

Marcos León Araújo

Estudo Experimental da Aderência entre o Concreto e Barras de Aço,
de Compósito de Fibras de Vidro e de Compósito de Fibras de
Carbono

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Tecnologia da Construção e Estruturas. Linha de Pesquisa: Patologia, Reforço e Recuperação de Estruturas, Materiais de Construção e Sistemas Construtivos.

Orientadores:

Prof. Emil de Souza Sánchez Filho – D. Sc.
Prof. Claudia Maria de Oliveira Campos – D. Sc.
Prof. Luiz Antônio Vieira Carneiro – D. Sc.

NITERÓI
2017

Marcos León Araújo

Estudo Experimental da Aderência entre o Concreto e Barras de Aço, de Compósito de Fibras de Vidro e de Compósito de Fibras de Carbono

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Tecnologia da Construção e Estruturas. Linha de Pesquisa: Patologia, Reforço e Recuperação de Estruturas, Materiais de Construção e Sistemas Construtivos.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Emil de Souza Sánchez Filho – D.Sc. (Orientador)
Universidade Federal Fluminense – UFF

Prof. Cláudia Maria de Oliveira Campos – D.Sc. (Coorientador)
Universidade Federal Fluminense – UFF

Prof. Luiz Antônio Vieira Carneiro – D.Sc. (Coorientador)
Instituto Militar de Engenharia – IME

Prof. Antônio Eduardo Polisseni – D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

Profª. Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares – D.Sc.
Universidade Estadual do Rio de Janeiro – UERJ

NITERÓI
2017

Agradecimentos

Ao meu pai, Victor Manuel Araujo, pelo incentivo ao estudo da engenharia. À minha mãe Pilar e aos meus irmãos.

Ao Alex, pela companhia, apoio e lealdade.

A minha orientadora Claudia, aos professores Luiz Carneiro e Emil Sánchez, pelas valiosas orientações.

A Universidade Federal Fluminense pelo apoio na realização desta dissertação.

A coordenação da pós-graduação de engenharia civil. Ao Leo, Clarice, Carlos Alberto.

Ao Instituto Militar de Engenharia e a sua equipe do Laboratório de Materiais de Construção e Concreto.

A Universidade do Estado do Rio de Janeiro, laboratório de materiais do campus Fonseca Teles, ao Paulo e os assistentes pela ajuda na realização dos ensaios.

A CAPES e ao Estado Venezuelano pelo apoio financeiro.

Agradeço a todos aqueles não citados nominalmente que contribuíram com a realização desta dissertação.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo estudar experimentalmente o comportamento da aderência entre concreto e barras de três tipos de material: aço, compósito de fibras de vidro GFRP e compósito de fibras de carbono CFRP. Foram preparados nove corpos de prova, três corpos de prova por cada tipo de barra, para ensaios de tração do tipo arrancamento direto ou *direct pull-out*. Para cada corpo de prova, parâmetros como o diâmetro e posição da barra, resistência à compressão do concreto, e comprimento de ancoragem, por exemplo, foram mantidos constantes. Os resultados dos ensaios mostraram que a tensão máxima média da aderência τ_u de barras de aço e de GFRP é alta e de barras CFRP é baixa. O valor do deslizamento na ruptura s_u da aderência para barras GFRP é bem maior do que barras de aço e muito maior de que barras de CFRP em razão do baixo módulo de elasticidade de barras GFRP o qual é uma fração do módulo de elasticidade de barras de aço e de CFRP. Foram desenvolvidas constantes empíricas para diferentes modelos analíticos. Se comprovou que o modelo CMR é o que mais se aproxima à curva $\tau - s$ experimental. Se compararam os resultados experimentais e analíticos com dois estudos de aderência de características similares.

Palavras chave: **Aderência, Compósitos, GFRP, Direct Pull-Out, CFRP, arrancamento direto, Concreto Armado, Análise Experimental, Tensão de aderência-deslizamento**

Abstract

The objective of the present work is to carry out an experimental investigation about the bonding behavior between concrete and reinforcing bars of three different types of materials: steel, Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP and Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP. Nine test specimens were prepared, three test specimens for each rebar type, to be tested for direct pull-out. For each test specimen, parameters such as bar diameter and placement, concrete compression strength and bond length were considered constant. The results of the test showed that the maximum average bond stress τ_u for steel rebars and GFRP rebars is high and CFRP rebars is much lower than the value of the other two. The average slip value at bond failure s_u for GFRP rebars is much higher than that of steel rebars and considerably much higher than that of CFRP rebars owing to the low modulus of elasticity of the GFRP rebars which is a fraction of the modulus of elasticity of steel rebars CFRP rebars. Empirical constants were developed for different analytical models. The CMR analytical model was proven to be the one that most accurately represents the experimental $\tau - s$ curve. The experimental and analytical results were compared with two investigations of bonding with similar characteristics.

Keywords: Bond, Composites, GFRP, CFRP, Direct Pull-Out, Reinforced Concrete, Experimental Analysis, Bond-Slip Behavior.

Lista de Figuras

Figura 2-1: Diferentes tipos de materiais compósitos FRP: a) barras de polímero reforçado com fibras FRP; b) grade ou malha de FRP; c) cabos de protensão FRP; d) mantas de cobertura de reforço para colunas; e) perfil pultrudado FRP em seções H e I; f) faixas de reforço coladas à superfície tipo NSM (Near Surface Mounted). Fonte: BANK (2006).	6
Figura 2-2: Curva típica tensão vs. deformação específica para produtos FRP baseado em dados experimentais. Fonte: ACI 440R (2007).	7
Figura 2-3: Curvas de tensão vs. deformação específica das fibras: a) carbono (alto módulo); b) carbono (alta resistência); c) aramida (Kevlar 49); d) vidro-S; e) vidro-E; f) compósito de basalto. Fonte: FIB Bulletin 40 (2007).	11
Figura 2-4: Tensão vs. deformação específica de materiais compósitos de matriz epóxi e fibra de carbono, aramida e vidro, na direção principal das fibras (C: Carbono, G: Vidro, A: Aramida). Fonte: FIB Bulletin 40 (2007).	20
Figura 2-5: Tratamento superficial em barras de FRP: a) nervuras contornadas em espiral; b) revestimento com areia. Fonte: BANK (2006).	22
Figura 3-1: Mecanismos de transferência das tensões de aderência. Fonte: ACI 408R (2003).	25
Figura 3-2: Hierarquia das modelagens de aderência para barras de aço e FRP. Fonte: FIB Bulletin 40 (2007).	26
Figura 3-3: Representação do comportamento da tensão na barra GFRP vs. deformação específica. Fonte: FIB Bulletin 40 (2007).	27
Figura 3-4: Arranjo típico do ensaio de arrancamento direto ou <i>Direct Pull-Out, DPO</i>	28
Figura 3-5: Curva do ensaio <i>Direct Pull-Out</i> . Fonte: FIB Bulletin 10 (2000).	29
Figura 3-6: Deslizamento relativo preliminar. Fonte: FIB Bulletin 10 (2000).	29
Figura 3-7: Fissuras transversais, longitudinais e fendilhamento. Fonte: FIB Bulletin 10 (2000).	30
Figura 3-8: Resultados típicos do ensaio de arrancamento direto barras FRP. Fonte: FIB Bulletin 40 (2007).	32
Figura 3-9: Curvas de tensão-deformação para três tipos de ruptura de barras FRP: a) ruptura da interface de aderência (arrancamento); b) ruptura por fendilhamento induzido por fissura do revestimento; c) ruptura por cisão do revestimento de concreto (fendilhamento). Fonte: TEPFERS e DELORENZIS (2003).	32
Figura 3-10: Distribuição normal de tensões em uma barra FRP submetida à tração axial. Fonte: ACHILLIDES e PILAKOUTAS (2004).	33
Figura 3-11: Interfaces de ruptura na superfície da barra FRP. Fonte: ACHILLIDES e PILAKOUTAS (2004).	34
Figura 3-12: Representação esquemática das componentes radiais das forças de aderência no concreto na zona de ancoragem. Fonte: TEPFERS (1973).	35
Figura 3-13: Distribuição das tensões de tração no estágio elástico (1), parcialmente fissurado – elástico (2) e plástico (3). Fonte: TEPFERS e DELORENZIS (2003).	36
Figura 3-14: Relação analítica do modelo BEP da tensão de aderência τ e deslizamento s . Carregamento monotônico. Fonte: FIB Bulletin 65 (2012)	38
Figura 3-15: Curva teórica de três estágios da relação da tensão de aderência e deslizamento, entre barras FRP e o concreto. Fonte: FIB Bulletin 65 (2012)	40
Figura 3-16: Fissuras de aderência: a) revestimento inferior menor do que espaçamento entre barras; b) espaçamento entre barras maior do que revestimento inferior. Fonte: ACI 408R (2003).	43

Figura 3-17: Variação da aderência em uma viga de concreto armado sob flexão pura: a) segmento de concreto fissurado; b) forças de aderência atuando na barra de reforço; c) variação da força de tração na barra; d) variação da força de aderência na barra. Fonte: NILSON, DARWIN e DOLAN (2010).....	44
Figura 3-18: Regiões de boa e má aderência segundo ABNT NBR 6118 (2014).	46
Figura 3-19: Influência da resistência à compressão do concreto na tensão de aderência τ para barras FRP. Fonte: ACHILLIDES e PILAKOUTAS (2004).	50
Figura 3-20: Comportamento dos corpos de prova de concreto 30 MPa e barras de GFRP de \varnothing 9 mm e \varnothing 16 mm. Fonte: COUTO (2007).	53
Figura 3-21: Comportamento dos corpos de prova de concreto 60 MPa e barras de GFRP de \varnothing 9 mm e \varnothing 16 mm. Fonte: COUTO (2007).	53
Figura 3-22: Comportamento dos corpos de prova de concreto 80 MPa e barras de GFRP de \varnothing 9 mm e \varnothing 16 mm. Fonte: COUTO (2007).	54
Figura 4-1: Modelo dos corpos de prova para ensaio de arrancamento direto <i>Pull-Out</i>	56
Figura 4-2: Detalhes do arranjo do ensaio Pull Out.	57
Figura 4-3: Curvas tensão – deformação específica das barras de aço.	58
Figura 4-4: Curva tensão – deformação específica das barras de CFRP.	60
Figura 4-5: Ensaio à tração das barras GFRP.	61
Figura 4-6: Detalhes da geometria da barra de compósito de fibra de vidro GFRP.	62
Figura 4-7: Detalhe do cobrimento com capa de plástico de parte do comprimento da barra, para a zona aderente e zona não aderente: a) CFRP; b) GFRP e c) aço.	64
Figura 4-8: Confeção dos corpos de prova: a) preparação das formas cúbicas; b) concretagem dos corpos de prova.	65
Figura 4-9: Corpos de prova de concreto e barras de aço, CP-A1, CP-A2 e CP-A3.	65
Figura 4-10: Corpos de prova de concreto e barras de fibras de carbono e barras de fibras de vidro, CP-C1, CP-C2, CP-C3, CP-V1, CP-V2 e CP-V3.	66
Figura 4-11: a) máquina de ensaio de laboratório para tração e compressão, marca Losenhausen, modelo Steuerpult z.; b) detalhe do mecanismo de garra da máquina de ensaio. Fonte: http://lagermaschinen.de	67
Figura 4-12: Transdutor de deslocamento LVDT marca Gefran, modelo PY2.	67
Figura 4-13: Arranjo do ensaio de arrancamento direto.	68
Figura 4-14: Detalhe do arranjo do ensaio de arrancamento direto.	69
Figura 4-15: Detalhe do dispositivo tipo luva para a proteção da área de agarre com a máquina de tração: a) barra de CFRP, b) barra de GFRP.	70
Figura 4-16: Detalhe da garra da máquina de tração e a luva de proteção da barra de GFRP.	71
Figura 4-17: Execução dos ensaios dos corpos de prova de concreto e barras de fibras de carbono e fibras de vidro.	72
Figura 4-18: Tensão de aderência τ vs. deslizamento S da aderência entre barras de aço e concreto, corpos de prova CP-A1, CP-A2 e CP-A3.	74
Figura 4-19: Tensão de aderência τ vs. deslizamento S entre concreto e barras de CFRP, corpos CP-C1, CP-C2 e CP-C3.	75
Figura 4-20: Tensão de aderência τ vs. deslizamento S entre concreto e barras de GFRP, corpos de prova CP-V1, CP-V2 e CP-V3.	76
Figura 5-1: Tensão da aderência vs. deslizamento $\tau - s$ entre barras de aço e o concreto.	78
Figura 5-2: Tensão da aderência vs. deslizamento $\tau - s$ entre as barras de CFRP e o concreto.	79
Figura 5-3: Tensão da aderência vs. deslizamento $\tau - s$ entre as barras de GFRP e o concreto.	81

Figura 5-4: Curvas tensão da aderência vs. deslizamento $\tau - s$ obtidos nos ensaios entre barras de GFRP e valores de Couto (2007).	82
Figura 5-5: Tensão da aderência vs. deslizamento $\tau - s$ entre os três tipos de barra da presente pesquisa.....	83
Figura 5-6: Valores S_m , \square_m e S_u , \square_u para barras de armadura	84
Figura 5-7: Tensões de tração na barra, ruptura da barra vs. ruptura da aderência.....	86
Figura 5-8: Comparação entre valores experimentais e analíticos da curva tensão da aderência vs. deslizamento $\tau - s$ para barras de aço.....	87
Figura 5-9: Comparação entre valores experimentais e analíticos da curva tensão da aderência vs. deslizamento $\tau - s$ para barras de GFRP	88
Figura 5-10: Comparação entre valores experimentais e analíticos da curva tensão da aderência vs. deslizamento $\tau - s$ para barras de GFRP segundo Malvar (1994).	89
Figura 5-11: Comparação entre valores experimentais e analíticos da curva tensão da aderência vs. deslizamento $\tau - s$ para barras de GFRP segundo BEP(1983).....	89
Figura 5-12: Comparação entre valores experimentais e analíticos da curva tensão da aderência vs. deslizamento $\tau - s$ para barras de GFRP segundo CMR(1997).	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Vantagens e desvantagens do reforço com FRP.....	8
Tabela 2-2: Propriedades mecânicas de barras típicas de armadura FRP atualmente disponíveis, relatados pelos fabricantes.	9
Tabela 2-3: Pesos específicos das barras de material compósito.	10
Tabela 2-4: Propriedades das fibras para os compósitos FRP.	12
Tabela 2-5: Propriedades típicas de matrizes poliméricas termofixas.	15
Tabela 2-6: Coeficientes de dilatação térmica típicos para barras de aço e compósitos FRP (fração volumétrica 0,5~0,75).	16
Tabela 2-7: Propriedades mecânicas para barras FRP (fração volumétrica 0,5~0,75) e aço. .	21
Tabela 3-1: Parâmetros para a definição da relação da tensão de aderência τ e deslizamento s para barras de aço nervuradas.	38
Tabela 3-2: Propriedades mecânicas experimentais dos materiais empregados na confecção dos corpos de prova para ensaios de aderência.	52
Tabela 4-1: Resumo dos dados do ensaio de tração para barras de aço.	58
Tabela 4-2: Propriedades físicas da barra CFRP segundo o fornecedor.	59
Tabela 4-3: Resumo dos dados do ensaio à tração para barras de CFRP.	60
Tabela 4-4: Propriedades mecânicas das barras GFRP, segundo o fornecedor.....	61
Tabela 4-5: Resumo dos dados do ensaio à tração para barras de GFRP.....	62
Tabela 4-6: Composição do concreto para confecção dos corpos de prova (kg de material / m ³ de concreto).	63
Tabela 4-7: Propriedades físicas normativas dos agregados utilizados.	63
Tabela 4-8: Valores experimentais da tensão última de ruptura da aderência para os corpos de prova de concreto e barras de aço.....	74
Tabela 4-9: Valores experimentais da tensão última de ruptura da aderência para os corpos de prova de concreto e barras de CFRP.....	75
Tabela 4-10: Valores experimentais da tensão última de ruptura da aderência para os corpos de prova de concreto e barras de GFRP.....	76
Tabela 5-1 Valores experimentais da tensão de aderência para os corpos de prova de concreto e barras de aço	78
Tabela 5-2: Valores experimentais da tensão de aderência para os corpos de prova de concreto e barras de CFRP.....	80
Tabela 5-3: Valores experimentais da tensão de aderência para os corpos de prova de concreto e barras de GFRP.....	81
Tabela 5-4: Resumo dos dados médios experimentais de ensaios Pull-Out.	84
Tabela 5-5: Valores de tensão de tração das barras σ_{u-ad} e σ_u para ruptura da aderência e ruptura da barra, respectivamente.	85
Tabela 5-6: Constantes empíricas adotadas no modelo analítico para GFRP.....	88
Tabela 5-7: Constantes empíricas adotadas na comparação de modelos.	90

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

τ	Tensão de aderência (MPa)
F	Força (N)
f_c	Resistência do concreto à compressão
d_b	Diâmetro da barra
f_{bd}	Resistência da aderência de cálculo
f_{ctd}	Resistência à tração direta do concreto
f_{cu}	Resistência última do concreto à compressão
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
τ_m	Tensão média da aderência
τ_u	Tensão última de ruptura da aderência
σ	Tensão de tração na barra
σ_y	Tensão de escoamento barra de aço
σ_u	Tensão última de ruptura à tração
C_b	Cobrimento de concreto na barra
C_s	Cobrimento de concreto entre barras
C_e	Cobrimento externo
E_b	Espaçamento entre barras
L_{ad}	Comprimento de aderência
E	Módulo de elasticidade
ε	Deformação específica
ε_u	Deformação específica última da barra
η_x	Coefficientes para cálculo de tensão de aderência
S	Deslizamento
S_u	Deslizamento último de ruptura da aderência

ρ	Massa específica
T_g	Temperatura de transição vítrea
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
FIB	<i>Fédération Internationale du Béton</i>
AFRP	<i>Aramid Fiber Reinforced Polymer</i>
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>
CP	Corpo de Prova
DPO	<i>Direct Pull-Out</i>
FRP	<i>Fiber Reinforced Polymer</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
FRC	Fiber Reinforced Concrete

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Notas Iniciais.....	1
1.1	Objetivos.....	3
1.2	Metodologia.....	3
1.3	Estrutura da Pesquisa.....	4
2	Revisão Bibliográfica.....	6
2.1	Materiais Compósitos FRP.....	6
2.1.1	Introdução aos Materiais Compósitos.....	6
2.1.2	Armadura Sintética FRP.....	7
2.1.3	Características do Material.....	9
2.1.4	Propriedades Mecânicas.....	20
2.1.5	Efeitos ao longo prazo.....	23
3	Aderência Concreto-Armadura.....	25
3.1	Considerações Iniciais.....	25
3.2	Níveis de Modelagem da aderência.....	26
3.2.1	Efeito de acréscimo da rigidez à face da tensão de aderência.....	26
3.3	Mecânica da Aderência.....	28
3.3.1	Interação entre o Concreto e a Armadura.....	28
3.3.2	Modos de Ruptura.....	31
3.3.3	Resistência ao fendilhamento do concreto circundante.....	34
3.4	Relação Local de Tensão de Aderência vs. Deslizamento.....	36
3.4.1	Modelo Bertero, Elighausen e Popov (BEP).....	37
3.4.2	Modelo modificado Bertero, Elighausen e Popov (mBEP).....	39
3.4.3	Modelo Cosenza-Manfredi-Realfonso (CMR).....	40
3.4.4	Modelo Malvar.....	41
3.5	Fatores que influenciam a aderência.....	41
3.5.1	Características Estruturais.....	42
3.5.2	Propriedades da barra.....	46

3.5.3	Propriedades do Concreto	49
3.5.4	Temperatura, Fatores Ambientais e Efeitos a Longo Prazo.....	51
3.6	Estudo da aderencia segundo couto	51
4	Programa Experimental	55
4.1	Considerações Iniciais	55
4.2	Especificações do tipo de ensaio	55
4.3	Especificações dos materiais	57
4.3.1	Barras de Aço.....	57
4.3.2	Barras de CFRP	58
4.3.3	Barras de GFRP.....	60
4.3.4	Concreto	62
4.4	Corpos de Prova.....	64
4.4.1	Preparação dos corpos de prova.....	64
4.5	Especificações dos equipamentos de ensaio implementados	66
4.5.1	Ensaio de <i>Pull-Out</i>	66
4.5.2	Transdutor de deslocamento LVDT	67
4.6	Realização dos Ensaios	68
4.7	Considerações sobre as unidades.....	72
4.8	Resultados dos ensaios.....	73
4.8.1	Ensaio de aderência entre concreto e barras de aço	73
4.8.2	Ensaio de aderência entre concreto e barras de CFRP.....	74
4.8.3	Ensaio de aderência entre concreto e barras de GFRP	75
5	Análise e discussão dos resultados.....	77
5.1	Considerações Iniciais	77
5.2	Ensaio de arrancamento	77
5.2.1	Corpos de prova de barras de aço	77
5.2.2	Corpos de prova de barras de CFRP.....	79
5.2.3	Corpos de prova de barras de GFRP	80
5.3	Comparação entre os corpos de prova compostos por diferentes Barras	83
5.4	Comparação entre resultados experimentais e analíticos.....	86

6	Conclusões e recomendações	91
6.1	Conclusões	91
6.2	Recomendações para pesquisas futuras.....	92
7	REFERÊNCIAS	94

1 INTRODUÇÃO

1.1 NOTAS INICIAIS

A indústria da construção é constantemente renovada com a introdução de novas tecnologias e novos materiais. Nas últimas décadas a tecnologia de materiais compósitos foi largamente aplicada: os polímeros reforçados com fibras, FRP (*Fiber Reinforced Polymers*). É uma tecnologia aplicada há tempos na engenharia mecânica, especialmente nas indústrias aeronáutica e naval, e também aplicada de modo crescente na indústria da construção, principalmente na forma de barras de reforço para estruturas de concreto armado, em substituição do aço. Outra alternativa é no uso de cordoalhas de protensão para o concreto protendido, remendagem e/ou restauração de estruturas existentes ou perfis ‘pultrudados’, semelhantes aos perfis de aço ‘laminados’.

As armaduras sintéticas de polímero reforçado com fibra (FRP), são constituídas por uma matriz, neste caso, polimérica (termorrígida, termoplástica, *etc.*), a qual é reforçada com fibras de alta resistência à tração (aramida, vidro, carbono, basalto, *etc.*). A combinação dessa matriz e as fibras ocorre por um processo químico-mecânico denominado de pultrusão. A sua confecção em forma de barras ou vergalhões cilíndricos com diferentes diâmetros e composições superficiais se realiza semelhante as barras aço para concreto armado. Desse modo, tem-se as barras de GFRP, CFRP, AFRP segundo a fibra principal constituinte, seja ‘G’ para fibras de vidro ou *Glass*, ‘C’ para fibras de carbono ou *Carbon*, e ‘A’ para fibras de aramida respectivamente.

São muitas as vantagens desse material em substituição ao aço para armadura do concreto, sendo a principal a resistência à corrosão. Concreto armado com barras de FRP é hoje uma das melhores alternativas para obras em ambientes marinhos, ou onde há presença de agentes químicos corrosivos. Outra grande vantagem é a sua baixa massa específica, sendo as barras FRP entre 16% e 27% do valor da massa específica do aço, facilitando assim a armazenagem, transporte, manuseio, *etc.* Esse material não é condutivo de eletricidade nem calor, e tem transparência magnética, uma propriedade vantajosa para salas de tomografia computadorizada ou para usinas de geração de eletricidade.

Em relação ao uso dos FRP como alternativa ao aço, uma boa parte dos ensaios em laboratório aborda o comportamento à flexão em vigas, à força cortante, compressão e tração simples ou composta em concreto com FRP, além dos ensaios relativos à durabilidade como fluência, fadiga, de entre outros.

Para se estudar o uso das barras FRP foram realizadas, no Instituto Militar de Engenharia de Rio de Janeiro, pesquisas experimentais de vigas de concreto armado com armaduras de GFRP e CFRP à flexão, nas quais se definiram alguns parâmetros para a sua aplicação na indústria, SILVA (2014).

No entanto, são necessários mais estudos experimentais, especialmente para analisar a aderência entre a armadura e o concreto. A presente pesquisa pretende dar continuidade a esses estudos tratando do comportamento da aderência.

Em referência à aderência existem diversos ensaios e configurações de corpos de prova que podem ser realizados para entender melhor esse fenômeno. Nas normas americana, europeia, japonesa, entre outras, há diferentes parâmetros de configuração padronizados para realizar ensaios de aderência para armadura FRP, porém estas normas permitem pequenas modificações dos seus parâmetros com o objetivo de testar novos materiais, configurações geométricas, condições do ambiente de laboratório, *etc.* sempre que estejam devidamente documentadas e justificadas na pesquisa.

Entre os ensaios de aderência mais comuns atualmente utilizados estão o fim de viga ou *beam-end*, viga emendada ou *spliced-beam*, viga rotulada ou *hinged-beam*, tração axial direta ou *direct-axial-tension*, *etc.* Um dos mais populares é o ensaio de arrancamento direto ou *direct pull-out*, DPO, pela sua simplicidade tanto na confecção dos corpos de prova quanto da realização do ensaio propriamente, permitindo assim uma maior quantidade de informação obtida destes e sua análise e posterior comparação entre as diversas modificações possíveis das configurações do ensaio.

Na última década têm sido realizados vários ensaios de aderência em diferentes universidades do mundo por meio de ensaios do tipo arrancamento direto ou *direct pull-out*, DPO. É notável uma participação crescente de países como a Turquia, a China, *etc.* e hoje em dia existe uma grande disposição para adotar o uso dos materiais FRP para a armadura do concreto. Na América do Sul a tecnologia ainda é relativa novidade, porém, já existem diversos estudos para a sua aplicabilidade e uso, SILVA (2014).

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é estudar experimentalmente o comportamento da aderência entre barras de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP), barras de polímero reforçado com fibras de carbono (CFRP), barras de aço e concreto convencional (CC) por meio de ensaios de laboratório padronizados do tipo arrancamento direto.

Os objetivos específicos a considerar são:

- comparar o comportamento da aderência entre armaduras passivas de barras de polímero reforçado com fibra de carbono e fibra de vidro, em concreto convencional.
- comparar o comportamento da aderência entre as barras de polímero reforçado com fibras e barras de aço nas mesmas propriedades do concreto.
- comparar os resultados experimentais dos ensaios com pesquisas semelhantes realizadas no Brasil além dos parâmetros teóricos estabelecidos na ACI 440.3R (2004) e FIB Bulletin 10 (2000).

1.2 METODOLOGIA

O tipo de ensaio adotado nesta pesquisa é o ensaio de arrancamento direto ou DPO *test*. Esse é o tipo de ensaio mais simples e habitual para o estudo teórico-prático essencial da aderência entre a armadura e o concreto. Além disso, é o tipo de ensaio mais empregado no estudo comparativo da aderência entre diversas configurações dos corpos de prova segundo os materiais utilizados ou as pequenas mudanças paramétricas que o caso de estudo precise.

A elaboração dos corpos de prova foi realizada no Laboratório de Materiais e Concreto da Seção de Engenharia de Fortificação e Construção do Instituto Militar de Engenharia, IME, localizado na cidade de Rio de Janeiro. O ensaio dos corpos de prova foi feito no Laboratório de Materiais da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, localizado na mesma cidade.

Os procedimentos operacionais para ensaios de arrancamento do tipo *Pull-Out* foram observados tanto na norma americana ACI 440.3R (2004) quanto nas europeias FIB Bulletin 10 (2000) e FIB Bulletin 65 (2012). Empregaram-se corpos de prova prismáticos de dimensão suficiente ($C_e \geq 5 d_b$) para garantir a ruptura por arrancamento ou *pull-out* e não por fendilhamento do concreto, com a barra localizada no meio do corpo, com comprimento de aderência de 10 vezes o diâmetro da barra e lançamento do concreto em paralelo à direção da barra.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

O presente documento está dividido em sete capítulos, começando pelo Capítulo I, no qual se providencia uma introdução sobre o tema a ser desenvolvido, os objetivos que se propõe examinar a presente pesquisa e uma breve descrição da metodologia a ser empregada no decorrer do estudo.

No segundo capítulo realiza-se uma revisão bibliográfica sobre os materiais que são os principais objetos do estudo, o material compósito sintético formado em barras para armadura de concreto, em específico a armadura de polímero reforçado com fibras de vidro e a armadura com barras de polímero reforçado com fibras de carbono.

O terceiro capítulo procura aprofundar sobre o comportamento da aderência entre barras de armadura e o concreto. Estudos experimentais de aderência com ensaios do tipo *Pull-Out*, revisam-se modelos analíticos do comportamento da aderência, fatores que a influenciam e outros parâmetros de definição.

O quarto capítulo relata sobre a metodologia experimental a ser aplicada na procura dos objetivos desta pesquisa. Também amplia-se em detalhes sobre a confecção e ensaio dos corpos de prova, ensaios prévios, os laboratórios, os equipamentos para realização dos ensaios, o procedimento de ensaio propriamente, e resultados preliminares.

No quinto capítulo se expõem e se analisam os resultados obtidos dos experimentos, apresentam-se gráficos, tabelas e demais detalhes que forneceram os ensaios realizados em todos os corpos de prova, especificando a variação da configuração dos espécimes. Examina-se o comportamento do material ensaiado segundo o comportamento teórico esperado e o observado experimentalmente, discutem-se sobre as virtudes da metodologia e sobre as possíveis erros da instrumentação ou os procedimentos.

No sexto capítulo apresentam-se as conclusões da pesquisa e as recomendações para pesquisas futuras. Por último, refere-se a bibliografia empregada, os artigos científicos baseados em experimentos similares, a literatura sobre os temas desenvolvidos e as teses e dissertações realizadas que contribuíram à realização deste documento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS FRP

2.1.1 Introdução aos Materiais Compósitos

Os materiais compósitos de polímero reforçados com fibras (*Fiber Reinforced Polymers*, FRP) têm se desenvolvido em materiais de construção de forma econômica e estruturalmente viáveis para edificações e pontes ao longo dos últimos vinte anos. Materiais compósitos FRP usados na engenharia estrutural tipicamente consistem de fibras de vidro, carbono ou aramida confinadas em uma matriz de resina epóxi, poliéster, vinil-éster ou fenólica termofixa, cuja concentração de fibra supera 30% em volume BANK (2006). São usados na engenharia estrutural em uma variedade ampla de formas, desde perfis laminados estruturais à armadura interna de elementos estruturais de concreto, assim como em laminados e mantas para reforço externo do concreto, e também como cabos de protensão internos ou externos no concreto protendido, conforme ilustra a Figura 2-1.

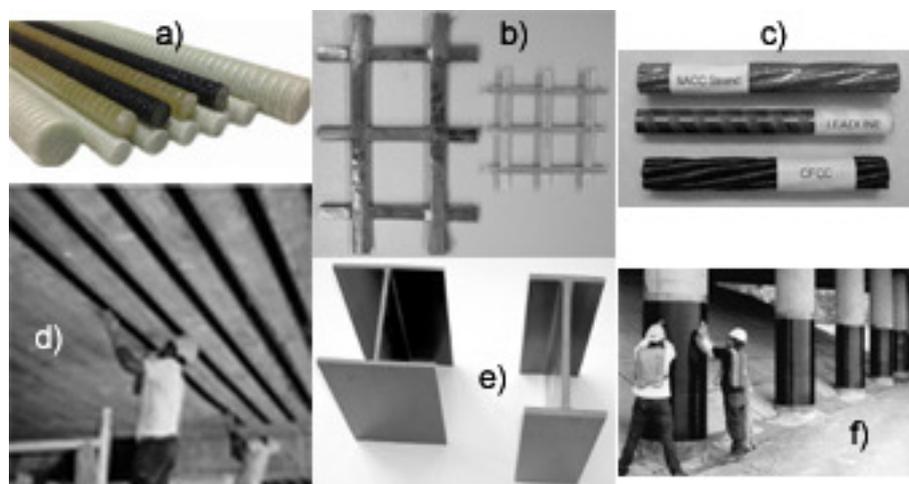


Figura 2-1: Diferentes tipos de materiais compósitos FRP: a) barras de polímero reforçado com fibras FRP; b) grade ou malha de FRP; c) cabos de protensão FRP; d) mantas de cobertura de reforço para colunas; e) perfil pultrudado FRP em seções H e I; f) faixas de reforço coladas à superfície tipo NSM (Near Surface Mounted). Fonte: BANK (2006).

As barras de FRP se tornaram comercialmente disponíveis como reforços para o concreto nos últimos quinze anos e hoje em dia mais de dez milhões de metros são usados na construção todos os anos segundo FIB Bulletin 40 (2007). Existem várias razões sobre o porquê

engenheiros civis e estruturais podem precisar de materiais FRP como armadura no concreto. A primeira razão é a durabilidade, mas outras razões incluem a neutralidade ou transparência magnética, alta resistência e baixo peso. Os materiais compósitos FRP ainda são relativamente novos na indústria da construção e uma significativa quantidade de profissionais da construção não está familiarizada com as propriedades e características desses materiais, os quais apresentam comportamento linear e pouca capacidade de deformação até a sua ruptura, de acordo com o que pode ser visto na Figura 2-2.

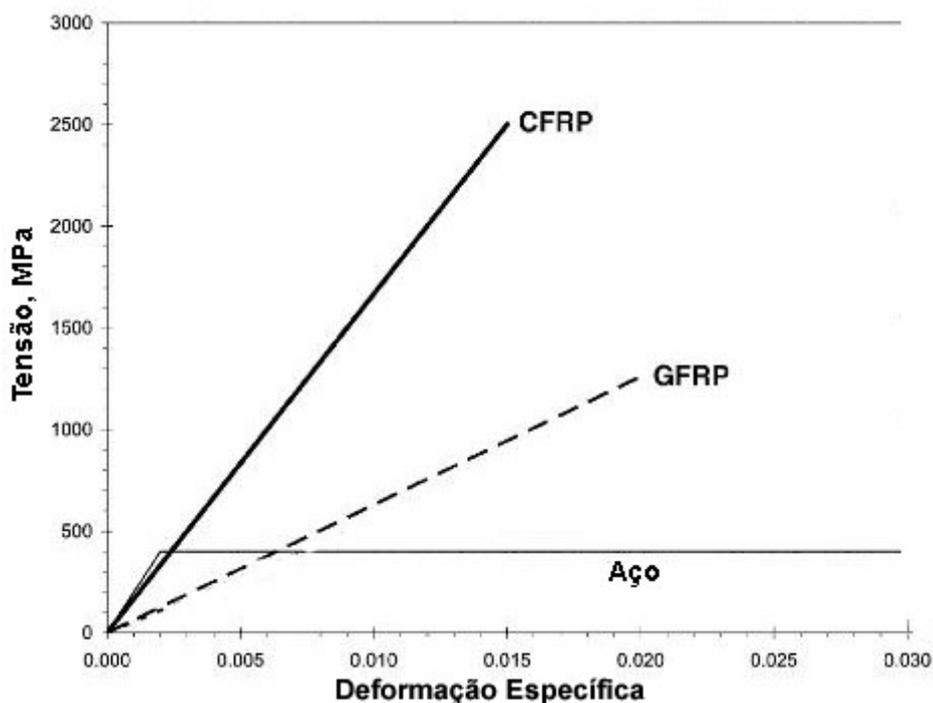


Figura 2-2: Curva típica tensão vs. deformação específica para produtos FRP baseado em dados experimentais. Fonte: ACI 440R (2007).

2.1.2 Armadura Sintética FRP

Para muitas estruturas expostas a meios agressivos, tais como estruturas marinhas, pontes, estacionamentos expostos a sais de degelo (caso climas com neve), combinações de umidade, temperatura ou cloretos, reduzem a alcalinidade do concreto resultando em corrosão do aço. O processo de corrosão acaba causando a perda da capacidade resistente em serviço do concreto. Para corrigir esses problemas de corrosão, os profissionais começaram usando

alternativas ao aço simples tais como barras de aço revestidas com resina epóxi, misturas de concreto de alto desempenho, entre outras. Enquanto efetivas em alguns casos, tais soluções não conseguem eliminar completamente o problema da corrosão do aço em estruturas de concreto armado, SAGÜES, POWERS e KESSLER (2001).

Recentemente, os materiais compósitos FRP se tornaram uma alternativa viável à substituição da armadura de aço para as estruturas de concreto. Os materiais FRP são não-magnéticos e não-corrosivos, por isso os problemas de interferência eletromagnética e corrosão do aço podem ser evitados com o uso da armadura sintética ACI 440.1R (2006). Os materiais FRP exibem várias propriedades, tal como alta resistência à tração, o que os tornam apropriados para o uso como reforço estrutural. Segundo a recomendação do ACI 440.1R (2006), a Tabela 2-1 apresenta algumas das vantagens e desvantagens dos materiais compósitos FRP como reforço.

Tabela 2-1: Vantagens e desvantagens do reforço com FRP

Vantagens do reforço FRP	Desvantagens do reforço FRP
Alta resistência longitudinal à tração (varia segundo direção da carga relativa às fibras)	Ruptura sem apresentação de limite de escoamento
Resistência à corrosão (independente do revestimento)	Baixa resistência transversal (varia segundo direção da carga relativa às fibras)
Não-magnético	Baixo módulo de elasticidade (varia segundo tipo de fibra de reforço)
Alta resistência à fadiga (varia segundo tipo de fibra de reforço)	Suscetibilidade de dano à resina polimerica e fibras sob exposição à radiação ultravioleta
Baixo peso (entre 1/6 a 1/4 do peso esp. do aço)	Baixa durabilidade das fibras de vidro em ambiente úmido
Baixa condutividade térmica e elétrica (para as fibras de vidro e aramida)	Alto coeficiente de expansão térmica perpendicular às fibras relativas ao concreto

Fonte: ACI 440.1R (2006).

2.1.3 Características do Material

2.1.3.1 Características Gerais

As barras de FRP são usinadas de fibras contínuas impregnadas de resinas poliméricas. Nesses compósitos, fibras contínuas de alta resistência e alta rigidez são embebidas, aderidas e unidas pela matriz polimérica de menor módulo de elasticidade FIB Bulletin 40 (2007). No caso das barras de FRP, as fibras formam a parte principal do material e determinam a sua resistência e rigidez final no sentido das fibras.

As barras FRP são anisotrópicas pela natureza do processo de produção. Esse processo é geralmente de pultrusão, mas também pode ser de trançado ou em tecelagem BANK (2006). Fatores tais como o volume de fibra, tipo de fibra, tipo de resina, orientação das fibras, geometria geral e controle de qualidade são todos importantes fatores na definição das características de uma barra FRP, cujas propriedades de alguns tipos de barra FRP estão reunidas na Tabela 2-2.

Tabela 2-2: Propriedades mecânicas de barras típicas de armadura FRP atualmente disponíveis, relatados pelos fabricantes.

Tipo de barra	Resistência à Tração [MPa]	Módulo Elasticidade [GPa]
Aço (*:até o escoamento)	420*	208
Pulltrall Inc. ®2005		
V-ROD CFRP	1596	120
V-ROD GFRP	852	43
Hughes Brothers ®2005		
Aslan CFRP	2068	124
Aslan GFRP	760	41
Mitsubishi ®2005		
Leadline CFRP	2255	147
Autocon Composites ®2006		
Nefmac CFRP	1200	100
Nefmac GFRP	600	30
Sika Corp. ®2007		
CarboDur CFRP	2800	155

Fonte: ACI 440R (2007).

2.1.3.2 Peso Específico

As barras de FRP têm um peso específico entre 12,5 kN/m³ a 21,8 kN/m³, o que representa uma sexta a uma quarta parte do peso específico do aço. O baixo peso reduz os custos de transporte e facilita o manuseio das barras no local do projeto.

Tabela 2-3: Pesos específicos das barras de material compósito.

	Aço	GFRP	CFRP	AFRP
Peso específico típico de barras para armadura (kN/m ³)	79,0	12,5 a 21	15 a 16	12,5 a 14

Fonte: ACI 440.1R (2006).

2.1.3.3 Fibras

A função primária das fibras de reforço é a de transmitir a carga ao longo do comprimento do compósito para fornecer resistência e rigidez na direção da mesma. As fibras são mais resistentes do que o material granel que o constitui devido à orientação preferencial das moléculas ao longo da direção das fibras. Os requisitos estruturais e funcionais desejados das fibras nos materiais compósitos são: alto módulo de elasticidade para o uso eficiente da armadura; alta resistência e escoamento conveniente na fratura à tração; baixa variação da resistência entre fibras individuais; estabilidade das propriedades durante a manipulação e fabricação; uniformidade do diâmetro e superfície das fibras; alta dureza, durabilidade, disponibilidade e custo aceitável FIB Bulletin 40 (2007).

Os principais tipos de fibras em uso comercial para aplicações na engenharia civil são vidro, carbono e aramida. Entre esses as fibras de vidro têm o maior volume de armadura medido tanto em quantidade consumida quanto em vendas do produto WALLEMBERGER, WATSON e LI (2001).

As curvas de tensão - deformação específica por tipo de fibras podem ser vistas na Figura 2-3, que foram extraídas da recomendação FIB Bulletin 40 (2007).

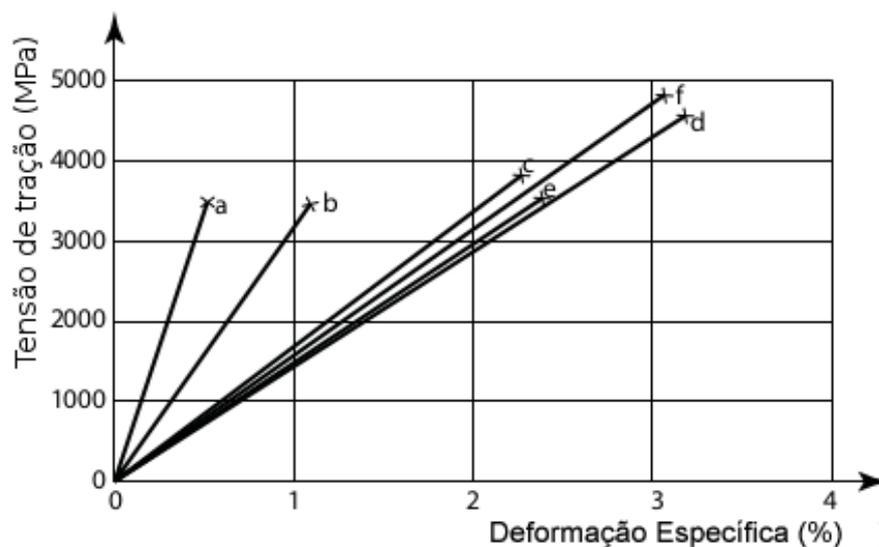


Figura 2-3: Curvas de tensão vs. deformação específica das fibras: a) carbono (alto módulo); b) carbono (alta resistência); c) aramida (Kevlar 49); d) vidro-S; e) vidro-E; f) compósito de basalto. Fonte: FIB Bulletin 40 (2007).

- Fibras de Vidro

As fibras de vidro são as fibras mais comumente usadas em compósitos de matriz polimérica. O vidro fundido pode ser alongado em finos filamentos os quais são tecidos em mechas. Durante a fabricação a superfície das fibras é posteriormente resfriada e revestida com agente químico aglutinante para melhorar a resistência da adesão à matriz e reduzir o número de vazios.

Segundo a FIB Bulletin 40 (2007), as fibras de vidro mais comuns são as vidro-E (*E-Glass*), vidro-S (*S-Glass*) e vidro-AR (*AR-Glass*). Baseado em uma composição de borossilicato de cal-alumínio, as fibras de *E-Glass* são consideradas o material predominante em compósitos de matriz polimérica pelas suas altas propriedades isolantes de eletricidade, baixa suscetibilidade à umidade e altas propriedades mecânicas.

As fibras *S-Glass* têm maior resistência à tração, enquanto as *AR-Glass* têm maior resistência ao ataque alcalino pela adição de Zircônio. Porém, as duas têm maior custo em relação ao da fibra *E-Glass*. As fibras de vidro têm geralmente boa resistência ao impacto,

porém, têm maior peso específico do que fibras o das de carbono ou aramida. As fibras de vidro têm boas propriedades de isolamento elétrico e térmico, assim como transparência à radiação eletromagnética ACI 440R (2007).

- Fibras de Carbono

As fibras de carbono são fabricadas por decomposição térmica da Poliacrilonitrila (PAN). As propriedades das fibras de carbono são controladas pela estrutura molecular e pelo teor dos defeitos. A formação de fibras de carbono requer temperaturas de processamento acima dos 1000°C. Existem basicamente dois tipos de fibras de carbono: alta resistência e alto módulo (também denominadas de fibras de grafito). A diferença nas propriedades entre as duas é o resultado das diferenças da microestrutura das fibras, derivadas do tipo de precursor e a temperatura do processamento WALSH (2001).

As fibras de carbono de alta resistência são as mais usadas na engenharia civil pela sua elevada resistência à tração (até 5000 MPa na sua direção principal) e o módulo de elasticidade relativamente alto (até 140 GPa). As fibras de carbono de alto módulo (ou fibras de grafito) têm, portanto, maior módulo de elasticidade (até 650 GPa), porém, menor resistência à tração (até 2000 MPa). A Tabela 2-3 apresenta as propriedades de diferentes fibras utilizadas nos compósitos FRP, segundo o manual FIB Bulletin 40 (2007).

Tabela 2-4: Propriedades das fibras para os compósitos FRP.

Tipo de Fibra	Peso Específico	Resistencia à tração	Módulo de elasticidade	Deformação última	Coefficiente de dilatação térmica
	(kN/m ³)	(MPa)	(GPa)	(%)	(10 ⁻⁶ /°C)
Vidro-E	25,0	3450	72,4	2,4	5
Vidro-S	25,0	4580	85,5	3,3	2,9
Vidro-AR	22,7	1800-3500	70-76	2,0-3,0	
Carbono (Alto Modulo)	19,5	2500-4000	350-650	0,5	-1,2... -0,1
Carbono (Alta Resistência)	17,5	3500	240	1,1	-0,6... -0,2
Aramida (Kevlar 49)	14,4	3620	124	2,2	-2

Aramida (Technora H)	13,9	3000	70	4,4	-6
Basalto (Albarrie)	28,0	4840	89	3,1	8

Fonte: FIB Bulletin 40 (2007)

A maior desvantagem das fibras de carbono é o seu alto custo, pois essas são 10 a 30 vezes mais caras do que as fibras de vidro-E. O alto custo dessas fibras deriva do alto custo do material base e do longo processo químico-térmico. Porém, as fibras de carbono possuem o dobro da resistência e têm quatro vezes o módulo de elasticidade em relação às fibras de vidro.

2.1.3.4 Matrizes Poliméricas

A matriz de um compósito polimérico é um componente estrutural e de proteção. É comum designar o termo de resina quando o polímero se encontra na fase de processamento, e de matriz quando o polímero já foi curado ou endurecido.

Existem dois grandes grupos de resinas poliméricas: termofixas (ou termorrígidas) e termoplásticas. As resinas termoplásticas são polímeros que não desenvolvem reticulação, portanto essas amolecem quando são aquecidas podendo ser remodelados no processo. As mais comuns são o Poli-Éter-Éter-Cetona (PEEK) e o policloreto de vinil (PVC) ACI 440R (2007).

Por outro lado, as resinas termofixas são polímeros os quais são irreversivelmente formados desde materiais precursores de baixo peso molecular e baixa viscosidade pelo uso de um catalisador. Quando curadas, as resinas termofixas endurecidas não podem ser remodeladas. Essas resinas são as mais usadas no processo de fabricação de barras de FRP, sendo as mais comuns: epóxi, poliéster, vinil-éster e fenólicas.

- Epóxi

As resinas epóxi têm um registro bem estabelecido e uma ampla gama de usos em estruturas e partes de compósito, e em serviços de reparo e/ou reforço de concretos. Essas são preparadas pela polimerização por abertura de anel dos compostos contendo em média mais do

que um grupo epóxi por molécula. A resina pode ser manipulada para obter diferentes produtos com variados níveis de desempenho.

Segundo a FIB Bulletin 40 (2007), as maiores vantagens das resinas epóxi são altas propriedades mecânicas, fácil processamento, baixo encolhimento durante a cura e boa adesão a uma ampla gama de fibras. Essas também têm alta resistência à corrosão e são menos afetadas pela água e temperaturas altas do que as outras resinas.

Segundo o ACI 440R (2007), a maior desvantagem das resinas epóxi é o seu alto custo e o seu longo período de cura. Atualmente o epóxi é a resina predominantemente usada em reparo e/ou reforço de concreto quando se aplicam mantas ou lâminas de FRP.

- Poliéster

As resinas de poliéster insaturado são produzidas usando etilenoglicol como o ácido dicarboxílico saturado e ácido fumárico como ácido dicarboxílico insaturado. A principal vantagem dessas resinas é o equilíbrio das suas propriedades tanto mecânicas quanto químicas e elétricas, custo e facilidade de manipulação e processamento. A desvantagem é a sua retração volumétrica, porém, esse comportamento pode ser reduzido pela adição de componentes termoplásticos ACI 440R (2007).

Outras propriedades como flexibilidade, isolamento elétrico, resistência à corrosão e ao calor, resistência à radiação UV, *etc.* precisam da adição de outros componentes para a sua melhora. As propriedades típicas de diferentes matrizes poliméricas termofixas podem ser visualizadas na Tabela 2-5.

Tabela 2-5: Propriedades típicas de matrizes poliméricas termofixas.

Propriedade	Polyester	Epóxi	Vinyl-Ester
Peso específico (kN/m ³)	12,0 – 14,0	12,0 – 14,0	11,5 – 13,5
Resistencia à tração (MPa)	34,5 – 104	55 – 130	73 – 81
Módulo de elasticidade (GPa)	2,1 – 3,5	2,8 – 4,1	3,0 – 3,5
Coefficiente de Poisson	0,35 – 0,39	0,38 – 0,40	0,36 – 0,39
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	55 – 100	45 – 65	50 – 75
Teor de umidade (%)	0,15 – 0,60	0,08 – 0,15	0,14 – 0,30

Fonte: FIB Bulletin 40 (2007).

- Termoplásticos

As resinas termoplásticas apresentam alta viscosidade na sua temperatura de processamento e, portanto, são difíceis de processar. Porém, materiais compósitos com resinas termoplásticas podem ser restaurados, sendo que a transição ao estado amolecido pode ser conseguida qualquer número de vezes aplicando-se calor (MCKAGUE, 2001).

O termoplástico mais comum para aplicações de alto desempenho é o Poli-Éter-Éter-Cetona, PEEK, o qual apresenta alta dureza à fratura, propriedade importante para a tolerância ao dano do compósito. Esse exibe também baixa absorção de água, aproximadamente 0,5% por peso.

As resinas de PVC são termoplásticas por definição e apresentam várias propriedades das resinas termofixas, mas com os atributos do processamento similar aos das resinas termoplásticas. Essas resinas são formuladas sem estireno, solventes ou compostos voláteis, ACI 440R (2007).

2.1.3.5 Efeitos da temperatura em barras FRP

Em relação ao coeficiente de dilatação térmica das barras FRP, esse varia segundo a direção longitudinal ou transversal e dependem do tipo de resina polimérica e fibras e da fração volumétrica das fibras. O coeficiente de dilatação térmica longitudinal é governado pelas propriedades da fibra, enquanto o coeficiente de dilatação térmica transversal é dependente pela resina polimérica (ACI 440.1R-06, 2006). Valores de coeficiente de dilatação térmica para barras de aço e de compósitos FRP podem ser vistos na Tabela 2-5 segundo o código FIB Bulletin 40 (2007).

Tabela 2-6: Coeficientes de dilatação térmica típicos para barras de aço e compósitos FRP (fração volumétrica 0,5~0,75).

Direção	Coeficiente de dilatação térmica ($\cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)			
	Aço	GFRP	CFRP	AFRP
Longitudinal α -L	11	6 a 10	-9 a 0	-2 a -6
Transversal α -T	11	21 a 23	74 a 104	60 a 80

Fonte: FIB Bulletin 40 (2007).

Sendo o reforço FRP incorporado no concreto, este não pode queimar devido à falta de oxigênio. Contudo, os polímeros perdem rigidez quando submetidos à alta temperatura.

Essa temperatura é a temperatura de transição vítrea T_g , além do T_g , o módulo de elasticidade do polímero é significativamente reduzido devido a mudanças na estrutura molecular. O valor de T_g depende do tipo de resina polimérica, mas este se situa normalmente na faixa dos 70°C aos 175°C BOOTLE, BURZESI e FIORINI (2001).

Em um material compósito as fibras exibem melhores propriedades térmicas do que a resina e continuam suportando carga na direção longitudinal da barra. Porém, as propriedades de tração do compósito inteiro são reduzidas devido à redução na transferência de força das fibras em função da redução da aderência à resina.

Segundo as pesquisas de KATZ (1999), a aderência entre as barras FRP e o concreto é principalmente dependente das propriedades da resina polimérica na superfície da barra. Em temperaturas próximas ao T_g , as propriedades mecânicas da matriz se reduzem assim como a transferência de tensão entre o concreto e as fibras.

O colapso estrutural pode acontecer quando as ancoragens nos extremos das barras FRP são perdidas ou quando a temperatura supera o limiar térmico das fibras: 800°C para fibras de vidro, e 1600°C, para fibras de carbono WALLEMBERGER, WATSON e LI (2001). Contudo, baseado no conhecimento atual, o uso do reforço FRP não é recomendado para estruturas onde a resistência ao fogo é essencial para manter a integridade da estrutura.

2.1.3.6 Durabilidade

A definição da durabilidade do compósito FRP ou do elemento estrutural armado com FRP é a habilidade de resistir fissuração, oxidação, degradação química, deslocamento, deterioração, fadiga, efeitos pelo dano por substâncias estranhas ou uma combinação destas por um período específico de tempo, sob as condições de carregamento apropriadas e sob condições ambientais específicas ACI 440R (2007).

A rigidez e a resistência podem aumentar, reduzir ou permanecer iguais dependendo do material, em particular, e as condições de exposição. A resistência à tração e a tensão máxima de aderência são as propriedades mecânicas importantes para o dimensionamento de elementos estruturais em concreto armado.

Segundo KARBHARI, CHIN, *et al.* (2003), a ausência de dados compreensivos, validados e acessíveis sobre a durabilidade dos compósitos FRP constitui uma barreira crítica para a sua ampla aceitação. Assim, existe uma preocupação enfatizada pelo fato das estruturas estarem permanentemente sob carregamento e das quais se espera uma longa vida útil em serviço e baixa manutenibilidade.

- Efeito da umidade e salinidade

O efeito da umidade sobre as propriedades do compósito FRP tem sido estudado tanto em diferentes umidades relativas do ar (percentagem de umidade relativa), quanto sob submersão em água e em diferentes temperaturas e carregamentos BANK e GENTRY (1995).

Esses estudos indicam que pode haver deterioração das resinas por rompimento das ligações Van der Waals dos polímeros, causando redução da resistência e módulo de elasticidade. No entanto esses efeitos dependem do tipo de fibra e ocorrem em geral acima dos 60°C e, especialmente, para resinas de poliéster.

Em relação à aplicação dos compósitos FRP em ambientes salinos, o código FIB Bulletin 40 (2007) resume importantes trabalhos de pesquisadores que realizaram estudos de compósitos FRP com fibras de vidro, aramida e carbono com diferentes composições superficiais e em concentrações de cloretos de até 4%.

Contudo, os resultados desses estudos variam amplamente, pois houve diferenciação entre ataque por cloretos, difusão por absorção de umidade e/ou ataque alcalino às fibras. Em termos gerais as barras CFRP expostas a todas as combinações de umidade e salinidade apresentam muito baixa degradação. Porém, as barras AFRP e GFRP podem apresentar até 50% de redução de resistência e rigidez em esses efeitos combinados com alta temperatura e ao longo prazo.

Os dados sobre ataque por cloretos são insuficientes para obter conclusões definitivas. Assim, o uso dos compósitos FRP como armadura deve basear-se no conhecimento do desempenho específico da barra empregada para um ambiente salino específico.

- Exposição em Ambiente Alcalino

As soluções alcalinas tais como as encontradas na água dos poros do concreto, têm um alto valor de pH e alta concentração de íons de álcali. As pesquisas compiladas no ACI 440R (2007) mostram que as fibras de carbono são resistentes às soluções alcalinas. O dano das resinas poliméricas por ataque alcalino é geralmente mais severo do que aquele por umidade.

No caso das barras GFRP, os estudos mostram que os valores de degradação por ataque alcalino são dependentes tanto do tipo de fibra quanto do tipo da matriz polimérica. Na configuração mais desfavorável (fibras E-glass, matriz de poliéster) submergidas em uma solução de pH 12,8 observou-se uma redução acima de 40% na resistência à tração.

Contudo, a resina polimérica apropriada (vinil-éster, epóxi) fornece um alto nível de proteção das fibras frente a esta condição de exposição. Além disto, a aplicação de revestimento especial e um melhor procedimento de fabricação podem acrescentar a durabilidade do compósito FRP ante o ataque alcalino.

Os estudos mais recentes feitos no Canadá sobre o desempenho da armadura GFRP, utilizando-se métodos como microscópio eletrônico de varredura, raios-X, espectroscopia de infravermelho, *etc.*, não mostraram degradação visível na interfase concreto-armadura em obras existentes e expostas à ambiente natural entre cinco e oito anos.

- Raios Ultravioletas (UV)

Os raios UV afetam os materiais poliméricos. Embora as barras FRP na armadura do concreto não estão expostas aos raios UV durante o serviço, os raios UV podem causar degradação durante a sua armazenagem, ou se o compósito FRP for usado como reforço externo.

Os ensaios de exposição aos raios UV realizados, segundo FIB Bulletin 40 (2007), mostram uma redução da resistência à tração de 8% nas barras de GFRP às 500 horas (sem

acréscimo de redução depois desse tempo), 13% nas barras AFRP às 2500 horas, e 0% para as barras de CFRP.

2.1.4 Propriedades Mecânicas

2.1.4.1 Resistência à Tração

Quando solicitadas à tração, as barras FRP não exibem comportamento plástico (escoamento) antes da ruptura. O comportamento à tração das barras FRP, que consistem somente de um tipo de fibra, é caracterizado por uma relação elástica entre tensão e deformação específica até a ruptura, conforme ilustra a Figura 2-4.

Os principais fatores que influenciam as propriedades de tração (resistência e módulo de elasticidade) das barras FRP, de acordo com a tabela 2-6, são: as propriedades dos constituintes (fibras e matriz) e as suas frações volumétricas, interações físicas e químicas, procedimento de fabricação e o controle da qualidade do fabricante.

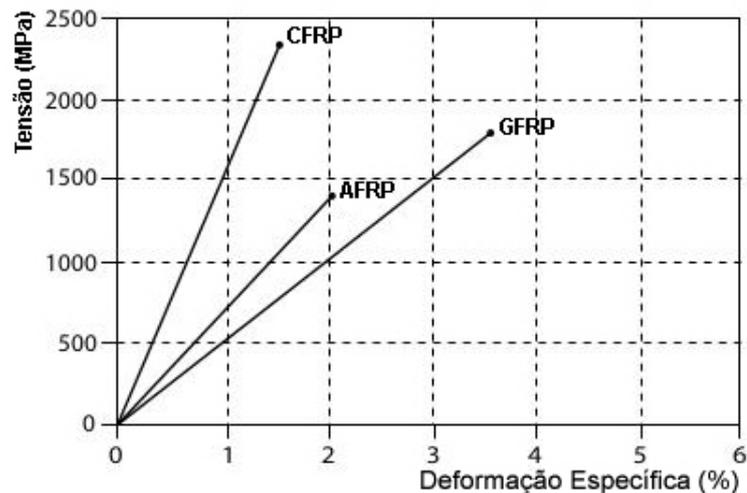


Figura 2-4: Tensão vs. deformação específica de materiais compósitos de matriz epóxi e fibra de carbono, aramida e vidro, na direção principal das fibras (C: Carbono, G: Vidro, A: Aramida). Fonte: FIB Bulletin 40 (2007).

Tabela 2-7: Propriedades mecânicas para barras FRP (fração volumétrica 0,5~0,75) e aço.

Propriedade	Aço	GFRP	CFRP	AFRP
Modulo de elasticidade longitudinal (GPa)	200	35 a 60	100 a 580	40 a 125
Resistencia longitudinal à tração (MPa)	450 a 700	450 a 1600	600 a 3500	1000 a 2500
Deformação específica última à tração (%)	5 a 20	1,2 a 3,7	0,5 a 1,7	1,9 a 4,4

Fonte: FIB Bulletin 40 (2007).

Os métodos de ensaio para a resistência à tração e o módulo de elasticidade para barras FRP têm sido desenvolvidos pelo Comitê 440 do Instituto Americano do Concreto, *ACI 440.3R-04: Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers* e pela Organização Internacional para Padronização, denominado *ISO 10406-08: FRP Reinforcement of Concrete – Test Methods*, entre outros. O fabricante de barras deve fornecer as propriedades à tração de uma barra específica e uma descrição do método usado para a obtenção destas propriedades.

2.1.4.2 Resistência à Compressão

De acordo aos estudos relatados no ACI 440.1R (2006), a resistência à compressão das barras FRP não é o seu atributo principal, portanto, é importante que esse comportamento seja caracterizado sendo que muitas variáveis podem influir na resistência e modo de ruptura. Os ensaios em barras FRP à compressão têm mostrado que a resistência à compressão é menor do que a resistência à tração. Em geral, a resistência à compressão é maior em barras com maior resistência à tração.

O modo de ruptura pode incluir ruptura por tração transversal, força cortante ou microflambagem das fibras dentro da matriz polimérica confinante. O modo de ruptura depende do tipo de fibra, a fração volumétrica da fibra e o tipo de resina polimérica. Por essa razão, os valores experimentais precisos para a resistência à compressão são difíceis de se obter, além de dependerem da geometria do corpo de prova e do tipo de ensaio.

2.1.4.3 Resistência à Força Cortante.

Segundo o FIB Bulletin 40 (2007), tem-se que a maioria das barras FRP são relativamente frágeis sob tensões tangenciais interlaminares, onde camadas de resina sem reforço se localizam entre camadas de fibras. Usualmente não existe reforço entre essas camadas e a resistência ao cisalhamento interlaminar é governada pela relativamente frágil matriz polimérica.

As barras FRP são ortotrópicas e as suas propriedades mais relevantes ocorrem na direção das fibras. Os métodos de ensaio padronizados estão sendo desenvolvidos para caracterizar o comportamento das barras FRP à força cortante.

2.1.4.4 Aderência

O desempenho da aderência de uma barra FRP depende da configuração, processo de fabricação, propriedades mecânicas da barra propriamente e as condições ambientais, em concordância com o ACI 440.1R (2006). Quando uma barra é ancorada no concreto, a força é transferida por: adesão ou aderência química, atrito e intertravamento mecânico. A Figura 2-5 mostra duas barras FRP, cada uma com um tipo de tratamento superficial.

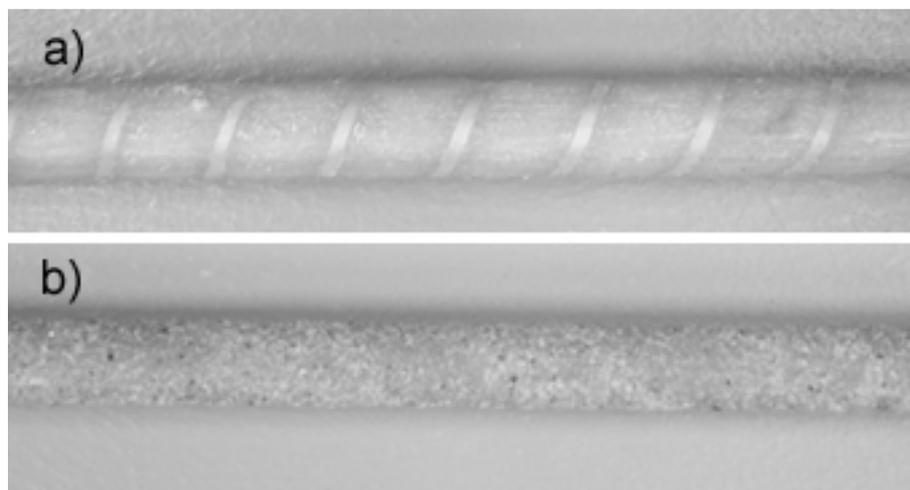


Figura 2-5: Tratamento superficial em barras de FRP: a) nervuras contornadas em espiral; b) cobertura com areia. Fonte: BANK (2006).

Quando uma barra nervurada aderida ao concreto é submetida à tensão crescente, no início a adesão ou aderência química entre a barra e o concreto ao redor dessa se perde, logo age o atrito entre as superfícies. Finalmente, as nervuras na superfície da barra geram forças de contato inclinadas entre a barra e ao redor do concreto.

A tensão resultante da força de contato entre a superfície da barra e o concreto, na direção longitudinal, pode se considerar a tensão da aderência entre a barra e o concreto. Essa propriedade mecânica, está aprofundada no capítulo 3 desta dissertação.

2.1.5 Efeitos ao longo prazo

2.1.5.1 Fluência e Relaxamento

As resinas poliméricas são materiais visco-elásticos e tipicamente apresentam conduta de fluência e relaxamento. Além disso, a adição de fibras acrescenta a resistência à fluência. Portanto, o comportamento à fluência e ao relaxamento é mais pronunciado quando o carregamento é aplicado transversalmente às fibras ou quando a fração volumétrica de fibras é baixa. As resinas termofixas têm melhor comportamento à fluência do que as termoplásticas ACI 440R (2007).

Segundo os estudos experimentais de YAMAGUCHI, KATO, *et al.* (1997), os compósitos FRP submetidos a carregamento continuado próximo da tração última de ruptura podem romper por fluência ao longo prazo, termo conhecido também como fadiga estática. Em termos gerais, as fibras de carbono são as mais resistentes à ruptura devido à fluência, as de aramida são moderadamente resistentes e as fibras de vidro as menos resistentes, mas têm-se poucos dados onde o estudo do prazo de resistência seja maior do que 100 horas.

No entanto, o mecanismo de ruptura por fluência não é exclusivamente relacionado à tensão propriamente, pois as condições ambientais de exposição alteram o tempo até a ruptura. Em ambientes secos a resistência à ruptura por fluência é superior a dos ambientes úmidos.

Os diversos ensaios de fluência foram realizados com diferentes configurações ambientais. Alguns resultados de ALWIS e BURGOYNE (2006) apresentaram redução de até 55% aos 50 anos em relação à resistência à tração em um curto prazo para barras GFRP, enquanto SCHEIBE e ROSTASY (1995) encontraram redução de 30% aos 114 anos.

Esses resultados confirmam a necessidade de métodos de ensaio padronizados para determinar conclusivamente as características da fluência e ruptura por fluência, para assim caracterizar melhor o desempenho do material.

2.1.5.2 Fadiga

A fadiga pode ser definida como a degradação na integridade do material perante a repetida aplicação de ciclos de carga e descarga. A integridade é medida pelas propriedades mecânicas do material após esses ciclos, como a perda da resistência à tração e rigidez do material, entre outros.

Segundo o ACI 440.1R (2006), foram realizados diversos ensaios sobre o comportamento à fadiga e predição de vida útil em materiais FRP para a indústria aeronáutica nos últimos 30 anos com resultados satisfatórios.

O desempenho à fadiga dos compósitos FRP depende da composição da matriz polimérica e do tipo de fibra. As fibras individuais incorporadas unidirecionalmente no compósito têm poucos defeitos. Por isso são resistentes à iniciação de fissuras. Qualquer fissura que se forme no compósito se propaga pela matriz polimérica e não pelas fibras adjacentes.

Essa característica do material impede a propagação de fissuras e contribui para o bom desempenho do compósito FRP sob fadiga. No caso do uso como armadura no concreto, é mais provável a fadiga afetar primeiro ao concreto e à aderência entre esses dois materiais, mais do que afeta o compósito FRP.

3 ADERÊNCIA CONCRETO-ARMADURA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A aderência entre o concreto e as barras de FRP é fundamental para que se tenha um comportamento próximo do concreto armado. Para garantir essa ação conjunta, suficiente aderência deve existir entre a armadura de reforço e o concreto para a correta transferência de força de um para o outro.

A aderência das barras FRP é diferente das barras nervuradas de aço. No caso das barras nervuradas de aço, a aderência surge principalmente da ação mecânica (intertravamento) das nervuras da barra contra o concreto como pode ser visualizado na Figura 3-1. Uma vez ultrapassado o limite da resistência à tração do concreto, têm-se fissuras primárias na superfície de contato. Em seguida, surgem múltiplas fissuras secundárias.

Segundo FIB Bulletin 40 (2007), no caso da armadura com barras FRP, tendo menor módulo de elasticidade e menores ondulações superficiais, a componente do atrito é maior na interação da aderência do que a componente de intertravamento mecânico. A ruptura de aderência em barras de aço ocorre por esmagamento do concreto na proximidade das nervuras, enquanto nas barras FRP ocorre parcialmente por esmagamento do concreto e danos na superfície própria da barra.

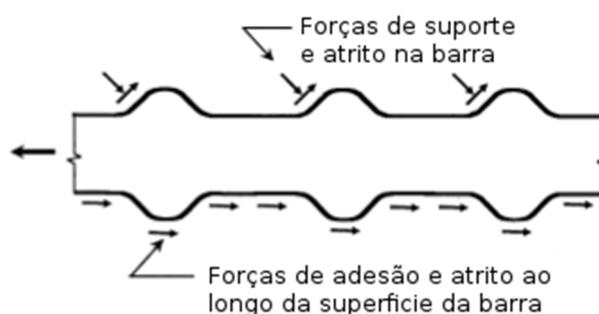


Figura 3-1: Mecanismos de transferência das tensões de aderência. Fonte: ACI 408R (2003).

3.2 NÍVEIS DE MODELAGEM DA ADERÊNCIA

As modelagens constitutivas da mecânica da aderência podem ser agrupadas em três níveis: nível macro, nível meso e nível micro. A diferença entre essas categorias é realizada dependendo, principalmente, das dimensões do volume de controle sob estudo. Na Figura 3-2, observa-se a hierarquia dos níveis de modelagem da aderência. Quando se estuda o comportamento das diferentes partes da interface de contato concreto-armadura, tem-se a análise de nível micro. Quando se estuda o comportamento da aderência de um elemento estrutural em uma escala global, tem-se de nível macro.

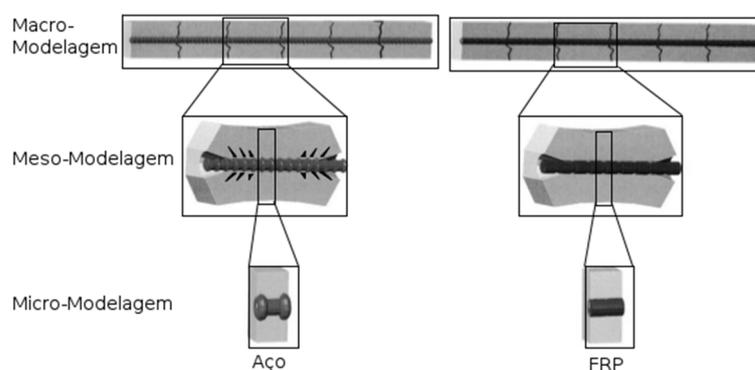


Figura 3-2: Hierarquia das modelagens de aderência para barras de aço e FRP. Fonte: FIB Bulletin 40 (2007).

O volume de controle para ensaios de aderência como o *Direct Pull-Out* ou o *Direct Tension Pull-Out (DTPO)*, entre outros, não se encaixa nos extremos micro e macro de modelagem analítica. Assim, os resultados dos ensaios de arrancamento DPO, que são o maior foco desta dissertação, formam parte do nível meso de modelagem analítica de acordo com o observado na Figura 3-2.

3.2.1 Efeito de acréscimo da rigidez à face da tensão de aderência

É importante analisar o comportamento global (nível macro de modelagem) das tensões de aderência de um elemento estrutural. O acréscimo da rigidez da peça à face da tensão de

aderência é a capacidade do concreto em resistir as tensões entre as fissuras, e ter acréscimo de rigidez sob tração. Trata-se da resposta global ante um fenômeno local.

Esse fenômeno depende da aderência entre o concreto e a armadura e da tensão tangencial, sendo importante para determinar a resposta estrutural especialmente no carregamento de serviço. O ensaio de tração direta DTPO é o melhor modo de estudar a influência dos diferentes parâmetros no efeito do acréscimo da rigidez da peça à face da tensão de aderência, conforme ilustra-se na Figura 3-3.

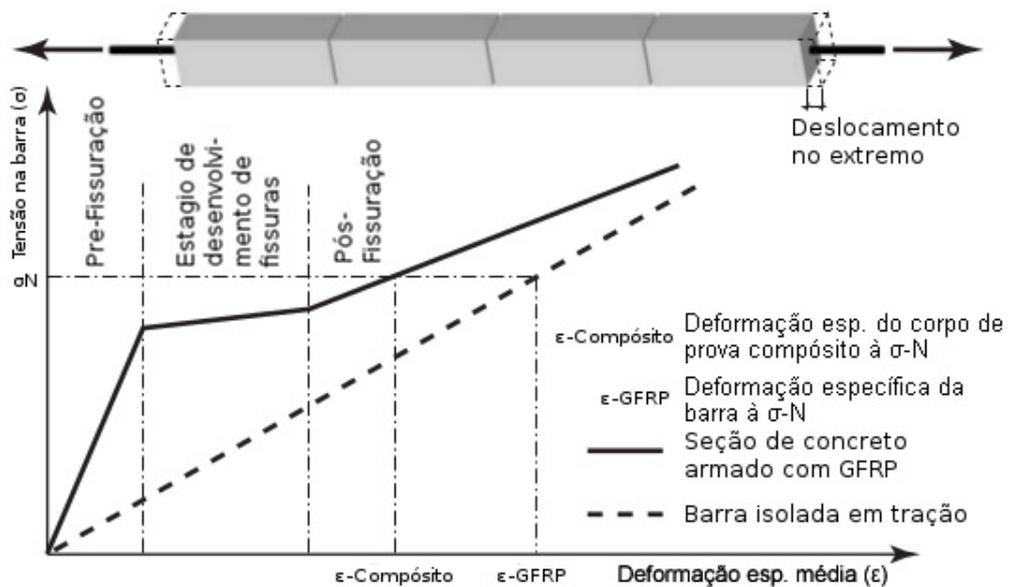


Figura 3-3: Representação do comportamento da tensão na barra GFRP vs. deformação específica. Fonte: FIB Bulletin 40 (2007).

No modelo de SOORIYAARACHCHI, PILAKOUTAS e BYARS (2005), existem três inclinações diferentes na curva da tensão na barra vs. deformação específica: o estágio prévio à fissuração do concreto, o estágio de desenvolvimento das fissuras e o estágio de fissuração total do concreto ao redor da armadura.

Nesse acréscimo da rigidez da peça observa-se que os fatores que incrementam ou o reduzem são, principalmente, a taxa de armadura e a resistência do concreto. Uma taxa de armadura menor induz um maior efeito, do mesmo modo uma maior resistência à compressão

do concreto torna maior esse efeito. Verificou-se que o diâmetro das barras da armadura pode alterar esse efeito, mas com uma contribuição menor.

3.3 MECÂNICA DA ADERÊNCIA

3.3.1 Interação entre o Concreto e a Armadura

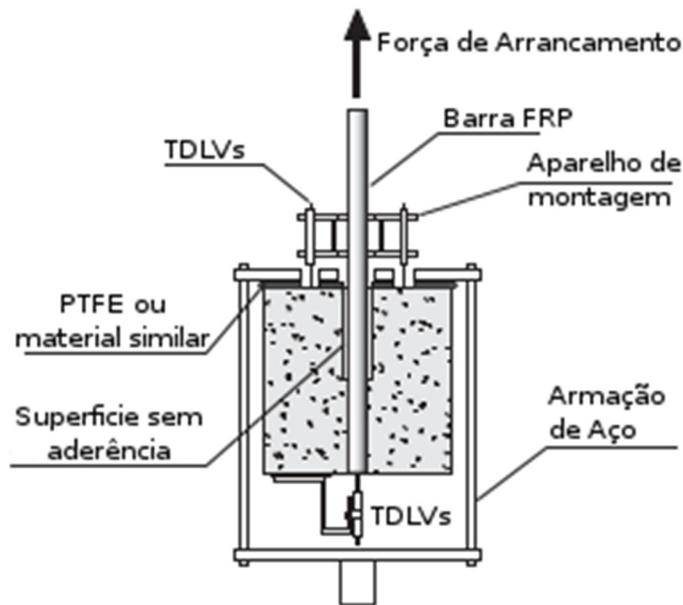


Figura 3-4: Arranjo típico do ensaio de arrancamento direto ou *Direct Pull-Out, DPO*.

A interação entre a armadura e o concreto é descrita pela curva da resposta do ensaio de arrancamento direto (ver Figura 3-5), para elementos com curto comprimento de aderência, onde se avalia a tensão da aderência *versus* o deslizamento da barra no extremo carregado.

A curva desse ensaio é mostrada na Figura 3-5, na qual se tem os diferentes estágios e os possíveis modos de ruptura.

A adesão físico-química tem menor magnitude. Esse fato é confirmado pelo baixo desempenho de aderência das barras lisas (sem nervuras), na qual existe uma abrupta queda na resistência de aderência logo após da quebra da adesão química. A ruptura se produz por arrancamento súbito da barra.

Na próxima etapa da curva, estágio II, quando a tensão de aderência aumenta ($\tau > \tau_1$), pode-se observar que a adesão química é vencida e a componente do atrito desempenha uma maior função. Começam aparecer microfissuras transversais no topo das nervuras como efeito secundário da reação induzida no concreto pela compressão gerada pelas nervuras das barras, permitindo certo deslizamento.

Ainda que nesse estágio surjam microfissurações e se observa certo deslizamento da barra, a ação do efeito de cunha das nervuras permanece limitada e não existe fendilhamento ou esmagamento do concreto.

No estágio III, quando a tensão de aderência continua aumentando ($\tau > \tau_{1-3}$), as fissuras longitudinais se espalham radialmente e ao longo da barra devido à ação do efeito de cunha o qual ocorre no concreto esmagado, mas preso na frente das nervuras, como ilustra a Figura 3-7. Essa componente da força nas nervuras é resistida pelas tensões circundantes no concreto ao redor da barra. A tensão máxima de aderência é então garantida principalmente pelo intertravamento mecânico das nervuras e a reação do concreto ao redor da barra.

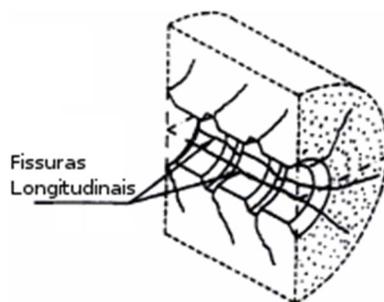


Figura 3-7: Fissuras transversais, longitudinais e fendilhamento. Fonte: FIB Bulletin 10 (2000).

O último estágio da curva mostra o modo de ruptura por aderência, o qual varia de acordo com os fatores influentes na tensão de aderência, sejam esses pelas características estruturais do elemento em estudo, pelas propriedades da barra de armadura ou pelas propriedades do concreto circundante.

No caso de barras lisas (sem nervuras), há uma queda abrupta da curva (estágio IVa), pois a barra rompe por arrancamento assim que é perdida a aderência por adesão química descrita no estágio I.

Para barras com conformações superficiais (nervuras) se observa a existência de tensão residual e os estágios IVb e IVc caracterizam esse comportamento. Nos casos onde as barras estão sob confinamento sem armadura transversal, ou onde o cobrimento de concreto é baixo (estágio IVb), as fissuras longitudinais ocorrem através do cobrimento do concreto e a aderência cai abruptamente, constituindo assim o modo de ruptura por fendilhamento.

Se a barra está confinada com armadura transversal, ou onde o cobrimento de concreto é suficiente (estágio IVc), as fissuras longitudinais ou transversais não ultrapassam o cobrimento ou essas são inibidas pela armadura transversal. Neste caso a ruptura ocorre por arrancamento.

3.3.2 Modos de Ruptura

Ainda que de um modo geral a ruptura da aderência armadura-concreto possa se agrupar em dois tipos, isto é, ruptura por arrancamento da barra e ruptura por fendilhamento do cobrimento de concreto, para o caso da armadura FRP observa-se pelo menos três diferentes tipos, segundo os ensaios experimentais, TEPFERS e DELORENZIS (2003).

Na Figura 3-8 observa-se, por exemplo, na curva (a) uma forte queda da tensão de aderência pós-pico sem fendilhamento; na curva (b) um comportamento pós-pico moderado e na curva (c) ruptura por fendilhamento. Na ruptura por fendilhamento, tem-se dois subtipos:

ruptura induzida por fissura do cobrimento e ruptura por cisão do cobrimento de concreto, como se observa na Figura 3-9.

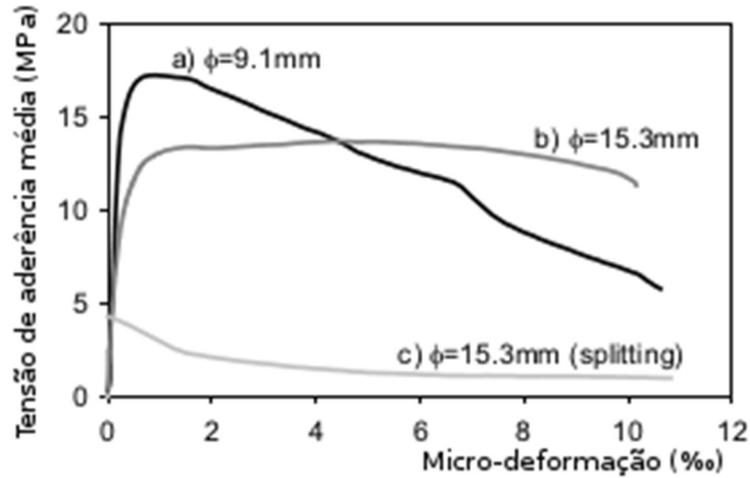


Figura 3-8: Resultados típicos do ensaio de arrancamento direto barras FRP. Fonte: FIB Bulletin 40 (2007).

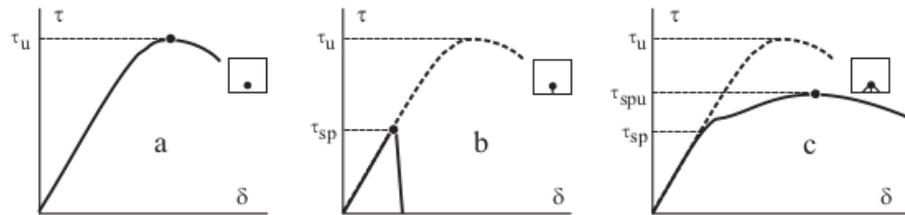


Figura 3-9: Curvas de tensão-deformação para três tipos de ruptura de barras FRP: a) ruptura da interface de aderência (arrancamento); b) ruptura por fendilhamento induzido por fissura do cobrimento; c) ruptura por cisão do cobrimento de concreto (fendilhamento). Fonte: TEPFERS e DELORENZIS (2003).

No caso das barras FRP verifica-se que geralmente há ruptura da aderência por uma combinação de razões devido às interações entre a matriz polimérica e as fibras do compósito. Na Figura 3-10 tem-se a distribuição das tensões normais em uma barra FRP submetida à tração axial.



Figura 3-10: Distribuição normal de tensões em uma barra FRP submetida à tração axial. Fonte: ACHILLIDES e PILAKOUTAS (2004).

Os modos de ruptura para barras FRP podem se resumir à continuação de acordo com o FIB Bulletin 40 (2007).

- Cisalhamento de parte ou todas as nervuras superficiais da barra

A tensão máxima de aderência de barras FRP nesse modo de ruptura não é controlada pela resistência do concreto, mas sim pela resistência ao cisalhamento interlaminar entre camadas de fibras ou pela resistência ao cisalhamento das nervuras da barra. Por conseguinte, ao contrário de barras de aço, um incremento na resistência do concreto não será acompanhado por um correspondente incremento da resistência de aderência da barra FRP. Nesse tipo de ruptura observa-se a maior tensão de resistência de uma barra, porém o comportamento pós-pico é caracterizado pela perda repentina da tensão de aderência. Este comportamento característico pode ser observado na curva (a) da Figura 3-8.

- Cisalhamento do concreto

Com a ruptura ocorrendo no concreto, esse modo de ruptura é semelhante àquele do concreto com barras nervuradas de aço. O concreto é esmagado na frente das nervuras da barra e a tensão de aderência é controlada principalmente pela resistência ao cisalhamento do concreto. No intuito de desenvolver fissuras de cisalhamento que penetrem no concreto (microfissuração), elevado intertravamento mecânico e aderência precisam se desenvolver e é

improvável que este seja o modo dominante de ruptura para barras FRP com baixa rigidez na direção radial.

- Arrancamento por compressão radial

A barra pode se comprimir radialmente devido à sua baixa rigidez na direção radial. A tensão de aderência provém do atrito devido às nervuras da barra no concreto ao redor. Nesse caso, a aderência é muito mais dúctil e a tensão de aderência máxima desenvolvida pode ser bastante significativa dependendo da geometria das nervuras da barra, da rigidez radial da barra e da quantidade de confinamento de concreto.

- Modo combinado

Devido à conformação superficial das barras FRP, qualquer combinação dos modos de ruptura mencionados acima pode ser mais uma possibilidade de modo de ruptura. Na Figura 3-11 se observa uma faixa de ruptura da aderência dentro da qual este fenômeno mostra-se factível.



Figura 3-11: Interfaces de ruptura na superfície da barra FRP. Fonte: ACHILLIDES e PILAKOUTAS (2004).

3.3.3 Resistência ao fendilhamento do concreto circundante

Ainda que a aderência das barras FRP nervuradas em condições de confinamento seja boa em termos gerais, ou tão boa quanto à do aço, o cobrimento do concreto deve ser prescrito

não somente por critérios de durabilidade, mas também pela resistência ao fendilhamento do concreto circundante.

O módulo de elasticidade da barra FRP pode influenciar a resistência ao cisalhamento do concreto ao mudar o ângulo α das forças diagonais de reação.

No intuito de prever a capacidade das ancoragens curtas e para descrever a matriz de fissuras de fendilhamento e o efeito do anel de força no cobrimento do concreto, uma teoria em direta analogia à pressão hidráulica foi desenvolvida por TEPFERS (1973), a qual ainda hoje é amplamente utilizada.

Na Figura 3-12 tem-se esse efeito, no qual a tensão de aderência gerada pelas forças forma um cone de ângulo α , cujo valor está relacionado ao módulo de elasticidade da barra tracionada.

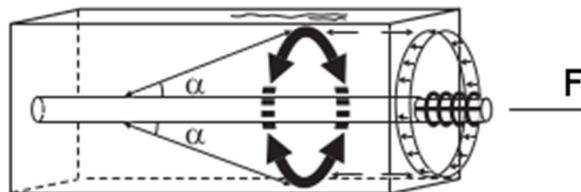


Figura 3-12: Representação esquemática das componentes radiais das forças de aderência no concreto na zona de ancoragem. Fonte: TEPFERS (1973).

A aderência gera tensões de cisalhamento ao longo da barra. Quando a resistência ao cisalhamento é alta e as tensões de tração geradas pelo cisalhamento alcançam a resistência à tração do concreto, então surgem fissuras radiais e longitudinais. Nesse local, as forças de fendilhamento surgem na superfície da barra as quais são contrapostas aos aros de força do concreto ao redor da barra.

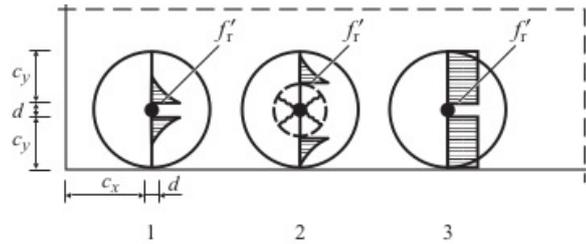


Figura 3-13: Distribuição das tensões de tração no estágio elástico (1), parcialmente fissurado – elástico (2) e plástico (3). Fonte: TEPFERS e DELORENZIS (2003).

Na maioria das estruturas, as barras têm um cobrimento entre 20 mm e 50 mm. Para essas barras a ruptura da aderência ocorre por fendilhamento do cobrimento de concreto. As barras menos confinadas têm um cobrimento c_x e c_y (ver Figura 3-13) na quina de uma seção transversal. E são essas as que formam a base para a estimativa dos valores de fendilhamento.

3.4 RELAÇÃO LOCAL DE TENSÃO DE ADERÊNCIA VS. DESLIZAMENTO

Na atualidade existem vários modelos teóricos para a representação da tensão de aderência vs. deslizamento para barras de armadura de concreto. O modelo mais conhecido e comumente usado na análise da aderência para as estruturas tradicionais de concreto armado com barras de aço é o modelo BEP, proposto por Bertero, Elighausen e Popov (BEP) e desenvolvida em 1983. Esse modelo foi adotado pelo FIB Bulletin 65 (2012) e continua sendo utilizado até hoje.

Para armadura com barras FRP uma modificação foi proposta por COSENZA, MANFREDI e REALFONSO (1997) por meio da calibração de parâmetros obtidos experimentalmente, sendo conhecido como o modelo modificado BEP ou mBEP. Além disso, COSENZA, MANFREDI e REALFONSO (1997) desenvolveram uma proposta própria alternativa, o modelo CMR, porém esse modelo é somente para o ramo ascendente da relação $\tau = \tau(S)$.

Outro modelo teórico importante para se considerar é o desenvolvido por MALVAR em 1994 para a curva monotônica da tensão de aderência vs. deslizamento, baseado também na calibração das variáveis segundo resultados obtidos experimentalmente.

3.4.1 Modelo Bertero, Elighausen e Popov (BEP)

Sob condições de aderência bem definidas, o modelo estabelece quatro estágios em função do deslizamento S entre a barra nervurada de aço e o concreto confinante. As expressões 3-1 à 3-4 descrevem a relação $\tau = \tau(s)$ para cada estágio.

$$\tau(s) = \tau_{max}(s/s_1)^\alpha \quad \text{para } 0 \leq s \leq s_2 \quad (3-1)$$

$$\tau(s) = \tau_{max} \quad \text{para } s_1 < s \leq s_2 \quad (3-2)$$

$$\tau(s) = \tau_{max} - (\tau_{max} - \tau_f) \left(\frac{s-s_2}{s_3-s_2} \right) \quad \text{para } s_2 < s \leq s_3 \quad (3-3)$$

$$\tau(s) = \tau_f \quad \text{para } s_3 < s \quad (3-4)$$

Os parâmetros para a tensão de aderência τ_{max} e τ_f , assim como os valores de s_1 , s_2 e s_3 são definidos segundo as condições de confinamento do concreto, quantidade de cobrimento, espaçamento entre barras, e resistência à compressão do concreto. A curva definida pelo o modelo BEP se observa na Figura 3-14.

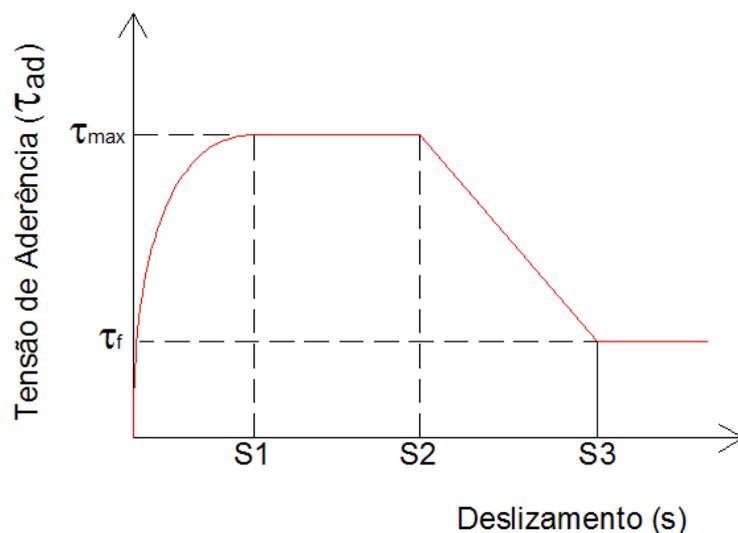


Figura 3-14: Relação analítica do modelo BEP da tensão de aderência τ e deslizamento s . Carregamento monotônico. Fonte: FIB Bulletin 65 (2012)

Na Tabela 3-1 se mostram os parâmetros para ruptura da aderência por arrancamento. Como boa aderência o cobrimento do concreto deve ser maior a 5 vezes o diâmetro da barra e o espaçamento entre barras maiores a 10 vezes o diâmetro da barra.

Tabela 3-1: Parâmetros para a definição da relação da tensão de aderência τ e deslizamento s para barras de aço nervuradas.

Condições Aderência	τ_{max}	s_1	s_2	s_3	α	τ_f
Boa	$2,5\sqrt{f_{ck}}$	1mm	2mm	d_{nv}	0,4	$0,4 \tau_{max}$
Resto	$1,25\sqrt{f_{ck}}$	1,8mm	3,6mm	d_{nv}	0,4	$0,4 \tau_{max}$

Fonte: FIB Bulletin 65 (2012)

A resistência à compressão característica do concreto f_{ck} é tomada em consideração, e o valor de deslizamento $s_3 = d_{nv}$ é o espaçamento entre nervuras da barra de aço. O modelo analítico BEP foi adotado pelo *Model Code* 1990 da CEB-FIP para a análise da aderência de barras de aço e ratificado posteriormente no FIB Bulletin 65 (2012).

3.4.2 Modelo modificado Bertero, Elighausen e Popov (mBEP)

Para avaliar o comportamento da aderência entre as barras FRP e o concreto usando o modelo BEP, as variáveis consideradas foram a conformação superficial e diâmetro das barras, tipo de fibra e resistência à compressão do concreto, entre outras. Devido à alta variabilidade entre resultados experimentais e analíticos, Cosenza (1997) propôs uma modificação na qual suprimiu o segundo estágio de tensão máxima de aderência constante, ficando um modelo somente de três estágios, um ramo ascendente, um descendente e um de tensão final da aderência constante.

Além disso, os parâmetros do modelo devem ser configurados segundo o tipo específico de barra FRP. As expressões para os diferentes estágios se mostram da 3-5 à 3-7, esses mantêm semelhança com o modelo original BEP, porém a tensão máxima da aderência é obtida da média dos resultados experimentais e recalibradas no modelo teórico.

$$\tau(s) = \tau_u (s/s_u)^\alpha \quad \text{para } 0 \leq s \leq s_u \quad (3-5)$$

$$\tau(s) = \tau_u - (\tau_u - \tau_f) \left(\frac{s-s_u}{s_f-s_u} \right) \quad \text{para } s_u < s \leq s_f \quad (3-6)$$

$$\tau(s) = \tau_f \quad \text{para } s_f < s \quad (3-7)$$

Na Figura 3-15 se observa a curva teórica do modelo de três estágios para barras FRP.

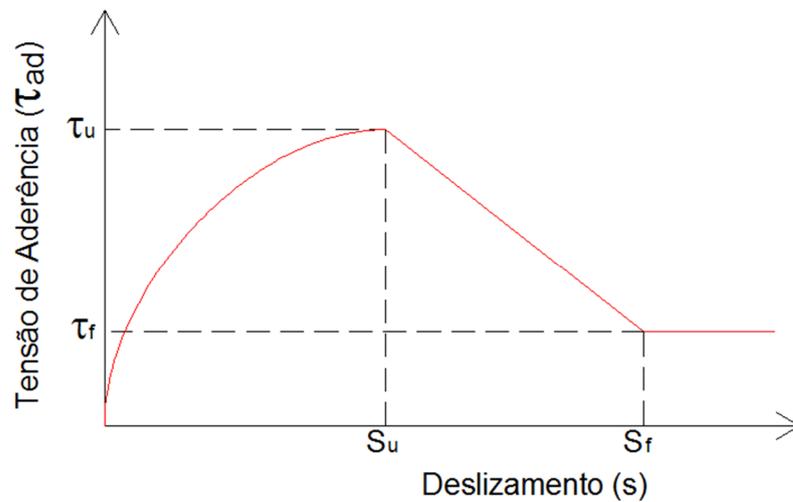


Figura 3-15: Curva teórica de três estágios da relação da tensão de aderência e deslizamento, entre barras FRP e o concreto. Fonte: FIB Bulletin 65 (2012)

3.4.3 Modelo Cosenza-Manfredi-Realfonso (CMR)

Baseados na curva de tres estagios do modelo mBEP, COSENZA, MANFREDI e REALFONSO (1997) propuseram uma alternativa própria para o ramo ascendente da curva. Na expressão 3-8 se observa a relação $\tau = \tau(s)$ denominada modelo CMR.

$$\tau = \tau_m \cdot \left(1 - e^{\frac{-s}{s_r}}\right)^\beta \quad (3-8)$$

Essa expressão para o ramo ascendente da curva tem como parâmetros incógnitos τ_m , s_r e β , cujos valores devem ser determinados por calibração experimental.

3.4.4 Modelo Malvar

Outro modelo analítico da relação local tensão de aderência τ e deslizamento s para o ramo ascendente da curva foi proposto por Malvar (1994). Neste estudo foram avaliadas barras GFRP com fibra E-Glass. A proposta é baseada também na curva de três estágios. Na expressão 3-9 se observa a proposta.

$$\tau(s) = \tau_u \left[\frac{F \left(\frac{s}{s_u} \right) + (G - 1) \left(\frac{s}{s_u} \right)^2}{1 + (F - 2) \left(\frac{s}{s_u} \right) + G \left(\frac{s}{s_u} \right)^2} \right] \quad (3-9)$$

Nesta proposta os parâmetros F e G deben ser recalibrados segundo resultados experimentais e determinam o comportamento da aderência para cada tipo específico de barra GFRP.

3.5 FATORES QUE INFLUENCIAM A ADERÊNCIA

Muitos fatores determinam a aderência entre o concreto e as armaduras. Além dos fatores próprios dos materiais envolvidos diretamente, existem fatores de condições de exposição ambiental e de tempo que também devem ser considerados no estudo da aderência, especialmente considerando-se armadura sintética FRP.

Segundo a norma ABNT NBR 6118 (2014), item 9.3, das verificações de aderência do comportamento conjunto dos materiais concreto e aço, tem-se a expressão 3-10 para a resistência de aderência de cálculo, na qual o coeficiente η_1 varia segundo o tipo de conformação superficial das barras (lisas, entalhadas ou nervuradas), o coeficiente η_2 depende da posição da barra e da direção da concretagem, e o coeficiente η_3 é função do diâmetro da barra e o termo f_{cta} é a resistência de cálculo à tração do concreto:

$$f_{bd} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 f_{ctd} \quad (3-10)$$

Em relação à armadura FRP uma expressão similar (3-11) foi desenvolvida por TEPFERS (2006), que estabeleceu que os coeficientes η_1, η_2, η_3 devem ser determinados por ensaios para cada diferente tipo de barras FRP. Ainda acrescenta que os coeficientes k_D e k_T modificam o comportamento da aderência segundo a durabilidade ao longo do tempo e a influência da temperatura, respectivamente:

$$f_{bd} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 k_D k_T f_{ctd} \quad (3-11)$$

Considerando-se as questões expostas os fatores que influenciam o comportamento da aderência podem ser divididos em três categorias principais a seguir descritas: 1) características estruturais, 2) propriedades da barra, 3) propriedades do concreto.

3.5.1 Características Estruturais

3.5.1.1 Cobrimento de concreto e espaçamento entre barras

De acordo com as prescrições do ACI 408R (2003) a relação entre a tensão de aderência e o deslizamento é afetada pelo cobrimento e o espaçamento entre barras. A curva torna-se mais acentuada à medida que o cobrimento e o espaçamento entre barras aumentam.

O modo de ruptura também depende desse espaçamento. Para maiores valores de espaçamento é possível se ter ruptura por arrancamento, enquanto para menores valores ocorre a ruptura por fendilhamento, resultando em menores valores de tensão máxima de aderência.

A região resistente do concreto é limitada por um círculo de raio igual ao menor cobrimento ou a metade do espaçamento entre as barras. Observa-se, na Figura 3-18, que se o

cobrimento do concreto for menor do que o cobrimento ou espaçamento entre barras $c_b < c_s$, a ruptura ocorre por fissuração até a superfície livre. Porém, se o cobrimento for maior do que o espaçamento entre barras $c_b > c_s$ ocorre uma fissuração entre as barras.

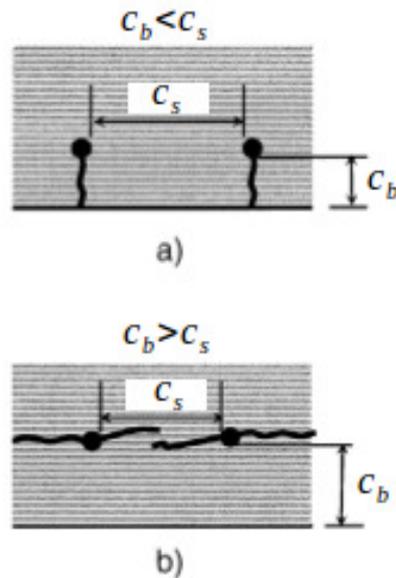


Figura 3-16: Fissuras de aderência: a) cobrimento inferior menor do que espaçamento entre barras; b) espaçamento entre barras maior do que cobrimento inferior. Fonte: ACI 408R (2003).

3.5.1.2 Comprimento de Aderência, de Emenda e de Ancoragem

Um aumento no comprimento de aderência ou o comprimento de emendas por traspasse de uma barra no concreto incrementa a sua resistência por aderência. No decorrer da ruptura por aderência, observa-se um aumento na resistência, que não é proporcional ao incremento do comprimento de ancoragem.

A razão desse comportamento é devido às forças de aderência não serem uniformes ao longo da barra. Nas Figuras 3-19-c e 3-19-d observa-se como a ruptura da aderência tende a aumentar, começando pela região com maior força de aderência por unidade de comprimento. No caso de barras emendadas o fendilhamento começa pelos extremos da emenda se deslocando até o centro.

A ancoragem de barras dobradas ou curvadas é afetada pela mudança de direção na dobragem, o que leva à concentração de tensões laterais e, portanto, menor resistência axial, FIB Bulletin 10 (2000). A resistência da barra na dobragem é dependente da forma como a dobragem é executada. Em barras com nervuras em espiral de resinas termoplásticas é possível que exista flambagem nas fibras internas da barra e rompimento nas fibras externas.

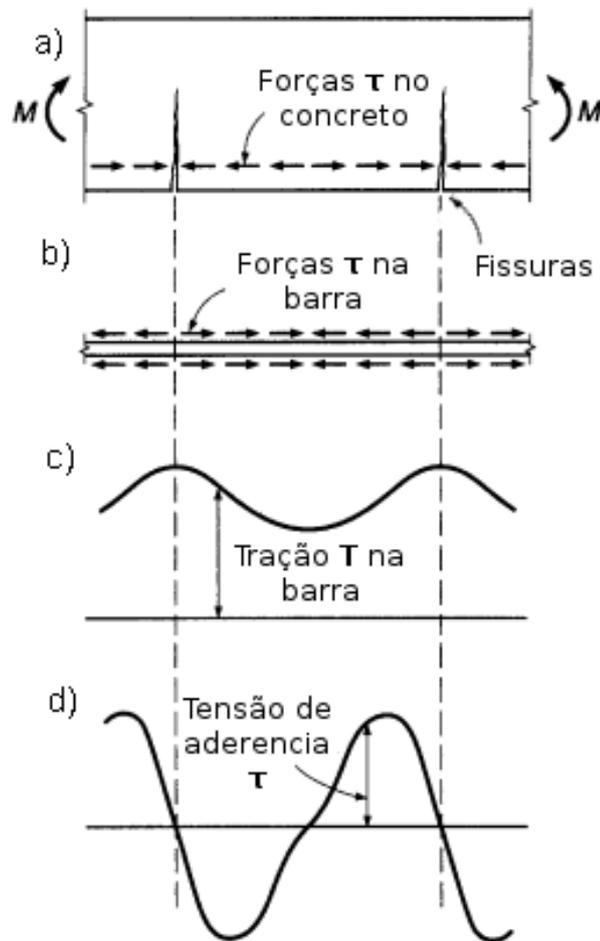


Figura 3-17: Variação da aderência em uma viga de concreto armado sob flexão pura: a) segmento de concreto fissurado; b) forças de aderência atuando na barra de reforço; c) variação da força de tração na barra; d) variação da força de aderência na barra. Fonte: NILSON, DARWIN e DOLAN (2010).

3.5.1.3 Armadura transversal e efeito de confinamento

A armadura transversal confina as barras de modo a tornar eficaz o comprimento de ancoragem ao limitar a progressão das fissuras de fendilhamento, e incrementando as tensões

de aderência requeridas para causar a ruptura, ACI 408R (2003). Um aumento da armadura transversal produz um incremento na força de aderência, convertendo uma ruptura por fendilhamento em uma ruptura por arrancamento. A armadura transversal adicional àquela necessária para levar à transição da ruptura por fendilhamento para a de arrancamento tornar-se progressivamente menos efetiva.

ACHILLIDES (1998) explicou que a armadura transversal pode melhorar a resistência ao fendilhamento do concreto ao redor da barra somente quando essas forem pré-tracionadas, como por exemplo, na região sob força cortante máxima no extremo de uma viga bi-apoiada.

O início das fissuras de fendilhamento não aparenta ser influenciado pela presença de armadura transversal, devido à baixa deformação na qual fissuras de tração são formadas no concreto. Porém, logo após o início dessas fissuras, a armadura transversal detém a sua propagação e contém o seu ulterior alargamento, dessa forma contribuindo com a tensão de aderência das barras.

3.5.1.4 Posição da barra e direção da concretagem

No caso de barras de aço é bem conhecida a influência da posição da barra durante a concretagem. Segundo a norma ABNT NBR 6118 (2014), existem duas condições de aderência de acordo com a posição da barra e a direção da concretagem: boa e má aderência.

Barras em posição vertical ou com inclinação maior do que 45° sobre a horizontal apresentam boa aderência. Para barras em posição horizontal haverá boa aderência em dois casos:

- elementos estruturais de altura h menor de 60 cm ($h < 60$ cm), barra posicionada no máximo 30 cm acima da face inferior;
- elementos estruturais de altura h maior ou igual de 60 cm ($h \geq 60$ cm), barra posicionada no mínimo 30 cm embaixo da face superior;

Para os demais casos, é considerada região de má aderência. Na Figura 3-18 se observam as regiões de boa e má aderência.

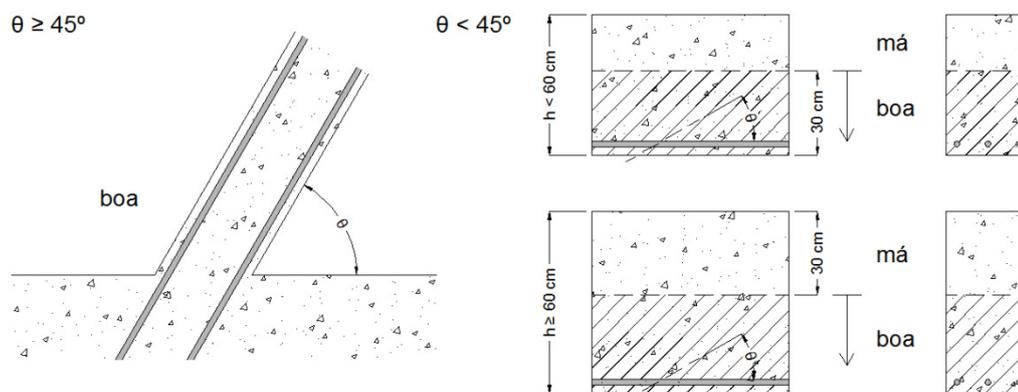


Figura 3-18: Regiões de boa e má aderência segundo ABNT NBR 6118 (2014).

Assim, o coeficiente η_2 da Expressão 3-7 muda o seu valor de $\eta_2 = 1$ para casos de boa aderência de $\eta_2 = 0,7$ para casos de má aderência. A razão dessa influência é devido ao adensamento do concreto na parte inferior do elemento estrutural. Do mesmo modo, na parte superior, se acumula maior quantidade de água de exsudação. Esse comportamento é similar para casos de armadura de FRP, embora a recomendação seja de avaliar e quantificar a influência de cada tipo barra FRP, considerando-se a grande variabilidade nas conformações superficiais.

3.5.2 Propriedades da barra

3.5.2.1 Características físicas

- Conformação Superficial

A forma da seção transversal determina a área da aderência e, portanto, afeta o comportamento da aderência. No estudo realizado por ACHILLIDES (1998), e referenciado no FIB Bulletin 10 (2000), observou-se que barras de seção transversal quadrada desenvolveram

maior tensão máxima à aderência devido ao efeito de cunha das bordas retas. Contudo, as barras planas geram maior força de fendilhamento no plano de ancoragem quando comparadas com as barras de seção transversal circular.

No entanto, as armaduras mais comuns são barras de seção transversal circular. Nesse caso, segundo a norma ABNT NBR 6118 (2014), por exemplo, se têm três tipos de conformação superficial: barras lisas, barras entalhadas e barras nervuradas. Na Expressão 3-7, o coeficiente η_1 varia de valor segundo esses três tipos.

Para barras lisas, o valor do coeficiente η_1 é 1,00; no caso de barras entalhadas, o coeficiente η_1 é 1,40 e, finalmente, para barras nervuradas, as mais comuns no concreto armado, o coeficiente η_1 é 2,25. Esses valores normativos são para barras de aço.

Na norma ABNT NBR 7480 (2007) está especificado o critério geométrico para as nervuras das barras de aço. Por exemplo, as barras devem ter pelo menos duas nervuras longitudinais diametralmente opostas. As nervuras transversais devem estar inclinadas 45° e ter espaçamento entre 0,5 e 0,8 vezes o diâmetro da barra.

Para barras de FRP, as conformações superficiais são mais diversas e não se tem ainda um padrão desenvolvido e aceito pelos fabricantes para unificar esse critério. As nervuras podem consistir somente de resinas poliméricas, de resinas reforçadas com fibra ou com um contorno em espiral com um filamento fibroso separado.

A inclinação e dimensão das nervuras superficiais determinam não somente a intensidade do intertravamento mecânico, mas também a intensidade das forças de fendilhamento. Por exemplo, embora as barras com grandes nervuras forneçam maior tensão máxima de aderência sob condições de confinamento total, elas apresentam tendência ainda maior a causar ruptura por fendilhamento e, portanto, menor tensão máxima de aderência do que as barras com revestimento arenoso.

- Diâmetro

No caso de barras de aço a norma ABNT NBR 6118 (2014) considera o diâmetro da barra um fator influente, cujo coeficiente varia se a barra tem diâmetro maior do que 32 mm, no qual o valor desse coeficiente diminui enquanto o diâmetro da barra aumenta.

Para um determinado comprimento de aderência, barras maiores requerem maiores forças para causar uma ruptura, seja por arrancamento ou fendilhamento. A força de aderência na ruptura aumenta mais lentamente do que a área da barra, o que significa que um maior comprimento de aderência é necessário para uma barra maior.

O resultado é que a força total desenvolvida na ruptura por aderência é não somente uma função crescente do cobrimento do concreto, espaçamento e comprimento de aderência, mas também de área da barra, de acordo com as pesquisas realizadas por DARWIN, THOLEN *et al.* (1995).

Quando avaliadas em termos de tensão de aderência, as barras menores mostram ter ainda maior vantagem. Assim, é desejável usar um maior número de barras de menor área ao invés de um número menor de barras de maior área.

3.5.2.2 Propriedades Mecânicas e Efeito Poisson

No caso da armadura de barras de aço, deve-se limitar a tensão ao limite de escoamento, antes que seja alcançada a tensão máxima de aderência. Demonstrou-se que a diferença entre a resistência de aderência e limite de escoamento menor é desprezível quando não há confinamento transversal, e até superior em 10% quando existe confinamento transversal.

Segundo ACHILLIDES (1998), o módulo de elasticidade longitudinal das barras desempenha um papel importante na tensão máxima de aderência. A deformabilidade da armadura determina a geometria das fissuras, o seu espaçamento e largura, e afeta a

transferência das tensões tangenciais no concreto ao longo das fissuras. Demonstrou-se que esses fatores influenciam a tendência última ao fendilhamento do concreto. Em barras com menor módulo de elasticidade, como as barras GFRP, observou-se o desenvolvimento de maior tendência ao fendilhamento e menor tensão de resistência da aderência do que nas barras com maior módulo de elasticidade, como as barras de CFRP.

O módulo de elasticidade na direção transversal à barra influencia também a tendência ao fendilhamento das barras FRP. Segundo TEPFERS e DELORENZIS (2003), certos tipos de barras FRP apresentam maior resistência de aderência do que a das correspondentes barras de aço. A razão é provavelmente pelo fato de que o módulo de elasticidade transversal das barras FRP é menor do que o do concreto. Portanto, como as barras FRP são mais comprimíveis do que as barras de aço, as nervuras das barras FRP não geram tantas concentrações de tensão no concreto quanto às barras de aço. Como resultado, certos tipos de barras FRP podem apresentar menor tendência ao fendilhamento do cobrimento de concreto, e assim maior resistência ao fendilhamento do que a das barras de aço.

Para a maioria dos materiais FRP, o valor do coeficiente Poisson é aproximadamente o mesmo do que o do aço. Contudo, as barras FRP mostram comportamento elástico até a ruptura sem escoamento e podem apresentar altas deformações longitudinais. Portanto, a deformação transversal das barras FRP é maior do que a das barras de aço, afetando desse modo o comportamento da aderência. Tais observações constam de FIB Bulletin 10 (2000).

3.5.3 Propriedades do Concreto

3.5.3.1 Resistências à Compressão e à Tração

Para a armadura de barras de aço, na maioria das expressões de resistência de aderência, o valor é proporcional à resistência à compressão do concreto. Na norma ABNT NBR 6118 (2014) constata-se esse fato: a resistência à tração do concreto tem influência direta, pois é função da resistência à compressão.

Segundo o ACI 408R (2003), essas previsões são válidas até uma resistência à compressão de 55 MPa. Acima desse valor, observa-se que enquanto a resistência à compressão do concreto aumenta, a resistência de aderência aumenta a uma taxa progressivamente menor, cujo valor é representado por uma potência do valor da resistência à compressão f_c do concreto, variando entre $1/4$ e $3/4$ ($f_c^{1/4}$ e $f_c^{3/4}$).

Em relação à armadura FRP, no FIB Bulletin 10 (2000) tem-se que efetivamente a resistência do cobrimento de concreto está diretamente relacionada ao modo atual de ruptura da aderência durante o arrancamento da barra.

O valor da resistência do concreto, em relação à resistência ao cisalhamento das nervuras superficiais da barra, afeta o modo de ruptura da aderência das barras FRP. A Figura 3-19 mostra o efeito da resistência do concreto na resistência de aderência de dois tipos de barras (GFRP e CFRP). Para concretos com resistência à tração maior do que 30 MPa, a interface da ruptura da aderência acontece na superfície da barra FRP.

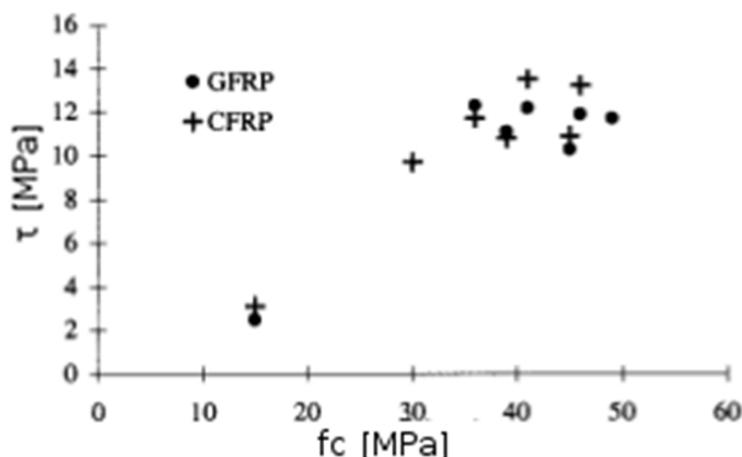


Figura 3-19: Influência da resistência à compressão do concreto na tensão de aderência τ para barras FRP. Fonte: ACHILLIDES e PILAKOUTAS (2004).

A resistência de aderência das barras FRP não depende do valor da resistência à compressão do concreto quando esse tiver resistência superior à 30 MPa. Do mesmo modo, para menores valores de resistência à compressão, ao redor dos 15 MPa, o modo de ruptura é

diferente. A interface da ruptura por aderência ocorre na matriz do concreto e o comportamento de aderência da barra é diretamente relacionado à resistência à compressão do concreto.

3.5.4 Temperatura, Fatores Ambientais e Efeitos a Longo Prazo

Segundo o FIB Bulletin 10 (2000), as diferenças da dilatação térmica entre a barra de FRP e o concreto, especialmente na direção transversal podem afetar a aderência. Uma dilatação térmica transversal muito alta da barra FRP pode gerar fissuras de fendilhamento no revestimento de concreto ao redor da barra. Contudo, as barras FRP são transversalmente flexíveis o suficiente para não causar fendilhamento do revestimento de concreto quando estas tentam se expandir. A dilatação térmica lateral pode também ser neutralizada pela contração do efeito Poisson das barras tensionadas. A diferença do alongamento térmico entre concreto e barras FRP é também desprezível quando a superfície das nervuras é de dimensões suficientes.

A influência ambiental na aderência entre as barras FRP e o concreto é de importante consideração. A absorção de água conduz à diminuição da resistência e do módulo de elasticidade da barra FRP, assim como a sua dilatação pode afetar a aderência. O ambiente altamente alcalino do concreto pode degradar a superfície da barra ou as suas fibras, especialmente em ambientes quentes e úmidos, embora fibras suscetíveis possam ser protegidas por revestimentos resistentes de resina. É por tudo isto que é importante identificar o nível no qual a transferência da aderência se torna crítica e desenvolver modelos de degradação tanto para as resinas quanto para as fibras. É também importante considerar as condições ambientais durante construção, manuseio e transporte, pois materiais FRP são suscetíveis à radiação UV.

3.6 ESTUDO DA ADERENCIA SEGUNDO COUTO

Segundo COUTO (2007), a pesquisa trata sobre um estudo teórico e experimental da aderência ao concreto da armadura sintética tipo GFRP ou de polímero reforçado com fibras de vidro. Para a parte experimental, foram confeccionados trinta corpos de prova para ensaios de

arrancamento direto DPO, onde as variáveis foram o diâmetro da barra de GFRP e a resistência do concreto à compressão.

As barras empregadas nesse estudo foram importadas, fabricadas pela empresa americana Hughes Brothers, modelo Aslan 100, de 9 mm e 16 mm de diâmetro. Foram usados três classes de resistência do concreto, C30, C60 e C80, tendo sido utilizados aditivos superplastificantes e sílica ativa nesta última classe. Tais detalhes podem se observar na Tabela 3-2.

Tabela 3-2: Propriedades mecânicas experimentais dos materiais empregados na confecção dos corpos de prova para ensaios de aderência.

Tipo de material	Resistência à tração [MPa]	Módulo elasticidade [GPa]	Resistência à compressão f'_{c28} [MPa]
Barra GFRP Ø 9mm	714	42,73	
Barra GFRP Ø 16mm	624	44,86	
Concreto C30		32,53	34,6
Concreto C60		39,93	55,2
Concreto C80		40,6	81,3

Fonte: COUTO (2007).

Os ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos, cujas dimensões corresponderam aos procedimentos estabelecidos na RILEM-CEB-FIP (1973), com comprimento de aderência de cinco vezes o diâmetro da barra e diâmetro do cilindro de concreto superior a 10 vezes o diâmetro da barra. A maioria dos corpos de prova apresentaram ruptura por arrancamento e alguns de concreto da maior resistência apresentaram ruptura por fendilhamento do concreto. Nas Figuras 3-20 e 3-21 se observam os resultados dessa pesquisa.

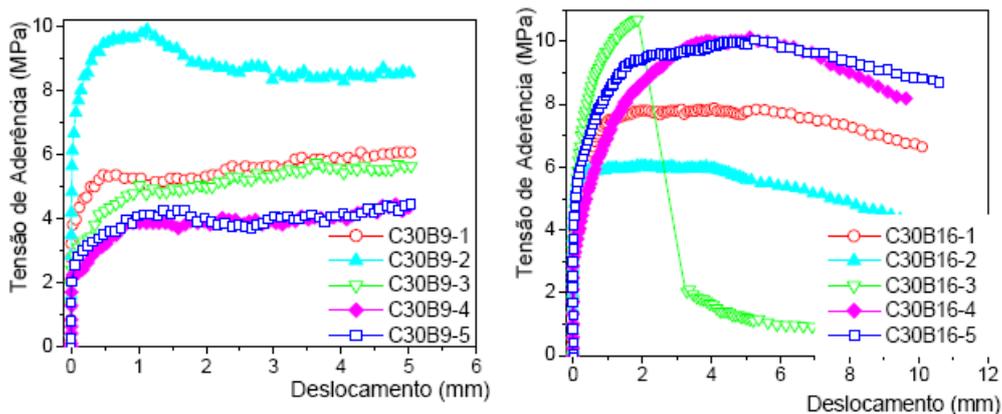


Figura 3-20: Comportamento dos corpos de prova de concreto 30 MPa e barras de GFRP de \varnothing 9 mm e \varnothing 16 mm. Fonte: COUTO (2007).

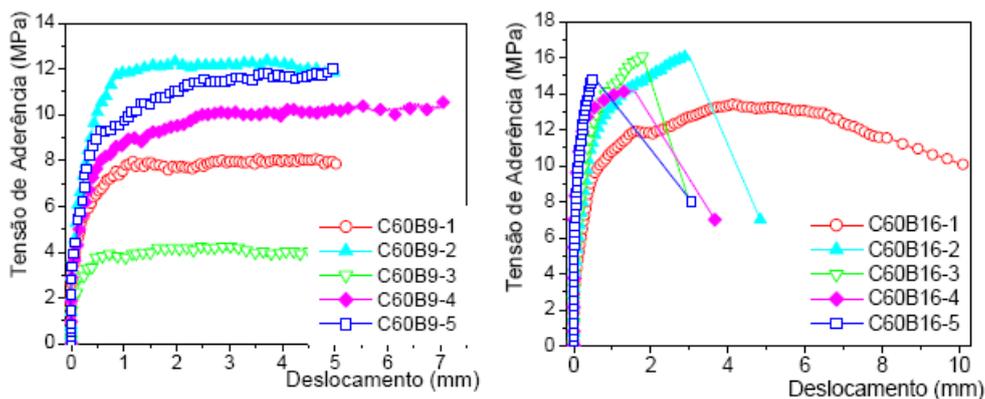


Figura 3-21: Comportamento dos corpos de prova de concreto 60 MPa e barras de GFRP de \varnothing 9 mm e \varnothing 16 mm. Fonte: COUTO (2007).

Observa-se na Figura 3-21 que os corpos de prova com concreto 60 MPa e barras \varnothing 16 mm romperam por fendilhamento do concreto. Isso foi devido à falta de armadura transversal nos corpos de prova ou ao pequeno cobrimento de concreto.

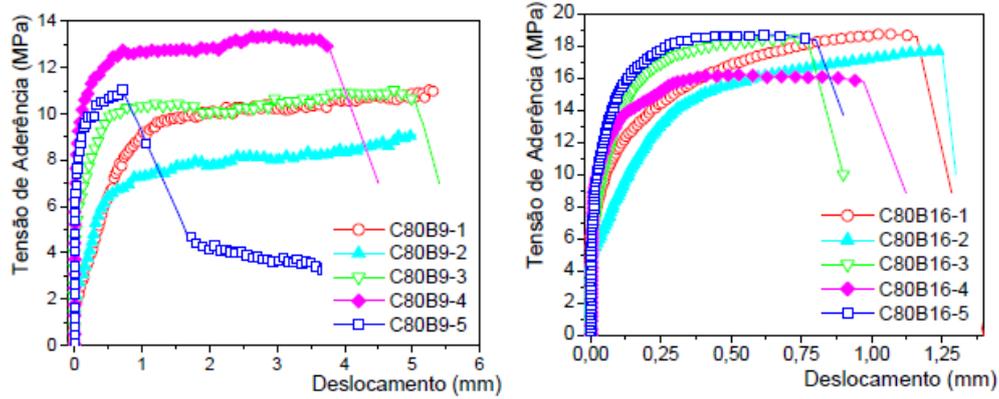


Figura 3-22: Comportamento dos corpos de prova de concreto 80 MPa e barras de GFRP de \varnothing 9 mm e \varnothing 16 mm. Fonte: COUTO (2007).

Concluiu-se que os corpos de prova com concreto de maior resistência apresentaram maior resistência de aderência, mas não houve diferença significativa da resistência à aderência entre concretos classe C60 e classe C80. As barras de maior diâmetro apresentaram maior resistência de aderência.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Foram confeccionados nove corpos de prova cúbicos de 200mm de aresta, tendo sido utilizados três tipos de barras: barra de aço, barra de polímero reforçado com fibras de carbono CFRP e barra de polímero reforçado com fibras de vidro GFRP. Tanto o diâmetro das barras quanto o comprimento de aderência foi o mesmo para todos os ensaios.

Os corpos de prova tinham concreto de resistência média à compressão de cerca de 35 MPa. O objetivo fundamental da configuração dos ensaios foi obter quantitativamente a resistência de aderência existente entre o concreto e as barras da armadura, e comparar dados resistência da aderência com a resistência à tração das barras.

4.2 ESPECIFICAÇÕES DO TIPO DE ENSAIO

O ensaio de arrancamento direto, padronizado pela RILEM-CEB-FIP (1973), estabelece o uso de um prisma cúbico de concreto com uma barra posicionada no centro do corpo de prova, paralela à direção da concretagem, com um comprimento de ancoragem entre quatro e sete vezes o diâmetro da barra começando desde o extremo oposto à aplicação da força.

Esse arranjo experimental tem sido empregado amplamente para se determinar valores de tensão de aderência entre o concreto e a barra. Constitui a base para diversas variações do mesmo ensaio adotado pelo ACI 440R (2007), ACI 440.3R (2004) e pela ISSO 10406-1 (2008). Na Figura 4-1 ilustram-se os detalhes do modelo de corpo de prova confeccionados para o ensaio *Pull Out* dessa pesquisa.

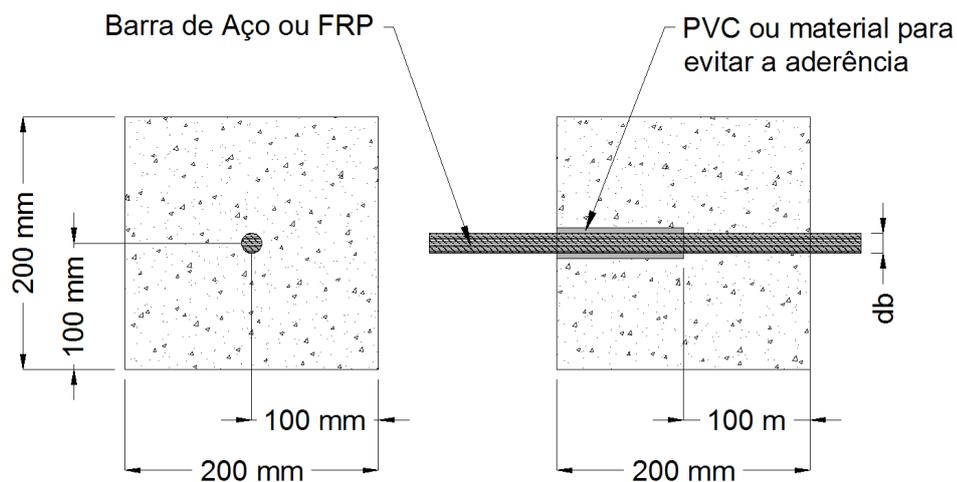


Figura 4-1: Modelo dos corpos de prova para ensaio de arrancamento direto *Pull-Out*.

Esse tipo de ensaio é o mais aplicado para se estudar a aderência entre o concreto e a armadura de aço, embora as condições desse ensaio raramente são encontradas em circunstâncias reais. Mesmo assim, é um dos ensaios recomendados para a adoção de parâmetros de aderência para o projeto de estruturas de concreto armado.

A comparação entre as possíveis e diversas configurações estruturais é o que lhe concede um grande valor. As variáveis podem ser diferentes tipos de material, tipos e tratamentos superficiais, diferentes composições geométricas dos corpos de prova, comprimentos de aderência, uso de fibras na matriz cimentícia, *etc.*

Na Figura 4-2 observa-se o arranjo do ensaio de arrancamento direto feito nessa pesquisa em concordância com as prescrições do ACI 440.3R (2004).

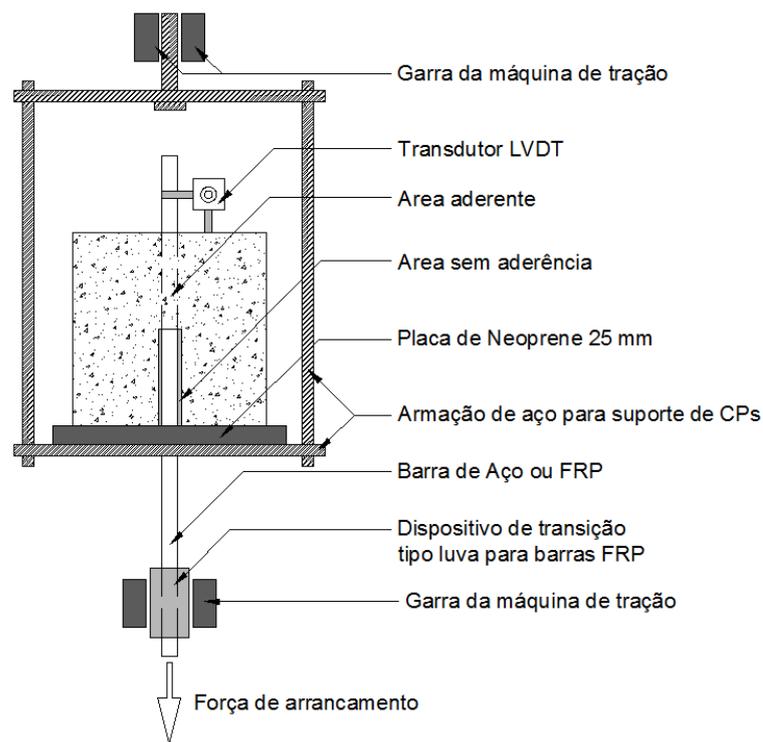


Figura 4-2: Detalhes do arranjo do ensaio Pull Out.

4.3 ESPECIFICAÇÕES DOS MATERIAIS

4.3.1 Barras de Aço

As barras nervuradas de aço empregadas para a realização desses ensaios foram de aço CA-50, com diâmetro nominal 10 mm e 700 mm de comprimento. As barras foram submetidas a ensaios de tração no Laboratório de Materiais de Construção e Concreto do Instituto Militar de Engenharia, segundo a NBR 6152 (2002), em uma prensa de marca CONTENCO com capacidade para 1000 kN. Para esses ensaios, foram empregadas três barras de aço, e os resultados sobre curvas de tensão – deformação específica obtidos estão apresentados na Figura 4-3.

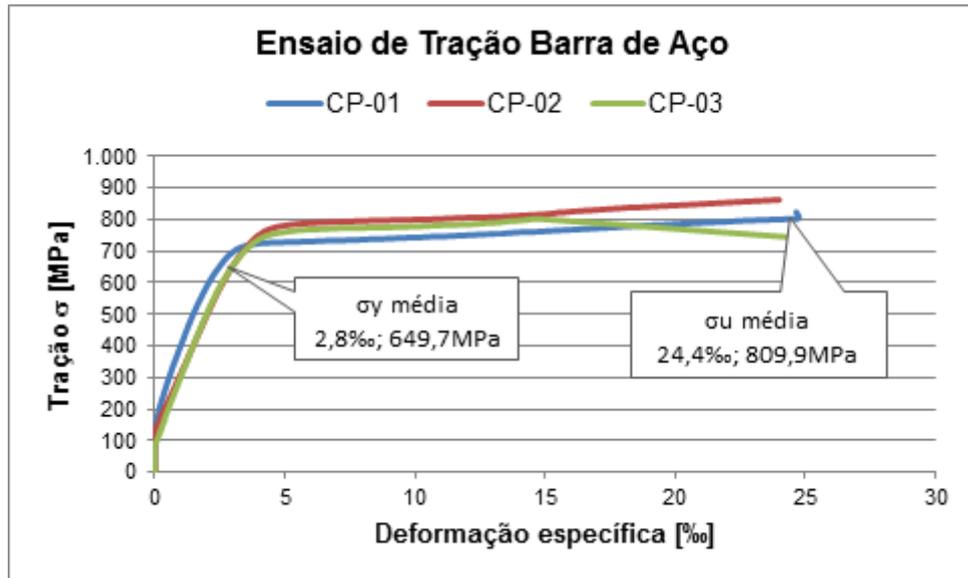


Figura 4-3: Curvas tensão – deformação específica das barras de aço.

Com base nesses resultados, tem-se a Tabela 4-1, que fornece os valores médios para as barras de aço a serem empregadas nos ensaios *pull-out*.

Tabela 4-1: Resumo dos dados do ensaio de tração para barras de aço.

Propriedade	Unid.	CP 01	CP 02	CP 03	Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação
Módulo de elasticidade	GPa		194,27	223,67	208,97	20,79	0,10
Resistência de escoamento σ_y	MPa	645,54	678	625,56	649,7	26,47	0,04
Def. esp. escoamento*	‰	2,40	3,20	2,80	2,80	0,4	0,14
Resistência última à tração σ_u	MPa	824,09	862,8	742,92	809,94	61,18	0,08
Def. esp. última à tração*	‰	24,64	23,99	24,65	24,43	0,38	0,02

*: Valor lido pelo extensômetro elétrico de resistência

Fonte: SILVA (2014).

4.3.2 Barras de CFRP

As barras de CFRP empregadas nos ensaios foram fornecidas pela empresa ROGERTEC, localizada no Rio de Janeiro. Essas barras são definidas como armadura de alta resistência MFC-AR 10. As propriedades físicas das barras, segundo o fornecedor, são expressadas na Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Propriedades físicas da barra CFRP segundo o fornecedor.

Propriedade	Unidade	Barra MFC AR 10
Resistência à tração característica	MPa	2300
Módulo elástico característico (tração)	GPa	130
Deformação característica última	%	1,8
Diâmetro nominal	mm	10
Carga de ruptura	kN	180
Area seção transversal	mm ²	78,5
Relaxação	%	2-3
Coefficiente de dilatação térmica	1/°C	$0,7 \cdot 10^{-6}$

Fonte: ROGERTECH (2014).

Algumas das propriedades mecânicas das barras de CFRP foram verificadas por meio de ensaios à tração realizados no Laboratório de Materiais de Construção e Concreto do Instituto Militar de Engenharia. Especificamente os valores da resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação específica última foram avaliados nesses ensaios SILVA (2014). A continuação se apresentam os resultados desses ensaios preliminares.

Na Figura 4-4 visualiza-se a curva tensão – deformação específica para as barras de CFRP, igualmente na Tabela 4-3 se apresenta o resumo dos desses ensaios.

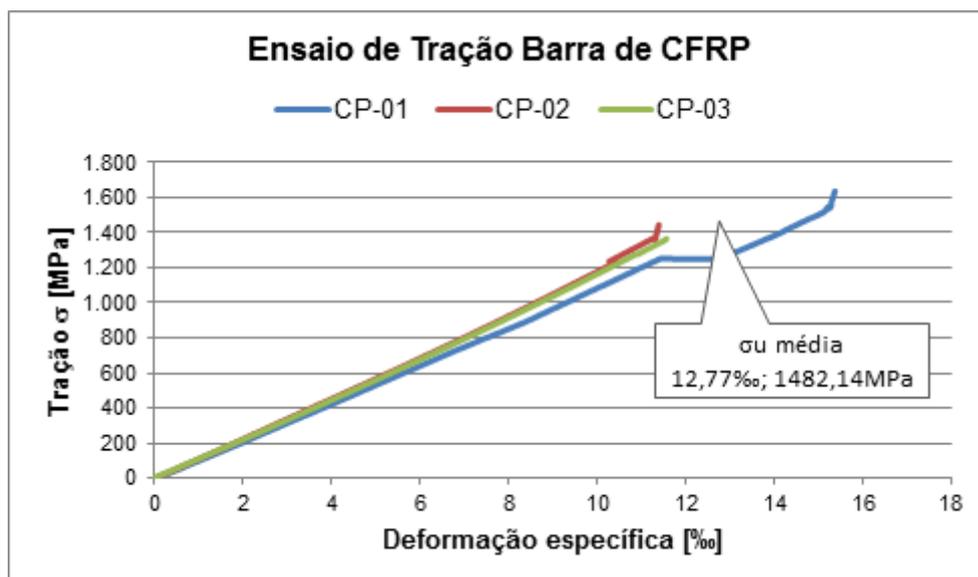


Figura 4-4: Curva tensão – deformação específica das barras de CFRP.

Tabela 4-3: Resumo dos dados do ensaio à tração para barras de CFRP.

Propriedade	Unid.	CP 01	CP 02	CP 03	Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação
Módulo de elasticidade	GPa	107,76	114,67	111,41	111,28	3,46	0,03
Resistencia última à tração σ_u	MPa	1636,84	1443,82	1365,75	1482,14	139,55	0,09
Def. esp. última à tração*	‰	15,37	11,39	11,56	12,77	2,25	0,18

*: Valor lido pelo extensômetro elétrico de resistência

Fonte: SILVA (2014).

4.3.3 Barras de GFRP

As barras de GFRP foram fornecidas pela empresa Cogumelo, sediada no Rio de Janeiro, e são compostas por uma matriz de resina epoxi-éster-vinílica com fibras de vidro *E-glass*. Os valores das propriedades físicas dessas barras fornecidas pelo fabricante são apresentados na Tabela 4-4.

Tabela 4-4: Propriedades mecânicas das barras GFRP, segundo o fornecedor.

Propriedade	Unidade	Barra 10mm
Resistência à tração característica	MPa	850
Módulo elástico característico (tração)	GPa	42
Deformação esp. característica últ.	%	2
Carga axial máxima	kN	58,84
Area seção transversal	mm ²	71
Massa linear	g/m	149

De igual forma que as barras de CFRP, foram avaliadas experimentalmente por meio ensaios à tração, e todas as barras tinham 700 mm de comprimento. Foram executados três corpos de prova ensaiados na prensa de tração, marca Contenco e capacidade de 1000 kN, do Laboratório de Materiais de Construção e Concreto do Instituto Militar de Engenharia. Os resultados desses ensaios à tração são apresentados na Figura 4-5 e na Tabela 4-5.

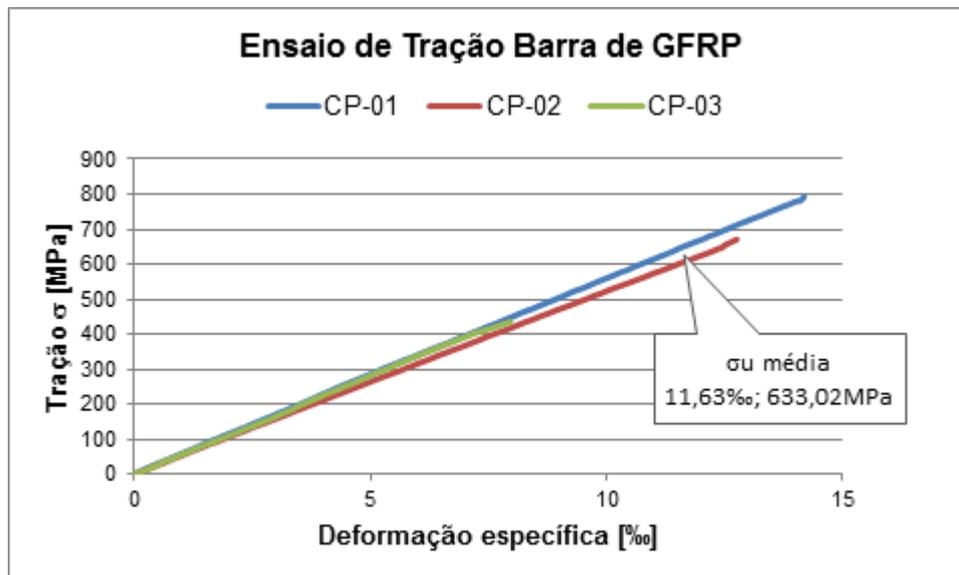


Figura 4-5: Ensaio à tração das barras GFRP.

Tabela 4-5: Resumo dos dados do ensaio à tração para barras de GFRP.

Propriedade	Unid.	CP 01	CP 02	CP 03	Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação
Módulo de elasticidade	GPa	62,19	52,18	55,87	56,75	5,06	0,09
Resistencia última à tração σ_u	MPa	792,64	670,78	435,65	633,02	181,47	0,29
Def. esp. última à tração*	‰	14,18	12,75	7,96	11,63	3,26	0,28

*: Valor lido pelo extensômetro elétrico de resistência

Fonte: SILVA (2014).

As nervuras da barra GFRP formam uma espiral contornada ao longo do eixo principal. A espessura média é de 2,9 mm e o espaçamento entre as nervuras é de 25,8 mm. Na Figura 4-6 se mostram os detalhes da geometria da barra GFRP.

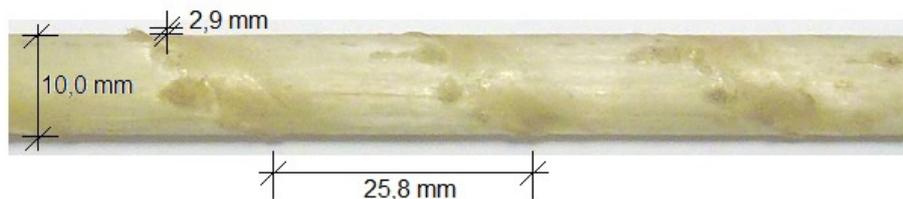


Figura 4-6: Detalhes da geometria da barra de compósito de fibra de vidro GFRP.

4.3.4 Concreto

Para esse programa experimental foi utilizado concreto com especificação para resistência nominal à compressão f_{ck28} de 25 MPa. A composição do concreto é apresentada na Tabela 4-6. A dosagem utilizada, em massa, foi de 1 : 2,41 : 3,26 : 0,59 (aglomerante com consumo de 316 kg/m^3 : agregado miúdo : agregado graúdo : fator água/aglomerante).

Tabela 4-6: Composição do concreto para confecção dos corpos de prova (kg de material / m³ de concreto).

Material	Quantidade (kg)
Cimento	316
Agregado miúdo	762
Agregado graúdo	1030
Água	186

O cimento utilizado na concretagem dos corpos de prova foi o cimento Portland, composto com escória de alto forno, de classe de resistência de 32 MPa (CP II – E – 32), conforme NBR 11578 (1991). O cimento foi cedido pela empresa Holcim Brasil S/A.

O agregado miúdo era de areia de rio lavada, proveniente do município de Seropédica, RJ. A distribuição granulométrica encontra-se dentro dos limites recomendados pela NBR NM 248 (2003) para zona dois, tendo graduação média. A massa específica foi de 2,58 g/cm³, módulo de finura 2,96; a dimensão máxima característica de 4,8 mm.

O agregado graúdo é originário de rocha tipo gnaisse, obtidas de um britador no município de Duque de Caxias, RJ. Para a realização dos corpos de prova utilizou-se 50% de agregado graúdo de dimensão máxima característica de 12,5 mm e módulo de finura 4,78; e 50% de agregado graúdo de dimensão máxima característica 19 mm e módulo de finura 6,30. Na Tabela 4-7, encontram-se as propriedades físicas dos agregados graúdos utilizados.

Tabela 4-7: Propriedades físicas normativas dos agregados utilizados.

Descrição	Agregado miúdo	Agregado graúdo 1 (50%)	Agregado graúdo 2 (50%)
Massa específica NBR NM 52 (2003) [g/cm ³]	2,58	2,70	2,64
Módulo de finura NBR 7211 (2005)	2,96	4,78	6,3
Dimensão máxima característica NBR 7211 (2005)	4,8 mm	12,5 mm	19 mm

4.4 CORPOS DE PROVA

4.4.1 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram confeccionados dentro dos padrões para ensaios de arrancamento direto, *Direct-Pull-Out*, mencionado anteriormente. O comprimento da aresta do cubo tinha 200 mm.

O comprimento de aderência foi determinado em 10 vezes o diâmetro da barra, $L_{ad} = 10 \cdot d_b = 100 \text{ mm}$, segundo as especificações das normas para esse tipo de ensaio. Foi empregada uma capa de plástico de PVC cobrindo a parte da barra que não ficou aderida ao concreto para garantir somente esses 100 mm de aderência quando da concretagem, como ilustra a Figura 4-7.



Figura 4-7: Detalhe do cobrimento com capa de plástico de parte do comprimento da barra, para a zona aderente e zona não aderente: a) CFRP; b) GFRP e c) aço.

Para as formas usou-se compensado de madeira coberto com capa não aderente. Peças de madeira foram dispostas para manter as barras no centro dos corpos de prova e segurar a correta concretagem final, na Figura 4-8 se observam esses detalhes.

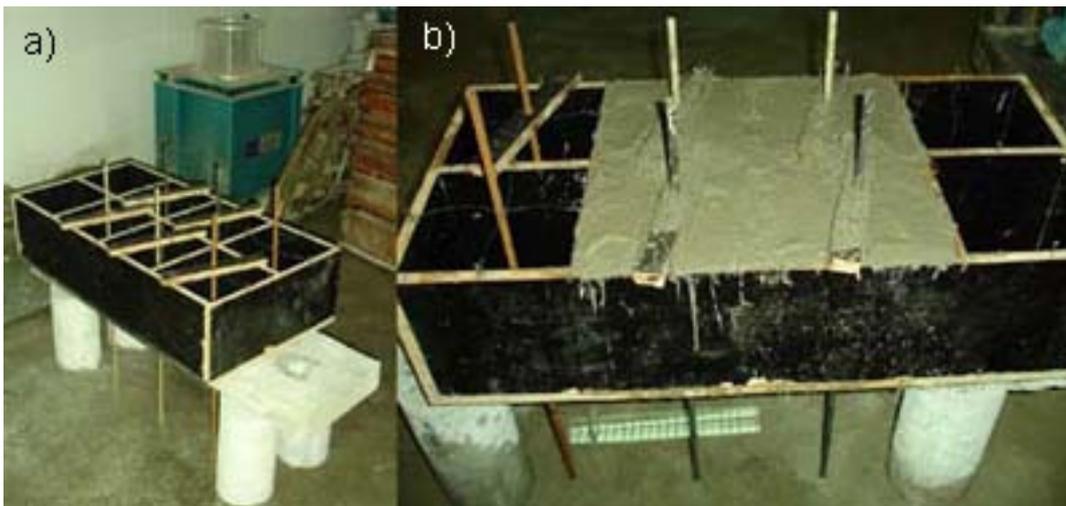


Figura 4-8: Confeção dos corpos de prova: a) preparação das formas cúbicas; b) concretagem dos corpos de prova.

Logo após a concretagem, os corpos de prova foram curados no Laboratório de Materiais de Construção e Concreto do Instituto Militar de Engenharia até a realização dos ensaios (Figura 4-9).



Figura 4-9: Corpos de prova de concreto e barras de aço, CP-A1, CP-A2 e CP-A3.

Os três corpos de prova com barra de CFRP foram denominados CP-C1, CP-C2 e CP-C3, enquanto os corpos de prova com barras de GFRP e de aço foram denominados CP-V1, CP-V2 e CP-V3, e CP-A1, CP-A2 e CP-A3, respectivamente. Na Figura 4-10 se observam os corpos de prova como barras de GFRP e CFRP.



Figura 4-10: Corpos de prova de concreto e barras de fibras de carbono e barras de fibras de vidro, CP-C1, CP-C2, CP-C3, CP-V1, CP-V2 e CP-V3.

4.5 ESPECIFICAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS DE ENSAIO IMPLEMENTADOS

4.5.1 Ensaio de *Pull-Out*

Os ensaios de arrancamento foram realizados no Laboratório de Materiais da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), Campus Fonseca Telles.

A máquina de tração universal utilizada para realizar os ensaios é de fabricação alemã, marca Losenhausen, modelo Steuerpult z. UHP 60, com capacidade à tração de 600 kN. Na Figura 4-11 visualiza-se dito equipamento.

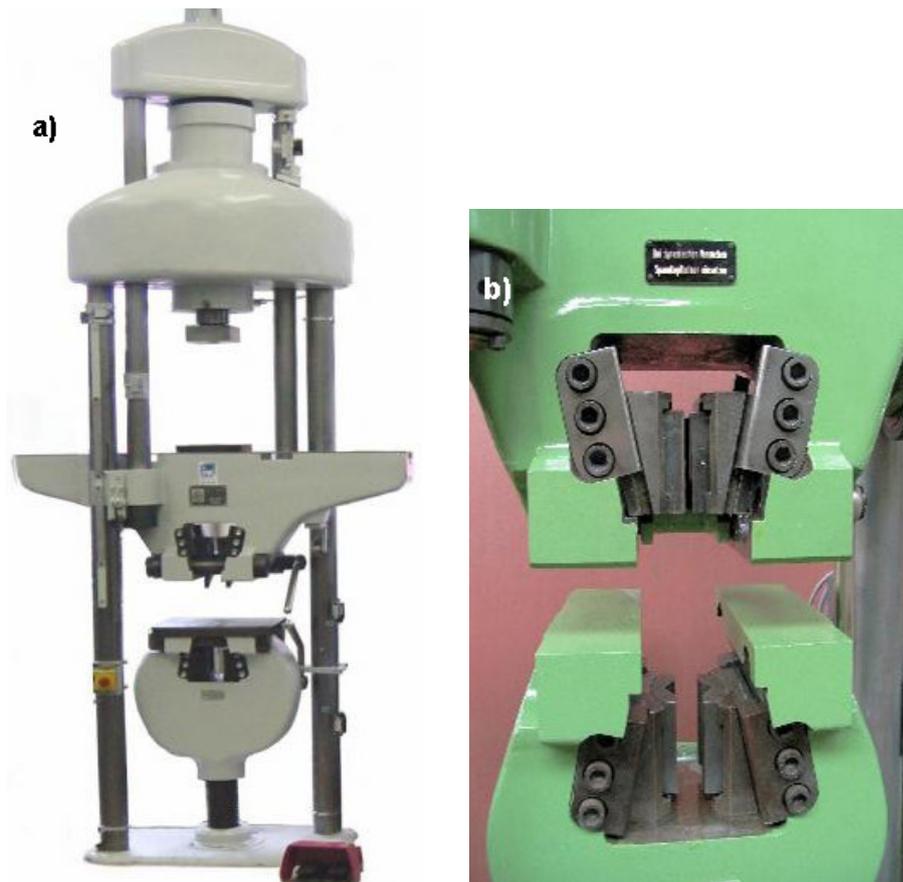


Figura 4-11: a) máquina de ensaio de laboratório para tração e compressão, marca Losenhausen, modelo Steuerpult z.; b) detalhe do mecanismo de garra da máquina de ensaio. Fonte: <http://lagermaschinen.de>

4.5.2 Transdutor de deslocamento LVDT

O equipamento para a medição do deslocamento é do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), de marca Gefran, Modelo PY2, de ponta esférica, cuja margem de precisão é de 1×10^{-6} m, um micrómetro $1 \mu\text{m}$, (Figura 4-12). O mesmo foi colocado no lado superior do corpo de prova, onde coincide com a ponta externa do comprimento de aderência.

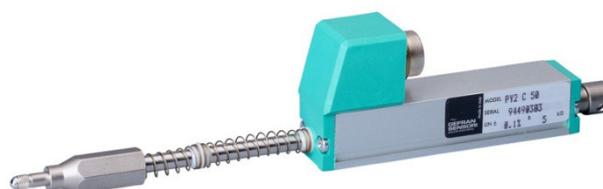


Figura 4-12: Transdutor de deslocamento LVDT marca Gefran, modelo PY2.

4.6 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Foi necessária a confecção de uma armação de suporte para os corpos de prova, executada com duas placas de aço de 350 mm x 350 mm e 20 mm de espessura cada uma, quatro furos periféricos de 16 mm e um furo central de 25 mm de diâmetro. As quatro barras metálicas roscadas fixavam as duas placas metálicas, com o objetivo de deixar um espaço entre ambas as placas de 500 mm, aproximadamente, para enquadrar os corpos de prova nesse espaço.

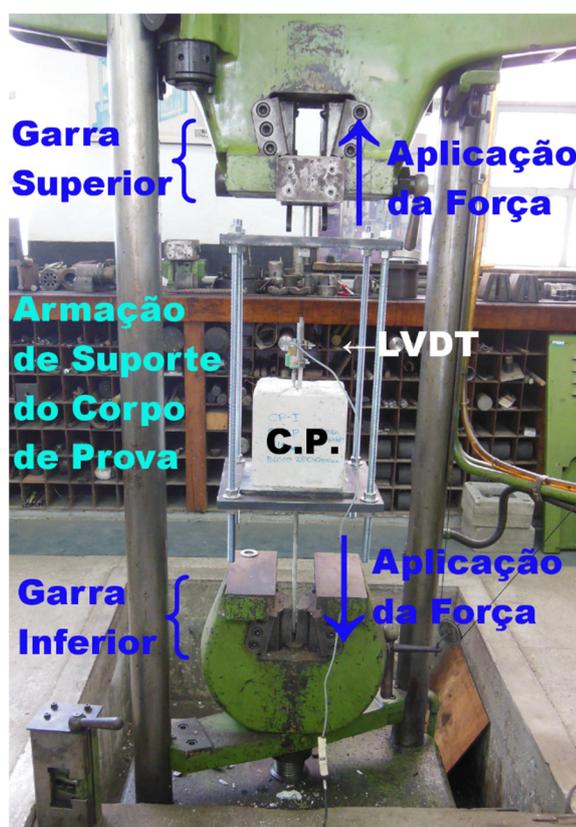


Figura 4-13: Arranjo do ensaio de arrancamento direto.

O furo central da placa superior tinha um parafuso roscado com porca que fixou o arranjo completo na garra superior da máquina de ensaio. O furo central da placa inferior foi por onde a barra do corpo de prova passou, a fim de ser ancorada pela garra inferior da máquina de ensaio.

Na placa de aço inferior colocou-se uma placa de Neoprene de 20 mm de espessura para a transição do contato entre o concreto do corpo de prova e o aço da placa.

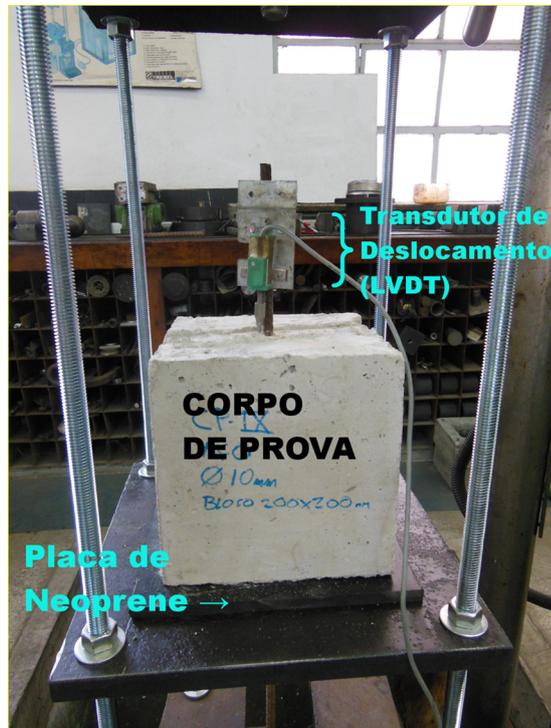


Figura 4-14: Detalhe do arranjo do ensaio de arrancamento direto

Os primeiros corpos de prova ensaiados foram os de concreto com barra de aço. Os ensaios transcorreram sem contratempo. Nos três corpos de prova a ruptura da aderência ocorreu por arrancamento (*Pull-out failure*) e não por fendilhamento do concreto (*Splitting failure*), em concordância com o que foi planejado.

No caso dos ensaios dos corpos de prova de concreto com barras de compósito de fibras de carbono e de fibras de vidro, foi necessário confeccionar um dispositivo de transição com resina epóxi para proteger a área de contato entre a barra sintética e a garra metálica da máquina de tração, assim como se observa na Figura 4-15.

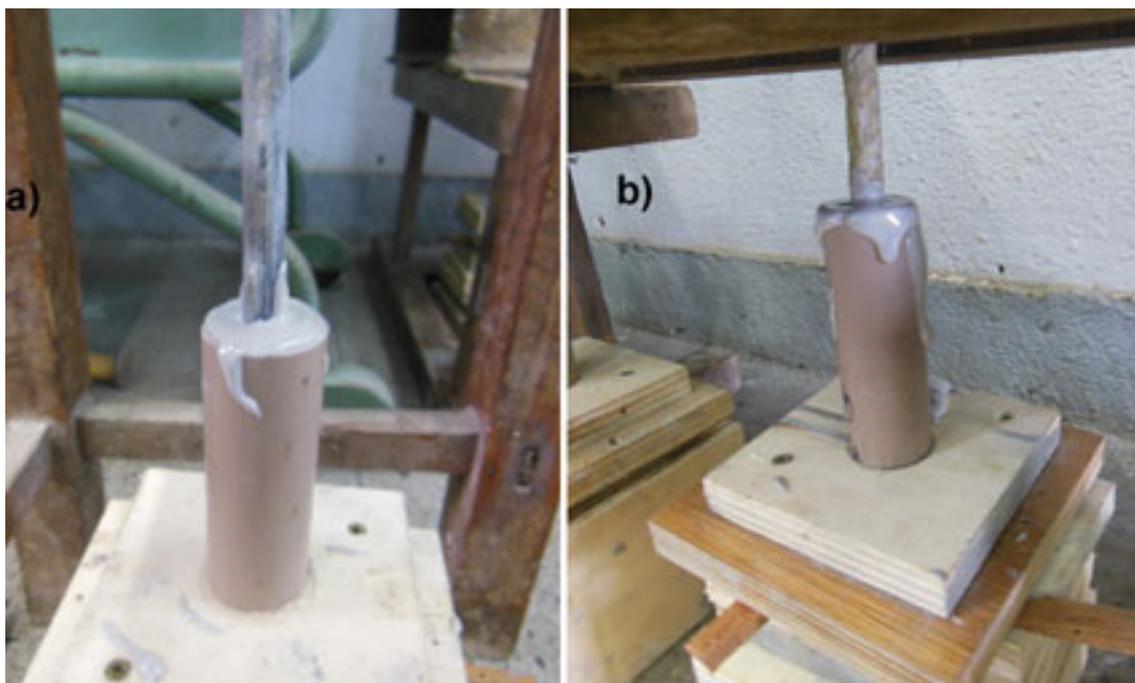


Figura 4-15: Detalhe do dispositivo tipo luva para a proteção da área de agarre com a máquina de tração: a) barra de CFRP, b) barra de GFRP.

Ao se utilizar esse dispositivo, semelhante a uma luva, se conseguiu executar os ensaios de aderência entre concreto e barras de compósito de fibras de carbono e fibras de vidro sem contratempos. Na Figura 4-16 se observa o correto posicionamento da luva na garra da máquina de tração.



Figura 4-16: Detalhe da garra da máquina de tração e a luva de proteção da barra de GFRP.

Observou-se que, dos três corpos de prova de composto de fibras de vidro, um apresentou ruptura por rompimento da barra propriamente, o que representa uma avaria do ensaio de arrancamento propriamente, provavelmente devido às imperfeições da barra ou erros na confecção do corpo de prova. Na Figura 4-17 se observa a realização dos ensaios nos corpos de prova com barras de CFRP e de GFRP.



Figura 4-17: Execução dos ensaios dos corpos de prova de concreto e barras de fibras de carbono e fibras de vidro.

Os corpos de prova com barras de compósito de fibras de carbono, CFRP, não apresentaram problemas na execução do ensaio, mas os resultados dos mesmos exibiram dispersão.

4.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS UNIDADES

Os dados obtidos dos ensaios foram adquiridos diretamente dos equipamentos de ensaio em valores absolutos de força e deslizamento. Para unificar os resultados e comparar entre esses e outros estudos de aderência por ensaio de arrancamento direto, foi necessário converter valores de carga F (N) para tensão de aderência τ (MPa) de acordo com as expressões 4-1 a 4-3.

$$\tau = \frac{F}{p_b L_{ad}} [MPa] \quad (4-1)$$

$$p_b = \pi d_b [mm] \quad (4-2)$$

$$L_{ad} = 10 d_b [mm] \quad (4-3)$$

Na expressão (4-1), a tensão de aderência τ é obtida em MPa, na qual a força F é expressada em Newtons e a área de aderência em mm^2 . Essa área de aderência é a superfície obtida pela multiplicação do perímetro da circunferência p_b das barras (expressão 4-2) e o comprimento de aderência L_{ad} (expressão 4-3). Para todas as barras, o diâmetro é o mesmo, 10 mm. Dessa forma o perímetro da circunferência das barras é de 31,416 mm e o comprimento de aderência é de 100 mm, respectivamente.

4.8 RESULTADOS DOS ENSAIOS

4.8.1 Ensaios de aderência entre concreto e barras de aço

A curva de tensão de aderência τ vs. deslizamento s dos ensaios de arrancamento direto para os três corpos de prova de aço CP-A1, CP-A2 e CP-A3 estão mostrados na Figura 4-18, além na Tabela 4-8 se mostram os resultados de tensão última de ruptura da aderência obtidos desses ensaios.

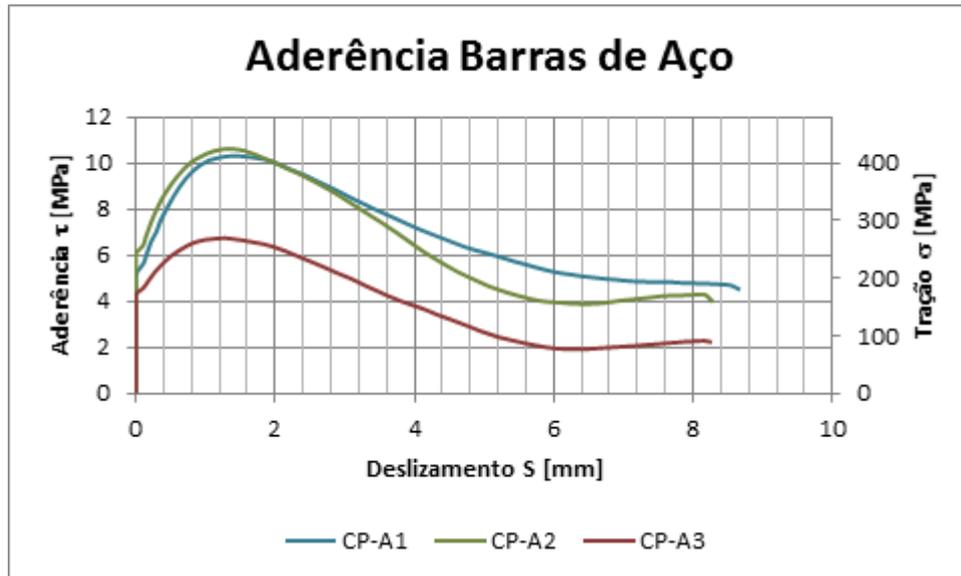


Figura 4-18: Tensão de aderência τ vs. deslizamento S da aderência entre barras de aço e concreto, corpos de prova CP-A1, CP-A2 e CP-A3.

Tabela 4-8: Valores experimentais da tensão última de ruptura da aderência para os corpos de prova de concreto e barras de aço.

Corpo de prova	τ_u [MPa]	S_u [mm]
CP-A1	10,312	1,464
CP-A2	10,618	1,334
CP-A3	6,740	1,289

4.8.2 Ensaios de aderência entre concreto e barras de CFRP

Após a realização dos ensaios de arrancamento para os corpos de prova CP-C1, CP-C2 e CP-C3 de concreto com barra de CFRP, se obtiveram os dados cuja curva é apresentada na Figura 4-19. Logo na Tabela 4-9 mostra-se um resumo dos valores de tensão última de ruptura da aderência para os três corpos de prova.

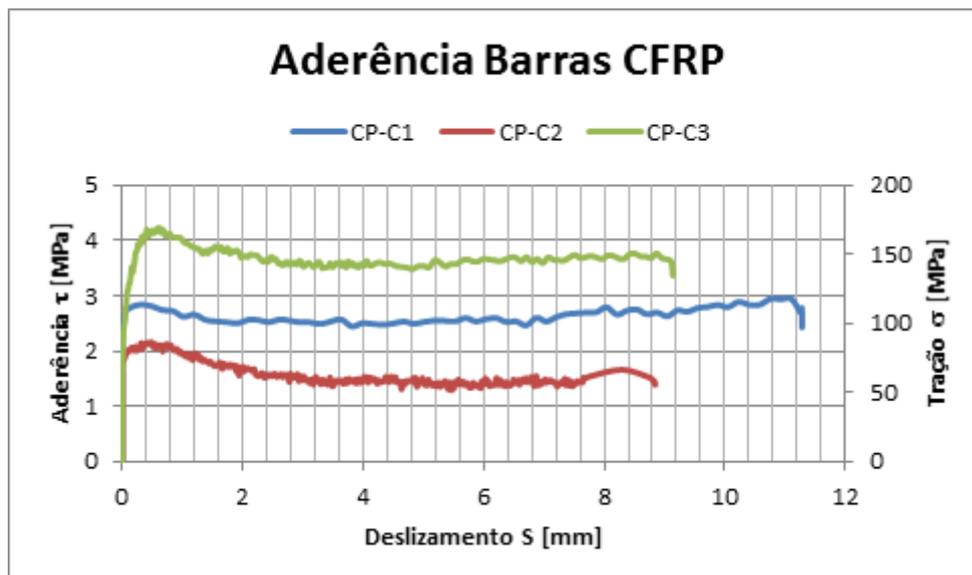


Figura 4-19: Tensão de aderência τ vs. deslizamento S entre concreto e barras de CFRP, corpos CP-C1, CP-C2 e CP-C3.

Tabela 4-9: Valores experimentais da tensão última de ruptura da aderência para os corpos de prova de concreto e barras de CFRP.

Corpo de prova	τ_u [MPa]	S_u [mm]
CP-C1	2,842	0,326
CP-C2	2,170	0,477
CP-C3	4,227	0,607

4.8.3 Ensaios de aderência entre concreto e barras de GFRP

Na Figura 4-20 se mostra a curva da tensão de aderência vs. deslizamento τ - S baseada nos dados obtidos dos ensaios de arrancamento direto para os corpos de prova de concreto com barras de GFRP, CP-V1, CP-V2 e CP-V3. Em seguida na Tabela 4-10 se mostra um resumo dos dados da tensão última de ruptura para os mencionados corpos de prova.

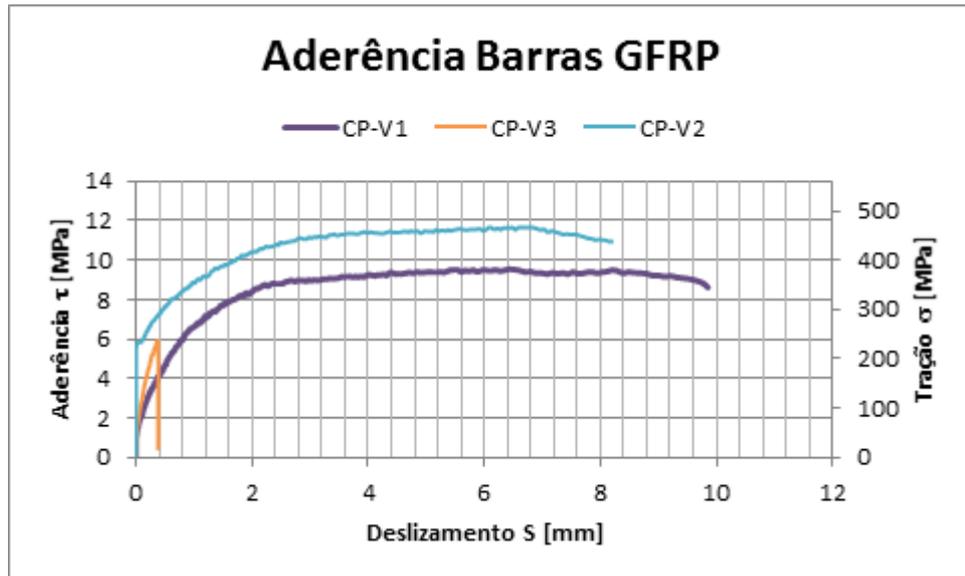


Figura 4-20: Tensão de aderência τ vs. deslizamento S entre concreto e barras de GFRP, corpos de prova CP-V1, CP-V2 e CP-V3.

Tabela 4-10: Valores experimentais da tensão última de ruptura da aderência para os corpos de prova de concreto e barras de GFRP.

Corpo de prova	τ_u [MPa]	S_u [mm]
CP-V1	9,549	6,436
CP-V2	11,675	6,106
CP-V3* (ruptura da barra)	5,940	0,366

5 ANALISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo os resultados experimentais obtidos são comparados considerando-se as diferentes barras empregadas. Realiza-se a comparação dos resultados obtidos com os modelos propostos de arrancamento disponíveis na literatura técnica e mencionados no capítulo 3.

A variabilidade nos resultados experimentais é analisada considerando-se: o desvio padrão e o coeficiente de variação. Couto (2007) menciona os limites empregados por alguns autores para o coeficiente de variação, adotando o valor máximo de 25%. Nesta pesquisa não foram analisados os dados obtidos de modo a se retirar os valores espúrios.

5.2 ENSAIOS DE ARRANCAMENTO

5.2.1 Corpos de prova de barras de aço

A Figura 5-1 mostra o comportamento das curvas tensão de aderência x deslizamento para os corpos de prova com barras de aço.

Aderência Barras de Aço

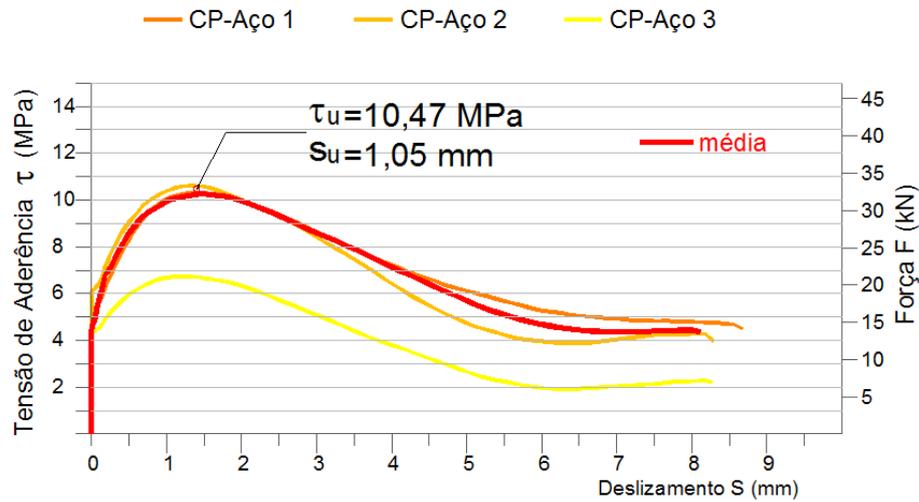


Figura 5-1: Tensão da aderência vs. deslizamento $\tau - s$ entre barras de aço e o concreto.

A curva tensão de aderência x deslizamento médio foi obtida considerando-se as tensões para $s = 0,01 \text{ mm}$, $s = 0,1 \text{ mm}$ e $s = 1 \text{ mm}$ de deslizamento, conforme dados apresentados na Tabela 5-1. Observa-se uma maior variabilidade dos resultados para as tensões de aderência correspondentes aos menores valores de deslizamento.

Tabela 5-1 Valores experimentais da tensão de aderência para os corpos de prova de concreto e barras de aço

Modelo	$\tau_{0,01}$ (MPa)	$\tau_{0,1}$ (MPa)	τ_1 (MPa)	τ_m (MPa)	τ_u (MPa)	S_u (mm)	F_u (kN)	σ_{u-ad} (MPa)	Ruptura
CP-Aço1	5,22	5,6	10,03	6,95	10,31	1,46	32,4	412,53	Arranc.
CP-Aço2	6,12	6,41	10,38	7,64	10,62	1,334	33,36	424,75	Arranc.
CP-Aço3	4,33	4,55	6,67	5,18	6,74	1,29	21,17	269,54	Arranc.
Média¹	5,67	6,01	10,21	7,3	10,47	1,4	32,88	418,64	
Desv. Padrão	0,64	0,57	0,25	0,49	0,22	0,09	0,68	8,64	
Coef. Variação	0,11	0,09	0,02	0,07	0,02	0,06	0,02	0,02	

¹: Considerando corpos 1 e 2 somente

5.2.2 Corpos de prova de barras de CFRP

Aderência Barras de CFRP

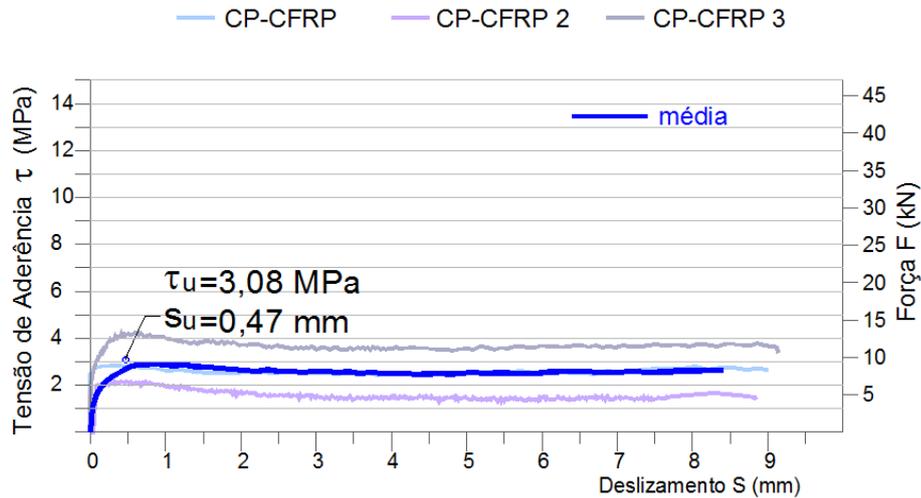


Figura 5-2: Tensão da aderência vs. deslizamento $\tau - s$ entre as barras de CFRP e o concreto.

A Figura 5-2 mostra o comportamento das curvas tensão de aderência x deslizamento para os corpos de prova com barras de fibras de carbono. A curva tensão de aderência x deslizamento médio foi obtida considerando-se as tensões para $s = 0,01$ mm, $s = 0,1$ mm e $s = 1$ mm de deslizamento, conforme dados apresentados na Tabela 5-2. De acordo com esses dados, a variação dos resultados da tensão média e de deslizamento máximo foram maiores quando comparados aos de corpos de prova de aço, mas com valores de coeficiente de variação inferiores à 25%.

Tabela 5-2: Valores experimentais da tensão de aderência para os corpos de prova de concreto e barras de CFRP

Modelo	$\tau_{0,01}$ (MPa)	$\tau_{0,1}$ (MPa)	τ_1 (MPa)	τ_m (MPa)	τ_u (MPa)	S_u (mm)	F_u (kN)	σ_{u-ad} (MPa)	Ruptura
CP-Carbono 1	2,51	2,76	2,63	2,63	2,84	0,33	8,93	113,70	Arranc.
CP-Carbono 2	1,80	2,01	1,94	1,92	2,17	0,48	6,82	86,83	Arranc.
CP-Carbono 3	2,06	3,14	4,00	3,07	4,23	0,61	13,28	169,09	Arranc.
Média	2,12	2,64	2,86	2,54	3,08	0,47	9,68	123,21	
Desv. Padrão	0,50	0,53	0,49	0,50	0,47	0,11	1,49	19,00	
Coef. Variação	0,24	0,20	0,17	0,20	0,15	0,23	0,15	0,15	

Observa-se uma maior variabilidade dos resultados para as tensões de aderência correspondentes aos menores valores de deslizamento.

5.2.3 Corpos de prova de barras de GFRP

A Figura 5-3 mostra o comportamento das curvas tensão de aderência x deslizamento $\tau - s$ para os corpos de prova com barras de fibras de carbono. A curva $\tau - s$ média foi obtida considerando-se as tensões para $s = 0,01$ mm, $s = 0,1$ mm e $s = 1$ mm de deslizamento, conforme dados apresentados na Tabela 5-3.

Aderência Barras de GFRP

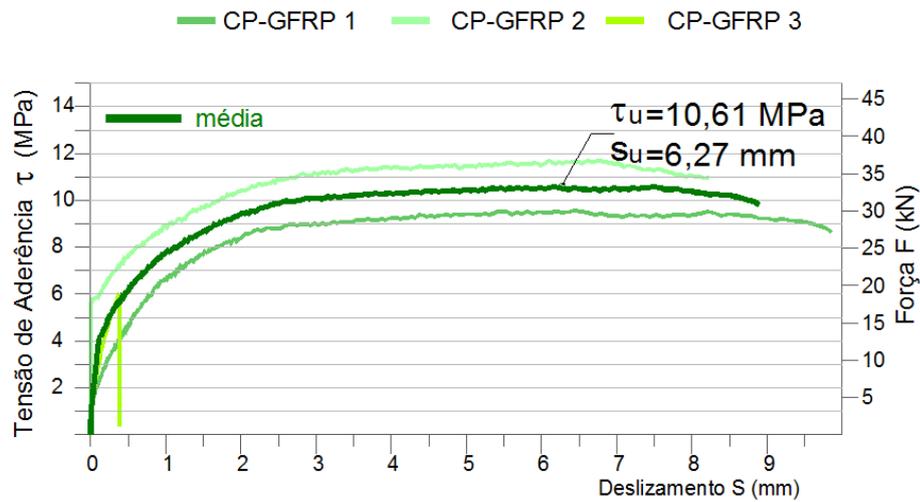


Figura 5-3: Tensão da aderência vs. deslizamento $\tau - s$ entre as barras de GFRP e o concreto.

De acordo com os dados apresentados a variação nos resultados da tensão média foi o maior quando comparados aos de corpos de prova com barras de outros materiais, alcançando um coeficiente de variação de 49%.

Tabela 5-3: Valores experimentais da tensão de aderência para os corpos de prova de concreto e barras de GFRP.

Modelo	$\tau_{0,01}$ (MPa)	$\tau_{0,1}$ (MPa)	τ_1 (MPa)	τ_m (MPa)	τ_u (MPa)	S_u (mm)	F_u (kN)	σ_{u-ad} (MPa)	Ruptura
CP-Vidro1	1,16	2,15	6,65	3,32	9,55	6,44	30	381,97	Arranc.
CP-Vidro2	5,7	5,9	8,85	6,82	11,67	6,11	36,68	467,02	Arranc.
CP-Vidro3	1,19	2,91	-	2,05	5,94	0,37	18,66	237,59	Barra ²
Média¹	3,43	4,03	7,75	5,07	10,61	6,27	33,34	424,5	
Desv. Padrão	3,21	2,65	1,56	2,47	1,5	0,23	4,72	60,14	
Coef. Variação	0,94	0,66	0,2	0,49	0,14	0,04	0,14	0,14	

¹: Considerando corpos 1 e 2 somente. ²: Ruptura da barra.

A Figura 5-4 apresenta as curvas para os modelos com barras de GFRP com as obtidas por COUTO (2007), considerando-se a resistência do concreto e diâmetro similares. Diferenças na fabricação do material, conformações superficiais da barra, por exemplo, podem influenciar a diferença observada.

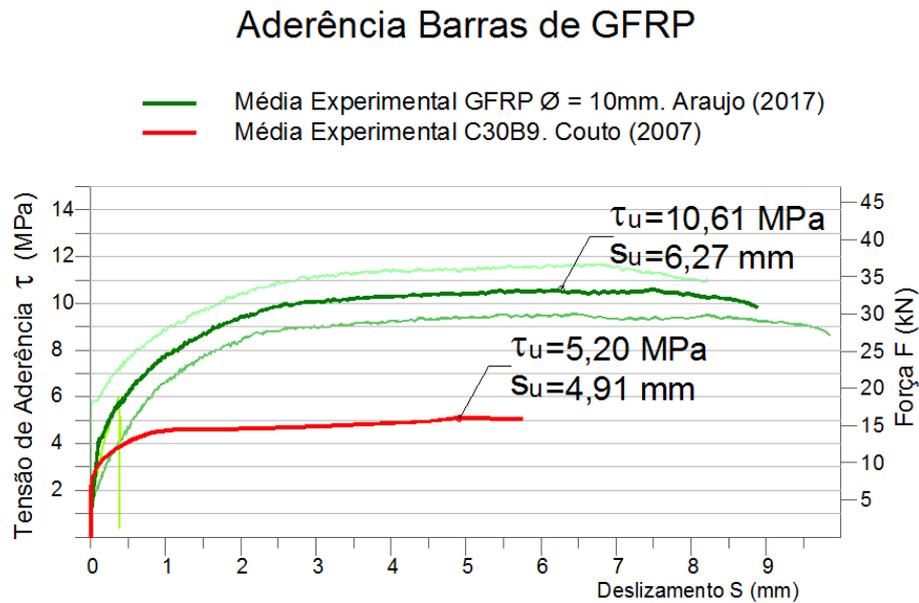


Figura 5-4: Curvas tensão da aderência vs. deslizamento $\tau - s$ obtidos nos ensaios entre barras de GFRP e valores de Couto (2007).

5.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS CORPOS DE PROVA COMPOSTOS POR DIFERENTES BARRAS

Aderência Barras de Aço, GFRP e CFRP

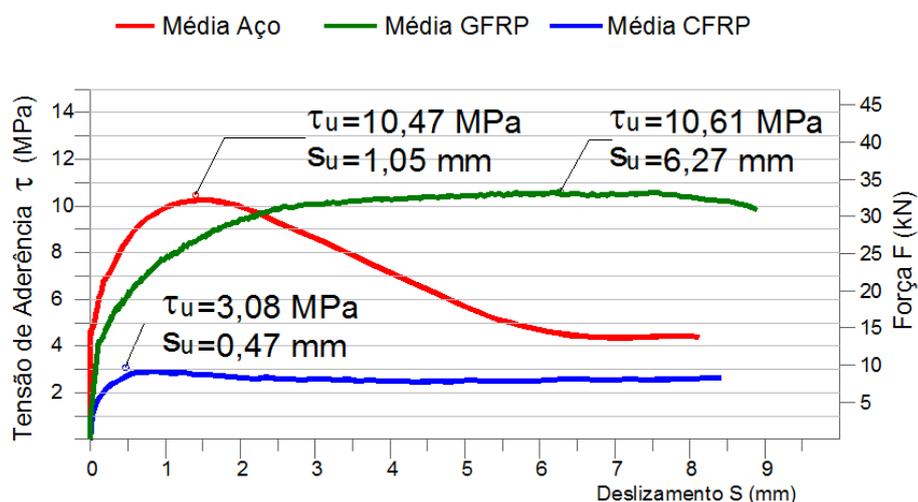


Figura 5-5: Tensão da aderência vs. deslizamento $\tau - s$ entre os três tipos de barra da presente pesquisa.

Observa-se como os valores de tensão da aderência das barras de CFRP são menores entre os três tipos de materiais, pois essa barra não tem nervuras superficiais. Ao mesmo tempo se nota o pequeno o deslizamento s_u até a ruptura quando da tensão de aderência, e encontra-se antes do $s = 1$ mm para os três corpos de prova.

A Tabela 5-4 se apresenta o resumo dos dados médios para cada tipo de material. O melhor comportamento da tensão máxima da aderência τ_u e menor deslizamento s_u é o aço. As barras de GFRP têm alto valor de tensão máxima de aderência τ_u , porém, o valor de deslizamento na ruptura s_u é muito maior do que os das barras de aço e das barras de carbono.

Tabela 5-4: Resumo dos dados médios experimentais de ensaios Pull-Out.

Modelo	$\tau_{0,01}$ (MPa)	$\tau_{0,1}$ (MPa)	τ_1 (MPa)	τ_m (MPa)	τ_u (MPa)	S_u (mm)	F_u (kN)	σ_{u-ad} (MPa)
CFRP	2,12	2,64	2,86	2,54	3,08	0,47	9,68	123,21
GFRP	3,43	4,03	7,75	5,07	10,61	6,27	33,34	424,50
Aço	5,67	6,01	10,21	7,30	10,47	1,40	32,88	418,64

Na Figura 6-6 se observam as linhas que definem o valor entre a tensão média τ_m e a tensão última s_u da aderência, para um deslizamento fixo de $s_m = 0,37$ mm, e o deslizamento último s_u para as barras de cada material.

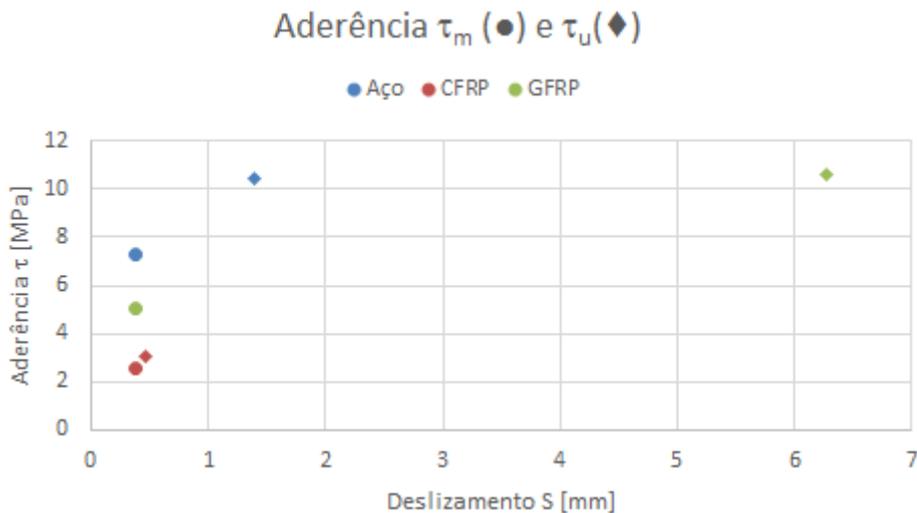


Figura 5-6: Valores S_m , τ_m e S_u , τ_u para barras de armadura

Se observa que nas barras de GFRP o valor de deslizamento último s_u é aproximadamente 4,5 vezes maior do que o aço, e 13 vezes maior do que barras CFRP. É um valor alto considerando-se que todos os corpos de prova apresentaram modo de ruptura por arrancamento. A razão desse comportamento é devido ao módulo de elasticidade, que é 27% do que o do módulo de elasticidade do aço.

Além do baixo módulo de elasticidade axial à tração das barras GFRP, a resistência às tensões tangenciais ou à força cortante é ainda menor. Essa é uma característica para esse tipo de barras devido ao processo de fabricação ortotrópico das mesmas.

É por essa razão que as barras GFRP exibem altos valores de deslizamento antes de atingir a tensão de ruptura da aderência. As barras GFRP têm maior intervalo de comportamento elástico e um efeito Poisson mais acentuado, se contraindo transversalmente perante as solicitações axiais.

Nas Tabelas 5-1 à 5-4 têm-se as tensões de tração da barra na ruptura da aderência σ_{u-ad} ; esse dado é útil para se comparar com as tensões de ruptura por tração das mesmas barras.

Os dados experimentais de tração, Silva (2014), nas barras a maior tensão de ruptura σ_u é a das barras de CFRP com 1482 MPa. A mais baixa é a das barras GFRP com 633 MPa, e no caso do aço a tensão de ruptura propriamente é de 810 MPa, mas o limite de escoamento é de 650 MPa, que é o valor válido para se comparar com as barras FRP, as quais não exibem escoamento (Tabela 5-5). Na Figura 5-7 tem-se a comparação gráfica desses valores.

Tabela 5-5: Valores de tensão de tração das barras σ_{u-ad} e σ_u para ruptura da aderência e ruptura da barra, respectivamente.

	Aço	CFRP	GFRP
σ_{ad} (MPa)	418,62	123,20	424,49
σ_u (MPa)	649,70	1482,14	633,02

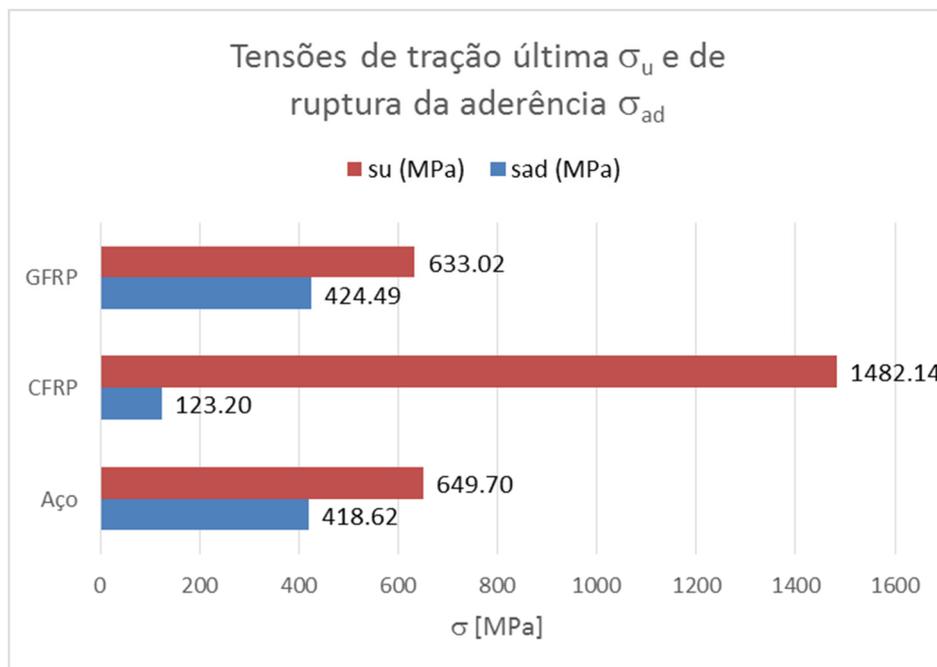


Figura 5-7: Tensões de tração na barra, ruptura da barra vs. ruptura da aderência.

5.4 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANALITICOS

No item 3.4 foram apresentados alguns modelos analíticos para estimar o comportamento da aderência entre as barras de armadura e o concreto. No caso de aderência entre concreto e barras de aço a FIB Bulletin 65 (2012) apresenta a curva analítica de tensão de aderência vs. deslizamento de quatro estágios, a qual estabelece o valor máximo de tensão de aderência em função do valor de resistência à tração do concreto. Na Figura 5-8 mostra-se uma comparação entre a curva teórica BEP, adotada na FIB Bulletin 65 (2012) e os valores experimentais obtidos nesta pesquisa, e os valores experimentais obtidos por Almeida Filho (2006).

Aderência Barras de Aço

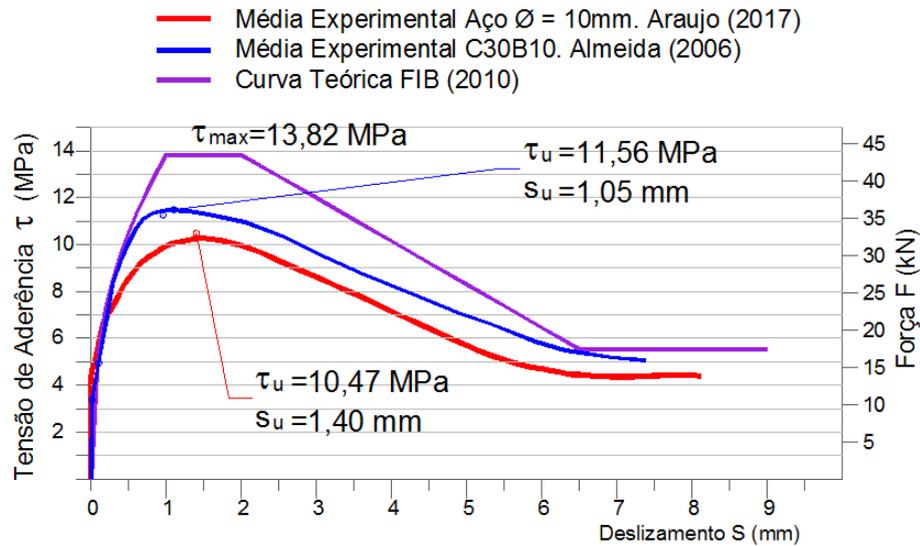


Figura 5-8: Comparação entre valores experimentais e analíticos da curva tensão da aderência vs. deslizamento $\tau - s$ para barras de aço.

Segundo a FIB Bulletin 65 (2012) devido à variação entre características tais como, conformação superficial, tipo de matriz, tipo de fibra, fração volumétrica, *etc.* das barras de FRP; as curvas analíticas de tensão de aderência vs. deslizamento devem ser calibradas para cada tipo de material ou entre padrões de fabricação iguais.

Existem três alternativas teóricas para o ramo ascendente da curva, e uma relação linear decrescente após a tensão última de ruptura da aderência. Na Figura 5-9 mostra-se a curva $\tau - s$ comparando-se os valores experimentais obtidos nos ensaios GFRP com os valores analíticos descritos na FIB Bulletin 65 (2012).

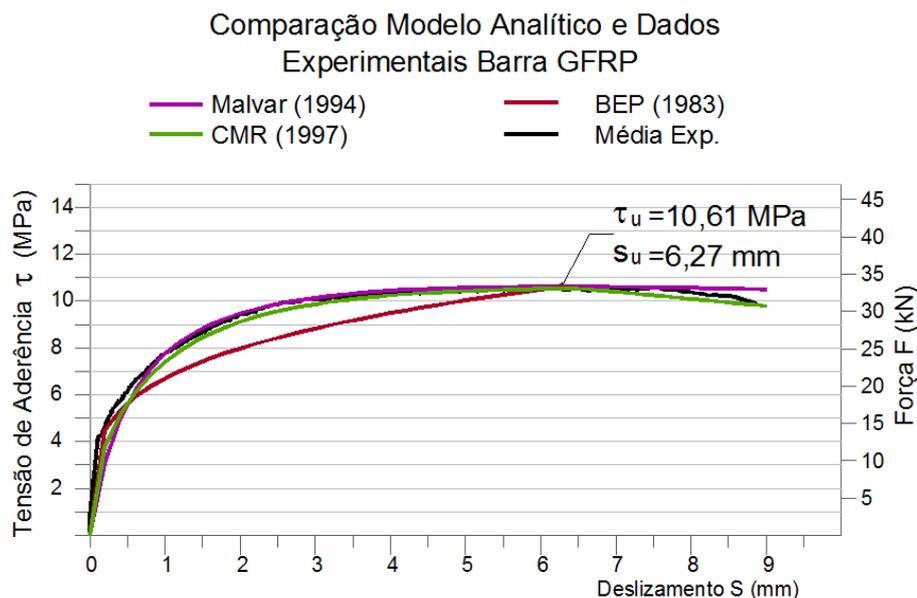


Figura 5-9: Comparação entre valores experimentais e analíticos da curva tensão da aderência vs. deslizamento $\tau - s$ para barras de GFRP

A Tabela 5-6 apresenta os coeficientes que foram utilizados em cada uma das expressões empregadas. Os valores das constantes foram obtidos por calibração para melhor adequar o comportamento observado.

Tabela 5-6: Constantes empíricas adotadas no modelo analítico para GFRP

Constantes empíricas por modelo analítico				
Malvar (1994)		BPE (1983)	CMR (1997)	
F	G	α	S_r	β
12	1,2	0,25	1,5	0,5

As Figuras 5-10, 5-11 e 5-12 mostram a comparação entre as curvas de Couto (2007) e as obtidas nesta pesquisa, considerando-se diferentes valores para as constantes empíricas.

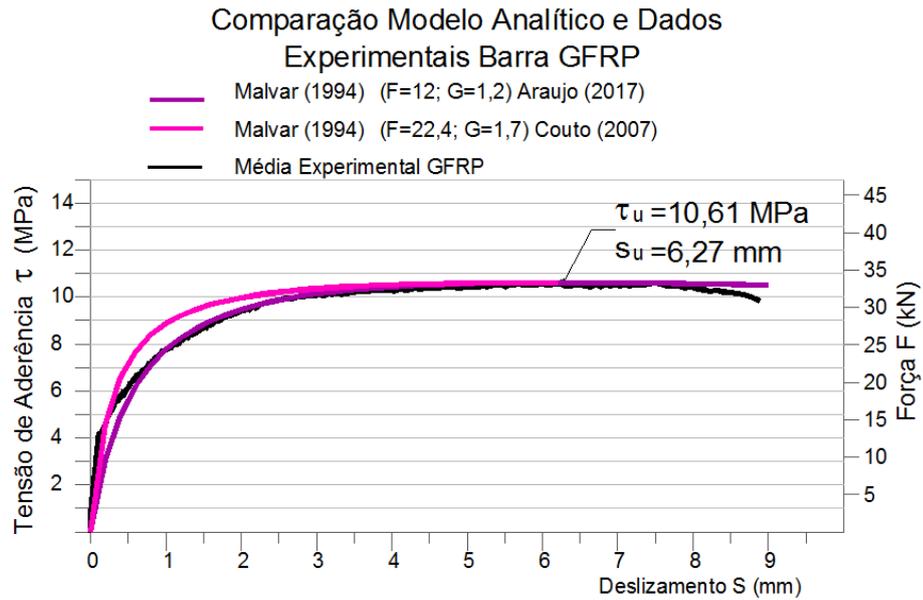


Figura 5-10: Comparação entre valores experimentais e analíticos da curva tensão da aderência vs. deslizamento $\tau - s$ para barras de GFRP segundo Malvar (1994).

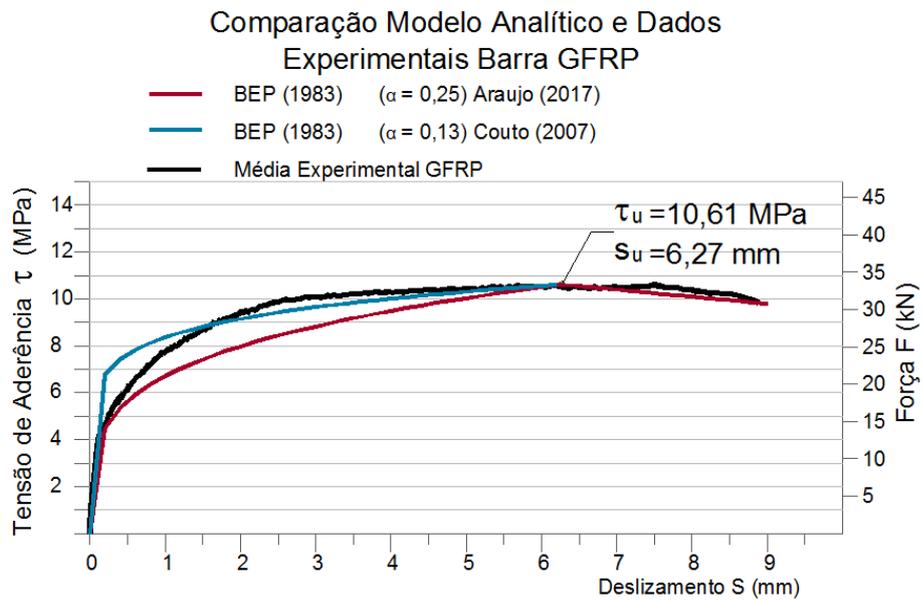


Figura 5-11: Comparação entre valores experimentais e analíticos da curva tensão da aderência vs. deslizamento $\tau - s$ para barras de GFRP segundo BEP(1983).

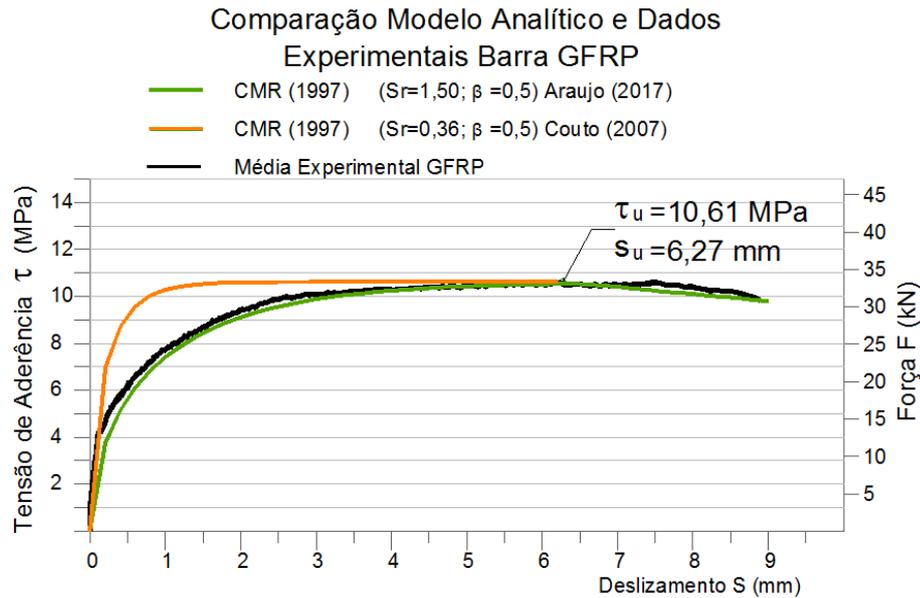


Figura 5-12: Comparação entre valores experimentais e analíticos da curva tensão da aderência vs. deslizamento $\tau - s$ para barras de GFRP segundo CMR(1997).

Na Tabela 5-7 tem-se os valores das constantes empíricas empregadas na elaboração do gráfico teórico para as barras GFRP. É importante destacar que as barras utilizadas por Couto (2007) são de fabricação americana, e têm uma conformação superficial com areia impregnada, além das nervuras helicoidais. As barras GFRP desta pesquisa são de fabricação nacional e não têm areia adicionada na superfície.

Tabela 5-7: Constantes empíricas adotadas na comparação de modelos.

	Constantes Empíricas Adotadas				
	Malvar (1994)		BPE (1983)	CMR (1997)	
	F	G	α	S_r	β
Araujo (2017)	12	1,2	0,25	1,5	0,5
Couto (2007)	22,4	1,7	0,13	0,36	0,5

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES

Os objetivos deste trabalho foram o de estudar experimentalmente o comportamento da aderência entre barras de aço e de polímeros reforçados com fibras de carbono e de vidro, em concreto convencional, e o de analisar os diferentes comportamentos desses materiais.

Os valores experimentais obtidos permitiram construir as curvas do comportamento da aderência. Nesses gráficos se observam três tipos diferentes desse comportamento perante forças de arrancamento aplicadas às barras.

Em relação à tensão máxima média da aderência τ_u de barras de aço e de GFRP apresentaram valores altos, enquanto que as barras de CFRP exibiram valores baixos de aproximadamente 30% em relação a barras de aço e GFRP

O valor de deslizamento na ruptura s_u da aderência para barras de GFRP foi 4,5 vezes maior do que barras de aço e 13 vezes maior do que barras de CFRP, a razão deste comportamento é devido ao baixo módulo de elasticidade de barras GFRP, o qual é 27% em relação ao módulo de elasticidade do aço e 50% em relação ao módulo de elasticidade das barras CFRP.

Barras de GFRP mostraram uma tensão máxima média τ_u da aderência próxima à do aço porém ao se considerar a tensão de tração na barra σ_u , barras de aço atingiram 64% do limite de escoamento, e 52% da tração última de ruptura. Barras GFRP atingiram 67% da tração última de ruptura o que mostra que para barras GFRP pode ocorrer ruptura por tração antes da ruptura da tensão de aderência. Assim como aconteceu em um dos corpos de prova ensaiados.

Constantes empíricas analíticas para a avaliação do comportamento da aderência $\tau - s$ segundo o modelo BEP (1983), CMR (1997) e Malvar (1994) foram desenvolvidos para barras de GFRP de fabricação nacional. Se determinou que o modelo analítico CMR (1997) é o que melhor reproduz o comportamento da aderência para as barras GFRP desse estudo.

Resultados experimentais da pesquisa sobre aderência de barras de aço de Almeida Filho (2006) as quais consistiram de ensaios de arrancamento *Pull-Out* foram comparadas com esse estudo. A comparação mostrou similitude da curva $\tau - s$ obtida dos resultados experimentais.

As constantes empíricas para os modelos BEP (1983), CMR (1997) e Malvar (1994) adotadas na pesquisa de Couto (2007) foram avaliadas e comparadas com os parâmetros determinados nesse estudo. Observou-se que essas constantes não reproduzem o comportamento experimental desse estudo, sendo necessária a determinação de diferentes constantes. Se confirmou dessa forma a necessidade de definir parâmetros analíticos para cada tipo específico de barras GFRP.

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como propostas para trabalhos futuros seguem-se:

1) entre as diversas configurações experimentais, recomenda-se variar o comprimento de aderência em atenção à distância entre nervuras das barras GFRP caso forem nervuradas. Se recomenda além que os estudos comparativos da aderência entre barras sejam de conformação superficial o mais próxima possível entre estas, pois as barras FRP apresentam muitas variáveis e configurações diferentes de usinagem segundo o fabricante.

2) ensaios de durabilidade como a resistência à umidade, ambiente alcalino e fadiga, entre outros são recomendados para a certificação da vantagem dessa característica das barras de materiais compósitos sobre barras de aço. Além se recomenda estudar o comportamento da aderência ao longo do tempo.

3) recomenda-se estudar a aderência de barras FRP com concreto auto adensável, o qual tem sido crescentemente empregado nos últimos anos pela sua praticidade e fluidez, além de outras vantagens, e se comparar os resultados obtidos com os do concreto convencional.

4) para a realização de ensaios do tipo *pull-out* recomenda-se a confecção de pelo menos cinco corpos de prova para cada configuração com o objetivo de reduzir a dispersão dos dados experimentais.

5) estudar a aderência em função da posição da barra no elemento estrutural e a direção de concretagem, pois ensaios desse tipo são mais representativos de estruturas reais de concreto armado.

6) avaliar a aplicação e calibração de modelos numéricos com o objetivo de simular ensaios de aderência para complementar dados experimentais.

7) outros ensaios de aderência como o do tipo viga rotulada ou *hinged-beam* e tração axial direta ou *direct-axial-tension*, entre outros, se recomenda em conjunto com ensaios *pull-out* para obter uma caracterização maior e mais precisa para diferentes tipos de barras GFRP ou CFRP especialmente as de fabricação nacional.

7 REFERÊNCIAS

ACHILLIDES, Z. **Bond behaviour of FRP bars in concrete**. Universidade de Sheffield, Departamento Engenharia Civil. Sheffield, Inglaterra, RU, p. 368. 1998.

ACHILLIDES, Z.; PILAKOUTAS, K. Bond Behavior of Fiber Reinforced Bars under Direct Pullout Conditions. **Journal of Composites for Construction**, v. 8, n. 2, 2004. ISSN 1090-0268/2004/2-173-181.

ACI 408R-03. **Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension**. American Concrete Institute Committee 408. [S.l.]: [s.n.]. 2003.

ACI 440.1R-06. **Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars**. American Concrete Institute Committee 440. [S.l.]: [s.n.]. 2006.

ACI 440.3R-04. **Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures**. American Concrete Institute Committee 440. [S.l.]: [s.n.]. 2004.

ACI 440R-07. **Report on Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) Reinforcement for Concrete Structures**. American Concrete Institute Committee 440. [S.l.]: [s.n.]. 2007.

ALWIS, K.; BURGOYNE, C. Time-Temperature Superposition to Determine the Stress-Rupture of Aramid Fibres. **Applications of Composite Materials**, v. 13, p. 249-264, 2006. ISSN DOI 10.1007/s10443-006-9017-8.

BANK, L. C. **Composites for Construction**. 1ª. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, v. I, 2006.

BANK, L. C.; GENTRY, T. R. Accelerated Test Methods to Determine the Long Term Behaviour of FRP Composites Structures: Environmental Effects. **Journal of Reinforced Plastic and Composites**, v. 14, 1995. ISSN 0731-6844/95/06.

BOOTLE, J.; BURZESI, F.; FIORINI, L. Design Guidelines. **ASM Handbook**, v. 21, n. 1, 2001.

COSENZA, E.; MANFREDI, G.; REALFONSO, R. Behavior and Modeling of Bond of FRP bars to Concrete. **Journal of Composites for Construction**, v. 1, n. 2, p. 40-51, maio 1997.

COUTO, I. A. **Análise Teórica e Experimental do Comportamento da Aderência entre o Concreto e Barras de Fibra de Vidro Impregnada por Polímero**. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia São Carlos. São Carlos, SP, p. 153. 2007.

DARWIN, D.; Tholen, M; Idun, E; Zuo, J. Splice Strength of High Relative Rib Area Reinforcing Bars. **Structural Engineering and Engineering Materials, SL Report 95-3**, Lawrence, KS, USA, mar. 1995.

FIB·CEB·FIP, Bulletin 10. **Bond of Reinforcement in Concrete**. State-of-the-art report by Task Group Bond Models. [S.l.]: Fédération Internationale du Béton. 2000.

FIB·CEB·FIP, Bulletin 40. **Fiber Reinforced Polymer Reinforcement in Reinforced Concrete Structures**. [S.l.]: Fédération Internationale du Béton. 2007.

FOCACCI, F.; NANNI, A.; BAKIS, C. Local Bond-Slip Relationship for FRP Reinforcement in Concrete. **Journal of Composites for Construction**, v. 4, n. 1, 2000. ISSN ISSN 1090-0268/00/0001-0024-0031.

ISO 10406-1. **Fibre-Reinforced Polymer (FRP) reinforcement of concrete - Test methods - Part 1: FRP Bars and Grids**. Geneve: [s.n.]. 2008. p. 48.

KARBHARI, V. M.; Chin, J. W.; Hunston, D.; Benmokrane, B. Durability Gap Analysis for Fiber-Reinforced Polymer. **American Society of Civil Engineers - Journal of Composites for Construction**, v. 7, n. 3, 2003. ISSN ISSN 1090-0268/2003/3-238-247.

KATZ, A. Bond Mechanism of FRP Rebars to Concrete. **Materials and Structures**, v. 32, December 1999.

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

MCKAGUE, L. Thermoplastic Resins. **ASM Handbook**, v. 21, n. 1, 2001.

NBR 11578. **Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 11578 Cimento Portland Composto**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1991.

NBR 6118. **Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6118 Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2014. p. 223.

NBR NM 248. **Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR NM 248 Agregados – Determinação da Composição Granlométrica**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2003.

NILSON, A. H.; DARWIN, D.; DOLAN, C. W. **Design of Concrete Structures**. 14^a ed. [S.l.]: McGraw Hill, v. 1, 2010.

SAGÜÉS, A.; POWERS, R.; KESSLER, R. Corrosion Performance of Epoxy-Coated Rebar in Florida Keys Bridges. **NACE International**, Houston, v. 1, 2001.

SCHEIBE, M.; ROSTASY, F. S. Stress-Rupture of AFRP subjected to Alkaline Solutions and Elevated Temperature - Experiments. **Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Proceeding of the Second International Symposium Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures**, p. 67-73, 1995.

SILVA, R. C. B. E. **Comportamento de Vigas de Concreto Armadas com Barras de CFRP e GFRP para Infraestrutura de Transportes**. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, RJ. 2014.

SOORIYAARACHCHI, H.; PILAKOUTAS, K.; BYARS, E. Tension Stiffening Behavior of GFRP-Reinforced Concrete. **Proceedings of 7th International Symposium for Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, FRPRCS7**, n. SP 230-55, p. 975-989, 2005.

TEPFERS, R. **A Theory of Bond Applied to Overlapped Tensile Reinforcement Splices for Deformed Bars, Phd Thesis**. Division of Concrete Structures, Chalmers University of Technology. Goteborg, Sweden. 1973.

TEPFERS, R. Bond clause proposals for FRP-barsrods in concrete based on CEBFIP Model Code 90. Part 1 Design bond stress for FRP reinforcing bars. **Structural Concrete**, v. 7, n. 2, 2006.

TEPFERS, R.; DELORENZIS, L. Bond of Reinforcement in Concrete - A Challenge. **Mechanics of Composite Matherials**, Goteborg, Sweden, v. 39, n. 4, 2003. ISSN 0191-5665/03/3904-031.

WALLENBERGER, F. T.; WATSON, J. C.; LI, H. Glass Fibers. **ASM Handbook**, v. 21, n. 1, 2001.

WALSH, P. J. Carbon Fibers. **ASM Handbook**, v. 21, n. 1, 2001.

YAMAGUCHI, T.; Kato, Y; Nishimura, T; Uomoto, T. Creep Rupture of FRP Rods Made of Aramid, Carbon. **Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures FRPRCS-3**, Tokyo, Japan, v. 2, p. 179-186, 1997.