

Aderência de Varões GFRP no Betão

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

João Filipe Gomes Gonçalves

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL



UNIVERSIDADE da MADEIRA

A Nossa Universidade
www.uma.pt

dezembro | 2013

UMa

N Ade

2

Aderência de varões GFRP no betão

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

João Filipe Gomes Gonçalves

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTAÇÃO

Paulo Miguel Macedo França

CO-ORIENTAÇÃO

Patrícia Carlota Costa Escórcio

Agradecimentos

Finda esta etapa da minha vida, resta-me prestar os respetivos agradecimentos a todas as pessoas e entidades que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a conclusão desta dissertação.

Primeiramente uma palavra de gratidão ao Professor Paulo França pela oportunidade de poder ser parte integrante de um projeto inovador, adicionalmente agradecendo a orientação, ensinamentos e disponibilidade prestada.

Um agradecimento especial ao Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC) pela disponibilização dos meios técnicos e humanos para a realização da campanha experimental.

À engenheira Patrícia Escórcio e ao engenheiro Luís Correia revelar um sentimento de gratidão pela coorientação, acompanhamento e interesse na procura de soluções aos obstáculos que surgiram e que estão naturalmente inerentes a um trabalho experimental desta natureza.

Aos meus colegas e amigos da Universidade da Madeira um grande bem-haja, em particular ao Rúben Jesus e Pedro Ornelas, que sempre revelaram um interesse especial por este tema, fomentando debates e discussões que enriqueceram e contribuíram para alguns dos textos presentes.

Finalmente um agradecimento muito especial à minha família, em particular aos meus pais e irmã, pelos valores e princípios transmitidos ao longo da minha vida, pela paciência, compreensão e pelas palavras de conforto, essenciais nos momentos menos bons.

Resumo

A utilização de varões de fibra de vidro (GFRP) em alternativa ao aço em estruturas de betão armado representa uma mais-valia no que respeita a ambientes agressivos, nomeadamente ambientes altamente corrosivos. No entanto a elevada flexibilidade e o comportamento elástico até à rotura levam a comportamentos distintos no que se refere ao seu dimensionamento. A sua aceitação no universo da construção está dependente de uma melhor compreensão do comportamento estrutural deste material. Desta forma a aderência constitui um dos aspetos mais básicos do comportamento estrutural, visto que representa a qualidade da transmissão de tensões das armaduras para o betão. Este parâmetro representa um fator determinante para o cálculo do comprimento de amarração nos códigos de dimensionamento.

De acordo com o exposto, esta dissertação tem como objetivo o estudo do comportamento da aderência entre o betão e os varões GFRP. O programa experimental é constituído por dois tipos de ensaio, 18 ensaios de arrancamento com longo comprimento de ancoragem e 18 ensaios com curto comprimento de ancoragem, com intuito de avaliar a influência do diâmetro, do comprimento embebido e do material do varão no comportamento da aderência.

Observou-se que as tensões desenvolvidas pelos varões GFRP, num ensaio de tração pura, diminuem consoante o diâmetro do varão aumenta. As tensões de aderência média diminuem com o aumento do comprimento embebido de varão. Os comprimentos de ancoragem ótimos dos varões GFRP aumentam consoante o aumento do diâmetro do varão, no entanto este valor representa cerca de 27 diâmetros do varão em causa. A nível local, verificou-se que as tensões de aderência aumentam conforme o aumento do diâmetro e que as tensões de aderência observadas nos varões GFRP são inferiores aquelas registadas nos varões de aço.

Os resultados demonstraram que o confinamento dos provetes é um fator determinante no desenvolvimento de elevadas tensões, principalmente nos varões GFRP de maiores diâmetros, este fator deverá ser tido em conta em trabalhos experimentais futuros.

Palavras chave: Polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP), Aderência, Ensaio de arrancamento, Comprimento de ancoragem

Abstract

The use of fiberglass rods (GFRP) as an alternative to steel in reinforced concrete structures represents an added value regarding aggressive environments, including highly corrosive environments. However, the high flexibility and elastic behavior till failure origins different behaviors regarding its design. Its acceptance in the world of construction is reliant on a better understanding of the structural behavior of this material. Thus bond behavior is one of the most basic aspects of structural behavior, as it represents the quality of stress transmission from reinforcement to concrete. This parameter represents a determinant factor for calculating the development length in design codes.

According to the above, this thesis aims to study the behavior of bond between the concrete and the GFRP rods. The experimental program consists of two kinds of test, 18 pullout tests with long anchorage length and 18 pullout tests with short anchorage length, in order to assess the influence of diameter, embedded length, and type of rod in bond behavior.

It was observed that the stresses developed by GFRP rods, in a direct tension test, decreases as the rod diameter increases. Average bond stresses decrease with an increase in rods embedment length. Optimal anchored lengths of GFRP bars increase with the increase in rod's diameter, however this value is about 27 diameters of the rod in question. At local level, it was found that bond stresses increase with the increment in rod diameter and the bond stress observed in GFRP rods are lower than the ones verified in steel rods.

The results showed that confinement of the test specimens is a determinant factor in the development of high stresses, especially in GFRP with larger diameter, this factor should be taken into account in future experimental studies.

Keywords: Glass Fiber Reinforced Polymer, Bond, Pull-out test, Anchored Length

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XV
LISTA DE SÍMBOLOS	XVII
<u>CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO</u>	<u>1</u>
1.1 ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2 OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO	2
1.3 DISPOSIÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
<u>CAPÍTULO 2. ANÁLISE DA ADERÊNCIA ENTRE GFRP E O BETÃO</u>	<u>5</u>
2.1 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO (GFRP)	5
2.1.1 CONSTITUINTES	5
2.1.2 MODO DE FABRICO	6
2.1.3 PROPRIEDADES GFRP	6
2.1.3.1 Densidade	6
2.1.3.2 Coeficiente de Expansão térmica	6
2.1.3.3 Resistência à tração	7
2.1.3.4 Resistência à compressão	8
2.1.3.5 Resistência ao corte	8
2.1.3.6 Fluência	8
2.1.3.7 Fadiga	9
2.1.3.8 Resistência a altas temperaturas e fogo	9
2.2 MECANISMO DE ADERÊNCIA	10
2.2.1 MODOS DE ROTURA POR ADERÊNCIA	10

2.2.2	LIGAÇÃO AÇO-BETÃO	12
2.2.3	LIGAÇÃO GFRP-BETÃO	12
2.2.4	TIPOLOGIA DE ENSAIOS PARA VERIFICAR A ADERÊNCIA ENTRE MATERIAIS	14
2.2.5	SISTEMA DE APERTO DO VARÃO GFRP	16
2.3	PARÂMETROS CONDICIONANTES NAS TENSÕES DE ADERÊNCIA ENTRE O BETÃO E GFRP	19
2.3.1	RESISTÊNCIA Á COMPRESSÃO DO BETÃO	19
2.3.2	COMPRIMENTO EMBEBIDO	20
2.3.3	DIÂMETRO DO VARÃO	21
2.3.4	POSIÇÃO DO VARÃO NO MOLDE	21
2.3.5	MATERIAL DO VARÃO	22
2.3.6	TIPO DE SUPERFÍCIE DOS VARÕES	23
2.4	EQUAÇÕES RELATIVAS À TENSÃO DE ADERÊNCIA E COMPRIMENTO DE AMARRAÇÃO NOS CÓDIGOS DE	
	DIMENSIONAMENTO	24
2.4.1	ACI 440-1R	25
2.4.2	CSA-S6 CANADIAN HIGHWAY BRIDGE DESIGN CODE	27
2.4.3	JAPAN SOCIETY FOR CIVIL ENGINEERING (JSCE)	28
CAPÍTULO 3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	31
3.1	SÉRIES EXPERIMENTAIS	31
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS	31
3.2.1	BETÃO	31
3.2.2	VARÃO GFRP	33
3.2.3	VARÃO DE AÇO	36
3.3	PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS	37
3.3.1	PREPARAÇÃO DOS PROVETES DE ENSAIO	37
3.3.1.1	Preparação dos varões	37
3.3.1.2	Preparação dos moldes, betonagem e cura	40
3.3.2	INSTRUMENTAÇÃO E RECOLHA DE DADOS	44
3.3.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	44
3.3.3.1	Ensaio de arrancamento com longo comprimento de ancoragem	45
3.3.3.2	Ensaio de arrancamento com comprimento de ancoragem curto	48

CAPÍTULO 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	52
4.1 ENSAIO DE ARRANCAMENTO COM LONGO COMPRIMENTO DE ANCORAGEM	52
4.1.1 PREVISÃO DOS RESULTADOS	54
4.1.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	55
4.1.3 TENSÃO DESENVOLVIDA – DESLOCAMENTO DAS GARRAS	57
4.1.3.1 Varões Retos	57
4.1.3.2 Varões com cabeça de ancoragem	60
4.1.4 TENSÕES DE ADERÊNCIA	64
4.1.5 COMPRIMENTO ÓTIMO DE ANCORAGEM	66
4.1.5.1 Varões retos	66
4.1.5.2 Varões com cabeça de ancoragem	68
4.2 ENSAIO DE ARRANCAMENTO COM CURTO COMPRIMENTO DE ANCORAGEM	69
4.2.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	70
4.2.2 RELAÇÃO TENSÃO DE ADERÊNCIA-ESCORREGAMENTO	71
4.2.3 PARÂMETROS CONDICIONANTES NA ADERÊNCIA	77
4.2.3.1 Diâmetro do varão	77
4.2.3.2 Material do varão	78
CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	81
5.1 CONCLUSÕES	81
5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	82
BIBLIOGRAFIA	85
ANEXO A	89
ANEXO B	93

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Tipos de FRP retirado de [18].....	1
Figura 2.1 - Processo de fabrico de varões GFRP [27]	6
Figura 2.2 - Relação constitutiva dos principais tipos de fibra constituintes de GFRP [1].....	7
Figura 2.3 - Mecanismo de transferência de tensões de aderência adaptado de [4]	10
Figura 2.4 - Seção transversal de um elemento de betão com fraturas entre os varões e através do recobrimento [4].....	11
Figura 2.5 - Vista lateral de um elemento de betão com uma superfície de corte na extremidade das nervuras devido ao arrancamento do varão [4].....	11
Figura 2.6 - Curva típica da relação entre as tensões de aderência e o escorregamento da extremidade carregada do varão GFRP num ensaio de arrancamento adaptado de [16].....	13
Figura 2.7 - Representação esquemática do equilíbrio dos anéis de tensões de tração com a componente radial das tensões de aderência segundo Tepfers (<i>apud</i> [16])	13
Figura 2.8 - Esquema do ensaio de arrancamento adaptado de [2].....	15
Figura 2.9 - Esquema simplificado de um ensaio de viga adaptado de [28].....	15
Figura 2.10- Sistema de aperto dos varões: a) antes da introdução da argamassa; b) após a introdução da argamassa com as prensas da máquina de teste; adaptado de [10].....	17
Figura 2.11 - Estrutura de montagem do sistema de aperto de varões FRP: 1- viga de madeira furada; 2- tampa de PVC furada; 3- tubo de aço soldado a uma anilha furada [22]	17
Figura 2.12 - Sistema de aperto com tubo cerrado adaptado de [10].....	18
Figura 2.13 - Varões GFRP com sistema de aperto para ensaio à tração, retirado de [25]	19
Figura 3.1 - Gama de varões GFRP ensaiados	33
Figura 3.2 - Varão GFRP com cabeça de ancoragem.....	33
Figura 3.3 - Sistema de aperto nos varões GFRP	33
Figura 3.4 - Utilização do vídeo-extensómetro para ensaio de tração do varão GFRP	34
Figura 3.5 - Rotura por tração do varão GFRP	34
Figura 3.6 - Diagrama tensão-extensão para os varões GFRP ensaiados	35
Figura 3.7 - Série de varões de aço para ensaio de tração	36
Figura 3.8 - Ensaio de tração pura para o varão D16.....	36
Figura 3.9 - Cantoneiras individuais com pontos de solda	38
Figura 3.10 - Conjunto de cantoneiras soldadas nas extremidades	38

Figura 3.11 - Gama de tubos de seção quadrada utilizados nos diferentes diâmetros ensaiados.....	39
Figura 3.12 - Colocação da resina no interior do tubo	39
Figura 3.13 - Sistema de suporte do tubo.....	39
Figura 3.14 - Vista geral da aplicação do sistema de aperto nos provetes prismáticos	39
Figura 3.15 - Colocação de tubos de plásticos nos varões de aço	40
Figura 3.16 - Colocação de tubos de plásticos nos varões GFRP	40
Figura 3.17 - Moldes para os provetes prismáticos	41
Figura 3.18 - Sistema de suporte de varões nos provetes prismáticos	41
Figura 3.19 - Enchimento e regularização da superfície dos moldes prismáticos	41
Figura 3.20 - Varões GFRP D16 inseridos nos moldes	42
Figura 3.21 - Varões aço D25 inseridos nos moldes	42
Figura 3.22 - Enchimento dos moldes com betão	43
Figura 3.23 - Correção da superfície dos provetes cúbicos	43
Figura 3.24 - Aplicação da manta de geotêxtil durante a cura dos provetes de ensaio.....	43
Figura 3.25 - Sistema de garras utilizado para (a) varões de aço e (b) varões GFRP	44
Figura 3.26 - Esquema simplificado do ensaio de arrancamento com longo comprimento de ancoragem.....	45
Figura 3.27 - Ensaio arrancamento com longo comprimento de ancoragem: (a) corte representativo, (b) planta da chapa superior e inferior e (c) ensaio real	46
Figura 3.28 - Fluxograma do procedimento experimental do ensaio para testar o comprimento de ancoragem.....	47
Figura 3.29 - Ensaio arrancamento com curto comprimento de ancoragem incluindo (a) corte representativo, planta da chapa superior e inferior e (c) ensaio real	48
Figura 3.30 - Esquema do ensaio de arrancamento com curto comprimento de ancoragem .	49
Figura 3.31 - Colocação do sistema de LVDT na (a) extremidade carregada e (b) extremidade livre do varão.....	50
Figura 3.32 - Fluxograma do procedimento experimental para o ensaio de arrancamento....	51
Figura 4.1 - Provetes prismáticos para o ensaio de arrancamento com longo comprimento de ancoragem.....	53
Figura 4.2 - Esquema da terminologia utilizada nos provetes prismáticos	53
Figura 4.3 - Operação de corte do provete prismático.....	53
Figura 4.4 - Esmagamento do betão nos espaços entre as nervuras	56
Figura 4.5 - Rotura do varão GFRP D12	57
Figura 4.6 - Fenda originada pela rotura da aderência por destacamento de betão do provete com varão GFRP D16 embebido a 500mm	57

Figura 4.7 - Relação entre as tensões desenvolvidas e a posição das garras da máquina de ensaio para (a) o varão de aço de 12mm, (b) o varão GFRP de 12 mm, (c) o varão GFRP de 16mm e (d) o varão GFRP de 25mm	58
Figura 4.8 - Relação entre as tensões desenvolvidas nos varões retos GFRP e o comprimento embebido no betão	59
Figura 4.9 - Extremidade exposta do provete com varão GFRP D25 embebido a 300mm	59
Figura 4.10 - Relação entre as tensões desenvolvidas no varão e o deslocamento para (a) o varão GFRP 12mm, (b) o varão GFRP 16mm e (c) varão GFRP 25mm com cabeça de ancoragem	60
Figura 4.11 - Cabeça de ancoragem no interior do betão com vestígios das nervuras arrancadas ao varão GFRP D12	61
Figura 4.12 - Perda da cabeça de ancoragem no betão do varão GFRP D12	61
Figura 4.13 - Destacamento do varão GFRP D12 da cabeça de ancoragem	62
Figura 4.14 - Fendilhação do provete com varão GFRP D16 embebido no betão a 250mm	63
Figura 4.15 - Rotura da cabeça de ancoragem no varão GFRP D16	63
Figura 4.16 - Sistema de confinamento externo	63
Figura 4.17 - Fendilhação do provete com varão GFRP D25 embebido 250mm no betão	64
Figura 4.18 - Escorregamento do varão GFRP D25 da cabeça de ancoragem	64
Figura 4.19 - Relação entre as tensões de aderência e o comprimento embebido para a gama de varões GFRP ensaiados	65
Figura 4.20 - Comprimento de ancoragem ótimo para (a) o varão de aço de 12mm, (b) o varão de GFRP de 12mm, (c) o varão de GFRP de 16mm e (d) o varão de GFRP de 25mm	67
Figura 4.21 - Comprimento de ancoragem ótimo para o varão GFRP D12 com cabeça de ancoragem	68
Figura 4.22 - Provete cúbicos para o ensaio de arrancamento com curto comprimento de ancoragem	69
Figura 4.23 - Sistema de classificação dos ensaios de arrancamento com curto comprimento de ancoragem	69
Figura 4.24 - Relação entre a tensão de aderência e o escorregamento relativo ao varão de aço de 12mm para a (a) extremidade não carregada e a (b) extremidade carregada do varão	71
Figura 4.25 - Relação entre a tensão de aderência e o escorregamento relativo ao varão de aço de 16mm para a (a) extremidade livre e a (b) extremidade carregada do varão	72
Figura 4.26 - Relação entre a tensão de aderência e o escorregamento relativo ao varão de aço de 25mm para a (a) extremidade livre e a (b) extremidade carregada do varão	72
Figura 4.27 - Destacamento do betão no provete de aço de 25mm	73

Figura 4.28 - Relação entre a tensão de aderência e o escorregamento relativo ao varão GFRP de 12mm para a (a) extremidade livre e (b) extremidade carregada do varão.....	73
Figura 4.29 - Relação entre a tensão de aderência e o escorregamento relativo ao varão GFRP de 16mm para a (a) extremidade livre e (b) extremidade carregada do varão.....	74
Figura 4.30 - Relação entre a tensão de aderência e o escorregamento relativo ao varão GFRP de 25mm para a (a) extremidade livre e (b) extremidade carregada do varão.....	74
Figura 4.31 - Esmagamento do betão entre as nervuras do varão GFRP de 25mm.....	75
Figura 4.32 - Curvas tensão de aderência média escorregamento para o varão GFRP de (a) 12, (b) 16 e (c) 25mm	76
Figura 4.33 - Relação entre a tensão de aderência e o diâmetro do varão.....	77
Figura 4.34 - Modo de rotura por arrancamento do varão de (a) aço e (b) GFRP.....	79
Figura 4.35 - Relação entre o diâmetro do varão e o escorregamento para a (a) extremidade carregada e (b) não carregada do varão	79

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Valor para o fator k_c	29
Tabela 3.1 - Composição do betão autocompactável C30/37	32
Tabela 3.2 - Características mecânicas do betão aos 28 dias	32
Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas especificadas pelo fabricante.....	34
Tabela 3.4 - Propriedades mecânicas obtidas experimentalmente.....	35
Tabela 3.5 - Propriedades mecânicas dos varões de aço.....	37
Tabela 3.6 - Especificações do sistema de aperto adotado	38
Tabela 4.1 - Previsão do tipo de rotura por aderência nos ensaios de arrancamento com longo comprimento de ancoragem	54
Tabela 4.2 - Resultados experimentais relativos aos provetes prismáticos	55
Tabela 4.3 - Tensões de aderência relativas aos ensaios de arrancamento com longo comprimento de ancoragem.....	65
Tabela 4.4 - Quadro resumo dos ensaios de arrancamento com curto comprimento de ancoragem.....	70
Tabela 4.5 - Valores máximos para a tensão média de aderência e respetivo escorregamento	76

Lista de Símbolos

Siglas

ACI	American Concrete Institute
AFRP	Aramid Fiber Reinforced Polymer
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
CHBDC	Canadian Highway Bridge Design Code
CSA	Canadian Standard Association
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
Fib	Fédération Internationale du Béton
FRP	Fiber Reinforced Polymer
JSCE	Japan Society for Civil Engineering
LREC	Laboratório Regional Engenharia Civil
LVDT	Linear Variable Displacement Transducer
MAGLEV	Transporte de Levitação Magnética
PAN	Poliacrilonitrila
PVC	Polyvinyl chloride

Notações Latinas (Minúsculas)

a_s	Rácio entre o espaçamento das nervuras e a área transversal do varão (-)
d_b	Diâmetro base do varão solicitado (mm)
d_{cs}	Menor distância entre a superfície mais próxima de betão e o centro do varão (mm)
f_b	Tensão desenvolvida no varão FRP sujeito a forças de tração (MPa)
f_{bod}	Tensão de aderência de cálculo do betão (MPa)
f_c'	Resistência à compressão do betão (MPa)
f_{cr}	Resistência média do betão à tração (MPa)
f_{fr}	Menor valor entre a resistência à tração do varão (f_{fu}) e a tensão desenvolvida ao longo do varão (f_{fe}) (MPa)
f_{fu}	Resistência à tração no Estado Limite Último (MPa);
f_y	Tensão de cedência do aço (MPa)
k_1	Fator de localização do varão (-)
k_4	Fator de superfície do varão (-)
l_a	Comprimento de amarração além do centro do apoio (mm)

l_{bhf}	Comprimento de amarração de varões dobrados a 90° (mm)
l_d	Comprimento de amarração (mm)
l_e	Comprimento do varão embebido (mm)
n	Número de varões solicitados ao longo do potencial plano de arrancamento do varão (-)
s	Espaçamento máximo entre varões utilizados para reforço transversal (estribos) dentro do comprimento de amarração (mm)
sm_{le}	Escorregamento registado na extremidade carregada do varão (mm)
sm_{ue}	Escorregamento registado na extremidade livre do varão (mm)

Notações latinas (Maiúsculas)

A	Área da secção transversal do varão FRP (mm ²)
$A_{f,bar}$	Área do varão (mm ²)
A_t	Área da secção transversal do estribo usado como reforço transversal (mm ²)
C	Menor valor entre a distância da superfície do betão e o centro do varão e metade do espaçamento entre o centro dos varões solicitados (mm)
E_{frp}	Módulo de elasticidade do varão de FRP (MPa)
E_s	Módulo de elasticidade do aço (MPa)
E_t	Módulo de elasticidade do varão utilizado como reforço transversal (GPa)
F	Força de tração desenvolvida ao longo do varão (kN)
$F_{compemb}$	Força de tração desenvolvidas ao longo do comprimento embebido do varão (kN)
F_u	Força de rotura à tração do varão GFRP (kN)
K_{tr}	Índice de reforço transversal (mm)
L_c	Comprimento desde o topo do varão embebido no betão ao ponto de contato do equipamento de medição com o varão (mm)
M_{Rd}	Momento fletor resistente da secção (kN.m)
P_{max}	Força máxima de arrancamento (kN)
S_c	Alongamento elástico (mm)
V_{sd}	Esforço transversal atuante (kN)

Notações gregas

α	Fator que tem em consideração a degradação do varão durante a betonagem (-)
α_1	Fator que tem em conta o reforço transversal (-)
α_2	Fator que relaciona as tensões de aderência entre o aço e o GFRP (-)
γ_c	Coeficiente parcial de segurança do betão (-)

σ_{max}	Tensão de aderência máxima (MPa)
σ_{res}	Tensão de aderência residual (MPa)

Capítulo 1. Introdução

1.1 Enquadramento geral

No universo da construção civil as primeiras referências ao betão armado surgiram por volta do século XIX. No entanto esta tecnologia de construção teve um desenvolvimento exponencial no início do século XX, resultado de um aumento da compreensão das funcionalidades e possibilidades dadas por este material. Deste modo começaram a surgir métodos de cálculo e disposições construtivas relativas a elementos estruturais.

No entanto, o reforço do betão com armaduras de aço apresenta alguns problemas no que toca á sua durabilidade em ambientes agressivos, sofrendo deterioração relacionada com a corrosão das armaduras. Desta forma torna-se imprescindível encontrar uma solução que possua as características atrativas dos varões de aço e que simultaneamente permita a sua proteção em ambientes corrosivos.

A busca por um material capaz de responder de forma eficaz às solicitações impostas por ambientes agressivos levou à descoberta de materiais compósitos, nomeadamente fibras reforçadas com polímeros, denominadas FRP – “Fyber Reinforced Polymer”. As fibras mais utilizadas no setor da construção para FRP são as fibras de carbono (CFRP – “Carbon Fyber Reinforced Polymer”), vidro (GFRP – “Glass Fyber Reinforced Polymer”) e aramida (AFRP – “Aramid Fyber Reinforced Polymer”), em destaque na Figura 1.1.



Figura 1.1 - Tipos de FRP retirado de [18]

Os varões de GFRP têm diversas vantagens que estão relacionadas com o seu reduzido peso próprio, a não corrosibilidade, a reduzida condutibilidade elétrica e a elevada resistência mecânica à tração, que o tornam num material atrativo face aos varões de aço utilizados correntemente no betão armado.

No entanto a substituição dos varões de aço por este material ainda não constitui uma prática comum devido aos problemas relacionados com os mesmos, nomeadamente o seu módulo de elasticidade é consideravelmente mais baixo do que o aço, pelo que o Estado Limite de Serviço (deformação e abertura de fendas) pode condicionar o seu dimensionamento [7]. Outro inconveniente está relacionado com o elevado custo inicial associado à falta de conhecimento e estudo aprofundado associado a este novo material. Finalmente o uso de varões de GFRP para reforçar estruturas de betão cuja resistência ao fogo é necessária para garantir a integridade estrutural não é recomendada visto que o calor excessivo enfraquece os polímeros [1].

O aumento do interesse neste material despertou uma série de estudos e trabalhos experimentais dos quais resultaram documentos regulamentares de dimensionamento redigidos por diversas entidades internacionais. No entanto algumas áreas não estão completamente compreendidas e carecem de mais investigação, mais concretamente a aderência entre os varões compostos por GFRP e o betão.

1.2 Objetivos e motivação

As primeiras referências relativas a materiais compósitos surgiram após a Segunda Guerra Mundial. A indústria aeroespacial desde logo reconheceu as vantagens destes materiais e, durante a Guerra Fria, o desenvolvimento das indústrias aeroespacial e defesa militar potenciou o uso dos mesmos. A utilização destes materiais nas indústrias militar e aeronáutica tornou-se, desde então, prática corrente e estimulou o avanço tecnológico nestas áreas ao longo das últimas décadas.

O sucesso da implantação deste tipo de materiais nas indústrias acima descritas, induz à reflexão sobre a sua aplicação noutras áreas da sociedade civil. A introdução deste tipo de materiais no quadro da construção civil constitui uma mais-valia no que toca a dotar determinado tipo de estrutura de propriedades singulares, potenciando a sustentabilidade das mesmas. Desta forma, o tema da dissertação vem complementar os estudos realizados pela comunidade científica internacional no âmbito dos materiais compósitos, particularmente os materiais compósitos em fibra de vidro.

O objetivo central da presente dissertação assenta no estudo da aderência entre o betão e os varões GFRP. De forma a cumprir com este foram estabelecidas as seguintes tarefas:

- Estudo intensivo da bibliografia para corretamente compreender o fenómeno da aderência entre o betão e varões GFRP e quais os parâmetros que influenciam este fenómeno;
- Correlacionar as metodologias de cálculo para o comprimento de amarração dos diversos códigos de dimensionamento e estabelecer os parâmetros chave que regulam este fator;
- Avaliar experimentalmente, através de ensaio de arrancamento, o fenómeno da aderência e a sua relação com o comprimento de ancoragem de varões GFRP;
- Determinar, através dos resultados experimentais, o comprimento de ancoragem ótimo para uma gama de diâmetros;
- Identificar corretamente os tipos de rotura obtidos experimentalmente e compreender os fenómenos que originam os mesmos;
- Comparar os dados obtidos com dados existentes na bibliografia consultada.

1.3 Disposição da Dissertação

De encontro aos objetivos descritos anteriormente, a presente dissertação encontra-se repartida em 5 capítulos principais, obedecendo a uma ordem de conteúdos.

O capítulo 1, servindo de capítulo introdutório, contextualiza o presente tema no panorama da construção civil e apresenta os fundamentos e os propósitos do autor face ao programa experimental proposto.

O capítulo 2 trata de apresentar as características dos materiais poliméricos reforçados com fibras de vidro, o seu processo de fabrico e os seus constituintes. São abordados os conceitos de aderência, modos de rotura por aderência, as características das ligações entre os materiais, dados a conhecer os tipos de ensaio existentes para estudar o fenómeno da aderência e consequentemente o sistema de aperto dos varões GFRP. Neste mesmo capítulo o estado do conhecimento é realizado através da recolha de parâmetros que regulam o fenómeno da aderência entre dois materiais na bibliografia consultada. Por fim para completar o capítulo expõe-se as

metodologias de cálculo utilizadas pelos diferentes códigos de dimensionamento no cálculo do comprimento de amarração de varões GFRP.

Com base nos pressupostos do capítulo 2, a descrição do programa experimental é realizada no capítulo 3, onde são relatados os tipos de ensaio realizados e descritas as séries experimentais. Neste capítulo também são especificadas as propriedades dos materiais utilizados, as metodologias de ensaio adotadas bem como a instrumentalização realizada nos mesmos.

O capítulo 4 apresenta os gráficos de comprimentos de ancoragem ótimo e as curvas de tensão de aderência-escorregamento obtidas dos ensaios de arrancamento. Neste capítulo os resultados são tratados e analisados face às informações recolhidas na bibliografia exposta no capítulo 2.

A dissertação é concluída no capítulo 5 onde são sistematizados os objetivos conseguidos e são propostos trabalhos de investigação futuros, complementares ao estudo realizado.

Capítulo 2. Análise da aderência entre GFRP e o betão

2.1 Polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP)

2.1.1 Constituintes

Os FRP são obtidos através de fibras de alta resistência embebidas numa matriz de resina. O tipo de fibra utilizado nos FRP é caracterizado pela sua alta resistência, rigidez, dureza e durabilidade, desta forma as fibras mais utilizadas nos FRP são fibras de vidro, carbono e aramida.

As fibras de vidro mais comuns são feitas de vidro tipo E (E-glass), vidro tipo S (S-glass) e vidro de resistência AR (Alkali-resistant). O vidro tipo E é o mais económico de todos os tipos de vidro utilizados, resultando num grande leque de aplicações na indústria de plásticos reforçados com fibras. O vidro tipo S possui um maior módulo de elasticidade e maior resistência à tração que os restantes tipos, no entanto por tratar-se de uma solução dispendiosa faz com seja o menos utilizado. O vidro AR previne a corrosão por ataque alcalino. [6]

A matriz tem como principais funções ligar as fibras e proteger a sua superfície durante o manuseamento, fabrico e vida útil do compósito, assim como a correta transferência das tensões para as fibras. Atualmente os compósitos são produzidos utilizando dois tipos de matrizes: as termoendurecíveis e as termoplásticas. As matrizes termoendurecíveis são caracterizadas pela baixa viscosidade inicial garantindo alta manobrabilidade durante a aplicação, contudo os compósitos produzidos com esta matriz têm um tempo de armazenamento limitado, longo tempo de fabrico e uma baixa resistência ao impacto. As matrizes termoplásticas adquirem alta viscosidade a altas temperaturas para serem processadas e solidificam à medida que arrefecem, estas matrizes são de difícil aplicação devido à alta viscosidade e às altas temperaturas de manuseamento, no entanto podem ser reparadas facilmente através de ciclos de temperatura [6].

2.1.2 Modo de fabrico

Os varões de GFRP são constituídos por uma multitude de fibras de vidro contínuas orientadas no sentido da carga, que são ligadas por uma matriz de resina [12]. O processo de fabrico encontra-se ilustrado na Figura 2.1 e denomina-se por pultrusão. Este tem início num sistema de manuseamento de fibras que as encaminha até à câmara de impregnação de resinas sintéticas, seguidamente o material resinoso é adicionado ao mesmo tempo que as fibras são puxadas continuamente para o molde metálico através do sistema de tração. Após a formação do compósito, dá-se início à cura da resina no interior do molde a elevada temperatura e pressão, por fim o material é cortado consoante as especificações pretendidas. Os varões GFRP são produzidos numa grande variedade de tratamentos superficiais, estes incluem superfície areada, superfície nervurada, superfície helicoidal areada, entre outros.

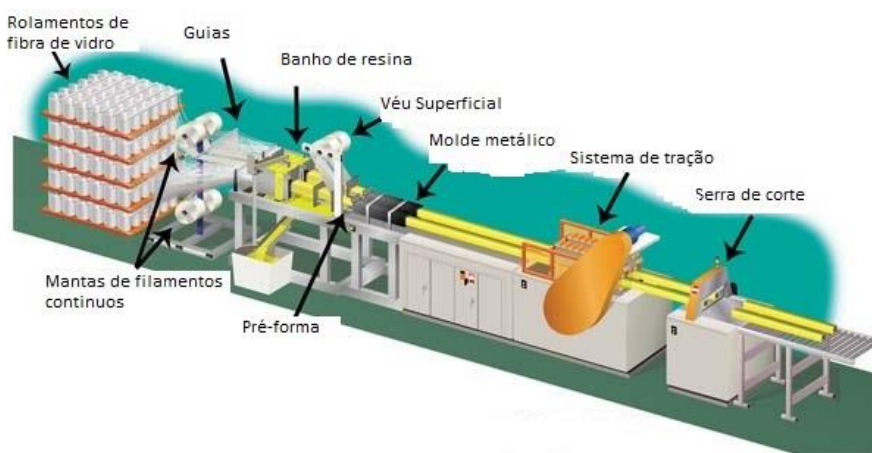


Figura 2.1 – Processo de fabrico de varões GFRP [27]

2.1.3 Propriedades GFRP

2.1.3.1 Densidade

Os varões de GFRP possuem uma densidade que varia entre 1.25 a 2.10 g/cm³ que corresponde a cerca de 25% da densidade dos varões de aço (7.90 g/cm³), esta característica representa uma melhoria no que toca a custos de transporte e manuseamento no local de construção [1].

2.1.3.2 Coeficiente de Expansão térmica

As propriedades térmicas das fibras variam consideravelmente nas direções transversais e longitudinais e estão relacionadas com o tipo de fibra, tipo de matriz e a relação fibras-volume. Na

direção longitudinal o GFRP tem um coeficiente de expansão térmica que varia entre 6×10^{-6} e $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Na direção transversal apresenta um valor entre 21×10^{-6} e $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, correspondendo a cerca do dobro do coeficiente de expansão térmica registrado para o aço em ambas as direções ($11.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) [18] [1].

2.1.3.3 Resistência à tração

No que toca à resistência à tração, o GFRP admite um comportamento elástico linear até a rotura, não havendo plastificação. Na Figura 2.2 podemos observar a relação tensão-extensão para os principais tipos de fibras utilizadas no fabrico de varões GFRP. Esta propriedade está fortemente dependente da relação fibras-volume, isto porque as fibras de vidro são o constituinte responsável pela distribuição de cargas.

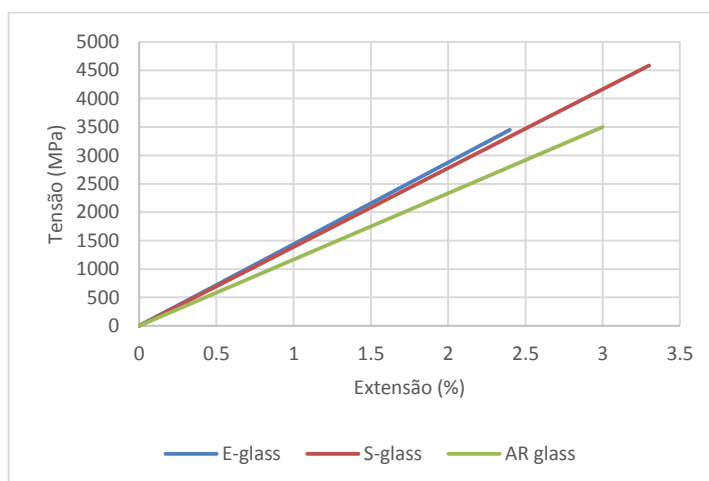


Figura 2.2 - Relação constitutiva dos principais tipos de fibra constituintes de GFRP [1]

A resistência à tração no GFRP varia indiretamente com o diâmetro do varão, esta característica foi observada no estudo experimental da autoria de Faza e GangaRao em 1993 (*apud* [1]), no qual verificou-se uma redução de cerca de 40% na resistência à tração variando o diâmetro de 9.5 para 22.2 mm.

Um dos inconvenientes dos varões FRP está relacionado com o fato de não poderem ser dobrados após o seu fabrico, com exceção dos varões FRP com resinas termoplásticas, que podem ser dobrados em determinadas condições de pressão e temperatura. No entanto, existe a possibilidade dos varões de FRP serem produzidos com as dobras. Em 1998 Nanni et al (*apud* [1]) examinou que nestes varões as zonas dobradas apresentam uma redução de cerca de 50% na resistência á tração

quando comparadas com varões retos do mesmo material. Estas reduções estão relacionadas com a encurvadura das fibras e concentração de tensões na zona da dobra.

Existe no entanto alguma dificuldade na execução de ensaios para testar a resistência á tração de varões de GFRP devido á concentração de tensões nas zonas de ancoragem que pode levar à rotura prematura do mesmo. Um adequado mecanismo de aperto do varão permite que a rotura aconteça a meio do varão.

2.1.3.4 Resistência à compressão

Quando os materiais de FRP são solicitados longitudinalmente por forças compressivas, não podem ser utilizados os modelos teóricos usados para as forças de tração longitudinal, visto que o modo de rotura dos compósitos está associado à microencurvadura das fibras. Este modo de rotura está dependente das propriedades da resina e matriz e da fração de volume de fibras [6]. Os ensaios experimentais para obter as forças de compressão associadas aos GFRP são de difícil realização e dependem do tipo de ensaio e geometria dos espécimes, no entanto em 1988 Mallick (*apud* [1]) realizou um trabalho experimental em que foi possível demonstrar que as forças de compressão associadas ao material GFRP correspondem a 55% das forças de tração associadas ao mesmo material.

2.1.3.5 Resistência ao corte

Os varões GFRP têm pouca resistência ao corte devido à falta de reforço de fibras entre camadas, estando a resistência ao corte dependente da matriz polimérica. No entanto, é possível melhorar o comportamento ao corte mudando a orientação das fibras de maneira a que estas formem um ângulo de desvio relativamente ao eixo. Esta alteração só é possível durante a fase de fabrico dos varões [1].

2.1.3.6 Fluência

Quando os varões FRP são submetidos a uma carga constante ao longo do tempo podem ser alvo de uma rotura repentina. Este fenómeno denomina-se rotura por fluência e é influenciado pelo ambiente envolto, isto é, radiação ultravioleta, temperaturas elevadas, alcalinidade do meio e fenómenos climatéricos. Para evitar este fenómeno deve ser garantida que a carga aplicada ao

longo do tempo esteja limitada a uma fração da sua resistência última. Os varões GFRP, de todo o tipo de varões FRP, representam um maior risco no que toca à rotura por fluência [18].

2.1.3.7 Fadiga

Estudos realizados em 1982 por Mandell (*apud* [1]) revelaram que os varões de GFRP sujeitos a uma carga cíclica podem perder cerca de 10% da sua resistência (estática) inicial por década da sua vida útil em escala logarítmica. Não é possível definir claramente um limite de fadiga, ou seja, um limite abaixo do qual seja possível a um material ser submetido a cargas cíclicas por um número infinito de vezes sem causar a rotura do mesmo. Os fatores ambientais são os grandes responsáveis por influenciar o comportamento à fadiga dos varões GFRP devido à vulnerabilidade das fibras de vidro à humidade, soluções alcalinas e ácidas [6].

2.1.3.8 Resistência a altas temperaturas e fogo

Os varões GFRP quando embebidos no betão não se encontram em contato direto com o fogo, no entanto, a matriz polimérica perde rigidez na presença de altas temperaturas. O efeito de altas temperaturas nos varões GFRP está relacionado com a redução da transferência de forças de aderência entre as fibras e a resina que resulta na perda de resistência à tração, ao corte e à flexão. A temperatura após a qual existe um detrimento das propriedades mecânicas da matriz polimérica é conhecida como a temperatura de transição vítrea, e situa-se entre os 65 e os 120°C conforme o tipo de resina, valores obtidos por Bootle (*apud* [1]) no trabalho experimental realizado em 2001. Estudos realizados por Kumatra (*apud* [1]) verificaram que para temperaturas muito superiores à temperatura de transição vítrea existe uma redução de cerca de 20% na resistência à tração dos varões GFRP e CFRP [1].

O colapso estrutural pode ocorrer se, nas zonas de amarração dos varões, as temperaturas excederem os limites suportáveis pelas próprias fibras, no caso de varões GFRP este valor corresponde a 980°C [1].

2.2 Mecanismo de aderência

Para o correto dimensionamento de estruturas de betão reforçadas, as forças entre as armaduras e o betão devem ser transmitidas de forma eficiente através da ligação entre os dois materiais. A transmissão de esforços acontece através de fenómenos de aderência presentes em todo o comprimento de contato entre os materiais.

A Figura 2.3 ilustra os três mecanismos responsáveis pela aderência entre dois materiais. Estes mecanismos são: resistência por adesão, resistência mecânica e resistência por atrito. A resistência por adesão constitui a resistência ao corte existente na ligação armadura-betão e está relacionada com interligações químicas e micromecânicas. A resistência mecânica está associada à ancoragem resultante do contato entre as nervuras dos varões e o betão, este mecanismo é o principal responsável pela transferência de tensões ao betão. A resistência por atrito só se verifica quando ocorrem deslocamentos relativos entre as superfícies dos materiais e está associado a rugosidades nas superfícies de contato [8].

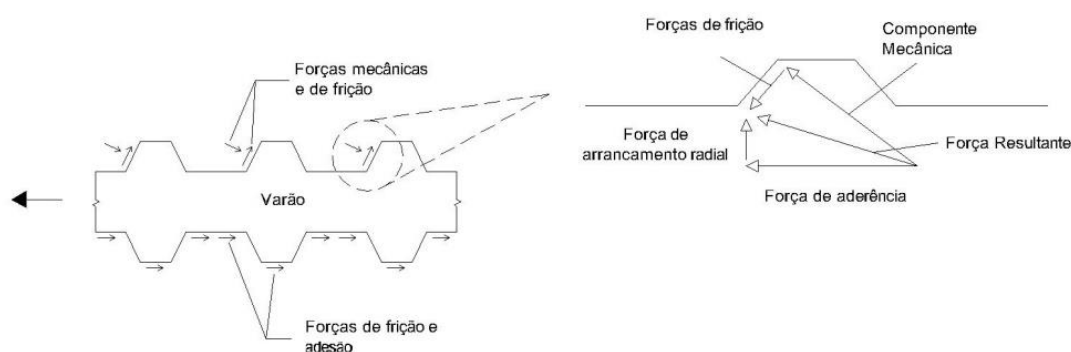


Figura 2.3 - Mecanismo de transferência de tensões de aderência adaptado de [4]

2.2.1 Modos de rotura por aderência

O comprimento de amarração de uma armadura de reforço é o comprimento necessário para assegurar uma correta transferência das forças de aderência (tangenciais e radiais) entre o betão e as armaduras, evitando o deslizamento entre os dois materiais. Quando o comprimento de amarração é insuficiente ou o confinamento do betão não é adequado, as forças radiais e de corte superam a capacidade resistente do betão e podem resultar na rotura por aderência. Desta forma existem dois modos de rotura por aderência que são descritos em seguida.

- Rotura por destacamento do betão – este tipo de rotura ocorre quando o betão que envolve os varões de reforço separa-se dos mesmos. À medida que os varões são solicitados, estes exercem pressão radial ao betão envolvente. Se o betão não constitui resistência necessária para lidar com estas pressões, começam a surgir fissuras na interface varão-betão, propagando-se em direção à superfície do betão resultando no destacamento do recobrimento. Estas fissuras podem ser observadas no esquema da Figura 2.4 e surgem tanto no plano perpendicular como horizontal aos varões de reforço [16].

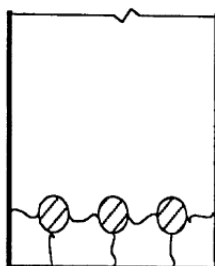


Figura 2.4 - Seção transversal de um elemento de betão com fraturas entre os varões e através do recobrimento [4]

- Rotura por arrancamento – este fenómeno é caracterizado pela diferença entre as forças radiais e tangenciais geradas pelo varão solicitado. Quando as forças tangenciais são superiores às forças radiais, ultrapassando a capacidade resistente do betão, surge uma superfície de corte ao longo da extremidade das nervuras, visível na Figura 2.5 [16].

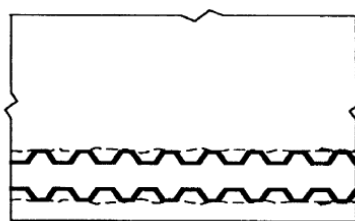


Figura 2.5 - Vista lateral de um elemento de betão com uma superfície de corte na extremidade das nervuras devido ao arrancamento do varão [4]

Os modos de rotura supracitados podem ser prevenidos nas condições em que o betão se encontre devidamente confinado, através da colocação de armadura transversal ou do aumento do recobrimento, ou nas condições em que o varão esteja embebido no betão num comprimento suficiente (comprimento amarração) para garantir que o varão atinja a sua tensão de rotura.

2.2.2 Ligação Aço-betão

A ligação entre o aço e o betão constitui um fenómeno complexo que permite a transferência de forças longitudinais para o betão envolvente.

Com o escorregamento do varão de aço relativamente ao betão, a resistência por adesão perde-se, sendo o mecanismo de aderência controlado pelas forças mecânicas nas nervuras e pelas forças de atrito presentes nas nervuras e cano¹ do varão de aço. Com o aumento do escorregamento do varão, as forças de atrito no cano do varão diminuem, ficando o mecanismo de aderência exclusivamente dependente das forças de atrito existentes entre a face das nervuras do varão de aço e o betão envolvente [4].

O comportamento da aderência entre varões de aço e o betão é influenciado pelas propriedades mecânicas do betão, do volume de betão envolto nos varões, condições superficiais e geometria do varão [4].

2.2.3 Ligação GFRP-betão

O comportamento da aderência dos varões GFRP com o betão apresenta algumas particularidades no que toca ao comportamento observado nos varões de aço devido às diferentes propriedades do material e textura superficial.

A principal particularidade está assente no fato de o aço ser um material isotrópico, homogéneo e com propriedades elasto-plásticas, já o GFRP apresenta-se como um material anisotrópico, não homogéneo e com propriedades elásticas. A anisotropia característica dos varões de GFRP resulta do fato de a resistência ao corte estar diretamente relacionada com a resina e com o tipo de fibras e a sua orientação.

No entanto os varões de GFRP disponíveis comercialmente são fabricados por diferentes produtores e têm diferentes processos de fabrico para a superfície exterior, resultando em diferentes propriedades tanto na direção longitudinal como transversal. As diferentes texturas superficiais usadas nos varões GFRP dotam os varões de propriedades não homogéneas e têm influência na aderência com o betão.

¹ Parte do varão que não inclui as nervuras

A aderência entre o betão e o varão GFRP está extensamente explicada no Bulletin 10 da Fib [16] e pode ser compreendida através da curva que relaciona as tensões de aderência e o escorregamento do varão GFRP embebido no betão sujeito ao arrancamento (Figura 2.6).

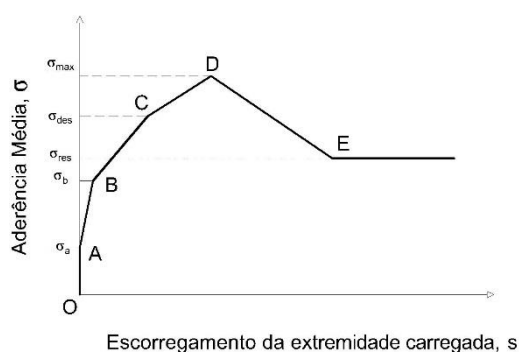


Figura 2.6 - Curva típica da relação entre as tensões de aderência e o escorregamento da extremidade carregada do varão GFRP num ensaio de arrancamento adaptado de [16]

O trecho AO representa o início do carregamento, nesta etapa o principal mecanismo de aderência a ser solicitado é a resistência por adesão e não existe qualquer escorregamento.

No intervalo AB, à medida que o carregamento vai aumentando a resistência por adesão é quebrada e o mecanismo de aderência altera-se. O escorregamento na extremidade carregada do varão aumenta e as nervuras do varão desenvolvem tensões mecânicas devido à reação com o betão envolto.

A seção BC é caracterizada pelo aumento das tensões mecânicas entre as nervuras do varão GFRP e o betão envolvente potenciadas pelo aumento do escorregamento do varão. A componente radial das forças de aderência é equilibrada com anéis de tensões de tração desenvolvidos pelo betão envolvente, conforme podemos observar na Figura 2.7. Quando o equilíbrio é desfeito, ou seja, as tensões de tração superam o valor da resistência do betão, desenvolvem-se fendas ao longo do comprimento do varão GFRP.

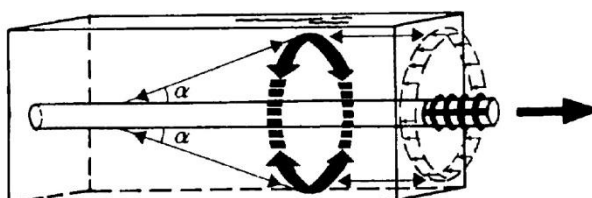


Figura 2.7 - Representação esquemática do equilíbrio dos anéis de tensões de tração com a componente radial das tensões de aderência segundo Tepfers (*apud* [16])

Na secção CD é atingida a tensão de aderência máxima (σ_{\max}), nas condições em que o betão envolvente possui características resistentes que impedem o seu destacamento. Nesta etapa ambas extremidades do varão sofrem deslocamentos e a rigidez da ligação diminui de forma significativa. Existem quatro modos de rotura de ligação que estão relacionados com a resistência à compressão do betão e a resistência ao corte das nervuras dos varões GFRP:

- Destacamento parcial ou total das nervuras superficiais do varão – neste modo as tensões de aderência são controladas pela resistência ao corte das camadas de fibras ou pela resistência ao corte das nervuras dos varões GFRP.
- Rotura do betão por corte – este modo é caracterizado pela rotura do betão junto às nervuras do varão GFRP e as tensões de aderência são reguladas principalmente pela resistência ao corte do betão.
- Modo combinado – este modo resulta da combinação dos modos anteriores e ocorre para níveis intermédios de resistência do betão
- “Aperto”- o varão sofrer um aperto (do inglês “squeeze through”) por parte do betão devido á sua baixa resistência na direção radial. Neste caso a resistência da ligação entre os dois materiais é garantida pela fricção entre a extremidade das nervuras do varão e o betão envolvente. Neste cenário a tensão de aderência está dependente da geometria das nervuras superficiais do varão, da rigidez radial e do confinamento do betão.

A secção DE corresponde à quebra da resistência mecânica entre o betão e as nervuras superficiais do varão, do qual resulta uma diminuição substancial da tensão de aderência até atingir um valor residual (σ_{res}) em que o mecanismo de aderência é controlado exclusivamente pela fricção entre os dois materiais.

2.2.4 Tipologia de ensaios para verificar a aderência entre materiais

Para a verificação das tensões de aderência entre varões GFRP e o betão existem dois tipos de ensaios: ensaios de arrancamento normalizados e ensaios de arrancamento por flexão ou ensaios de viga.

No ensaio de arrancamento, ilustrado na Figura 2.8, o provete é fabricado em moldes cúbicos e o varão a ser ensaiado é colocado segundo o eixo central com as extremidades prolongadas para o exterior do provete. O contato entre o betão e o varão é restringido a um dado comprimento do varão através da colocação de uma mangueira de plástico na restante superfície. O ensaio consiste

na aplicação de forças de tração no varão até que se verifique o escorregamento entre os dois materiais. No decorrer do ensaio são medidos os deslocamentos nas extremidades livre e carregada do varão para cada valor de carga aplicada.

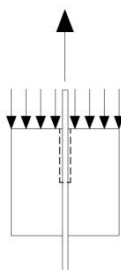


Figura 2.8 – Esquema do ensaio de arrancamento adaptado de [2]

Estes ensaios são caracterizados por um grande recobrimento, pela ausência de flexão nos varões e pelo confinamento conferido pela ação da placa de reação no provete de betão, isto é, o betão que envolve os varões está comprimido. Este tipo de ensaio surge como uma alternativa económica e simples para a avaliação da aderência dos varões e constitui um modelo simplificado para o conceito de ancoragem de varões.

Os ensaios de arrancamento por flexão, vide Figura 2.9, consistem em dois blocos retangulares de betão armado conectados no topo por uma junta metálica e na base por varões GFRP. Neste tipo de ensaios apenas uma parte dos varões encontra-se embebida em cada bloco, enquanto a restante parte encontra-se isolada do betão através da colocação de uma mangueira de plástico envolta nos varões. A viga é carregada quando está assente em dois rolamentos cilíndricos por duas forças iguais aplicadas simetricamente em cada lado da junta metálica através de um sistema hidráulico e são medidos os escorregamentos nas extremidades dos varões para cada carga aplicada pelo sistema [28].

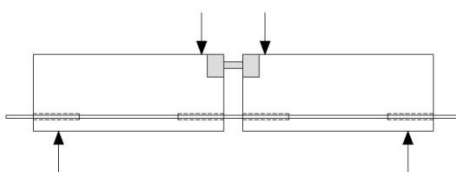


Figura 2.9 - Esquema simplificado de um ensaio de viga adaptado de [28]

Os ensaios de arrancamento por flexão são caracterizados por um menor recobrimento e pelo fato do betão envolvente aos varões estar sob tração originando fissuras sob tensões baixas e uma redução nas tensões de aderência.

Pelas características supracitadas conclui-se que as tensões de aderência obtidas através de ensaios de arrancamento são superiores às obtidas por ensaios de arrancamento por flexão, no entanto, os ensaios de arrancamento por flexão revelam ser mais apropriados para simular o comportamento real de estruturas de betão armado sujeitas à flexão.

2.2.5 Sistema de aperto do varão GFRP

Os trabalhos experimentais realizados ao longo dos últimos anos revelaram alguns problemas no que toca ao sistema de aperto dos varões de GFRP embebidos no betão. Este fato está associado à fraca resistência dos varões a cargas aplicadas transversalmente à direção das fibras, pelo que a área do varão sujeita ao aperto deve ser protegida de maneira a evitar o esmagamento do mesmo. O sistema de aperto deve suportar o varão de forma a evitar a rotura do mesmo na zona de aperto, permitindo que a rotura ocorra numa região fora da área de aperto. De seguida são abordadas algumas soluções adotadas nos diversos estudos experimentais.

No âmbito do seu trabalho experimental, Castro e Carino [10] desenvolveram um sistema eficaz de aperto que permitiu tracionar os varões de forma simplificada e económica para determinar a resistência à tração de varões FRP e o módulo de elasticidade. O sistema encontra-se ilustrado na Figura 2.10 e consiste em introduzir as extremidades do varão em tubos metálicos de forma a que os esforços de corte aplicados na matriz transfiram as forças de tração diretamente para o varão. Após uma campanha de testes, os autores determinaram que uma argamassa de alta resistência constituía a escolha ideal para a matriz devido ao fato de ser um material fluido, ao custo relativamente baixo dos materiais, ao tempo de cura e a alta resistência que é obtida dentro de poucas horas. Adicionalmente, os tubos de aço utilizados constituíam espessura suficiente para evitar a rotura por encurvadura local. Neste método, os varões ficam embebidos no tubo a uma distância de 15 diâmetros, com um espaçamento de 10mm entre a extremidade do varão e o extremo do tubo para facilitar o enchimento do mesmo com argamassa. Finalmente, a extremidade do tubo de aço e o varão ficam envolvidos com fita-cola de forma a conter a argamassa e manter o varão na sua posição inicial.

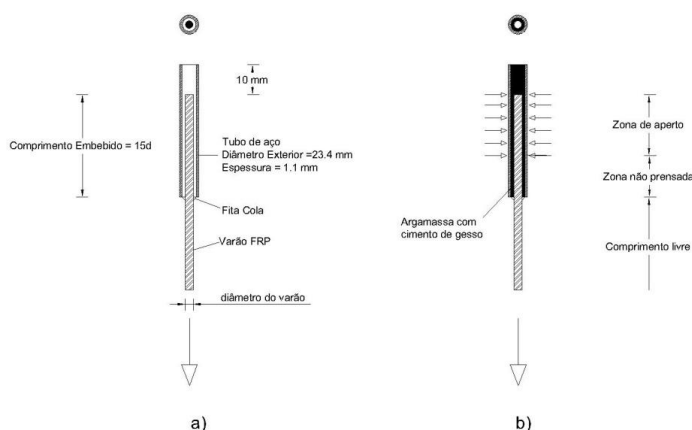


Figura 2.10- Sistema de aperto dos varões: a) antes da introdução da argamassa; b) após a introdução da argamassa com as prensas da máquina de teste; adaptado de [10]

Nos trabalhos de Micelli e Nanni [22] e Kocaoz et al. [20] com o intuito de garantir uma boa ancoragem e alinhamento dos varões para a caracterização das forças de tração desenvolvidas nos varões de FRP, investigaram um sistema que consiste em tubos de aço preenchidos com argamassa expansiva. Neste método, o alinhamento dos varões é assegurado através de tampas de PVC e anilhas de aço furadas na extremidade livre dos tubos como é visível na Figura 2.11, a verticalidade dos varões é certificada através de uma estrutura de madeira. A escolha da espessura dos tubos de aço está relacionada com a pressão desenvolvida pela expansão da argamassa no interior do tubo, que varia consoante o diâmetro interno do tubo. Por esta razão os autores optaram pela utilização de tubos com diferentes espessuras e diâmetros externos.

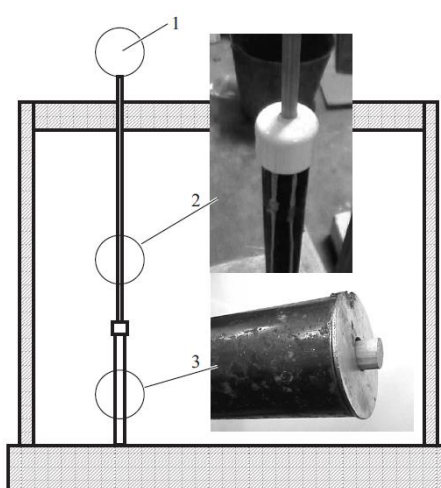


Figura 2.11 - Estrutura de montagem do sistema de aperto de varões FRP: 1- viga de madeira furada; 2- tampa de PVC furada; 3- tubo de aço soldado a uma anilha furada [22]

Outro sistema de aperto para o ensaio de tração de varões FRP foi estudado por investigadores da Universidade de Virgínia nos Estados Unidos da América. Este sistema encontra-se ilustrado na Figura 2.12 e consiste num tubo de aço de 203mm (8 in) de extensão com um diâmetro interno igual ao diâmetro do varão a ensaiar cerrado ao longo da sua extensão em duas peças. As superfícies internas das peças são cobertas com areia e resina epóxi. Posteriormente as peças são fixadas ao varão de FRP até à cura da resina epóxi. Este estudo teve por base ensaio de varões com um comprimento mínimo de 1219mm (48 in). Este sistema difere dos restantes por distribuir as tensões geradas pelo aperto das prensas ao longo de toda a superfície do tubo de aço, evitando a concentração de esforços nas extremidades dos varões a ensaiar [10].

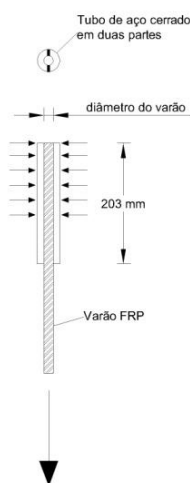


Figura 2.12 - Sistema de aperto com tubo cerrado adaptado de [10]

Nos ensaios de tração realizados no âmbito do trabalho experimental realizado por Santos [25] para a caracterização das propriedades mecânicas dos varões GFRP, foi utilizado um sistema de aperto constituído por um tubo metálico com 200mm de comprimento introduzido nas extremidades do varão de GFRP e preenchido com resina epóxi (Figura 2.13). No entanto os resultados evidenciaram que os valores obtidos experimentalmente não iam de encontro aos apresentados nas tabelas técnicas do fabricante. Segundo o autor, este fato pode ser atribuído à elevada força de aperto nas garras da máquina de teste que acabou por esmagar o tubo metálico e danificar os varões GFRP. Contudo o autor deixa a recomendação para a utilização de um sistema de aperto com um tubo metálico mais resistente ou uma força de aperto menor para a obtenção resultados mais fidedignos.



Figura 2.13 - Varões GFRP com sistema de aperto para ensaio à tração, retirado de [25]

2.3 Parâmetros condicionantes nas tensões de aderência entre o betão e GFRP

As características favoráveis dos varões de GFRP levaram a um aumento significativo de trabalhos experimentais de investigação, nos últimos 20 anos, com o objetivo de estudar a aderência dos varões de GFRP no betão. Foram analisados os trabalhos de Chaallal e Benmokrane (1993), Cosenza et al.(1997), Tighiort et al. (1998), Achillides e Pilakoutas (2004), Esfahani et al. (2005), Lee et al. (2007), Qingduo Hao et al.(2008), Baena et al.(2009) e Soong et al.(2011). Estes trabalhos experimentais constituem ensaios de arrancamento normalizados e por flexão variando uma série de parâmetros que condicionam a aderência de varões GFRP no betão.

2.3.1 Resistência á compressão do betão

Os trabalhos experimentais de Baena et al. [5] e Achillides e Pilakoutas [3] demonstraram que a resistência à compressão do betão influencia o modo de rotura do varão durante o arrancamento. Os autores verificaram que para valores baixos de resistência à compressão do betão, cerca de 15 MPa, o modo de rotura por aderência acontece por esmagamento do betão em contato com as nervuras do varão, neste caso as tensões de aderência do varão GFRP estão diretamente relacionadas com a resistência ao corte do betão, contudo para valores superiores a 30 MPa a rotura acontece nas nervuras presentes nos varões GFRP.

Dentro do mesmo parâmetro Chaallal e Benmokrane [11], no âmbito do seu trabalho com o intuito de investigar a aderência de varões GFRP inseridos em provetes de betão de normal e alta resistência e argamassa de cimento, verificaram que a tensão de aderência de varões GFRP em

betão de alta resistência à compressão (79 MPa) é semelhante aquela verificada para um betão de classe de resistência normal (31 MPa), cerca de 12 MPa.

Já Lee et al. [21] no âmbito do seu estudo experimental para avaliar o comportamento da aderência de varões GFRP ao betão de normal e alta resistência à compressão, constataram que as tensões de aderência dos varões GFRP tendem a aumentar com a resistência à compressão do betão. Os autores constataram que a rotura da ligação entre o betão de classe de resistência normal e o varão GFRP ocorreu devido ao escorregamento da interface entre o betão e a resina, já no betão de classe de resistência superior a rotura ocorreu principalmente pela separação laminar na interface entre a resina e as fibras.

2.3.2 Comprimento Embebido

O trabalho experimental de Chaallal e Benmokrane [11] teve como um dos objetivos a determinação do comprimento de amarração ótimo. Desta forma foram ensaiados 18 provetes com diferentes comprimentos de varão embebido e diferentes diâmetros. Os autores aferiram que o comprimento de amarração ótimo capaz de resistir a cerca de 700 MPa (f_u) é de 20 diâmetros para o betão e 30 diâmetros para argamassa de cimento, o comprimento de amarração ótimo capaz de resistir a cerca de 500 MPa ($0.7 f_u$) é de 10 e 20 diâmetros respetivamente para o betão e argamassa de cimento.

No estudo realizado por Achillides e Pilakoutas [3], foram realizados 131 ensaios de arrancamento com o intuito de avaliar a aderência de varões de FRP ao betão. Os autores verificaram que um aumento no comprimento embebido, diminui a tensão de aderência máxima entre os materiais, este fenómeno, de acordo com os autores, resulta de uma distribuição não linear das tensões de aderência nos varões.

Tighiouart et al. [28], nos ensaios de arrancamento realizados no âmbito do seu estudo experimental verificaram que a força de tração aplicada nos varões GFRP aproxima-se da sua resistência última à tração, à medida que o comprimento embebido do varão GFRP aumenta. Da mesma forma os autores identificaram que os ensaios com menores comprimentos embebidos de varão GFRP tendem a desenvolver maiores tensões de aderência.

2.3.3 Diâmetro do varão

Em 1998, Tighiouart et al. [28] publicaram um artigo no âmbito do seu trabalho experimental com o objetivo de estudar a aderência de varões GFRP e compará-los com os mais tradicionais varões de aço. Os resultados apontaram para uma relação entre as tensões de aderência instaladas nos varões nos ensaios de arrancamento e o diâmetro dos varões, ou seja, os autores concluíram que os varões de menor diâmetro desenvolvem tensões de aderência superiores.

Estas mesmas observações foram verificadas nos estudos de Baena et al. [5] e Achillides e Pilakoutas [3] nos quais confirmam a propensão dos varões com maior diâmetro estarem relacionados com menores forças de aderência. Segundo os autores, são três os fatores responsáveis pelas tensões de aderência inferiores, são eles: o comprimento embebido de varão, o efeito de Poisson, e o efeito “*shear lag*”. Achillides e Pilakoutas [3] referem que para maiores diâmetros são necessários maiores comprimentos embebidos de varão resultando em tensões de aderência menores, o efeito de Poisson pode levar a uma pequena redução do diâmetro do varão como resultado das tensões longitudinais, esta redução aumenta com o tamanho do varão. Quanto ao efeito “*shear lag*” os autores explicam que quando um varão de GFRP é tracionado, existe a possibilidade de ocorrerem deslocamentos diferenciais entre as fibras do núcleo e as fibras superficiais, que resultam na distribuição não uniforme das tensões normais ao longo da seção transversal do varão, a diferença entre estas tensões são tanto maiores quanto maior for o diâmetro do varão e diminuem as tensões de aderência.

2.3.4 Posição do varão no molde

Em 2005, Esfahani et al. [15] apresentaram os resultados de um estudo experimental baseado na aderência de varões GFRP inseridos em provetes de betão normalmente vibrado e betão auto compactado. Os ensaios de arrancamento consistiam em provetes com três varões GFRP embebidos no topo, meio e base do provete e a betonagem foi realizada no plano paralelo ao dos varões. Os autores concluíram que a relação entre a aderência dos varões inferiores para os varões superiores foi de 1.29 para o betão normalmente vibrado, e de 1.51 para o betão auto compactado. Segundo os mesmos a diferença entre as tensões de aderência entre os varões no topo do provete e na base estão relacionadas com a reduzida resistência à compressão do betão no topo do provete, esta característica está relacionada com o assentamento do betão fresco após a betonagem. Da mesma forma os autores verificaram que a aderência dos varões localizados na parte inferior do provete não difere consoante o tipo de betão, no entanto, este cenário não se verifica para os

varões de topo, em que as tensões de aderência desenvolvidas são inferiores no betão auto compactado.

Tighiouart et al. [28] no âmbito do seu estudo experimental realizou ensaios de arrancamento com três varões embebidos no betão (topo, meio e base) e verificaram que o efeito de varão de topo observável nos varões de aço também se verifica para os varões GFRP, tendo a relação entre os varões de topo e varões de base variado entre 1.09 e 1.32, no entanto os autores recomendam um fator de 1.30 para o efeito de varão de topo.

No estudo de Chaallal e Benmokrane [11] foi também analisado o efeito da posição do varão GFRP no provete através de ensaios de arrancamento em provetes prismáticos com varões GFRP colocados no topo e base do provete. Os autores obtiveram um valor médio de 1.23 e 1.18 para o fator de modificação² no betão de normal e alta resistência respetivamente. Através da análise de diversos diâmetros os autores concluíram que o fator de modificação aumenta com o diâmetro dos varões GFRP.

2.3.5 Material do varão

O estudo realizado por Tighiouart et al. [28] evidencia que os varões de GFRP mostraram menores tensões de aderência quando comparadas com os varões de aço, este fato está relacionado com a diferente forma da superfície de cada tipo de varão. No caso do aço o mecanismo de resistência mecânica é o principal componente da aderência, contrariamente ao GFRP em que os mecanismos de adesão e de atrito são os grandes responsáveis pelo desenvolvimento das tensões de aderência.

Achillides e Pilakoutas [3] no seu estudo para determinar o comportamento de aderência de varões FRP ao betão verificaram que os varões de GFRP e CFRP desenvolveram cerca de 72% das tensões de aderência verificadas para os varões de aço. Da mesma forma verificaram que os varões AFRP desenvolveram cerca de 85% das tensões de aderência verificadas para os varões de GFRP e CFRP. No entanto, os autores alertam para o fato das percentagens não terem em conta a resistência à compressão do betão. Este fator, segundo os autores, possui alguma importância devido à influência da resistência do betão, ou seja, enquanto que no varão de aço as tensões de aderência tendem a diminuir na presença de um betão de baixa resistência (cerca de 30 MPa), este cenário já não acontece nos varões FRP, em que as tensões de aderência mantêm-se.

² Relação entre as forças de arrancamento nos varões colocados na base do provete para os colocados no topo do provete

Em 2009, o estudo de Baena et al. [5] num trabalho experimental destinado a verificar a aderência de varões de CFRP, GFRP e aço ao betão. Foram realizados 88 ensaios de arrancamento e foram medidos os escorregamentos numa das extremidades livres dos varões. Os resultados demonstraram aos autores que os escorregamentos associados aos varões de GFRP foram superiores aos escorregamentos verificados para os varões de CFRP, esta observação está relacionada com o fato do módulo de elasticidade do GFRP constituir cerca de metade do módulo de elasticidade do CFRP. Outra observação, relacionada com o material do varão, está associada à rigidez inicial verificada nos varões de aço, ou seja, os autores observaram que para forças de tração baixas, o escorregamento entre os varões de aço e o betão é nulo, contrariamente aos varões FRP em que o escorregamento pode ser registado imediatamente após a aplicação de forças de tração.

2.3.6 Tipo de superfície dos varões

Em 1997, Cosenza et al. [13] compilaram os resultados experimentais de diversos autores com o objetivo de melhor compreender os mecanismos de aderência e a influência do tratamento superficial no comportamento de aderência entre varões FRP e o betão. Os resultados evidenciaram que os varões de FRP com tratamento superficial têm melhor comportamento de aderência face aos varões lisos. Segundo os autores este comportamento é explicado pelo fato do tratamento superficial aumentar a fricção relativamente aos varões lisos, potenciando as interligações mecânicas resultando num melhor comportamento de aderência.

No ano de 2008, Quigduo et al. [17] realizaram um trabalho experimental para estudar a aderência de varões nervurados GFRP ao betão de resistência normal. Através de ensaios de arrancamento, os autores analisaram as curvas de aderência-escorregamento, de maneira a determinar a geometria ideal para as nervuras do varão, nomeadamente a altura e espaçamento. Os resultados mostraram aos autores que o espaçamento ideal de nervuras corresponde ao valor do diâmetro dos varões e que a altura ótima das nervuras corresponde a 6% do diâmetro do varão.

Em 2009, o estudo de Baena et al. [5] demonstrou que o tratamento superficial dos varões tem influência no comportamento da aderência nos casos em que a rotura não acontece pelo betão. Os autores analisaram a geometria superficial dos quatro tipos varões GFRP e verificaram que a maior tensão de aderência foi observada no varão GFRP com superfície helicoidal e sem revestimento de areia, este fato pode ser atribuído ao valor superior de a_s^3 . Nos restantes varões GFRP ensaiados,

³ Rácio entre o espaçamento das nervuras e a área transversal do varão

os autores referem que as baixas tensões de aderência estão relacionadas com a baixa resistência mecânica associada a um menor a_s . Por último, os autores constataram que o tratamento superficial adquire maior importância na presença de um betão de alta resistência, pois num betão de alta resistência a rotura acontece na superfície do varão.

Em 2011 Soong et al. [26] realizaram um trabalho experimental de maneira a compreender as contribuições dos três mecanismos responsáveis pela aderência no arranque de varões de GFRP, efetuando uma correlação com as características da superfície dos varões. Para tal foram realizados ensaios de arrancamento, utilizando 6 tipos de varões de GFRP: 3 tipos de varões com diferentes espaçamentos entre nervuras, varões sem nervuras, varões revestidos com areia e varões lisos. Os resultados demonstraram aos autores que a resistência mecânica associada às nervuras dos varões varia consoante a resistência ao corte da interface varão-nervura, das dimensões das nervuras, do espaçamento entre nervuras, do número de nervuras e está limitado à resistência ao corte ou compressão do betão. Relativamente aos varões revestidos com partículas de areia, a resistência mecânica varia em função da rugosidade da superfície do varão e está limitado à resistência ao corte da ligação entre as partículas de areia e o varão. Por último a resistência à fricção está relacionada com a rugosidade superficial do varão e pode variar durante o carregamento devido ao corte sucessivo das nervuras ou partículas de areia. Os autores concluem que a resistência à adesão é o principal mecanismo que contribui para as tensões de aderência, enquanto que os outros dois mecanismos contribuem para a força de arrancamento do varão.

2.4 Equações relativas à tensão de aderência e comprimento de amarração nos códigos de dimensionamento

O aumento exponencial de estudos e trabalhos científicos relacionados com as estruturas de betão armado com GFRP levou à publicação de variados documentos elaborados por entidades internacionais. No Japão a “Japan Society of Civil Engineers” [19] publicou em 1997 um conjunto de normas, recomendações, especificações e metodologias de ensaios para a construção com materiais reforçados com fibras (FRP). Nos Estados Unidos da América, o “American Concrete Institute” criou o regulamento ACI 440-1R [1] que fornece recomendações para o dimensionamento e construção de estruturas reforçadas com FRP. Em 2000 a “Canadian Standards Association” publicou o “Canadian Highway Bridge Design Code” [9] que inclui um capítulo

exclusivo com diretrizes e requisitos para o dimensionamento de elementos estruturais que usam polímeros reforçados com fibras (FRP) como armadura principal.

Nos seguintes subcapítulos é apresentada a abordagem que os três códigos de dimensionamento supracitados fazem ao cálculo do comprimento de amarração. O Anexo A apresenta a aplicação das metodologias de cada código de dimensionamento a um caso prático, possibilitando uma análise comparativa entre as diferentes abordagens.

2.4.1 ACI 440-1R

O método de cálculo apresentado no ACI 440-1R [1] estabelece o equilíbrio entre as tensões de aderência desenvolvidas ao longo da superfície do varão e as forças transmitidas pelas armaduras, como podemos observar na equação [2.1].

$$l_e \pi d_b f_b = A_{f,bar} f_{fu} \quad [2.1]$$

Em que,

- l_e – comprimento do varão embebido (m);
- d_b – diâmetro do varão (mm);
- $A_{f,bar}$ – área do varão (mm²);
- f_b – tensão desenvolvida no varão FRP sujeito a forças de tração (MPa).

A tensão máxima desenvolvida ao longo do varão obtém-se através da equação [2.2] em que a tensão é limitada ao valor da resistência última à tração do varão.

$$f_{fe} = \frac{0.083 \sqrt{f_c'}}{\alpha} \left(13.6 \frac{l_e}{d_b} + \frac{C}{d_b} \frac{l_e}{d_b} + 340 \right) \leq f_{fu} \quad [2.2]$$

Em que,

- α – coeficiente relacionado com as condições de aderência e com a posição do varão durante a betonagem (o valor adotado por defeito é 1.0, no entanto para alturas de betonagem superiores a 300 mm deve ser adotado o valor de 1.5);
- f_c' – resistência à compressão do betão (MPa);
- C – representa o menor valor entre a distância da superfície do betão e o centro do varão e metade do espaçamento entre o centro dos varões solicitados (mm).

A equação [2.3] representa o comprimento de amarração para varões retos e nas condições em que $20d_b < l_d < 100d_b$ e $\frac{C}{d_b} \leq 3.5$.

$$l_d = \frac{\alpha \frac{f_{fr}}{0.083\sqrt{f'_c}} - 340}{13.6 + \frac{C}{d_b}} d_b \quad [2.3]$$

Em que,

f_{fr} – representa o menor valor entre a resistência à tração do varão (f_{fu}) e a tensão desenvolvida ao longo do varão (f_{fe})

Devido à redução do fator de resistência quando comparado com o aço, o comprimento de amarração para as armaduras positivas nos pontos de inflexão e apoios simples deve ser calculado de acordo com a equação [2.4].

$$l_d \leq \frac{\phi M_{Rd}}{V_{sd}} + l_a \quad [2.4]$$

Em que,

M_{Rd} – momento fletor resistente da seção (kN.m);
 V_{sd} – esforço transversal atuante (kN);
 l_a – comprimento de amarração além do centro do apoio (m). É o maior valor das profundidades efetivas do betão ou $12 d_b$

O valor de M_{Rd}/V_{sd} pode ser incrementado em 30% quando as extremidades das armaduras de reforço estão confinadas por uma reação compressiva.

No caso de varões dobrados o ACI apresenta a equação [2.5] para o comprimento de amarração de varões dobrados a 90°.

$$l_{bhf} = \begin{cases} 165 \frac{d_b}{\sqrt{f'_c}}, \text{ para } f_{fu} \leq 520 \text{ MPa} \\ \frac{f_{fu}}{3.1} \frac{d_b}{\sqrt{f'_c}}, \text{ para } 520 < f_{fu} < 1040 \text{ MPa} \\ 330 \frac{d_b}{\sqrt{f'_c}}, \text{ para } f_{fu} \geq 1040 \text{ MPa} \end{cases} \quad [2.5]$$

Os valores obtidos pela equação [2.5] não devem ser inferiores a $12 d_b$ ou 230 mm, igualmente para evitar rotura frágil por corte na zona da dobra o raio da dobra não deverá ser inferior a $3 d_b$.

Esta metodologia para o cálculo do comprimento de amarração está diretamente relacionada com as propriedades inerentes ao tipo de material do varão, diâmetro do varão, fator de localização do varão, resistência à compressão do betão e distância dos varões à superfície do betão.

2.4.2 CSA-S6 Canadian Highway Bridge Design Code

O código de dimensionamento “Canadian Highway Bridge Design Code” (CHBDC) [9], da “Canadian Standard Association” remete-nos para a abordagem na qual o comprimento de amarração característico de um varão FRP sob forças de tração é calculado através da equação [2.6]. Esta equação é utilizada exclusivamente para comprimentos de amarração superiores a 250 mm.

$$l_d = 0.45 \frac{k_1 k_4}{(d_{cs} + K_{tr} \frac{E_{frp}}{E_s})} \frac{f_{fu}}{f_{cr}} A \quad [2.6]$$

Onde,

- k_1 – fator de localização da barra;
- k_4 – fator de superfície do varão;
- f_{fu} – resistência à tração no Estado Limite Último (MPa);
- f_{cr} – resistência média do betão à tração (MPa);
- d_{cs} – menor distância entre a superfície mais próxima de betão e o centro do varão (mm);
- K_{tr} – índice de reforço transversal (mm);
- E_{frp} – módulo de elasticidade do varão de FRP (MPa);
- E_s – módulo de elasticidade do aço (MPa);
- A – área da secção transversal do varão FRP (mm²).

O fator de localização do varão (k_1) está relacionado com a altura de betão abaixo dos varões que são solicitados, sendo que para alturas superiores a 300mm este fator deverá tomar o valor de 1.3 e para os restantes casos, o valor de 1.0. O parâmetro da superfície do varão (k_4) está associado ao rácio entre as tensões de aderência do varão FRP e de um varão de aço com a mesma secção transversal, este valor não deverá ser superior a 1 e, na falta de dados experimentais, deve ser tomado o valor de 0.8. O índice de armadura transversal pode ser calculado utilizando a equação [2.7].

$$K_{tr} = 0.45 \frac{A_t f_y}{10.5 s n} \quad [2.7]$$

Onde,

- A_t – área da secção transversal do estribo usado como reforço transversal (mm²);
- f_y – tensão de cedência do aço (MPa);
- s – espaçamento máximo entre varões utilizados para armadura transversal (estribos) dentro do comprimento de amarração (mm);
- n – número de varões solicitados ao longo do potencial plano de arrancamento do varão.

Contudo, o termo da equação [2.6] $(d_{cs} + K_{tr} \frac{E_{frp}}{E_s})$ não deverá ser superior a 2.5 diâmetros.

A metodologia apresentada pela norma canadiana para o cálculo do comprimento de amarração assenta principalmente nos seguintes parâmetros: tipo de material do varão FRP, recobrimento, confinamento do betão e localização do varão.

2.4.3 Japan Society for Civil Engineering (JSCE)

O código de dimensionamento desenvolvido pelo JSCE [19] em 1997 para estruturas de betão reforçadas com fibras apresenta a seguinte abordagem relativamente ao comprimento de amarração.

O comprimento de amarração pode ser calculado usando a equação [2.8], nas condições em que a rotura pela quebra da ligação entre o betão e as armaduras de FRP é previsível, no entanto não deverá ser inferior a 20 diâmetros.

$$l_d = \alpha_1 \left[\frac{f_{fu}}{4f_{bod}} \right] d_b > 20d \quad [2.8]$$

Em que,

- α_1 – fator que tem em conta a armadura transversal;
- f_{bod} – tensão de aderência de cálculo do betão (MPa);

A tensão de aderência do betão pode ser obtida através da equação [2.9] e está restringida a tensões de aderência inferiores a 3.2 MPa.

$$f_{bod} = \alpha_2 \left(\frac{0.28f_c'^{\frac{2}{3}}}{\gamma_c} \right) < 3.2 \text{ MPa} \quad [2.9]$$

Em que,

- γ_c – coeficiente parcial de segurança do betão;
- α_2 – fator que relaciona as tensões de aderência entre o aço e o GFRP.

O fator parcial de segurança do betão está relacionado com a resistência à compressão do betão, assume o valor de 1.3 para betões cujo valor característico da resistência à compressão é inferior a 50 MPa e assume o valor 1.5 para os restantes casos. O parâmetro α_2 deverá tomar o valor de 1 nos casos em que as tensões de aderência verificadas nos varões GFRP são iguais ou superiores às verificadas nos varões de aço e deverá ser verificado experimentalmente para os restantes casos, devendo no entanto ser inferior à unidade. O fator α_1 pode ser obtido tendo em conta a Tabela 2.1, o valor k_c pode ser obtido através da equação [2.10].

$$k_c = \frac{C}{d_b} + \frac{(15 \times A_t) E_t}{s \times d E_s} \quad [2.10]$$

Em que,

E_t – módulo de elasticidade do varão utilizado como reforço transversal (GPa);

Tabela 2.1 - Valor para o fator k_c

α_1	k_c
1.0	≤ 1
0.9	$1.0 < k_c < 1.5$
0.8	$1.5 < k_c < 2.0$
0.7	$2.0 < k_c < 2.5$
0.6	> 2.5

O termo $\frac{15A_t}{s \times d}$ representa o efeito da armadura transversal. Para os casos em que o modo de rotura seja do tipo arrancamento, o comprimento de amarração deverá ser obtido e verificado experimentalmente.

Quando o reforço com varões de FRP é colocado a 300 mm do topo da superfície do betão e numa direção com um ângulo inferior a 45° com a direção horizontal, o comprimento de amarração obtido na equação [2.8] deverá ser majorado por um fator de 1.3.

Uma análise mais atenta das equações propostas pelo código de dimensionamento do JSCE revela que o comprimento de amarração está diretamente relacionado com o recobrimento de betão, tipo de reforço, resistência à compressão do betão e confinamento do betão (armadura transversal).

Capítulo 3. Programa Experimental

3.1 Séries Experimentais

O programa experimental é constituído por dois tipos de ensaios. O primeiro consiste no arrancamento de varões GFRP do betão com diferentes comprimentos embebidos de betão, com o intuito de determinar o ótimo comprimento de ancoragem. O segundo trata do arrancamento de varões GFRP de diferentes diâmetros para verificação das tensões de aderência instaladas no betão.

No caso dos ensaios com longo comprimento de ancoragem foram construídos 18 provetes 200x200 mm² com uma altura de 750mm para a realização 6 séries de ensaios, de acordo com o procedimento utilizado no estudo de Chaallal e Benmokrane de 1993 [11]. Três séries são realizadas utilizando varões GFRP normalizados e as restantes três séries são realizadas usando varões GFRP com cabeça de ancoragem. As séries com varões normalizados são constituídas por ensaios de varões com três comprimentos de varão embebidos distintos (250, 500 e 750mm). Nas series com varões GFRP com cabeça de ancoragem apenas são ensaiados provetes com dois comprimentos embebidos de varão (250 e 500mm).

Para a realização dos ensaios de arrancamento com curto comprimento de ancoragem, conforme o código de dimensionamento da ACI 440-3R [2], foram construídos 18 provetes cúbicos 200x200x200 mm³ de betão C30/37 para a realização de 6 séries de ensaios, cuja variável está assente no diâmetro e no material do varão.

3.2 Materiais utilizados

3.2.1 Betão

O betão utilizado no âmbito do programa experimental corresponde ao betão auto-compactável de classe de resistência C30/37. Este foi preparado em laboratório e a sua composição encontra-se descrita na Tabela 3.1. Devido ao número de provetes a serem betonados, a betonagem ocorreu em 3 fases. Foram criados provetes de controlo com as mesmas condições de betonagem e cura dos provetes de ensaio.

Estes provetes de controlo foram submetidos a ensaios de compressão uniaxial para determinar a sua resistência à compressão, de acordo com a norma portuguesa NP EN 12390-3 de 2011 [23].

Tabela 3.1 - Composição do betão autocompactável C30/37

Componente	Quantidade	
Água	186	l
Cimento	337	kg/m ³
Cinzas	103	kg/m ³
Agregados finos	974	kg/m ³
Agregados grossos	863	kg/m ³
Plastificantes	5.58	l
Superplastificantes	2.61	l

Os resultados dos ensaios de compressão uniaxial encontram-se na Tabela 3.2, estes ensaios foram realizados em cubos e em cilindros. Contudo o Eurocódigo 2 [14] apresenta uma relação entre os valores obtidos experimentalmente em provetes cúbicos e provetes cilíndricos, segundo o qual os resultados obtidos nos provetes cilíndricos representam cerca de 80% dos resultados para os provetes cúbicos. Tal não se verificou nestes provetes de controlo em que as tensões de rotura observadas nos cilindros representam mais de 80% do valor registado nos cubos.

Tabela 3.2 -Características mecânicas do betão aos 28 dias

Amostra	Data de fabrico	Cubos (MPa)		Cilindros (MPa)		Módulo Elasticidade (GPa)	
1ª Betonagem	24/06/2013 11h	45.1		38.4		29.2	
		36.6	41.2	34.2	37.1	28.3	28.2
		42.0		38.7		27.0	
2ª Betonagem	24/06/2013 14h	47.0		43.2		26.3	
		53.5	48.1	45.0	44.5	28.8	27.9
		43.8		45.2		28.6	
3ª Betonagem	16/07/2013 11h	46.7		40.5		28.4	
		53.2	47.6	40.8	40.4	23.9	27.0
		42.9		39.9		28.7	

3.2.2 Varão GFRP

Os varões GFRP utilizados nos ensaios foram fornecidos pelo fabricante *Schoeck* e são constituídos por uma superfície nervurada (Figura 3.1). Para fins comparativos foram utilizados dois tipos de varões, varões retos (Figura 3.1) e varões com cabeça de ancoragem (Figura 3.2).



Figura 3.1 - Gama de varões GFRP ensaiados



Figura 3.2 - Varão GFRP com cabeça de ancoragem

Estes varões foram disponibilizados nos diâmetros de 12, 16 e 25mm e dotados de um sistema de aperto de forma a resistir às forças impostas pelas garras da máquina de tração, conforme distinguido na Figura 3.3. As propriedades descritas pelo fabricante, no respetivo catálogo [12], são apresentadas na Tabela 3.3.



Figura 3.3 - Sistema de aperto nos varões GFRP

Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas especificadas pelo fabricante

Diâmetro (mm)	Diâmetro Exterior (mm)	Peso Específico (kg/m)	Resistência à tração média (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
12	13.5	0.30	1350	60
16	18.0	0.53	1200	60
25	27.0	1.22	1100	60

Realizaram-se ensaios para determinar as propriedades mecânicas e geométricas dos varões GFRP. Para a obtenção das propriedades mecânicas foram realizados ensaios de tração dos varões, segundo a norma ACI 440.3R-04 [2], para obtenção da tensão de rotura (f_{tu}) e o módulo de elasticidade (E_{GFRP}). Para o registo da extensão do varão ao longo do ensaio foi utilizada a técnica de vídeo-extensometria (Figura 3.4), esta técnica consiste na medição, através do vídeo-extensómetro, do alongamento ocorrido entre dois pontos previamente estabelecidos a uma distância conhecida. Este sistema foi adotado como forma de prevenir possíveis danos no equipamento, visto que a rotura por tração do GFRP resulta num processo destrutivo, ver Figura 3.5.



Figura 3.4 - Utilização do vídeo-extensómetro para ensaio de tração do varão GFRP



Figura 3.5 - Rotura por tração do varão GFRP

Desta forma, a Figura 3.6 representa a relação tensão-extensão da gama de diâmetros de varões GFRP ensaiados. Adicionalmente apresenta-se em Anexo B diagramas mais detalhados referentes a cada um dos diâmetros ensaiados.

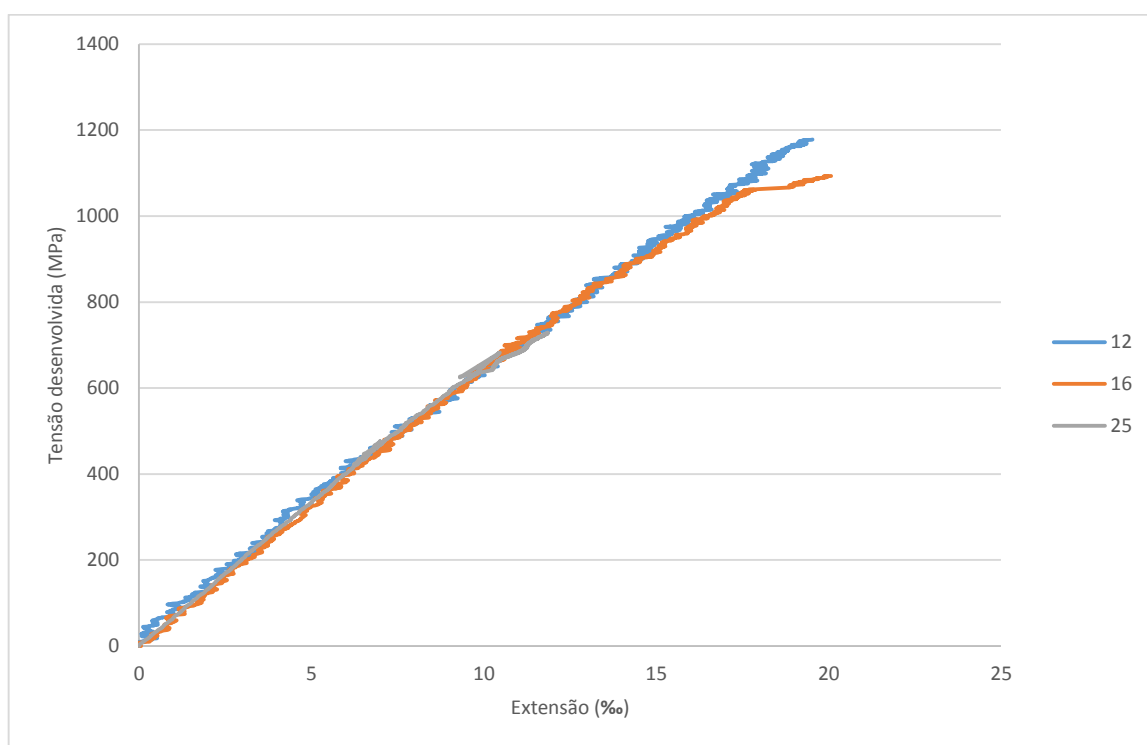


Figura 3.6 - Diagrama tensão-extensão para os varões GFRP ensaiados

A Tabela 3.4, surge como complemento ao diagrama apresentado anteriormente, apresentando valores concretos, que, na sua maioria, vão de encontro aos especificados pelo fabricante. Exceção feita ao varão de diâmetro 25mm. Este fato deveu-se principalmente ao esmagamento da zona de aperto. Neste caso particular, o sistema de aperto do varão não foi suficiente para suportar as forças transmitidas pelas garras da máquina ao varão, originando uma rotura prematura do varão na zona de aperto.

Tabela 3.4 - Propriedades mecânicas obtidas experimentalmente

Diâmetro Nominal (mm)	Resistência à tração (MPa)		Módulo de elasticidade (GPa)		Extensão última (‰)	
12	949.59		61.79		15.37	
	1315.26	1200.56	61.27	61.77	21.47	19.44
	1336.82		61.26		21.47	
16	1051.71		66.58		15.80	
	1013.69	1094.65	60.71	62.32	16.70	17.64
	1218.55		59.68		20.42	
25	777.13		59.27		13.11	
	610.90	728.83	68.70	64.31	8.89	11.43
	798.46		64.96		12.29	

3.2.3 Varão de Aço

Em toda a campanha experimental foram igualmente utilizados varões de aço com o intuito de servirem como referência, permitindo uma análise comparativa entre os diferentes materiais. Para os ensaios de arrancamento foram utilizados três diâmetros distintos de 12, 16 e 25mm, ver Figura 3.7, os varões de diâmetro 12, 16 e 25mm são constituídos por um aço A500. Da mesma forma, nos ensaios de arrancamento com longo comprimento de ancoragem, foram utilizados varões de aço A500 com o diâmetro de 12mm.



Figura 3.7 – Série de varões de aço para ensaio de tração



Figura 3.8 - Ensaio de tração pura para o varão D16

Para a determinação das propriedades mecânicas dos varões de aço foram realizados ensaios de tração de acordo com a norma NP EN ISO 6892-1 [24] de 2012, como demonstra a Figura 3.8. Nos quais foram ensaiados três varões com o mesmo diâmetro de forma a obter os valores médios para a tensão de cedência (f_y), a tensão de rotura (f_u) e o módulo de elasticidade (E_s). Os resultados obtidos nestes ensaios encontram-se na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Propriedades mecânicas dos varões de aço

Diâmetro nominal (mm)	Tensão de cedência (MPa)		Tensão de rotura (MPa)		Módulo de elasticidade (GPa)	
12	622.8		721.1		212.5	
	605.2	602.8	698.0	701.0	211.4	216.2
	580.3		684.0		224.7	
16	614.2		719.1		208.7	
	618.2	609.1	720.1	711.3	208.8	211.0
	594.8		694.8		215.5	
25	583.1		680.6		226.8	
	623.9	604.5	728.3	705.0	215.7	216.6
	606.3		706.1		207.2	

3.3 Preparação dos ensaios

3.3.1 Preparação dos provetes de ensaio

3.3.1.1 Preparação dos varões

Na preparação dos varões de GFRP para os ensaios houve um cuidado especial de forma a evitar o esmagamento do varão na zona de aperto. Após o estudo de soluções para sistemas de aperto realizado no subcapítulo 2.2.5, adotou-se um sistema de aperto semelhante ao realizado por Castro e Carino [10] na sua campanha experimental.

Foi pensado um sistema de duas cantoneiras soldadas nas extremidades para criar um tubo de seção quadrada, vide Figura 3.9 e Figura 3.10, com largura e espessura variável consoante o diâmetro do varão a que se destina, como demonstra a Tabela 3.6. A razão da não utilização de um tubo está relacionada com os condicionalismos do mercado regional, isto é, os tubos disponíveis apresentam espessura insuficiente pelo que são facilmente esmagados pelas garras da máquina de ensaio.

A ligação entre o varão GFRP e o tubo é materializada pelo preenchimento do espaço com uma resina epóxi com elevadas propriedades resistentes, estas propriedades podem ser consultadas no Anexo B. Adicionalmente dotou-se as paredes das cantoneiras de pontos de solda que melhoram a aderência entre os dois materiais, pois adicionam rugosidade à superfície interior da cantoneira.

Esta solução permite que o tubo resista aos esforços provocados pelas garras da máquina de tração, ao mesmo tempo que evita o esmagamento do varão GFRP.



Figura 3.9 – Cantoneiras individuais com pontos de solda



Figura 3.10 – Conjunto de cantoneiras soldadas nas extremidades

Tabela 3.6 – Especificações do sistema de aperto adotado

Diâmetro do varão	Largura da cantoneira (mm)	Espessura das paredes (mm)	Altura da cantoneira (mm)	Tipo de aço
12	35	3	200	S275
16	40	5	200	S275
25	50	5	200	S275

O procedimento de colocação do varão GFRP no tubo de secção quadrada consiste na seguinte metodologia:

- Limpeza e remoção de detritos das superfícies em contato com a resina epóxi, com intuito de melhorar a aderência aço-resina (Figura 3.11);
- Preenchimento do tubo com resina epóxi (Figura 3.12);
- Colocação de negativos em espuma rígida de poliestireno extrudido numa das extremidades do tubo, com objetivo de centrar o varão no interior do tubo ao mesmo tempo que impede o vazamento de resina pela mesma extremidade (Figura 3.13);
- Introduzir o tubo no varão aplicando uma rotação no sentido das nervuras, para que a resina preencha os espaços entre as nervuras do varão;
- Colocação na restante extremidade de um suporte para garantir estabilidade e centralidade do varão durante o tempo de cura da resina epóxi (Figura 3.14).



Figura 3.11 – Gama de tubos de seção quadrada utilizados nos diferentes diâmetros ensaiados



Figura 3.12 – Colocação da resina no interior do tubo



Figura 3.13 – Sistema de suporte do tubo



Figura 3.14 – Vista geral da aplicação do sistema de aperto nos provetes prismáticos

Para a preparação dos varões a utilizar nos ensaios de arrancamento com curto comprimento de ancoragem, para além do sistema referido em cima, adicionalmente foi colocado um tubo de plástico de maneira a restringir o contato entre o varão e o betão a um comprimento de 5 diâmetros na extremidade não carregada do varão, visível na Figura 3.15 e Figura 3.16, como refere a metodologia de ensaio do ACI 440 3R [2]. Para cada diâmetro utilizou-se tubos de cores distintas para facilitar a identificação dos mesmos. Os varões utilizados nestes ensaios foram cortados em comprimentos de 750mm.

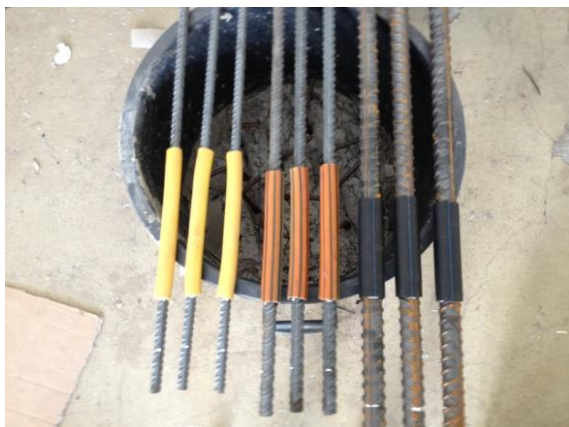


Figura 3.15 – Colocação de tubos de plásticos nos varões de aço



Figura 3.16 – Colocação de tubos de plásticos nos varões GFRP

Os varões utilizados nos ensaios de arrancamento com longos comprimentos de ancoragem não tiveram nenhum tratamento peculiar à exceção do sistema de aperto, visto que os mesmos foram simplesmente embebidos no provete de betão em três comprimentos diferentes. A única diferença está no fato dos varões utilizados nestes ensaios apresentarem um comprimento de 1000mm.

3.3.1.2 Preparação dos moldes, betonagem e cura

Os moldes utilizados para a preparação dos provetes cúbicos e provetes prismáticos foram construídos através de painéis de contraplacado de madeira de 1,25x2,5m². Nos moldes para os provetes prismáticos os painéis foram cortados de forma a comportar dois provetes prismáticos de dimensões 200x200x750 mm³ tal como mostra a Figura 3.17.

Após a construção das caixas foram realizados dois furos numa das faces das caixas de forma a permitir a entrada do varão. Adicionalmente foi criado um sistema de suporte dos varões constituído por tábuas de madeira com pequenos orifícios para garantir um correto nivelamento e estabilidade dos varões durante a betonagem (Figura 3.18).



Figura 3.17 – Moldes para os provetes prismáticos



Figura 3.18 – Sistema de suporte de varões nos provetes prismáticos

A betonagem dos provetes prismáticos ocorreu em duas fases, diferenciadas pela data em que ocorreram. O betão foi transportado da central de betonagem até ao LREC através de camião betoneira e o transporte até aos moldes realizado manualmente, através de carros de mão. Após o enchimento dos moldes, a superfície foi regularizada e os excessos retirados, ver Figura 3.19. Tratando-se de um betão auto-compactável, o processo de compactação tornou-se dispensável.



Figura 3.19 – Enchimento e regularização da superfície dos moldes prismáticos

Os moldes para os provetes cúbicos resultaram da racionalização de alguns painéis de cofragem utilizados para os moldes dos provetes prismáticos. Assim sendo foram construídas quatro caixas para três provetes e três caixas para dois provetes cúbicos totalizando 18 provetes cúbicos. As caixas foram perfuradas nas duas faces laterais para que o varão ficasse embebido no provete com

ambas extremidades salientes do molde. Os varões foram introduzidos nos moldes de acordo com o seu diâmetro garantindo um comprimento de 50mm na extremidade livre do varão. Da mesma forma na outra extremidade foi colocado um tubo de plástico, de forma a restringir o contato entre o betão e o varão a cinco diâmetros, ilustrado nas Figura 3.20 e Figura 3.21.



Figura 3.20 – Varões GFRP D16 inseridos nos moldes



Figura 3.21 – Varões aço D25 inseridos nos moldes

A betonagem dos provetes cúbicos realizou-se numa segunda fase com um betão de características semelhantes ao utilizado nos provetes prismáticos, abordadas no subcapítulo 3.2.1. O transporte do betão foi efetuado através de carros de mão e vertido diretamente nos moldes, com o auxílio de uma pá, e posteriormente corrigida com a ajuda de uma colher de pedreiro para evitar irregularidades e vazios na superfície dos cubos, como demonstram as Figura 3.22 e Figura 3.23.



Figura 3.22 – Enchimento dos moldes com betão



Figura 3.23 – Correção da superfície dos provetes cúbicos

Após a betonagem, a cura dos provetes foi efetuada em local coberto, à temperatura ambiente durante um período de sete dias. Para o processo de cura foi mantida a cofragem e a superfície do betão foi coberta por uma manta de geotêxtil humedecida (Figura 3.24), a fim de evitar a evaporação excessiva de água necessária à hidratação do cimento e a abertura de fissuras na superfície dos mesmos por retração plástica.



Figura 3.24 – Aplicação da manta de geotêxtil durante a cura dos provetes de ensaio

Após os sete dias de cura procedeu-se ao desmolde dos provetes e ao seu armazenamento até à data do ensaio.

3.3.2 Instrumentação e recolha de dados

Os ensaios foram realizados na máquina para ensaios de tração pura com capacidade para 1500kN, com várias configurações no sistema de garras variando consoante o tipo de material do varão objeto de estudo, conforme demonstra a Figura 3.25.

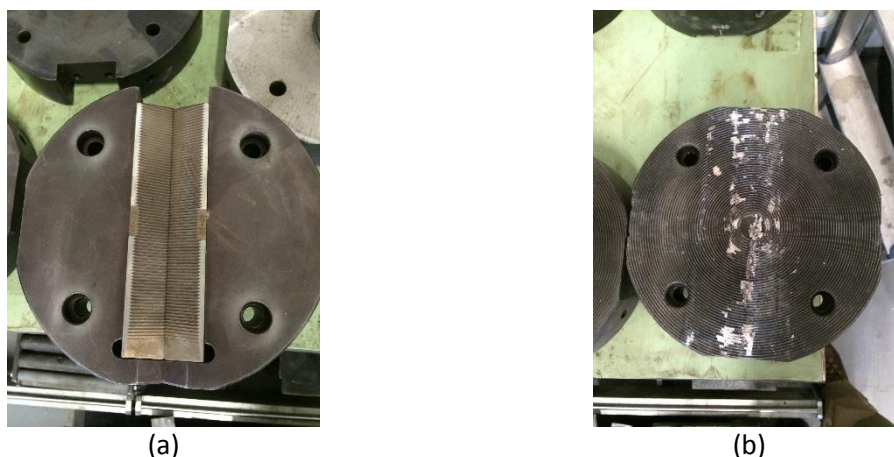


Figura 3.25 - Sistema de garras utilizado para (a) varões de aço e (b) varões GFRP

Nos ensaios de caracterização das propriedades dos varões foi utilizado o extensómetro eletrónico e o vídeo-extensómetro para os varões em aço e GFRP respetivamente. Estes equipamentos foram utilizados como alternativa ao extensómetro existente na máquina de ensaios de tração para uma medição mais rigorosa dos resultados.

Para monitorizar o escorregamento dos varões no ensaio de arrancamento dos provetes cúbicos foram utilizados quatro transdutores de deslocamento ou LVDT (Linear Variable Displacement Transducer). Um LVDT com 100mm de curso foi colocado na extremidade livre e três LVDT de 50mm de curso e precisão de 0.001mm, foram colocados na extremidade carregada do varão. Estes últimos foram colocados de forma a perfazerem ângulos de 120° entre si.

3.3.3 Procedimento experimental

Como foi referido anteriormente, a campanha de ensaio consistiu em dois tipos de ensaio de arrancamento, o ensaio de arrancamento com longo comprimento de ancoragem e o ensaio de arrancamento em provetes cúbicos com curto comprimento de ancoragem. Estes ensaios foram realizados na mesma máquina mas com metodologias e equipamento de monitorização distintos, desta forma apresenta-se as metodologias experimentais adotadas para cada tipo de ensaio.

3.3.3.1 Ensaio de arrancamento com longo comprimento de ancoragem

O ensaio de arrancamento com longo comprimento de ancoragem é caracterizado pelo longo comprimento embebido de varão. A Figura 3.26 ilustra os três comprimentos embebidos (250, 500 e 750mm) nos provetes para cada diâmetro de varão ensaiado.

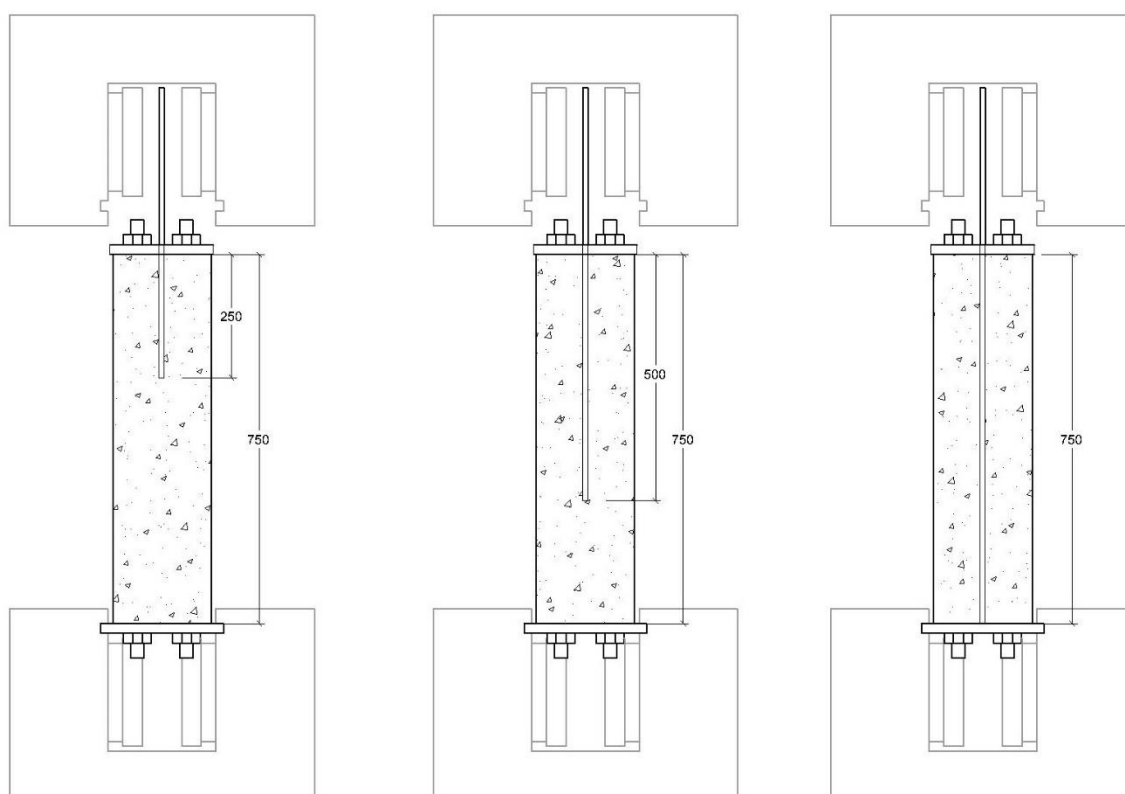


Figura 3.26 - Esquema simplificado do ensaio de arrancamento com longo comprimento de ancoragem

Um esquema mais detalhado encontra-se ilustrado na Figura 3.27, e é constituído por duas placas maciças de aço perfuradas de forma a alojar quatro varões roscados responsáveis pela transmissão dos esforços aplicados no provete de ensaio à máquina de teste. Adicionalmente a placa de aço superior contém um furo adicional com intuito de permitir a passagem do sistema de aperto utilizado nos varões GFRP.

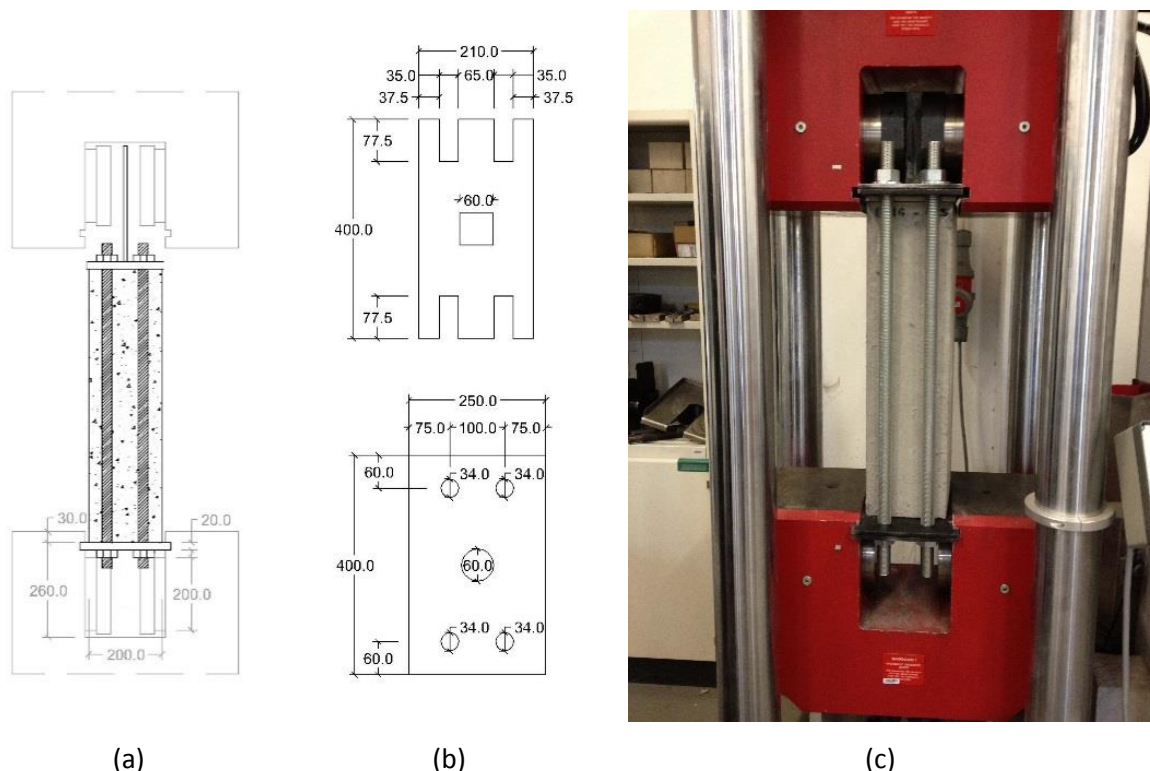


Figura 3.27 – Ensaio arrancamento com longo comprimento de ancoragem: (a) corte representativo, (b) planta da chapa superior e inferior e (c) ensaio real

Para este tipo de ensaios foi adotado o procedimento utilizado no estudo de Chaallal e Benmokrane de 1993 [11]. O procedimento experimental é composto por duas fases, a primeira fase é constituída pela montagem do sistema de suporte e a segunda fase corresponde à realização do ensaio. A montagem do sistema de suporte abordado anteriormente é de extrema importância, no sentido em que garante ao provete de ensaio estabilidade e confinamento, características essenciais à correta transmissão de esforços aplicados no varão até à máquina de ensaio. Outra particularidade desta fase do processo experimental é a adequação das garras da máquina de ensaio ao material do varão a ensaiar.

A máquina de ensaios de tração pura é provida de um sistema de garras que permite o aperto adequado aos varões de aço que são alvo do ensaio. Atendendo que na campanha de ensaio que trata a presente dissertação os varões a estudar são de natureza diferente, tornou-se necessário substituir as garras *standard* (Figura 3.25(a)) por garras com superfície de atrito (Figura 3.25(b)) que permitem alojar o sistema de aperto dos varões GFRP, ficando toda a superfície lateral do dito sistema em contato com a superfície das garras.

O ensaio tem início através da imposição de um deslocamento às garras superiores de 1.1 mm/min até a rotura do provete. Toda a informação fica registada pelo *software* do equipamento, inclusive a força máxima exercida ao provete de ensaio. Antes da conclusão do ensaio é deveras importante reconhecer o tipo de rotura ocorrido para posterior tratamento dos dados. Toda a metodologia abordada está cronologicamente descrita no fluxograma apresentado na Figura 3.28.

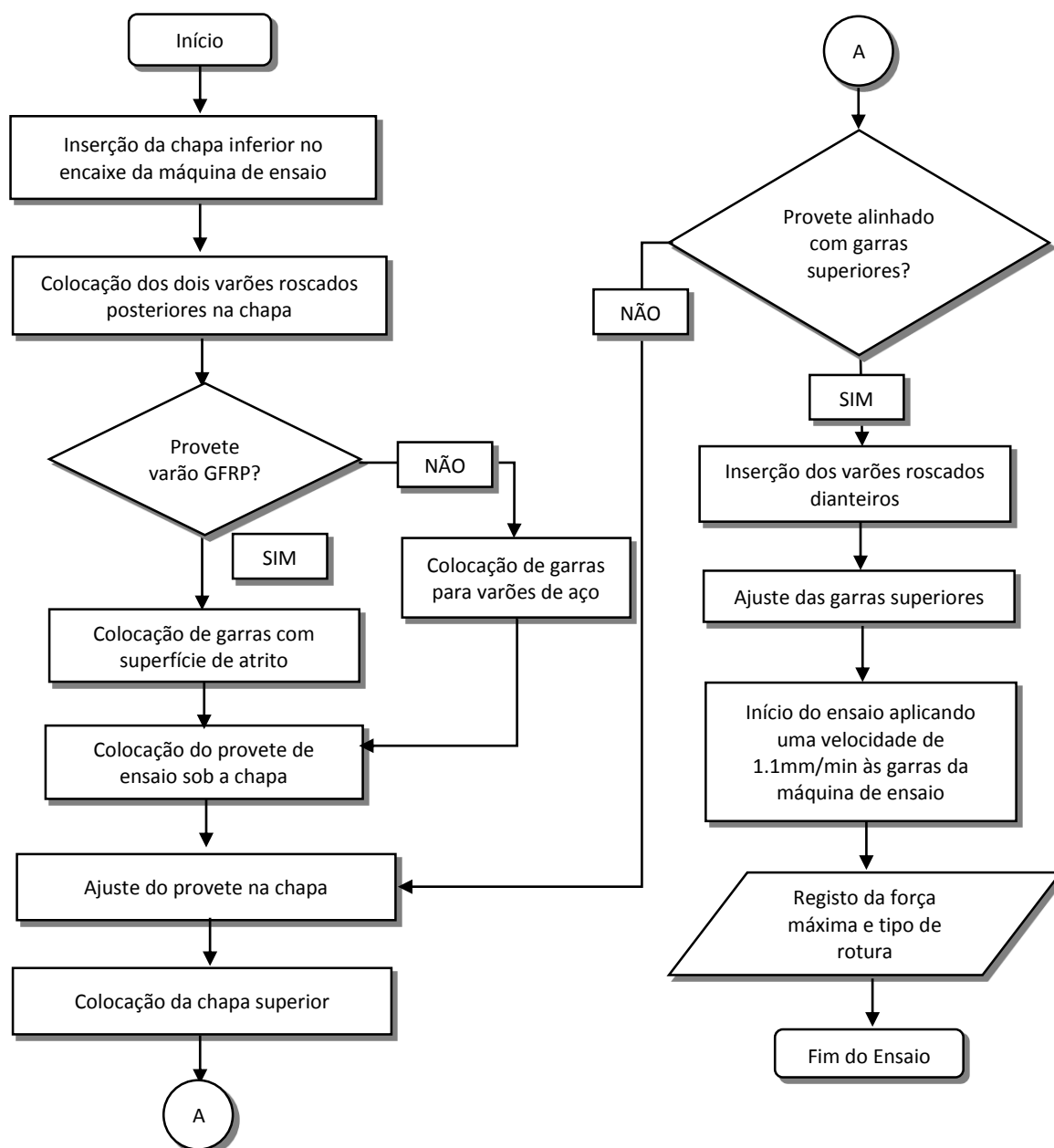


Figura 3.28 - Fluxograma do procedimento experimental do ensaio para testar o comprimento de ancoragem

3.3.3.2 Ensaio de arrancamento com comprimento de ancoragem curto

Apesar do comprimento embebido ser menor (5 diâmetros), o ensaio de arrancamento possui características muito semelhantes ao ensaio descrito no subcapítulo anterior, nomeadamente no que toca à montagem de todo o aparato experimental. O esquema do ensaio de arrancamento pode ser observado na Figura 3.29 e Figura 3.30. Este foi projetado de forma a otimizar o uso dos elementos utilizados no ensaio referido anteriormente. Todavia os varões que fazem a ligação entre as duas chapas sofreram uma diminuição no seu comprimento de maneira a alojar os provetes cúbicos.

O sistema de suporte do provete opera no mesmo sentido que o anterior, ou seja, a chapa superior constitui reação às forças de tração impostas ao provete, esta reação é transmitida à chapa inferior através dos varões que as interligam, a chapa inferior por sua vez transfere as cargas à máquina de ensaio.

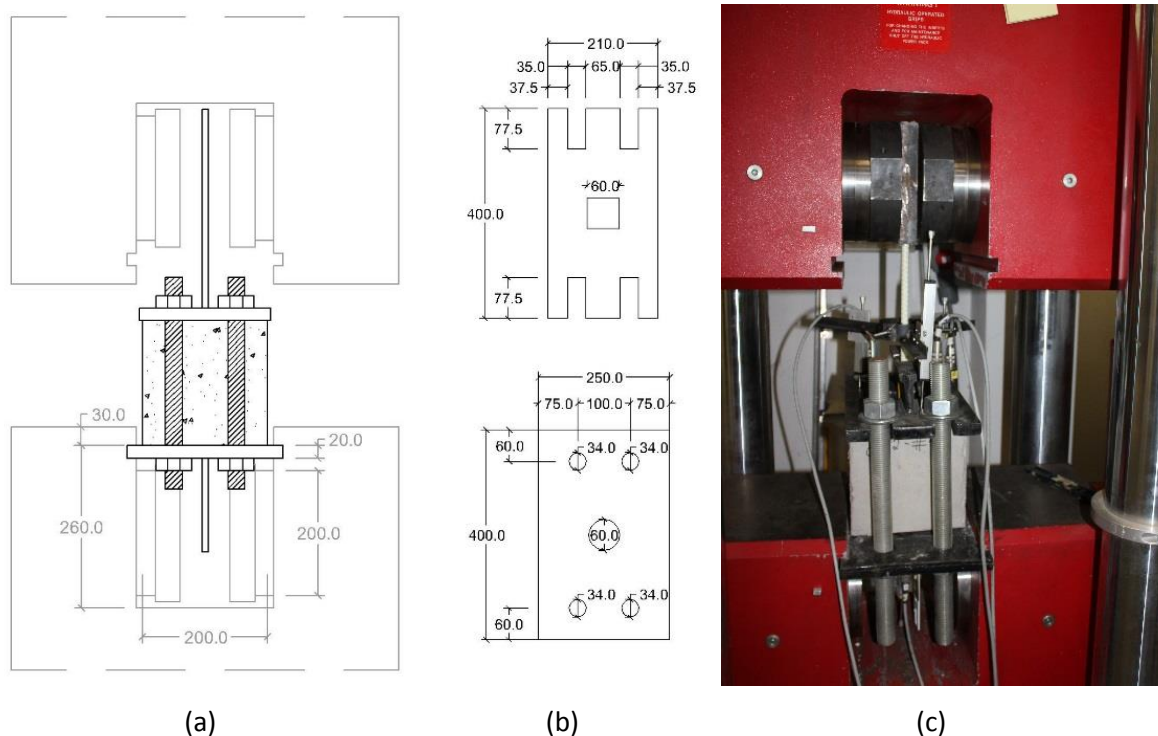


Figura 3.29 – Ensaio arrancamento com curto comprimento de ancoragem incluindo (a) corte representativo, planta da chapa superior e inferior e (c) ensaio real

A metodologia experimental adotada foi adaptada do código de dimensionamento da ACI 440-3R [2] e está assente em duas etapas, a etapa de montagem do aparato experimental e o ensaio de arrancamento.

A junção dos elementos do sistema de suporte ao ensaio é realizado de forma idêntica ao ensaio para testar o comprimento de ancoragem, com a particularidade da montagem dos aparelhos de instrumentação. Este ensaio tem a singularidade de ser monitorizado por dois tipos de equipamento de monitorização.

As forças aplicadas no varão são monitorizadas pela célula de carga existente na máquina de ensaio, os deslocamentos em ambas extremidades do varão são controlados por meio de aparelhos LVDT, três LVDT colocados na extremidade carregada (Figura 3.31(a)) e um LVDT na extremidade livre (Figura 3.31(b)), conforme indicado no esquema da Figura 3.30.

A instalação dos aparelhos de medição está prevista na primeira etapa do aparato experimental, juntamente com a montagem do sistema de suporte. A colocação destes aparelhos é efetuada após o correto posicionamento do provete a fim de evitar leituras incorretas associadas à flexão do varão a ensaiar.

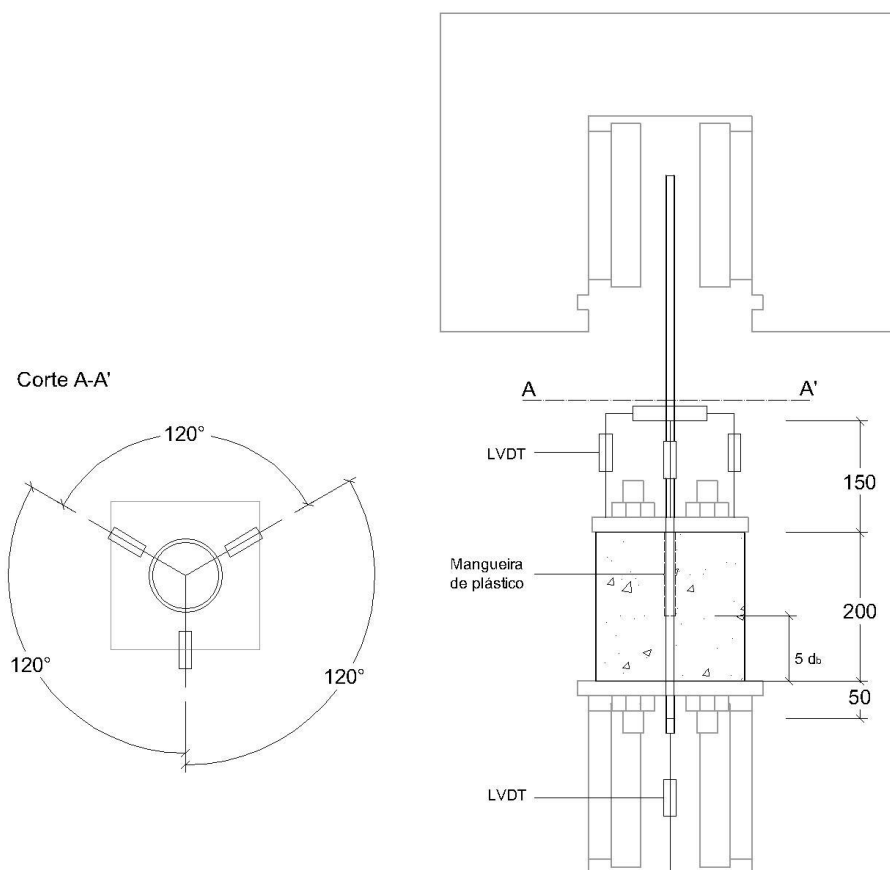
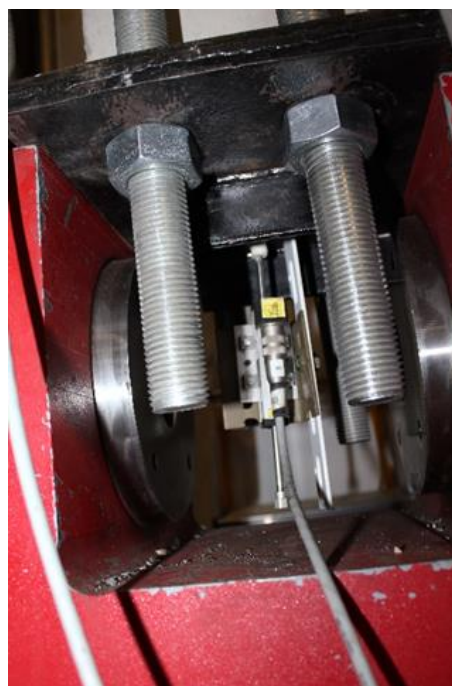


Figura 3.30 - Esquema do ensaio de arrancamento com curto comprimento de ancoragem

Após a montagem do esquema de ensaio tem início a etapa do ensaio de arrancamento, esta etapa começa com a medição e registo da distância entre a superfície superior do comprimento embebido e o ponto de fixação do conjunto de aparelhos LVDT na extremidade carregada do varão (Figura 3.31(a)) para posterior tratamento de dados. Segue-se a aplicação de um deslocamento nas garras superiores a uma taxa de 1.1 mm/min, simultaneamente efetuar um registo da força aplicada e os valores obtidos pelos LVDT, em ambas extremidades do varão.



(a)



(b)

Figura 3.31 - Colocação do sistema de LVDT na (a) extremidade carregada e (b) extremidade livre do varão

O ensaio dá-se por concluído na ocorrência de uma das seguintes condições: rotura do varão, destacamento do betão envolvente ou a verificação do escorregamento de 25 mm ocorrido na extremidade carregada do varão. Todas as etapas do protocolo experimental do ensaio de arrancamento encontram-se organizadas no fluxograma da Figura 3.32.

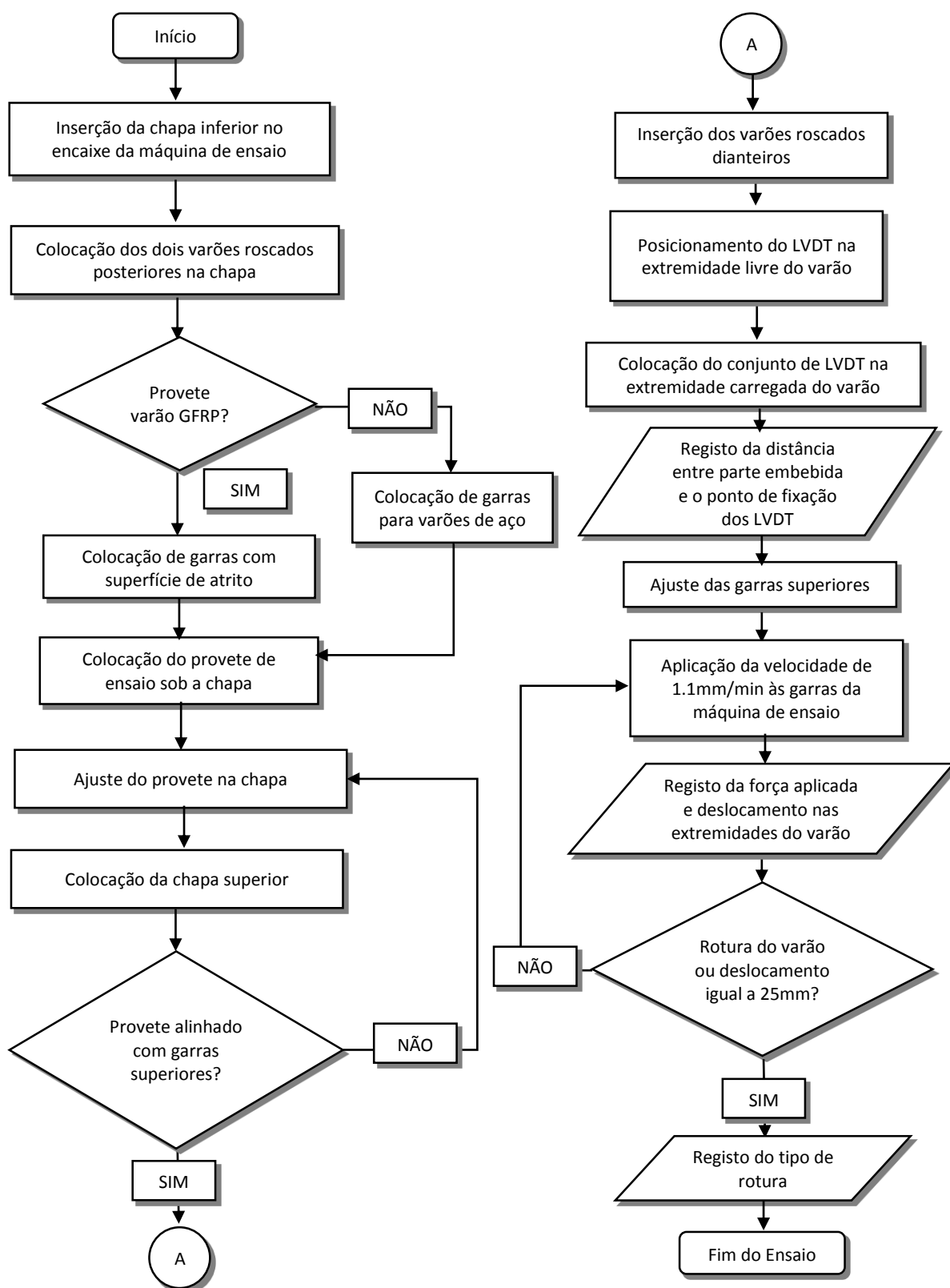


Figura 3.32 - Fluxograma do procedimento experimental para o ensaio de arrancamento

Capítulo 4. Apresentação e Análise dos Resultados Experimentais

Neste capítulo são apresentados os resultados dos dois tipos de ensaio realizados, os ensaios de arrancamento com diferentes comprimentos ancorados e os ensaios de arrancamento normalizado com ambas extremidades do varão expostas.

No primeiro tipo de ensaio os resultados constituem a força máxima registada pelo equipamento na rotura e o tipo de rotura por aderência. Nos ensaios de arrancamento normalizados são apresentados gráficos que relacionam as tensões de aderência com o escorregamento registado pelos instrumentos de recolha de dados.

4.1 Ensaio de arrancamento com longo comprimento de ancoragem

Foram realizados 18 ensaios de arrancamento com o objetivo de compreender o comportamento dos varões GFRP quando embebidos em provetes prismáticos de betão.

Desta forma foram idealizados provetes de $200 \times 200 \times 750 \text{ mm}^3$ (Figura 4.1), com varões embebidos a 250, 500 e 750mm. Realizou-se 3 séries de 3 ensaios com varões retos GFRP (diâmetros 12, 16 e 25mm), 3 séries de dois ensaios de varões com cabeça de ancoragem e 1 série de 3 ensaios com varões retos em aço (diâmetro 12mm) de forma a constituir um valor referência. Procedeu-se ao estudo de alguns parâmetros chave, incluindo o tipo de material constituinte, o diâmetro nominal e a existência de cabeça de ancoragem nos varões.



Figura 4.1 - Provetes prismáticos para o ensaio de arrancamento com longo comprimento de ancoragem

De encontro ao que foi descrito anteriormente, optou-se por utilizar uma nomenclatura para classificar cada tipo de provete ensaiado, exposta no esquema da Figura 4.2.

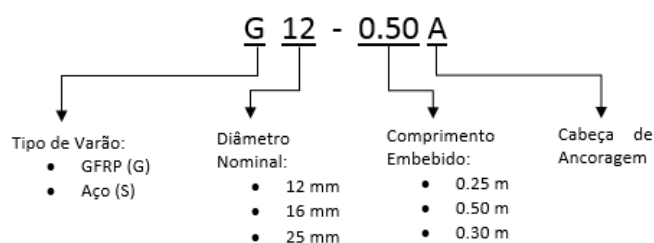


Figura 4.2 – Esquema da terminologia utilizada nos provetes prismáticos

Apesar de estar previsto o ensaio dos provetes com comprimento embebido de 750mm, tal não foi possível, visto que os provetes prismáticos não asseguravam o confinamento necessário para que o varão desenvolvesse as tensões necessárias para observar os fenómenos de escorregamento e rotura do varão. Os provetes com os varões embebidos a 750mm foram cortados no comprimento de 300mm, conforme explicito na Figura 4.3. Esta operação tornou possível observar o arrancamento do varão sem ocorrer destacamento do betão.



Figura 4.3 – Operação de corte do provete prismático

4.1.1 Previsão dos resultados

Neste subcapítulo pretende-se demonstrar, para os ensaios de arrancamento com longos comprimentos de ancoragem, os valores previstos através dos valores característicos apresentados nos catálogos do fabricante, bem como por valores apresentados por diversos autores nos respetivos trabalhos experimentais.

Estes valores foram calculados através da equação [2.1], que estabelece o equilíbrio das forças desenvolvidas ao longo do varão e a tensão de rotura do varão à tração. Da mesma forma é possível prever o tipo de rotura por aderência que ocorrerá no varão ensaiado. Estes dados encontram-se reunidos na Tabela 4.1

Tabela 4.1 – Previsão do tipo de rotura por aderência nos ensaios de arrancamento com longo comprimento de ancoragem

d_b (mm)	f_b^4 (MPa)	l_e (mm)	$F_{compemb}$ (KN)	A_{fbar} (mm ²)	f_{fu} (MPa)	F_u (KN)	OBS
25	6	750	353.43	490.87	1100	539.96	Arrancamento
		500	235.62				Arrancamento
		250	117.81				Arrancamento
16	11	750	414.69	201.06	1200	241.27	Rotura
		500	276.46				Rotura
		250	138.23				Arrancamento
12	9	750	254.47	113.10	1350	152.68	Rotura
		500	169.65				Rotura
		250	84.82				Arrancamento

Os valores atribuídos às tensões de aderência (f_b) correspondem a valores médios obtidos no catálogo do fabricante e através de ensaios de arrancamento realizados por diversos autores. Desta forma é possível calcular as forças desenvolvidas ($F_{compemb}$) ao longo do comprimento embebido do varão (l_e). De igual forma é possível calcular as forças necessárias à rotura por tração do varão GFRP (F_u), através da tensão de rotura (f_{fu}) e área transversal do varão (A_{fbar}). Finalmente o tipo de rotura por aderência pode ser previsto nas seguintes condições: quando a força desenvolvida ao longo do comprimento embebido do varão é inferior à força de rotura por tração ocorre o fenómeno de arrancamento do varão no betão, em caso contrário, ocorre a rotura do varão por tração.

⁴ Valores consultados no trabalho experimental de Baena et al. [5]

4.1.2 Resultados experimentais

Os resultados experimentais dos ensaios estão sumarizados na Tabela 4.2, bem como o tipo de rotura por aderência observado. Nesta tabela f_c refere-se à resistência à compressão dos provetes cúbicos de controlo retirados de cada betonagem, F_{max} constitui a força máxima registada durante o ensaio e f_{max} a tensão máxima equivalente, são também apresentados dados como o tipo de rotura e a betonagem correspondente ao provete ensaiado.

Os tipos de rotura observados encontram-se explicados no subcapítulo 2.2.1 e estão relacionados com as componentes tangenciais e radiais das forças de aderência na interface varão-betão durante a solicitação do varão.

Tabela 4.2 – Resultados experimentais relativos aos provetes prismáticos

Ensaio	Betonagem	f_c	F_{max}	f_{max}	Tipo de rotura
		(MPa)	(KN)	(MPa)	
G12-0.25	2ª (24-06-13t ⁵)	48.1	112.24	992.43	Arrancamento
G12-0.50	2ª (24-06-13t ⁵)	48.1	151.66	1340.95	Rotura
G12-0.30 ⁶	1ª (24-06-13m ⁷)	41.2	90.99	804.52	Arrancamento
G16-0.25	2ª (24-06-13t ⁵)	48.1	127.71	635.18	Destacamento
G16-0.50	2ª (24-06-13t ⁵)	48.1	140.85	700.53	Destacamento
G16-0.30 ⁶	1ª (24-06-13m ⁷)	41.2	163.02	810.81	Arrancamento
G25-0.25	2ª (24-06-13t ⁵)	48.1	-	-	-
G25-0.50	2ª (24-06-13t ⁵)	48.1	124.81	254.26	Destacamento
G25-0.30 ⁶	1ª (24-06-13m ⁷)	41.2	175.58	357.68	Arrancamento
G12-0.25A	1ª (24-06-13m ⁷)	41.2	109.65	969.53	Arrancamento
G12-0.50A	3ª (16-07-13)	47.6	155.89	1378.36	Arrancamento
G16-0.25A	3ª (16-07-13)	47.6	110.45	549.31	Destacamento
G16-0.50A	3ª (16-07-13)	47.6	116.42	579.04	Destacamento
G25-0.25A	3ª (16-07-13)	47.6	113.94	232.12	Destacamento
G25-0.50A	3ª (16-07-13)	47.6	315.32	642.36	Destacamento
S12-0.25	3ª (16-07-13)	47.6	80.88	715.10	Rotura
S12-0.15 ⁶	3ª (16-07-13)	47.6	67.67	598.29	Arrancamento
S12-0.10 ⁶	3ª (16-07-13)	47.6	35.19	311.15	Destacamento

⁵ Betonagem realizada no período da tarde

⁶ Os provetes com esta denominação representam provetes que foram posteriormente cortados

⁷ Betonagem realizada no período da manhã

Os resultados evidenciaram que após atingirem o carregamento máximo, os varões exibiram diferentes tipos de rotura por aderência. O arrancamento do varão foi verificado na maioria dos provetes ensaiados, onde foi possível observar o esmagamento do betão entre as nervuras do varão (Figura 4.4). Este fenómeno é indicador de uma boa aderência entre o betão e o varão GFRP devido à resistência ao corte das nervuras superficiais do varão.



Figura 4.4 – Esmagamento do betão nos espaços entre as nervuras

A rotura do varão foi verificada em dois ensaios, em que o comprimento embebido constituiu ancoragem necessária para que o varão desenvolvesse a sua tensão última (Figura 4.5). Por outro lado, a perda de aderência por fenómenos de destacamento do betão foi verificada igualmente em grande parte dos ensaios (Figura 4.6). Este fenómeno está relacionado com a propagação de fendas criadas pela solitação das nervuras do varão ao betão, quando o betão não garante resistência na direção radial. Estas fendas ao atingirem a superfície destacam a camada de betão, e o provete exibe uma perda de resistência súbita.



Figura 4.5 - Rotura do varão GFRP D12



Figura 4.6 - Fenda originada pela rotura da aderência por destacamento de betão do provete com varão GFRP D16 embebido a 500mm

4.1.3 Tensão desenvolvida – Deslocamento das garras

4.1.3.1 Varões Retos

A relação entre as tensões desenvolvidas pelo varão e o deslocamento das garras da máquina de ensaio pode ser verificada nos gráficos da Figura 4.7. Os valores facultados pela máquina de ensaio dizem respeito ao deslocamento das garras superiores, denominado por posição, e às tensões registadas pela célula de carga contida na máquina.

Através dos gráficos é possível identificar o tipo de rotura ocorrida no provete, isto é, a rotura por destacamento de betão e a rotura do varão por tração podem ser facilmente identificadas através de uma perda repentina de tensão após atingido o pico máximo de tensão. Por outro lado, as roturas por arrancamento são reconhecidas através de perdas mais subtis da tensão desenvolvida pelo varão, após alcançar a tensão máxima.

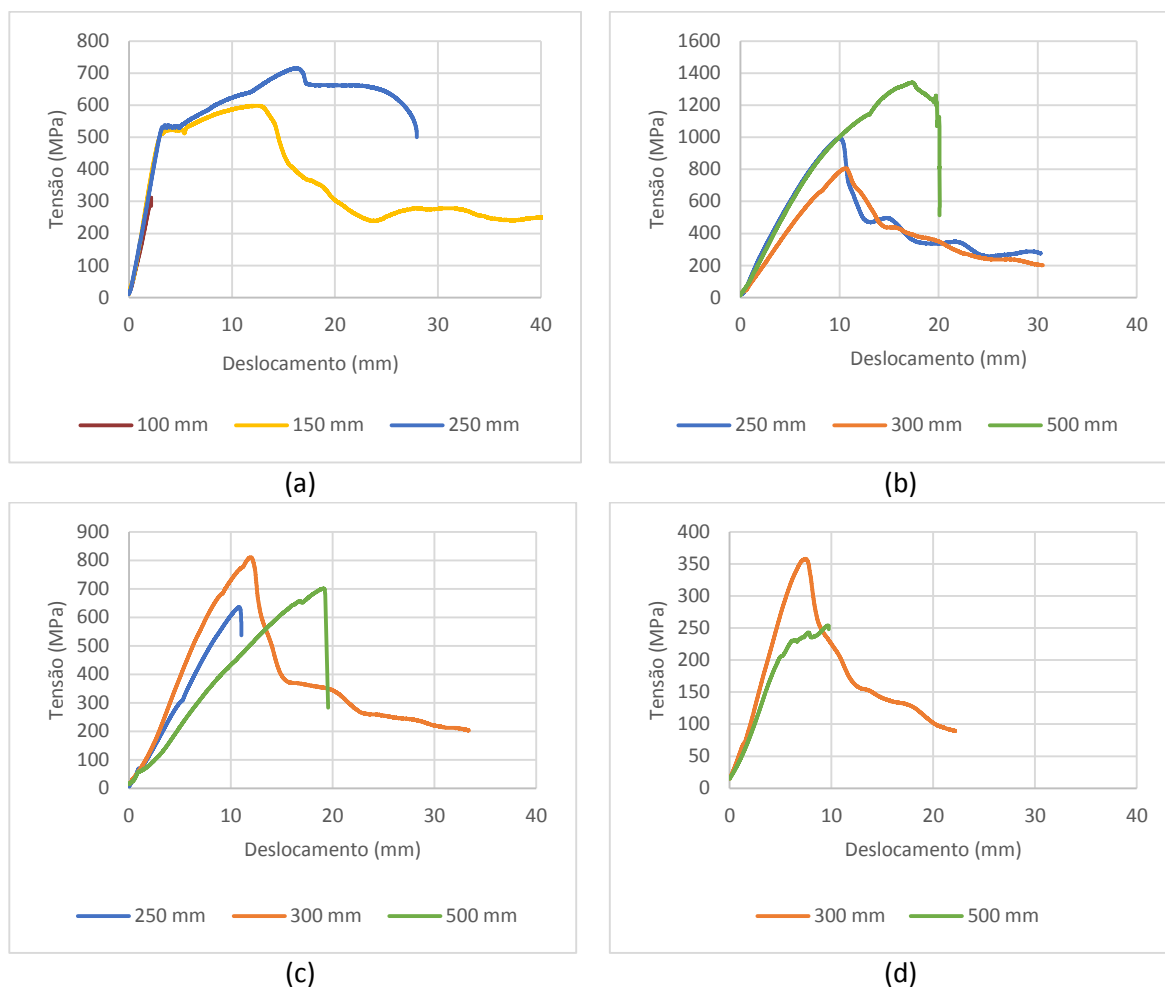


Figura 4.7 – Relação entre as tensões desenvolvidas e a posição das garras da máquina de ensaio para (a) o varão de aço de 12mm, (b) o varão GFRP de 12 mm, (c) o varão GFRP de 16mm e (d) o varão GFRP de 25mm

Uma primeira análise demonstra que os varões GFRP de menores diâmetros desenvolvem tensões mais elevadas, quando sujeitos a esforços de tração pura. Por outro lado, quando comparado com um varão de diâmetro semelhante de aço (Figura 4.7(a)), os varões GFRP de 12mm (Figura 4.7(b)) desenvolvem uma tensão de rotura cerca de 53% superior.

Outra constatação está relacionada com o comprimento embebido dos varões. Para um varão do mesmo diâmetro, quanto maior o comprimento embebido no betão, maior são as tensões desenvolvidas no varão (Figura 4.8).

No caso particular do varão GFRP de 12 mm quando o comprimento embebido aumenta de 250 para 500mm as tensões desenvolvidas no varão apresentam um incremento de 35%. O varão reto GFRP de 16mm apresenta um aumento de aproximadamente 9% para um incremento, no comprimento embebido de varão, de 250 para 500mm.

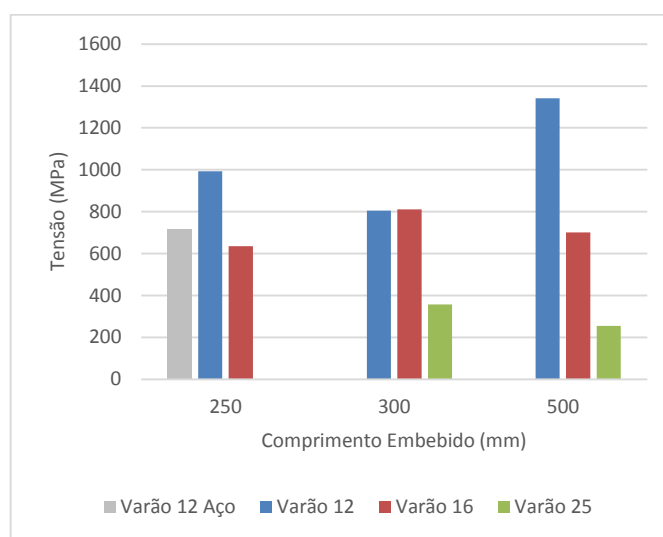


Figura 4.8 – Relação entre as tensões desenvolvidas nos varões retos GFRP e o comprimento embebido no betão

Para esta análise não podemos ter em conta os provetes com varão embebido a 300mm, estes provetes foram obtidos através do corte de provetes com varão embebido a 750mm, ficando uma superfície do varão a descoberto, como demonstra a Figura 4.9. Esta superfície do varão ao estar exposta não contribui para a ancoragem do mesmo no betão, neste caso específico as tensões desenvolvidas no varão são controladas pelas nervuras superficiais ao longo do comprimento embebido do varão.



Figura 4.9 – Extremidade exposta do provete com varão GFRP D25 embebido a 300mm

4.1.3.2 Varões com cabeça de ancoragem

Em relação aos varões com cabeça de ancoragem os resultados encontram-se expressos na Figura 4.10. Neste caso específico para cada diâmetro nominal de varão GFRP foram estudados dois comprimentos de ancoragem, 250 e 500 mm respetivamente. Tal como nos provetes com varões de comprimento de ancoragem reto, são facilmente perceptíveis os modos de rotura através de uma leitura atenta dos gráficos da Figura 4.10. Nesta figura podemos facilmente identificar dois ramos, o ramo pré pico e pós pico. A fase pré pico é facilmente reconhecida pelo aumento substancial da tensão desenvolvida no varão face à posição das garras da máquina de ensaio, a fase pós pico como o próprio nome indica, tem início após atingida a tensão máxima e é caracterizada por uma diminuição da tensão em relação à posição. A diminuição da tensão poderá ser repentina ou demorada consoante o tipo de rotura registado, como já referido anteriormente.

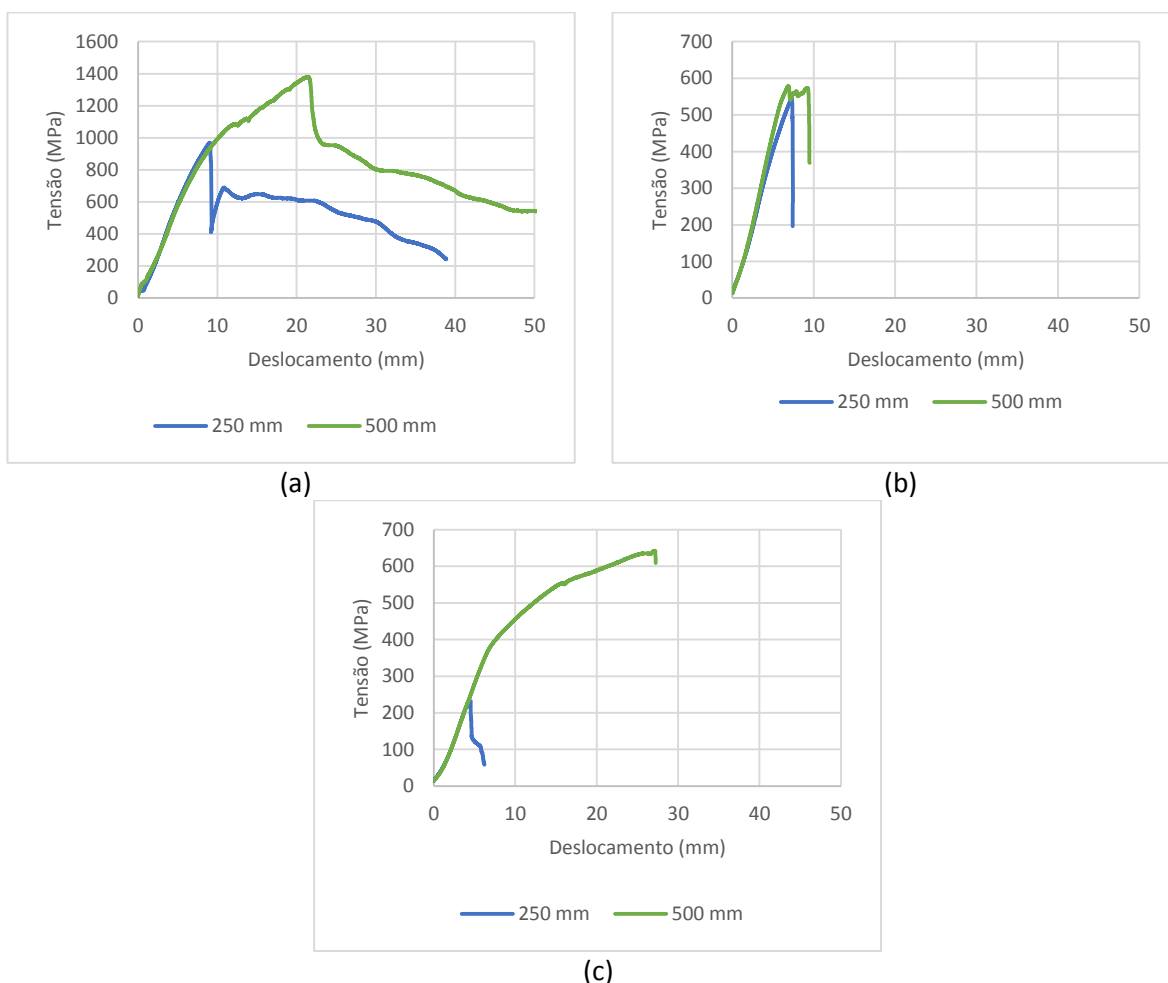


Figura 4.10 – Relação entre as tensões desenvolvidas no varão e o deslocamento para (a) o varão GFRP 12mm, (b) o varão GFRP 16mm e (c) varão GFRP 25mm com cabeça de ancoragem

Os resultados apresentados pela Figura 4.10(a) revelam que em ambos os varões GFRP de 12mm ocorreram roturas do tipo arrancamento. O varão GFRP embebido a 250mm exibiu um comportamento normal na fase pré pico, com aumento exponencial de tensão face à posição das garras da máquina de ensaio.

A fase pós pico apresenta comportamento peculiar, demonstrando uma perda acentuada de tensão, seguida de um aumento relativo de tensão. A perda de tensão está associada à separação da cabeça de ancoragem do varão GFRP. No entanto o ganho temporário de tensão está associado ao arrancamento do varão da cabeça de ancoragem, à medida que as nervuras roçam contra a superfície interna da cabeça de ancoragem originam tensões de fricção (Figura 4.11). As nervuras do varão são arrancadas de uma vez só, dando origem a um varão GFRP liso na zona da cabeça de ancoragem, como demonstra a Figura 4.12.



Figura 4.11 – Cabeça de ancoragem no interior do betão com vestígios das nervuras arrancadas ao varão GFRP D12



Figura 4.12 – Perda da cabeça de ancoragem no betão do varão GFRP D12

O varão GFRP D12 embebido a uma distância de 500 mm no betão exibiu um comportamento semelhante, conseguindo desenvolver uma tensão mais elevada, no entanto o mesmo sofreu uma rotura de aderência por arrancamento. O pico de tensão máxima representa o momento em que o varão destacou-se da cabeça de ancoragem (Figura 4.13).



Figura 4.13 – Destacamento do varão GFRP D12 da cabeça de ancoragem

Os provetes contendo os varões GFRP de 16mm (Figura 4.10(b)) e os provetes com varão GFRP de 25 mm (Figura 4.10(c)) sofreram roturas por destacamento do betão. Este fenómeno pode ser facilmente reconhecido pelo surgimento de fendas verticais em ambas as faces do provete no comprimento que este se encontra inserido no betão, estas fendas ao atingirem a cabeça de ancoragem adquirem horizontalidade, demonstrado pela Figura 4.14.

O surgimento destas fendas é justificado pela ausência de confinamento imposto ao provete perante a solicitação de tensões elevadas, características dos varões de maior diâmetro. Nestes ensaios o fenómeno de rotura da aderência por destacamento do betão esteve igualmente associado ao rompimento da cabeça de ancoragem do betão, visível na Figura 4.15.

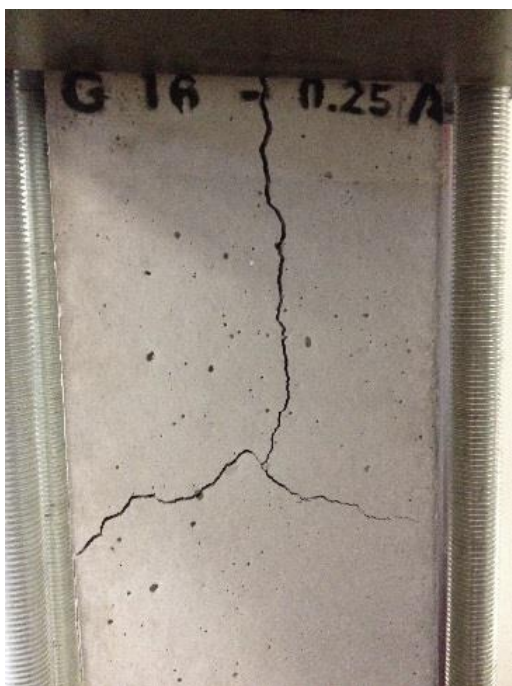


Figura 4.14 – Fendilhação do provete com varão GFRP D16 embebido no betão a 250mm



Figura 4.15 – Rotura da cabeça de ancoragem no varão GFRP D16

Os provetes contendo os varões GFRP de 25 mm exibiram comportamentos distintos no que toca ao seu comprimento embebido. Este fato está relacionado com a colocação de um sistema artesanal de confinamento externo constituído por placas de aço apoiadas entre si com o auxílio de grampos, conforme explicito na Figura 4.16.



Figura 4.16 – Sistema de confinamento externo

O varão GFRP D25 embebido a 250 mm no betão apresentou uma rotura prematura por destacamento do betão (Figura 4.17), associada à falta de confinamento perante as solicitações de um varão deste diâmetro quando submetido a esforços de tração. No entanto no varão GFRP D25

embebido a 500 mm, ao aplicar o sistema externo de confinamento, este possibilitou um aumento de tensão máxima na ordem dos 64%. Apesar do modo de rotura deste provete ter sido destacamento do betão, uma análise ao interior do provete de betão revelou que ocorreu escorregamento do varão no interior da cabeça de ancoragem (Figura 4.18).



Figura 4.17 – Fendilhação do provete com varão GFRP D25 embebido 250mm no betão



Figura 4.18 – Escorregamento do varão GFRP D25 da cabeça de ancoragem

4.1.4 Tensões de aderência

As tensões de aderência desenvolvidas pelos varões ensaiados podem ser calculadas através da equação[4.1], que resulta do equilíbrio de tensões entre as tensões desenvolvidas na superfície do varão embebido no betão e a tensão de rotura do varão.

$$f_b = \frac{A_{f,bar} f_{fu}}{l_e \pi d_b} \quad [4.1]$$

No âmbito dos ensaios realizados, esta tensão de aderência só se verificou para os ensaios cuja rotura por aderência ocorreu por arrancamento. Desta forma as tensões de aderência dos ensaios que reúnem as condições estabelecidas estão reunidos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Tensões de aderência relativas aos ensaios de arrancamento com longo comprimento de ancoragem

Ensaio	Diâmetro do varão (mm)	Material do varão	Cabeça de ancoragem	Comprimento embebido (mm)	Tensão de aderência (MPa)
G12-0.25	12	GFRP	Não	250	11.91
G12-0.30	12	GFRP	Não	300	8.05
G16-0.30	16	GFRP	Não	300	10.81
G25-0.30	25	GFRP	Não	300	7.45
G12-0.25A	12	GFRP	Sim	250	11.63
G12-0.50A	12	GFRP	Sim	500	8.27
S12-0.15	12	Aço	Não	150	11.97

Note-se a ausência de valores para os varões de 16 e 25mm de diâmetro nos comprimentos embebidos de 250 e 500 mm, estes provetes não conferiram o confinamento necessário para a observação do fenómeno da rotura por arrancamento. Note-se que nenhuma conclusão pode ser tecida quanto à relação existente entre as tensões de aderência e o diâmetro dos varões GFRP, como pode ser observado nos provetes com varões embebidos a 300mm no betão. Esta constatação não está em concordância com o consultado na bibliografia, nomeadamente nos trabalhos experimentais de Tighiouart et al. [28], Baena et al. [5] e Achilides e Pilakoutas [3].

Uma análise mais atenta ao gráfico da Figura 4.19 permite-nos verificar que para o varão GFRP de diâmetro 12 mm com ancoragem reta e com cabeça de ancoragem, as tensões de aderência diminuem conforme aumenta o comprimento embebido do varão no betão. A mesma figura remete para a semelhança nos valores de tensão de aderência entre os varões GFRP retos e com cabeça de ancoragem de 12mm, este fato deve-se à semelhança de tensões máximas atingidas durante os respetivos ensaios.

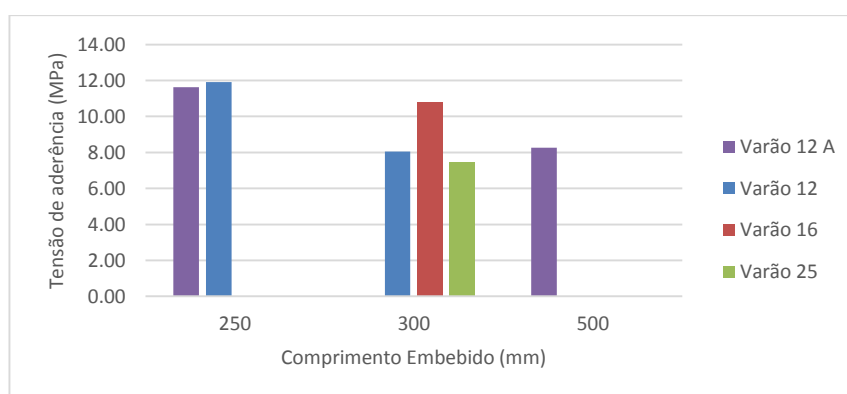


Figura 4.19 – Relação entre as tensões de aderência e o comprimento embebido para a gama de varões GFRP ensaiados

Dentro do parâmetro em estudo constatou-se que quando o comprimento de varão GFRP embebido no betão aumenta de 250 para 300mm existe uma diminuição de 32.4% na tensão de aderência para o varão reto de diâmetro 12. No caso do varão com cabeça de ancoragem de diâmetro 12 quando o comprimento ancorado aumenta de 250 para 500mm ocorre um decréscimo de 28,9% da tensão de aderência.

Essas constatações estão de acordo com a bibliografia consultada, nomeadamente com os ensaios de Achillides e Pilakoutas [3] e Tighiouart et al. [28].

4.1.5 Comprimento ótimo de ancoragem

4.1.5.1 Varões retos

Os provetes que exibiram roturas por aderência do tipo arrancamento e rotura por tração do varão permitiram a construção de gráficos referentes ao comprimento de ancoragem ótimo, ou seja, o comprimento mínimo de varão embebido no betão que possibilita o desenvolvimento de esforços de tração no varão que dão origem à rotura do mesmo.

A exclusão do estudo dos provetes de 750mm impossibilita, na maioria dos casos, a observação da rotura do varão por tração, deste modo, para a realização dos referidos gráficos, optou-se por utilizar os dados relativos à resistência à tração dos varões GFRP, descritos no subcapítulo 3.2.2.

Atendendo ao que foi exposto anteriormente os gráficos são apresentados na Figura 4.20. O ramo ascendente dos gráficos representa os ensaios onde foi observado o arrancamento do varão, relativamente ao ramo constante representa a rotura por tração do varão, relacionando as forças de arrancamento com o comprimento embebido do varão no betão.

A Figura 4.20(a) ilustra o comprimento ótimo de ancoragem relativo ao varão 12 de aço, que corresponde a 179.30 mm ($\cong 15 d_b$), este ensaio é representativo e serve como base de comparação para um varão idêntico de GFRP. Para os ensaios com varões GFRP, os comprimentos de amarração ótimos correspondem a 337.77 ($\cong 28 d_b$), 430.88 ($\cong 27 d_b$) e 611.25 ($\cong 25 d_b$) mm para os varões de 12, 16 e 25 mm respetivamente, conforme indicado nos gráficos das Figura 4.20(b), Figura 4.20(c) e Figura 4.20(d).

Relativamente ao comprimento de ancoragem ótimo verificou-se que os varões GFRP de 12mm necessitam de maior comprimento de ancoragem para desenvolverem as tensões de rotura, um comprimento cerca de 53% superior ao registado para um varão do mesmo diâmetro de aço. Este

valor vai de encontro ao estipulado anteriormente na medida em que as tensões de rotura verificadas para o GFRP são cerca de 53% superiores às observadas nos varões de aço do mesmo diâmetro.

Note-se que, no caso do varão GFRP de 25mm (Figura 4.20(d)), a tensão desenvolvida não atingiu os valores tabelados referentes à tensão de rotura por tração. Esta situação está relacionada com o sistema de aperto, que não constituindo resistência necessária à força imposta pelas garras, acabou por esmagar e o varão GFRP registar uma rotura prematura na zona de aperto.

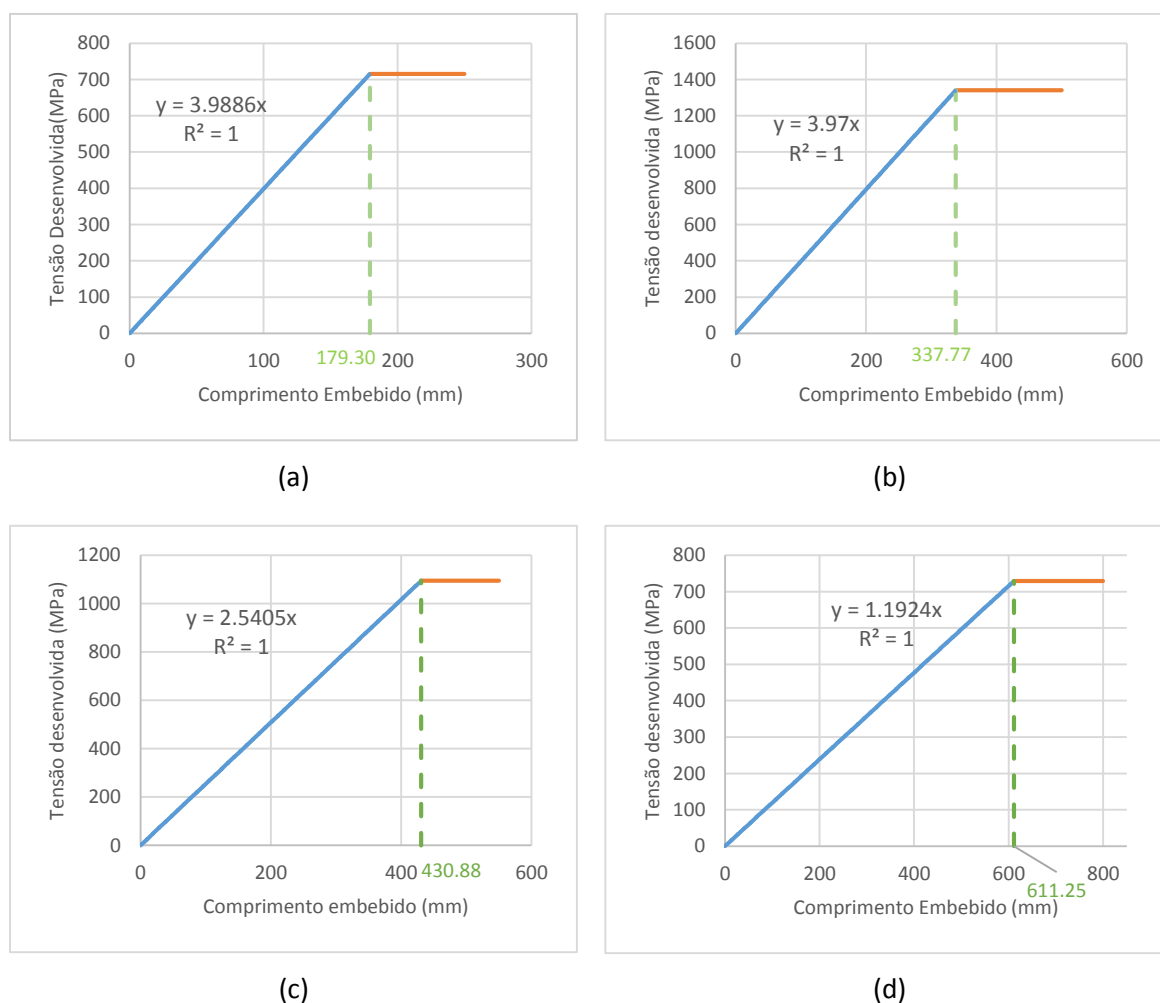


Figura 4.20 – Comprimento de ancoragem ótimo para (a) o varão de aço de 12mm, (b) o varão de GFRP de 12mm, (c) o varão de GFRP de 16mm e (d) o varão de GFRP de 25mm

Comparativamente aos resultados obtidos por Chaallal e Benmokrane [11] no seu trabalho experimental, estes resultados representam um aumento cerca de 25% e 66% do comprimento ótimo de ancoragem, relativamente aos varões de 12 e 16mm, face aos obtidos pelos referidos autores. Contudo os varões GFRP utilizados no programa experimental apresentavam tensões de

rotura na ordem do 690 MPa, da mesma forma o diâmetro nominal dos varões ensaiados pelos autores foi 12.7 e 15.9 mm respetivamente. Estes fatos justificam as diferenças nos resultados obtidos.

4.1.5.2 Varões com cabeça de ancoragem

Os resultados obtidos nos provetes com varões com cabeça de ancoragem não permitem, com exatidão, construir gráficos de comprimento de amarração ótimo, visto ter ocorrido, em alguns casos, uma rotura prematura na cabeça de ancoragem.

Contudo, foi possível observar o fenómeno de arrancamento do varão GFRP de diâmetro 12mm. A Figura 4.21 demonstra o comprimento de amarração ótimo para o caso particular do varão GFRP de 12mm com cabeça de ancoragem.

Apesar de ter ocorrido o fenómeno de arrancamento, observado na Figura 4.21, este não pode ser contabilizado, no sentido em que, a partir do instante em que ocorre uma rotura prematura da cabeça de ancoragem, o varão comporta-se como um varão reto, exibindo comportamento semelhante aos referidos no subcapítulo anterior.

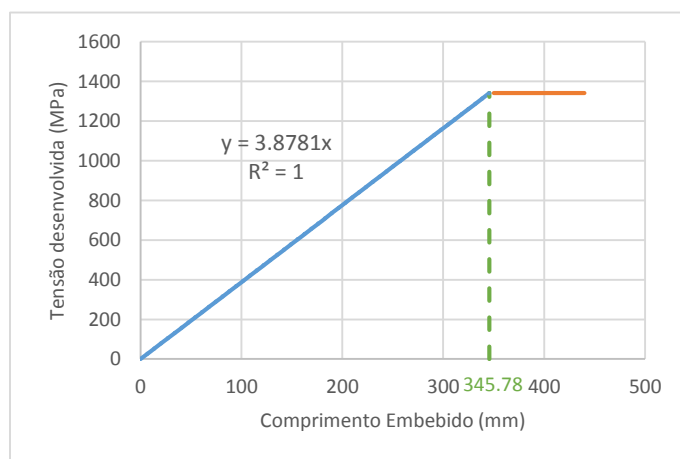


Figura 4.21 – Comprimento de ancoragem ótimo para o varão GFRP D12 com cabeça de ancoragem

No caso particular dos varões GFRP de diâmetro 16 e 25mm, não foi possível determinar o comprimento de amarração ótimo, devido ao modo de rotura dos referidos provetes. Em ambos ocorreram roturas por destacamento do betão, conforme já explicito na Figura 4.14 e Figura 4.17. Este fenómeno ocorre nas condições em que o betão não constitui confinamento necessário às tensões desenvolvidas pelo varão embebido, originando fissuras que se propagam até à superfície do provete.

4.2 Ensaio de arrancamento com curto comprimento de ancoragem

A campanha experimental destinada a avaliar o comportamento da aderência entre o varão GFRP e o betão a nível local (com reduzido comprimento embebido) consistiu em 18 ensaios de arrancamento com provetes cúbicos de 200x200x200mm³ (Figura 4.22). As variantes dos ensaios incluíram o tipo e o diâmetro do varão.

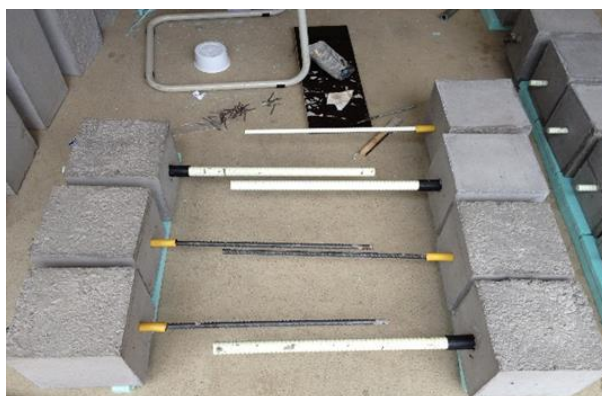


Figura 4.22 - Provetes cúbicos para o ensaio de arrancamento com curto comprimento de ancoragem

Foram realizadas 3 séries de ensaios com varões de aço e 3 séries com varões GFRP, cada série corresponde a 3 ensaios de arrancamento com características semelhantes para tratamento estatístico, cada série é constituída por um diâmetro nominal diferente.

A nomenclatura utilizada para esta campanha experimental baseia-se nos mesmos pressupostos abordados nos ensaios do capítulo 4.1, e está explicitado no esquema da Figura 4.23.

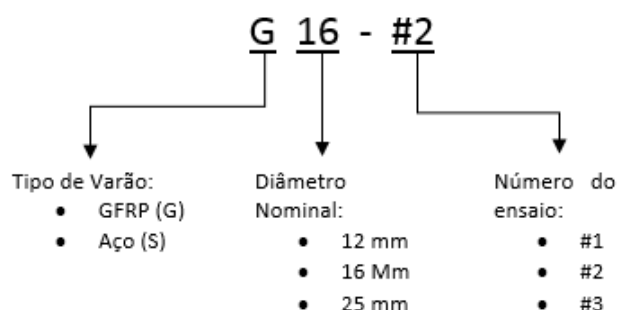


Figura 4.23 - Sistema de classificação dos ensaios de arrancamento com curto comprimento de ancoragem

4.2.1 Resultados experimentais

Os resultados obtidos dos ensaios de arrancamento com curto comprimento de ancoragem encontram-se detalhados na Tabela 4.3. A tabela reúne informações relativas à força e tensão de aderência máximas registadas durante o arrancamento, os escorregamentos registados na extremidade carregada (sm_{le}) e livre (sm_{ue}) dos varões e o modo de rotura observado no ensaio.

Note-se que, devido ao baixo módulo de elasticidade característico dos varões GFRP, os valores obtidos para a extremidade carregada carecem de um tratamento peculiar, ou seja, ao valor registado pelo LVDT é necessário subtrair o valor do alongamento do varão GFRP, conforme explicado posteriormente no texto.

Tabela 4.4 - Quadro resumo dos ensaios de arrancamento com curto comprimento de ancoragem

Ensaio		f_c' (MPa)	P_{max} (kN)	σ_{max} (MPa)	sm_{le} (mm)	sm_{eu} (mm)	Modo Rotura
S12	#1	40.4	25.820	11.4136	1.2466	0.8663	Arrancamento
	#2	40.4	36.178	15.9942	2.0225	1.5698	Arrancamento
	#3	40.4	50.368	22.2675	1.6751	1.6487	Arrancamento
Média			37.45	16.56	1.65	1.36	
S16	#1	40.4	64.386	16.0115	2.7593	2.0042	Arrancamento
	#2	40.4	89.018	22.1370	2.1595	2.6988	Arrancamento
	#3	40.4	78.024	19.4030	1.9787	0.2194	Arrancamento
Média			77.14	19.18	2.30	1.64	
S25	#1	40.4	190.113	19.3648	0.9462	0.9178	Destacamento
	#2	40.4	196.687	20.0344	1.2168	1.1760	Destacamento
	#3	40.4	190.757	19.4304	1.2643	1.0697	Destacamento
Média			192.52	19.61	1.14	1.05	
G12	#1	40.4	26.173	11.5710	0.6847	0.1687	Arrancamento
	#2	40.4	19.999	8.8415	1.3285	0.0003	Arrancamento
	#3	40.4	21.346	9.4370	0.8406	0.0397	Arrancamento
Média			22.51	9.95	0.95	0.07	
G16	#1	40.4	52.962	13.1706	0.8406	0.0397	Arrancamento
	#2	40.4	51.404	12.7831	1.1350	0.0185	Arrancamento
	#3	40.4	50.413	12.5367	1.2343	0.5742	Arrancamento
Média			51.59	12.83	1.07	0.21	
G25	#1	40.4	85.549	8.7140	1.0047	0.0000	Arrancamento
	#2	40.4	74.636	7.6024	0.9670	0.6102	Arrancamento
	#3	40.4	82.816	8.4356	0.8959	0.0895	Arrancamento
Média			81.00	8.25	0.96	0.23	

Os escorregamentos presentes na Tabela 4.4 resultam da diferença entre a média aritmética dos valores registados pelos 3 LVDT na extremidade carregada do varão e o alongamento do varão

compreendido entre o ponto de contato dos LVDT com o varão e a superfície superior do varão em contacto com o betão. Desta forma o alongamento na extremidade carregada pôde ser calculado através da equação [4.2].

$$S_c = \frac{FL_c}{E_{frp}A} \quad [4.2]$$

Onde,

- F – Força de tração desenvolvida ao longo do varão (kN);
- S_c – alongamento elástico (mm);
- L_c – comprimento desde o topo do varão embebido até ao ponto de contato do equipamento de medição com o varão (mm).

4.2.2 Relação tensão de aderência-escorregamento

A avaliação da aderência entre dois materiais é geralmente avaliada através das curvas tensão de aderência- escorregamento. Esta relação é constituída por um aumento substancial de tensão face a um escorregamento praticamente nulo até atingir o pico de tensão máxima, seguida de uma perda substancial de tensão associada a um aumento de escorregamento. A particularidade destas curvas está fortemente dependente dos mecanismos de aderência abordados no capítulo 2.2.

As curvas características da tensão de aderência e o escorregamento encontram-se expostas da Figura 4.24 à Figura 4.30. Estas curvas são respetivas aos varões de aço e GFRP de 12, 16 e 25mm de diâmetro.

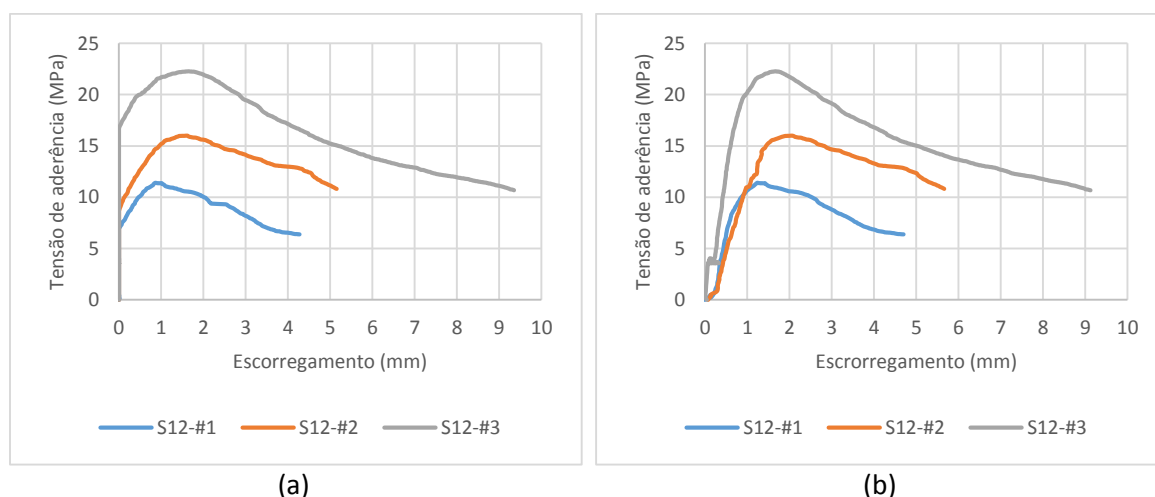


Figura 4.24 - Relação entre a tensão de aderência e o escorregamento relativo ao varão de aço de 12mm para a (a) extremidade não carregada e a (b) extremidade carregada do varão

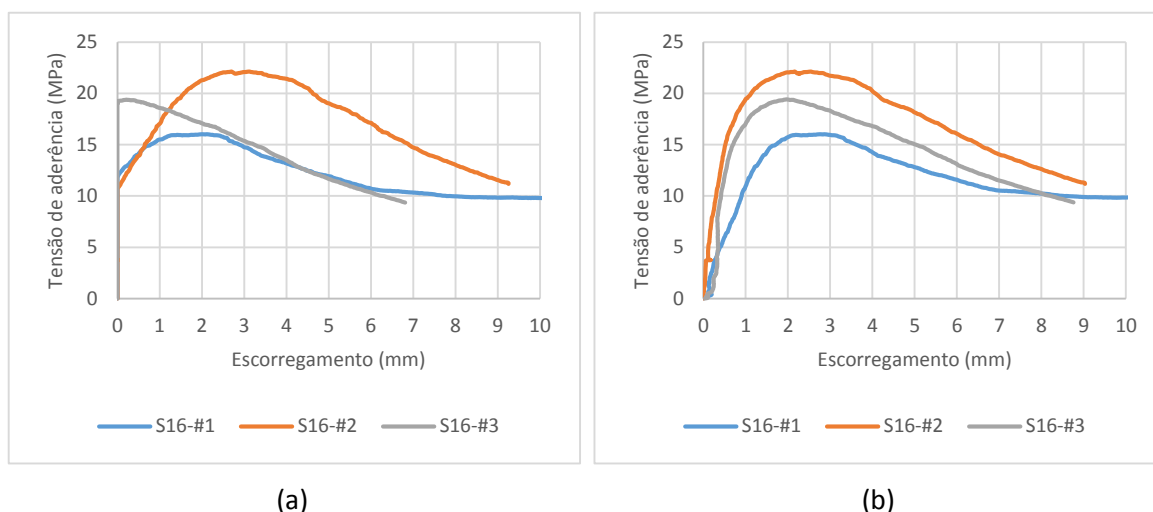


Figura 4.25 - Relação entre a tensão de aderência e o escorregamento relativo ao varão de aço de 16mm para a (a) extremidade livre e a (b) extremidade carregada do varão

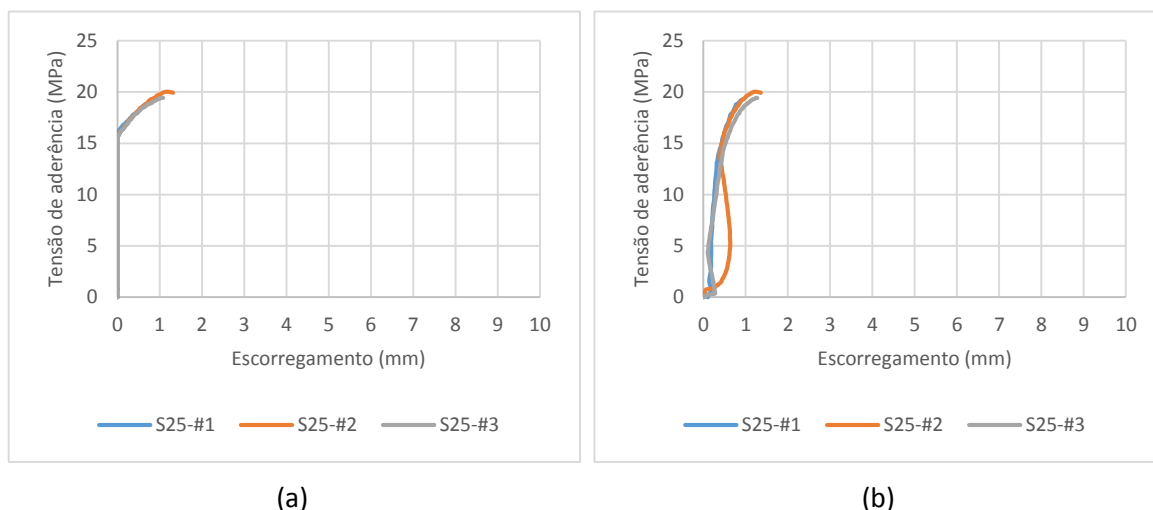


Figura 4.26 - Relação entre a tensão de aderência e o escorregamento relativo ao varão de aço de 25mm para a (a) extremidade livre e a (b) extremidade carregada do varão

Os ensaios realizados com varões de aço foram realizados com o intuito de constituírem ensaios de referência aos mesmos com varões GFRP. No caso particular dos varões de aço registou-se que os escorregamentos registados para as tensões de aderência máxima não diferem significativamente da extremidade carregada para a extremidade livre, esta particularidade está relacionada com o elevado módulo de elasticidade característico deste tipo de material do varão. Para os varões de 12 e 16mm verificou-se o arrancamento do varão do provete, já no caso específico dos varões de aço de 25mm, a camada de betão não constituiu confinamento suficiente ao varão e o provete acabou por evidenciar uma rotura do tipo destacamento de betão (Figura 4.27).

Este fenómeno é facilmente observável nos gráficos da Figura 4.26, na qual só há registo de escorregamento até à tensão de aderência máxima.



Figura 4.27 - Destacamento do betão no provete de aço de 25mm

Os ensaios de arrancamento dos varões GFRP encontram-se ilustrados da Figura 4.28 à Figura 4.30. Estas curvas são caracterizadas por dois ramos, um ramo ascendente até à tensão de aderência máxima e um ramo descendente. O ramo ascendente é caracterizado por um aumento quase linear até ao pico da tensão de aderência máxima. O ramo descendente é constituído por um abrandamento da tensão de aderência. Na Figura 4.28(b) é possível identificar que o ramo descendente possui algumas ondulações, estas ondulações representam aumentos pouco significativos de tensão e são atribuídos à solicitação do mecanismo de resistência por atrito após o esmagamento do betão entre as nervuras (Figura 4.31).

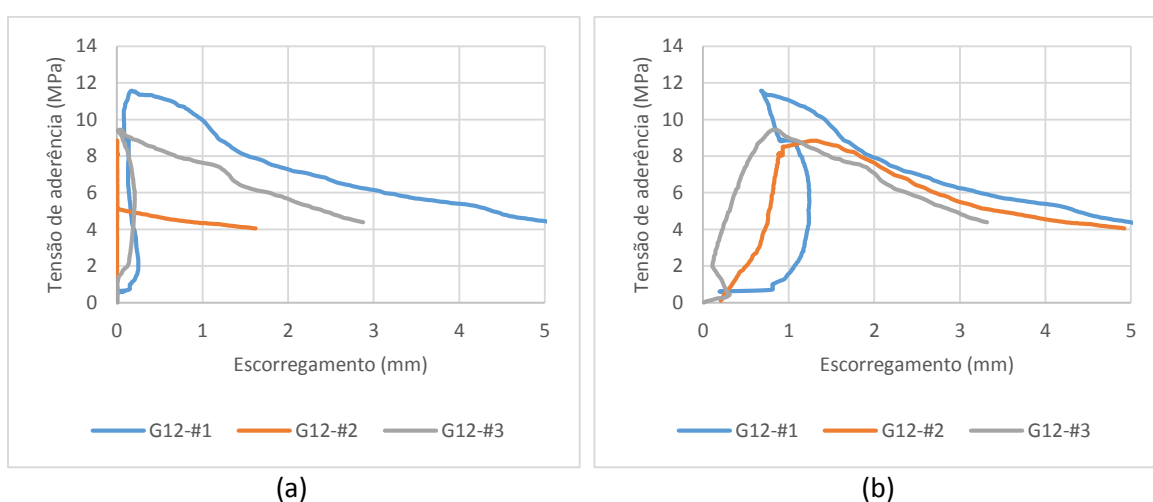


Figura 4.28 -Relação entre a tensão de aderência e o escorregamento relativo ao varão GFRP de 12mm para a (a) extremidade livre e (b) extremidade carregada do varão

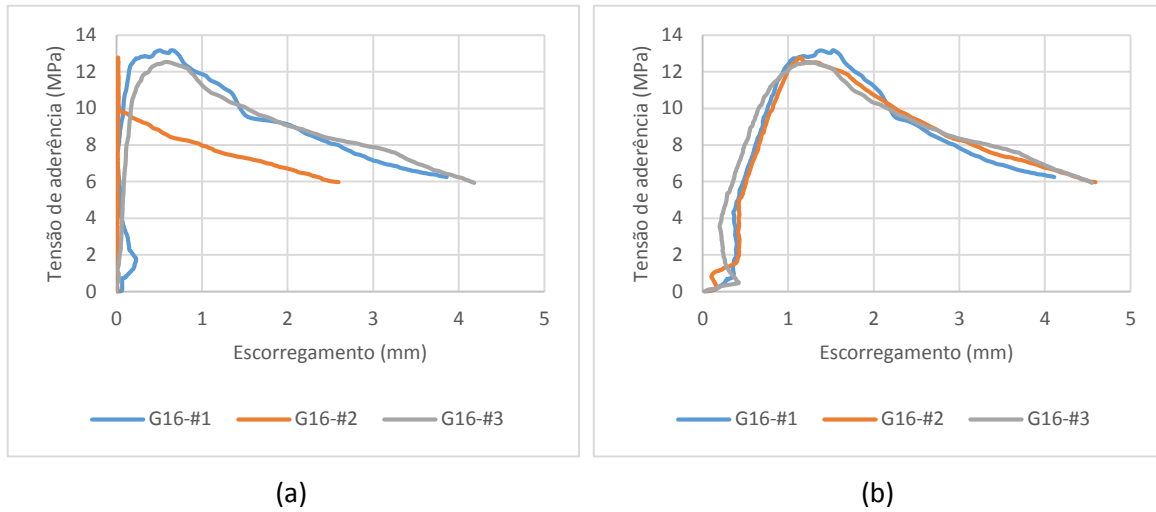


Figura 4.29 - Relação entre a tensão de aderência e o escorregamento relativo ao varão GFRP de 16mm para a (a) extremidade livre e (b) extremidade carregada do varão

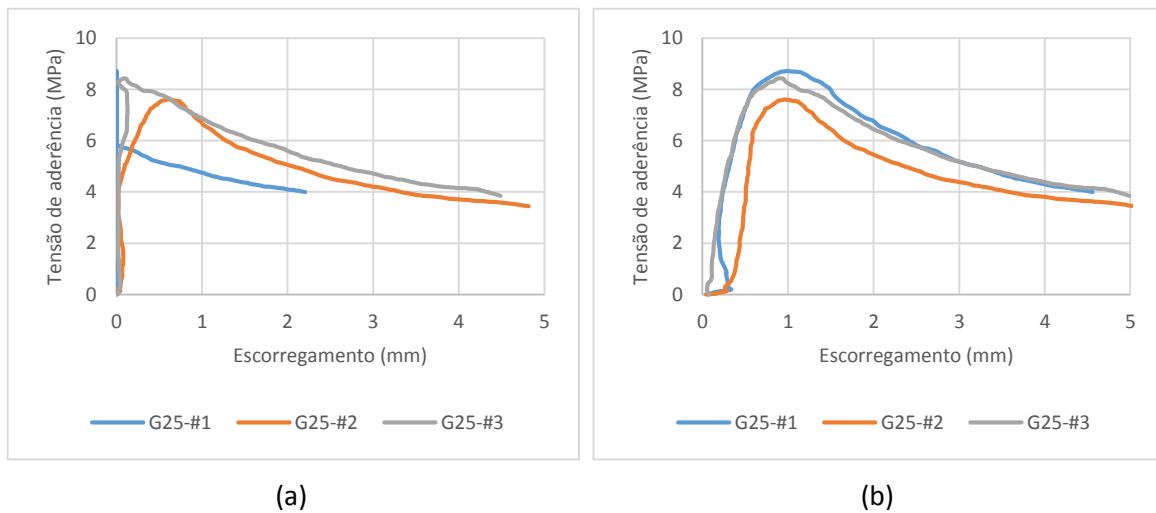


Figura 4.30 - Relação entre a tensão de aderência e o escorregamento relativo ao varão GFRP de 25mm para a (a) extremidade livre e (b) extremidade carregada do varão



Figura 4.31 - Esmagamento do betão entre as nervuras do varão GFRP de 25mm

Comparativamente ao aço, os varões GFRP apresentam diferenças no que toca aos escorregamentos registados na extremidade carregada e livre do varão. Além disto, como os varões em GFRP apresentam um módulo de elasticidade muito inferior o alongamento no varão é significativo.

Outro fator característico dos varões de GFRP está relacionado com a rigidez inicial do varão, ou seja, as tensões de aderência que a interface GFRP-betão consegue suportar até ocorrer escorregamento na extremidade carregada. Esta característica é visível nas Figura 4.28(a), Figura 4.29(a) e Figura 4.30(a) e consiste, na extremidade livre do varão, num aumento das tensões de aderência até à tensão de aderência máxima com escorregamentos muito reduzidos. Após atingir a tensão de aderência máxima a extremidade livre exhibe um aumento significativo no que toca ao escorregamento, ao mesmo tempo que as tensões de aderência apresentam um decréscimo acentuado. De notar que, após atingir o pico de tensão máxima, o escorregamento registado na extremidade livre aproxima-se dos valores registados para a extremidade carregada.

Os gráficos da Figura 4.32 representam a curva média da relação tensão de aderência e escorregamento para os varões GFRP nos diversos diâmetros ensaiados. Estas curvas encontram-se divididas em dois troços, o troço ascendente caracterizado por uma equação polinomial e o troço descendente descrito por uma equação exponencial.

Estes dados adquirem alguma importância quando se trata de caracterizar a aderência de dois materiais num programa de elementos finitos com fim à sua modelação computacional.

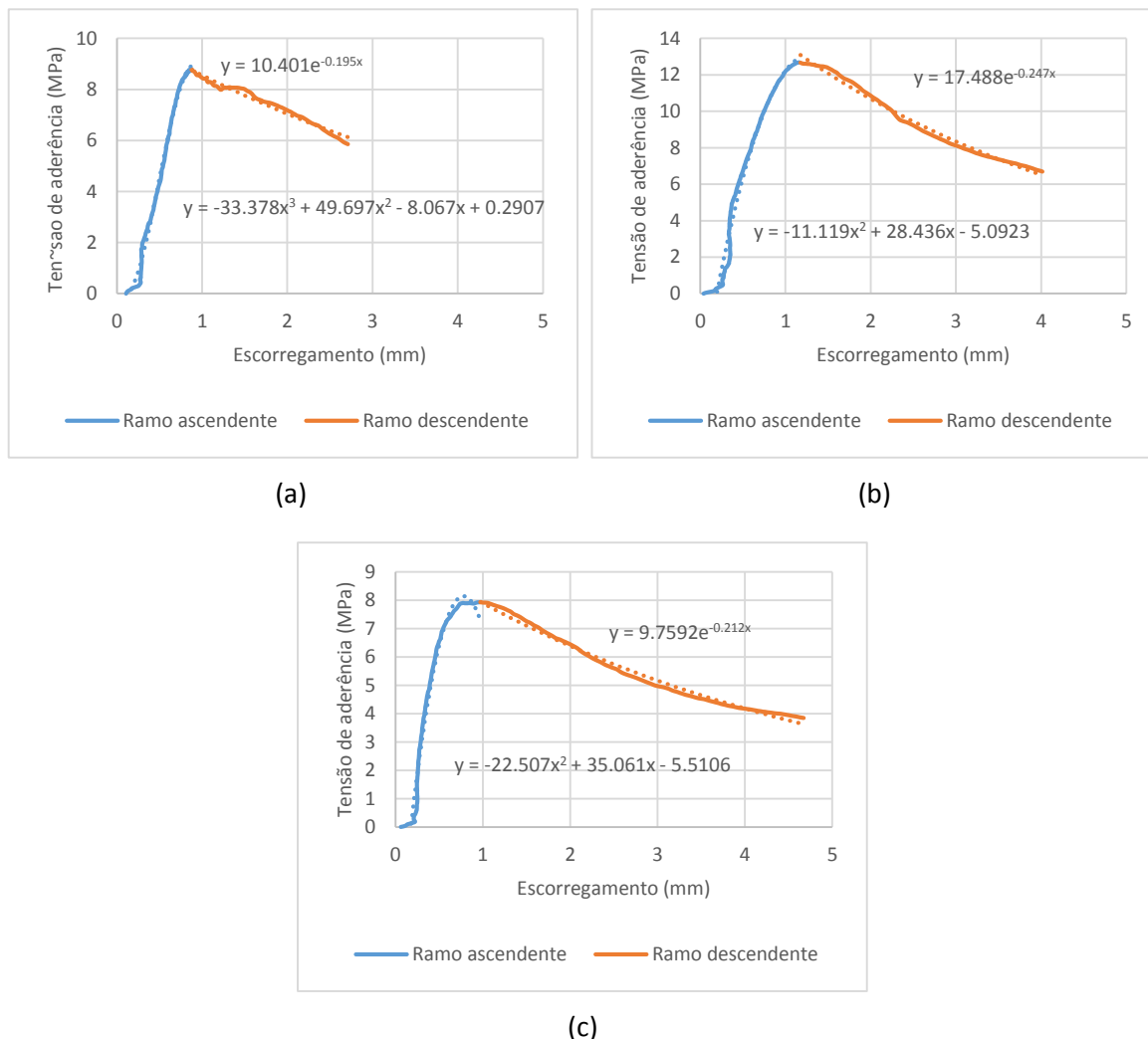


Figura 4.32 - Curvas tensão de aderência média escorregamento para o varão GFRP de (a) 12, (b) 16 e (c) 25mm

A Tabela 4.5 visa complementar a informação descrita na Figura 4.32 apresentando os valores máximos da tensão de aderência média para os varões GFRP estudados. Estes valores quando associados às equações relativas a cada troço das curvas simplificam o processo de obtenção de todos os pontos das curvas tensão de aderência-escorregamento.

Tabela 4.5 – Valores máximos para a tensão média de aderência e respetivo escorregamento

Diâmetro do varão (mm)	Tensão aderência máxima (MPa)	Escorregamento (mm)
12	8.79	0.8767
16	12.69	1.1616
25	7.93	0.9606

4.2.3 Parâmetros condicionantes na aderência

4.2.3.1 Diâmetro do varão

A bibliografia consultada ([5], [3], [28]) refere a aptidão de varões GFRP desenvolverem menores tensões de aderência com o aumento do diâmetro. Essa constatação não pode ser totalmente verificada na campanha experimental realizada.

Na análise da Figura 4.33 verifica-se que no caso dos varões de aço existe um aumento das tensões de aderência associadas ao aumento do diâmetro do varão. No caso dos varões de GFRP, embora não haja uma relação óbvia entre as tensões de aderência e o diâmetro, a relação sugerida na bibliografia consultada pode ser observada no caso específico dos varões de 16 - 25mm e 12 - 25mm em que há uma diminuição de cerca de 36% e 17% respectivamente, nas tensões de aderência.

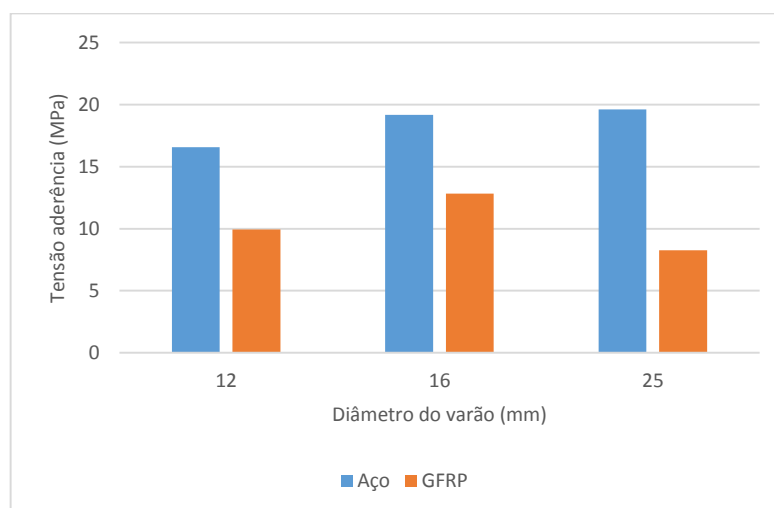


Figura 4.33 - Relação entre a tensão de aderência e o diâmetro do varão

Esta tendência de varões de maiores diâmetros estarem associados a tensões de aderência mais baixas relaciona-se com dois fatores: o efeito Poisson e o comprimento embebido de varão.

O efeito de Poisson representa um dos fatores de influência, pois constitui a deformação transversal de um material quando sujeito a forças de tração. Ao tracionar um varão ocorre uma diminuição da seção transversal do varão. Para varões de maiores diâmetros esta diminuição tem maior relevo e as componentes relativas à aderência ficam comprometidas, nomeadamente a resistência de atrito e a resistência mecânica, componentes fortemente associadas às características geométricas do varão.

Como já foi verificado na campanha de ensaios com longo comprimento de ancoragem, o comprimento embebido de varão tem influência nas tensões de aderência, verificando-se que, para varões de características semelhantes, o aumento do comprimento embebido origina um decréscimo nas tensões de aderência. Visto que, nestes ensaios os provetes têm varões embebidos a 5 diâmetros no betão, os varões de 25mm representam os varões com maior comprimento embebido nos provetes (125mm) pelo que apresentam tensões de aderência mais baixas.

4.2.3.2 Material do varão

A presente campanha experimental consistiu no ensaio de duas tipologias de varão: aço e GFRP. Tal como verificados pelos autores consultados na bibliografia ([28], [5], e [3]), observou-se que os varões GFRP desenvolvem tensões de aderência mais baixas comparativamente ao aço, como pode ser observado na Figura 4.33. A análise de dois varões de tipologias distintas mas com o mesmo diâmetro, permite-nos concluir que no arrancamento os varões GFRP, as tensões de aderência são cerca de 60, 67 e 42% das registadas para o aço. Estes valores dizem respeito aos diâmetros de 12, 16 e 25mm respetivamente.

Este fato está fortemente associado aos mecanismos solicitados durante o arrancamento do varão. No caso do varão de aço, o mecanismo envolvido durante o arrancamento é o mecanismo de resistência mecânica. Este mecanismo está associado às características geométricas do varão, mais concretamente às nervuras, que exercem um efeito de fixação do varão ao betão e que são responsáveis pela transmissão de tensões ao betão.

No arrancamento de varões GFRP os mecanismos de resistência por adesão e atrito são os responsáveis pelas tensões de aderência desenvolvidas. O mecanismo de adesão consiste nas interligações químicas entre os dois materiais e é quebrado quando ocorre escorregamento. O mecanismo de resistência por atrito é acionado após a perda de adesão entre o varão e o betão e compreende o atrito gerado pelas nervuras do varão quando este escorrega pela camada de betão.

As Figura 4.34(a) e (b) ilustram perfeitamente o que foi abordado nos parágrafos anteriores, ou seja, a geometria das nervuras dos dois tipos de varão tem grande influência nas tensões de aderência desenvolvidas pelos mesmos. Enquanto na Figura 4.34(a) é pouco nítida a posição inicial das nervuras, na Figura 4.34 (b) é facilmente identificável a localização das nervuras do varão GFRP.

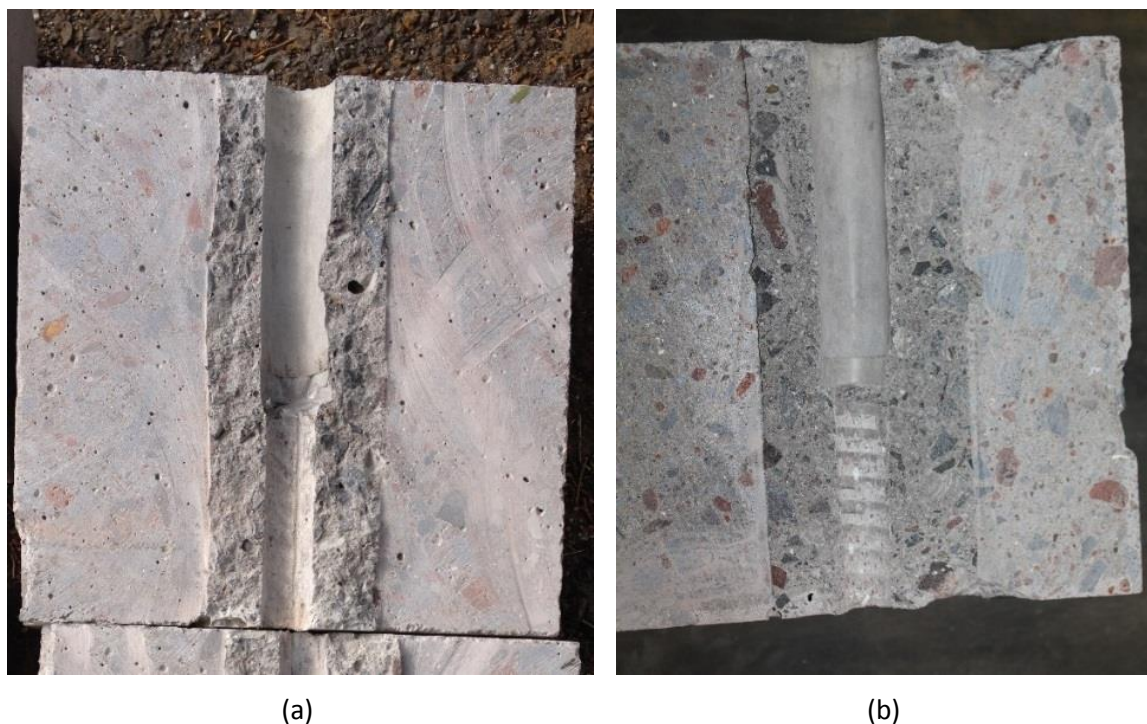


Figura 4.34 - Modo de rotura por arrancamento do varão de (a) aço e (b) GFRP

Outra característica que varia conforme o tipo de material do varão é o escorregamento verificado na extremidade carregada e não carregada do varão. A Figura 4.35 demonstra a variação do diâmetro do varão com o escorregamento registrado no pico de tensão de aderência máxima.

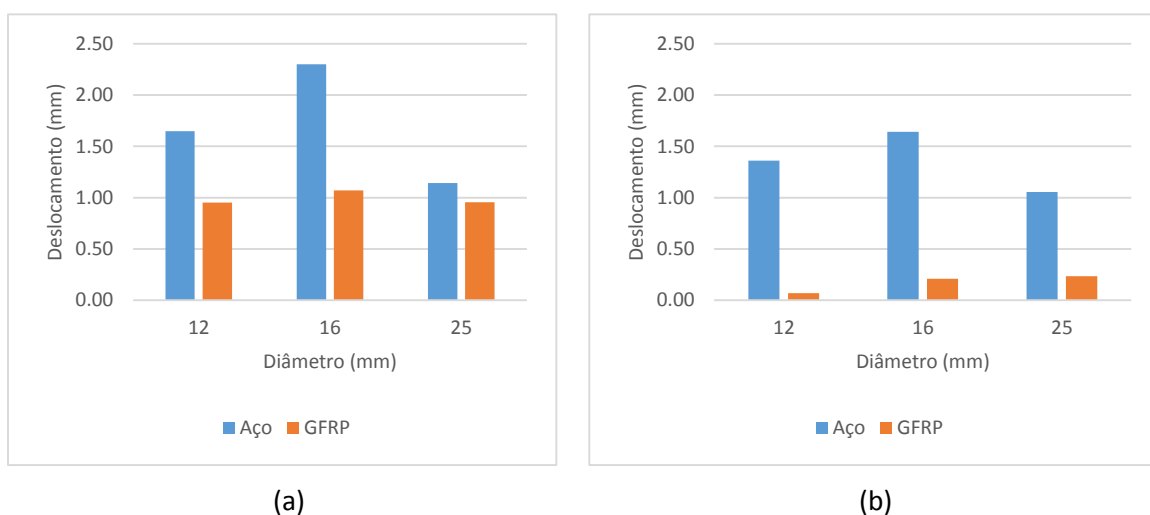


Figura 4.35 - Relação entre o diâmetro do varão e o escorregamento para a (a) extremidade carregada e (b) não carregada do varão

A primeira observação exposta nesta figura e que é transversal ao tipo de extremidade é a obtenção de escorregamentos superiores para os varões de aço comparativamente aos mesmos constituídos

por GFRP. Este resultado pode resultar do fato das tensões de aderência obtidas nos varões de aço serem superiores, implicando deslocamentos superiores em ambas extremidades.

Apesar de não se registrar uma tendência clara entre os escorregamentos verificados para ambas extremidades e o diâmetro do varão, observa-se que, para a extremidade carregada (Figura 4.35(a)), os varões de GFRP registaram deslocamentos cerca de 58% e 47% daqueles obtidos para os varões de aço de 12 e 16mm respectivamente. O varão aço de 25mm não pode ser contabilizado visto que o tipo de rotura verificado foi por destacamento do betão, não tendo desenvolvido a tensão de aderência máxima.

A Figura 4.35(b) ilustra claramente a diferença dos escorregamentos da extremidade não carregada, verificada entre os dois materiais. Os escorregamentos registados no varão de GFRP são muito reduzidos quando comparados com os ensaios em aço. Esta característica está novamente relacionada com os mecanismos de aderência solicitados durante o arrancamento, visto que o mecanismo de adesão nos varões de aço não representa um fator relevante na aderência, os escorregamentos registados na extremidade não carregada começam a aumentar mesmo antes de atingir-se o pico de tensão máxima, ou seja, começa a ocorrer escorregamento na extremidade não carregada assim que este mecanismo é quebrado. Nos varões GFRP pelo contrário, durante o arrancamento, o desenvolvimento de tensões de aderência até ao pico está dependente do mecanismo de resistência por adesão, pelo que na tensão máxima os escorregamentos obtidos pela extremidade não carregada são quase nulos.

Esta relação está relacionada com as propriedades mecânicas intrínsecas ao material. A diferença nos módulos de elasticidade dos materiais permite que sejam desenvolvidos mecanismos de aderência distintos no que toca ao arrancamento de um provete de betão de características semelhantes. Este fator tem uma grande influência no que toca às tensões de aderência desenvolvidas pelos diferentes materiais.

Capítulo 5. Conclusões e desenvolvimentos futuros

5.1 Conclusões

Este trabalho tem como foco a análise da aderência entre varões de GFRP e o betão, com o objetivo de contribuir para a base de dados existente e demonstrar a influência de determinados parâmetros na aderência entre os varões GFRP e o betão. O comportamento da aderência entre dois materiais pode ser avaliado através de ensaios de arrancamento e de curvas tensão de aderência-escorregamento. Neste caso específico foram realizados ensaios de arrancamento com longo e curto comprimento de ancoragem, com o propósito de estudar a influência do diâmetro do varão, comprimento embebido, material do varão e determinar o comprimento ótimo de ancoragem dos varões GFRP. Em seguida são expostas as conclusões gerais obtidas ao longo do programa experimental.

Relativamente ao diâmetro do varão concluiu-se que varões de menores diâmetros desenvolvem tensões mais elevadas, quando sujeitos a esforços de tração pura. Por outro lado, quando comparado com um varão de diâmetro semelhante de aço, os varões GFRP de 12mm desenvolvem uma tensão de rotura cerca de 53% superior.

Da mesma forma verificou-se que, relativamente ao comprimento embebido, e para um varão do mesmo diâmetro, quanto maior o comprimento embebido no betão, maior são as tensões desenvolvidas no varão. Quando o comprimento embebido aumenta de 250 para 500mm as tensões desenvolvidas no varão apresentam um incremento de 35% e 9% para o varão de 12 e 16mm respetivamente.

Nomeadamente às tensões de aderência, constatou-se que estas diminuem conforme o aumento do comprimento embebido de varão no betão. No caso específico do varão reto GFRP de diâmetro 12mm, quando o comprimento embebido no betão aumenta de 250 para 300mm houve uma diminuição de 32% na tensão de aderência. No caso do varão com cabeça de ancoragem de diâmetro 12mm quando o comprimento ancorado aumenta de 250 para 500mm houve um decréscimo de 29% da tensão de aderência.

Quanto ao comprimento de ancoragem, determinou-se que o comprimento ótimo de ancoragem relativo ao varão reto 12mm de aço corresponde a 179.30 mm ($\cong 15 d_b$). Para os ensaios com varões GFRP, os comprimentos de amarração ótimos correspondem a 337.77 ($\cong 28 d_b$), 430.88 ($\cong 27 d_b$) e 611.25 ($\cong 25 d_b$) mm para os varões de 12, 16 e 25 mm respectivamente.

Nos ensaios de arrancamento com curto comprimento de ancoragem observou-se que para um mesmo comprimento embebido de 5 d_b , os varões de GFRP revelaram uma diminuição de 36% e 17% nas tensões de aderência do varão de 16mm para o de 25mm e do varão de 12mm para o de 25mm, respectivamente. Este aumento está relacionado com o efeito Poisson e com o comprimento embebido do varão.

Conclui-se igualmente que os varões GFRP desenvolvem tensões de aderência mais baixas do que os varões de aço. Os varões GFRP de 12, 16 e 25mm atingem cerca de 60%, 67% e 42% das tensões observadas nos varões de aço com os mesmos diâmetros.

Observou-se que os escorregamentos ocorridos na extremidade carregada diferem consoante o material do varão. Os escorregamentos ocorridos na extremidade carregada do varão de GFRP correspondem a 58% e 46% daqueles ocorridos para os varões de aço de 12 e 16mm respectivamente. Quanto à extremidade não carregada verificou-se que os escorregamentos registados no varão GFRP são praticamente nulos quando comparados com os varões de aço.

Através das características enunciadas anteriormente constatou-se que, durante o arrancamento dos varões, são solicitados diferentes mecanismos de aderência consoante a tipologia do varão. Para o caso do varão GFRP as tensões de aderência desenvolvidas são influenciadas pelo mecanismo de resistência por adesão. Já no caso particular do varão de aço, as tensões de aderência são influenciadas pelos mecanismos de resistência mecânica e atrito.

5.2 Desenvolvimentos futuros

Para complementar o trabalho experimental desenvolvido na presente dissertação é sugerido uma série de estudos e práticas a serem usadas em trabalhos futuros de estudo da aderência entre o betão e varões GFRP.

O confinamento dos provetes de betão ensaiados revelou ser um parâmetro de extrema importância, e por isso é recomendado que em ensaios futuros para testar a aderência destes materiais, seja tida em consideração a colocação de armadura transversal nos provetes de forma a

dotar os mesmos de confinamento necessário para resistir às tensões elevadas características de varões GFRP com diâmetros elevados.

O sistema de aperto utilizado nos ensaios de arrancamento é de extrema importância para a mobilização das características reais dos varões GFRP, pelo que deve ser aperfeiçoado, especialmente para varões de maiores diâmetros.

Outra sugestão está relacionada com o estudo paramétrico e modulação computacional de ensaios de arrancamento com varões GFRP, e compará-los com os resultados obtidos nos ensaios efetuados no âmbito da presente dissertação.

Adicionalmente seria uma mais-valia para o conhecimento científico nesta área, elaborar estudos experimentais com o intuito de verificar a relevância de determinados fatores que influenciam a aderência de varões GFRP no betão, nomeadamente, a posição dos varões no molde aquando da betonagem e o tratamento superficial de varões GFRP.

Por fim o estudo de aderência pode ser complementado com a realização de ensaios de arrancamento por flexão ou ensaios de vigas e comparados com os realizados na presente tese.

Bibliografia

- [1] 440.1R-06, ACI Committee, *"Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars"*. Farmington Hills, E.U.A.: American Concrete Institute, 2006.
- [2] 440.3R-04, ACI Committee, *"Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures"*. Farmington Hills, E.U.A.: American Concrete Institute, 2004.
- [3] Z. Achillides and K. Pilakoutas, "Bond Behavior of Fiber Reinforced Polymer Bars under Direct Pullout Conditions," *Journal of Composites for Construction*, pp. 173-181, 2004.
- [4] 408, ACI Committee, *"Bond and development of straight reinforcing bars in tension"*. Farmington Hills, E.U.A.: American Concrete Institute, 2003.
- [5] M. Baena, L. Torres, A. Turon, and C. Barris, "Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test," *Composites: Part B* 40, pp. 784-797, julho 2009.
- [6] C. J. Burhoyne et al., *"Fib Bulletin nº40: FRP reinforcement in RC structures"*. Lausana, Suíça: Fédération Internationale du béton (Fib), 2007.
- [7] L. Camacho, *"A Utilização de Varões de GFRP nas Estruturas de Betão Armado"*, Tese de Mestrado. Penteada, Funchal: Universidade da Madeira, 2011.
- [8] A. Camões, P. J. S. Cruz, and J. M. A. Sá, "Avaliação da aderência ao betão de varões de aço galvanizado ou com revestimento epoxídico," in *BE 2008 - Encontro Nacional de Betão Estrutural*, Guimarães, 2008.
- [9] CAN/CSA-S6-00, *Canadian High Bridge Design Code*. Canada: Canadian Standard Association, 2000.

- [10] P. F. Castro and N. J. Carino, "Tensile and Nondestructive Testing of FRP Bars," *Journal of Composites for Construction*, vol. 2, pp. 17-27, 1998.
- [11] O. Chaallal and B. Benmokrane, "Pullout and bond of glass-fibre rods embedded in concrete and cement grout," *Materials and Structures* 26, pp. 167-175, 1993.
- [12] Schöck Combar, "*Technical Information Schöck Combar*". Baden, Alemanha: Schöck Combar GmbH, 2007.
- [13] E. Cosenza, G. Manfredi, and R. Realfonzo, "Behavior and Modeling of Bond of FRP Rebars to Concrete," *Journal of Composites for Construction*, vol. 1, pp. 40-51, 1997.
- [14] EN 1992-1-1, "Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1:General Rules and Rules for Building," 2004.
- [15] M. R. Esfahani, M. R. Kianoush, and M. Lachemi, "Bond strength of glass fibre reinforced polymer reinforcing bars in normal and self-consolidating concrete," *NRC Research Press*, pp. 553-560, Junho 2005.
- [16] FIB Bulletin 10, *Bond of Reinforcement in Concrete, State-of-the-art Report*. Lausanne, Suíça: FIP Fédération International de la Précontraint, 2000.
- [17] Q. Hao, Y. Wang, Z. He, and J. Ou, "Bond strength of glass fiber reinforced polymer ribbed rebars in normal strength concrete," *Construction and building materials* 23, pp. 865-871, junho 2008.
- [18] ISIS, "*ISIS Design Manual nº3: Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers*".: Intelligent Sensing for Innovative Structures, 2001.
- [19] JSCE - Concrete Engineering Series 23, *Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing Materials*. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 1997.

-
- [20] S. Kocaoz, V. A. Samaranayake, and A. Nanni, "Tensile characterization of glass FRP bars," *Composites: Part B*, vol. 36, pp. 127-134, 2005.
- [21] J. Y. Lee et al., "Interfacial bond strength of glass fiber reinforced polymer bars in high-strength concrete," *Composites: Part B*, vol. 39, pp. 258-270, 2008.
- [22] F. Micelli and A. Nanni, "Tensile Characterization of FRP Rods for Reinforced Concrete Structures," *Mechanics of Composite Materials*, vol. 39, pp. 293-304, 2003.
- [23] NP EN 12390-3, "Ensaio do betão endurecido; Parte 3: Resistência à compressão de provetes," 2011.
- [24] NP EN ISO 6892-1, "Materiais Metálicos. Ensaio de tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente," 2012.
- [25] P. Santos, "*Avaliação Experimental do Comportamento de Vigas Contínuas com Secção em T de Betão Armado com Varões de GFRP*", *Tese de Mestrado*. Penteada, Funchal: Universidade da Madeira, 2010.
- [26] W. H. Soong, J. Raghavan, and S. H. Rizkalla, "Fundamental mechanisms of bonding of glass fiber reinforced polymer reinforcement to concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 2813-2821, 2011.
- [27] Strongwell. Processo de pultrusão. [Online]. <http://www.strongwell.com/about/the-pultrusion-process/>
- [28] B. Tighiouart, B. Benmokrane, and D. Gao, "Investigation of bond in concrete member with fibre reinforced polymer," *Construction and building materials* 12, pp. 453-462, Setembro 1998.

Anexo A

Cálculos Exemplificativos

Serve o presente anexo de ilustração para as metodologias apresentadas no subcapítulo 2.4, aproveitando para uma análise comparativa do comprimento de amarração apresentado nos três códigos de dimensionamento abordados no mesmo.

Para a dita exemplificação aborda-se o problema de uma viga de 4000mm com uma seção 200x400mm² armada com 2 varões GFRP de 16mm de diâmetro na parte inferior e armada transversalmente com estribos de aço A500 de 10mm de diâmetro espaçados a 100mm, com um recobrimento de 30 mm.

A1. ACI 440-1R

O primeiro passo consiste em determinar a variável C que consiste no menor valor entre o centro do varão solicitado à superfície do betão e metade da distância entre o centro dos varões solicitados.

$$C = \min \left[30 + 10 + \frac{16}{2}; \frac{200 - 2 \times \left(30 + 10 + \frac{16}{2} \right)}{2} \right] = 48 \text{ mm}$$

$$\frac{C}{d_b} = \frac{48}{16} = 3 < 3.5$$

Em seguida calcula-se a tensão máxima desenvolvida ao longo do varão tendo em conta que o coeficiente α é igual a 1 pois a altura de betonagem abaixo dos varões solicitados não é superior a 300 mm. O valor f_{fu} corresponde à resistência à tração do varão e tem em conta o fator de exposição ambiental. Este fator é 0.7 para os casos em que o betão encontra-se exposto aos agentes ambientais.

$$f_{fu} = 1200 \times 0.7 = 840 \text{ MPa}$$

$$l_e = \frac{l}{2} = \frac{4000}{2} = 2000 \text{ mm}$$

$$f_{fe} = \frac{0.083\sqrt{f_c'}}{\alpha} \left(13.6 \frac{l_e}{d_b} + \frac{C}{d_b} \frac{l_e}{d_b} + 340 \right) \leq f_{fu}$$

$$f_{fe} = \frac{0.083\sqrt{30}}{1} \left(13.6 \frac{2000}{16} + \frac{48}{16} \frac{2000}{16} + 340 \right) \leq 840 \text{ MPa}$$

$$f_{fe} = 1098 \text{ MPa} \geq 840 \text{ MPa}$$

Finalmente calcula-se o comprimento de amarração tendo em conta que a variável f_{fr} corresponde ao menor valor entre a tensão máxima desenvolvida ao longo do varão e o valor de resistência à tração do varão.

$$l_d = \frac{\alpha \frac{f_{fr}}{0.083\sqrt{f_c'}} - 340}{13.6 + \frac{C}{d_b}} d_b$$

$$l_d = \frac{1 \frac{840}{0.083\sqrt{30}} - 340}{13.6 + \frac{42}{16}} 16 = 1486.8 \text{ mm}$$

A2. Canadian Highway bridge design code (CHBDC)

Esta metodologia começa com o cálculo do índice de reforço transversal (K_{tr}) tendo em conta a área dos estribos, tensão de cedência do aço, o espaçamento dos estribos e o número de varões solicitados ao longo da superfície de rotura. Os valores apresentados correspondem aos estribos de aço A500 de diâmetro 10mm espaçados 100mm.

$$K_{tr} = 0.45 \frac{A_{tr} f_y}{10.5 s n} = 0.45 \times \frac{78.5 \times 435}{10.5 \times 100 \times 2} = 7.31 \text{ mm}$$

O comprimento de amarração é calculado tendo em conta dois fatores: o fator de superfície e o fator de posição do varão. Para o fator de superfície adotamos o valor de 0.8 devido à falta de dados experimentais e o fator de posição do varão corresponde ao valor de 1.0 pois a altura de betonagem abaixo dos varões solicitados não é superior a 300mm. O betão utilizado foi o C30/37 pelo que a resistência à tração média é de 2.9 MPa. O varão GFRP tem uma secção transversal com 201 mm² de área e um módulo de elasticidade de 60 GPa.

$$d_{cs} = \min \left[30 + 10 + \frac{16}{2}; \frac{2}{3} \times 104 \right] = 48 \text{ mm}$$

$$l_d = 0.45 \frac{k_1 k_4}{(d_{cs} + K_{tr} \frac{E_{FRP}}{E_s})} \frac{f_{FRP}}{f_{cr}} A$$

$$l_d = 0.45 \frac{1.0 \times 0.8}{(48 + 7.31 \frac{60}{200})} \frac{840}{2.9} 201 = 1118.2 \text{ mm}$$

A3. Japan Society for Civil Engineering (JSCE)

A norma japonesa começa por calcular a tensão de aderência do betão tendo em conta um fator α_2 que tem em conta a relação entre as tensões de aderência de varões de FRP e de aço. Admitemos que as tensões de aderência registadas no varão GFRP de 16mm correspondem a 70% daquelas registadas para o aço.

$$f_{bod} = \alpha_2 \left(\frac{0.28 f_c'^{\frac{2}{3}}}{\gamma_c} \right) = 0.7 \times \left(\frac{0.28 \times 30^{\frac{2}{3}}}{1.3} \right) = 1.46 \text{ MPa} < 3.2 \text{ MPa}$$

$$C = \min \left[30 + 10 + \frac{16}{2}; \frac{200 - 2 \times (30 + 10 + \frac{16}{2})}{2} \right] = 48 \text{ mm}$$

$$k_c = \frac{C}{d_b} + \frac{(15 \times A_t)}{s \times d_b} \frac{E_t}{E_s} = \frac{48}{16} + \frac{(15 \times 78.5)}{100 \times 16 \times 200} = 3.74$$

Como o valor de k_c é superior a 2.5 o valor a atribuir a α_1 será 0.6.

$$l_d = \alpha_1 \left[\frac{f_{fu}}{4 f_{bod}} \right] d = 0.6 \times \left[\frac{840}{4 \times 1.46} \right] \times 16 = 1384.6 \text{ mm} > 320 \text{ mm}$$

L_b é claramente superior a 20 diâmetros (320mm) pelo que cumpre com a predisposição indicada no regulamento, ou seja, que esta metodologia só se aplica para comprimentos de amarração superiores a 20 diâmetros.

Anexo B

Tabelas e Diagramas adicionais

O anexo B compreende as tabelas e diagramas relacionados com as propriedades dos materiais. A Tabela B. 1 vem complementar os procedimentos relativos ao sistema de aperto utilizado em toda a campanha experimental, abordados no subcapítulo 3.3.1.1.

Tabela B. 1 - Propriedades da resina epóxi

	Tempo de cura (dias)	Temperatura (°C)	Base de aplicação	Tensão (MPa)
Resistência à compressão	1	10	(-)	25 - 35
		23		45 - 55
		30		50 - 60
	3	10		40 - 50
		23		50 - 65
		30		60 - 70
	7	10		50 - 60
		23		60 - 70
		30		60 - 70
Tensão de aderência	1	10	Betão Seco	> 4
		10	Betão Húmido	> 4
		10	Aço	6 - 10
	3	10	Aço	10 - 14
		23	Aço	11 - 15
		30	Aço	13-17

As Figura B. 1, Figura B. 2 e Figura B. 3 são referentes aos diagramas tensão- extensão dos varões GFRP ensaiados. Estas figuras servem de complemento à informação disponível no subcapítulo 3.2.2.

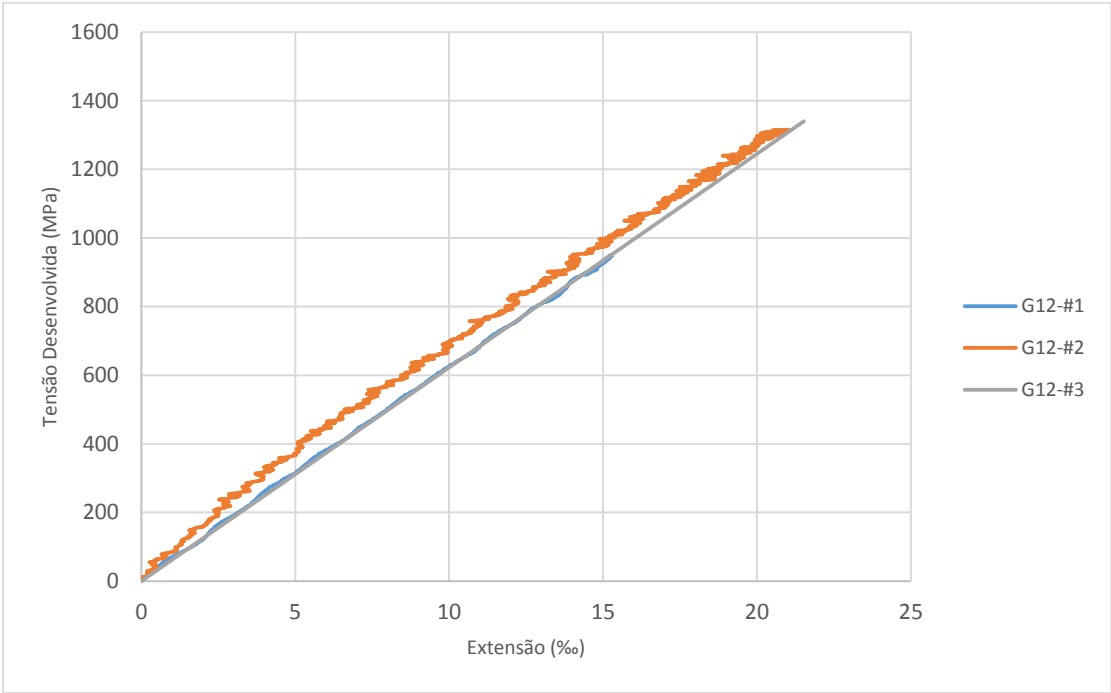


Figura B. 1- Diagrama tensão-extensão relativo ao varão GFRP diâmetro 12

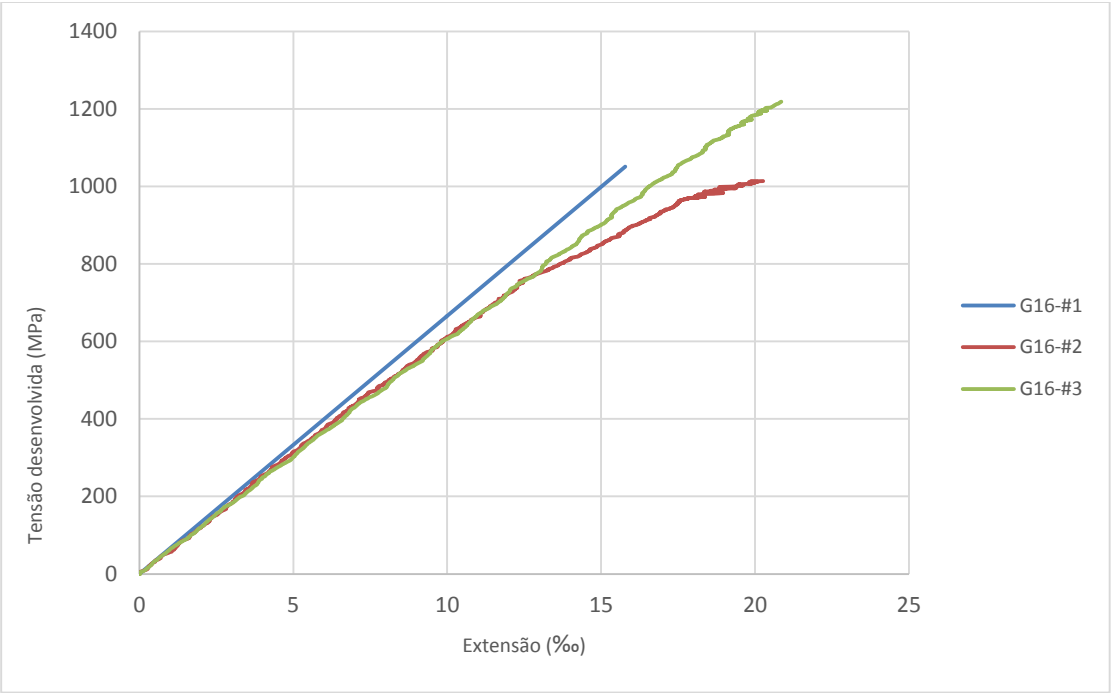


Figura B. 2 - Diagrama tensão-extensão relativo ao varão GFRP diâmetro 16

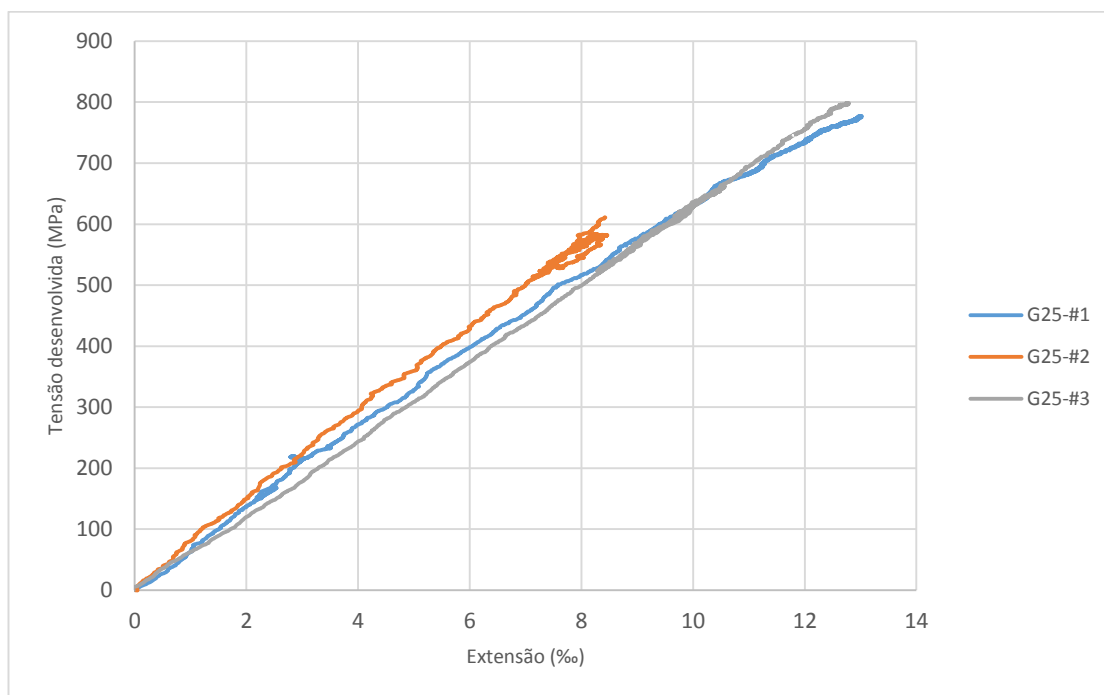


Figura B. 3 - Diagrama tensão-extensão relativo ao varão GFRP diâmetro 25