



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Déborah Rebouças da Cunha

**Estudo da aderência de barras poliméricas reforçadas com fibras de vidro  
(GFRP) ao concreto**

Rio de Janeiro

2019

Déborah Rebouças da Cunha

**Estudo da aderência de barras poliméricas reforçadas com fibras de vidro (GFRP) ao  
concreto**



Dissertação de mestrado apresentada como requisito final para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Regina Helena Ferreira de Souza

Rio de Janeiro

2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

C972 Cunha, Déborah Rebouças da.  
Estudo da aderência de barras poliméricas reforçadas com fibras de vidro (GFPR) ao concreto / Déborah Rebouças da Cunha. – 2019. 111f.

Orientadora: Regina Helena Ferreira de Souza.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Resistência de materiais - Teses. 3. Materiais de construção - Testes - Teses. 4. Construção mista - Teses. 5. Plástico reforçado com vidro - Teses. 6. Concreto - Teses. I. Souza, Regina Helena Ferreira de. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 624.016:691

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Déborah Rebouças da Cunha

**Estudo da aderência de barras poliméricas reforçadas com fibras de vidro (GFRP) ao  
concreto**

Dissertação de mestrado apresentada  
como requisito final para obtenção do  
título de Mestre, ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade do Estado do Rio de  
Janeiro.

Aprovado em:

Banca Examinadora:

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Regina Helena Ferreira de Souza  
Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Ana Maria Abreu Jorge Teixeira  
Instituto Militar de Engenharia – IME

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Margareth da Silva Magalhães  
Faculdade de Engenharia – UERJ

Rio de Janeiro

2019

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha família, sempre ao meu lado.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar força, dedicação e coragem em todo momento de angústia durante o mestrado.

Aos meus pais, Cláudio e Vera, pelo amor, carinho e por me incentivarem a ir sempre mais longe.

À minha irmã, Juliane, pela amizade e apoio durante todo o curso.

Ao meu companheiro, Daniel Fabrizio, por viver comigo todos os momentos dessa caminhada, sempre me incentivando e mostrando que sou capaz.

À minha orientadora, Prof<sup>a</sup> Regina Helena Souza, por toda paciência e união durante esta trajetória, mostrando sempre os melhores caminhos e orientando com excelência, para juntas obtermos sucesso neste trabalho.

Às Prof<sup>as</sup> Maria Elizabeth Tavares e Margareth Magalhães, pelos ensinamentos e ajuda prestada dentro e fora do laboratório.

Ao mestre e amigo Luiz Otávio, pelos ensinamentos, companheirismo e disponibilidade em sempre ajudar, visando o melhor para a pesquisa.

Aos meus colegas de mestrado, pelo companheirismo e ajuda prestada e por fazerem esta jornada mais leve.

À UERJ, que me acolheu como aluna de Engenharia Civil e agora como mestranda em Estruturas.

Às empresas Stratus, pela parceria e disponibilidade em apoiar a pesquisa, Lafarge-Holcim e Tecnosil, pela doação de cimento e aditivo, essenciais para o desenvolvimento deste estudo.

## RESUMO

CUNHA, R. D. *Estudo da aderência de barras poliméricas reforçadas com fibras de vidro (GFRP) ao concreto*. 2019. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

Dentre os novos materiais para a construção civil que vêm sendo estudados em substituição ao aço, estão as barras não-metálicas. Algumas vantagens no seu uso podem ser citadas como: possibilidade de menor espessura de cobrimento, alta resistência à tração, baixo peso específico e não condutividades elétrica, térmica e magnética. Este trabalho analisa experimentalmente a aderência entre barras de GFRP e concreto por meio de ensaios de arrancamento (Pull Out), adaptados das normas canadense e americana, CSA S806-12 e ACI 440.3R-04, respectivamente. Foram considerados como parâmetros o comprimento de aderência e o diâmetro da barra. Os resultados experimentais foram comparados com formulações normativas propostas e resultados de pesquisas anteriores da literatura técnica. Nos modelos experimentais foi possível analisar a influência das propriedades mecânicas das barras, assim como as tensões de aderência, a influência do diâmetro das barras, modos de ruptura dos ensaios e o coeficiente de conformação superficial. Foram ensaiadas barras com cinco diâmetros diferentes, e três comprimentos de aderência, totalizando cinquenta e sete modelos neste estudo.

Palavras-chave: Barras de GFRP; Aderência barra-concreto; Ensaio de arrancamento.

## ABSTRACT

CUNHA, R. D. *A study of the bond between glass fiber reinforced polymer bars (GFRP) and concrete*. 2019. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

New material that have been studied in construction engineering to replace the steel include non-metallic bars. Some advantages in its use can be cited as the possibility of lower cover thickness, high tensile strength, low specific weight and no electrical, thermal and magnetic conductivity. This work experimentally analyzes the bond between GFRP bars and concrete through pull-out tests, adapted from Canadian and American standards, CSA S806-12 and ACI 440.3R-04. The parameters considered were the bonded length and the bar diameter. The experimental results were compared with normative formulations and results from previous studies available in literature. In the experimental models it was possible to analyze the influence of the mechanical properties of the bars, as well as the bond stresses, the influence of the bars diameter, the failures modes and the surface conformation coefficient. Five different diameters and three bonded lengths were tested, totalizing fifty-seven models in this study.

Keywords: Glass Fiber Reinforced Polymer bars; Bond stress; Pull-out test.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de barras. (ACI 440.1R-15).....	16
Figura 2- Hospital no Texas onde utilizou-se GFRP nas vigas e pilares. (ACI 440-R, 96).....	18
Figura 3- Substituição de barra de aço por GFRP no paredão que protege a rodovia Honoapiilani, em Maui, HI. (ACI 440.1R-15) .....	18
Figura 4- Tabuleiro de ponte em Emma Park Bridge com barras de GFRP. (ACI 440.1R-15) .....	18
Figura 5- Tabuleiro de ponte construída com barras de GFRP em Kansas, EUA. (ACI 440.1R- 15).....	19
Figura 6- Curva tensão-deformação. (REIS, 2009).....	20
Figura 7- Processo de pultrusão, retirado do catálogo da Stratus. (apud TEIXEIRA, 2018)...	23
Figura 8- Conformações superficiais das barras GFRP. (FIB 9.3 TG, 2003) .....	25
Figura 9- Curva deformação por tempo. (FIB Bulletin 40, 2007).....	28
Figura 10- Curva típica de tensão de aderência média versus deslizamento. (Adaptado do FIB BULLETIN 10, 2000) .....	32
Figura 11- Deformação do concreto após a formação de fissura (GOTO, 1971) .....	33
Figura 12- Representação esquemática do equilíbrio entre o anel de tensão e a força radial de aderência na zona de ancoragem. (FIB BULLETIN 10, 2000).....	33
Figura 13- Modelo de arrancamento com barras de GFRP após o ensaio. (ACHILIDES E PILAKOUTAS, 2004).....	34
Figura 14- Ruptura por fendilhamento do concreto (XINGYU GU, BIN YU E MING WUB, 2015).....	35
Figura 15- Ruptura por fendilhamento do concreto (COUTO, 2007).....	35
Figura 16- Ruptura da barra (Xingyu Gu, Bin Yu e Ming Wub, 2015).....	36
Figura 17- Distribuição de tensão normal em uma barra GFRP sobre carregamento axial. (ACHILIDES E PILAKOUTAS, 2004).....	36
Figura 18- Formação de espaços vazios devido ao posicionamento da barra na seção do concreto. (COUTO, 2007).....	38
Figura 19- Gráfico tensão x deslizamento. (FIB BULLETIN 10, 2000) .....	40
Figura 20- Dados experimentais x modelos analíticos. (FIB BULLETIN 10, 2000). .....	41
Figura 21- Método com barra moldada no centro do bloco. (ACI 440.3R-04).....	46
Figura 22- Método com duas barras moldadas. (ACI 440.3R-04) .....	46

Figura 23- Método de ensaio com uma barra. (CSA S806-12).....	48
Figura 24- Método de ensaio com duas barras. (CSA S806-12).....	48
Figura 25- Esquema do ensaio de arrancamento. (CSA S806-12).....	49
Figura 26 - Modelo de ensaio. (PECCE et al, 2001) .....	50
Figura 27- Gráfico tensão x deslizamento para extremidades livre e carregada. (PECCE et al, 2001).....	51
Figura 28- Gráfico tensão x deslizamento para extremidades carregada e não carregada. (ACHILLIDES e PILAKOUTAS, 2004) .....	52
Figura 29- Ruptura combinada no ensaio de arrancamento. (COUTO, 2007).....	54
Figura 30- Cálculo para área (as) das barras. (BAENA et al, 2009) .....	56
Figura 31- Esquema do ensaio. (BEIRAL, 2012) .....	57
Figura 32- Barras ensaiadas sem e com cabeça de ancoragem. (GONÇALVES, 2013) .....	58
Figura 33- Esquema de ensaio de arrancamento, $L_d = 5d$ (GONÇALVES,2013).....	59
Figura 34 - Modo de ruptura dos ensaios. (GONÇALVES, 2013) .....	59
Figura 35- Modos de ruptura dos ensaios. (GU et al, 2015) .....	61
Figura 36 - Gráficos deslizamento x força de arrancamento para barras de diâmetro 8 mm com utilização de água potável, $l_d = 5d$ e $l_d = 10d$ . (FREITAS, 2016) .....	63
Figura 37 - Gráficos deslizamento x força de arrancamento para barras de diâmetro de 12 mm com utilização de água potável, $l_d = 5d$ e $l_d = 10d$ . (FREITAS, 2016) .....	63
Figura 38 - Rupturas associadas à resistência à compressão do concreto. (YAN et al, 2016) .	65
Figura 39 - Resistência de aderência-resistência à compressão do concreto $f_c'$ . (YAN et al, 2016).....	66
Figura 40 - Resistência de aderência normatizada- $l_d/db$ . (YAN et al, 2016).....	66
Figura 41 - Deslizamento x $L_d$ . (YAN et al, 2016).....	67
Figura 42 - Gráfico dos modos de ruptura. (YAN et al, 2016) .....	67
Figura 43 - Comparativo entre os ensaios de aderência. ....	69
Figura 44 - Ensaio de área. ....	73
Figura 45 – Esquema de ensaio, com dispositivo de ancoragem para ensaio de tração.....	75
Figura 46- Forma para concretagem.....	77
Figura 47- Slump Test. ....	77
Figura 48- Corpos de prova concretados. ....	78
Figura 49- Esquema de montagem do ensaio. ....	78
Figura 50- Aparelho de medição do ensaio. ....	79
Figura 51- Ancoragem do tubo de pvc na extremidade da barra.....	79

Figura 52- Ancoragem do tubo de aço na extremidade da barra.....	80
Figura 53- Destruição da nervura devido a ruptura por arrancamento.....	87
Figura 54-Ruptura por arrancamento, com esmagamento da nervura e pó residual no concreto. .....	88
Figura 55- Excesso de nervura na superfície do bloco, caracterizando arrancamento.....	88
Figura 56- Nervura fraturada na superfície do bloco após ensaio de arrancamento. ....	89
Figura 57- Ruptura por fendilhamento. ....	90
Figura 58- Ruptura por fendilhamento. ....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Propriedades das matrizes poliméricas das barras de FRP.....	21
Tabela 2-Propriedade das fibras de vidro. ....	22
Tabela 3 - Densidade dos materiais compósitos.....	24
Tabela 4 - Valores típicos dos coeficientes de expansão térmica ( $\times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$ ).....	24
Tabela 5- Propriedades das barras. ....	26
Tabela 6- Características das barras ensaiadas. ....	55
Tabela 7 - Resultado da geometria das barras .....	56
Tabela 8 - Descritivo dos parâmetros ensaiados. ....	60
Tabela 9 - Propriedades do aditivo. ....	71
Tabela 10 - Traço em massa do concreto. ....	71
Tabela 11 - Resultados dos ensaios de caracterização do concreto.....	72
Tabela 12 - Ensaio da área da seção transversal.....	73
Tabela 13 - Cálculo do $\alpha_s$ experimental. ....	74
Tabela 14 - Resultado do ensaio de queima. (TEIXEIRA, 2018).....	74
Tabela 15 - Resultado do ensaio de tração. (OLIVEIRA, 2019).....	76
Tabela 16 - Resumo dos modos de ruptura dos ensaios. ....	91
Tabela 17 - Valores de tensão de aderência. ....	92
Tabela 18 - Análise tensão de aderência em relação ao ACI.1R-15. ....	95
Tabela 19 - Cálculo $K_5$ e $L_d$ , segundo CSA S806-12.....	96

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Ensaio da barra de 6,85 mm, Ld= 5 $\phi$ . .....	81
Gráfico 2- Ensaio das barras 6,85mm, Ld= 7,5 $\phi$ . .....	81
Gráfico 3- Ensaio das barras 6,85 mm, Ld= 10 $\phi$ . .....	82
Gráfico 4- Ensaio das barras de 9,67 mm, Ld= 5 $\phi$ . .....	82
Gráfico 5- Ensaio das barras de 9,67 mm, Ld= 7,5 $\phi$ . .....	82
Gráfico 6- Ensaio das barras de 9,67 mm, Ld= 10 $\phi$ . .....	83
Gráfico 7- Ensaio das barras de 13 mm, Ld= 5 $\phi$ . .....	83
Gráfico 8- Ensaio das barras de 13 mm, Ld= 7,5 $\phi$ . .....	83
Gráfico 9- Ensaio das barras de 13 mm, Ld= 10 $\phi$ . .....	84
Gráfico 10- Ensaio das barras de 16,35 mm, Ld=5 $\phi$ . .....	84
Gráfico 11- Ensaio das barras de 16,35 mm, Ld= 7,5 $\phi$ . .....	84
Gráfico 12- Ensaio das barras de 16,35 mm, Ld= 10 $\phi$ . .....	85
Gráfico 13- Ensaio das barras de 18,34 mm, Ld= 5 $\phi$ . .....	85
Gráfico 14- Ensaio das barras de 18,34 mm, Ld= 7,5 $\phi$ . .....	85
Gráfico 15- Ensaio das barras de 18,34 mm, Ld= 10 $\phi$ . .....	86
Gráfico 16 - Tensão média por diâmetro e Ld. ....	93
Gráfico 17 - Tensões máximas por diâmetro e Ld. ....	93
Gráfico 18- Forças máximas médias por diâmetro e Ld. ....	97

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1. CARACTERÍSTICAS DAS BARRAS CONSTITUÍDAS POR MATERIAIS</b>	
<b>COMPÓSITOS FRP. ....</b>	<b>16</b>
1.1. BREVE HISTÓRICO .....	17
1.2. CARACTERÍSTICAS DE GFRP .....	20
1.2.1. <i>Matriz polimérica</i> .....	20
1.2.2. <i>Fibras</i> .....	22
1.2.3. <i>Processo de fabricação</i> .....	22
1.3. PROPRIEDADES DAS BARRAS DE GFRP.....	23
1.3.1. <i>Densidade</i> .....	23
1.3.2. <i>Coefficiente de expansão térmica</i> .....	24
1.3.3. <i>Geometria</i> .....	24
1.3.4. <i>Condutividade eletromagnética</i> .....	25
1.3.5. <i>Resistência à tração</i> .....	25
1.3.6. <i>Resistência à compressão</i> .....	26
1.3.7. <i>Resistencia ao cisalhamento</i> .....	27
1.3.8. <i>Fluência</i> .....	27
1.3.9. <i>Fadiga</i> .....	28
1.3.10. <i>Resistência à temperatura e ao fogo</i> .....	29
1.3.11. <i>Resistência aos raios ultravioletas</i> .....	29
1.3.12. <i>Resistencia à umidade</i> .....	30
1.3.13. <i>Resistencia aos álcalis e carbonatação</i> .....	30
<b>2. ADERÊNCIA ENTRE A BARRA DE GFRP E O CONCRETO.....</b>	<b>31</b>
2.1. COMPORTAMENTO DA ADERÊNCIA.....	31
2.2. MODO DE RUPTURA DO ENSAIO DE ARRANCAMENTO .....	34
2.3. FATORES QUE INFLUENCIAM A ADERÊNCIA ENTRE BARRAS DE GFRP E O	
CONCRETO. ....	36
2.3.1. <i>Diâmetro da barra</i> .....	36
2.3.2. <i>Conformação superficial da barra</i> .....	37
2.3.3. <i>Posição das barras na seção transversal do concreto</i> .....	37
2.3.4. <i>Cobrimento do concreto</i> .....	38

2.3.5.	<i>Resistência do concreto</i> .....	38
2.3.6.	<i>Durabilidade</i> .....	39
2.3.7.	<i>Armadura Transversal</i> .....	39
2.4.	MODELO ANALÍTICO DA ADERÊNCIA PARA AS BARRAS NÃO METÁLICAS .....	39
2.5.	DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS NORMATIVOS DE PROJETO.....	41
2.5.1.	<i>ACI 440.1R-15</i> .....	41
2.5.2.	<i>CSA Standards S806-12</i> .....	41
2.6.	ENSAIOS NORMATIZADOS.....	43
2.6.1.	<i>ACI 440.3R-04</i> .....	43
2.6.2.	<i>CSA S806-12</i> .....	48
2.7.	ESTUDOS ANTERIORES SOBRE ADERÊNCIA ENTRE BARRAS DE GFRP E CONCRETO	50
2.7.1.	<i>M.Pecce; G.manfredi; R.Realfonzo; E.Cosenza – Experimental and Analytical Evaluation of Bond Properties of GFRP bars. (2001)</i> .....	50
2.7.2.	<i>Katzl, A. - Bond to Concrete of FRP Rebars and Tendon. (2001)</i> .....	51
2.7.3.	<i>Achillides Z, Pilakoutas K. - Bond Behavior of Fiber Reinforced Polymer bars under direct Pullout Conditions. (2004)</i> .....	51
2.7.4.	<i>Iara Couto - Análise teórica e experimental do comportamento da aderência entre concreto e barras de fibra de vidro impregnadas por polímeros. (2007)</i> .....	53
2.7.5.	<i>Baena, M; Torres, L; Turon, R; Barris,C. - Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test. (2009)</i> .....	55
2.7.6.	<i>Beiral, W. V. – Aderência entre concreto e barras lisas de Polímero reforçado com Fibra de Vidro (2012)</i> .....	57
2.7.7.	<i>Gonçalves, J. F. G. - Aderência de varões GFRP no betão (2013)</i> .....	58
2.7.8.	<i>Gu, X.; Yu, B. e Wub, M. - Experimental study of the bond performance and mechanical response of GFRP reinforced concrete (2015).</i> .....	60
2.7.9.	<i>Freitas, N. - Sustentabilidade de Estruturas de Betão em Ambiente Marítimo com Recurso a FRP. (2016)</i> .....	61
2.7.10.	<i>Yan, F.; Lin,Z.; Yang,M. - Bond mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete. (2016)</i> .....	64
2.7.11.	<i>Hossain, K., M., A. - Bond Strength of GFRP Bars Embedded in Engineered Cementitious Composite using RILEM Beam Testing. (2018)</i> .....	68
<b>3.</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>70</b>
3.1.	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	70
3.1.1.	<i>Agregado miúdo</i> .....	70

3.1.2.	<i>Agregado graúdo</i> .....	70
3.1.3.	<i>Cimento</i> .....	70
3.1.4.	<i>Água</i> .....	70
3.1.5.	<i>Aditivo</i> .....	70
3.1.6.	<i>Dosagem do concreto</i> .....	71
3.1.7.	<i>Barras de GFRP</i> .....	72
3.2.	ENSAIO DE ARRANCAMENTO .....	76
3.2.1.	<i>Forma e moldagem</i> .....	77
3.2.2.	<i>Realização do ensaio</i> .....	78
<b>4.</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>81</b>
4.1.	MODOS DE RUPTURA .....	86
4.2.	TENSÕES MÉDIAS DE ADERÊNCIA.....	92
4.3.	TENSÕES MÁXIMAS MÉDIAS.....	93
4.4.	COMPRIMENTO DE ADERÊNCIA.....	95
4.5.	FORÇA DE ARRANCAMENTO.....	96
	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>98</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>101</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>105</b>



## INTRODUÇÃO

Atualmente existem muitas pesquisas que visam o estudo de novos materiais que permitam substituir o aço-carbono da estrutura de concreto convencional, devido a algumas deficiências apresentadas por ele, principalmente, o fato de formar campo elétrico e conseqüente corrosão. À procura de materiais que possuem melhor durabilidade, as barras de polímeros reforçados com fibras de vidro surgem como uma alternativa na construção civil.

Esta tecnologia não é usual no Brasil, porém já está sendo utilizada há algum tempo nos países mais desenvolvidos. As barras poliméricas reforçadas com fibras de vidro, conhecidas como GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer bars), devem ser analisadas quanto ao seu desempenho e influência na matriz cimentícia, principalmente porque suas propriedades se diferem das barras metálicas.

A aderência entre a barra de GFRP e a matriz de concreto tem sido estudada há algum tempo e diversos trabalhos experimentais foram publicados sobre este tema, embora com diferentes métodos de ensaio, nem sempre normatizados. As normas para aço não podem ser utilizadas para este material, já que as propriedades do aço e do GFRP diferem em diversos aspectos. A falta de formulação sobre este material fez surgir a necessidade de normas específicas, entretanto, nenhuma até hoje foi publicada no Brasil.

Este trabalho dá início ao estudo experimental de aderência entre barras de GFRP e concreto no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Foram realizados ensaios de arrancamento e seus resultados foram comparados com pesquisas anteriores sobre o tema e com as formulações propostas pelas normas.

## 1. CARACTERÍSTICAS DAS BARRAS CONSTITUÍDAS POR MATERIAIS COMPÓSITOS FRP.

Materiais compósitos feitos de fibras imersas em resina polimérica são conhecidos como polímero reforçado com fibra (FRP). Barras destes materiais são alternativas às barras de aço carbono adotadas nas estruturas de concreto armado, devido, principalmente, às suas características de não corroerem e não causar interferência magnética. Os materiais de reforço do FRP podem ser de fibra de aramida, fibra de carbono, fibra de vidro ou de basalto. Exemplos de barras de FRP são mostrados na Figura 1. (ACI 440-R, 96)



Figura 1 - Exemplo de barras. (ACI 440.1R-15)

Aplicações bem-sucedidas em todo o mundo usando barras de FRP durante as últimas décadas demonstraram que este material pode ser usado com sucesso, como ilustram as Figuras 2 a 5.

Algumas vantagens e desvantagens das barras FRP quando comparadas às barras de aço nas estruturas de concreto armado são: (ACI 440.1R-15)

- a) Imunidade ao íon cloreto e ataque químico;
- b) Elevada resistência à tração;
- c) Baixo peso específico, um quarto a um quinto do peso específico da barra de aço;
- d) Não conduz corrente magnética, térmica e elétrica (GFRP);
- e) Possibilidade de redução da espessura do concreto;
- f) Dispensa o uso de aditivos para redução da corrosão das barras;
- g) Elevada resistência à fadiga;
- h) Em ambientes corrosivos, vida útil muito superior à do aço;

A seguir serão abordados aspectos importantes sobre as barras de GFRP, tais como seu desenvolvimento histórico, sua estrutura, suas propriedades e características,

bem como aplicações e ensaios para avaliar a aderência entre concreto e barras de aço e barras de GFRP.

### **1.1. Breve Histórico**

O desenvolvimento de polímeros reforçados com fibras (FRP) pode ser atribuído ao uso ampliado de compósitos após a Segunda Guerra Mundial, na década de 1940. A indústria aeroespacial há muito reconheceu as vantagens da alta resistência e leveza dos materiais compósitos e, durante a Guerra Fria, os avanços na indústria aeroespacial e de defesa causaram um aumento em seu uso. Além disso, a economia em rápida expansão dos Estados Unidos exigia materiais baratos para atender às demandas dos consumidores. A pultrusão oferecia um método rápido e econômico de formar peças de perfil constante, e, FRP pultrudados passaram a ser usados em tacos de golfe e varas de pescar. No entanto, apenas na década de 1960 é que esses materiais foram seriamente considerados para uso como armaduras de concreto. (ACI 440.1R-15)

A expansão dos sistemas rodoviários dos Estados Unidos na década de 1950 aumentou a necessidade de fornecimento de manutenção durante todo o ano, de acordo com a Figura 4. Tornou-se comum aplicar sais de degelo em pontes rodoviárias e, como resultado, as armaduras dessas estruturas sofreram corrosão extensa, tornando-se uma grande preocupação e levando a altos custos de manutenção. Várias soluções foram investigadas, incluindo revestimentos galvanizados, revestimentos com fusão eletrostática-spray (resina em pó), concreto impregnado com polímero, revestimentos epóxi, barras constituídas por ligas de aço e barras de GFRP (ACI 440-R, 96). Dessas opções, armaduras revestidas com epóxi pareciam ser a melhor solução e, portanto, implementado em ambientes agressivos de corrosão. Barras de polímero reforçadas com fibra não foram consideradas uma solução viável e não estavam disponíveis comercialmente até o final de 1970.

Outros usos foram desenvolvidos à medida que as vantagens do reforço de FRP se tornaram mais conhecidas e desejadas, especificamente, na construção de paredões próximo à orla, como mostra a Figura 3, bases de reatores de subestações, pistas de aeroportos, laboratórios de eletrônica e hospitais, como é o caso da Figura 2. (ACI 440.1R-15)



Figura 2- Hospital no Texas onde utilizou-se GFRP nas vigas e pilares. (ACI 440-R, 96)



Figura 3- Substituição de barra de aço por GFRP no paredão que protege a rodovia Honoapiilani, em Maui, HI. (ACI 440.1R-15)



Figura 4- Tabuleiro de ponte em Emma Park Bridge com barras de GFRP. (ACI 440.1R-15)



Figura 5- Tabuleiro de ponte construída com barras de GFRP em Kansas, EUA.  
(ACI 440.1R-15)

Em 1991, O American Concrete Institute (ACI) estabeleceu o Comitê 440 cuja missão de desenvolver e documentar informações sobre polímeros impregnados com fibra – FRP. O primeiro produto deste comitê foi um relatório a respeito do estado-da-arte da utilização de armaduras de FRP para estruturas de concreto, o ACI 440R-96, cuja revisão mais recente é de 2007. Este mesmo comitê publicou, em 2001, a normativa ACI 440.1R-01, que prevê o dimensionamento de estruturas de concreto armadas com barras de FRP, cuja versão mais recente é de 2015 e, em 2004 publicou o código normativo ACI 440.3R-04, contendo os procedimentos para ensaio das barras de FRP, atualizado em 2012.

Na Europa, o uso das barras de FRP começou na Alemanha, em 1986, com a construção de uma ponte rodoviária. Desde a construção desta ponte, foram desenvolvidas pesquisas e implementados programas na Europa para detalhar a utilização destas barras. Em 1991, iniciou-se na Inglaterra o projeto de pesquisas em FRP, que culminou, em 2007 com o FIB Bulletin n° 40 para estruturas de concreto com armaduras de FRP. No Canadá, a norma atual que especifica a utilização deste tipo de barra em estruturas de concreto armado, é a CSA Standards S806-12.

No Brasil, existem poucas pesquisas sobre o assunto e ausência de documentos normativos.

## 1.2. Características de GFRP

As barras de fibra de vidro impregnadas por polímeros são uma alternativa à utilização das tradicionais barras de aço. Sua estrutura é formada por um núcleo de fibras estiradas, de elevada resistência mecânica e envoltas numa matriz polimérica que possui propriedades isotrópicas, resultando em barras com propriedades ortotrópicas, já que possuem melhor resistência longitudinalmente do que transversalmente às fibras.

Os principais fatores que afetam o desempenho das barras de GFRP são as propriedades mecânicas das fibras quanto ao teor, à sua orientação, seu comprimento, seu tipo e sua composição, além da adesão entre fibra e matriz polimérica. Quanto mais uniforme for a distribuição das fibras, menos heterogêneo é o material e menor é a probabilidade de falhas nas áreas mais fracas.

### 1.2.1. Matriz polimérica

A matriz é responsável pela transferência de tensões entre as fibras da barra, além de protegê-las de ações mecânicas e danos do meio ambiente. Em relação às características mecânicas da matriz, a literatura refere que esta possui baixa influência na resistência à tração da barra, mas ajudam a evitar a flambagem das barras submetidas à compressão e são importantes para a resistência do compósito ao cisalhamento e à ação de elevadas temperaturas. (TEIXEIRA, 2018)

A Figura 6 mostra o comportamento da matriz e da fibra em relação a resistência à aderência e à deformação.

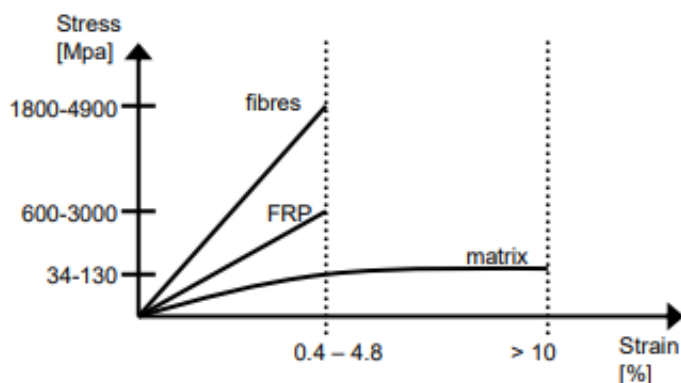


Figura 6- Curva tensão-deformação. (REIS, 2009)

A matriz polimérica dos compósitos pode ser constituída de resinas de dois tipos:

a) Termorrígidas: são as mais comuns, de polímeros irreversíveis que não podem ser dissolvidos nem fundidos depois de curados. Apresentam uma viscosidade inicial baixa, boa estabilidade dimensional, baixo coeficiente de dilatação térmica e elevada resistência aos solventes. No entanto, apresentam como pontos negativos o fato de não poderem ser armazenadas por muito tempo, podendo vir a comprometer a eficiência do processo de pultrusão (REIS, 2009). A tabela 1 apresenta as propriedades destas resinas, segundo o CEB-FIP MODEL CODE (2010).

Tabela 1 -Propriedades das matrizes poliméricas das barras de FRP.

	Epóxi	Poliéster	Viniléster
Módulo de Elasticidade (GPa)	2 -3,5	3,5	3,2
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	1200 -1300	1380	1120
Alongamento (%)	05/jun	05/jun	04/mai
Resistência à tração (MPa)	2 - 3,5	3,5	3,2

Fonte: Adaptada de CEB-FIP MODEL CODE 2010.

As resinas de epóxi apresentam elevadas propriedades mecânicas, baixa retração durante a cura, boa adesão a uma grande variedade de fibras, alta resistência à umidade, são menos afetadas pelo calor, são mais duráveis e mais caras do que as resinas de poliéster ou vinil éster. Também apresentam baixa viscosidade, permitindo a saturação adequada entre os fios e o alinhamento dos mesmos e acarretando baixa retração. A resina de poliéster apresenta baixa viscosidade e elevada resistência aos raios ultravioleta, sendo um bom isolante elétrico, porém a retração volumétrica é a principal desvantagem deste produto. Já a resina vinil éster possui elevada resistência aos ácidos, peróxidos e álcalis. (REIS, 2009)

b) Termoplásticas: Por não possuírem ligações cruzadas, quando submetidas a uma dada temperatura e pressão, amolecem e fluem, podendo ser moldadas e remodeladas quando novas temperaturas e pressões são aplicadas, o que permite que sejam recicladas. Apresentam elevada viscosidade, dificultando o processo de impregnação de fibras longas. Contudo, têm a vantagem sobre as resinas termorrígidas de serem mais resistentes a impactos e microfissurações, devido a sua maior ductilidade e tenacidade. As resinas termoplásticas mais utilizadas são as compostas por polietileno, poliestireno ou metacrilato de polimetila na sua composição (BAKIS, 98).

### 1.2.2. Fibras

As propriedades das barras de GFRP são determinadas pela escolha das fibras.

Uma desvantagem das fibras de vidro é que, na presença soluções aquosas, se degradam facilmente por possuírem uma superfície muito ativa quimicamente à água e à umidade. Devido a isso, a escolha da matriz polimérica adequada é imprescindível para que haja proteção das fibras. As fibras de vidro podem ser facilmente danificadas durante o manuseio. Assim, um filme protetor deve ser aplicado imediatamente após seu processo de fabricação. Este filme, além de protegê-la contra umidade, também é responsável por aumentar a adesão entre a fibra e matriz polimérica.

Três tipos de fibra de vidro são comercializadas: vidro - E; vidro - S e vidro - AR. Suas propriedades estão descritas na tabela abaixo.

Tabela 2-Propriedade das fibras de vidro.

Tipo de Fibra	Densidade Kg/m <sup>3</sup>	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Deformação última (%)	Coef. Dilatação térmica Longitudinal (10-6/°C)	Coefficiente Poisson
<b>Vidro - E</b>	2500	3450	72,4	2,4	5	0,22
<b>Vidro - S</b>	2500	4580	85,5	3,3	2,9	0,22
<b>Vidro - AR</b>	2270	1800-3500	70-76	2,0-3,0	-	-

Fonte: Adaptado de FIB Bulletin 40, 2007.

As fibras do tipo vidro -E (*electricalglass*) possuem alta resistividade elétrica e são mais econômicas do que as fibras do tipo vidro -S (*structural* ou *high-strength glass*). As fibras de vidro- S apresentam maior leveza, rigidez, resistência à tração e módulo de elasticidade. Já as fibras do tipo vidro -AR são resistentes aos álcalis e possuem as características mais favoráveis, apesar de serem mais caras do que os outros tipos de fibra; neste caso, a responsabilidade da resistência ao meio alcalino (agressivo às fibras) é transferida à resina polimérica (TEIXEIRA, 2008).

### 1.2.3. Processo de fabricação

As barras de fibra de vidro normalmente são fabricadas através do processo da pultrusão. Este processo consiste em banhar as fibras em resina, tracioná-las unilateralmente e colocá-las em moldes para a cura.



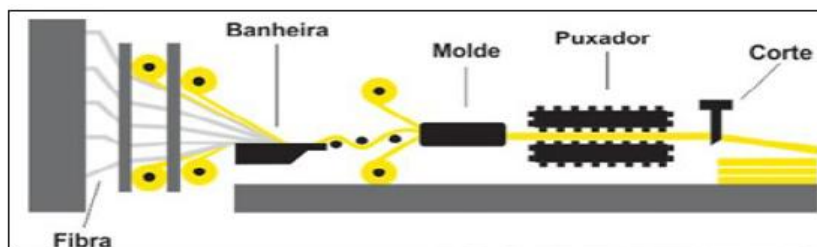


Figura 7- Processo de pultrusão, retirado do catálogo da Stratus. (apud TEIXEIRA, 2018)

Para aumentar a aderência entre o concreto e estas barras de GFRP, normalmente, realiza-se algum tipo de acabamento na superfície da barra antes da polimerização final. (GONÇALVES, 2013)

Na fabricação de estribos e barras dobradas, o processo é o mesmo para barras retas, porém são realizadas as dobras antes da etapa de acabamento e cura final.

As barras são fabricadas sem restrição ao comprimento final, sendo apenas o local de fabricação e o transporte limitadores para seu corte. A fabricação apresenta baixa perda de material e requer baixo conhecimento técnico sobre a pultrusão, sem necessidade de mão de obra extremamente especializada.

De modo geral, pode-se dizer que o volume de fibras, o tipo e fibra, o tipo de resina, a orientação das fibras, os efeitos dimensionais e o controle de qualidade durante a fabricação são fatores primordiais na definição das características das barras.

### 1.3. Propriedades das barras de GFRP

#### 1.3.1. Densidade

A massa específica das barras de GFRP é obtida por meio da soma do volume da matriz polimérica e das fibras, multiplicados pelas respectivas massas específicas, conforme a equação abaixo.

$$\rho_c = \rho_v \times V_v + \rho_m \times V_m \quad (1)$$

As barras de polímero reforçado com fibra de vidro têm uma densidade que varia de 1,25 a 2,1 g / cm<sup>3</sup>, um sexto a um quarto da densidade do aço, conforme demonstra a Tabela 3. A massa reduzida diminui os custos de transporte e facilita o manuseio das barras no local do projeto. (ACI 440.1R-15)

Tabela 3 - Densidade dos materiais compósitos.

Densidade dos materiais (g/cm <sup>3</sup> )			
AÇO	GFRP	CFRP	AFRP
7,9	1,25 - 2,10	1,50 - 1,60	1,25 - 1,40

Fonte: Adaptado do ACI 440.1R-15.

### 1.3.2. Coefficiente de expansão térmica

Os coeficientes de expansão térmica das barras de FRP variam nas direções longitudinal e transversal, dependendo dos tipos de fibra, resina e fração volumétrica da fibra. O coeficiente longitudinal de expansão térmica é dominado pelas propriedades das fibras, enquanto o coeficiente transversal é dominado pela resina. (ACI 440.1R-15)

Polímeros reforçados com fibras têm uma expansão térmica na direção transversal muito maior do que na direção longitudinal e superior à expansão térmica do concreto endurecido. A diferença entre o coeficiente transversal de expansão térmica de barras de FRP e o concreto pode causar fissuras no concreto sob aumento de temperatura e, em última análise, ruptura do cobrimento de concreto se a ação confinante do concreto for insuficiente. A Tabela 4 apresenta os valores típicos dos coeficientes de expansão térmica das barras de fibra de vidro.

Tabela 4 - Valores típicos dos coeficientes de expansão térmica (x 10<sup>-6</sup> °C)

Direção	Aço	GFRP	Concreto
Longitudinal $\alpha_L$	11,7	6,0 a 10,0	7,2 a 10,8
Transversal $\alpha_T$	11,7	21,0 a 23,0	7,2 a 10,8

Fonte: Adaptada de ACI 440.1R-15.

### 1.3.3. Geometria

Os diferentes tipos de superfícies externas das barras pultrudadas impacta diretamente nas condições de desempenho das mesmas. A conformação superficial é importante propriedade mecânica de ligação da barra com o concreto. Pode-se encontrar barras com as seguintes conformações superficiais: com nervuras moldadas na própria resina, areadas, com enrolamento helicoidal ou trançadas, como mostrado na figura 8. (FIB 9.3 TG, 2003).

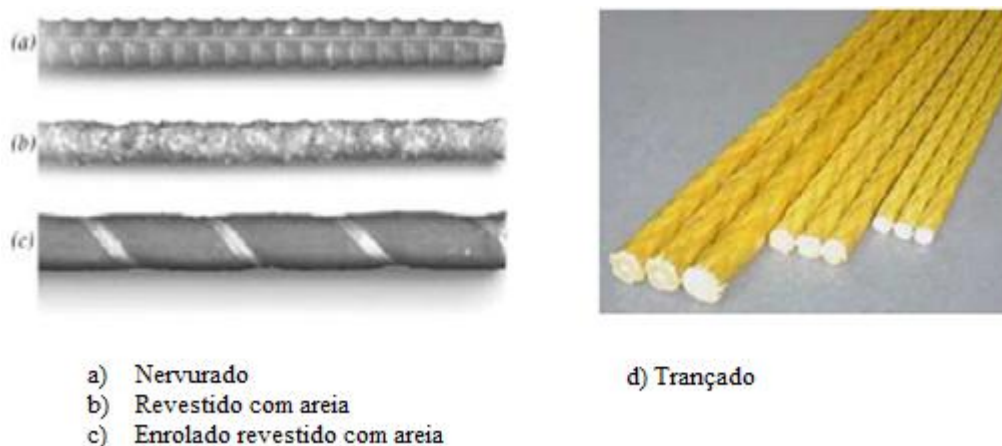


Figura 8- Conformações superficiais das barras GFRP. (FIB 9.3 TG, 2003)

O diâmetro da seção transversal e a geometria da barra dependem da tecnologia disponível nas indústrias fabricantes. Em geral, as fábricas fornecem barras com diâmetros equivalentes aos encontrados comercialmente para as barras de aço. Observa-se, contudo, que como não é possível alterar o formato das barras após o processo de polimerização, a geometria das barras deve ser executada na fábrica, podendo ser barras retas, barras com ancoragem, estribos e telas.

#### 1.3.4. Condutividade eletromagnética

As barras de GFRP têm excelentes propriedades isolantes magnéticas e elétricas. Por isso, quando comparadas ao aço, podem ser usadas em locais onde há campo magnético, como hospitais.

#### 1.3.5. Resistência à tração

As barras de FRP quando carregadas alcançam sua resistência última sem apresentar comportamento plástico, ou seja, rompem sem patamar de escoamento. Apresentam comportamento elástico-linear e ruptura brusca, sem aviso prévio. Na Tabela 5 é possível observar os valores destas barras e compará-las com outros materiais.

Tabela 5- Propriedades das barras.

	Aço	GFRP	CFRP	AFRP
Tensão de escoamento (MPa)	276 - 517	-	-	-
Resistência à tração (MPa)	483 - 1600	483 - 690	600 - 3690	1720 - 2540
Módulo de Elasticidade ( $10^3$ ) (Gpa)	200	35 - 51	120 - 580	41 - 125

Fonte: Adaptado do ACI 440.1R-15.

O diâmetro da barra influencia diretamente a sua resistência à tração devido ao efeito Shear Lag, que se caracteriza pelo fato de que as fibras mais próximas à superfície são submetidas a maiores tensões do que as fibras mais internas. (COUTO, 2007)

A resistência à tração e rigidez de uma barra de FRP é dependente de vários fatores como as resistências da resina e da fibra, a cura, o processo de fabricação e o controle de qualidade de fabricação da barra. (ACI 440.1R-15)

Vale destacar que os ensaios para caracterização da resistência à tração de barras de FRP são complicados devido às concentrações de tensões nos pontos de ancoragem da amostra de ensaio, podendo levar a uma falha prematura. Para que o ensaio seja adequado, a falha deve ocorrer no meio da amostra de teste. (GONÇALVES, 2013)

Conforme já relatado anteriormente, as barras de GFRP não podem ser dobradas após a fabricação (uma exceção a isso seria uma barra GFRP com uma resina termoplástica que poderia ser remodelada com a adição de calor e pressão), porém podem ser fabricadas com dobras. Neste caso, pode haver uma redução da resistência de cerca de 40 a 50% na região da dobra em comparação com a resistência à tração de uma barra reta. Isto ocorre devido às concentrações de tensões e curvatura das fibras na zona dobrada. (ACI 440.1R-15)

#### 1.3.6. Resistência à compressão

As barras de GFRP não se comportam tão bem à compressão quanto à tração. O modo de ruptura depende das propriedades dos elementos constituintes (fibras e resina) e da fração do volume de fibras. A ruptura à compressão pode ocorrer em função da microflambagem das fibras, da tração transversal da matriz em virtude do efeito de Poisson ou do cisalhamento da matriz.

Resumidamente, o que se observa é que a resistência à compressão das barras de GFRP é inferior à resistência à tração e o mesmo ocorre com o módulo de elasticidade à compressão que é em torno de 80% menor que o módulo à tração. (ACI 440.1R-15).

O ACI 440.1R-15 refere que não é recomendável o uso de barras de FRP em projeto, para resistência de tensões de compressão.

#### 1.3.7. Resistencia ao cisalhamento

As barras de GFRP possuem baixa resistência ao corte devido à orientação longitudinal das fibras e, por isso, a resistência ao cisalhamento depende basicamente da resina.

O ACI 440.1R-15 sugere adicionar fibras não alinhadas com o eixo da barra durante o processo de fabricação das barras. A caracterização do comportamento ao corte de barras de GFRP pode ser feita pelo método de ensaio padrão da ASTM D4475-02 (2016).

#### 1.3.8. Fluência

O FIB Bulletin 40 (2007) explica a fluência como sendo a deformação progressiva de um material sob ação de cargas constantes e fornece um gráfico que relaciona a deformação com o tempo da estrutura, figura 9. Após a deformação inicial, a fase primária se caracteriza por uma deformação grande num curto período de tempo. Na segunda fase, já se observa uma deformação num período maior, caracterizando o período de serviço da estrutura e a terceira fase mostra a estrutura começando a entrar em colapso, com elevadas tensões.

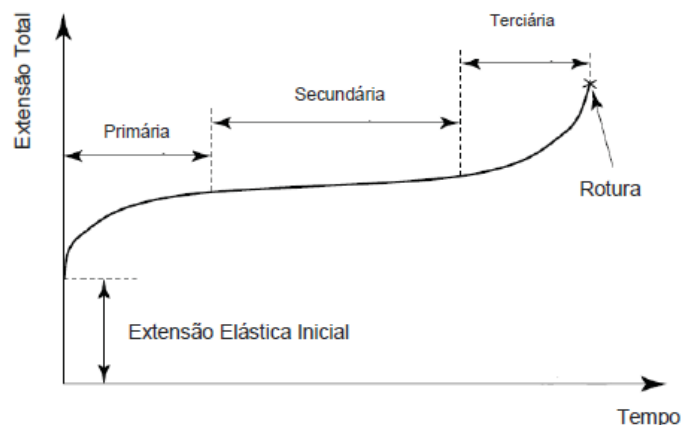


Figura 9- Curva deformação por tempo. (FIB Bulletin 40, 2007).

As barras de GFRP quando sujeitas a uma carga constante ao longo do tempo, podem romper subitamente após um período de tempo designado por tempo limite de tolerância (*endurance limit*). Este tempo de resistência também diminui à medida que o esforço de tração a curto prazo da barra GFRP aumenta, podendo ser de forma irreversível em condições ambientais adversas, como alta temperatura, exposição à radiação ultravioleta, alta alcalinidade, ciclos úmidos e secos ou ciclos de congelamento e descongelamento. (CEB-FIP MODEL CODE 2010)

Devido à fluência, com o passar do tempo, a matriz se torna incapaz de absorver esforços a ela aplicados, sendo estes então absorvidos apenas pelas fibras da armadura. Considera-se assim que a ruptura por fluência depende também do tipo, orientação e volume de fibras, sendo necessário limitar no dimensionamento da tensão limite a 60% da resistência de carga de curto duração, com o objetivo de eliminar este fenômeno (FIB Bulletin 40, 2007).

### 1.3.9. Fadiga

A fadiga se caracteriza pela degradação do material após repetidos carregamentos cíclicos.

Apesar da análise dos danos das barras de FRP por fadiga ser complexa devido aos mecanismos de deterioração que ocorrem em diferentes partes, como a fissuração da matriz e ruptura das fibras, as barras de GFRP possuem uma alta resistência à fadiga. (ACI 440.1R-15)

Embora as barras de fibra de vidro sejam mais frágeis do que as de aço em relação ao cisalhamento, testes de fadiga em barras retas de fibra de vidro não aderidas

têm apresentado comportamento similar ao das barras de aço, no que diz respeito ao carregamento cíclico ao corte, para mais do que 10 milhões de ciclos.

Tal qual ocorre nas barras de aço, a presença de nervuras que melhoram a aderência, induz à concentrações locais de tensões que degradam o desempenho à fadiga.

As limitações das tensões de fadiga para as barras de FRP dependem do processo de manufatura da barra, das condições ambientais como umidade, alcalinidade e soluções ácidas e do tipo de carregamento de aplicado. (ACI 440.1R-15)

#### 1.3.10. Resistência à temperatura e ao fogo

De acordo com o ACI 440.1R- 2015, as pesquisas têm mostrado que o comportamento à transferência de calor de lajes e vigas armadas com barras de FRP expostas ao fogo assemelha-se ao concreto armado com barras de aço. Entretanto, as barras de FRP são mais sensíveis às temperaturas elevadas do que as de aço e, portanto, apresentam menores resistências ao fogo, com redução das propriedades mecânicas devido ao amolecimento. Por isso, as barras de GFRP não são recomendáveis em estruturas que necessitam de resistência ao fogo.

Uma vez a matriz deteriorada, esta não conseguirá transmitir os esforços entre as fibras, reduzindo à resistência de tração, ao corte e à flexão das barras.

A utilização destas barras não deve ser a uma temperatura superior à temperatura vítrea,  $T_g$  das fibras. Para valores próximos a  $T_g$ , as propriedades mecânicas da matriz já são reduzidas e ela não consegue transmitir as tensões entre as fibras. (BOOTLE, 2001) Na concepção do projeto, recomenda-se que a  $T_g$  seja pelo menos  $30^\circ$  acima da temperatura máxima esperada na estrutura. (FIB Bulletin 40, 2007)

O ACI 440.1R- 2015 refere, entretanto, que em situação de colapso estrutural, barras bem ancoradas podem reter considerável resistência e rigidez à temperaturas superiores ao valor de  $T_g$ .

Ao contrário, se baixas temperaturas atuarem sobre as barras de GFRP, pode ocorrer o endurecimento e microfissuração da resina e assim, a perda de aderência entre resina e fibras. Ciclos de gelo/degelo associados a sais podem provocar degradação da matriz devido a dilatação provocada pelos sais. (FIB Bulletin 40, 2007)

#### 1.3.11. Resistência aos raios ultravioletas

Os raios ultravioletas podem afetar os materiais polímeros. Apesar de imersos no concreto, a radiação pode danificar o material durante o transporte e armazenamento das barras, prejudicando suas propriedades.

Em contato com raios UV, as barras de GFRP apresentam redução de resistência. Para evitar isto, deve-se incorporar na resina aditivos adequados ou fibras aleatórias. (TEIXEIRA, 2008)

#### 1.3.12. Resistencia à umidade

A absorção excessiva de água pelas barras de GFRP pode acarretar diminuição da sua resistência e rigidez. O inchamento da resina pode causar deformação nas barras. Nas fibras de vidro pode ocasionar ionização (a umidade pode extrair íons da fibra) com consequente aparecimento de pites (LUKE, WILLIAMS E SADEGHIAN, 2013). Na literatura técnica as principais consequências da absorção da umidade é a diminuição da temperatura de transição vítrea e hidrólise da resina, causando plastificação.

Existem resinas resistentes a água e estas devem ser usadas em ocasiões onde haverá contato direto com água ou a estrutura estará em situações de gelo e degelo. (FIB Bulletin 40)

#### 1.3.13. Resistencia aos álcalis e carbonatação

Apesar do concreto proteger a armadura dos ataques de agentes externos, as barras de GFRP podem ser afetadas pela própria alcalinidade do concreto.

A velocidade de ataque dos álcalis às barras de GFRP depende da susceptibilidade das fibras a este ataque, da difusibilidade dos álcalis na resina, da qualidade da ligação da resina à fibra, da temperatura, da concentração dos álcalis (influenciada pelo tipo de cimento) e, finalmente, da mobilidade dos íons álcalis. (REIS, 2009)

A ação das soluções alcalinas resulta em fragilização das fibras de maneira individual, reduzindo sua resistência axial e danificando a interface fibra-resina. O mecanismo de ocorrência destas patologias está associado ao ataque químico e ao surgimento de produtos expansivos na região das fibras. A literatura técnica indica reduções de 0 a 75% da resistência inicial à tração de barras de GFRP. A utilização de matrizes adequadas minora o efeito do ataque alcalino às fibras. Estudos apontam que a resina Vinil Ester apresenta melhor resistência aos álcalis do que a resina epóxi.



## **2. ADERÊNCIA ENTRE A BARRA DE GFRP E O CONCRETO**

O bom funcionamento da estrutura de concreto armado ocorre quando não há deslizamento entre a armadura e o concreto adjacente. Conhecida como aderência, esta solidariedade entre os dois materiais fornece a transferência de tensões e a compatibilidade das deformações entre estes materiais. As características da aderência entre as barras de FRP e o concreto influenciam o mecanismo de transferência das cargas e, assim sendo, o controle do espaçamento entre fissuras, a abertura das fissuras, a espessura de cobrimento necessária e o comprimento de aderência.

O comportamento mecânico das barras de GFRP difere das barras de aço. As barras de GFRP possuem maior resistência à tração longitudinal do que transversal, menor módulo de elasticidade, menor resistência à compressão e ao cisalhamento etc. Por essa razão, mudanças no dimensionamento de estruturas de concreto com armadura de GFRP devem ocorrer.

### **2.1. Comportamento da Aderência**

As tensões de aderência em peças de concreto armado surgem sempre que há variação de esforços ou de tensões em determinado trecho das barras de armadura. As principais causas dessas variações de tensões são: ações externas, fissuras, forças de ancoragem nas extremidades das barras, variações de temperatura, retração do concreto e deformação lenta.

No entanto, as barras produzidas hoje no mercado brasileiro são de produção manual e, por isso, apresentam características superficiais variáveis e isto influencia diretamente na resistência e aderência.

Existem barras lisas e barras nervuradas de GFRP, sendo a mais usual as que possuem saliências no seu comprimento, por apresentarem resistência à aderência superior em relação às barras lisas.

A aderência entre barras e o concreto é influenciada, principalmente pela adesão entre esses dois materiais ou pela resistência ao corte entre as sucessivas camadas de fibras na superfície da barra. A ruptura por aderência ocorre ao longo do perímetro da barra à medida que esta vai sendo arrancada do concreto. (FIB BULLETIN 10, 2000)

O comportamento de aderência de barras FRP ao concreto distingue-se daquele das barras de aço convencionais, uma vez que vários parâmetros-chave que influenciam o desempenho da aderência são distintos, como:

- os módulos de elasticidade do FRP nas direções longitudinal e transversal são menores do que os do aço;
- a rigidez ao corte do FRP é também muito menor do que a do aço;
- a matriz de resina tem resistência ao corte menor do que o aço, fator que limita a resistência da superfície da barra às deformações;
- o coeficiente de expansão térmica do FRP é diferente dos do aço e do concreto.

O comportamento de aderência entre as barras de FRP e o concreto pode ser analisado por meio da curva tensão média de aderência versus deslizamento da extremidade solicitada por um carregamento monotônico, conforme mostrado na Figura 10.

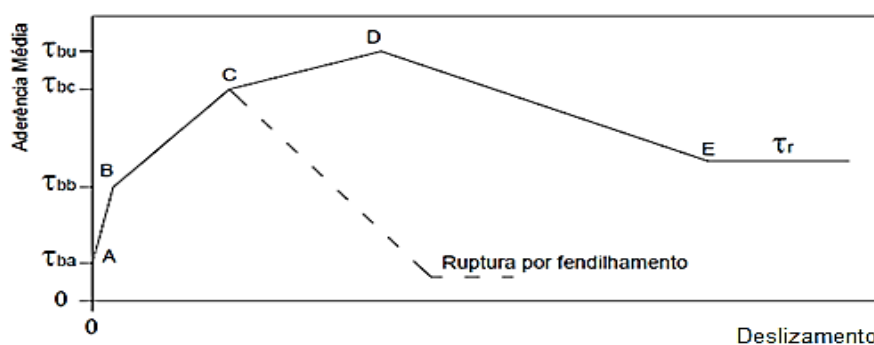


Figura 10- Curva típica de tensão de aderência média versus deslizamento.  
(Adaptado do FIB BULLETIN 10, 2000)

Trecho 0A: No início do carregamento, o principal mecanismo que resiste à carga externa é a aderência química entre os dois materiais. Nenhum deslizamento mensurável é observado neste estágio.

Trecho AB: com o aumento do carregamento ocorre a ruptura da adesão, o deslizamento na extremidade solicitada aumenta gradualmente e as deformações superficiais da barra (rugosidades) desenvolvem tensões tangenciais em virtude da reação do concreto adjacente. Microfissuras transversais no concreto se iniciam nas extremidades das rugosidades (nervuras) barra, permitindo um maior deslizamento das barras, vide figura 11. No caso de barras de GFRP, esta microfissuração começa relativamente atrasada por ser a conformação superficial mais amena se comparada a das barras de aço. (FIB Bulletin 10, 2000)

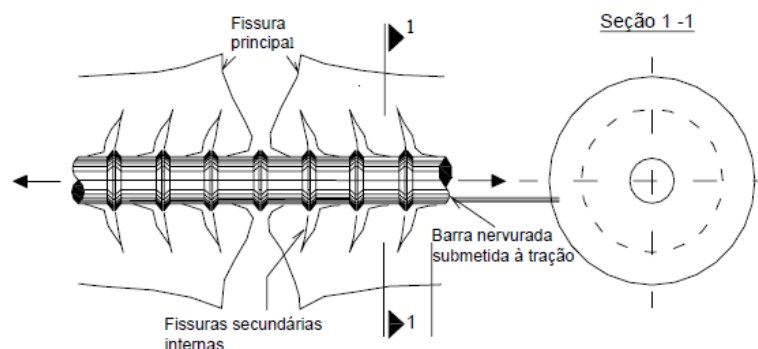


Figura 11- Deformação do concreto após a formação de fissura (GOTO, 1971)

Trecho BC: neste estágio as pressões resistentes desenvolvidas pelas nervuras ao concreto adjacente aumentam consideravelmente e o deslizamento da barra aumenta, diminuindo a rigidez da ligação. A componente radial das forças de aderência é equilibrada com o arco de tensão de tração desenvolvida pelo concreto adjacente, vide figura 12.

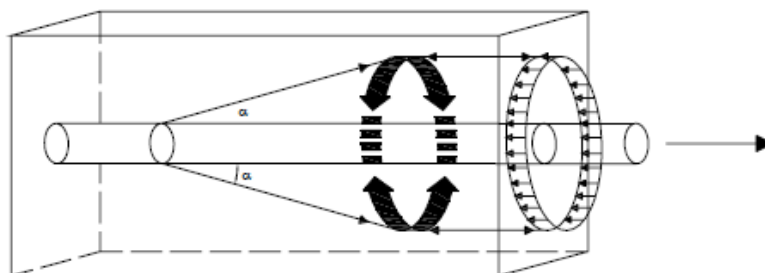


Figura 12- Representação esquemática do equilíbrio entre o anel de tensão e a força radial de aderência na zona de ancoragem. (FIB BULLETIN 10, 2000)

Se o confinamento da barra não for adequado, ou seja, se a tensão de tração no arco for maior que a resistência à tração do concreto, surgirão fissuras de fendilhamento ao redor de toda extensão da barra.

Trecho CD: Se o concreto adjacente possuir resistência suficiente para impedir o fendilhamento, é atingida a resistência máxima ( $\tau_*$ ). Neste estágio, ambas as extremidades da barra (carregada e descarregada) deslizam e a resistência de aderência é significativamente reduzida.

Trecho DE: depois de atingida a máxima tensão de aderência, o mecanismo de resistência entre as rugosidades da barra (nervuras) e os consoles de concreto se rompem, diminuindo consideravelmente a tensão de aderência. A resistência de

aderência residual ( $\tau_r$ ) depende principalmente da resistência ao atrito  $\tau_r$  da interface de ruptura. A rugosidade da interface de ruptura determina a magnitude de  $\tau_r$ .

## 2.2. Modo de ruptura do ensaio de arrancamento

À medida que o carregamento aumenta é inevitável o aparecimento de microfissuras transversais e eventualmente longitudinais, dependendo de diversos fatores físicos e mecânicos, como a pressão de confinamento, a espessura do cobrimento, a armadura transversal e a resistência do concreto. O fendilhamento longitudinal pode-se manter restrito ao concreto junto à armadura, se um ou mais dos fatores anteriormente mencionados for suficientemente grande para contê-lo.

Os modos de ruptura são influenciados pela resistência do concreto e pela resistência da superfície da barra:

- Arrancamento da barra: a resistência de aderência é transmitida pelo atrito entre a superfície rugosa da barra e o concreto adjacente. Neste caso a aderência é mais dúctil e a máxima resistência de aderência ( $\tau_*$ ) dependerá da geometria das rugosidades da barra, da rigidez radial da barra e do confinamento do concreto.

A foto da figura 13 ilustra o tipo de ruptura por arrancamento da barra, em ensaio realizado por Achillides E Pilakoutas (2004). Após o ensaio, os autores abriram o cubo e observaram que a ruptura ocorreu parcialmente na superfície da barra e parcialmente no concreto, havendo desprendimento da camada superficial da barra. Notaram a presença de um pó branco aderido ao concreto, característico do esmagamento da resina e do desbastamento da fibra (a barra mostrou-se arranhada e com pequenos pedaços de fibra na sua superfície).



Figura 13- Modelo de arrancamento com barras de GFRP após o ensaio.  
(ACHILIDES E PILAKOUTAS, 2004)

- Ruptura por fendilhamento do concreto: este modo de ruptura é similar ao que ocorre com as barras de aço. O concreto é esmagado pelas rugosidades da superfície da barra e a resistência de aderência é controlada majoritariamente pela resistência à tração do concreto.

As figuras 14 e 15 ilustram o tipo de ruptura por fendilhamento do concreto. Nota-se o cisalhamento superficial das nervuras.

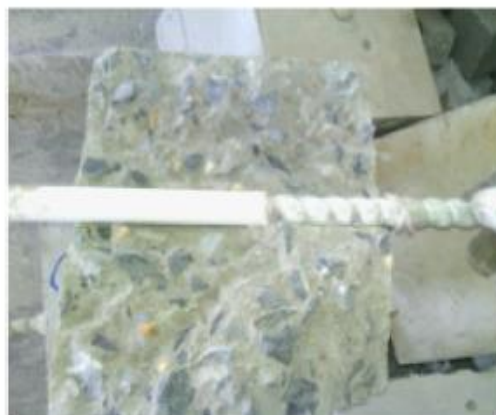


Figura 14- Ruptura por fendilhamento do concreto (XINGYU GU, BIN YU E MING WUB, 2015).



Figura 15- Ruptura por fendilhamento do concreto (COUTO, 2007).

Achillides e Pilakoutas (2004) consideram que a resistência ao cisalhamento entre fibras e resina controla a capacidade de aderência das barras de FRP em ambos os casos. Por isso, o incremento de resistência do concreto não significa um incremento de resistência de aderência entre a barra de GFRP e o concreto.

- Ruptura da barra: este tipo de ruptura ocorre quando a tração exercida é capaz de deteriorar a barra na seção fora do concreto.

A foto da figura 16 ilustra o tipo de ruptura da barra.



Figura 16- Ruptura da barra (Xingyu Gu, Bin Yu e Ming Wub, 2015).

### 2.3. Fatores que influenciam a aderência entre barras de GFRP e o concreto.

#### 2.3.1. Diâmetro da barra

O diâmetro da barra tem importante papel no comportamento da aderência entre concreto e barras de GFRP. Barras de grande diâmetro apresentam menores resistências de aderência que barras de diâmetro pequeno.

A resistência de aderência em barras de GFRP é afetada por sua pequena rigidez ao cisalhamento na direção axial. O valor da rigidez ao cisalhamento leva em consideração a rigidez ao cisalhamento da resina e a resistência na interface entre resina e fibra de vidro. Quando uma barra é submetida a uma força axial de tração, ocorrerem deslocamentos diferenciais entre as fibras superficiais e as fibras situadas do centro da barra, resultando em uma distribuição de tensão normal não uniforme na seção transversal da barra. (COUTO, 2007)

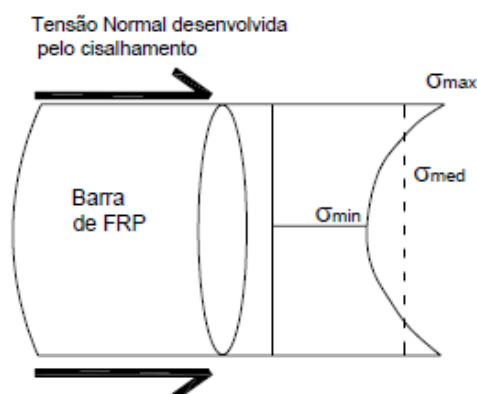


Figura 17- Distribuição de tensão normal em uma barra GFRP sobre carregamento axial. (ACHILIDES E PILAKOUTAS, 2004)

A resistência de aderência efetiva é medida por meio da tensão normal desenvolvida na superfície da barra ( $\sigma_{max}$ ). Por outro lado, a resistência de aderência real, é proporcional à tensão normal média na seção transversal da barra ( $\sigma_{med}$ ). Com o aumento do diâmetro da barra essa diferença entre tensões aumenta, e a resistência de aderência real diminui. Como não é possível calcular a tensão média referente à média entre a tensão na zona mais externa e a tensão na zona mais interna da barra, para efeito de cálculo utiliza-se a resistência de aderência efetiva ( $\sigma_{max}$ ). Este efeito é conhecido com shear lag.

### 2.3.2. Conformação superficial da barra

As conformações superficiais são importantes na ancoragem mecânica e na pressão lateral exercida sobre o concreto. Existem diferentes conformações superficiais como: o revestimento de areia, nervuras constituídas por um feixe de fibras enroladas helicoidalmente à barra e barras revestidas por fibras longitudinais trançadas externamente ao seu eixo. (FIB Bulletin 10, 2000).

O tamanho e a inclinação das nervuras não determinam apenas a magnitude da aderência mecânica, mas também a magnitude das forças de tração responsáveis pelo fendilhamento do concreto. Barras com maiores rugosidades possuem grande resistência de aderência quando em confinamento adequado, e maior tendência à ruptura por fendilhamento que barras com superfície lisa (FIB 9.3 TG, 2003).

### 2.3.3. Posição das barras na seção transversal do concreto

A posição da barra durante a concretagem influencia a resistência de aderência entre os dois materiais.

Verifica-se que a segregação do concreto fresco faz com que haja um acúmulo de água sob as armaduras e, posteriormente, ao ser absorvida pelo concreto endurecido (ou desaparecer por evaporação) deixa vazios ou inúmeros poros na sua face inferior, prejudicando sensivelmente a aderência, conforme mostrado na figura 18.

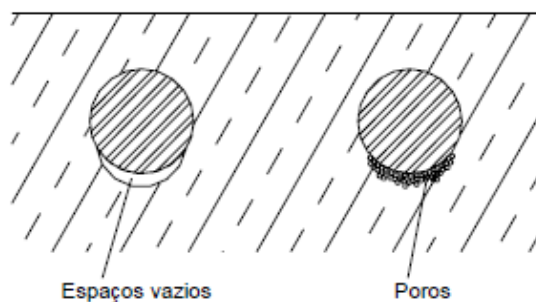


Figura 18- Formação de espaços vazios devido ao posicionamento da barra na seção do concreto. (COUTO, 2007)

A posição das barras horizontais, que podem ser colocadas no topo ou no fundo do molde do corpo de prova, também influencia a qualidade da aderência. Barras concretadas na posição horizontal no fundo da fôrma apresentam melhor comportamento que aquelas concretadas no topo da fôrma, visto que as barra inferiores situam-se na zona onde o adensamento se faz sentir de maneira mais acentuada e, conseqüentemente, torna-se mais difícil a existência de argamassa porosa na metade inferior das barras. (MACEDO, 2018)

#### 2.3.4. Cobrimento do concreto

O cobrimento de concreto é fator importante para proteção da barra à agentes externos que possam ser nocivos a armadura. No caso das barras de GFRP, por não sofrerem processo de corrosão, tal cobrimento de concreto pode ser diminuído em relação às barras tradicionais de aço carbono. Tal parâmetro influencia na resistência de aderência devido ao grau de confinamento que proporciona à barra, com o objetivo de prevenir o fendilhamento.

#### 2.3.5. Resistência do concreto

A resistência do concreto circunvizinho à barra pode influenciar a resistência de aderência durante o ensaio.

De acordo com a literatura, para concretos com resistência à compressão superior a 30 MPa a ruptura ocorre na superfície da barra, logo a resistência do concreto não influencia diretamente na resistência da aderência. Já para concretos com valores mais baixos, por exemplo 15 MPa, a ruptura ocorre na matriz de concreto e, portanto, a resistência à compressão é significativa.



### 2.3.6. Durabilidade

Estudos da durabilidade da aderência de barras GFRP ao concreto referem-se, em geral, à umidade e ao meio alcalino.

Enquanto as fibras controlam propriedades como a resistência longitudinal e a rigidez das barras de FRP, as resinas controlam os mecanismos de durabilidade. Assim, ambientes que degradam a resina ou a interface fibra/resina também tendem a degradar a aderência da barra de FRP ao concreto. Ensaios de arrancamento em espécimes sujeitos à exposição ambiental por períodos de até dois anos não mostraram redução significativa. (FIB Bulletin 10, 2000)

### 2.3.7. Armadura Transversal

A armadura transversal controla a propagação da fissuração, reduzindo a abertura das fissuras e, desse modo, pode aumentar a resistência ao fendilhamento do concreto ao redor da barra. (FIB Bulletin 10, 2000)

## 2.4. **Modelo analítico da aderência para as barras não metálicas**

De acordo com o CEB-FIB Model Code 2010, as tensões de aderência entre concreto e as barras não metálicas podem ser calculadas em função do deslocamento relativo  $s$ , de acordo com as equações:

$$\tau = \tau_m (s/s_m)^\alpha \quad \text{para } 0 \leq s \leq s_m \quad (2)$$

$$\tau = \tau_m - \tau_m p (s - s_m)/s_m \quad \text{para } s_m \leq s \leq s_u \quad (3)$$

Onde,

$\tau_m$  = é o pico da tensão de aderência

$s_m$  = é o deslocamento correspondente

$\alpha$  e  $p$  são parâmetros baseados em resultados experimentais.

Tal proposição foi inicialmente descrita no Bulletin 10 e tem por base o modelo inicialmente proposto por Eligehausen et al., conhecido por modelo B.P.E. Estes autores verificaram que no caso das barras de FRP não há um patamar como ocorre no modelo de aderência das barras de aço.

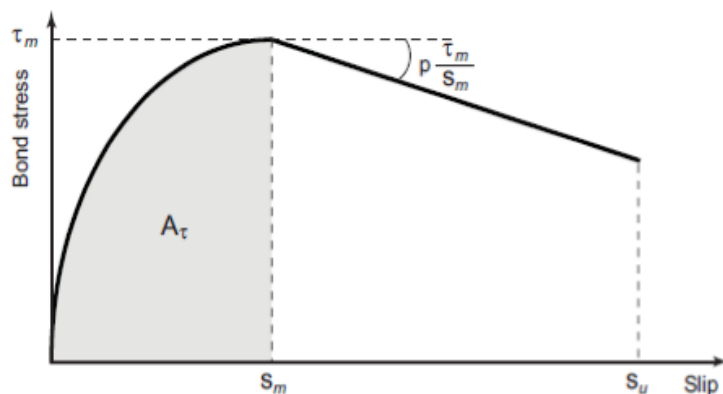


Figura 19- Gráfico tensão x deslizamento. (FIB BULLETIN 10, 2000)

O valor do parâmetro  $\alpha$  que determina o ramo ascendente é derivado da área  $A_\tau$  da curva experimental:

$$A_\tau = \tau_m \cdot s_m / (1 + \alpha) \quad (4)$$

O valor do parâmetro  $p$ , que determina o ramo descendente é avaliado de forma semelhante.

O Bulletin 10 refere também o modelo proposto por Cosenza, Manfredi & Realfonzo, conhecido por modelo C.M.R., e refere ser este modelo o mais adequado para a modelagem do ramo ascendente.

$$\frac{\tau}{\tau_m} = (1 - e^{-s/s_r})^\beta \quad (5)$$

Onde  $s_r$  e  $\beta$  são parâmetros baseados em ajuste da curva experimental.

A figura 20 a seguir compara o desempenho estes dois modelos, confrontados por dados experimentais.

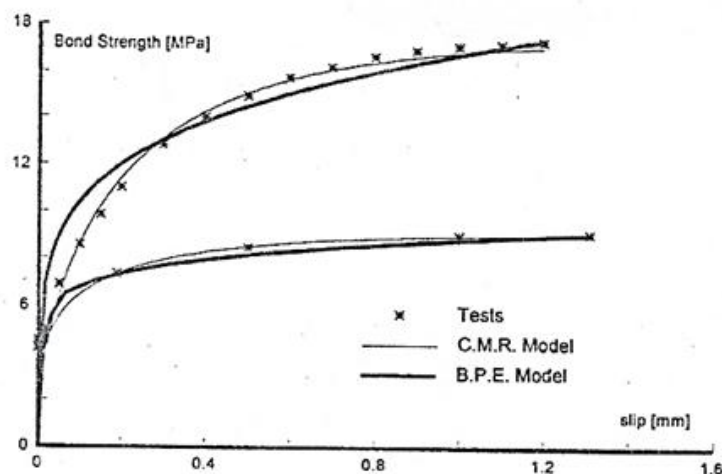


Figura 20- Dados experimentais x modelos analíticos. (FIB BULLETIN 10, 2000).

## 2.5. Determinação de parâmetros normativos de projeto

### 2.5.1. ACI 440.1R-15

O ACI 440.1R-15 sugere uma formulação para o cálculo da tensão de aderência da barra,  $u$ , com base na resistência do concreto, na espessura de cobrimento, no comprimento de ancoragem e no diâmetro da barra, dada por:

$$\frac{u}{0,083\sqrt{f'_c}} = 4,0 + 0,3 \frac{c}{d_b} + 100 \frac{d_b}{l_e} \quad (6)$$

Onde

$f'_c$  é a resistência à compressão do concreto em corpos de prova cilíndricos;

$c$  é a espessura de cobrimento até o centro da barra;

$d_b$  é o diâmetro;

$l_e$  é o comprimento de ancoragem.

Contudo, o ACI 440.1R-15 não menciona nenhuma modificação relativa à conformação superficial da barra.

### 2.5.2. CSA Standards S806-12

- Comprimento de transferência de barras tracionadas

Deve ser determinado diretamente a partir de ensaios ou calculado de acordo com a expressão abaixo, mas não deve ser menor do que 300mm.

$$l_d = 1,15 \frac{k_1 k_2 k_3 k_4 k_5}{d_{cs}} \frac{f_F}{\sqrt{f'_c}} A_b \quad (7)$$

Onde

$l_d$  = comprimento de ancoragem da barra;

$f_F$  =resistência de cálculo à tração da barra de fibra;

$f'_c$  =resistência à compressão do concreto;

$d_{cs}$  =corresponde ao menor dos valores: distância da superfície de concreto mais próxima ao eixo da barra ou  $2/3$  do espaçamento entre os eixos das barras.;

$A_b$  = área da barra;

$d_b$  =diâmetro nominal da barra;

$d_{cs}$  não deve ser maior do que  $2,5d_b$  e  $\sqrt{f'_c}$  não deve ser maior do que 5MPa.

Os coeficientes k levam em conta diversas condições:

a) Localização da barra:

$k_1 = 1,3$  para barras horizontais dispostas em camada de concreto fresco superior a 300mm;

$k_1 = 1,0$  para os demais casos.

b) Densidade do concreto

$k_2 = 1,3$  para concretos de baixa densidade;

$k_2 = 1,2$  para concretos de média a baixa densidade (semi-low-density);

$k_2 = 1,0$  para concretos de densidade normal.

c) Área da barra

$k_3 = 0,8$  para  $A_b \leq 300\text{mm}^2$ ;

$k_3 = 1,0$  para  $A_b > 300\text{mm}^2$ .

d) Tipo de fibra

$k_4 = 1,0$  para CFRP e GFRP;

$k_4 = 1,25$  para AFRP.

e) Perfil superficial da barra

Deve ser considerado menor ou igual a 1,0 e maior que 0,5 nos casos em que este valor tenha sido obtido por meio de ensaios. Na falta de ensaios deve-se considerar:

$k_5 = 1,0$  para superfície rugosa ou aspergida com areia;

$k_5 = 1,05$  para superfície com conformação espiral;

$k_5 = 1,0$  para superfície trançada;

$k_5 = 1,05$  para superfície com nervuras;

$k_5 = 1,80$  para superfície denteada.

## 2.6. Ensaios Normatizados

Tanto o ACI quanto a CSA especificam metodologias de ensaio para barras de GFRP. Estas serão abordadas a seguir.

### 2.6.1. ACI 440.3R-04

Na segunda parte desta norma, estão descritos métodos de ensaios para obtenção de propriedades das barras de FRP usadas em concreto. Assim, são descritos os seguintes métodos:

- Propriedades da seção transversal

Cinco amostras de barra, com aproximadamente 200 mm de comprimento, devem ser usadas.

#### a) Área

Os espécimes devem ser mantidos no ambiente de laboratório pelo menos 24 horas antes do ensaio. Encha um cilindro graduado seco com água ou etanol até uma altura adequada de tal forma que o fluido não transborde após a inserção da amostra no cilindro. Meça o comprimento de cada amostra três vezes. A média das três medições, arredondadas para o 0,1 mm mais próximo, é usada como o comprimento da amostra. Meça o volume de água ou etanol no cilindro antes de imergir a amostra. Mergulhe a amostra na água ou etanol no cilindro graduado sem nenhuma parte saliente acima da borda

A área da seção transversal  $A$  será determinada através da equação:

$$A = \frac{\Delta V}{L} \cdot 1000 = (V_1 - V_0) \cdot \frac{1000}{L} \quad (8)$$

Onde

$V_0$  - volume de água ou etanol no cilindro antes da imersão da amostra, mL;

$V_1$  - volume de água ou etanol quando a amostra é imersa em água ou etanol, mL;

$L$  - comprimento da amostra, mm.

#### b) Diâmetro Equivalente

O diâmetro equivalente  $d_b$  de cada amostra deve ser calculado assumindo que a seção transversal seja um círculo.

$$d_b = 2 \cdot \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (mm) \quad (9)$$

c) Perímetro Equivalente

A circunferência equivalente  $C_b$  deve ser calculada como:

$$C_b = 2 \cdot \sqrt{\pi A} \quad (mm) \quad (10)$$

- Ensaio de tração da barra

Esta metodologia especifica os requisitos de ensaio para obtenção da resistência à tração, do módulo de elasticidade e do alongamento final das barras de FRP. Este ensaio concentra-se na própria barra do FRP, excluindo o desempenho da ancoragem. Portanto, falha ou arrancamento em uma seção de ancoragem deve ser desconsiderada. Para determinar o módulo de elasticidade e deformação final do corpo de prova, o extensômetro ou o LVDT deve ser instalado próximo à meia altura da amostra a uma distância da ancoragem de pelo menos oito vezes o diâmetro da barra de FRP. O extensômetro ou LVDT deve estar adequadamente alinhado com a direção do esforço aplicado.

O comprimento da amostra não deve ser inferior a 100 mm, nem deve ser menor do que 40 vezes o diâmetro da barra de FRP. O número de amostras do ensaio não deve ser inferior a cinco. Se a amostra falhar ou escorregar para fora de uma seção de ancoragem, um teste adicional deverá ser realizado.

Ao montar a amostra na máquina de ensaio, deve-se ter o cuidado de assegurar que o eixo longitudinal da amostra coincida com a linha que une as duas fixações montadas na máquina. O sistema de aquisição de dados deve ser iniciado alguns segundos antes de iniciar o carregamento. A taxa de carregamento (taxa de deslocamento ou taxa de carregamento) deve ser constante durante o ensaio e deve ser tal que a amostra rompa em 1 a 10 min. A carga deve ser aumentada até que ocorra ruptura de tração. As medições de tensão devem ser registradas até que a carga atinja pelo menos 50% da capacidade de tração ou a capacidade de tração garantida, o que for maior.

Uma curva tensão-deformação deve ser gerada a partir das medições do ensaio. A resistência à tração deve ser calculada através da equação abaixo.

$$f_u = \frac{F_u}{A} \quad (11)$$

Onde

$F_u$  – força última;

$f_u$  - tensão resistente última em (MPa);

$A$  – área da seção transversal em mm<sup>2</sup>. (equação do item a. das propriedades da seção transversal da barra).

O módulo de elasticidade pode ser calculado pela da equação a seguir.

$$E_L = \frac{F_1 - F_2}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) A} \quad (12)$$

Onde

$E_L$  – módulo de elasticidade longitudinal em (MPa);

$A$  – área da seção transversal em (mm<sup>2</sup>);

$F_1$  e  $\varepsilon_1$  – força e deformação correspondentes a 50% da tração máxima, em (N) e admissional, respectivamente;

$F_2$  e  $\varepsilon_2$  - força e deformação correspondentes a 20% da tração máxima, em (N) e admissional, respectivamente;

A deformação final deve ser calculada a partir da tensão final e do módulo de elasticidade de acordo com a equação.

$$\varepsilon_u = \frac{F_u}{E_L A} \quad (13)$$

- Ensaio de Arrancamento - Pull Out Test

Segundo o ACI 440.3R-04, o ensaio de arrancamento pode ser realizado de duas formas diferentes: com uma barra moldada no centro do bloco, alinhada com a direção de concretagem (semelhante à uma barra longitudinal em um pilar) ou com duas barras alinhadas transversalmente à direção de concretagem (semelhante à uma barra longitudinal de uma viga ou laje), conforme figuras abaixo.

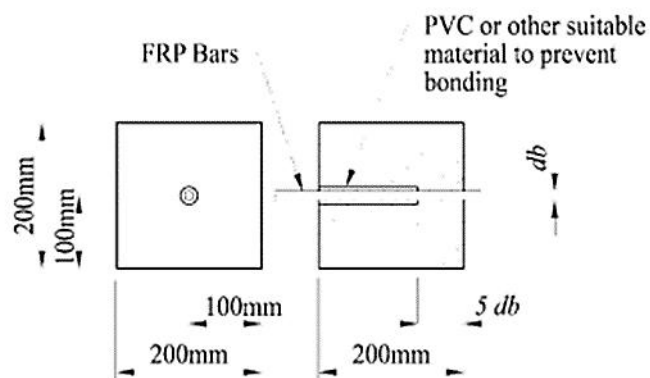


Figura 21- Método com barra moldada no centro do bloco. (ACI 440.3R-04)

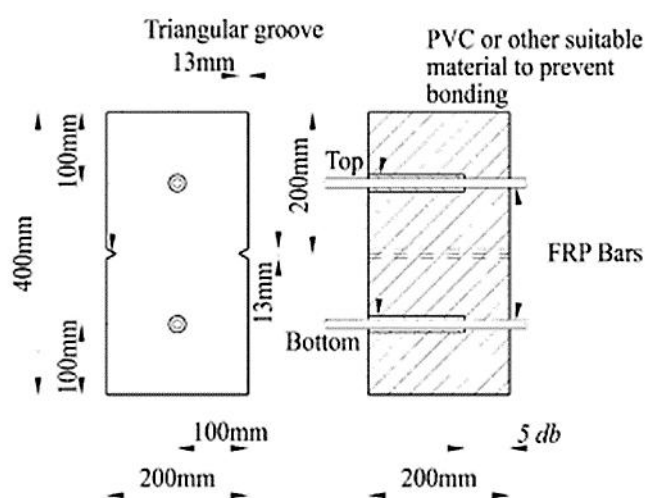


Figura 22- Método com duas barras moldadas. (ACI 440.3R-04)

O ensaio de arrancamento destina-se à avaliação em laboratório, sendo a variável principal o tamanho ou tipo da barra de FRP. Esta metodologia de ensaio não deve ser usada para estabelecer valores de tensões de aderência de projeto, nem comprimentos de ancoragem de barras de FRP embutidas no concreto.

Assim, o ensaio de arrancamento destina-se a determinar o comportamento da aderência visando a especificação de materiais, a garantia de qualidade e a pesquisa. Os resultados devem ser usados apenas para fins comparativos, de parâmetros ou variáveis de resistência de aderência, ou para estabelecer efeitos ambientais de longa duração na resistência de aderência. O comportamento da aderência será dependente da configuração do espécime, o que pode afetar tanto a análise quanto o projeto. O resultado principal do ensaio é a resistência de aderência do espécime em relação a um



concreto normalizado, o que é um importante fator a ser considerado no uso das barras de FRP como armaduras de concreto.

O comprimento de aderência da barra de FRP deve ser cinco vezes o diâmetro da barra de FRP. Se este comprimento não for suficiente para representar as características de aderência da barra de FRP, tal comprimento pode ser estendido conforme apropriado. Fora do comprimento de aderência, a barra embutida deve ser revestida com cloreto de polivinila (PVC) ou outro material adequado.

Para a realização do ensaio deve-se utilizar uma máquina de teste com capacidade de carga superior à capacidade de tração do corpo de prova e calibrada de acordo com as Práticas ASTM E 4. O dispositivo de transmissão de carga deve transmitir apenas cargas axiais às barras de FRP, sem aplicar torção ou flexão. Três LVDTs em intervalos de 120 graus na extremidade carregada e um manômetro concêntrico ou dois aferidores em intervalos de 180 graus na extremidade livre da barra são recomendados. A composição do concreto é padronizada e os modelos devem ser curados em ambiente de laboratório ( $23 \pm 3$  °C e  $50 \pm 10\%$  humidade relativa).

A tensão de aderência média deve ser calculada de acordo com a equação abaixo e o valor relatado com uma precisão de três dígitos significativos. Devem ser plotadas curvas tensão de aderência versus deslizamento na extremidade livre e deslocamento da extremidade carregada, para cada amostra.

$$\tau = \frac{F}{C_b \cdot l} \quad (14)$$

Onde

$\tau$  é a tensão média de aderência em (MPa);

$C_b$  é o perímetro equivalente da barra em (mm);

$l$  é o comprimento de aderência em (mm);

$F$  é a força de tração em (N);

Deve-se calcular a tensão média de aderência correspondente aos deslizamentos de 0,05, 0,10 e 0,25 mm em ambas as extremidades, e a tensão de aderência máxima na ruptura. Em cada nível de carga, o deslizamento na extremidade carregada deve ser calculado como a média das leituras dos transdutores menos o alongamento  $S_c$  da barra FRP, sendo este calculado pela equação:

$$S_c = \frac{F \cdot L_c}{E_L \cdot A} \quad (15)$$

Onde

$S_c$  é o alongamento elástico (mm);

$F$  é a força de tração (N);

$L_c$  é o comprimento do topo da barra ao ponto onde foi disposto o transdutor (vide figura 44);

$E_L$  é o módulo de elasticidade longitudinal da barra (MPa);

$A$  é a área da seção transversal (mm<sup>2</sup>).

### 2.6.2. CSA S806-12

Assim como previsto no ACI 440.3R-04, as amostras de teste podem ser de dois tipos: uma contendo uma barra embutida verticalmente no centro do cubo de concreto ou um modelo contendo duas barras embutidas horizontalmente paralelas e equidistantes aos lados do prisma. O comprimento de aderência deve ser 4 vezes o diâmetro da barra, exceto se este comprimento for considerado inadequado. As figuras abaixo contêm informações sobre as dimensões.

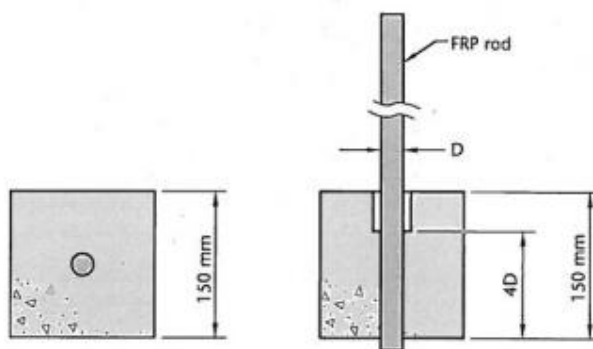


Figura 23- Método de ensaio com uma barra. (CSA S806-12)

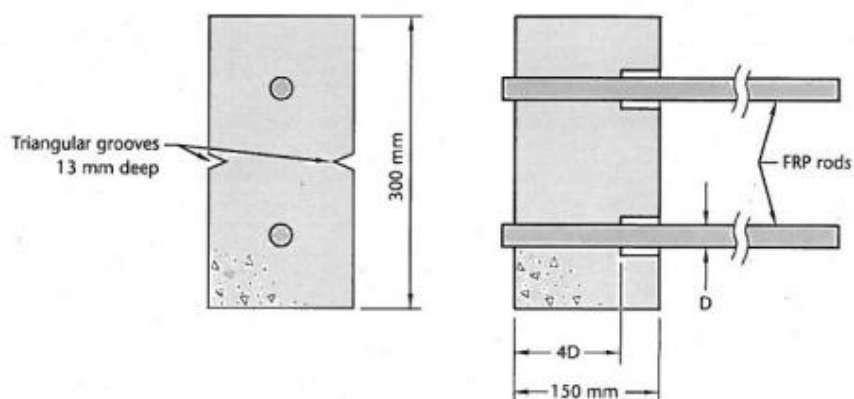


Figura 24- Método de ensaio com duas barras. (CSA S806-12)

O cobrimento do concreto deve ser cinco ou seis vezes o diâmetro da barra para que não ocorra fendilhamento do concreto, por isso, se for necessário estas dimensões dos cubos podem ser alteradas de modo a garantir isto. Durante a concretagem, a forma deve ser mantida horizontal e se manter assim até os ensaios.

O esquema do ensaio está descrito na figura 25. Devem ser alocados três medidores de deslocamento em cada extremidade da barra. O dispositivo de transmissão de carga deve transmitir apenas cargas axiais à barra de GFRP. O alongamento da barra deve ser medido e descontado do deslizamento medido na extremidade carregada.

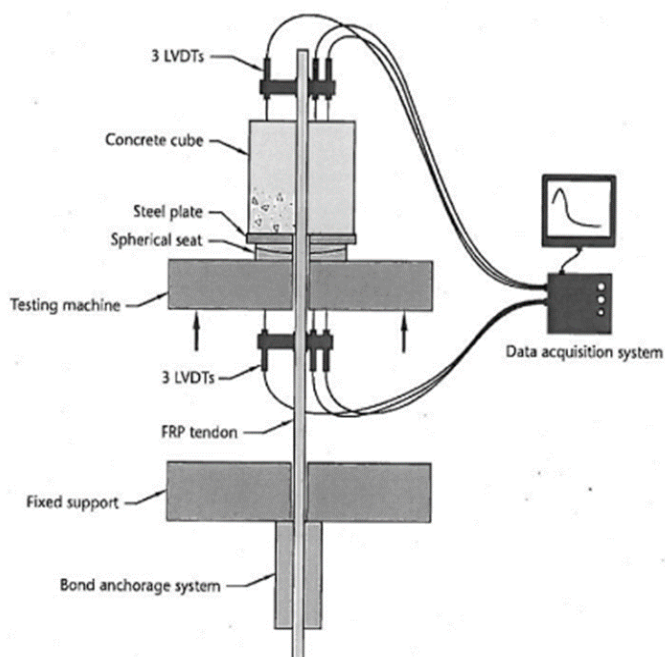


Figura 25- Esquema do ensaio de arrancamento. (CSA S806-12)

A tensão média de aderência deve ser calculada e descrita com uma precisão de 3 casas decimais e as curvas  $\tau - s$  em ambas as faces, livre e carregada, devem ser plotadas para cada teste.

$$\tau = \frac{P}{ul} \quad (16)$$

Onde

$l$  é o comprimento de aderência;

$P$  é a carga de tração;

$u$  é o comprimento periférico nominal da barra;

$\tau$  é a tensão média de aderência.

Devem ser calculadas as tensões de aderência correspondentes aos deslizamentos de 0,05mm; 0,10mm e 0,25mm.

## 2.7. Estudos anteriores sobre aderência entre barras de GFRP e concreto

### 2.7.1. M.Pecce; G.manfredi; R.Realfonzo; E.Cosenza – Experimental and Analytical Evaluation of Bond Properties of GFRP bars. (2001).

Os autores testaram barras de FRP de mesmo diâmetro, 0,7in (12,7mm), com quatro comprimentos de aderência distintos (5d, 10d, 20d e 30d, sendo d o diâmetro da barra) através do Beam Test. Foram avaliadas duas classes de resistência de concreto – 39 e 52MPa, embora a variação da resistência neste nível não influencie significativamente os valores da tensão de aderência, pois neste caso dependem da resistência ao cisalhamento da superfície das nervuras. Foram usados prismas conforme indica a figura 26.

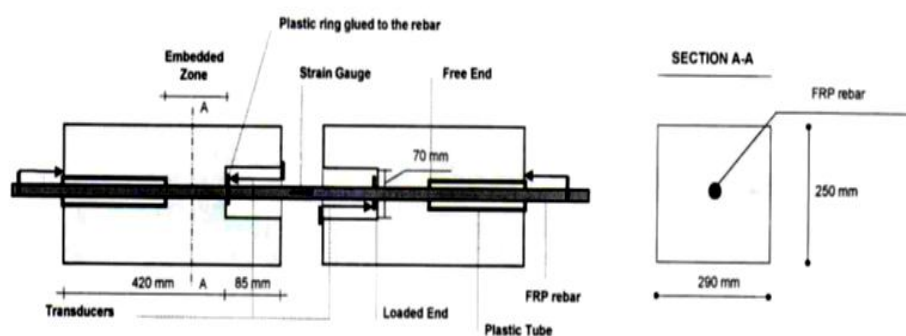


Figura 26 - Modelo de ensaio. (PECCE et al, 2001)

Foram obtidas rupturas por arrancamento para comprimento de aderência igual a 5d e ruptura da barra por tração para comprimento de aderência igual ou superior a 10d. Os autores concluíram que comprimentos de aderência da ordem de dez vezes o diâmetro da barra equivale praticamente ao comprimento de ancoragem. Nas rupturas por arrancamento foram observados o cisalhamento superficial da nervura e arrancamento do concreto entre duas nervuras subsequentes e somente poucas fissuras com pequenas aberturas foram observadas. Este cisalhamento das nervuras leva a um comportamento dúctil da aderência.

A figura 27 mostra que, contrariamente ao que ocorre com as barras de aço, os deslizamentos medidos na extremidade carregada são significativamente maiores do que aqueles medidos na extremidade livre, devido ao baixo módulo de elasticidade (1/5 do aço) que resulta em deformações elásticas na porção embebida da barra.

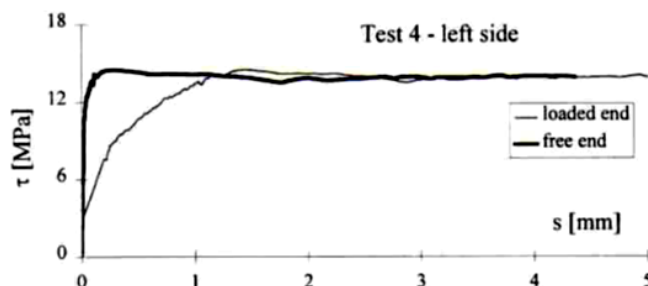


Figura 27- Gráfico tensão x deslizamento para extremidades livre e carregada.  
(PECCE et al, 2001)

#### 2.7.2. Katzl, A. - Bond to Concrete of FRP Rebars and Tendon. (2001)

O autor realizou uma revisão bibliográfica sobre o tema e concluiu que:

- Os mecanismos de aderência das barras de FRP são significativamente diferentes das barras de aço. A aderência das barras lisas é em geral muito baixa, o que é melhorado com os tratamentos superficiais.
- A resistência média de aderência diminui com aumento do comprimento de aderência;
- A distribuição de tensões ao longo do comprimento de aderência é não linear;
- A resistência de aderência não é afetada por concretos com resistência à compressão de até 20MPa, sendo a ruptura condicionada pelo desempenho da nervura;

#### 2.7.3. Achillides Z, Pilakoutas K. - Bond Behavior of Fiber Reinforced Polymer bars under direct Pullout Conditions. (2004)

Por meio de ensaios de arrancamento os autores examinaram os seguintes fatores: tipo de fibra da barra, resistência do concreto, diâmetro da barra, forma da barra, características da superfície da barra, comprimento de aderência e o efeito da localização do comprimento de aderência no cubo de concreto.

Foram moldados cubos de 20cm, com barras de FRP dispostas no centro. Durante o carregamento foram medidos os deslocamentos relativos da barra em relação

à superfície do cubo tanto na extremidade carregada como na descarregada. Para as barras de fibra de vidro os autores verificaram que a extremidade carregada apresenta deslizamentos desde o início do carregamento, tão logo se dê a ruptura da adesão química entre o concreto e a barra. Por outro lado, a extremidade descarregada permanece praticamente nula até que a tensão de aderência alcance níveis bastante elevados, em comparação com a tensão máxima. Tal fato está ilustrado no gráfico da figura 28. Os resultados mostraram que a razão entre a tensão média e a tensão máxima devidas à adesão química, na extremidade descarregada é de cerca de 80%. Os resultados também sugeriram que não há relação clara entre a resistência de aderência e o módulo de elasticidade da barra.

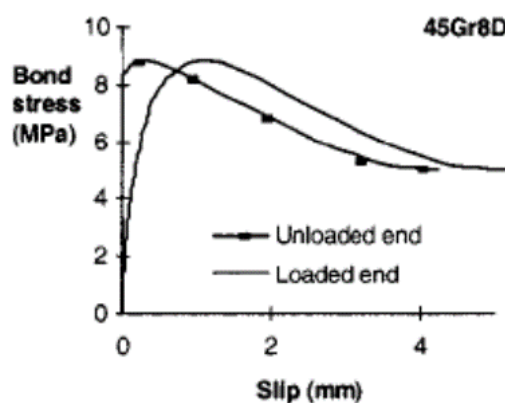


Figura 28- Gráfico tensão x deslizamento para extremidades carregada e não carregada. (ACHILLIDES e PILAKOUTAS, 2004)

Os autores concluíram que:

- As tensões de aderência diminuem com o aumento do comprimento de aderência e do diâmetro da barra.
- Para concreto com resistência à compressão maior que 30 MPa, a ruptura da aderência ocorre na superfície da barra. Consequentemente, em tal concreto, a resistência de aderência não depende do valor da resistência do concreto. No entanto, para resistência à compressão do concreto menor, cerca de 15 MPa, o modo de ruptura muda. Neste caso, a ruptura da interface se dá na matriz de concreto, e comportamento da aderência da barra torna-se diretamente relacionado à resistência do concreto.

2.7.4. Iara Couto - Análise teórica e experimental do comportamento da aderência entre concreto e barras de fibra de vidro impregnadas por polímeros. (2007)

Couto analisou o comportamento da aderência entre barras de GFRP e o concreto por meio de ensaios de arrancamento baseados nas prescrições da RILEM-FIB-CEB (1973). Foram testadas barras GFRP de diâmetros de 9 mm e 16 mm compostas por fibra de vidro e matriz polimérica de vinil-éster embebidas em cilindros de concreto com comprimento de  $10\phi$  e diâmetro de  $10\phi$ , sendo o comprimento de ancoragem de  $5\phi$ . A conformação superficial das barras foi obtida por meio de fibras de vidro dispostas de forma helicoidal e uma camada de areia. Foram testados concretos com resistência à compressão de 30 MPa, 60 MPa e 80 MPa.

A autora concluiu que:

- Os ensaios de tração das barras de GFRP atestou o comportamento elástico linear do material até a ruptura. O dispositivo de alumínio fabricado de acordo com as especificações ASTM D 3916-02 não se mostrou eficiente durante o ensaio, pois não evitou que as barras rompessem por cisalhamento junto a ele.
- Os ensaios de arrancamento realizados se mostraram adequados para a avaliação do comportamento de aderência entre as barras de GFRP e o concreto, porém, alguns valores de deslocamento último e das tensões de aderência  $\tau_{0,01}$  e  $\tau_{0,1}$  apresentaram grande variabilidade nos resultados.
- Os modelos que utilizaram os concretos de alta resistência à compressão (60 MPa e 80 MPa) não apresentaram variação significativa entre si. A autora refere que para concretos com resistências à compressão superiores a 50 MPa, a resistência de aderência é influenciada basicamente pelas propriedades da barra.
- Os modelos que utilizaram os concretos de alta resistência à compressão (60 MPa e 80 MPa) apresentaram resistência de aderência sensivelmente superior quando comparados aos modelos com o concreto de resistência à compressão de 30 MPa;
- Os modelos com barras de 9 mm apresentaram ruptura por arrancamento da barra. Em alguns casos, quando se utilizou concreto de resistência à compressão de 80 MPa ocorreu ruptura combinada.
- Os modelos com barras de 16 mm foram caracterizados pela ruptura combinada (ruptura da superfície externa da barra e posterior ruptura por fendilhamento

do concreto), exceto os modelos com concreto de resistência à compressão de 30 MPa, que apresentaram ruptura por arrancamento da barra.



Figura 29- Ruptura combinada no ensaio de arrancamento. (COUTO, 2007)

- A resistência de aderência foi sensivelmente maior nos modelos com barra de 16 mm quando comparados aos modelos com barra de 9 mm, independentemente da resistência à compressão do concreto.

- Comparando o comportamento da aderência nos modelos de arrancamento com barras de GFRP e com barras de aço, verificou-se que os modelos com barras e GFRP apresentaram menor resistência de aderência e maior deslocamento último que os modelos com barras de aço. Comprovando o fato da resistência de aderência entre as barras de GFRP e o concreto ser controlada pela parcela da aderência por atrito, diferente dos modelos com barra de aço, cuja parcela que exerce maior influência é a aderência mecânica.

Esta autora fez uma projeção do comprimento de ancoragem básico ( $l_b$ ) e da resistência de aderência ( $f_{bd}$ ) para as barras de GFRP por ela testadas. Por meio da equação original do ACI 318 (1999) (17) e da equação de equilíbrio de forças em uma barra (18), obteve-se o valor médio de K substituindo na equação (19) os resultados experimentais e, finalmente, concluiu-se a equação de  $l_b$  para a pesquisa. (20)

$$l_b = K \cdot \frac{A_b \cdot f_y}{\sqrt{f_c}} \quad (17)$$

$$l_b \cdot \pi \cdot \Phi \cdot f_{bd} = A_b \cdot f_y \quad (18)$$

Igualando  $l_b$  das duas equações, obtém-se:

$$K = \frac{\sqrt{F_c}}{F_{bd} \cdot \pi \cdot \Phi} \quad (19)$$



$$l_b = 0,058 \cdot \frac{A_b \cdot f_y}{\sqrt{f_c}} \quad (20)$$

Onde:

$A_b$  – área da seção transversal da barra;

$f_c$  – resistência à compressão do concreto;

$f_y$  – resistência última da barra.

A equação pode ser rearranjada e obter-se a resistência de aderência.

$$f_{bd} = 17,182 \times \frac{\sqrt{f_c}}{\phi \times \pi} \quad (21)$$

2.7.5. Baena, M; Torres, L; Turon, R; Barris, C. - Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test. (2009)

Este artigo apresenta os resultados de um programa experimental envolvendo 88 modelos cúbicos de 200mm de face, conforme as normas ACI 440.3R-04 e CSA S806-02. Foram testadas barras de CFPP e GFRP e de aço, com comprimento de aderência de cinco vezes o diâmetro da barra. Foram analisadas a conformidade superficial (revestimento de areia, nervuras helicoidais e com sulcos) e o diâmetro da barra (8, 12, 16 e 19 mm), bem como a resistência do concreto, para o qual avaliaram as resistências de 28,63 sendo chamado de C1 e 52,19 MPa, como C2. Foram lidos os deslocamentos das faces carregada e descarregada.

As barras de GFRP nervuradas foram denominadas por R4 e R6 e suas características estão descritas na tabela 6:

Tabela 6- Características das barras ensaiadas.

Nomenclatura	Resina	Diâmetro (mm)	Superfície
R4	Vinil-éster	8	Helicoidal com areia
R4	Vinil-éster	12	Helicoidal com areia
R4	Vinil-éster	16	Helicoidal com areia
R4	Vinil-éster	19	Helicoidal com areia
R6	Poliéster	8	Helicoidal
R6	Poliéster	12	Helicoidal
R6	Poliéster	16	Helicoidal
R6	Poliéster	19	Helicoidal

Fonte: Adaptado de Baena et al. (2009)

A influência da geometria das barras nervuradas foi analisada por meio da relação geométrica  $a_s$ , entre as projeções da área perpendicular da nervura ao eixo e o

espaçamento entre os centros das nervuras conforme mostrado na Figura 30. As características geométricas das barras R4 e R6 estão apresentadas na tabela 7.

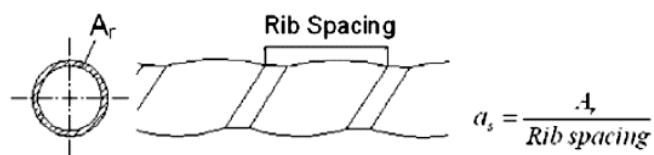


Figura 30- Cálculo para área ( $a_s$ ) das barras. (BAENA et al, 2009)

Tabela 7 - Resultado da geometria das barras

Nomenclatura	Diâmetro real (mm)	Espaçamento entre nervuras (mm)	Altura das nervuras (mm)	$a_s$
R4	9,28	22,75	0,47	0,633
R4	13,73	21,66	0,47	0,968
R4	16,11	19,6	0,47	1,249
R4	19,14	17,35	0,47	1,669
R6	7,07	18,39	1,38	1,992
R6	12,35	16,02	1,09	2,873
R6	17,36	16,13	0,84	2,978
R6	21,25	16,42	1,03	4,391

Fonte: Adaptado de Baena et al. (2009)

As nervuras helicoidais das barras R4 apresentavam altura constante, mas o espaçamento entre si diminuía com o diâmetro da barra. Os autores referem que nas barras com menores diâmetros, os espaçamentos entre nervuras e, conseqüentemente, os valores de  $a_s$  decrescem. Para pequenos valores de  $a_s$  a ação resistente das nervuras diminui, produzindo uma queda mais abrupta da tensão de aderência após o pico da curva. Maiores valores de  $a_s$  possibilitam maiores resistências de aderência após a destruição da adesão química.

Os autores verificaram que, embora o aumento da resistência à compressão do concreto possibilite maior rigidez inicial da aderência, a resistência de aderência não depende sobremaneira do valor da resistência do concreto, mas sim das propriedades da barra, como refere a literatura técnica.

Tal qual refere a literatura técnica, os autores verificaram que maiores diâmetros levam à menores valores da tensão de aderência. Segundo os autores, isto é, devido à natureza frágil da ruptura observada nos ensaios de arrancamento e a maior quantidade de energia elástica disponível ao usar diâmetros maiores.

Em relação à conformação superficial, os autores verificaram que a tensão de aderência aumenta com o valor  $a_s$ .

Os efeitos dinâmicos que ocorrem durante o ensaio, quando a camada revestida de areia descola, explica os trajetos de descarregamento e recarga.

#### 2.7.6. Beiral, W. V. – Aderência entre concreto e barras lisas de Polímero reforçado com Fibra de Vidro (2012)

A pesquisa teve por objetivo estudar o comportamento da aderência entre barras lisas de fibra de vidro impregnada por polímero e o concreto, por meio de ensaios de arrancamento em metodologia que teve por base as recomendações da RILEM/FIP/CEB (1973) e com modelos cilíndricos.

Foram utilizadas duas resistências à compressão do concreto, de 47 e 58 MPa. As barras testadas eram lisas, de fabricação da empresa Cogumelo e tinham os seguintes diâmetros: 9,7 mm, 8,6 mm, 8,3 mm, 7,3 mm, 7,1 mm, 6,6 mm e 6,4 mm. A figura 31 apresenta o esquema do ensaio.



Figura 31- Esquema do ensaio. (BEIRAL, 2012)

O autor concluiu que:

- Apesar da grande variabilidade verificada nos resultados de aderência, por serem barras lisas, o autor verificou que barras de maiores diâmetros apresentaram menores valores de tensão de aderência e maiores deslocamentos no carregamento final, o que coincide com pesquisas realizadas nesta área (COUTO, 2007). Isto ocorre devido

ao efeito *shear lag*, que resulta em uma distribuição não uniforme de tensões normais na seção transversal da barra.

- A resistência de aderência foi maior nos concretos com maior resistência à compressão - 58MPa -, em comparação com o de 47 MPa.
- A barra composta com fibra de vidro tipo C apresentou maior tensão de aderência que aquela com tipo E.
- Com base na literatura técnica, as barras lisas levam a valores de resistência de aderência mais baixos.

#### 2.7.7. Gonçalves, J. F. G. - Aderência de varões GFRP no betão (2013)

O programa experimental foi composto de duas partes, a primeira teve por objetivo avaliar o melhor comprimento de ancoragem por meio de ensaios de arrancamento de barras com diferentes comprimentos de aderência. Para tal foram ensaiados 18 modelos prismáticos com dimensões de 200x200x750 mm divididos em grupos de seis séries, sendo três com barras com cabeça de ancoragem e comprimentos de ancoragem de 250mm e 500mm e três com barras sem cabeça de ancoragem e comprimentos de ancoragem de 250mm, 500mm e 750mm, conforme mostrado na Figura 32.



Figura 32- Barras ensaiadas sem e com cabeça de ancoragem. (GONÇALVES, 2013)

A segunda parte do projeto consistiu no arrancamento de barras de diferentes diâmetros para análise da tensão de aderência. Foram ensaiados blocos cúbicos de 200 mm de face, com comprimento de ancoragem de cinco vezes o diâmetro da barra, conforme o ACI 440-3R-04.

Em todo o projeto foram usadas barras de GFRP com superfície nervurada, do fabricante *Schoeck* e barras de aço do mesmo diâmetro como método comparativo para os resultados. O valor médio da resistência à compressão do concreto era de 41 MPa.

Para os ensaios de arrancamento, foram usadas barras de 12, 16 e 25 mm, para ambos os materiais, aço e GFRP.

Nas figuras abaixo estão os esquemas dos dois ensaios de arrancamento.

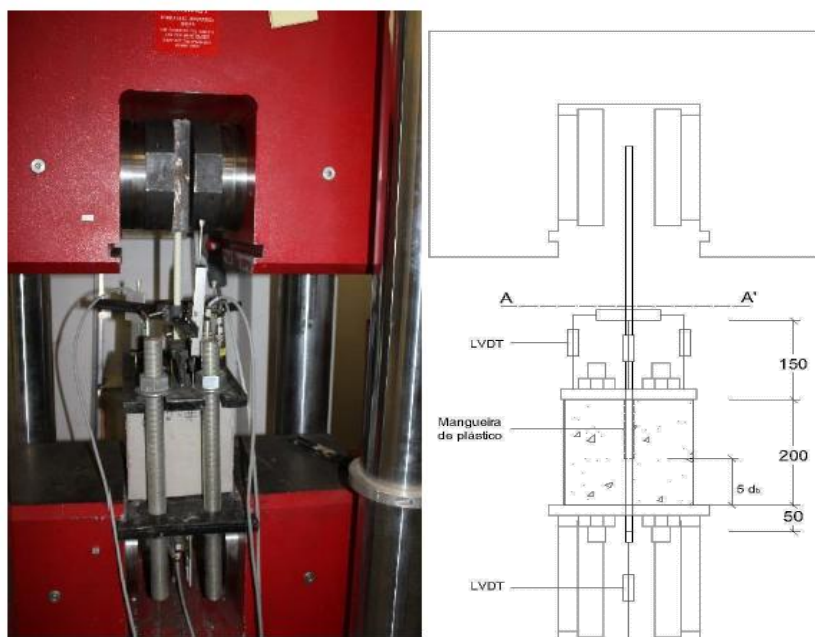


Figura 33- Esquema de ensaio de arrancamento,  $L_d = 5d$  (GONÇALVES,2013)

A Figura 34 ilustra o modo de ruptura dos ensaios em que ocorreu esmagamento do concreto ao redor da superfície da barra.



Figura 34 - Modo de ruptura dos ensaios. (GONÇALVES, 2013)

Nos ensaios de arrancamento com comprimento de  $5d$  os ensaios revelaram diminuição das tensões de aderência com o aumento do diâmetro da barra. Este aumento está relacionado com o efeito Poisson e com o comprimento de ancoragem da barra.

De modo geral, o autor concluiu que as barras de GFRP desenvolvem tensões de aderência mais baixas que as de aço.

2.7.8. Gu, X.; Yu, B. e Wub, M. - Experimental study of the bond performance and mechanical response of GFRP reinforced concrete (2015).

O referido trabalho consiste em três etapas, a primeira delas é a obtenção dos parâmetros mecânicos, seguida de ensaios de arrancamento e por último ensaio de flexão em vigas com barras de aço e de GFRP.

Para os ensaios de arrancamento foram analisados seguintes parâmetros: diâmetro da barra, comprimento de ancoragem, altura da nervura, espaçamento da nervura, resistência do concreto e superfície da barra com areia ou não. Foram realizados três exemplares para cada modelo, de acordo com a tabela 8. O ensaio foi feito de acordo com o ACI 440.3R-7.

Tabela 8 - Descritivo dos parâmetros ensaiados.

Série	Resistência à compressão do concreto	Diâmetro	Comprimento de aderência	Espaçamento entre nervuras	Altura da nervura	Areia na superfície
A	30	16	5d	1d	0,05; 1; 1,2	não
B	30	16	5d	0,5d; 0,8d; 1d; 1,2d	1	não
C	30	16	5d	1d	1	não, A, B
D	30	16	5d, 10d, 15d, 20d	1d	1	não
E	30,35,40	16	5d	1d	1	não
F	30	12,16,20,25	5d	1d	1	não
G	30	12,24 (GFRP, STEEL)	5d	1d	1	não

Fonte: Adaptado de GU et al (2015)

As rupturas encontradas durante o ensaio estão ilustradas na Figura 35, sendo (a) ruptura por arrancamento da barra, (b) por fendilhamento do concreto e (c) por ruptura da barra.



a) Arrancamento da barra



b) Fendilhamento do concreto



c) Ruptura da barra

Figura 35- Modos de ruptura dos ensaios. (GU et al, 2015)

Os autores concluíram:

- O aumento na altura da nervura leva a maiores tensões de aderência e, por isso, os autores indicam que as nervuras tenham altura superior a 1mm. Todas as amostras sofreram ruptura por arrancamento. Os autores recomendam que o espaçamento entre nervuras seja inferior a  $1d$ .
- As barras com superfície de areia apresentaram maior tensões de aderência e menores deslizamentos comparado às barras sem superfície tratada.
- A área de contato da barra com o concreto aumenta com maiores comprimentos de ancoragem e proporcionam maiores tensões de tração durante o ensaio.
- Barras de diâmetro de 12, 16 e 20 mm se mostraram semelhantes e mais acentuadas do que a curva da barra de 25mm. A tensão de aderência diminui com o aumento do diâmetro da barra.
- A resistência do concreto não se mostrou como um parâmetro influenciador da tensão de aderência.

Os autores concluíram que a barra de GFRP ótima é aquela que possui altura de nervura de 1mm, espaçamento entre nervuras de 0,8mm e as que possuem os menores diâmetros.

#### 2.7.9. Freitas, N. - Sustentabilidade de Estruturas de Betão em Ambiente Marítimo com Recurso a FRP. (2016)

Freitas avaliou a utilização de estruturas armadas com barras em ambiente marinho, em particular quando são utilizados concretos de resistência elevada.

Para este efeito, procedeu a ensaios de arrancamento. O trabalho foi composto de 48 modelos cúbicos de 200 mm de aresta. Os parâmetros analisados foram o diâmetro da barra, 8 ou 12 mm, o comprimento de aderência, 5d ou 10d, a idade do concreto, 7 dias ou 28 dias e se foi usada água potável ou água do mar.

Os blocos ficaram submersos na mesma água usada para concretagem, durante sua cura, até a data do ensaio. O concreto concebido com água potável foi classificado como de classe de resistência C55/67 e o concreto utilizando água do mar foi de classe C50/60.

O sistema instrumental usado incluiu a medição da força de tração e dos deslocamentos ao longo do eixo longitudinal da barra. Na extremidade carregada foram usados três LVDTs enquanto na extremidade livre foi usado um LVDT.

A configuração do ensaio de arrancamento teve por base as recomendações presentes na norma CSA Standards 2013 para o ensaio com a barra de GFRP na posição horizontal. Foi necessário proceder a colocação de um sistema de ancoragem na extremidade da barra, constituído por tubos metálicos de parede fina, com espessura de 1,5 mm, e resina epóxi na ligação entre o tubo metálico e barra.

A seguir, são mostrados os resultados dos ensaios aos 28 dias do concreto com utilização de água potável, de modo a serem comparados com os demais trabalhos descritos nesta revisão bibliográfica.

Na Figura 36 são apresentadas as curvas força x deslizamento da barra de diâmetro 8mm e comprimentos de ancoragem  $L_b10\emptyset$  e  $L_b5\emptyset$ . Nos casos dos modelos de ensaio com  $L_b10\emptyset$ , o valor médio da força de arrancamento máxima foi de 33,7 kN para um deslizamento de 0,31 mm na extremidade livre. Constatou-se que a resistência mecânica das nervuras da barra foi completamente solicitada pelos esforços de tração até à degradação total das mesmas, acompanhada pelo aumento do dano interno do concreto circundante à barra de GFRP.



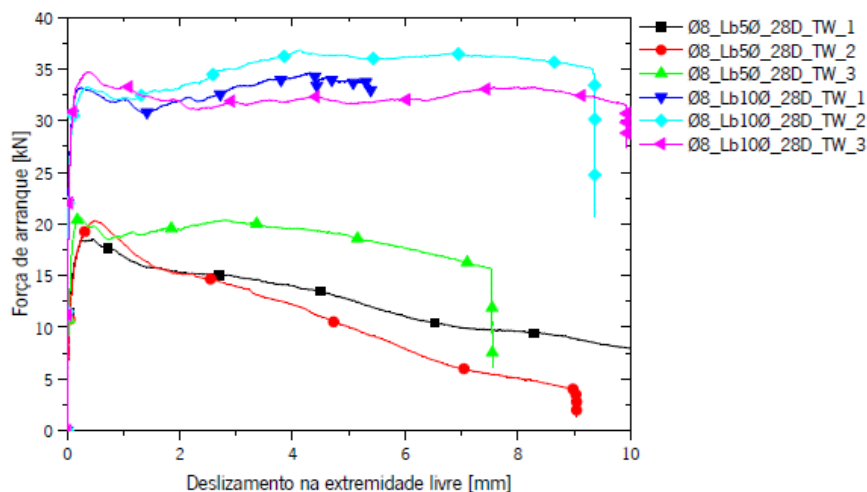


Figura 36 - Gráficos deslocamento x força de arrancamento para barras de diâmetro 8 mm com utilização de água potável,  $l_d = 5d$  e  $l_d = 10d$ . (FREITAS, 2016)

Na Figura 37 são apresentadas as curvas força x deslocamento da barra de diâmetro 12mm e comprimentos de ancoragem  $L_b10Ø$  e  $L_b5Ø$ .

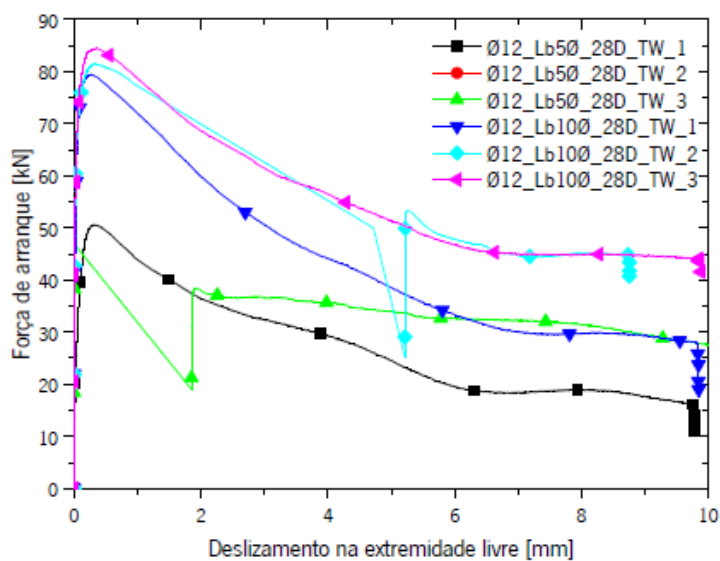


Figura 37 - Gráficos deslocamento x força de arrancamento para barras de diâmetro de 12 mm com utilização de água potável,  $l_d = 5d$  e  $l_d = 10d$ . (FREITAS, 2016)

Foram verificados três modos de ruptura, sendo eles: (i) deslizamento da barra acompanhado pela ruptura total das nervuras, mobilizando na totalidade da capacidade resistente da ligação; (ii) deslizamento da barra acompanhado pela ruptura parcial das nervuras e (iii) deslizamento da barra. É de realçar que o modo de ruptura por

deslizamento da barra foi aquele que se observou com maior frequência durante o programa experimental.

De modo geral, a força de arrancamento aumenta com o aumento do diâmetro da barra e com o aumento do comprimento de ancoragem.

Este comportamento pode ser justificado pela maior capacidade de transmissão de carga entre a barra de GFRP e o concreto, em virtude de maiores áreas de contato entre as interfaces.

Os resultados dos ensaios mostraram que a tensão de aderência diminui com o aumento do comprimento de ancoragem e com o aumento do diâmetro da barra. A diminuição da tensão é justificada pelo fato de que com o aumento do comprimento de ancoragem são mobilizadas maiores áreas de contato entre a barra de GFRP e a matriz de concreto e devido à distribuição não linear das tensões de corte ao longo do comprimento de ancoragem.

#### 2.7.10. Yan, F.; Lin, Z.; Yang, M. - Bond mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete. (2016)

Os autores criaram um banco de dados que consistiu em 682 estudos e práticas relativos aos ensaios de arrancamento, com o objetivo de observar os fatores que afetam o comportamento da aderência, os modos de ruptura e a relação básica entre resistência de aderência-deslizamento. Efetuaram também comparações entre diferentes recomendações normativas para predição da resistência de aderência: ACI 440.1R-06, CSA S806-02, CSA S6-06 e a Norma Japonesa de projeto.

Da comparação das quatro normas os autores verificaram que os valores experimentais da resistência de aderência são maiores do que aqueles previstos pelas normas, indicando que a formulação apresentada pelos códigos é conservadora, e que o comprimento de aderência normatizado é suficiente para que as barras de FRP possam atingir a resistência última antes da ruptura por aderência.

Em relação aos fatores críticos e seus correspondentes modos de ruptura e resistência de aderência das barras de GFRP ao concreto, os autores verificaram a existência de vários modos de ruptura: arrancamento da barra, fendilhamento do concreto, ruptura da ancoragem, ruptura da barra e o destacamento das fibras superficiais, estando todos esses modos associados à resistência à compressão do

concreto, ao diâmetro da barra, à espessura de cobrimento, ao comprimento de aderência, ao espaçamento das barras e à presença de armadura transversal.

A figura 38 relaciona os modos de ruptura com a resistência à compressão do concreto. As rupturas dominantes são as por arrancamento e fendilhamento, representando mais de 80% de todos os modos de ruptura, independentemente da resistência do concreto. Rupturas por fendilhamento ocorrem, principalmente, em concretos com resistência à compressão de 30 e 50 MPa, enquanto rupturas na ancoragem ocorrem para resistências à compressão acima de 30 MPa. A ruptura da barra foi observada em 32 casos, com concretos com resistências à compressão de 30 MPa a 50 MPa, enquanto 42 espécimes romperam pelo destacamento das fibras superficiais (cisalhamento da rugosidade superficial da barra) e resistência à compressão do concreto entre 50 e 60 MPa.

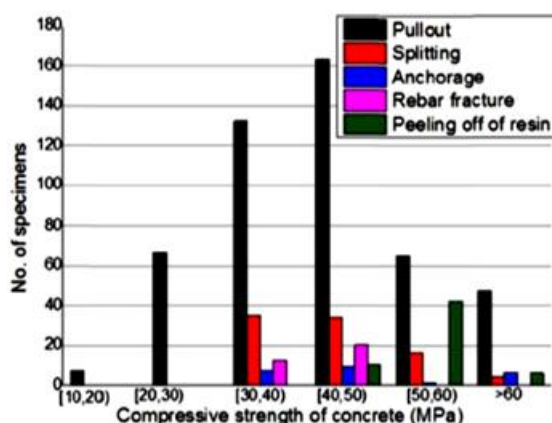


Figura 38 - Rupturas associadas à resistência à compressão do concreto. (YAN et al, 2016)

A Fig. 39 relaciona a resistência de aderência com a resistência à compressão do concreto (em termos de  $\sqrt{f'_c}$ ) relativos à ruptura por arrancamento e fendilhamento, em que  $f'_c$  refere-se à resistência à compressão do concreto aos 28 dias. Observa-se que a relação entre a resistência de aderência e a resistência do concreto começa a diminuir com o aumento da resistência à compressão após 55 MPa.

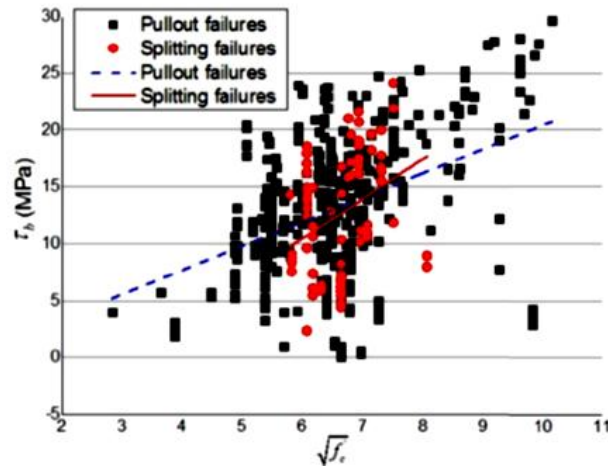


Figura 39 - Resistência de aderência-resistência à compressão do concreto  $\sqrt{f'_c}$ . (YAN et al, 2016)

A Figura 40 plota a resistência de aderência normalizada pela resistência à compressão do concreto vs. o comprimento de aderência ( $l_d / d_b$ ) normalizado sob rupturas de arrancamento e fendilhamento. Observa-se que a média das máximas resistências de aderência das barras de GFRP ao concreto diminui à medida que o comprimento de aderência aumenta, semelhante ao que ocorre com as barras de aço. Isto ocorre devido a uma distribuição não-linear da tensão de aderência ao longo da barra, como mostrado esquematicamente nesta figura.

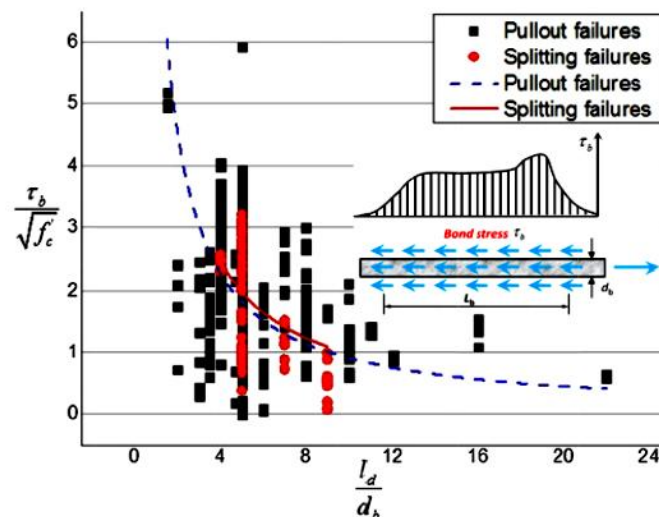


Figura 40 - Resistência de aderência normalizada-  $l_d/d_b$ . (YAN et al, 2016)

Por outro lado, o deslizamento aumenta à medida que o comprimento de aderência aumenta, como mostrado na Fig. 41. Maiores comprimentos de aderência resistem à aplicação de maiores forças aplicadas, levando aos maiores deslizamentos.

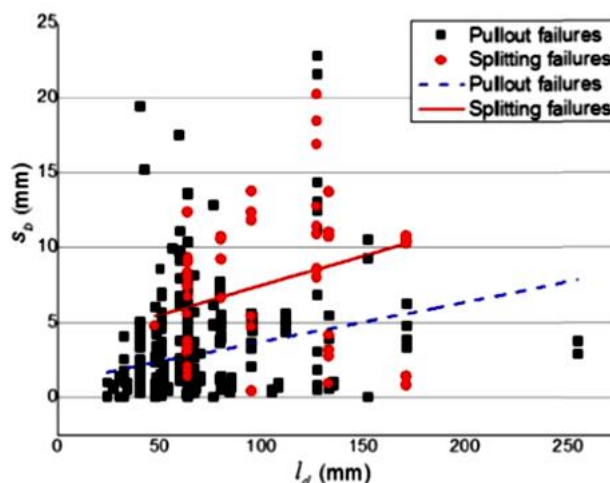


Figura 41 - Deslizamento x  $l_d$ . (YAN et al, 2016)

A Fig. 42 mostra a relação entre condições de superfície e modos de ruptura. Nesta figura, o primeiro termo das legendas usadas representa os modos de ruptura, enquanto o segundo termo é para condições de superfície: a) R = nervura; b) HW = enrolamento helicoidal; c) SC = revestimento de areia; d) HWSC = enrolamento helicoidal e revestimento de areia; e) SW = enrolamento espiral. Claramente, o modo de ruptura por arrancamento é 84% maior do que todos os outros. As barras de FRP com nervuras (Pullout-R) ocupam a maior proporção entre todos os tratamentos de superfície, com cerca de 35% do total de rupturas. Superfície com enrolamento helicoidal e revestimento de areia (P-HWSC) permite desejável intertravamento mecânico, cerca de 22% do total. Apenas 16% das rupturas ocorreu por fendilhamento, ocorrendo com enrolamento helicoidal e revestimento de areia (S-HWSC). Portanto, o uso de nervuras ou do enrolamento helicoidal e revestimento de areia são as condições de superfície que promovem o maior intertravamento mecânico, levando ao aumento das tensões radiais e, portanto, maiores deslizamentos.

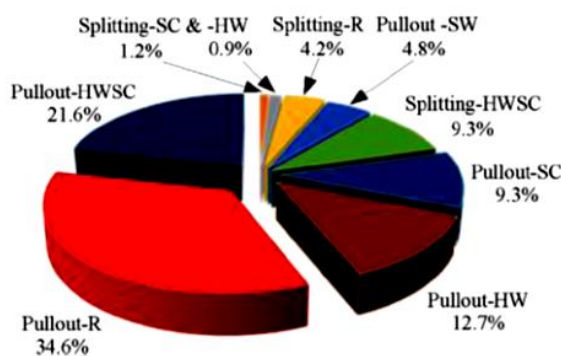


Figura 42 - Gráfico dos modos de ruptura. (YAN et al, 2016)

Os autores verificaram ainda que a inclusão de fibras discretas na massa do concreto e de armaduras transversais são soluções efetivas para aumentar a resistência da aderência de barras de GFRP ao concreto.

2.7.11. Hossain, K., M., A. - Bond Strength of GFRP Bars Embedded in Engineered Cementitious Composite using RILEM Beam Testing. (2018)

Este artigo apresentou um estudo sobre ensaios de aderência em vigas, o Beam Test. Para os ensaios foram utilizados dois tipos de concreto: concreto convencional e compósito cimentício de elevado desempenho com fibras PVA (EEC). As barras testadas possuíam diâmetros 12,5mm; 15,9mm e 19,1 mm, sendo dois modelos de barra, um de baixo módulo de elasticidade e outro de alto módulo. Os comprimentos de ancoragem ensaiados foram de 5d, 7d e 10d, totalizando então, 90 amostras para teste, sendo três para cada modelo. Foi utilizado o ensaio de vigas com dimensões que variavam de acordo com o diâmetro das barras testadas.

O autor concluiu que:

- Todos os modelos com EEC romperam por arrancamento e nos modelos de concreto convencional a maioria foi por arrancamento com exceção de três espécimes.
- A carga de ruptura aumentou conforme aumentou o diâmetro da barra e o comprimento de ancoragem.
- O comportamento dos modelos com material EEC teve um comportamento pós-pico melhor (mais ductilidade) que aqueles com concreto convencional e que isto se deveu às propriedades da fibra.
- O uso de armadura transversal nas vigas, para evitar o fendilhamento, de acordo com o ACI 408R-03, permitiu o desenvolvimento de maiores tensões de aderência e de ruptura por arrancamento. Como resultado, tensões de aderência são maiores neste ensaio comparadas às obtidas nos ensaios de arrancamento realizados por Hossain et al.(2014), em torno de 1,36 vezes maiores. (HOSSAIN apud HOSSAIN, 2018) A figura abaixo ilustra este comparativo.

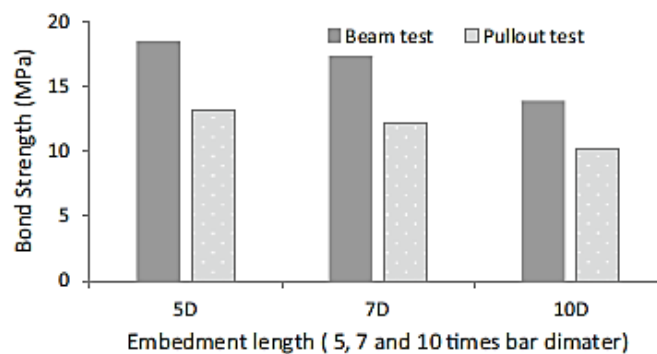


Figura 43 - Comparativo entre os ensaios de aderência.

- A tensão de aderência diminui com o aumento do diâmetro e do comprimento de aderência, confirmando o que outros autores concluíram em trabalhos anteriores.
- As forças de aderência das barras de fibra de vidro HM (alto módulo de elasticidade) foram consistentemente mais baixas do que as de LM (baixo módulo de elasticidade), independentemente do comprimento de ancoragem e diâmetro da barra. Isso foi atribuído principalmente ao descolamento prematuro do revestimento de areia da barra.
- Os valores encontrados para a tensão de aderência por meio das normas CSA S806-12 e ACI 440,1-15 são conservadores e, por isso, podem ser usados com segurança para a previsão da tensão de aderência entre concreto e barras de GFRP.

### **3. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

A investigação experimental do comportamento da aderência entre barras de GFRP e o concreto foi realizada por meio de ensaios de arrancamento segundo a CSA S806-12 e ACI 440.3R-04.

Foi utilizado concreto de 40 MPa, barras com diâmetros de 6,3; 9; 12,5; 16 e 18 mm. Os deslocamentos foram medidos por transdutores de deslocamento. Todos os ensaios, arrancamento e caracterização dos materiais, foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da UERJ, no Rio de Janeiro – RJ.

#### **3.1. Caracterização dos materiais**

##### **3.1.1. Agregado miúdo**

Como agregado miúdo na fabricação do concreto, utilizou-se areia média lavada. As análises foram feitas de acordo com as normas NBR NM: 52(1996); NBR NM:45(2006); NBR NM: 248(2003) e os resultados estão descritos no Anexo I.

##### **3.1.2. Agregado graúdo**

Como agregado graúdo, empregou-se a brita tipo 1 que foi caracterizada conforme as normas NBR NM: 53 (2009); NBR NM:45(2006); NBR NM: 248(2003). As análises granulométricas da brita encontram-se no Anexo II.

##### **3.1.3. Cimento**

Na dosagem do concreto foi utilizado tipo CP II E 32, cimento Portland composto com escória de alto forno, de 32MPa de resistência, Ultra Forte, da fabricante Holcim.

##### **3.1.4. Água**

A água utilizada na mistura foi água potável da rede de abastecimento público da cidade do Rio de Janeiro – RJ.

##### **3.1.5. Aditivo**

Foi usado o aditivo superplastificante Silicon ns Mix 400 da marca Silicon, cujas propriedades fornecidas pelo fabricante estão especificadas na tabela abaixo:



Tabela 9 - Propriedades do aditivo.

Recomendações	Dosagem	Aspecto/ Cor	pH	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )
Aditivo para manutenção da plasticidade 200 min a 4h	480 ml - 1950 ml	líquido translúcido/ mel claro	3,0 +/- 1,0	1,04 +/- 0,02

Fonte: Adaptado do catálogo da Silicon.

### 3.1.6. Dosagem do concreto

A dosagem dos materiais foi realizada segundo o método descrito pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) adaptado do método da ACI (American Concrete Institute), para agregados brasileiros. A resistência média à compressão dos ensaios foi de 41 MPa. O consumo de materiais por metro cúbico de concreto e o traço em massa é apresentado na tabela 10 e o método de dosagem está resumido no Anexo III.

Tabela 10 - Traço em massa do concreto.

Consumo de material por m <sup>3</sup> de concreto (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à compressão do concreto aos 28 dias
	40 MPa
Cimento	431,58
Areia	854,08
Brita	851,36
Água	205
Aditivo	3,45
Traço em massa	1 : 1,98 : 1,99

Para cada concreto produzido foram moldados doze corpos de prova cilíndricos, três para ensaiar a compressão, três para determinação da resistência à tração por compressão diametral, e três para módulo de elasticidade, o restante para eventual necessidade.

Os corpos de prova foram moldados na posição vertical e vibrados em mesa vibratória. Foram desmoldados 24 horas após a concretagem e levados em câmara úmida até o dia dos ensaios. Foram realizadas cinco concretagens.

Para o ensaio de resistência à compressão utilizou-se a NBR 5739 (2007), o ensaio de compressão diametral foi baseado na NBR 7222 (2011), e o de módulo de elasticidade secante estava de acordo com a NBR 8522 (2017). Os resultados obtidos estão resumidos na tabela 11.

Tabela 11 - Resultados dos ensaios de caracterização do concreto.

Concretagem	$F_c$ (MPa)	$F_{ct,sp}$ (MPa)	$E_c$ (GPa)
1ª	35,84	3,63	22,01
2ª	40,72	3,48	24,27
3ª	40,86	3,66	24,21
4ª	43,18	3,56	25,84
5ª	43,98	3,81	23,44
Média	40,92	3,63	23,95
Desvio Padrão	3,17	0,12	1,39

### 3.1.7. Barras de GFRP

As armaduras de GFRP foram fornecidas pela empresa Stratus (2019). O processo de produção das barras é o de pultrusão. A resina utilizada foi a éster vinílica e as fibras foram de vidro, com teor em peso na ordem de 70% de fibra e 30% de resina.

Como mencionado anteriormente, para o estudo experimental foram usadas barras de 6,3; 9; 12,5; 16 e 18mm.

#### 3.1.7.1. Determinação da área da barra

Foi empregada a metodologia descrita na norma ACI 440.3R-04. Para tal, a barra de GFRP era mergulhada em água numa proveta graduada. Desta forma pode-se calcular o diâmetro real e a área equivalente da barra.

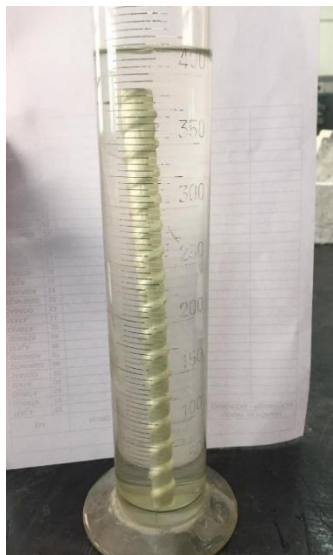


Figura 44 - Ensaio de área.

Inicialmente a proveta graduada continha 400 ml de água. A tabela 12 contém a variação de volume após a imersão da barra, o comprimento inicial da amostra e com isto foi possível calcular o diâmetro real e a área equivalente.

Tabela 12 - Ensaio da área da seção transversal.

$\phi$ (mm)	L méd (mm)	$\Delta V$ (ml)	$\phi$ real (mm)	A equivalente (mm <sup>2</sup> )
6.3	203,7	7,5	6,85	36,82
9	217,7	16	9,67	73,50
12.5	196	26	13,00	132,65
16	202,4	42,5	16,35	209,98
18	193	51	18,34	264,25

### 3.1.7.2. Área relativa das nervuras

Como não existe norma em vigor que analise as características das nervuras em barras de GFRP, utilizou-se a formulação proposta por Baena, et al (2009) para calcular  $a_s$ . Por meio da fórmula abaixo, foi possível montar a tabela 13 com os resultados experimentais.

$$a_s = \frac{A_r}{Rib_{spacing}} \quad (21)$$

Onde

$a_s$  – área relativa da nervura.

$A_r$  - a projeção da área perpendicular da nervura ao eixo da barra.

Rib spacing - o espaçamento entre nervuras.

Tabela 13 - Cálculo do  $\alpha_s$  experimental.

$\phi$ real (mm)	Espaçamento entre Nervuras (mm)	Altura da Nervura (mm)	$\alpha_s$ (mm)
6,85	15,33	0,63	1,514
9,67	15,33	0,74	3,544
13	15,33	0,77	6,665
16,35	15,33	0,6	8,216
18,34	15,33	0,97	16,712

### 3.1.7.3. Ensaio de queima

Outro importante ensaio realizado para conferir as porcentagens de fibra e resina existente nas barras, foi o ensaio de queima, realizado por TEIXEIRA (2018) no Laboratório de Materiais do Instituto Militar de Engenharia, seguindo as instruções normativas da ASTM D297-13.

O ensaio consistiu em selecionar, por amostragem, pequenos protótipos de cada bitola utilizada no ensaio com aproximadamente, 10 mm de comprimento e submetê-los à temperatura de 600°C, em Forno Mufla MA 305, para que desta forma a resina existente em sua matriz queimasse, restando apenas as fibras longitudinais.

Os resultados do ensaio estão na tabela 14. É possível verificar de forma comparativa a aproximação do percentual de fibra e resina encontrados no ensaio e estabelecidos pelo fabricante para dois diâmetros.

Tabela 14 - Resultado do ensaio de queima. (TEIXEIRA, 2018)

Diâmetro	Fabricante		Ensaio	
	Fibra (%)	Resina (%)	Fibra (%)	Resina (%)
6,3 mm	70	30	77	23
12,5 mm			75	25

### 3.1.7.4. Ensaio de tração

O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro por OLIVEIRA (2019). A metodologia de ensaio utilizada foi a baseada no Anexo “C” da norma canadense CAN CSA S-806/12. A figura 45 mostra o esquema de ensaio.



Figura 45 – Esquema de ensaio, com dispositivo de ancoragem para ensaio de tração.

No anexo “B” da referida norma indica-se a utilização de tubos de aço por conta da baixa resistência transversal da barra. Na falta destes, as extremidades das barras seriam esmagadas pelas garras da máquina de ensaio de tração. Foram usados tubos de 40 mm de diâmetro com comprimento de 20 cm, ancorados nas barras com comprimento de 70cm, dimensões essas limitadas pela máquina disponível no laboratório para o ensaio.

Os resultados experimentais encontrados por OLIVEIRA (2019) estão na tabela 15.

Tabela 15 - Resultado do ensaio de tração. (OLIVEIRA, 2019)

$\phi_{nom}$	E		$\sigma_{rup}$	
[mm]	[GPa]	Varição percentual máxima entre os modelos	[MPa]	Varição percentual máxima entre os modelos
6,3	46,187	1,49%	890,705	0,38%
9,0	30,330	2,02%	506,070	1,39%
12,5	46,527	5,99%	520,597	1,66%
16,0	33,845	9,29%	931,630	-
18,0	46,352	9,59%	803,356	2,91%

Fonte: Oliveira, L.O B. S.- *Ensaio De Tração Em Armaduras de GFRP*, relatório Doutorado UERJ- 2019.

Durante os ensaios e em apenas alguns modelos, houve ruptura da barra na região próxima ou até mesmo interior à ancoragem e escorregamento entre o tubo e a resina de epóxi, o que se deu somente para as barras de maior diâmetro (diâmetros nominais de  $\emptyset$  16,00 e  $\emptyset$  18,00 mm). Tal ocorrência foi relatada em outras pesquisas e acredita-se que esse fenômeno poderia ser mitigado aumentando-se o tamanho dos modelos, o que não foi feito devido a limitações da máquina de tração do LEC.

Para a maioria dos diâmetros, o módulo de elasticidade encontrado assemelha-se ao observado pelo fabricante – da ordem de 48 GPa. Contudo, as barras de 9,0 e 16,0 mm apresentaram valores de módulo bastante inferiores, cerca de 30 GPa.

### 3.2. Ensaio de Arrancamento

A metodologia utilizada nos ensaios baseou-se nas prescrições normativas da CSA S806-12 e do ACI 440.3R-04, tendo sido feitas leituras dos deslocamentos apenas na extremidade não carregada das barras. Os modelos foram ensaiados após 28 dias de cura do concreto. Para cada diâmetro variou-se o comprimento de ancoragem em  $5\phi$ ;  $7,5\phi$  e  $10\phi$ , e foram ensaiadas 3 amostras de cada, totalizando 45 blocos. Após esta primeira campanha, sentiu-se necessidade em averiguar alguns resultados e foi feita uma segunda campanha repetindo os diâmetros de 6,85 mm e 13 mm, com ancoragem de  $7,5\phi$  e  $10\phi$ .

### 3.2.1. Forma e moldagem

Para moldagem dos corpos de prova foram utilizadas formas quadradas de madeira com lado de 20 cm. O trecho não aderente da barra foi isolado por meio de um pedaço de mangueira de plástico, conforme mostra a figura 46.



Figura 46- Forma para concretagem.

Os modelos foram concretados em três camadas e adensados com vibrador elétrico. Para cada concretagem foi realizado o teste de abatimento (Slump Test).



Figura 47- Slump Test.



Figura 48- Corpos de prova concretados.

### 3.2.2. Realização do ensaio

O ensaio de arrancamento foi realizado após a cura total dos modelos. O bloco de concreto foi apoiado em uma placa metálica com orifício central que permitia a passagem da barra presa por quatro parafusos a outra placa na parte superior, formando uma “gaiola” conforme foto abaixo.



Figura 49- Esquema de montagem do ensaio.



Os ensaios foram realizados com controle de força e com um transdutor de deslocamento de 10mm acoplado na extremidade não solicitada da barra. Os resultados foram aferidos pelo aparelho de medição digital.



Figura 50- Aparelho de medição do ensaio.

Na extremidade da barra onde foi aplicada a carga, foi necessário a fixação de tubo de pvc de 10 cm de comprimento, para barras de 6,85; 9,67 e 13 mm de diâmetro, para que a garra da máquina pudesse fazer o arrancamento sem danificar a barra. Foi usado epóxi Sikadur 32 para esta fixação, conforme apresentado na figura 51. Para as barras mais grossas (16,35mm e 18,34mm) este procedimento não foi eficiente, tendo em vista que o epóxi usado para colar os tubos de pvc suportava uma carga máxima em torno de 80kN e as cargas últimas nestes ensaios ultrapassaram este valor, levando ao deslizamento ou destruição do tubo antes de finalizar o ensaio. Devido a isto, utilizou-se tubos de aço, que proporcionaram um melhor confinamento do epóxi, com comprimento de 20cm, de acordo com o anexo B da CSA S806-12.



Figura 51- Ancoragem do tubo de pvc na extremidade da barra.

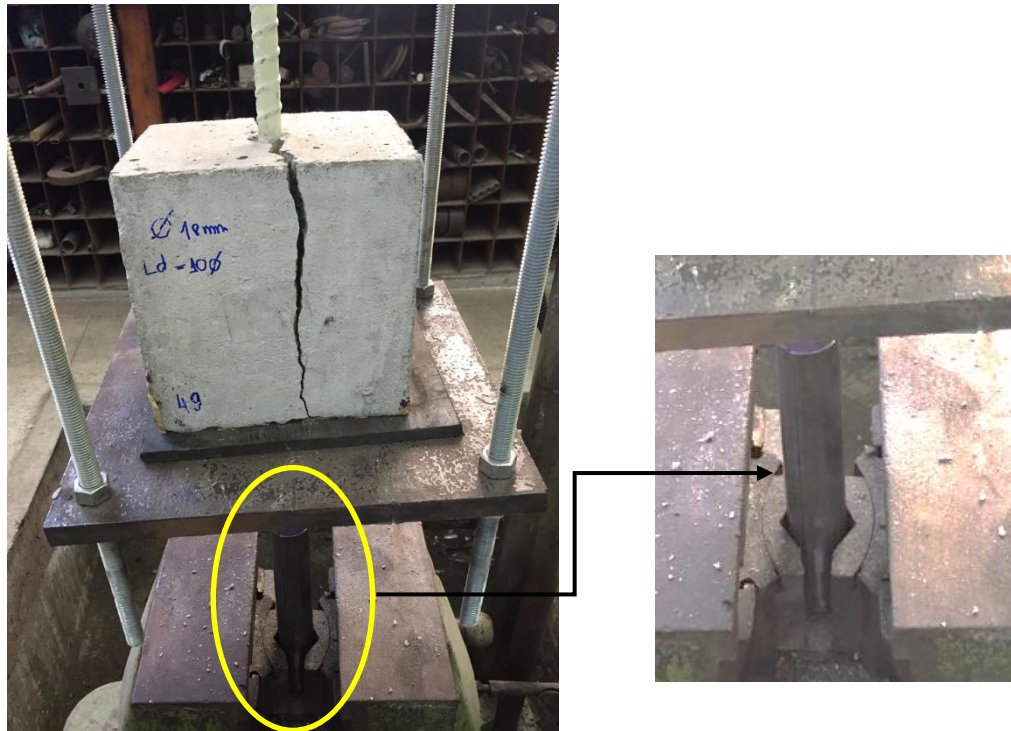


Figura 52- Ancoragem do tubo de aço na extremidade da barra.

#### 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foram ensaiadas inicialmente três amostras de cada modelo. Entretanto, durante os ensaios dos modelos 20; 25; 34 e 44 verificou-se falhas devidas à deficiente colagem das ancoragens e, por isso, os mesmos foram descartados.

De modo a interpretar e analisar os resultados dos ensaios foram construídas curvas tensão de aderência x deslizamento em gráficos que se destacassem cada grupo de parâmetros estudados, como se apresenta nos gráficos 1 a 15. Os valores das tensões de aderência foram calculados conforme equação (16).

Durante os ensaios e, com o objetivo de preservação dos equipamentos do laboratório, o transdutor foi retirado antes do final do carregamento.

##### a) Barra de 6,85 mm.

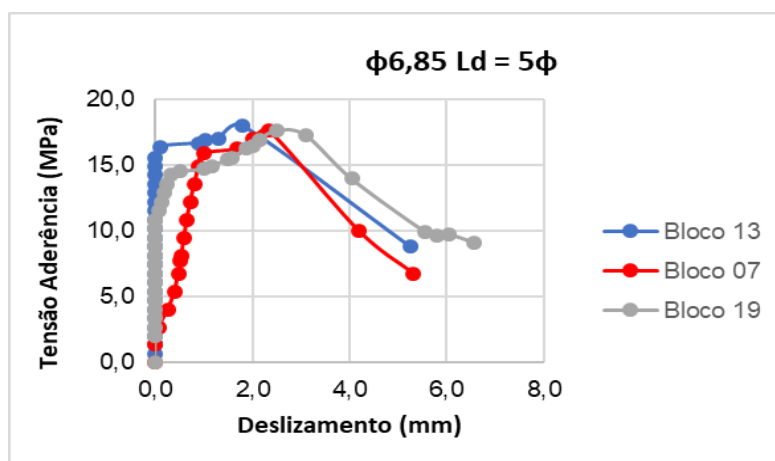


Gráfico 1- Ensaio da barra de 6,85 mm, Ld= 5φ.

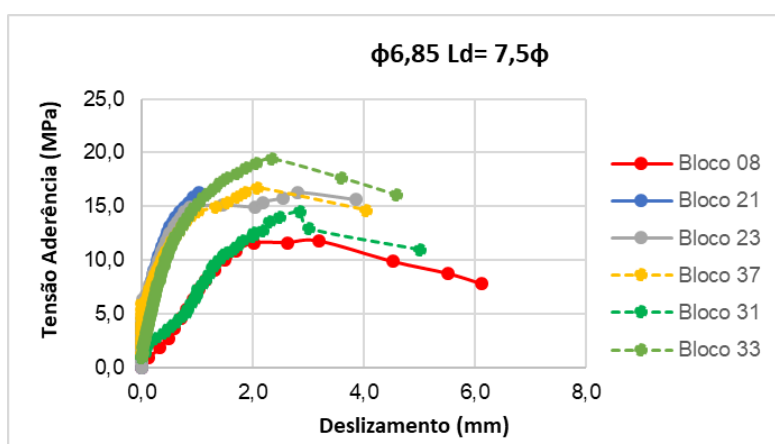


Gráfico 2- Ensaio das barras 6,85mm, Ld= 7,5 φ.

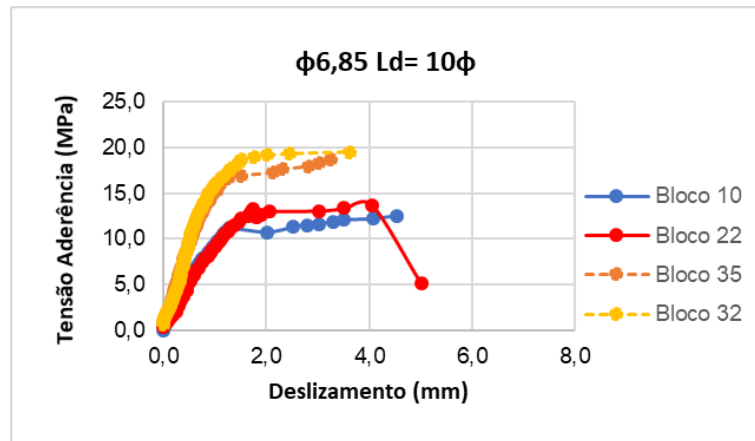


Gráfico 3- Ensaio das barras 6,85 mm, Ld= 10φ.

b) Barra de 9,67 mm.

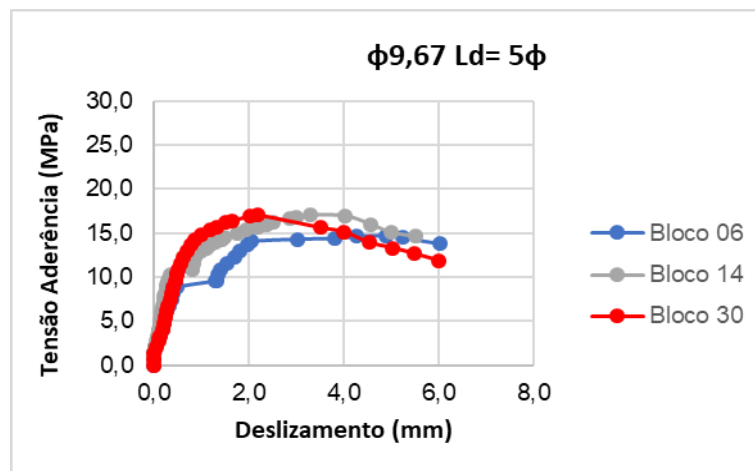


Gráfico 4- Ensaio das barras de 9,67 mm, Ld= 5φ.

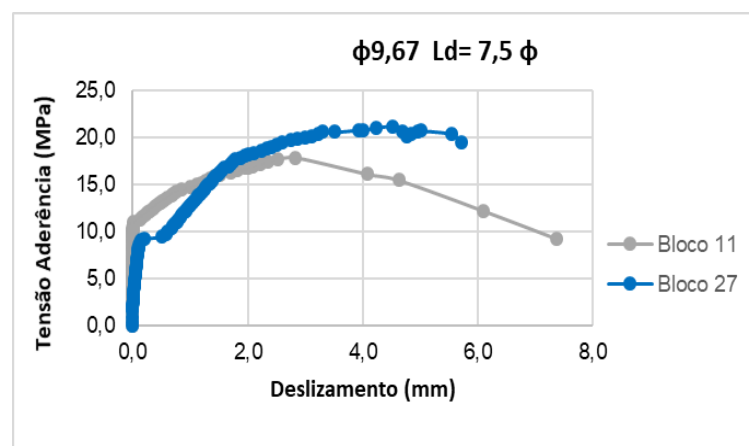


Gráfico 5- Ensaio das barras de 9,67 mm, Ld= 7,5φ.

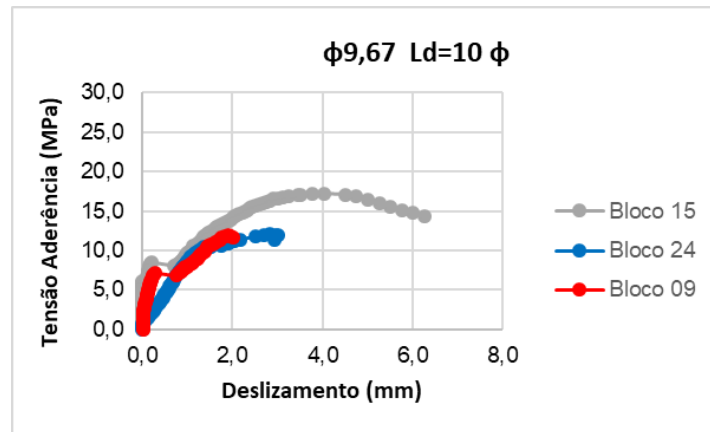


Gráfico 6- Ensaio das barras de 9,67 mm, Ld= 10φ.

c) Barra de 13 mm.

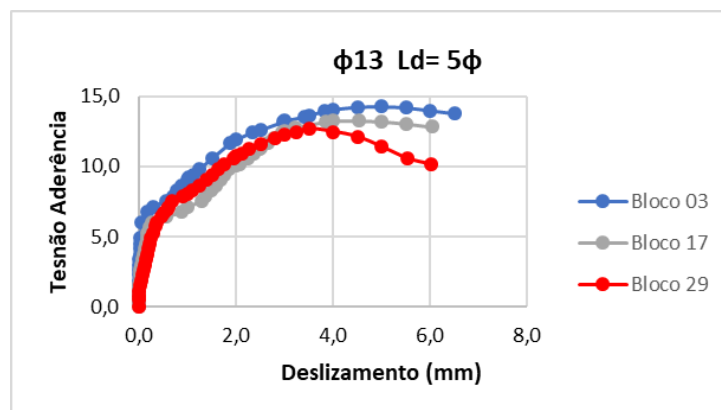


Gráfico 7- Ensaio das barras de 13 mm, Ld= 5φ.

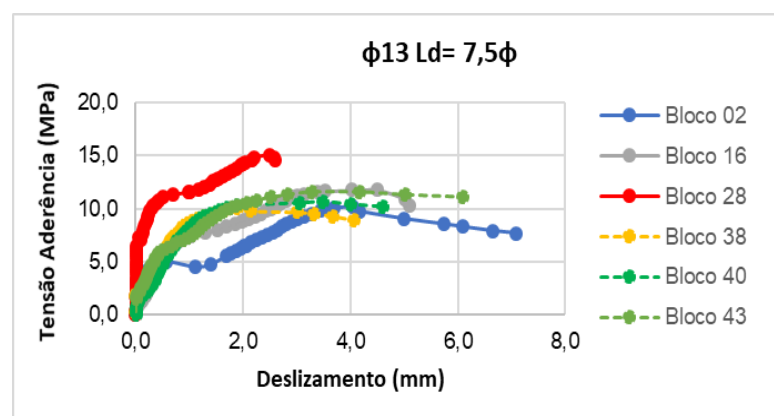


Gráfico 8- Ensaio das barras de 13 mm, Ld= 7,5φ.

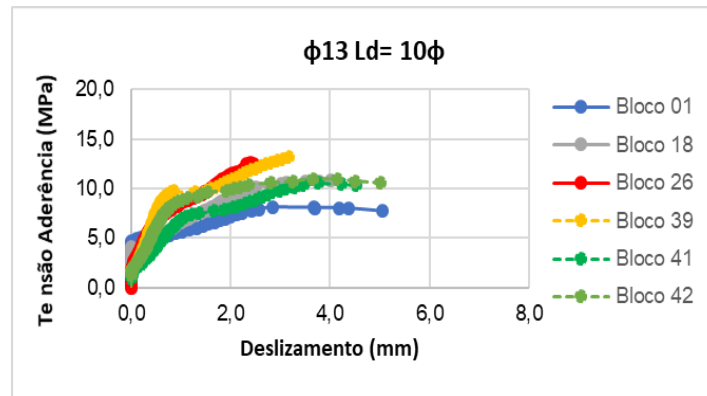


Gráfico 9- Ensaio das barras de 13 mm, Ld= 10φ.

d) Barra de 16,35 mm.

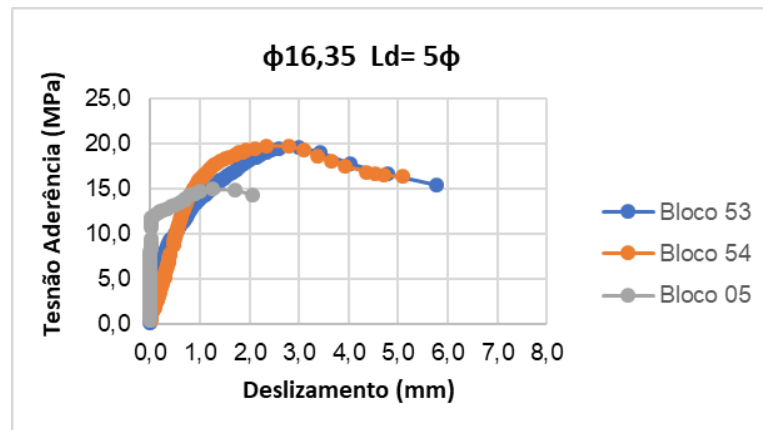


Gráfico 10- Ensaio das barras de 16,35 mm, Ld=5φ.

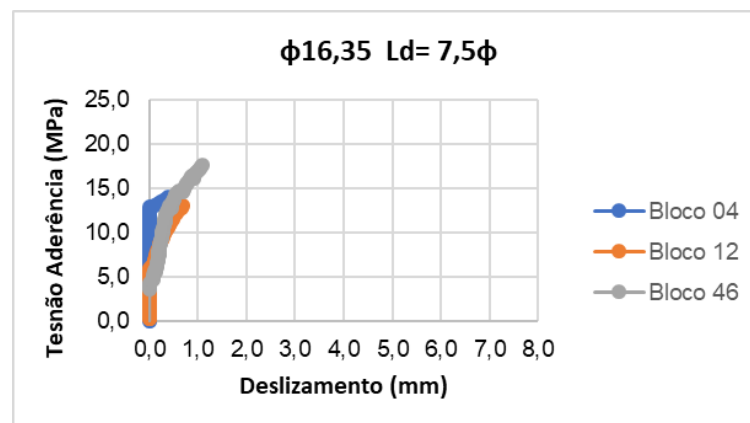
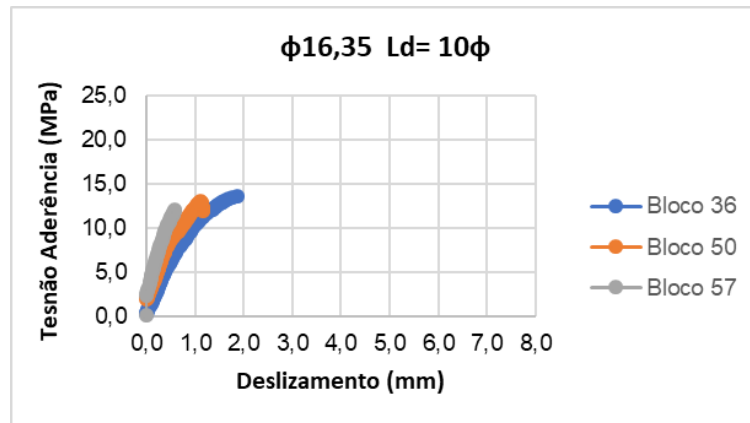
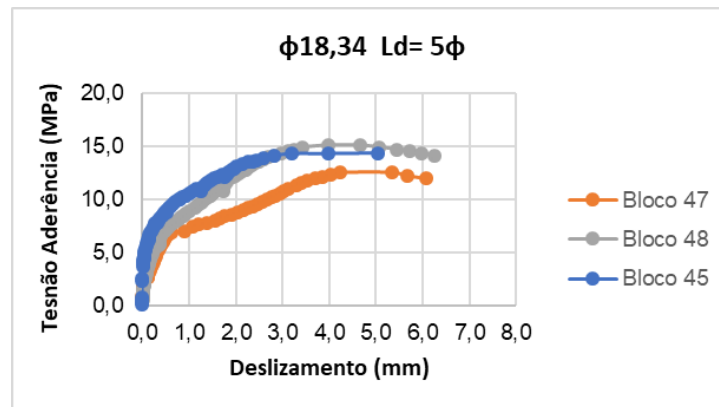
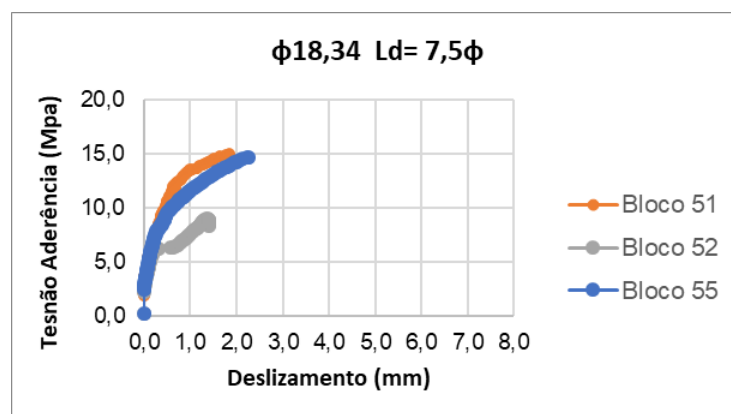


Gráfico 11- Ensaio das barras de 16,35 mm, Ld= 7,5φ.

Gráfico 12- Ensaio das barras de 16,35 mm, Ld=  $10\phi$ .

e) Barra de 18,34 mm.

Gráfico 13- Ensaio das barras de 18,34 mm, Ld=  $5\phi$ .Gráfico 14- Ensaio das barras de 18,34 mm, Ld=  $7,5\phi$ .

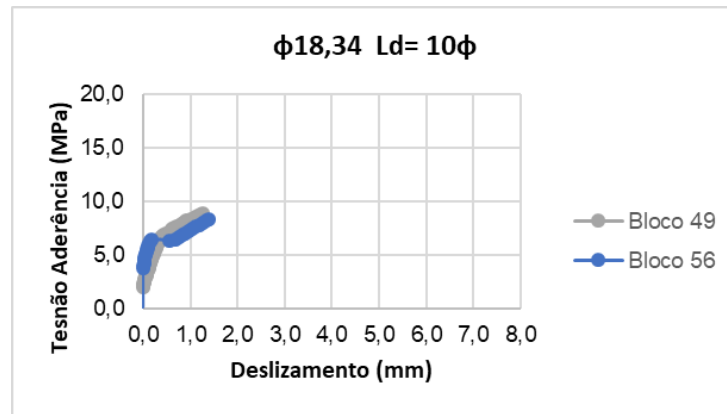


Gráfico 15- Ensaio das barras de 18,34 mm,  $L_d = 10\phi$ .

#### 4.1. Modos de ruptura



Durante os ensaios a maioria dos blocos apresentou ruptura por arrancamento da barra, ocorrendo fendilhamento do concreto somente nas barras mais grossas e com maior comprimento de ancoragem.

Como dito anteriormente, inicialmente tentou-se ensaiar as barras de 16,35 mm e 18,34 mm com tubos de pvc na ancoragem, mas o ensaio não foi bem-sucedido, havendo deslizamento na ancoragem. Como solução foram adotados tubos de aço de acordo com o anexo B da CSA S806-12. Nos modelos que sofreram arrancamento, observou-se que houve esmagamento e raspagem da nervura, deixando, inclusive, um pó branco na superfície de concreto ao redor da barra e acúmulo de nervura na parte superior do bloco, como mostrado nas figuras 53 a 56.



Figura 53- Destruição da nervura devido a ruptura por arrancamento.



Figura 54-Ruptura por arrancamento, com esmagamento da nervura e pó residual no concreto.



Figura 55- Excesso de nervura na superfície do bloco, caracterizando arrancamento.

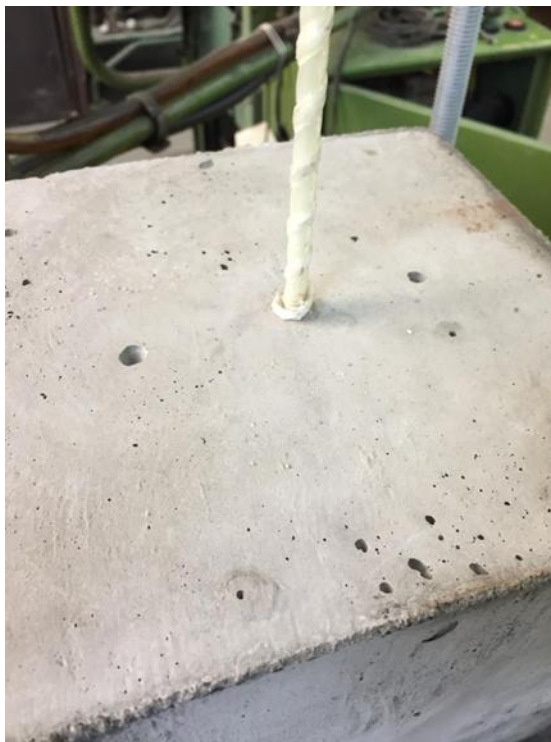


Figura 56- Nervura fraturada na superfície do bloco após ensaio de arrancamento.

A ruptura por fendilhamento do bloco foi observada nos modelos com as barras de 16,35mm com  $l_d = 10\phi$  e nas barras de 18,34mm com comprimento de aderência de 7,5 $\phi$  e 10 $\phi$ , como mostram as figuras 57 e 58. As demais barras tiveram ruptura por arrancamento.

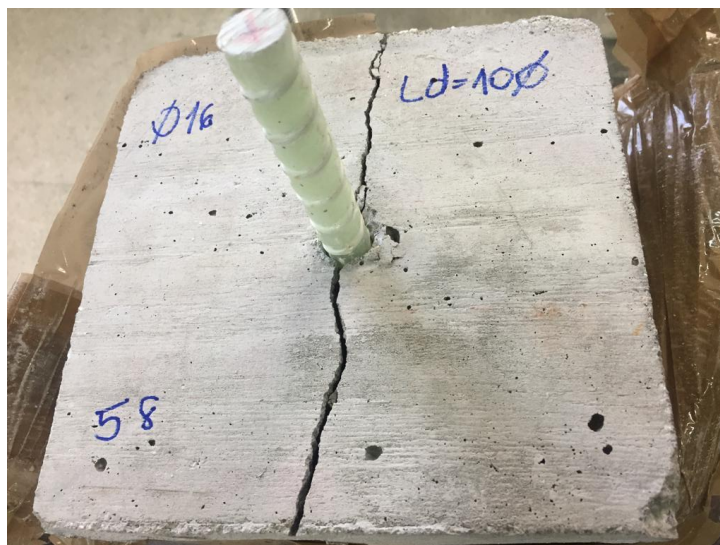


Figura 57- Ruptura por fendilhamento.



Figura 58- Ruptura por fendilhamento.

A tabela 16 resume os modos de ruptura de todos os blocos ensaiados e algumas observações que ocorreram durante os ensaios.

Tabela 16 - Resumo dos modos de ruptura dos ensaios.

Bloco	Ø real (mm)	lb (mm)	Tipo de ruptura
7	6,85	5φ = 34,25	DESLIZAMENTO
13			DESLIZAMENTO
19			DESLIZAMENTO
8	6,85	7,5φ = 51,375	DESLIZAMENTO
21			DESLIZAMENTO
23			DESLIZAMENTO
31			DESLIZAMENTO
33			DESLIZAMENTO
37			DESLIZAMENTO
10	6,85	10φ = 68,5	DESLIZAMENTO
20			Ensaio mal sucedido. Falha na ancoragem.
22			DESLIZAMENTO
32			DESLIZAMENTO
34			Ensaio mal sucedido. Rompimento da barra junto ao fundo do bloco, excesso de epóxi na parte superior pode ter atrapalhado o deslizamento.
35	DESLIZAMENTO		
6	9,67	5φ = 48,35	DESLIZAMENTO
14			DESLIZAMENTO
30			DESLIZAMENTO
11	9,67	7,5φ = 72,525	DESLIZAMENTO
25			Ensaio mal sucedido. Falha na ancoragem.
27			DESLIZAMENTO
9	9,67	10φ = 96,7	DESLIZAMENTO
15			DESLIZAMENTO
24			DESLIZAMENTO
3	13	5φ = 65	DESLIZAMENTO
17			DESLIZAMENTO
29			DESLIZAMENTO
2	13	7,5φ = 97,5	DESLIZAMENTO
16			DESLIZAMENTO
28			DESLIZAMENTO
38			DESLIZAMENTO
40			DESLIZAMENTO
43			DESLIZAMENTO
1	13	10φ = 130	DESLIZAMENTO
18			DESLIZAMENTO
26			DESLIZAMENTO
39			DESLIZAMENTO
41			DESLIZAMENTO
42	DESLIZAMENTO		
5	16,35	5φ = 81,75	Ancoragem com PVC
53			DESLIZAMENTO
54			DESLIZAMENTO
4	16,35	7,5φ = 122,63	Ancoragem com PVC
12			Ancoragem com PVC
46			FENDILHAMENTO
36	16,35	10φ = 163,5	FENDILHAMENTO
50			FENDILHAMENTO
57			FENDILHAMENTO
45	18,34	5φ = 91,7	DESLIZAMENTO
47			DESLIZAMENTO
48			DESLIZAMENTO
51	18,34	7,5φ = 137,55	FENDILHAMENTO
52			FENDILHAMENTO
55			FENDILHAMENTO
44	18,34	10φ = 183,4	Ensaio mal sucedido. Deslizou na ancoragem do tubo de aço.
49			FENDILHAMENTO
56			FENDILHAMENTO

Analisando a tabela 16 constata-se que, assim como Yan, F. et al. (2016), a ruptura por arrancamento prevaleceu durante os ensaios, em mais de 80% dos modelos. Pecce et al. (2001) verificaram em ensaios próprios que para comprimentos de aderência iguais a  $5\phi$ , o modo de ruptura deu-se por arrancamento da barra enquanto para comprimentos de aderência maiores ou iguais a  $10\phi$ , a ruptura deu-se na barra.

Em alguns ensaios houve falha na ancoragem da barra à garra da prensa. Isto ocorreu, em alguns casos, pela tentativa inicial de ensaiar as barras mais grossas com ancoragem de PVC, como dito anteriormente. Além disso, devido à falta de ancoragem padronizada em todas as barras, estas foram feitas manualmente, o que pode ter resultado em desconformidade em algumas barras.

#### 4.2. Tensões médias de aderência.

As normas CSA S806-12 e o ACI 440.3R-04 recomendam leituras para os deslocamentos de 0,05mm; 0,10mm e 0,25mm. Um valor médio de tensão é calculado a partir da média da tensão relativa a estes deslizamentos. Na Tabela 17 são apresentados os valores das tensões médias e máximas, obtidos em função dos deslizamentos medidos em cada caso.

Tabela 17 - Valores de tensão de aderência.

$\phi$ real [mm]	lb (mm)	$\tau$ , 0,05 (MPa)	$\tau$ , 0,10 (MPa)	$\tau$ , 0,25 (MPa)	$\tau$ , média (MPa)	$\tau$ , max,média (MPa)	$\tau$ , u, média (MPa)
<b>6,85</b>	5 $\phi$ = 34,25	13,54	14,14	15,03	14,24	17,75	8,25
	7,5 $\phi$ = 51,375	5,29	6,06	8,59	6,65	15,83	13,55
	10 $\phi$ = 68,5	1,26	1,75	3,61	2,21	16,12	13,99
<b>9,67</b>	5 $\phi$ = 48,35	2,11	2,78	6,59	3,83	16,25	13,42
	7,5 $\phi$ = 72,525	8,3	9,74	10,65	9,56	19,6	14,39
	10 $\phi$ = 96,7	4,64	5,48	7,74	5,95	13,74	12,46
<b>13</b>	5 $\phi$ = 65	3,63	4,36	5,98	4,66	13,41	12,26
	7,5 $\phi$ = 97,5	2,00	2,31	3,42	2,58	11,55	9,83
	10 $\phi$ = 130	2,92	3,18	4,1	3,40	11,03	10,17
<b>16,35</b>	5 $\phi$ = 81,75	1,71	2,57	5,88	3,39	18,14	15,63
	7,5 $\phi$ = 122,63	5,4	5,96	9,24	6,87	14,88	14,71
	10 $\phi$ = 163,5	2,36	3,06	5,43	3,62	12,9	12,5
<b>18,34</b>	5 $\phi$ = 91,7	3,32	4,04	5,77	4,38	14,04	13,53
	7,5 $\phi$ = 137,55	3,7	4,71	6,94	5,12	12,83	12,62
	10 $\phi$ = 183,4	3,93	4,65	5,95	4,84	8,57	8,57

O gráfico 16 mostra os valores das tensões médias referentes ao início do deslizamento da barra e, portanto, associadas à adesão. Por este gráfico verifica-se que os resultados dos ensaios não permitiram uma relação clara entre estas tensões e o

comprimento de aderência ou o diâmetro da barra, indicando ser a adesão mais influenciada pela conformação superficial da barra. Entretanto, se tivessem sido medidos os alongamentos na extremidade carregada da barra, que fornecem menores valores de tensões, maiores informações sobre a adesão poderiam ter sido obtidas.

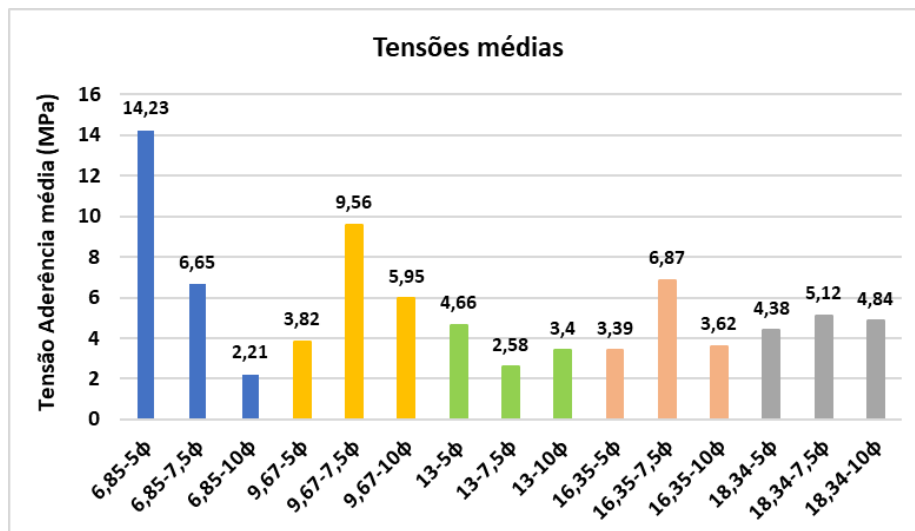


Gráfico 16 - Tensão média por diâmetro e Ld.

#### 4.3. Tensões máximas médias

Foi possível montar um gráfico comparativo em que ficasse mais visível a análise da influência do diâmetro e do comprimento de aderência nos valores das tensões máximas. No gráfico 17 estão plotados os valores de tensão máxima obtida a partir da média dos exemplares de cada modelo.

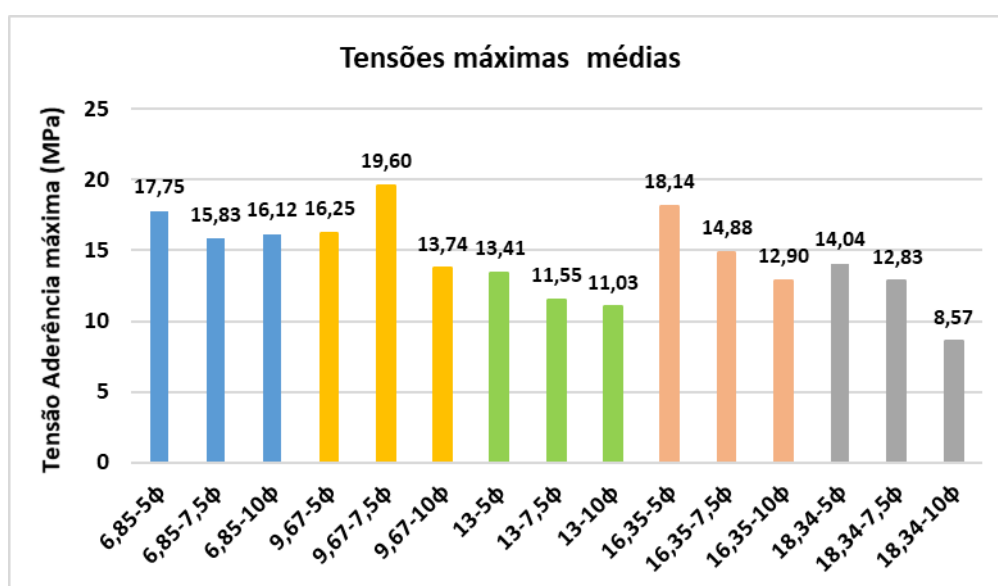


Gráfico 17 - Tensões máximas por diâmetro e Ld.

A partir desta análise conclui-se que para praticamente todos os diâmetros, a tensão máxima decresce com o aumento do comprimento de aderência e com o aumento do diâmetro. Fato também observado por Aquillides e Pilakoutas (2004) e Katzl, A. (2001), Weverthon (2012), José Gonçalvez (2013), Xingyu Gu, Bin Yu e Ming Wub (2015), Nelson Freitas (2016) e Yan et al. (2016). No gráfico 17 percebe-se, ainda, que apenas a barra de 9mm – 7,5 $\phi$  apresentou um comportamento diferente dos demais, ou seja, uma amostragem pequena dentre os grupos.

Katzl, A. (2001) e Yan, et al. (2016) referiram que a distribuição de tensões ao longo do comprimento de aderência é não linear.

De acordo com Baena et al (2009) esta relação ocorre devido à natureza frágil da ruptura observada nos ensaios de arrancamento.

Para a determinação dos valores experimentais das tensões de aderência de cada modelo foi determinada a média dos exemplares de cada modelo. A tabela 18 mostra a comparação entre os valores das tensões máximas médias experimentais com a formulação do ACI 440.1R-15, que calcula o valor de  $u$  de acordo com a equação (22) abaixo, anteriormente descrita no item 3.5.1. Vale lembrar que  $u$  é a tensão máxima média de aderência, que na tabela está descrita como  $\tau$ , assim como  $l_e$  significa o comprimento de aderência e na tabela está como  $L_d$ , nomenclaturas usadas durante toda a pesquisa.

$$\frac{u}{0,083\sqrt{f'_c}} = 4,0 + 0,3 \frac{c}{d_b} + 100 \frac{d_b}{l_e} \quad (22)$$



Tabela 18 - Análise tensão de aderência em relação ao ACI.1R-15.

Ø real (mm)	f <sub>c</sub> [MPa]	ld Ø (mm)	c / db	db / ld	τ ACI 440.1R-15	τ max, méd exp.
					(MPa)	(MPa)
6,85	42,53	5Ø = 34,25	14,10	0,20	15,28	17,75
		7,5Ø = 51,375		0,13	11,67	15,83
		10Ø = 68,5		0,10	9,87	16,12
9,67	41,67	5Ø = 48,35	9,84	0,20	14,44	16,25
		7,5Ø = 72,525		0,13	10,87	19,6
		10Ø = 96,7		0,10	9,08	13,74
13	41,2	5Ø = 65	7,19	0,20	13,94	13,41
		7,5Ø = 97,5		0,13	10,38	11,54
		10Ø = 130		0,10	8,61	11,03
16,35	40,33	5Ø = 81,75	5,62	0,20	13,54	18,14
		7,5Ø = 122,625		0,13	10,02	14,61
		10Ø = 163,5		0,10	8,27	12,9
18,34	41,22	5Ø = 91,7	4,95	0,20	13,58	13,12
		7,5Ø = 137,55		0,13	10,03	12,83
		10Ø = 183,4		0,10	8,25	8,56

Conclui-se que os valores obtidos com a equação do ACI 440.1R -15 são ligeiramente inferiores aos resultados experimentais indicando que a formulação proposta pelo ACI representa bem as tensões médias máximas de aderência geradas, que os ensaios experimentais realizados se mostraram confiáveis e que a expressão da norma pode ser usada com segurança para o cálculo de projeto.

#### 4.4. Comprimento de aderência.

Em relação ao comprimento de ancoragem, a norma CSA S806-12 permite calcular este valor levando em conta diversos parâmetros, denominados pela letra K. (olhar item 3.5.2) A equação do comprimento de ancoragem segundo a CSA S806-12 é:

$$l_d = 1,15 \frac{k_1 k_2 k_3 k_4 k_5}{d_{cs}} \frac{f_F}{\sqrt{f'_c}} A_b \quad (23)$$

De acordo com os parâmetros utilizados nos ensaios, os valores de K adotados segundo a norma foram:

$$K1 = 1,0$$

$$K2 = 1,0$$

$$K3 = 0,8$$

$$K4 = 1,0$$

$$K5 = 1,05$$

Os resultados experimentais possibilitaram a determinação do coeficiente k5 experimental, conforme indicado na tabela 19. Entretanto, a norma limita o valor de K5

prescrevendo  $0,5 \leq K5 \leq 1,0$ , e por isso, adotou-se um novo valor para K5. A tabela 19 mostra com mais detalhes estes cálculos. Após estabelecido o K5 adotado, calculou-se Ld experimental pela fórmula e Ld de projeto, este último com  $K5 = 1,05$ .

Tabela 19 - Cálculo K5 e Ld, segundo CSA S806-12.

$\varnothing$ real (mm)	$f_c$ [MPa]	ld $\varnothing$ (mm)	Ab (mm <sup>2</sup> )	dcs (mm)	$f_t$ real (MPa)	k5 exp.	k5 adotado	ld exp.CSA (mm)	ld projeto CSA (mm)
6,85	42,53	5 $\varnothing$ = 34,25	36,85	96,58	890,71	0,71	0,71	34,04	50,35
		7,5 $\varnothing$ = 51,375				1,07	1,0	47,95	
		10 $\varnothing$ = 68,5				1,43	1,0	47,95	
9,67	41,67	5 $\varnothing$ = 48,35	73,44	95,17	506,07	0,87	0,87	48,35	58,44
		7,5 $\varnothing$ = 72,525				1,30	1,00	55,66	
		10 $\varnothing$ = 96,7				1,74	1,00	55,66	
13	41,2	5 $\varnothing$ = 65	132,73	93,50	520,6	0,61	0,61	64,62	111,22
		7,5 $\varnothing$ = 97,5				0,92	0,92	97,45	
		10 $\varnothing$ = 130				1,23	1,0	105,93	
16,35	40,33	5 $\varnothing$ = 81,75	209,96	91,83	931,63	0,26	0,50	154,30	324,02
		7,5 $\varnothing$ = 122,625				0,40	0,50	154,30	
		10 $\varnothing$ = 163,5				0,53	0,53	163,55	
18,34	41,22	5 $\varnothing$ = 91,7	264,17	90,83	803,36	0,27	0,50	167,41	351,56
		7,5 $\varnothing$ = 137,55				0,41	0,50	167,41	
		10 $\varnothing$ = 183,4				0,55	0,55	183,40	

Para o valor de K5 adotado era necessário estar no limite determinado pela norma e por isso, alguns valores, estes em vermelho, precisaram ser adaptados para posterior cálculo de Ld experimental. Em todos os diâmetros foi preciso adotar o valor estabelecido como limite pela norma, sendo as barras mais grossas (16,35mm e 18,34mm) as que obtiveram menores valores.

Considerando que a norma limita em 300mm o comprimento de ancoragem, pelos resultados apresentados na tabela, pode-se perceber que a norma é conservadora em relação aos valores de Ld, principalmente quando aumenta-se o diâmetro. No caso das barras de 16,35mm e 18,34mm o Ld de projeto é aproximadamente o dobro do experimental.

É um consenso na literatura técnica que quanto maior o comprimento de aderência maior será a tensão de aderência. Segundo Yan et al. (2016) e Katzl, A. (2001) isto ocorre devido a uma distribuição não-linear da tensão de aderência ao longo da barra. Este fenômeno foi confirmado durante esta pesquisa, como mostrado no gráfico 17.

#### 4.5. Força de arrancamento

Em relação à força de arrancamento, o gráfico 18 traz a análise levando em consideração os diâmetros e comprimentos de aderência.

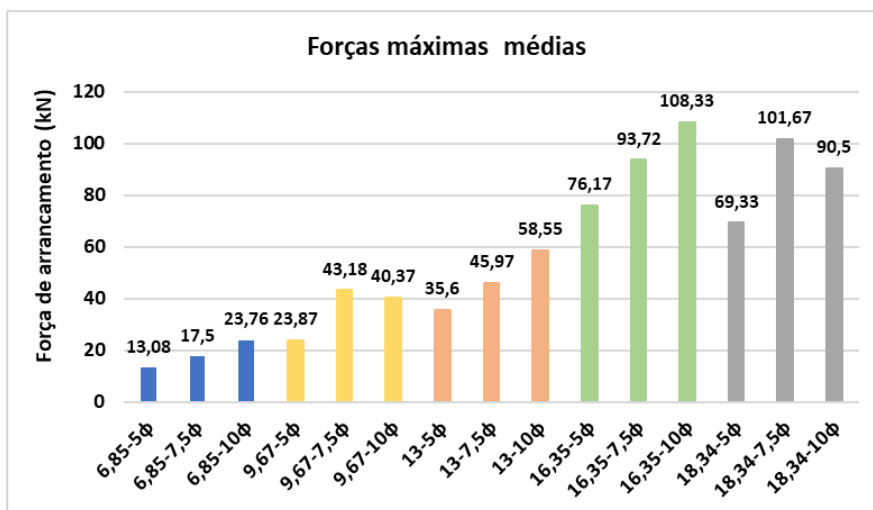


Gráfico 18- Forças máximas médias por diâmetro e Ld.

A força de arrancamento aumenta com o aumento do diâmetro da barra e aumento do comprimento de ancoragem, segundo Nelson Freitas (2016) e Yan et al.; Yang, M (2016). O mesmo foi notado durante esta pesquisa, e o gráfico 18 resume este resultado.

Em relação às barras de 9,67mm e de 18,34mm, houve diferença nos resultados no que se refere ao comprimento de aderência, porém com pouca dispersão. Logo, os resultados mostraram-se satisfatórios.

## CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as conclusões do trabalho, assim como sugestões para futuras pesquisas, visando maior entendimento sobre as propriedades das barras de GFRP e da aderência entre estas barras e o concreto.

Ressalta-se que estas conclusões têm por base o trabalho experimental desenvolvido, mas que como visto na análise dos resultados, estes se assemelham aos valores estabelecidos pelas normas, indicando a confiança nos valores experimentais obtidos e que, apesar do número limitado de ensaios, foi possível averiguar vários aspectos. Assim, pode-se fazer as seguintes conclusões:

### ➤ Tipo de ensaio

O ensaio de arrancamento escolhido foi adequado para as disponibilidades do laboratório. Apesar da falta de suporte e aparatos para montar o melhor tipo de ancoragem na barra, sua execução foi de fácil construção. Foi observado escorregamento nas barras grossas ao serem ensaiadas com tubos de PVC, por isto estas foram, posteriormente, ancoradas com tubos de aço, mas, com isso, alguns modelos não puderam ser considerados durante as análises.

Oliveira (2019) constatou que durante os ensaios de tração houve ruptura da barra na região próxima, ou até mesmo interior à ancoragem. Como relatado por outras pesquisas, isto é comum e poderia ter sido evitado aumentando-se o tamanho dos modelos, o que porém, não foi possível devido à limitação da capacidade da máquina de ensaios do laboratório.

### ➤ Modos de ruptura

Percebeu-se que houve ruptura por arrancamento em todas as barras que possuíam comprimento de aderência de  $5\phi$ , tendo em vista que o comprimento da mangueira usada para isolar a parte não aderente ocupa uma porção grande dentro do modelo. Conclui-se que, para as barras ensaiadas,  $L_d = 5\phi$  resulta em ruptura por arrancamento.

Após o ensaio, os cubos foram abertos para averiguar o estado da barra e do concreto e observou-se que a ruptura ocorre parcialmente na superfície da barra e parcialmente no concreto, havendo desprendimento da camada superficial da barra. Notou-se a presença de um pó branco aderido ao concreto, característico do esmagamento da resina e do desbastamento da fibra, como concluído anteriormente por Achillides e Pilakoutas (2004).

Somente as barras de 18,34 mm com  $L_d = 7,5\phi$  e  $10\phi$  e as barras de 16,35 mm com  $L_d = 10\phi$  apresentaram ruptura por fendilhamento do concreto.

➤ Resistência à compressão do concreto.

Parece haver consenso na literatura técnica que a resistência do concreto não é um parâmetro influenciador da tensão de aderência. A aderência entre as barras de FRP e o concreto é controlada pelas propriedades da barra de FRP, diferentemente da aderência entre as barras de aço nervuradas e o concreto, onde a resistência à compressão do concreto é o parâmetro controlador.

Embora o aumento da resistência à compressão do concreto possibilite maior rigidez inicial da aderência, a resistência de aderência não depende sobremaneira do valor da resistência do concreto, mas sim das propriedades da barra.

Tendo em vista o que as pesquisas anteriores sobre barras de GFRP concluíram, não foram feitos ensaios diferenciando-se a resistência à compressão do concreto. Na concretagem foi estipulado um traço de 40 MPa, e o resultado da caracterização do concreto forneceu valores bem próximos a este. Foi satisfatório este valor para as análises da aderência entre barras de GFRP e concreto.

➤ Conformação superficial

Na presente pesquisa foram usadas barras nervuradas através do processo de pultrusão pela empresa Stratus, que aplica as nervuras no último estágio de consolidação da resina às fibras. Desta forma, sua própria aderência às barras é, de certa forma, fraca.

Quando se aplicam esforços à barra, a degradação da aderência entre nervura e barra é a primeira a acontecer. Com isso, os resultados lidos pelos extensômetros podem sofrer “saltos” de leitura durante o ensaio, consequentes da fratura da nervura.

Baena, et al (2009) determinaram o valor de  $a_s$  e concluíram que barras com menores diâmetros fornecem  $a_s$  menores e, em contrapartida, barras com maiores valores de  $a_s$  apresentam maiores valores de tensão de aderência. No presente trabalho reafirmou-se o que estes autores já haviam abordado.

➤ Comprimento de aderência

Averiguou-se a formulação proposta pela norma Canadense (CSA S806-12) em relação ao comprimento de ancoragem. A tabela 19 descreve os resultados, mostrando que a norma é conservadora em relação aos valores de  $L_d$ , principalmente quando aumenta-se o diâmetro.

Foi possível relacionar a tensão de aderência máxima com o comprimento de aderência e concluiu-se o mesmo que a literatura técnica, quanto maior o comprimento de aderência menor será a tensão de aderência máxima adquirida.

➤ Tensão de aderência

Verificou-se que a tensão de aderência decresce com o aumento do diâmetro e do comprimento de aderência.

Como anteriormente citado, o efeito shear lag explica que o diâmetro da barra influencia diretamente a resistência à tração das barras de GFRP, que se caracteriza pelo fato de que as fibras mais próximas à superfície serem submetidas a maiores tensões do que as fibras mais internas.

➤ Força da Aderência

Pelas pesquisas anteriores, os autores verificaram que quanto maior o comprimento de ancoragem maior a força de arrancamento. Pelo gráfico 18, é possível perceber que a força de aderência cresce conforme aumenta o diâmetro e comprimento de aderência. Logo, a conclusão desta pesquisa está em consonância com a literatura técnica e seus resultados foram satisfatórios.

➤ Normas

Neste trabalho concluiu-se que a norma ACI 440.1R-15 pode, de fato, ser usada com segurança para o cálculo de projeto da tensão de aderência, como também refere Hossain, K., M., A. (2018).

➤ Sugestões para trabalhos futuros

Durante a realização dos ensaios e posterior análise dos resultados, percebeu-se um leque de opções para trabalhos futuros, dentre os quais se destacam:

- Refazer os ensaios com controle de deslocamento.
- Refazer os ensaios com transdutores de deslocamentos nas duas extremidades, como recomendam as normas.
- Novos estudos com maiores números de exemplares por modelo.
- Comparar os resultados do comprimento de aderência experimental com o comprimento de ancoragem de norma, através de ensaio de viga.

## REFERÊNCIAS

- ACI 440.1R-15, A. C. I. *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars*. [S.l.]. (2015)
- ACI 440R, 1996, A.C.I. *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*. (1996)
- ACI 440.3R-04, A.C.I. *Guide test methods for fiber- reinforced polymer (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures*. (2004)
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos – especificação: NBR 7222*. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – especificação: NBR 5739*. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: 2009 - *Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 45:2006 - *Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro. 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248:2003 - *Agregados: Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522:2017 - *Concreto: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão*. Rio de Janeiro. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222:2017 - *Concreto e argamassa: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: *Agregado Miúdo – Determinação de Massa Específica e Massa Específica Aparente*. Rio de Janeiro, 1996.

- ASTM D4475-02. *Standard Test Method for Apparent Horizontal Shear Strength of Pultruded Reinforced Plastic Rods By the Short-Beam Method*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- ACHILLIDES, Z. ; PILAKOUTAS, K. *Bond behavior of fiber reinforced Polymer bars under direct pullout conditions*. *Journal of Composition for Constrution*, v.8, p173-181, 2004.
- BAENA, M.; TORRES, L.; TURON, A.; BARRIS, C. *Experimental study of bond behavior between concrete and FRP bars using a pull-out test*. *Composites Part B: Engineering – Elsevier* (2009).
- BAKIS, E. C. et al. *Analysis of bonding mechanisms of smooth and lugged FRP rods embedded in concrete*. *Composites Science and Technology*, v. 58, p. 1307-1319. (1998)
- BOOTLE, J.; BURZESI, F.; FIORINI, L. *Design Guidelines*. In: *ASM Handbook*. Ohio: [s.n.], v. 21: Composites, 2001. p. 388-395.
- CAN/CSA STANDARDS S806-12. *Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers*. (2012)
- COUTO, I. A. *Análise Teórica e Experimental do Comportamento da Aderência entre o Concreto e Barras de Fibra de Vidro Impregnadas por Polímeros*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - USP. São Carlos. (2007)
- FREITAS, N. *Sustentabilidade de Estruturas de Betão em Ambiente Marítimo com recurso à FRP*. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia, Universidade do Minho.
- FEDERATION INTERNATIONALE DU BENTON- *FIB 9.3 TG- FRP as reinforcement in concrete*. (2003)
- FIB. FÉDÉRATION INTERNACIONALE DU BETÓN. *CEB/FIB Bulletin 40: FRP reinforcement in RC structures*. (2007)
- FIB Bulletin 10. *Bond of Reinforcement in Concrete*. State-of-the-art Report. (2000)
- CEB-FIP MODEL CODE 2010. *First complete draft*. Lausanne, Switzerland. (2010)
- GOTO, Y. *Cracks Formed in Concrete around Deformed Tension Bars*. *Journal of the ACI*, (Apr), pp. 244-251, 1971.
- GONÇALVES, J. F. G. *Aderência de varões GFRP no betão*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade da Madeira. Funchal, 2013.



- HOSSAIN, K.M.A. *Bond strength of GFRP bars embedded in engineered cementitious composite using RILEM Beam Test*. (2018)
- KATZL, A.; *Bond to Concrete or FRP rebars and tendon*. International Workshops on Composites in Construction. Capri, Italy (2001)
- LUKE, A. B.; WILLIAMS, B.; SADEGHIAN, P. *Specific Durability Issues*. In: ZOGHI, M. *The International Handbook of FRP in Civil Engineering*. Florida: CRC Press, 2013. p. 706.
- MACEDO, B. N. T. *Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras para o uso em concreto armado*. 2018. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.
- Oliveira, L.O B. S.- *Ensaio De Tração Em Armaduras de GFRP*, relatório Doutorado UERJ. Rio de Janeiro, 2019.
- RILEM/CEB/FIP. *Bond Test for Reinforcement Steel: 1. Beam test (RC5), 2. Pull-Out Test (RC6)*. CEB Manual on Concrete Reinforcement Technology. News n.73. (1983)
- REIS, V. L. F. *Construção de Estruturas de Betão Armado com Varões de FRP*. Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos de Construção) - Universidade do Porto. Porto. (2009)
- STRATUS Compostos Estruturais Ltda. Catálogo de Produtos. São José dos Campos, SP. [www.stratusfrp.com](http://www.stratusfrp.com). Em 16/10/2019.
- TAVARES, D. H. *Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de GFRP*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - USP. São Carlos, p. 118. (2006)
- TEIXEIRA, Bruna de Almeida Carvalho. *Avaliação do comportamento de vigas de concreto armadas com barras de fibra de vidro – um estudo experimental*. 2018. 173f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.
- TEIXEIRA, A. M. A. J.; Carneiro, L. A. V. *Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na engenharia de construção*. Revista Ciência e Tecnologia, v. 3º quadrimestre, p. 52-66. (2008)
- PECCE, M.; MANFREDI, G.; REALFONZO, R.; COSENZA, E.- *Experimental and Analytical Evaluation of Bond Properties of GFRP bars*. (2001).

- BEIRAL, W. V. *Aderência entre concreto e barras lisas de polímero reforçado com fibra de vidro*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Fluminense. (2012)
- XINGYU GU, BIN YU E MING WU. *Experimental study of the bond performance and mechanical response of GFRP reinforced concrete*. (2016)
- YAN, F.; LIN, Z. ;YAN, M. *Bond Mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete*. (2016)

**ANEXOS**


Anexo I – Caracterização do agregado miúdo.

Anexo II – Caracterização do agregado graúdo.


Anexo III – Dosagem do Concreto.

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO							ANEXO I			
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL							FLS:	1/1		
	ENSAIO DE ARRANCAMENTO COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO							LOCAL :	UERJ		
								DATA:			
RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES											
<b>ENSAIO FÍSICO DE AGRAGADO MIÚDO - AREIA</b>											
1) GRANULOMETRIA DO AGRAGADO MIÚDO ( NBR NM 248:2003)											
Abertura da malha das peneiras	a) massa inicial seca (gr) = 1.185,7				(Vr)	(Mrm)	(Mra)	Faixas em relação as % retidas acumuladas			
	b) massa inicial seca (gr) = 1.034,1				Massa retida	Massa retida	Massa retida	Limites Inferiores		Limites Superiores	
	(Mrg)	Massa retida (gr)	Mr%	Massa retida (%)	Variacões	média	acumulada	Zona	Zona	Zona	Zona
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b	± 4 %	(%)	(%)	Utilizável	Ótima	Utilizável	Ótima
9,5	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	0
6,3	5,9	3,9	0,5%	0,4%	0,1%	0,4%	0,4%	0	0	0	7
4,75	12,1	8,4	1,0%	0,8%	0,2%	0,9%	1,4%	0	0	5	10
2,36	84,1	69,0	7,1%	6,7%	0,4%	6,9%	8,3%	0	10	20	25
1,18	249,9	221,9	21,1%	21,5%	0,3%	21,3%	29,6%	5	20	30	50
0,6	435,1	384,2	36,8%	37,2%	0,4%	37,0%	66,5%	15	35	55	70
0,3	290,2	252,7	24,5%	24,5%	0,1%	24,5%	91,0%	50	65	85	95
0,15	80,6	76,6	6,8%	7,4%	0,6%	7,1%	98,2%	85	90	95	100
Fundo	24,6	16,7	2,1%	1,6%	0,5%	1,8%	100,0%	100	100	100	100
(Mt) Total Σ	1.182,5	1.033,4	<b>Módulo de Finura = 2,95</b>				<b>Diâmetro máximo = 4,75</b>				
<b>Mt = (Σ de Mrg) Mr% = (Mrg / Mt) * 100 Vr = (Mr% ensaio a - Mr% ensaio b) Mrm = (Mr% ensaio a + Mr% ensaio b)/2 Mra = (Σ Mrm Ma</b> <b>Módulo finura = Σ % retidas acumuladas, nas peneiras da serie normal / 100 D. máximo = abertura da peneira na qual apresenta % retida ac</b>											
2) MASSA ESPECÍFICA DO AGRAGADO MIÚDO (NM 52)											
Massa de agregado seco para o ensaio: Ms (g)											498,2
Volume do frasco: Vf (cm³)											500
Massa do frasco + agregado: M1 (g)											865
Massa do frasco + agregado + água: M2 (g)											1168,3
Massa específica da água: Me.a (g/cm³)											1
Volume de água adicionado ao frasco: Va = M2 - M1 / Me.a (m³)											303,3
Massa específica do agregado seco: Me.ag_s = Ms / ( Vf - Va ) (g/cm³)											2,533
Massa da areia (agregado) na condição saturada superfície seca: Mag.sss (g)											500
Massa específica da areia (agregado) saturado superfície seca: Me.ag_sss = Mag.sss / ( Vf - Va ) (g/cm³)											2,542
Massa específica: Me = ( ( Ms / ( Vf - Va ) - ( (Mag.sss - Ms) / Me.a ) ) (g/cm³)											2,56
3) UMIDADE (NBR NM 30)											
Massa do agregado úmido: Mh (g)											366,4
Massa do agregado seco: Ms (g)											337,8
Umidade: U = [(Mh - Ms) / (Ms)]											0,08
Porcentagem de umidade media (%)											8,47
4) ABSORÇÃO (NBR NM 30)											
Massa do agregado saturado: Mst (g)											500
Massa do agregado seco: Ms (g)											498,2
Umidade: U = [(Mst - Ms) / (Ms)]											0,004
Porcentagem de umidade media (%)											0,361

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO							ANEXO II			
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL							FLS:	1/2		
	ENSAIO DE ARRANCAMENTO COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO							LOCAL:	UERJ		
	RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES							DATA:			
<b>ENSAIO FÍSICO DE AGRAGADO GRAÚDO - BRITA 1</b>											
1) GRANULOMETRIA DO AGRAGADO GRAÚDO ( NBR NM 248:2003)											
Abertura da malha das peneiras (mm)	a) massa inicial seca (gr) = 5.426,6				(Vr)	(Mrm)	(Mra)	Faixas em relação as % retidas acumuladas			
	b) massa inicial seca (gr) = 6.496,8				Massa retida	Massa retida	Massa retida	Limites Inferiores		Limites Superiores	
	(Mrg) Massa retida (gr)	Mr%	Massa retida (%)	Variações	média	acumulada	Zona	Zona	Zona	Zona	
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b	± 4 %	(%)	(%)	Utilizável	Ótima	Utilizável	Ótima
19	148,2	270,4	2,7%	4,2%	1,4%	3,4%	3,4%				
12,5	3.358,9	4.219,2	61,9%	64,9%	3,0%	63,4%	66,9%	0	0	0	0
9,5	1.436,3	1.509,6	26,5%	23,2%	3,3%	24,9%	91,8%	0	0	0	0
6,3	186,6	177,2	3,4%	2,7%	0,7%	3,1%	94,8%	0	0	0	7
4,75	59,3	37,2	1,1%	0,6%	0,5%	0,8%	95,7%	0	0	5	10
2,36	56,3	46,8	1,0%	0,7%	0,3%	0,9%	96,6%				
1,18	41,0	36,5	0,8%	0,6%	0,2%	0,7%	97,2%				
0,6	43,1	51,5	0,8%	0,8%	0,0%	0,8%	98,0%				
0,3	35,6	61,8	0,7%	1,0%	0,3%	0,8%	98,8%				
0,15	25,6	42,4	0,5%	0,7%	0,2%	0,6%	99,4%	0	10	20	25
Fundo	31,4	43,7	0,6%	0,7%	0,1%	0,6%	100,0%				
(Mt) Total Σ	5.422,3	6.496,3	<b>Módulo de Finura = 8,43</b>				<b>Diâmetro máximo = 19</b>				
$Mt = (S \text{ de } Mrg)$ $Mr\% = (Mrg / Mt) * 100$ $Vr = (Mr\% \text{ ensaio a} - Mr\% \text{ ensaio b})$ $Mrm = (Mr\% \text{ ensaio a} + Mr\% \text{ ensaio b}) / 2$ $Mra = (\sum Mrm \text{ Massa retida})$											
<b>Módulo finura</b> = Σ % retidas acumuladas, nas peneiras da serie normal / 100 <b>D. máximo</b> = abertura da peneira na qual apresenta % retida acumulada											
2) MASSA ESPECÍFICA DO AGRAGADO GRAÚDO (NBR NM 53)											
Massa da amostra seca: <b>Ms</b> (g)							3594				
Massa da amostra em água: <b>Ma</b> (g)							2267				
Massa da amostra em condição saturada superfície seca (SSS): <b>Mss</b> (g)							3616				
Massa específica do agregado seco: <b>Me.s</b> = $Ms / (Ms - Ma)$ (g/cm³)							2,708				
Massa específica do agregado SSS: <b>Me.sss</b> = $Msss / (Msss - Ma)$ (g/cm³)							2,681				
Massa específica aparente: <b>Me.ap</b> = $Ms / (Msss - Ma)$ (g/cm³)							2,664				
3) UMIDADE (NBR NM 30)											
Massa do agregado úmido: <b>Mh</b> (g)							2492,1				
Massa do agregado seco: <b>Ms</b> (g)							2475,7				
Umidade: $[(Mh - Ms) / (Ms)]$							0,00662				
Porcentagem de umidade media: $[(Mh - Ms) / (Ms)] * 100$ (%)							0,662				
4) ABSORÇÃO (NBR NM 30)											
Massa do agregado saturado: <b>Mst</b> (g)							3616				
Massa do agregado seco: <b>Ms</b> (g)							3594				
Umidade = $[(Mst - Ms) / (Ms)]$							0,006121313				
Porcentagem de umidade media: $[(Mst - Ms) / (Ms)] * 100$ (%)							0,61213133				
5) MASSA UNITÁRIA (NBR NM 45)											
Massa do agregado: <b>Ma</b> (Kg)							2479,5				
Massa de água necessária para encher o recipiente: <b>Ma</b> (Kg)							1735,2				
Massa específica da água à sua temperatura de ensaio (23°C): <b>Me.a</b> (Kg/m³)							1000				
Volume do recipiente: <b>V</b> = $Ma / Me.a$ (m³)							1,735				
Massa unitária do agregado: <b>M.u</b> = $Ma / V$ (Kg/m³)							1428,94				

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO		ANEXO III	
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		FLS:	01/05
	ADERÊNCIA ENTRE CONCRETO E BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADAS COM FIBRA DE VIDRO		LOCAL :	UERJ
	RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES			
<b>DOSAGEM DO CONCRETO</b>				
1) CONSIDERAÇÕES INICIAIS				
<p><u>Características do Projeto</u></p> <p>1.1) Tipo de construção (influenciará na trabalhabilidade desejada): BLOCOS DE CONCRETO</p> <p>1.2) Tipo de exposição da estrutura (ditará o fator a/c adequado para a durabilidade): FRACA</p> <p>1.3) Resistência do concreto aos 28 dias: 40MPA</p> <p><u>Características dos materiais (disponibilizados por meio de ensaios)</u></p> <p>1.4) Diâmetro máximo do agregado graúdo (ANEXO II): 19 mm</p> <p>1.5) Massa específica do agregado graúdo SSS (ANEXO II) = 2,681 g/cm<sup>3</sup></p> <p>1.6) Massa unitária do agregado graúdo (levando em conta o volume para ensaio de massa unitária do ANEXO II): 1428,94 Kg/m<sup>3</sup></p> <p>1.7) Peso areia seca (levando em conta o volume para ensaio de umidade ANEXO I): 337,85 g</p> <p>1.8) Peso areia úmida (levando em conta o volume para ensaio de umidade ANEXO I): 366,4 g</p> <p>1.9) Módulo de Finura (MF) do agregado miúdo (ANEXO I): 2,95</p> <p>1.10) Massa específica do agregado miúdo SSS (ANEXO I) = 2,542 g/cm<sup>3</sup></p> <p>1.11) Resistência à compressão, do cimento utilizado, esperada aos 28 dias = CP II E 32 (32Mpa)</p> <p>1.12) Massa específica do cimento (de acordo com fabricante) = 3100 Kg/m<sup>3</sup></p>				
2) CALCULAR RESISTÊNCIA DE DOSAGEM OU MÉDIA (f <sub>cr</sub> )				
Considerando f <sub>ck</sub> (Mpa) 40				
Adota-se a Tabela 1:				
		<b>Resistência a compressão especificada - F<sub>c</sub>' (Mpa)</b>	<b>Resistência de dosagem (F<sub>cr</sub>)</b>	
		< 20,7	f <sub>c</sub> + 6,9	
		20,7 - 34,5	f <sub>c</sub> + 8,3	
		>34,5	f <sub>c</sub> + 9,6	
TABELA 1 Resistência de dosagem - Adaptada ACI				
Neste caso utiliza-se a fórmula:				
		$f_{cr}' = f_c + 9,6$		
		$f_{cr}' = 49,6$ Mpa		
3) ESCOLHA DO ABATIMENTO				
Adota-se a Tabela 2:				
		<b>Tipos de Obras</b>	<b>Abatimentos (mm)</b>	
			<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>
		Paredes de fundações e sapatas armadas	75	25
		Sapatas planas, caixões e paredes de infra-estrutura	75	25
		Vigas e paredes armadas	100	25
		Pilares de edifícios	100	25
		Pavimento e lajes	75	25
		Construções de concreto massa	50	25
TABELA 2: Abatimentos - Adaptada ACI				
Logo:	Abatimento máximo =	100		
	Abatimento mínimo =	25		

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO		Nº ANEXO: 005																																																																																										
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		FLS:	02/05																																																																																									
	ADERÊNCIA ENTRE CONCRETO E BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADAS COM FIBRA DE VIDRO		LOCAL :	UERJ																																																																																									
	RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES																																																																																												
<b>DOSAGEM DO CONCRETO</b>																																																																																													
<b>4) DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS AGREGADOS</b>																																																																																													
Conforme ensaio físico do agregado graúdo realizado neste estudo, apresentado no ANEXO II, pode-se determinar o diâmetro máximo do agregado graúdo utilizado (brita0)																																																																																													
$\varnothing$ máx brita (mm) = 19																																																																																													
<b>5) ESTIMATIVA CONSUMO DA ÁGUA DE AMASSAMENTO (Ca) E TEOR DE AR INCORPORADO</b>																																																																																													
Em função da dimensão máxima das partículas do agregado, do slump e da presença ou não de ar incorporado na mistura, é possível saber o consumo estimado de água de amassamento utilizado																																																																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Slump, mm</th> <th colspan="5">Diâmetro máximo do agregado graúdo</th> </tr> <tr> <th>9,5</th> <th>12,5</th> <th>19</th> <th>25</th> <th>37,5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="6"><b>Sem ar incorporado</b></td> </tr> <tr> <td>25 até 50</td> <td>207</td> <td>199</td> <td>190</td> <td>179</td> <td>166</td> </tr> <tr> <td>75 até 100</td> <td>228</td> <td>216</td> <td>205</td> <td>193</td> <td>181</td> </tr> <tr> <td>150 até 175</td> <td>243</td> <td>228</td> <td>216</td> <td>202</td> <td>190</td> </tr> <tr> <td>Teor de ar não incorporado</td> <td>3%</td> <td>2,5%</td> <td>2%</td> <td>2%</td> <td>1%</td> </tr> <tr> <td colspan="6"><b>Com ar incorporado</b></td> </tr> <tr> <td>25 até 50</td> <td>181</td> <td>175</td> <td>168</td> <td>160</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td>75 até 100</td> <td>202</td> <td>193</td> <td>184</td> <td>175</td> <td>165</td> </tr> <tr> <td>150 até 175</td> <td>216</td> <td>205</td> <td>197</td> <td>184</td> <td>174</td> </tr> <tr> <td colspan="6"><b>Teor de ar incorporado</b></td> </tr> <tr> <td>baixa exposição</td> <td>4,5%</td> <td>4%</td> <td>3,5%</td> <td>3%</td> <td>2,5%</td> </tr> <tr> <td>média exposição</td> <td>6%</td> <td>5,5%</td> <td>5%</td> <td>4,5%</td> <td>4,5%</td> </tr> <tr> <td>alta exposição</td> <td>7,5%</td> <td>7%</td> <td>6%</td> <td>6%</td> <td>5,5%</td> </tr> </tbody> </table>					Slump, mm	Diâmetro máximo do agregado graúdo					9,5	12,5	19	25	37,5	<b>Sem ar incorporado</b>						25 até 50	207	199	190	179	166	75 até 100	228	216	205	193	181	150 até 175	243	228	216	202	190	Teor de ar não incorporado	3%	2,5%	2%	2%	1%	<b>Com ar incorporado</b>						25 até 50	181	175	168	160	150	75 até 100	202	193	184	175	165	150 até 175	216	205	197	184	174	<b>Teor de ar incorporado</b>						baixa exposição	4,5%	4%	3,5%	3%	2,5%	média exposição	6%	5,5%	5%	4,5%	4,5%	alta exposição	7,5%	7%	6%	6%	5,5%
Slump, mm	Diâmetro máximo do agregado graúdo																																																																																												
	9,5	12,5	19	25	37,5																																																																																								
<b>Sem ar incorporado</b>																																																																																													
25 até 50	207	199	190	179	166																																																																																								
75 até 100	228	216	205	193	181																																																																																								
150 até 175	243	228	216	202	190																																																																																								
Teor de ar não incorporado	3%	2,5%	2%	2%	1%																																																																																								
<b>Com ar incorporado</b>																																																																																													
25 até 50	181	175	168	160	150																																																																																								
75 até 100	202	193	184	175	165																																																																																								
150 até 175	216	205	197	184	174																																																																																								
<b>Teor de ar incorporado</b>																																																																																													
baixa exposição	4,5%	4%	3,5%	3%	2,5%																																																																																								
média exposição	6%	5,5%	5%	4,5%	4,5%																																																																																								
alta exposição	7,5%	7%	6%	6%	5,5%																																																																																								
TABELA 3: Consumo de água (kg/m <sup>3</sup> ) - Adaptada ACI																																																																																													
Destes forma assume-se que o consumo de água é : <b>Ca (Kg/m<sup>3</sup>) 205</b>																																																																																													
<b>6) RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO</b>																																																																																													
A determinação da a/c é em função da curva de Abrams do cimento, sendo necessário conhecer a resistência do mesmo. Adotando um cimento CP II E, temos uma resistência aos 28 dias de : <b>32 Mpa</b>																																																																																													
a/c= 0,475																																																																																													
TABELA 4: Relação a/c - A adaptada ACI																																																																																													

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO		Nº ANEXO: 005			
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		FLS:	03/05		
	ADERÊNCIA ENTRE CONCRETO E BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADAS COM FIBRA DE VIDRO		LOCAL :	UERJ		
	RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES					
<b>DOSAGEM DO CONCRETO</b>						
7) OBSERVAR OS LIMITES ESTABELICIDOS DE ACORDO COM A DURABILIDADE						
Primeiramente classifica-se a agressividade ambiental do local da estrutura de acordo com a NBR 6118:2014, estabelecido na Tabela 5						
	<b>Classe de agressividade</b>	<b>Agressividade</b>	<b>Classificação para tipo de ambiente do</b>	<b>Risco de deterioração da</b>		
	I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante		
	II	Moderada	Urbana <sup>1 2</sup>	Pequena		
	III	Forte	Marinha Industrial	Grande		
	IV	Muito Forte	Industrial Respingos de Maré	Elevado		
<sup>1</sup> Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos <sup>2</sup> Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegida de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente						
TABELA 5: R agressividade ambiental - Adaptada NBR						
Considerando a atuação do ensaio em uma área de baixa agressão ambiental, adota-se <b>I</b>						
A qualidade do concreto deve ser respeitada conforme a Tabela 6 abaixo:						
	<b>Concreto</b>	<b>Tipo</b>	<b>Classe ambiental</b>			
			I	II	III	IV
	Relação água/aglomerante em massa	CA	<= 0,65	<= 0,60	<= 0,55	<= 0,45
		CP	<= 0,60	<= 0,55	<= 0,50	<= 0,45
	Classe de concreto (NBR 8953)	CA	>= C20	>= C25	>= C30	>= C40
		CP	>= C25	>= C30	>= C35	>= C40
	Consumo de cimento por m <sup>3</sup> de concreto (Kg/m <sup>3</sup> )		>= 260	>= 280	>= 320	>= 360
TABELA 6: Qualidade do concreto I - Adaptada NBR						
Como o ideal é o fator a/c ser <= 0,65 pela Tabela 6, e na Tabela 4 o valor encontrado 0,475, ou seja, utiliza-se						<b>0,475</b>
8) CONSUMO DE CIMENTO (Cc)						
De acordo com a equação abaixo, é possível determinar o consumo de cimento do traço:						
$Cc = Ca / (a/c)$						
$Cc \text{ (Kg/m}^3\text{)} = 431,58$						
9) CONSUMO DE AGREGADO GRUDO (Cagg)						
$Cagg = Vb \times Mu$						
Onde:	Vb é o volume de agregado grúdo seco/m <sup>3</sup> do concreto, encontrado no Anexo II					
	Mu é a massa unitária compactada do agregado grúdo, encontrada em ensaio no Anexo II desta dissertação.					



	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO		Nº ANEXO: 005																																			
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		FLS:	04/05																																		
	ADERÊNCIA ENTRE CONCRETO E BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADAS COM FIBRA DE VIDRO		LOCAL :	UERJ																																		
	RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES																																					
<b>DOSAGEM DO CONCRETO</b>																																						
9) CONSUMO DE AGREGADO GRÚDO (Cag) _Continuação																																						
Sabendo que o módulo de finura (MF) da areia, encontrado no ensaio do Anexo 02, é igual a:			<b>2,95</b>																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Diâmetro máximo agregado grúdo</th> <th colspan="4">Módulo de finura da areia</th> </tr> <tr> <th>2,40</th> <th>2,60</th> <th>2,80</th> <th>3,00</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>9,5</td> <td>0,50</td> <td>0,48</td> <td>0,46</td> <td>0,44</td> </tr> <tr> <td>12,5</td> <td>0,59</td> <td>0,57</td> <td>0,55</td> <td>0,53</td> </tr> <tr> <td>19</td> <td>0,66</td> <td>0,64</td> <td>0,62</td> <td>0,60</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>0,71</td> <td>0,69</td> <td>0,67</td> <td>0,65</td> </tr> <tr> <td>37,5</td> <td>0,75</td> <td>0,73</td> <td>0,71</td> <td>0,69</td> </tr> </tbody> </table>					Diâmetro máximo agregado grúdo	Módulo de finura da areia				2,40	2,60	2,80	3,00	9,5	0,50	0,48	0,46	0,44	12,5	0,59	0,57	0,55	0,53	19	0,66	0,64	0,62	0,60	25	0,71	0,69	0,67	0,65	37,5	0,75	0,73	0,71	0,69
Diâmetro máximo agregado grúdo	Módulo de finura da areia																																					
	2,40	2,60	2,80	3,00																																		
9,5	0,50	0,48	0,46	0,44																																		
12,5	0,59	0,57	0,55	0,53																																		
19	0,66	0,64	0,62	0,60																																		
25	0,71	0,69	0,67	0,65																																		
37,5	0,75	0,73	0,71	0,69																																		
ACI																																						
Adotando:	Mu= 1428,94	kg/m³																																				
	Vb= 0,6																																					
$Cagg = Vb \times Mu$																																						
Cagg (Kg/m³) = 857,364																																						
10) CONSUMO AGREGADO MIUDO (Cagm)																																						
$Vagm = 1 - (Cc/\gamma_c + Cagg/\gamma_{agg} + Ca/\gamma_a)$																																						
Onde:	Vagm é o volume de areia	$\gamma_c$ (g/cm³) = 3,10 =	3100	Kg/m³																																		
	$\gamma$ é a massa específica de cada material	$\gamma_{agg}$ (g/cm³) = 2,659 =	2681	Kg/m³																																		
	C é o consumo de cada material	$\gamma_a$ (g/cm³) = 1,00 =	1000	Kg/m³																																		
Vagm = 0,3360																																						
Como o consumo de areia é dado pela fórmula:																																						
$Cagm = Vagm \times \gamma_{agm}$																																						
Sabendo que :	$\gamma_{agm}$ (g/cm³) = 2,542 =	2542	kg/m³																																			
Cagm (Kg/m³) = 854,08244																																						
11) Traço Inicial																																						
$Cc/Cc : Cagm/Cc : Cagg/Cc : Ca/Cc$																																						
1 : 1,98 : 1,99 : 0,475																																						