University of Sheffield, UK, /Apresentação em PowerPoint/.

QING-DUO, H., YAN-LEI, W., ZHI-CHUN, Z., JIN-PING (2007), Bond strength improvement of GFRP rebars with different rib geometries, *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, pp. 1356-1365.

RAFFAELLO FICO (2006), Limit States design of Concrete Structures Reinforced with Frp Bars. Tese (PHD Engenharia de estruturas e Materiais, University of Naples Federico II – UNF, 167p.).

RE- BARS (2009), Product Guide Specifications – Glass Fiber polymer (GFRP), Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) & Aramid Reinforced Polymer (AFRP) Re – Bars – Anticorrosive Reinforcement for concrete. Chile. 10p.

REHM, G.; ELIGEHAUSEN, R. (1979), Bond of ribbed bars under high cycle repeated loads, *ACI Journal, Symposium Paper*, n. 76-15, pp. 297-309.

RIBEIRO, J.L.D., (1985), Análise experimental dos fatores que influenciam a aderência em barras nervuradas. Tese (Mestrado) – Porto Alegre, Universidade Federal de Rio Grande do Sul - RS., pp. 180.

RIBEIRO, S. E. C. (2009), Análise da confiabilidade de vigas de concreto armado com plástico reforçado por fibras. Tese (mestrado em Engenharia Civil) – Belo Horizonte – MG, Universidade Federal de Minas Gerais, 139p.

RILEM-CEB-FIP (1973), Bond test for reinforced steel: 1-Beam test (7-II-28 D). 2- Pull Out Test (7-II-128): Tentative recommendations. *RILEM Journal Materials and Structures*, vol. 6, n. 32, p. 96-105.

SILVA, A. O. B., MORENO JR., A. L. (2000), Reforço à Flexão em Vigas de Concreto de Alta Resistência à Compressão Através da Colagem Externa de Mantas Flexíveis de Fibras de Carbono (PRFC). *Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural*, Punta Del Este.

SUNDARRAJA, M. C., RAJAMOHAN, S.. Reforço de Vigas ao cisalhamento utilizando tiras de GFRP inclinada. On-line. Disponível na internet via <http://www.elsevier.com/locate/conbuildmat> . Acesso em: 28 de agosto de 2010.

TASTANI, S.P. , PANTAZOPOULOU, S.J., ASCE (2006), Bond of GFRP bars in concrete: experimental study and analytical interpretation, *Journal of Composites for Construction ASCE*, pp. 381-391.

TIGHIOUART, B., BENMOKRANEU, B., GAO, D. (1998), Investigation of bond in concrete member with fibre reinforced polymer (FRP) bars, *Construction and Building Materials*, v. 12, pp. 453-463.

TINAZZI, D., NANNI, A. (2000), Assessment technologies of masonry retrofitting with FRP. Center for Infrastructure Engineering Studies, University of Missouri-Rolla.

UMOTO, T. *et al.* (2002), Use of fiber reinforced polymer composites as reinforcing material for concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.14, n. 3, pp. 191-209.

VIEIRA, F.M.P. (1994), Estudo do comportamento da aderência das barras de aço no concreto de alta resistência com adição de microssílica. Dissertação de (Mestrado), Porto Alegre – Universidade federal do Rio Grande do Sul, pp. 107.

VIEIRA, JAMINE DOMINGOS (2008), Estudo do comportamento estrutural de perfis pultrudados sob efeito de alta temperatura. Tese (doutorado em Engenharia Civil – Rio de Janeiro - RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 196p.

YONIZAWA, T., OHNO, S., KAKIZAWA, T., INOUE, K., OKAMOTO, R. (1993), A New Three-Dimensional FRP Reinforcement: Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) for Concrete Structures: Properties and Applications, *Elsevier*, St. Louis.

