

BETÃO ARMADO COM VARÕES DE FRP NA CONSTRUÇÃO

PEDRO NUNO SARAIVA TEIXEIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Luís Filipe Pereira Juvandes

JUNHO DE 2022

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2021/2022

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2021/2022 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2022.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha Avó

Any fool can know. The point is to understand.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho apenas foi possível com o contributo positivo de um conjunto de pessoas e empresas aos quais manifesto o meu apreço e sincero agradecimento.

Ao professor Luís Juvandes, pela sua amizade, atenção e orientação que foi fulcral na elaboração deste documento. Por todo o conhecimento transmitido e disponibilidade constante.

Às empresas produtoras de varões FRP, nomeadamente SHOECK, DEXTRA GROUP, PULTRALL, Pultron Composites e Kodiak que facilitaram dados relevantes a este trabalho, pela disponibilidade e colaboração.

À empresa de construção civil portuguesa VHM (Vitor Hugo – Coordenação e Gestão de Projetos), pela colaboração e prontidão com que forneceram dados indispensáveis para este estudo.

Às minhas avós, quero expressar a minha gratidão por terem ajudado a me criar e por todos os ensinamentos passados.

Aos meus pais, por todo o apoio, carinho e preocupação com a minha educação e no meu crescimento como pessoa. Agradeço também por todos os sacrifícios feitos e pelo exemplo que me transmitiram de ambicionar sempre mais.

À minha irmã, que esteve sempre muito presente em várias áreas da minha vida, por toda a sua amizade e carinho.

Ao Xavier Campos, Rafela Domingues e Ana Rita Figueiral quero agradecer toda a paciência, companheirismo, boa disposição e amizade que ajudaram a superar momentos mais stressantes da vida académica.

Ao António Duarte Nunes, Gonçalo Martins, João Macedo e Eduardo Parracho, por me acompanharem durante este percurso da vida, entre outros. Por todas as vivências, conselhos e experiências partilhadas que me formaram como pessoa.

À minha namorada, Carolina, por todo o amor, atenção, preocupação e inspiração. Por tudo o que me ensinou e incentivou a alcançar.

RESUMO

Na sequência do grande movimento de progressão científica das últimas décadas, surgiu uma nova possibilidade à construção tradicional com varões de aço – o betão armado com varões de polímeros reforçados com fibra (FRP). A construção com varões de aço detém uma posição dominante no setor da construção, pelas suas boas propriedades físicas e mecânicas, aliadas a custos de execução que permitem a sua utilização em massa. No entanto, face à exposição a ambientes agressivos, de modo a evitar uma rápida corrosão das armaduras de aço, que levariam à rotura precoce da estrutura, é necessária a utilização de aço inoxidável, extremamente dispendioso.

A opção por varões de FRP surgiu da necessidade de uma escolha economicamente viável para a construção em ambientes agressivos. Para além da sua forte resiliência à ação química, os varões FRP possuem outras propriedades que os tornam interessantes para a construção civil, destacando-se: boas propriedades resistentes, leveza, neutralidade magnética baixa condutividade térmica.

Neste documento, procurou-se realizar um estado atual dos conhecimentos sobre a utilização de varões FRP na construção civil, reunindo todas as informações relevantes presentes na literatura acerca dos mesmos. Desta forma, foram resumidas as propriedades geométricas, físicas e mecânicas destes materiais, com o intuito de apresentar as suas vantagens, desvantagens e diversas aplicações.

Perante a necessidade de criarem-se propostas regulamentares de dimensionamento e uso desses varões para soluções construtivas, este estudo visou também a análise dos documentos “Guidelines” publicados até à data acerca de betão armado com varões FRP. Procurou-se analisar “Guidelines” com origens distintas, nomeadamente o ACI (American Concrete Institute), CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche), JSCE (Japan Society of Civil Engineers) e Fib (Fédération Internationale du Béton), por forma a dotar o presente estudo de maior consistência e abrangência. No entanto, para uma análise de conteúdo mais específico e direcionada ao dimensionamento (ELU e ELS), foi dada preferência à utilização das recomendações do ACI (versão de 2015) por ser a mais recente e completa.

Devido à crescente preocupação com o impacto que o setor da construção tem no ambiente, bem como com os verdadeiros custos desta indústria, cujo apoio em matérias-primas e em recursos naturais é forte e insustentável, procurou-se ter uma opinião sobre esse impacto. Examinando o grau de sustentabilidade desta solução, distinguindo alguns fatores chave, foi possível estabelecer uma comparação com a solução tradicional em varões de aço.

No sentido de avaliar o estado atual do mercado da construção com varões FRP, foram solicitados dados e preços a empresas internacionais, com a intenção de comparar o potencial de mercado desta solução relativamente à tradicional. Isto permitiu avaliar quão uniforme e estandardizado estará o mercado a nível mundial.

Por fim, procedeu-se à interpretação de um caso de estudo que permitisse uma análise da viabilidade económica fidedigna e relevante, apoiada pelos dados fornecidos pela empresa VHM, que permitiram examinar os detalhes associados não só aos custos diretos, mas também aos custos compostos inerentes a esta solução construtiva.

Para além de propor-se como uma súmula dos conhecimentos sobre a técnica de construção com betão armado de varões FRP, este trabalho deixa uma mensagem para futuros progressos de investigação.

Palavras-Chave: Betão Armado, Varões FRP, Modelos de Dimensionamento, Especificações Construtivas, Viabilidade Económica.

ABSTRACT

Following the great scientific progress of the last decades, a new possibility to the traditional construction with steel bars has emerged - the concrete reinforced with fibre reinforced polymer (FRP) bars. Steel bars have a dominant position in the construction sector due to their good physical and mechanical properties, combined with construction costs that allow their mass use. However, in the face of exposure to aggressive environments, in order to avoid rapid corrosion of the steel reinforcement, which would lead to early failure of the structure, it is necessary to use stainless steel, which is extremely expensive.

The option for FRP bars arose from the need for an economically viable choice for construction in aggressive environments. Besides their strong resilience to chemical action, FRP bars have other properties that make them interesting for civil construction, namely: good resistant properties, lightness, magnetic neutrality and low thermal conductivity.

In this paper, an attempt has been made to perform a current state of knowledge about the use of FRP bars in civil construction, gathering all the relevant information present in the literature about them. Thus, the geometrical, physical and mechanical properties of these materials were summarised, with the purpose of presenting their advantages, disadvantages and various applications.

In view of the need to create regulatory proposals for the design and use of these reinforcing bars for construction solutions, this study also aimed to analyse the Guidelines documents published so far about reinforced concrete with FRP bars. The Guidelines from different sources, namely ACI (American Concrete Institute), CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche), JSCE (Japan Society of Civil Engineers) and Fib (Federation Internationale de Beton), were analysed in order to provide a greater consistency and comprehensiveness to this study. However, for an analysis of more specific content and directed to the design (ULS and SLS), preference was given to the use of the recommendations of the ACI (2015 version) for being the most recent and complete.

Due to the growing concern about the impact that the construction sector has on the environment, as well as the true costs of this industry, whose support in raw materials and natural resources is strong and unsustainable, it was sought to have an opinion about this impact. By examining the degree of sustainability of this solution, distinguishing some key factors, it was possible to establish a comparison with the traditional solution in steel bars.

In order to assess the current state of the FRP rebar construction market, data and prices were requested from international companies, with the intention of comparing the market potential of this solution with the traditional one. This allowed to evaluate how uniform and standardised the market will be worldwide.

Finally, a case study was interpreted to provide a reliable and relevant economic viability analysis, supported by the data provided by the company VHM, which allowed examining the details associated not only to the direct costs, but also to the compound costs inherent to this constructive solution.

In addition to proposing itself as a summary of the knowledge about the FRP reinforced concrete construction technique with FRP bars, this work leaves a message for future research progress.

Keywords: Reinforced concrete, FRP bars, Design Models, Constructive Specifications, Economic Viability.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ALTERNATIVA AO BETÃO ARMADO TRADICIONAL	1
1.2. OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	2
2. MATERIAIS DE FRP NA CONSTRUÇÃO CIVIL	3
2.1. MATERIAIS COMPÓSITOS DE FRP	3
2.2. CASOS DE APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO	4
2.2.1. CASO: REFORÇO/REABILITAÇÃO COM SISTEMAS DE FRP	4
2.2.2. CASO: CONSTRUÇÃO COM PERFIS DE FRP	5
2.2.3. CASO: ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO COM VARÕES DE FRP	6
2.3. BETÃO ARMADO COM VARÕES DE FRP	7
2.3.1. VANTAGENS VS DESVANTAGENS	7
2.3.2. PARÂMETROS IMPORTANTES	8
2.3.3. SUSTENTABILIDADE E AMBIENTE	9
2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	10
3. VARÕES DE FRP	13
3.1. CARACTERIZAÇÃO	13
3.1.1. VARIEDADES DE FIBRAS	13
3.1.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS	15
3.1.3. PROPRIEDADES FÍSICAS	16
3.1.4. PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS	17
3.2. PRODUTOS COMERCIAIS	17
3.2.1. REQUISITOS	19
3.2.2. MERCADO DA CONSTRUÇÃO	22

3.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	23
--	-----------

4. BETÃO ARMADO COM VARÕES FRP

4.1. COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS	25
---	-----------

4.1.1. FLEXÃO	25
---------------------	----

4.1.2. CORTE	26
--------------------	----

4.1.3. AXIAL	26
--------------------	----

4.1.4. TORÇÃO	27
---------------------	----

4.1.5. FADIGA.....	28
--------------------	----

4.1.6. ESTÁTICO E DINÂMICO	29
----------------------------------	----

4.2. RESUMO DE MODELOS DE DIMENSIONAMENTO	29
--	-----------

4.2.1. CONDIÇÕES DE ADERÊNCIA BETÃO-VARÃO FRP	29
---	----

4.2.2. MODELOS DE DIMENSIONAMENTO	30
---	----

4.2.2.1. ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE)	31
--	----

4.2.2.2. CNR (ITALIAN NATIONAL RESEARCH COUNCIL)	32
--	----

4.2.2.3. JSCE (JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS)	33
--	----

4.2.3. ESTADO LIMITE ÚLTIMO (ELU) - FLEXÃO.....	33
---	----

4.2.4. ESTADO LIMITE ÚLTIMO (ELU) - CORTE.....	37
--	----

4.2.5. ESTADO LIMITE SERVIÇO (ELS)	39
--	----

4.3. ASPETOS CONSTRUTIVOS.....	41
---------------------------------------	-----------

4.3.1. RECOBRIMENTO.....	41
--------------------------	----

4.3.2. ESPAÇAMENTO ENTRE VARÕES.....	42
--------------------------------------	----

4.3.3. EFEITOS DE SOBREPOSIÇÃO	42
--------------------------------------	----

4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
---------------------------------------	-----------

5. VIABILIDADE DO BETÃO ARMADO COM VARÕES FRP

5.1. ANÁLISE DOS PROCEDIMENTOS DE CONSTRUÇÃO	45
---	-----------

5.1.1. MANUSEAMENTO, ARMAZENAMENTO E COLOCAÇÃO	45
--	----

5.1.2. CONTROLO DE QUALIDADE	46
------------------------------------	----

5.2. ANÁLISE DE CUSTOS	47
-------------------------------------	-----------

5.2.1. DIRETO	47
---------------------	----

5.2.2. COMPOSTO	48
-----------------------	----

5.3. CASO PRÁTICO	49
5.3.1. DADOS INICIAIS.....	49
5.3.2. CÁLCULO E RESULTADOS.....	50
5.3.3. CUSTO	52
5.4. VIABILIDADE EM PORTUGAL	53
5.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
 6. CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS	 55
6.1. CONCLUSÕES RELEVANTES	55
6.2. FUTUROS DESENVOLVIMENTOS.....	57
 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 59
 A1. ANEXO 1: FICHAS TÉCNICAS DE VARÕES COMERCIAIS	 61
A2. ANEXO 2: DESENHOS ESTRUTURAIS DE BETÃO ARMADO DA VIGA	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. – Exemplo de aplicações de reforço exterior com FRP	4
Figura 2.2. – Exemplo de aplicações de perfis pultrudidos de GFRP	6
Figura 2.3. – Exemplo de aplicações de estruturas armadas com varões de GFRP	7
Figura 3.1 – Diagrama Tensão-Extensão de fibras FRP e Aço	13
Figura 4.1. – Curvas experimentais de carregamento de colunas armadas com aço e GFRP	27
Figura 4.2. – Tensão média de aderência em função do tipo de FRP	30
Figura 4.3. – Tensão média de aderência em função do tipo de superfície	30
Figura 4.4. – Rotura à flexão por esmagamento do betão, (ACI 2015)	35
Figura 4.5. – Rotura à flexão equilibrada, (ACI 2015)	35
Figura 4.6. – Rotura à flexão por rompimento da armadura, (ACI 2015)	35
Figura 5.1. – Exemplos de montagem de armaduras com varões FRP	46
Figura 5.2. – Secção transversal da viga	49
Figura 5.3. – Modelo de cálculo	50
Figura 5.4. – Resultados de dimensionamento com varões de Aço e com GFRP	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. – Características de Fibras	14
Tabela 3.2. – Coeficientes de Expansão térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	16
Tabela 3.3. – Densidade Varões FRP e Aço (g/cm^3)	16
Tabela 3.4. – Propriedades técnicas dos Varões Comerciais	17
Tabela 3.5. – Dados comerciais dos Varões	18
Tabela 3.6. – Requisitos e métodos de ensaio das propriedades mecânicas	19
Tabela 3.7. – Requisitos e métodos de ensaio das propriedades geométricas e físicas	20
Tabela 3.8. – Requisitos e métodos de ensaio de outras propriedades	21
Tabela 4.1. – Fator de segurança de condições de exposição ambiental (ACI, 2015)	31
Tabela 4.2. – Fator de segurança parcial (γ_m)	32
Tabela 4.3. – Fator de conversão ambiental (η_a)	32
Tabela 4.4. – Fator de conversão devido a efeitos a longo prazo (η_1)	33
Tabela 4.5. – Fator de segurança (JSCE, 1997)	33
Tabela 4.6. – Modo de rotura e Fator de redução da resistência (ϕ)	34
Tabela 4.7. – Recobrimento sugerido para vigas e lajes (ISIS 2007)	41
Tabela 4.8. – Recobrimento de betão base (JSCE 1997)	42
Tabela 5.1. – Custos varões de Aço e de GFRP	48
Tabela 5.2. – Custos de betão e cofragens	48
Tabela 5.3. – Custos indiretos	49
Tabela 5.4. – Ações consideradas no dimensionamento	50
Tabela 5.5. – Quantidade de Armadura de aço da viga	52
Tabela 5.6. – Quantidade de Armadura de GFRP da viga	52

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

Símbolos

K - Coeficiente de transmissão térmica ($W/m^2\text{°K}$)

E - Módulo de elasticidade (GPa)

ρ – Densidade (Kg/m^3)

b_w – Largura da escora

d – Distância entre a fibra comprimida e o eixo neutro

f'_c - Resistência do betão à compressão (ACI)

f_{ck} - Resistência característica do betão à compressão

$f_{f,s}$ - Tensão de cargas prolongadas

f_{fu} - Resistência à tração de cálculo

f_f - Tensão da armadura longitudinal

f_{fv} - Tensão da armadura de corte

f_{bk} - Resistência característica à tração do betão fornecido pelo fabricante

M_u - Momento de cálculo

M_n - Momento resistente

M_{cr} - Momento crítico

M_{sv} - Momento de serviço

I_e - Inércia efetiva

I_{cr} - Inércia crítica

I - Inércia geométrica

V_u - Esforço transversal de cálculo

V_n - Esforço transversal resistente

V_c - Resistência ao corte do betão

V_f - Resistência ao corte da armadura transversal

ρ_f – Percentagem de armadura

ρ_{fb} - Percentagem de armadura equilibrada

Φ - Fator de redução da resistência

ζ - Factor dependente de tempo para cargas prolongadas

ε_{cu} - Extensão última do betão

ε_{fu} - Extensão de rotura de cálculo

$A_{f,min}$ - Armadura mínima

C_b - Profundidade da linha neutra

k - Razão entre profundidade do eixo neutro e da profundidade da armadura

r_b - Diâmetro do raio de curvatura da dobragem dos varões

d_b - Diâmetro dos varões

w - Abertura de fendas máxima

k_b - Coeficiente do grau de aderência betão-varão

C_{min} - Recobrimento mínimo

C_0 - Recobrimento base

Abreviaturas

FRP – Fiber Reinforced Polymer

ACI - American Concrete Institute

CNR – Italian Research Council

JSCE – Japan Society of Civil Engineers

ISIS – Intelligent Sensing for Innovative Structures

Fib - Federation Internationale de Beton

EBR – Externally Bonded Reinforced

NSR – Near Surface Mounted Reinforcement

ELU – Estado Limite Último

ELS – Estado Limite de Serviço

1

INTRODUÇÃO

1.1. ALTERNATIVA AO BETÃO ARMADO TRADICIONAL

O Betão armado tradicional é um sistema estrutural que revolucionou o setor da construção no século XX. A incorporação de varões de aço no betão ofereceu uma solução eficaz para os problemas estruturais do betão, pois embora este apresente uma boa resistência à compressão, praticamente não resiste a esforços de tração, que levam à sua fissuração e rotura. Com a incorporação de varões de aço (material com uma boa resistência à tração), foi possível colmatar esta fragilidade em termos gerais, permitindo casos mais arrojados de ações/solicitações nas estruturas.

No entanto, o betão armado tradicional possui algumas fragilidades. Em situações onde sejam comprometidas as propriedades mecânicas do aço, a estabilidade estrutural será consequentemente posta em causa. Isto acontece quando se dá a corrosão das armaduras, nomeadamente, em ambientes quimicamente agressivos onde a fendilhação do betão levará à corrosão das mesmas, originando uma rápida deterioração da estrutura. Para além disso, certas propriedades físicas do aço podem ser indesejadas para determinadas construções, como a sua condutibilidade e falta de neutralidade magnética.

Com os notáveis avanços tecnológicos que temos sofrido nas últimas décadas, surgiu uma alternativa ao betão armado tradicional que vem diretamente solucionar as fragilidades acima mencionadas – betão armado com varões FRP (“Fiber Reinforced Polymers”). Estes materiais alcançaram já uma notável presença na indústria aeroespacial, tendo começado a ser viabilizados no setor da construção na década de 90, com o aparecimento dos primeiros manuais de dimensionamento com FRP. As características mais vantajosas dos varões de FRP são: elevada resistência longitudinal à tração, leveza, tolerância à fadiga, resistência à corrosão, baixa condutividade elétrica e térmica e neutralidade magnética.

Atualmente, estes varões podem ser constituídos por fibras de carbono (C), Aramida (A), Vidro (G) e Basalto (B). Cada uma destas fibras apresenta propriedades distintas, levando a que a sua escolha e implementação impliquem considerações estruturais diferentes. O facto de a sua utilização na construção ser bastante recente em comparação com a alternativa tradicional, leva a uma desconfiança no seu uso da parte de muitos projetistas, bem como falta de conhecimento necessário à sua aplicação. Assim, para que alcancem uma maior presença no setor da construção civil é necessário que haja uma standardização da produção dos varões, fichas técnicas com especificações mínimas de projeto, regulamentos para a aplicação estrutural e maior clareza sobre as implicações económicas, ambientais e sustentabilidade da escolha desta solução.

1.2. OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO

A crescente aplicação de varões FRP na construção, aliada ao aumento da investigação a nível internacional e às inegáveis potencialidades da utilização destes componentes em betão armado, motivaram a realização deste estudo, com o intuito de proporcionar uma visão atualizada e objetiva da aplicação de varões FRP em betão armado.

Desta forma, pretende-se aumentar a exposição desta solução construtiva, oferecendo de forma clara as informações relevantes neste domínio, que poderão induzir maior confiança e interesse à sua aplicação em Portugal.

Destacada a motivação, foram estabelecidos os aspetos fundamentais a serem abordados no presente documento, focando não só todas as questões relevantes ao dimensionamento, mas também os custos envolvidos e as perspetivas de mercado atuais. Pode-se resumir os principais objetivos deste estudo nos seguintes pontos:

- Síntese da presença dos materiais FRP na construção civil, expondo as suas possíveis aplicações e respetivas vantagens e desvantagens, incluindo questões de sustentabilidade.
- Identificação dos varões FRP na vertente da caracterização das principais propriedades e resumo dos produtos comerciais atualmente disponíveis.
- Compreensão da técnica do betão armado com varões FRP em termos de comportamento mecânico face a diversas solicitações estruturais e da análise dos modelos de dimensionamento actuais (ACI, CNR, JSCE e Fib) de forma a indicar diretrizes claras para a sua utilização.
- Estudo da viabilidade de betão armado com FRP em Portugal, salientando a implicação na análise de custos.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

O presente documento encontra-se organizado em 6 capítulos, com as respetivas referências e anexos. No *capítulo 1* é introduzida, de forma breve, a alternativa ao betão armado tradicional, identificam-se a motivação e os objetivos do trabalho e expõe-se a organização da dissertação que é detalhada nos capítulos subsequentes. O *capítulo 2* apresenta um estado atual dos conhecimentos no domínio da aplicação dos materiais compósitos FRP na construção, ilustrados com casos práticos reais, priorizando o betão armado com varões FRP e a descrição das suas vantagens e desvantagens, parâmetros importantes e a análise da sua sustentabilidade. O *capítulo 3* caracteriza os varões FRP em detalhe, expondo as variedades de fibras existentes, assim como as diversas propriedades físicas, mecânicas e geométricas. Inclui também a exposição dos requisitos necessários para os fabricantes e uma análise da posição desses no mercado da construção. O *capítulo 4* divide-se em 3 subcapítulos, começando com o estudo da resposta das estruturas armadas com varões compósitos de FRP face às várias solicitações com que se deparam as estruturas (flexão, corte, axial e torção), assim como o seu comportamento estático, dinâmico e à fadiga. Posteriormente, são apresentados três modelos de dimensionamento atuais (ACI, CNR e JSCE) e detalhados os aspetos principais do dimensionamento ao ELU e ELS pelo ACI. O último subcapítulo aborda os aspetos construtivos a serem considerados na realização de projeto com estes varões. O *capítulo 5* apresenta uma análise dos procedimentos a serem levados em consideração durante a construção, seguido de uma análise de custos baseada num caso prático. Este capítulo termina com uma reflexão sobre a viabilidade em Portugal do uso desta alternativa ao betão armado tradicional. Por último, o 6.º *capítulo* pretende, com base no que foi estudado, apresentar as conclusões relevantes e indicações para futuros desenvolvimentos.

2

MATERIAIS DE FRP NA CONSTRUÇÃO CIVIL

2.1. MATERIAIS COMPÓSITOS DE FRP

Os FRP (“Fyber Reinforced Polymers”) fazem parte de uma subclasse de materiais, normalmente denominados de compósitos. Estes são definidos como materiais criados a partir da junção de dois ou mais materiais diferentes de modo a criar um novo que assimile um conjunto de propriedades desejáveis dos seus materiais constituintes. Os varões FRP para construção são compostos essencialmente por dois materiais diferentes – as fibras e a matriz. É possível obter vários varões diferentes variando o tipo de fibra e/ou o tipo de matriz, o que influenciará o comportamento do material compósito física, geométrica e mecanicamente [5]. É assim relevante analisar as propriedades dos diferentes materiais, de modo a melhor entender as condicionantes e vantagens do uso de cada, o que proporcionará uma boa “Guideline” para a sua escolha adequada e implementação em casos reais (abrangendo tanto o aspeto económico, como o aspeto funcional).

O interesse em materiais compósitos FRP começou em meados do século XX com a sua descoberta e veio a estabelecer-se na indústria desde então, tendo tido um forte crescimento durante a Guerra fria, devido à sua utilidade na indústria aeroespacial, face à sua resistência e leveza.

A empresa “Owens Corning”, sedeadada nos EUA, foi pioneira no desenvolvimento de métodos de produção destas fibras, tendo feito a sua primeira patente em 1936. Ao longo deste século, a produção de polímeros aumentou exponencialmente com a crescente necessidade destes produtos em várias indústrias, sendo que por volta de 1970 atingiu o seu pico ao superar a produção mundial de aço.

Rapidamente se tornou evidente o seu potencial para aplicação no setor da construção Civil, no entanto, embora já existisse bastante investigação sobre estes materiais compósitos, estavam por estabelecer normas de dimensionamento que permitissem a sua aplicação. Com o aparecimento dos documentos de dimensionamento desenvolvidos pela “American Concrete Institute (ACI)” [1], pelo “Japan Society of Civil Engineers (JSCE)” [4] e pelo “Italian National Research Council (CNR)” [3], tornou-se possível a utilização de varões de FRP em estruturas de betão armado. Nas últimas décadas, o aumento da investigação do comportamento destes materiais compósitos no setor da construção civil tem levado ao melhoramento dos documentos de orientação para a execução de estruturas de betão armado com FRP, motivando cada vez mais empresas a investirem na produção destes materiais para fins de construção. Isto também se deve à sua versatilidade, dado que as suas aplicações vão desde o dimensionamento de uma estrutura de raiz à reabilitação e reforço de estruturas existentes.

2.2. CASOS DE APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO

2.2.1. CASO: REFORÇO/REABILITAÇÃO COM SISTEMAS DE FRP

Com o decorrer dos anos, a degradação das estruturas é inevitável, sendo necessário tomar medidas quando estas atingem um ponto crítico onde a segurança da sua utilização começa a ficar comprometida.

A técnica de reforço por colagem exterior de Sistemas Compósitos de FRP tem-se vindo a revelar uma opção viável no reforço e reabilitação estrutural com inegáveis vantagens em termos de durabilidade, facilidade de aplicação e comportamento mecânico. A sua utilização em obras de reabilitação tem vindo a aumentar, devido ao facto de esta representar uma alternativa mais económica e prática do que as técnicas tradicionais de reforço estrutural. Para que a implementação desta técnica seja bem-sucedida é fulcral que a sua conceção em projeto e execução em obra sejam corretas, respeitando as condicionantes estudadas.

Em termos gerais, existem duas técnicas principais de aplicação do FRP no reforço/reabilitação – a colagem EBR (“Externally Bonded Reinforcement”) e colagem NSR (“Near-surface Mounted Reinforcement”). Mais recentemente, outras estão em desenvolvimento, sem ou com pré-esforço. A escolha do tipo de técnica a aplicar depende do tipo de reforço que se pretende executar, podendo este ser à flexão, corte ou por confinamento [7]. Na Figura 2.1 ilustram-se alguns exemplos de obras de reforço/reabilitação com laminados de FRP pelas duas técnicas.



a) Condomínio Residencial, São Paulo, EBR [29]



b) Aeroporto Sá Carneiro, Porto, EBR [30]



c) Viaduto Ponte Vasco da Gama, Lisboa, EBR [31]



d) Apartamento Bellavista, Den Haag, NSM [32]

Figura 2.1 – Exemplo de aplicações de reforço exterior com FRP

Existem dois sistemas distintos de comercialização de compósitos FRP para Sistemas de colagem exterior, o Pré-Fabricado e o Curado “in situ”.

O compósito FRP integrante dos sistemas Pré-Fabricados provém da impregnação de um conjunto de feixes de fibras contínuas numa resina termoendurecível, que é consolidada por um processo de pultrusão, permitindo o controlo da espessura e largura do produto em fábrica, descartando assim a

necessidade de ser efetuada polimerização em obra. Este produto é normalmente denominado de Laminado (“Laminate” ou “Strips”).

Por outro lado, no sistema Curado “in situ” são comercializadas Mantas ou Tecidos. Estes vêm em vários tamanhos, larguras e espessuras, devendo posteriormente ser impregnados em obra com uma resina termoendurecível. É necessário garantir que esta é aplicada correta e uniformemente e que o processo de cura decorre em condições apropriadas. Ou seja, neste caso, não é vendido um compósito FRP, mas sim os materiais necessários para o seu fabrico e implementação em obra através da aplicação da resina. As Mantas são constituídas por fibras unidirecionais ou multidirecionais (fibras interlaçadas em direções perpendiculares ou até mesmo em várias direções), sendo relevante mencionar que a resistência mecânica se dá no sentido das fibras da Manta, aspeto fulcral a considerar na sua aplicação e dimensionamento [37].

2.2.2. CASO: CONSTRUÇÃO COM PERFIS DE FRP

Os perfis de FRP, sobretudo os com fibra de vidro (GFRP), possuem bastante potencial para a aplicação na construção devido a um conjunto de características como a sua leveza, resistência, boas propriedades isolantes e eletromagnéticas, durabilidade em ambientes agressivos e rapidez de instalação.

As suas condicionantes de aplicação prendem-se pela sua reduzida rigidez, que dá origem a elevada deformabilidade, condicionando assim o dimensionamento para Estado Limite de Serviço (ELS). Além disso, estes perfis apresentam uma notável suscetibilidade a fenómenos de instabilidade. Uma reduzida relação rigidez/resistência torna estes propensos a encurvadura elástica. Desta forma é aconselhado efetuar análises lineares de estabilidade dos perfis de FRP quando estes estejam submetidos a tensões de compressão e/ou flexão, de modo a identificar os modos de encurvadura.

A presença de fibras de vidro na direção longitudinal dos perfis faz com que as suas paredes tenham um comportamento ortotrópico, o que torna mais complexa a determinação da carga crítica de encurvadura. Além disso, secções de parede fina aberta possuem reduzida rigidez à torção e ao empenamento, comparativamente a secções fechadas. Com uma elevada relação entre o módulo de elasticidade longitudinal e o módulo de distorção, a contribuição da deformação por corte em vigas não pode ser desprezada.

A produção dos perfis de GFRP é feita por um processo denominado de pultrusão, combinando filamentos contínuos aglomerados em mechas e mantas de fios, que são embebidos numa matriz de resina termoendurecível. Este processo é composto por duas fases: inicialmente impregna-se as fibras de reforço e produz-se a forma final em molde, posteriormente, solidifica-se a matriz no molde de forma a obter o perfil com as dimensões desejadas.

Embora o dimensionamento dos perfis em GFRP para completa substituição dos tradicionais perfis em aço apresente alguns desafios, apresentam-se como uma solução muito viável para elementos não estruturais ou estruturas secundárias como escadas, isolantes, painéis de fachada e plataformas. Confirma-se também a sua utilidade em algumas aplicações em estruturas de edifícios, coberturas e pontes pedonais. Assim, podemos afirmar que em determinados contextos, a utilização de estruturas mistas de FRP-Betão como elemento resistente à tração pode ser bastante viável, especialmente no reforço de estruturas, [35].

O conjunto de imagens que constituem a Figura 2.2. ilustram exemplos de aplicações de perfis pultrudidos de GFRP.



a) Torre de arrefecimento, [33]



b) Asnas de cobertura, [34]

Figura 2.2. – Exemplo de aplicações de perfis pultrudidos de GFRP

2.2.3. CASO: ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO COM VARÕES DE FRP

Nas últimas décadas, com o surgimento de manuais de dimensionamento para estruturas com varões de FRP, a aplicação destes varões na construção civil tem aumentado. Estes varões apresentam uma boa resistência, leveza e um excelente comportamento a ambientes agressivos, sendo esta uma das principais razões que leva à sua ponderação na substituição dos tradicionais varões de aço. A utilização de varões de aço em ambientes agressivos é possível, mas condicionada pela utilização de aço inoxidável ao revés do aço normal, sendo o preço de mercado do aço inoxidável exorbitantemente maior. Desta forma, em grandes obras com exposição a condições agressivas, a sua utilização revela-se bastante dispendiosa, inviabilizando a sua utilização. Bons exemplos destas situações são pontes, obras portuárias e plataformas petrolíferas. Segundo Sonnenschein et al. [12], cerca de dois terços dos casos de degradação e desabamento de pontes na Alemanha são devidos à corrosão por penetração de cloretos. Assim, a utilização de varões de FRP surgiu como uma alternativa, permitindo que a estrutura cumpra a sua função eficazmente num tempo de vida aceitável, mantendo os custos de construção baixos.

Por outro lado, o facto de os varões de FRP serem heterogéneos, as fibras apresentarem boa resistência unidireccionalmente e possuírem um baixo módulo de elasticidade leva a que a sua aplicação tenha que ser devidamente ponderada e rigorosa, tanto em fase de projeto como em fase de construção. Por esta razão, e por ser ainda um material relativamente recente na construção civil, a sua utilização é ainda muitas vezes posta de parte por receio e desconfiança da sua capacidade por parte dos projetistas e das respetivas empresas de construção civil. No entanto, com os avanços tecnológicos e a crescente investigação destes varões, a sua implementação tem aumentado nos últimos anos, sendo expectável que ao obterem maior presença no mercado, provocada por uma crescente demanda, que o seu preço se torne cada vez mais competitivo, incentivando cada vez mais o seu uso.

Na Figura 2.3. são apresentados casos reais de pontes armadas com GFRP.



a) Utrecht A27 Lunetten, híbrida de aço e GFRP [28]



b) King's Stormwater Channel Bridge, GFRP [20]



c) West Mill Bridge (Oxfordshire 2002), híbrida de aço e GFRP [17]



d) Friedberg Bridge over B3 Highway, híbrida de aço e GFRP [27]

Figura 2.3 – Exemplo de aplicações de estruturas armadas com varões de GFRP

2.3. BETÃO ARMADO COM VARÕES DE FRP

2.3.1. VANTAGENS VS DESVANTAGENS

As vantagens da utilização de varões de FRP na construção com betão armado são, na sua maioria, características destes materiais que oferecem soluções para problemas da utilização de varões de aço. Os varões de FRP possuem elevada resistência longitudinal à tração, leveza, baixa condutividade térmica e elétrica, neutralidade magnética, tolerância à fadiga e resistência à corrosão em ambientes agressivos, [24].

A sua leveza permite que o seu transporte seja facilitado, assim como o seu manuseamento e colocação em obra. Isto traduz-se numa redução do tempo necessário para a disposição das armaduras, agilizando todo o processo de montagem das mesmas.

Propriedades como a sua elevada resistência longitudinal à tração e tolerância à fadiga são benéficas para o dimensionamento com estes varões, permitindo garantir uma estrutura com boas capacidades mecânicas a curto e longo prazo. Especificamente, uma boa resistência à fadiga torna estes varões capazes de aguentar esforços repetitivos num longo ciclo de vida, o que os torna ideais para aplicações como tabuleiros de pontes.

A sua baixa condutividade térmica e elétrica e neutralidade magnética fazem destes materiais a escolha ideal em situações onde estas propriedades sejam requeridas, como, por exemplo, em estruturas de determinados edifícios destinados a investigação científica.

A resistência à corrosão em ambientes agressivos é, possivelmente, a propriedade mais interessante destes varões, visto que os torna aptos para situações correntes onde os tradicionais varões de aço não se comportam bem. Destas destacam-se: estruturas próximas de ambientes marítimos, de solos agressivos e ambientes químicos; elementos estruturais esbeltos e em obras onde não possa ser garantida uma boa qualidade do betão.

Os varões FRP são mais facilmente demolidos por maquinaria do que os varões de aço, o que os torna especialmente aptos para aplicação em estruturas temporárias, como, por exemplo em construções de vias subterrâneas.

Apesar das inúmeras vantagens que os varões compósitos de FRP possuem, algumas das suas características levantam problemas ao dimensionamento. Embora apresentem uma boa resistência à tração, esta dá-se apenas no sentido das fibras do varão (unidireccionalmente), tornando estes mais frágeis a esforços que atuem perpendicularmente à orientação das fibras.

Alguns varões, sobretudo de fibra de vidro, apresentam baixo módulo de elasticidade, que leva a que por vezes seja difícil cumprir o estado limite de serviço (ELS), uma vez que isto se traduz em problemas de aderência betão-varão, que podem levar à fissuração excessiva. Isto obriga a que sejam tomadas precauções extra como a adoção de um comprimento de amarração adequado e disposição de mais armadura, [1].

Os varões compósitos de FRP são compostos não só pela respetiva fibra, mas também por uma resina, sendo que situações como a exposição a temperaturas elevadas afetam o comportamento desta, na medida em que reduzem a capacidade de aderência ao betão, condicionando o comportamento resistente da estrutura. Desta forma é necessário tomar precauções que permitam proteger a armação, de forma a prevenir que este tipo de exposição ocorra.

No espectro global da construção civil, o emprego deste tipo de varões é ainda muito marginal. Isto prende-se com o facto do seu uso ser relativamente recente em comparação ao uso de varões de aço, levando a que exista uma falta de confiança, e por vezes até de capacidade técnica, dos projetistas para a sua aplicação. Com o decorrer dos anos e do progresso científico, esta desvantagem poderá ser mitigada, mas atualmente continua a ser um entrave à utilização de varões FRP em betão armado.

2.3.2. PARÂMETROS IMPORTANTES

Genericamente falando, os varões de FRP possuem um comportamento semelhante aos varões de aço em estruturas de betão armado. No entanto, há diferenças entre estes dois produtos, nomeadamente, o reduzido módulo de elasticidade dos varões de FRP (sendo cerca de 3 a 10 vezes inferior dependendo do tipo de aço e de fibra), o seu comportamento linear elástico até à rotura, o FRP ser um material anisotrópico e apresentar resistência sobretudo na direção das fibras (unidireçãoais) o que implica sejam adotadas medidas diferentes no dimensionamento. É importante ter em consideração as diferentes propriedades mecânicas e físicas das diferentes fibras com as quais se podem fabricar varões FRP, sendo que, por exemplo, os varões de fibra de carbono (C) são capazes de possuir um módulo de elasticidade três vezes superior aos de fibra de vidro (G), o que terá um notável impacto no dimensionamento da estrutura.

Existem três modos de ruína de elementos estruturais armados com varões FRP, nomeadamente a rotura da armadura, o esmagamento do betão e a rotura por perda de aderência. A rotura da armadura com varões FRP dá-se num curto espaço de tempo e leva à total quebra da estrutura, no entanto, pode ser sinalizada pela aparição de fendas extensas. Por outro lado, a ruína por esmagamento do betão possui comportamento plástico antes do momento de rotura, tornando este modo de ruína o mais desejável, por

ser mais facilmente identificável. A rotura por perda de aderência ocorre quando a tensão de aderência é inferior à tensão máxima aplicada, expondo o betão à tração (esforço ao qual não apresenta boa resistência), [1].

Para evitar a ocorrência de rotura, seja ela de que modo for, é necessário tomar medidas preventivas que tenham em consideração as fragilidades acima mencionadas, nomeadamente:

- Adoção de sistemas híbridos com varões de aço e FRP, priorizando a colocação de varões de aço no interior da estrutura e de FRP no exterior
- Confinamento do betão estrutural onde este é mais comprimido, aumentando assim a ductilidade
- Utilização de betão de alta resistência que permite um maior aproveitamento das capacidades resistentes dos varões FRP, aumentando a rigidez das secções fendilhadas
- Adoção de um coeficiente de segurança maior do que o do aço, permitindo assim anular a possibilidade de rotura instantânea provocada pela inexistência de comportamento plástico dos FRP
- Aplicação de pré-esforço nos varões FRP, permitindo uma redução da deformação quando sujeito à flexão

Segundo estudos realizados por vários autores, [36] a aderência constitui um dos aspetos 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.

2.3.3. SUSTENTABILIDADE E AMBIENTE

Desde inícios do século XXI, a preocupação com questões ambientais tem vindo a aumentar. A sensibilização da sociedade para problemas como o uso abusivo dos recursos naturais, urbanismo excessivo, poluição nas suas diversas formas, entre muitos outros, tem crescido. A implementação de uma economia circular, caracterizada pela redução da produção de resíduos através da reinserção destes na cadeia de valor, ao revés da tradicional economia linear, é um dos objetivos correntes da União Europeia.

O setor da construção civil, apresentando uma pegada ecológica bastante significativa, acarreta bastante responsabilidade na preservação do mundo como o conhecemos. Assim sendo, torna-se relevante analisar a sustentabilidade da utilização de novos materiais neste setor, até mesmo de um ponto de vista económico, visto que cada vez mais surgem apoios financeiros para empresas com práticas sustentáveis e penalizações para as que praticam atos insustentáveis. Desta forma, a implementação de materiais compósitos de FRP na construção tem de ser analisada e comparada às práticas tradicionais, como a utilização do aço, de modo a conhecer a viabilidade destes a nível ambiental.

Embora o custo de fabricação dos FRP seja maior que o do aço, estes requerem um menor tempo de aplicação na construção, assim como menor manutenção e reparos ao longo do seu ciclo de vida. Assim, a implementação de materiais FRP acaba por se revelar mais eficiente, apresentando menores custos a longo prazo. Apesar de serem mais difíceis de produzir, a sua leveza permite uma redução das emissões de CO₂ no seu transporte, comparativamente ao aço, assim como maior segurança na construção. [10]

Vigas reforçadas com GFRP, BFRP e CFRP apresentam, respetivamente, cerca de 43%, 40% e 39% menos emissões de carbono do que vigas reforçadas com aço, bem como reduções no consumo de energia na ordem dos 47%, 50% e 32%. Outros parâmetros relevantes como impactos na toxicidade humana chegam a revelar uma redução de até 78%, em relação ao reforço tradicional em aço. [22]

A utilização de FRP's na reabilitação de estruturas também contribui para uma reduzida pegada ecológica, uma vez que a demolição e construção de uma nova estrutura tem um impacto consideravelmente maior do que o reforço da mesma, chegando a atingir valores de redução desta pegada entre 14,2% e 73%, dependendo das dimensões e complexidade da estrutura em questão.

Ou seja, a redução do peso total da estrutura, transportes mais rápidos, aplicação mais rápida e simples e o facto de requerer menor manutenção, faz com que a construção com FRP gere menores emissões de carbono e um menor custo do ciclo de vida das estruturas. Isto leva a que os materiais FRP sejam considerados uma solução moderna e mais sustentável.

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O interesse em materiais compósitos FRP começou em meados do século XX com a sua descoberta e veio a estabelecer-se na indústria desde aí, tendo tido um forte crescimento durante a Guerra fria, devido à sua utilidade na indústria aeroespacial, face à sua resistência e leveza.

O seu potencial para aplicação no setor da construção civil, em substratos de materiais diferentes como betão, aço, madeira e pedra, tornou-se evidente, levando à criação e desenvolvimento de documentos com propostas de dimensionamento, nomeadamente o ACI (Americano), o JSCE (Japonês) e o CNR (Italiano). Esses, tornaram mais seguros a aplicação de FRP em betão armado, assim como em situações de reforço e reabilitação de estruturas.

A aplicação de materiais compósitos FRP na construção civil é atualmente diversificada, na reabilitação, na construção de novas estruturas e em situações mistas. Para o reforço/reabilitação de estruturas são utilizadas técnicas de colagem – EBR (“Externally Bonded Reinforcement”) e NSR (“Near-surface Mounted Reinforcement”). O tipo de colagem exterior também varia entre Pré-fabricado (“laminates” ou “strips”) e curado “in situ” (mantas ou tecidos). Esta solução não é invasiva para a estrutura e possibilita o aumento do seu período de vida.

Na construção de raiz ou situações mistas, são usados produtos da família dos perfis em FRP. A produção dos perfis de GFRP é feita por um processo denominado de pultrusão, combinando filamentos contínuos aglomerados em mechas e mantas de fios, que são embebidos numa matriz de resina termoindurecível. É aconselhado efetuar análises lineares de estabilidade dos perfis de FRP quando estes estejam submetidos a tensões de compressão e/ou flexão, de modo a identificar os modos de encurvadura, uma vez que a reduzida relação rigidez/resistência os torna especialmente vulneráveis. Com uma elevada relação entre o módulo de elasticidade longitudinal e o módulo de distorção, a contribuição da deformação por corte em vigas não pode ser desprezada. Este tipo de solução é especialmente apelativo para elementos não estruturais e para estruturas secundárias como escadas, isolantes, painéis de fachada e plataformas.

A utilização de varões de FRP em betão armado tem vindo a aumentar nas últimas décadas, com o desenvolvimento de propostas de dimensionamento. A tradicional solução, varões em aço, embora estruturalmente seja bastante eficiente, não é indicada para certas situações, como ambientes agressivos.

Sendo que os varões FRP, pelas suas características resistentes, oferecem uma boa solução para projetos nestas condições, o interesse na sua utilização tem vindo a aumentar.

As vantagens estruturais dos varões FRP que viabilizam a sua utilização em estruturas de betão armado são a sua leveza, elevada resistência longitudinal à tração e tolerância à fadiga. As suas condicionantes passam pelo facto de a sua resistência ser unidirecional (no sentido das fibras), pelo seu baixo modo de elasticidade e pela fragilidade das resinas polímeras quando expostas a temperaturas mais altas.

O setor da construção civil detém um impacto significativo na utilização dos recursos do planeta, sendo assim bastante importante avaliar a pegada ecológica de novas soluções construtivas. Os materiais compósitos FRP apresentam menores emissões de carbono e reduções no consumo de energia em comparação à alternativa tradicional, o aço. Por outro lado, o seu potencial no setor da reabilitação permite uma redução da pegada ecológica, dado que permitem evitar os desperdícios envolvidos na demolição e reconstrução.

3

VARÕES DE FRP

3.1. CARACTERIZAÇÃO

3.1.1. VARIEDADES DE FIBRAS

Os varões compostos são constituídos por dois componentes, as fibras e a matriz. As fibras compõem entre 30 – 70% do volume do compósito e visam providenciar rigidez mecânica e térmica assim como outras propriedades estruturais necessárias.

A matriz assegura o agrupamento e posição das fibras, ajudando também na aderência ao betão.

É importante garantir a compatibilidade entre a matriz e as fibras, de modo a oferecer um bom desempenho estrutural ao conjunto, desempenhando um papel importante no comportamento tensão-extensão do compósito [7].

As fibras são caracterizadas por terem uma boa resistência, leveza e elevada rigidez. No entanto, para a sua implementação em betão armado é relevante possuir um bom módulo de elasticidade, baixa variação de resistência entre fibras, elevada resistência última, uma extensão na rotura apropriada e boa uniformidade geométrica dos varões.

As principais variedades de fibras FRP utilizadas e disponibilizadas comercialmente são Fibra de Vidro (GFRP), Fibra de Basalto (BFRP), Fibra de Carbono (CFRP) e Fibra de Aramida (AFRP). A Figura 3.1 ilustra os diagramas de tensão-extensão das várias fibras de FRP e do aço (“Steel Reinforcement”), inclusive aço pré-esforçado (“Prestressing steel”). A Tabela 3.1 expõe algumas características das variantes existentes de cada tipo de fibra.

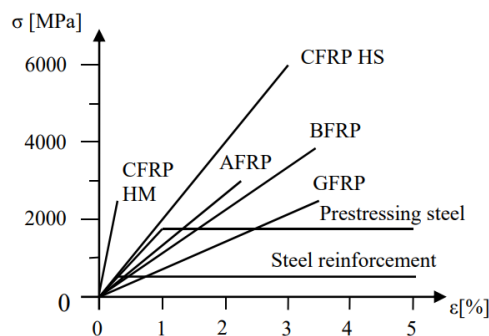


Figura 3.1. – Diagrama Tensão-Extensão de fibras FRP e Aço, [20]

Tabela 3.1 – Características de Fibras, [20]

Fibra	Densidade ρ (Kg/m ³)	Módulo de Elasticidade E (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Extensão (%)
Carbono (Elevada Resistência)	1800	230	2480	11.0
Carbono (Elevada Elasticidade)	1900	370	1790	0.50
Vidro (E)	2540	72	3400	2.12
Vidro (S)	2530	89	4600	1.93
Aramida (kevlar 29)	1440	83	2920	3.50
Aramida (Kevlar 49)	1440	124	3600	2.90
Basalto	2700	90	4000	2.25
Aço	7850	200	500	2.50

i) Fibras de Vidro (GFRP)

As fibras de vidro são as fibras predominantes na indústria de polímeros de reforço, isto porque, para além de conseguirem suportar as exigências necessárias ao uso, são as que oferecem a melhor relação custo eficiência, [38].

A “E-glass” é a mais usada em construção civil, sendo feita com borossilicatos de alumínio-cálcio possui elevada resistência elétrica, sendo também a fibra que apresenta o menor preço.

A “AR-glass” é produzida com silicatos de zircónio o que lhe proporciona resistência a ambientes alcalinos, no entanto, é significativamente mais cara quando comparada às restantes.

A “S-glass” destaca-se pela sua elevada resistência, rigidez, resistência a elevadas temperaturas e à corrosão. É feita com aluminossilicatos de magnésio.

ii) Fibras de Basalto (BFRP)

A produção destas fibras requer apenas como matéria-prima rocha basáltica (rocha ígnea formada através do rápido arrefecimento de lava) esmagada, sendo a sua produção bastante semelhante à das fibras de vidro. Destaca-se pela sua alta resistência a ambientes alcalinos, ácidos e corrosão salina, o que a torna o perfeito candidato para construções portuárias e de pontes. Possui também elevada resistência a fortes amplitudes térmicas (-269 °C a +650 °C). Comparativamente às restantes fibras, é a mais recente sendo que o seu custo é mais elevado do que o das fibras de vidro, mas inferior ao das fibras de aramida e carbono. Nos últimos anos tem vindo a adquirir cada vez mais presença no mercado de varões de FRP para construção de infraestruturas, [38].

iii) Fibras de Carbono (CFRP)

Produzidas a partir de petróleo ou filamentos precursores de poliacrilonitrila, são reconhecidas na indústria pelas suas propriedades altamente resistentes (mecânica, química e termicamente) e,

simultaneamente, possuem um módulo de elasticidade mais elevado que o das restantes fibras, o que a torna um perfeito candidato para o setor de construção civil. No entanto, o seu elevado custo impede que esta seja utilizada frequentemente (tendem a ser de 10 a 30 vezes mais caras que as fibras de vidro), [38].

iv) Fibras de Aramida (AFRP)

Feitas a partir de uma fibra sintética derivada do polímero Poliamida são facilmente degradados face à exposição a raios ultravioleta (UV) o que implica que os varões são revestimentos ou pinturas. Embora possuam o melhor rácio resistência à tensão em relação à densidade (40% menor densidade que fibras de vidro), podem absorver água o que pode reduzir as suas propriedades resistentes, [38].

3.1.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS

i) Comportamento à tração

Os varões de FRP, contrariamente às de aço, não exibem comportamento plástico antes da rutura. O seu comportamento à tensão é linear elástico até atingir a rotura, sendo diferente consoante o tipo de fibra. Como a resina da matriz não exhibe uma resistência significativa, a rigidez e a resistência á tração dependem apenas do volume de fibra presente no varão. As propriedades mecânicas gerais dos diferentes tipos de varões podem ser observadas no item 3.3 (Tabela 3.4). Espera-se que o produtor do varão forneça as suas características obtidas através de ensaios viáveis e com uma amostra significativa de provetes (de acordo com o ACI 440.1R-15 [1], pelo menos 25 provetes devem ser submetidos a ensaio).

ii) Comportamento à compressão

Os varões de FRP não são especialmente recomendados para serem submetidos à compressão. Varões com maior resistência à tração têm também maior resistência à compressão, no entanto, esta é consideravelmente inferior. Quando sujeitos à compressão longitudinal, os modos de ruína ocorrem através de rotura transversal devido à extensão de Poisson, corte das fibras e “microbuckling”. As fibras de Aramida são as únicas com um comportamento não linear à compressão, pelo que não são recomendadas em situações em que tal carregamento ocorra.

As tabelas de propriedades dos varões fornecidas pelos produtores possuem a resistência à compressão a que os mesmos poderão estar sujeitos, indicando também o ensaio realizado para obter esta informação.

ii) Comportamento ao corte

Os varões de FRP resistem bem ao corte (Tabela 3.4) quando ocorre paralelamente à orientação das fibras, no entanto, são consideravelmente mais frágeis se o carregamento for perpendicular. Contudo, as propriedades da matriz e a distribuição local de tensões pode ser feita de modo a atenuar este problema, quando o carregamento é perpendicular às fibras. É também possível que o comportamento ao corte dos varões seja aumentado durante o processo de fabrico dos mesmos, com a adição de um cordão contínuo em volta das fibras longitudinais (ACI 440.1R-15 [1]).

3.1.3. PROPRIEDADES FÍSICAS

i) Coeficiente de expansão térmica

O coeficiente de expansão térmica de barras FRP varia consoante a direção — transversal e longitudinal. Depende do tipo de fibra e do seu volume nas barras, assim como da resina da matriz polímera.

O coeficiente de expansão longitudinal é determinado pelas propriedades da fibra, enquanto o coeficiente de expansão transversal depende das propriedades da resina.

Polímeros reforçados têm uma expansão térmica transversal notavelmente superior à longitudinal, assim como uma expansão térmica maior que a do betão endurecido.

A diferença do coeficiente de expansão térmica entre o betão e os varões de FRP pode causar fendilhação no betão quando exposto a determinados incrementos de temperatura, o que pode dar origem à rutura. No entanto, isto pode ser mitigado se o rácio entre o recobrimento e o diâmetro do varão for igual ou superior a 1.6 (ACI 440.1R-15 [1]). A Tabela 3.2. apresenta os coeficientes de expansão (longitudinal e transversal) do aço, betão e fibras FRP.

Tabela 3.2. – Coeficientes de Expansão térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

Direção	Aço	GFRP	CFRP	AFRP	BFRP	Betão
Longitudinal	11.7	6.0 – 10.0	-9.0 – 0.0	-6 – -2	9.0 – 12.0	7.2 – 10.8
Transversal	11.7	21.0 – 23.0	74.0 – 104.0	60.0 – 80.0		7.2 – 10.8

ii) Densidade

A Densidade dos varões FRP varia entre 1.25 a 2.1 g/cm³, o que representa entre 1/4 a 1/6 da densidade do aço. Em obras em que sejam requeridas quantidades de armadura significativas (devido a altas solicitações), a baixa densidade dos varões FRP em comparação com os de aço poderá traduzir uma vantagem para a implementação dos mesmos, uma vez que o peso da estrutura será consideravelmente reduzido se se optar por armar com varões de FRP. A Tabela 3.3. a seguir apresentada indica as densidades dos diferentes varões FRP e dos varões de aço.

Tabela 3.3. – Densidade Varões FRP e Aço (g/cm³)

Aço	GFRP	AFRP	CFRP	BFRP
7.90	1.25 - 2.10	1.25 - 1.40	1.50 - 1.60	1.90 - 2.10

iii) Condutividade eletromagnética

Contrariamente ao aço, as fibras não são condutoras, o que as torna muito mais indicadas para construções onde seja relevante isolamento magnético e elétrico. As resinas que impregnam as fibras também têm características isoladoras, tornando as barras FRP uma boa solução para alguns casos particulares, onde estas propriedades são requeridas, [38].

3.1.4. PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS

As propriedades geométricas dos varões incluem o seu diâmetro nominal, diâmetro efetivo e o tipo de superfície que este possui – liso, nervurado, revestido com areia, enrolado e entrançado.

Diferentes tratamentos de superfície originam varões com características únicas, como melhor aderência ao betão ou até melhor capacidade de resistência ao corte.

Varões enrolados e entrançados possuem melhor resistência ao corte que os restantes, sendo que os entrançados apresentam ainda melhor resistência que os enrolados.

O diâmetro do varão é também um dado bastante importante a detalhar pelo produtor, por ser tão importante no dimensionamento. O diâmetro nominal de um varão liso é o equivalente ao diâmetro exterior de um varão nervurado, sendo que para os varões nervurados o produtor terá também de mencionar qual o diâmetro interior. Fornecer a área da face de cada varão é também importante para a sua aplicação.

3.2. PRODUTOS COMERCIAIS

A Tabela 3.4 tem como objetivo dar a conhecer, de uma forma eficaz, as propriedades técnicas dos varões comerciais de FRP para construção a nível mundial e as principais características e condicionantes dos seus produtos. A Tabela 3.5 apresenta, de forma sucinta, as informações comerciais destes produtos, como o seu custo, fornecedor, país de origem e existência de representação em Portugal.

Com base nestes dados, é possível estabelecer comparações entre os respetivos produtos de uma forma breve, mas suficientemente abrangente, no que diz respeito a propriedades essenciais ao dimensionamento, assim como uma estimativa dos custos implicados.

Por questões de sigilo comercial, nem todas as empresas são capazes de proporcionar uma estimativa orçamental apropriada, sendo que o preço irá variar de acordo com fatores como o volume da compra, destino da mesma (com os respetivos impostos associados) e frequência de compra (clientes regulares irão beneficiar de uma descida do preço/Kg). Por outro lado, outras consideram que maior investigação e exposição do tema corrente lhes trará benefícios a longo prazo, pelo que não se mostraram relutantes em proporcionar os dados requeridos.

Tabela 3.4. – Propriedades técnicas dos Varões Comerciais

Referência	Diâmetros Nominais	Tipo de Fibra	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Resistência ao Corte (MPa)
Schöck COMBAR	8, 12, 16, 20, 25, 32	GFRP	60	445	150
DURABAR	6, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 29, 32, 41	GFRP	50	920, 910, 900, 890, 880, 860, 840, 820, 770, 740	-
V-ROD	6, 10, 12, 15, 20, 22, 25, 30, 32	GFRP	46	1000, 1000, 1000, 1000, 1000, 950, 850, 800, 800	160
	6, 10, 12, 15, 20, 22, 25, 30, 32, 38	GFRP	50	1000, 1000, 1000, 1000, 1000, 1000, 900, 800, 800, 800	170

Tabela 3.4. – Propriedades técnicas dos Varões Comerciais (cont.)

Referência	Diâmetros Nominais	Tipo de Fibra	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Resistência ao Corte (MPa)
V-ROD	6, 10, 12, 15, 20, 22, 25, 30, 32	GFRP	60	1100, 1100, 100, 1100, 1100, 1100, 1000, 1000	180
	6, 10, 12, 15, 20, 22, 25	BFRP	60	1400, 1400, 350, 1300, 1250, 1200, 1150	230, 220, 220, 210, 200, 190, 180
MATEENBAR	6, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 32	GFRP	46	844, 830, 744, 653, 640, 623, 582, 534	150
	6, 10, 13, 15/16, 19/20, 22, 25, 30, 32	GFRP	60	844, 1000, 1000, 1000, 1000, 1000, 1000, 930, 897	180
KODIAK REBAR	6, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 29	GFRP	40.8	827, 758, 689, 655, 621, 586, 552, 517	124
	6, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 29	BFRP	60	883, 883, 827, 772, 717, 634, 607, 552	124

Tabela 3.5. – Dados comerciais dos Varões

Referência	Fornecedor	País	Preço (€/kg)	Representação em Portugal
Schöck COMBAR	SHOECK	Alemanha	(1)	s/r
DURABAR	DEXTRA GROUP	Tailândia	-	s/r
V-ROD	PULTRALL	Canadá	(2)	s/r
MATEENBAR	Pultron Composites	Nova Zelândia	(3)	s/r
KODIAK REBAR	Kodiak	EUA	-	s/r

(1) O preço dos varões praticado pela “SHOECK” varia entre 23.85€/kg, 20.34€/kg, 15.19€/kg, 15.00€/kg, 14.13€/kg e 13.61€/kg consoante o diâmetro requerido (segundo a ordem da Tabela 3.4).

(2) A “PULTRALL” não revelou os preços praticados, no entanto, ofereceu uma estimativa de que o preço dos varões FRP é de 10% a 15% superior ao dos varões de aço não galvanizado (“Black Steel”).

(3) A “Pultron Composites” indicou que o preço dos varões GFRP ronda os 4000 USD/ton o que equivale, no momento presente, a 3.66 €/Kg. Foi também referido que este preço assume um volume de encomenda elevado, na casa das toneladas.

A “KODIAK” e “DEXTRA GROUP” não ofereceram quaisquer informações, por motivos de sigilo comercial.

3.2.1. Requisitos

Um dos pontos fulcrais para o desenvolvimento da indústria de varões FRP é a normalização dos produtos existentes no mercado. As fichas técnicas atuais apresentam informações dispersas sobre o produto, não havendo coerência mundial sobre que dados fornecer. É, portanto, necessário estabelecer que informações devem ser fornecidas e que requisitos devem ser respeitados, fazendo recurso a testes que se tenham provado fidedignos na avaliação das respetivas características dos materiais.

i) Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas que devem ser devidamente especificadas pelos fabricantes são: a resistência à tração longitudinal, módulo de elasticidade à tração longitudinal, extensão na rotura à tração longitudinal, resistência ao corte, aderência ao betão, fadiga, fluência e relaxação. Todas estas propriedades são relevantes de um ponto de vista de dimensionamento, devendo cumprir os requisitos impostos através dos ensaios criados/adaptados para este tipo de produto, apresentados na Tabela 3.6. de acordo com o ACI 440.3R-12, [2].

Tabela 3.6. – Requisitos e métodos de ensaio das propriedades mecânicas

Propriedade	Método de Ensaio	Requisito
Resistência à tração longitudinal (MPa)	D7205/D7205M	≥ 400 GPa
Módulo de elasticidade à tração longitudinal (GPa)	D7205/D7205M	40 GPa (GFRP) 125 GPa (CFRP)
Extensão na rotura à tração longitudinal (%)	D7205/D7205M	$\geq 0.5\%$ (CFRP) $\geq 1.2\%$ (GFRP)
Resistência ao Corte	D7617/D7617M	125 MPa
Aderência	A944 B.3	≥ 9.7 MPa
Fadiga	D3479 B.7	Em estudo
Fluência	D7337/D7337M	Em estudo
Relaxação	D2990, E328 B.9	Em estudo

ii) *Propriedades geométricas e físicas*

As propriedades geométricas e físicas que devem ser devidamente especificadas pelo fabricante são as descritas na Tabela 3.7 como: o diâmetro nominal, área equivalente, percentagem de fibra de mistura, densidade, temperatura de transição vítrea, coeficiente de dilatação térmica e condutibilidade elétrica e magnetismo. A normalização das propriedades geométricas revela-se por vezes complicada, visto que frequentemente variam conforme a tradição do país de origem, no entanto, desde que sejam devidamente especificadas e cumpram os requisitos impostos pelos métodos de ensaio estudados, esta divergência não será um problema.

Tabela 3.7. – Requisitos e métodos de ensaio das propriedades geométricas e físicas

Propriedade	Método de Ensaio	Requisito
Diâmetro Nominal (mm)	D7205/D7205M	Diâmetro da secção circular correspondente
Área equivalente (mm ²)	D7205/D7205M	Área da secção circular correspondente
Percentagem de fibra na mistura (%)	D3171 D2584	≤ 55% do volume total
Densidade (g/cm ³)	-	Em estudo
Temperatura de transição vítrea (°C)	E1356, E1640, D648, E2092	≥ 100 °C
Coeficiente de dilatação térmica (10 ⁻⁶ /°C)	E831, D696	Em estudo
Condutibilidade elétrica	-	Não condutor
Magnetismo	-	Não magnético

iii) *Outras propriedades relevantes*

Propriedades como o potencial de reciclagem revelam-se importantes de um ponto de vista de sustentabilidade. A reação ao fogo e resistência química devem ser conhecidas, de modo que não

ocorram problemas estruturais por falta de conhecimento prévio na sua aplicação e durante o período de vida da obra. Na Tabela 3.8 resumem-se as outras propriedades relevantes para os varões.

Tabela 3.8. – Requisitos e métodos de ensaio de outras propriedades

Propriedade	Método de Ensaio	Requisito
Reciclagem	De acordo com LAGA	Z0
Reação ao fogo	-	Euroclasse
Resistência química	B.6	Muito boa
Absorção de água	Em estudo	$\leq 1\%$

É também necessário estabelecer controlo sobre a percentagem de materiais de preenchimento e de aditivos utilizados nos varões. Segundo a secção 6 do ACI 440.6-08 (17) (22), só são permitidos preenchimentos compostos por matéria inorgânica como argila Kaolin, carbonato de cálcio e trifosfato de alumínio, sendo que estes não devem exceder 20% da massa da resina constituinte do polímero. A massa de aditivos da resina polímera não deve ultrapassar 10% da sua respetiva massa.

A dobragem de varões FRP deve ser abordada com base em algumas precauções. Deve ser executada previamente à cura completa da resina, dado que após terminada esta, o varão torna-se inflexível. O aquecimento do varão em obra para dobragem não é permitido, visto que pode alterar as propriedades da fibra constituinte, comprometendo a sua função estrutural.

iv) Identificação do varão

Uma questão fundamental para a normalização dos varões no mercado internacional é a existência de um guia de identificação que possa ser adotada pelos diversos produtores. O ACI 440.6-08(17)(22), publicado em 2008 e reprovado em 2017 e 2022 apresenta uma proposta onde devem ser fornecidas as seguintes informações:

- Símbolo de identificação do produtor
- Marcação indicativa do tipo de fibra -vidro (G), basalto (B), carbono (C) ou aramida (A)
- O diâmetro nominal do varão
- Marcação indicativa da resistência à tração garantida
- Marcação indicativa do módulo de elasticidade nominal

As características acima mencionadas são requeridas para cada pacote de barras fornecido, no entanto, o diâmetro nominal do varão deve também ser incluído em cada varão individualmente, de uma forma durável. Isto para prevenir que em obras onde sejam utilizados varões com diâmetros diferentes ocorram misturas no armazenamento, que poderiam levar à utilização do varão errado, comprometendo o correto seguimento do projeto.

Os parâmetros a seguir indicados devem obrigatoriamente ser fornecidos pelo fabricante ao comprador, de modo a assegurar por escrito os resultados do controlo de qualidade, dando assim a possibilidade ao comprador de rejeitar a encomenda, caso se verifique que algo não vai conforme o especificado:

- Data do ensaio e laboratório onde este foi executado
- Resina da matriz, materiais de preenchimento e aditivos

- Guia do método de identificação utilizado e respetiva nomenclatura
- Descrição da amostra testada, nomeadamente do seu comprimento e detalhes de ancoragem
- Descrição dos métodos de ensaio utilizados
- Propriedades geométricas – área e diâmetro nominal
- Propriedades físicas – percentagem de fibra, (referenciada por massa ou volume) temperatura de transição vítrea, dimensões do varão
- Propriedades mecânicas garantidas – resistência à tração, resistência ao esforço transversal, força de aderência ao betão e força de dobragem dos varões.

O documento do CNR-DT 203 [3] apresenta uma proposta para a normalização das fichas técnicas dos fabricantes de varões FRP que pode ser consultada no ANEXO A1.

3.2.2. MERCADO DA CONSTRUÇÃO

Com base na informação dos itens anteriores, podemos estabelecer algumas conclusões:

- Os diâmetros de varões disponíveis variam consoante o produtor. Isto deve-se principalmente ao facto de serem de países diferentes, cada qual com as suas práticas comuns na construção e produção de produtos para tal fim. No entanto, isto não traduz nenhum problema à comercialização internacional, desde que todas as propriedades mecânicas, geométricas e físicas dos varões sejam fornecidas adequadamente.
- Os módulos de elasticidade dos FRP variam entre 40-60 GPa, cabendo ao comprador avaliar qual lhe trará maior custo-benefício no projeto a realizar.
- Um dado que muitos produtores não fornecem (pelo menos nas suas tabelas técnicas) é o coeficiente de dilatação térmica.
- A resistência ao corte varia entre 124-180 MPa.
- A resistência a tração e ao corte são também dados fornecidos que são extremamente relevantes de um ponto de vista de dimensionamento. A resistência à tração varia entre 445-1400 MPa, sendo o valor mais elevado atribuído à fibra de basalto (comparativamente à fibra de vidro). No entanto, esta diferença tem repercussões ao nível de custo, pelo que terá de ser avaliada qual a melhor solução para cada caso, isto porque, mesmo sendo necessário utilizar mais varões de fibra de vidro comparativamente aos de fibra de Basalto, de modo a cumprir com os requisitos estruturais (ELU e ELS), estes podem mesmo assim oferecer uma melhor relação custo-benefício.
- O tipo de resina usada no revestimento das fibras dos varões é também um fator a considerar na escolha do varão comercial, pois estas têm propriedades distintas que irão afetar o funcionamento do varão, tendo especial relevância no que diz respeito à aderência Betão-varão, assim como uma resistência térmica diferente que irá afetar o seu comportamento consoante o ambiente a que forem expostas. Resinas que trazem maiores vantagens ao produto (maior aderência, resistência a ambientes corrosivos, boa amplitude térmica), tornarão o preço/Kg do respetivo varão FRP maior. A empresa “Kodiak FiberglassRebar LLC (USA)” destaca-se neste parâmetro, pois oferece a possibilidade de escolher o revestimento dos seus varões entre Vinyl Ester e Silicate Bond, enquanto outras empresas optam por uma determinada resina para a produção das suas diferentes gamas de varões.

O atual mercado da varões de FRP aparenta estar disperso, sem um código ou uma ficha técnica padrão seguido pelos fornecedores com a identificação das especificações técnicas fundamentais dos produtos.

Existem aproximadamente 27 fornecedores de varões FRP a nível mundial, sendo que aproximadamente metade deles mantém produto em “stock”, enquanto os restantes apenas produzem em resposta a encomendas.

É expectável que, com o decorrer dos anos, o uso de varões de FRP na construção venha a aumentar, especialmente com o corrente aumento do preço do aço. Para além disso, o progresso científico permitirá o melhoramento dos guias de dimensionamento existentes. Assim, o número de aplicações reais irá aumentar, o que por si só criará maior exposição a esta alternativa na construção, fomentando o crescimento da confiança dos projetistas no uso de FRP em betão armado.

3.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os varões FRP são feitos através da junção de fibras com uma resina termoindurecível. As fibras proporcionam a rigidez mecânica ao varão, enquanto a resina contribui para a proteção destes e para a sua boa aderência ao betão. As fibras correntes são as de vidro (G), carbono (C), basalto (B) e aramida (A), possuindo características semelhantes entre si, mas com diferenças que justificam a sua ponderação.

As propriedades mecânicas mais relevantes são o comportamento à tração, à compressão e ao corte. Ao contrário dos varões de aço, os de FRP não exibem comportamento plástico antes da rotura. Varões FRP quase não resistem à compressão, apresentando modos de ruína através de rotura transversal devido à extensão de Poisson, corte de fibras e “microbuckling”. Quando sujeitos a corte, apresentam bom comportamento, desde que este seja paralelo à orientação das fibras.

O coeficiente de expansão térmica de barras FRP varia conforme a direção – transversal e longitudinal. O coeficiente de expansão térmica longitudinal é dado pelas propriedades da fibra, enquanto o transversal depende da resina. A diferença do coeficiente de expansão térmica entre o betão e os varões FRP pode causar fendilhação em determinadas condições. A baixa densidade destes varões representa uma vantagem para o seu dimensionamento, dado que reduz o seu peso estrutural. A neutralidade eletromagnética das fibras polímeras torna-as uma excelente opção para obras onde seja requerido isolamento magnético e elétrico.

Das empresas produtores de varões de FRP construção em betão armado a nível mundial destacam-se neste estudo: SHOECK, DEXTRA GROUP, PULTRALL, Pultron Composites e Kodiak. Através da análise das fichas técnicas fornecidas pelas diversas empresas, pode-se concluir que existe uma notável disparidade entre informações fornecidas e as características dos varões comerciais.

Existe um conjunto de requisitos mínimos mecânicos, físicos, geométricos entre outros que devem ser apresentados pelo fabricante no ato de compra. Estes devem cumprir os requisitos mínimos estabelecidos pelos guias de dimensionamento existentes e comprová-lo através da realização dos métodos de ensaio definidos por estes guias. Consegue-se assim assegurar um bom controlo de qualidade. Também é necessário estabelecer um método universal de identificação dos varões, que inclua informações relevantes como o símbolo de identificação do produtor, tipo de fibra, diâmetro nominal, resistência à tração e módulo de elasticidade.

O mercado dos varões FRP para construção em betão armado encontra-se muito disperso e pouco estandardizado. De momento, existem cerca de 27 fornecedores de varões FRP mundialmente que operam de forma distinta. Apesar de tudo, espera-se que este mercado venha a crescer nas próximas décadas, devido a fatores como o constante aumento do preço do aço e a crescente exposição e investigação científica desta alternativa na construção.

4

BETÃO ARMADO COM VARÕES FRP

4.1. COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS

4.1.1. FLEXÃO

O comportamento de elementos de betão armado com FRP à flexão apresenta três modos de ruína possíveis, [1]:

- Rotura da armadura: caracterizada por ser frágil devido aos varões FRP não exibirem grande comportamento plástico. Pode apenas ser prevista através da observação de fendas extensas no betão e deformação do elemento estrutural.
- Esmagamento do betão: modo de ruína menos perigoso, pois pode ser observado algum comportamento plástico antes do momento de rotura, permitindo que medidas sejam tomadas no sentido de prevenir consequências catastróficas para toda a estrutura e seus utilizadores.
- Perda de aderência: ocorre quando a tensão de aderência é inferior à tensão máxima a que o elemento é solicitado em ELU (Estado Limite Último). No sentido de evitar este modo de ruína, não pode ser considerada no cálculo do momento resistente uma tensão superior à que a aderência do betão-varão permite.

Uma das principais diferenças no comportamento estrutural dos varões FRP em relação aos varões de aço é ditada pela superior relação resistência/rigidez do FRP. Esta condição leva a que a profundidade do eixo neutro seja muito próxima do topo da secção. Isto implica que uma grande parte da secção esteja sujeita à tração, levando a gradientes de extensão e deformações superiores aos existentes nos elementos armados com aço.

Se a capacidade resistente da armadura for utilizada no seu máximo potencial, a secção considera-se sub-armada, pelo que se ocorrer rotura, será por rompimento da armadura. Quando se verifica o contrário, ou seja, quando não é possível solicitar a capacidade resistente máxima da armadura diz-se que a secção está sobre-armada, sendo o modo de ruína expectável o esmagamento do betão. O modo de ruína mais desejável é o esmagamento do betão, se possível o mais próximo possível da rotura das armaduras, de modo a proporcionar uma solução eficaz e equilibrada.

4.1.2. CORTE

O comportamento de elementos de betão armado com FRP ao corte apresenta dois modos de ruína possíveis, [1]:

- Rotura por corte-tração: este modo é caracterizado pela rotura da armadura de corte de FRP, originando maiores deformações que a rotura por corte-compressão. Ocorre quando V_c é inferior a $0.18f_c'b_wd$, levando à rotura da armadura de corte FRP
- Rotura por corte-compressão: Depende apenas das características do betão, ocorrendo quando V_c excede $0.3f_c'b_wd$ através do esmagamento das escoras

A resistência ao corte de uma estrutura de betão armado é determinada pela profundidade da zona comprimida das suas secções. A deterioração de elementos de betão armado com aço quando sujeitos a corte é normalmente impedida pela implementação de armadura transversal, especificamente utilizada para aumentar a resistência ao corte da estrutura, evitando o aparecimento de fendas. Este fenómeno ocorre quando a extensão de plastificação da armadura de flexão é atingida, levando a uma redução rápida da profundidade do eixo neutro (menor área comprimida). Isto não se verifica em elementos armados com FRP, dado que após a fendilhação, sendo a rigidez axial dos varões menor, a área de betão comprimida é consideravelmente menor. Com o aumento da extensão dos varões FRP, a área comprimida não diminui. Ou seja, a degradação de elementos armados com FRP sujeitos ao corte é menos rápida do que a com varões de aço.

Embora tenha sido concluído que elementos armados com FRP sofrem menor degradação ao corte a longo prazo do que varões de aço, estes continuam a apresentar maiores problemas estruturais quando sujeitos a esta solicitação. A presença de esforços de corte nos elementos estruturais impõe a incorporação de estribos. Estes permitem que ocorra transferência de forças para si próprios e para o betão nas zonas onde os esforços por corte provocam fendilhação do betão, prevenindo que estas fendas aumentem.

A resistência de varões FRP é bastante reduzida quando estes são dobrados (processo necessário para a montagem de estribos), contrariamente aos varões de aço que conseguem manter boas propriedades resistentes mesmo quando dobrados. Uma solução possível é a utilização de estruturas mistas, onde os estribos sejam de aço.

4.1.3. AXIAL

O comportamento de elementos de betão armado com FRP ao esforço axial possui um modo de ruína – o esgotamento da capacidade resistente à compressão dos varões FRP [13]. Este modo de ruína coincide com o esgotamento da capacidade resistente do betão quando a estrutura é corretamente dimensionada, levando a que as armaduras de FRP não sejam o elemento condicionante na rotura da estrutura em questão. Colunas armadas com varões FRP sujeitos a esforço axial de compressão apresentam uma resposta que pode ser explicada por três fases, ilustradas na Figura 4.1. [13]:

- Fase Elástica: caracterizada pelo comportamento elástico linear do material (ponto I)
- Fase Inelástica – Fissuração: quando ocorre fissuração por flexão (ponto II)
- Fase Inelástica – Confinamento: caracterizada pelo movimento dos varões que confinam o núcleo de betão (ponto III)

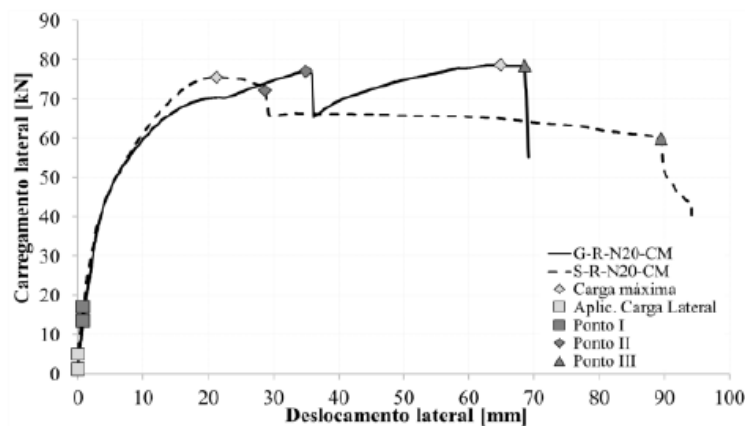


Figura 4.1. – Curvas experimentais de carregamento de colunas armadas com aço e GFRP, [13]

O estudo realizado por Tu et al. [13], onde foi comparado o comportamento estrutural de uma coluna tradicional com varões de aço e uma coluna dimensionada com varões FRP, concluiu que as colunas de betão armado com varões FRP podem apresentar resistências similares às colunas armadas com varões de aço desde que: seja garantida a resistência à flexão equivalente das secções transversais, que o estado limite último seja em par com o esgotamento da capacidade resistente à compressão do betão. Estas condicionantes implicam que seja feito um confinamento adequado do núcleo de betão pela adoção de uma taxa de armadura transversal adequada.

A construção de colunas sujeitas a esforço axial com varões FRP é possível, sob a condição de que o dimensionamento seja feito tendo em consideração as características destes materiais e não apenas pela substituição de varões de aço por varões FRP (garantindo que o esgotamento da capacidade resistente da estrutura é ditado pela rotura das armaduras simultaneamente com o esmagamento do betão). É importante ter em consideração que o dimensionamento com varões FRP resultará numa estrutura com um menor espaçamento máximo entre varões, obrigando à utilização de mais armadura em comparação com o dimensionamento tradicional com varões de aço.

4.1.4. TORÇÃO

O comportamento à torção de uma estrutura de betão armado é um tema bastante complexo, sendo que os resultados dependem de vários fatores, nomeadamente: geometria da secção transversal, tipo de armadura transversal utilizada, tipo de armadura longitudinal utilizada, diâmetro nominal dos varões, espaçamento considerado e ângulo em que as armaduras são dispostas. Diferentes combinações destes fatores geram resultados diferentes, sendo necessário analisar em profundidade as diferentes combinações possíveis, mantendo os restantes fatores iguais, de modo a que se possa retirar conclusões com relevância científica. Segundo [15], foram realizados ensaios explorando as diversas combinações possíveis, de modo a poder concluir de que maneira cada combinação afeta o comportamento da estrutura, quando solicitada à torção. Com base nos ensaios realizados, este estudo piloto concluiu que:

- A utilização de cintas de GFRP unidas por adesivo aumentou tanto a força última de torção como a resistência à torção, não afetando a deflexão vertical e o aparecimento de fendas, comparativamente a cintas em aço. Assim, a utilização de cintas GFRP unidas por adesivo para armação longitudinal e transversal aparenta ser viável.

- O uso de varões GFRP na armadura longitudinal não teve efeito no comportamento à torção, excetuando o caso de vigas com pouca armadura longitudinal e muita armadura transversal, cuja aplicação no mundo da construção não é comum.
- O aumento da percentagem de armadura transversal resultou num aumento significativo na rigidez de torção pós-aparecimento de fendas, na tolerância à deformabilidade devido à torção e na rigidez do elemento. Desta forma a viga conseguiu sustentar maiores deformações e absorver mais energia antes do ponto de rotura.
- Tanto para vigas com secção transversal retangular como com secção transversal em “L”, o aumento da percentagem de armadura transversal resultou num aumento da resistência última ao esforço transversal. No entanto, a forma da secção transversal teve bastante influência neste fator.
- Para vigas com secção transversal retangular, foi registado que o aumento do reforço longitudinal conduziu a uma redução da diferença entre a relação da força última de corte e a percentagem de reforço transversal.

As “Guidelines” de dimensionamento para estruturas de betão armado com varões FRP são, até à data, bastante conservadores no que diz respeito a esforços de torção, o que é explicado pela escassez de estudos nesta vertente complexa do comportamento estrutural. Para que um dimensionamento adequado seja efetuado, sem utilização de fatores de segurança desmesurados, será necessário incidir na investigação de critérios para propostas de “Guidelines” apropriadas.

4.1.5. FADIGA

A rotura por fadiga é caracterizada pela degradação do material face a carregamentos cíclicos aplicados repetitivamente. A fadiga deve ser analisada nas estruturas de betão armado sujeitas a ações cíclicas como são as ações em pontes. O comportamento de um material à fadiga é de especial importância no setor da construção civil, uma vez que pode ditar o período de vida de uma estrutura.

A interpretação dos efeitos da fadiga em varões FRP é complexa, uma vez que estes dependem do tipo de fibra do varão, assim como da resina utilizada. Para além disso, as condições ambientais em que os varões se enquadram também afetam o seu comportamento à fadiga. Uma vez que uma das principais razões para a utilização de varões FRP na construção é o seu bom comportamento em ambientes agressivos, torna-se relevante perceber até que ponto estas condições ambientais mais severas afetaram o seu comportamento quando exposto a forças cíclicas, [14, 18].

Das fibras utilizadas atualmente, as fibras de carbono (CFRP) são as que apresentam melhor comportamento à fadiga. Por outro lado, as fibras de vidro (GFRP) tendem a ser mais suscetíveis à rotura por fadiga. Um fator relevante para alcançar uma boa resistência à fadiga é uma boa aderência betão-varão, que pode ser alcançada através de um tratamento próprio da superfície do varão. É, no entanto, importante mencionar que os varões FRP exibem uma resistência similar à do aço a esforços de fadiga.

O modo de ruína obtido por fadiga é a rotura das fibras por “micro buckling” quando sujeitas a cargas de compressão que excedem a carga crítica das fibras. Investigadores apontam que uma escolha de geometria diferente da barra, assim como o uso de certas resinas de revestimento podem atrasar a propagação das fendas microscópicas, melhorando o comportamento à fadiga destes varões.

4.1.6. ESTÁTICO E DINÂMICO

Durante o período de vida útil de uma estrutura, esta está sujeita a diversas combinações de esforços, aplicados em locais diferentes com intensidades e variações diferentes. O comportamento estático de uma estrutura diz respeito a forças aplicadas de forma isolada e constante, como o peso próprio da estrutura e seus componentes. Por outro lado, o comportamento dinâmico é caracterizado por esforços externos aplicados com intensidades que variam ao longo do tempo, como, por exemplo, a passagem de peões ou automóveis num tabuleiro de uma ponte ou a ocorrência de um sismo.

O comportamento estático de estruturas armadas com FRP é similar ao de estruturas armadas com aço. As principais condicionantes da integridade estrutural a longo prazo dependem principalmente de fatores ambientais, sendo a maior fragilidade a exposição a temperaturas mais elevadas que podem levar a degradação da matriz polímera, [18]. As estruturas armadas com varões de aço também são suscetíveis a aumentos de temperatura, mas apenas quando estes são severos, no entanto, sofrem maior degradação da sua capacidade de resposta a carregamentos estáticos face a ambientes agressivos, quando comparadas com as estruturas em FRP.

Para poder ser feita uma caracterização fidedigna do comportamento dinâmico de estruturas armadas com varões FRP, devem ser realizados ensaios que abranjam diversas frequências e intensidades de forças aplicadas. É também relevante que seja efetuada uma monitorização de várias propriedades da estrutura que podem ser afetadas de maneiras diferentes, como, por exemplo, a aderência betão-varão. De momento, não existem estudos suficientes que possibilitem uma caracterização do comportamento dinâmico de varões FRP em betão armado, pelo que se recomenda uma abordagem conservadora no dimensionamento.

4.2. RESUMO DE MODELOS DE DIMENSIONAMENTO

4.2.1. CONDIÇÕES DE ADERÊNCIA BETÃO-VARÃO FRP

O principal objetivo da incorporação de varões em betão é reforçar o comportamento resistente da estrutura, mais especificamente, melhorar a sua resistência à tração, visto que o betão apenas apresenta boa resistência à compressão. Para tal, é essencial que estes dois elementos funcionem como um só, transferindo os esforços a que estão submetidos entre ambos, de modo a aumentar o espectro resistente da estrutura. Assim sendo, é imperativo garantir que as condições de aderência betão-varão são suficientes.

Um fator influente na aderência dos dois elementos é o módulo de elasticidade do varão. Contrariamente aos tradicionais varões de aço, os varões FRP possuem um módulo de elasticidade significativamente mais baixo (entre 3 e 10 vezes) condicionando as suas condições de aderência ao betão. Contrariamente ao aço, onde o esgotamento da tensão de tração no betão leva à formação de fendas e posteriormente ao esmagamento do betão, nos FRP a perda de aderência é normalmente causada pela fendilhação parcial do betão com o desgaste superficial dos varões (devido a elevada fricção).

No sentido de prevenir a rotura da estrutura por falta de aderência betão-varão, é necessário que sejam tomadas medidas específicas de segurança no dimensionamento. De acordo com [19], os parâmetros que influenciam esta condição são:

- O comprimento dos varões possui uma relação inversamente proporcional à tensão de aderência, ou seja, quanto maior o comprimento do varão, menor a tensão de aderência

- Quanto maior o diâmetro de um varão menor a tensão de aderência. A tensão requerida para provocar deslizamento em varões de diâmetro menor é maior do que para varões de maior diâmetro. Para além disso, durante o processo de cura do betão, existe maior risco da formação de bolhas de ar à volta do varão quando este possui um diâmetro maior, o que reduz a superfície de contacto, prejudicando a aderência
- O tipo de FRP utilizado afeta as condições de aderência, verificando-se que há uma alteração na rigidez da ligação, alterando o ramo ascendente da curva tensão aderência em função do deslizamento, como pode ser verificado na Figura 4.2.
- O tipo de superfície do varão apresenta um notável impacto nos mecanismos de transmissão de tensões betão-varão, sendo assim um fator importante nas condições de aderência. O revestimento com areia da superfície dos varões FRP revelou-se a melhor solução para aumentar a aderência em estruturas de betão armado. No seguimento desta linha de pensamento, os varões com superfície lisa sem revestimento não são aconselhados para betão armado por possuírem significativamente menos aderência. Podemos observar mais concretamente as diferenças das condições de aderência na Figura 4.3.

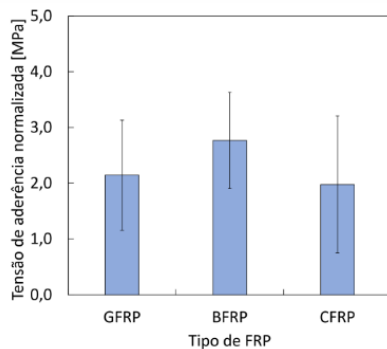


Figura 4.2. – Tensão média de aderência em função do tipo de FRP, [19]

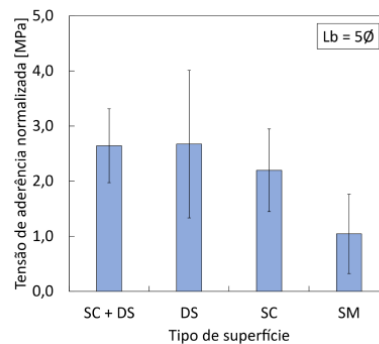


Figura 4.3. – Tensão média de aderência em função do tipo de superfície, [19]

Fatores como o envelhecimento da estrutura e exposição a temperaturas mais elevadas não apresentam degradação relevante da aderência betão-varão.

A escolha de varões nervurados com superfície revestida de areia (SC + DS) apresenta, em média, os melhores resultados de aderência.

4.2.2. MODELOS DE DIMENSIONAMENTO

A implementação de uma nova técnica de construção requer que sejam ultrapassados vários obstáculos antes de poder ser utilizada pelos profissionais da área. Após notável esforço pela comunidade científica, com estudos adequados embora não completos, a viabilidade do betão armado com varões FRP impõe que se estabeleçam normas que permitam a sua correta aplicação e sugiram parâmetros que abranjam um leque de características geométricas, físicas e mecânicas para a standardização da comercialização de produtos viáveis. Os modelos de dimensionamento abordados com maior detalhe neste documento são:

- American Concrete Institute (ACI)
 - ACI 440.1R-15 (2015): Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) bars [1];

- ACI 440.3R-12 (2012): Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete and Masonry Structures [2].
- CNR-DT 203/2006 (2006): Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars, Italian Research Council (CNR) [3].
- JSCE (1997): Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials, Japan Society of Civil Engineers [4].

Contudo, menos detalhados face à informação recolhida de alguns autores [24;25], também foram consideradas outras “Guidelines” publicadas. Cada documento proporciona uma abordagem diferente, sendo necessário cruzar recomendações de forma a obter uma visão mais completa do tema em questão. Entre elas destacam-se:

- Fib (2007): Fib Bulletin 40 - FRP Reinforced in RC Structures, Fédération Internationale du Béton [38].
- ISIS (2007): Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers. Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS) [5].

4.2.2.1. ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE)

A determinação da resistência à tração de cálculo dos varões de FRP, ou seja, o valor resistente a utilizar para o dimensionamento da estrutura que permite estabelecer o número de varões necessários e o comprimento do ELU (Estado Limite Último) e do ELS (Estado Limite Serviço), requer a ponderação de um fator de segurança adequado às fragilidades do polímero em questão. Segundo o documento ACI (2015) [1], a resistência à tração de cálculo é dada pela seguinte fórmula:

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (4.1)$$

Sendo que o f_{fu}^* representa a resistência à tração indicada pelo fabricante, com base nos ensaios realizados a uma certa amostra de provetes, e o coeficiente C_E representa um fator de segurança associado às condições de exposição da estrutura com base no tipo de fibra do varão. O fator de segurança C_E pode ser adotado com base na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. – Fator de segurança de condições de exposição ambiental (ACI, 2015)

Condições de exposição	Tipo de fibra	Fator de segurança (C_E)
Betão não exposto a condições climáticas e sem contacto com a terra	Carbono	1.0
	Vidro	0.8
	Aramida	0.9
Betão exposto a condições climáticas e em contacto com a terra	Carbono	0.9
	Vidro	0.7
	Aramida	0.8

Os fatores de segurança acima mencionados refletem a expectativa de durabilidade das diferentes fibras ao longo do tempo. Embora maior investigação nesta área poderá levar a que estes valores sejam ajustados, não é esperado que sofram alterações significativas. As fibras de basalto (B), por terem adquirido apenas recentemente relevância para esta alternativa de construção, não foram ainda consideradas neste guia de dimensionamento.

4.2.2.2. CNR (ITALIAN NATIONAL RESEARCH COUNCIL)

O documento Italino (CNR) [3] considera dois coeficientes de segurança na obtenção dos valores resistentes de cálculo. O valor de cálculo de resistência do varão a utilizar no dimensionamento é obtido por:

$$X_d = \eta \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (4.2)$$

O X_k representa o valor característico resistente indicado pelo fabricante do varão.

O γ_m é um fator de segurança parcial que pesa as propriedades dos materiais do varão, ou seja, varia consoante o tipo de fibra escolhida e resina utilizada na matriz. Este pode ser obtido a partir da Tabela 4.2.

Tabela 4.2. – Fator de segurança parcial (γ_m)

Estado Limite	Fator de segurança parcial (γ_m)
Último	1.5
Serviço	1.0

O η é um fator de segurança parcial obtido através da multiplicação do fator de conversão ambiental η_a pelo fator de conversão devido a efeitos a longo prazo η_1 .

O fator de conversão ambiental pode ser obtido a partir da Tabela 4.3.

Tabela 4.3. – Fator de conversão ambiental (η_a)

Condições de exposição	Tipo de fibra/matriz	η_a
Betão não exposto a humidade	Carbono / Vinylester ou epoxy	1.0
	Vidro / Vinylester ou epoxy	0.8
	Aramida / Vinylester ou epoxy	0.9
Betão exposto a humidade	Carbono / Vinylester ou epoxy	0.9
	Vidro / Vinylester ou epoxy	0.7
	Aramida / Vinylester ou epoxy	0.8

O fator de conversão devido a efeitos a longo prazo pode ser obtido a partir da Tabela 4.4.

Tabela 4.4. – Fator de conversão devido a efeitos a longo prazo (η_1)

Modo de Carga	Tipo de fibra/matriz	η_1 (ELU)	η_1 (ELS)
Quase permanente e/ou cíclico (Fluência, Relaxação e Fadiga)	Vidro / Vinylester ou epoxy	1.00	0.30
	Aramida / Vinylester ou epoxy	1.00	0.50
	Carbono / Vinylester ou epoxy	1.00	0.90

4.2.2.3. JSCE (JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS)

De acordo com as “Guidelines” da JSCE (1997) [4], os fatores de segurança a serem considerados para a determinação dos valores de cálculo variam de acordo com o tipo de Estado Limite. Esta abordagem é semelhante à utilizada nos varões de aço.

Tabela 4.5. – Fator de segurança (JSCE, 1997)

Estado Limite	Tipo de fibra	Fator de segurança (γ_{mf})
Último	Carbono	1.15
	Vidro	1.3
	Aramida	1.15
Serviço	Carbono	1.0
	Vidro	1.0
	Aramida	1.0
Fadiga	Carbono	1.15
	Vidro	1.3
	Aramida	1.15

Com base na Tabela 4.5., que permite a determinação do fator de segurança a utilizar (γ_{mf}), procede-se à menção da equação do valor de cálculo da resistência à tração:

$$f_{bd} = f_{bk} / \gamma_{mf} \quad (4.3)$$

Sendo f_{bk} o valor característico da resistência à tração do varão fornecido pelo fabricante, certificado pelos devidos ensaios.

4.2.3. ESTADO LIMITE ÚLTIMO (ELU) - FLEXÃO

O cumprimento do Estado Limite Último (ELU) no dimensionamento de uma estrutura é um requisito fundamental, dado que este garante que a estrutura tem capacidade para resistir às solicitações que lhe

são esperadas, sem sofrer danos que levariam à sua ruína. O modelo de dimensionamento mais recente e completo é o referido no ACI (2015) [1], pelo que será o principal abordado neste subcapítulo.

Para que se verifique a segurança ao ELU é necessário que o valor de de cálculo dos esforços atuantes (E_d) seja inferior ao valor de cálculo resistente (R_d) da estrutura:

$$E_d < R_d \quad (4.4)$$

Os esforços atuantes de cálculo (p_{Ed}) são obtidos através da soma da multiplicação do valor esperado da carga permanente (cp) e da carga variável (sc) por um coeficiente de segurança:

$$p_{Ed} = 1.2 \, cp + 1.7 \, sc \quad (4.5)$$

Tanto para a verificação do ELU à flexão como ao corte, é necessário que se cumpra a seguinte condição, respetivamente:

$$M_u \leq \phi \, M_n \quad (4.6)$$

$$V_u \leq \phi \, V_n \quad (4.7)$$

Sendo M_u o momento de cálculo e V_u o esforço transverso de cálculo, M_n o momento resistente e V_n o esforço transverso resistente.

A percentagem de armadura (ρ_f) e a percentagem de armadura equilibrada (ρ_{fb}) podem ser calculadas através das seguintes expressões:

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad (4.8)$$

$$\rho_{fb} = 0.85 \, \beta_1 \, \frac{f_{c'}}{f_{fu}} \, \frac{E_f \, \varepsilon_{cu}}{E_f \, \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (4.9)$$

O fator de redução da resistência (ϕ) é definido com base no tipo de esforço (flexão ou corte) e na relação da percentagem de armadura (ρ_f) com a percentagem equilibrada de armadura (ρ_{fb}), que permite estimar o modo de rotura esperado, como pode ser visto na Tabela 4.6.:

Tabela 4.6. – Modo de rotura e Fator de redução da resistência (ϕ)

Esforço	Condição	Modo de rotura	ϕ
Flexão	$\rho_f \geq 1.4 \, \rho_{fb}$	Esmagamento do betão	0.65
	$\rho_{fb} < \rho_f < 1.4 \, \rho_{fb}$	Equilibrada	$0.30 + 0.25 \, \frac{\rho_{fb}}{\rho_f}$
	$\rho_f \leq \rho_{fb}$	Rotura da armadura	0.55

As Figuras 4.4., 4.5. e 4.6. ilustram os três diagramas possíveis de rotura à flexão.

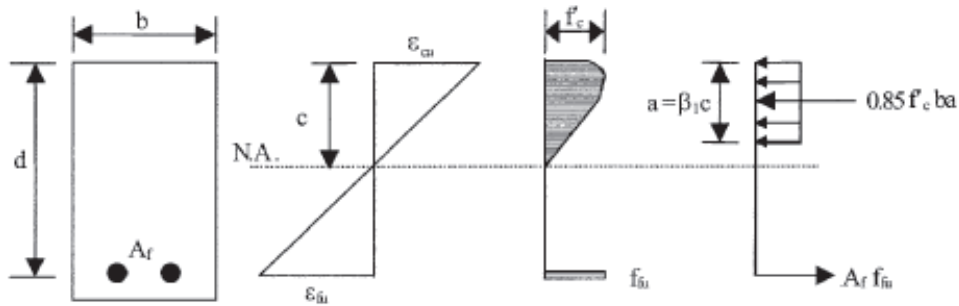


Figura 4.4. – Rotura à flexão por esmagamento do betão, (ACI 2015)

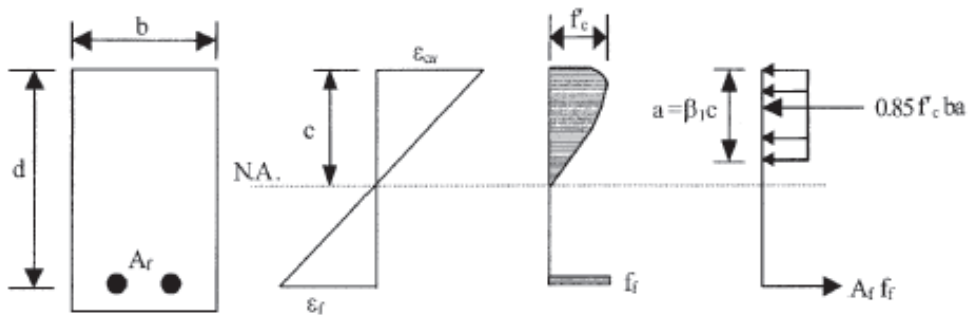


Figura 4.5. – Rotura à flexão equilibrada, (ACI 2015)

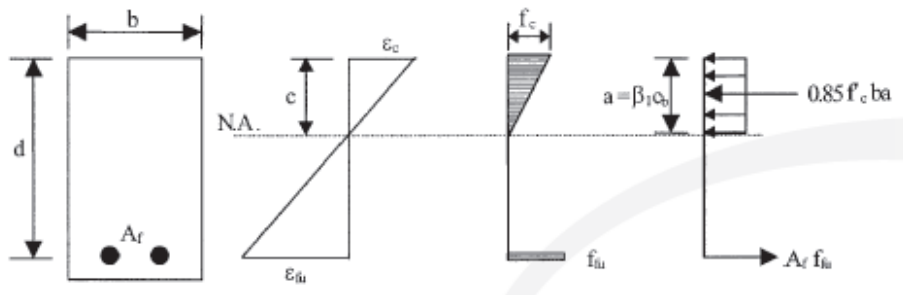


Figura 4.6. – Rotura à flexão por rompimento da armadura, (ACI 2015)

i) Rotura à flexão por esmagamento do betão

Quando verificada a condição $\rho_f \geq 1.4 \rho_{fb}$, indicativa que o modo de rotura será por esmagamento do betão, procede-se ao cálculo do momento resistente de cálculo (M_n) através da seguinte expressão:

$$M_n = \rho_f f_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f_c'}\right) b d^2 \quad (4.10)$$

$$f_f = \sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85 \beta_1 f_{ck}}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0.5 E_f \varepsilon_{cu} \leq f_{fu} \quad (4.11)$$

Sendo f_f a tensão nos varões e β_1 um coeficiente que deve adotar valores entre 0.65 e 0.85 consoante a resistência característica do betão (f_c'). O fator $\beta_1 = 0.85$ quando $f_c' \leq 28$ MPa e adota um valor reduzido em 0.05 a cada 7 MPa acima de 28 MPa, sendo 0.65 o menor valor possível.

ii) Rotura à flexão por rompimento da armadura

Quando verificada a condição $\rho_f \leq \rho_{fb}$, indicativa que o modo de rotura será por rompimento da armadura, procede-se ao cálculo do momento resistente de cálculo (M_n) através da seguinte expressão:

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 C_b}{2}\right) \quad (4.12)$$

Donde a profundidade da linha neutra (C_b) é dada através da equação:

$$C_b = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}}\right) d \quad (4.13)$$

Quando a rotura se dá por rompimento da armadura, o diagrama retangular de tensões do ACI não é aplicável, visto que a extensão máxima do betão não é alcançada – 0.003. Ao invés, deve-se utilizar o diagrama ilustrado de tensões equivalentes, Figura 4.6.

iii) Armadura mínima

Quando a rotura se dá por esmagamento do betão, não é necessário calcular armadura mínima. Por outro lado, se a rotura se der por rompimento das armaduras, é recomendado que se considere a armadura mínima calculada com base na seguinte expressão:

$$A_{f,min} = \frac{0.41 f_c'}{f_{fu}} b_w d \geq \frac{2.30}{f_{fu}} b_w d \quad (4.14)$$

iv) Aspetos importantes

- Não se deve efetuar redistribuição em elementos de betão armado com varões FRP, dado que os mecanismos de rotura de elementos solicitados à flexão não incluem formação de rotura plástica, pelo facto de estes materiais apresentarem apenas comportamento elástico linear.

- Os varões FRP possuem uma resistência à compressão muito baixa, sendo que deve ser desprezada no dimensionamento. Quando for necessário colocar varões FRP em zonas comprimidas, deve ser efetuado um bom confinamento dos varões na zona comprimida.
- Se for pretendido utilizar varões diferentes na armadura, a variação da tensão de cada varão deve ser tida em conta na determinação da resistência à flexão.

4.2.4. ESTADO LIMITE ÚLTIMO (ELU) – CORTE

O cálculo do Estado Limite Último ao corte em estruturas com varões FRP assemelha-se ao de estruturas armadas com varões de aço, excetuando alguns ajustes, que se devem a diferentes propriedades físicas e mecânicas destes materiais polímeros, que afetam os mecanismos de transmissão de esforços. Praticamente todas as estruturas armadas com varões FRP requerem armadura de transversal, à exceção de lajes com capacidade de distribuição dos esforços transversais aplicados. O modelo de dimensionamento mais recente e completo é o referido no documento do ACI (2015) [1], pelo que será o principal abordado neste subcapítulo.

O esforço transversal resistente de uma estrutura a dimensionar é obtido através da soma da resistência ao corte do betão (V_c) com a resistência ao corte da armadura transversal (V_f) conferida pelos varões FRP:

$$V_u = V_c + V_f \quad (4.15)$$

i) Resistência ao corte

A resistência ao corte do betão (V_c) pode ser obtida através equação a seguir apresentada, onde (c) representa a distância ao eixo neutro e (k) o fator de resistência à tração de varões:

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f_c'} b_w c \quad (4.16)$$

$$c = kd \quad (4.17)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (4.18)$$

De modo a considerar a resistência axial dos varões FRP, pode-se utilizar, ao invés da equação anteriormente mencionada, a seguinte:

$$V_c = \left(\frac{5}{2}k\right) 2 \sqrt{f_c'} b_w d \quad (4.19)$$

A resistência ao corte da armadura transversal de FRP (V_f), que leva em consideração a inclinação dos varões, pode ser obtida através equação a seguir apresentada:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad (4.20)$$

Donde a tensão da armadura de corte FRP (f_{fv}) deve ser restringida a uma tensão de cálculo (f_{fb}), para que a abertura de fendas por corte seja controlada, evitando a rotura do elemento na zona de dobragem do estribo FRP:

$$f_{fv} = 0.004 E_f \leq f_{fb} \quad (4.21)$$

$$f_{fb} = \left(0.05 \frac{r_b}{d_b} + 0.3 \right) f_{fu} \leq f_{fu} \quad (4.22)$$

Sendo que r_b representa o diâmetro do raio de curvatura da dobragem dos varões e d_b o diâmetro dos varões, respeitando $r_b/d_b \geq 3$.

Por fim, a razão entre armadura transversal total necessária e o respetivo espaçamento, que permite que seja feita a escolha dos varões a utilizar, pode ser calculada, adotando $\phi = 0.75$, pela expressão seguinte expressão:

$$\frac{A_{fv}}{s} = \frac{(V_u - \phi V_c)}{\phi f_{fv} d} \quad (4.23)$$

Os estribos devem ser fechados com um ângulo de 90° e o seu espaçamento vertical deve ser $\min(d/2; 610)$ mm. O valor mínimo do comprimento de amarração recomendado é $12d_b$.

ii) Armadura mínima

De forma a evitar uma rotura frágil por corte, é recomendado garantir no dimensionamento, sempre que se verifique que $V_u > V_c/2$, uma capacidade de resistência mínima do elemento ao esforço transverso:

$$A_{fv,min} = 0.35 \frac{b_w s}{f_{fv}} \quad (4.24)$$

iii) Punçoamento

O cálculo da resistência ao punçoamento é necessário quando se dimensionam lajes. Os resultados dos estudos do punçoamento em lajes tradicionais (armadas com varões de aço) não podem ser diretamente aplicados ao dimensionamento com varões FRP, pois estes possuem diferentes propriedades. Assim, é proposto para o cálculo do punçoamento a utilização da seguinte equação:

$$V_c = \frac{4}{5} \sqrt{f'_c} b_0 k d \quad (4.25)$$

Donde b_0 deve ser calculado à distância mínima de $d/2$ da face de cada coluna.

4.2.5. ESTADO LIMITE SERVIÇO (ELS)

O cumprimento do Estado Limite de Serviço (ELS) no dimensionamento de uma estrutura é importante na medida em que garante que a estrutura não irá sofrer deformações e fendilhação excessiva que prejudicariam a sua integridade estética e funcionamento ao longo do seu período de vida expectado. Devido à reduzida rigidez dos varões FRP depois do betão fendilhar, as deformações por cargas de serviço normalmente são o fator crítico do dimensionamento. O modelo de dimensionamento mais recente e completo é o ACI (2015) [1], pelo que será o principal abordado neste subcapítulo.

Os esforços a considerar no dimensionamento ao ELS (p_{ed}) não sofrem qualquer majoração, sendo obtidos através da expressão:

$$p_{ed} = cp + sc \quad (4.26)$$

i) Controlo de Fendilhação

O controlo da fendilhação é necessário primeiramente para garantir a estanqueidade do elemento, evitando a degradação das armaduras, mas também por questões estéticas. Pelo facto de os varões de FRP resistirem bem a corrosão, os limites de aberturas de fendas do dimensionamento com estes são maiores do que no dimensionamento com aço.

O limite de abertura de fendas para exposição exterior sugerido é 0.5 mm e para exposição interior 0.7 mm. A equação que dita a abertura de fendas máxima é a seguinte:

$$w = 2 \frac{f_f}{E_f} \beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad (4.27)$$

Donde k_b representa o coeficiente representativo do grau de aderência betão-varão, variando entre 0.6 e 1.72, podendo ser conservadoramente considerado 1.4. O β é a razão entre a distância da linha neutra à fibra extrema tracionada, o s representa a distância entre o centro de gravidade dos varões longitudinais e o d_c a distância entre a fibra extrema tracionada e o centro de gravidade das armaduras.

ii) Controlo de Deformação

As deformações que ocorrem em serviço, provocadas por cargas estáticas, são avaliadas em detalhe pelo modelo do ACI (2015). No entanto, este não oferece “Guidelines” para o dimensionamento em serviço face a cargas dinâmicas como ventos e sismos.

A obtenção das deformações em estruturas armadas com varões FRP pode ser feita através do método direto ou do método indireto. Será apresentado neste documento o método direto, por incluir o cálculo de flechas. O método indireto inclui sugestões para o pré-dimensionamento da altura mínima do elemento.

Por possuírem uma pior aderência ao betão do que os varões de aço, os varões FRP são mais propícios a atingir maiores deformações.

Obtidos os valores de momento crítico (M_{cr}) e momento de serviço (M_{sv}), a inércia efetiva (I_e) é obtida através da seguinte expressão:

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left(\frac{M_{cr}}{M_{sv}} \right)^2 \left(1 - \frac{I_{cr}}{I} \right)} \leq I \quad (4.28)$$

Donde (I_{cr}) representa o momento de inércia crítica, (I) o momento de inércia geométrica da secção, (β_d) o coeficiente de redução e o coeficiente (k):

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1 - k)^2 \quad (4.29)$$

$$\beta_d = \frac{1}{5} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right) \leq 1.0 \quad (4.30)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (4.31)$$

O método direto de cálculo de deformações permite obter as deformações na estrutura, como as flechas, que devem cumprir com os limites estabelecidos. As deformações a curto prazo podem ser obtidas através do momento de inércia efetivo. As deformações a longo prazo também devem ser consideradas, por questões de segurança, uma vez que podem ultrapassar as de curto prazo. As deformações a longo prazo, devidas a fenómenos de fluência e retração, podem ser obtidas, para aplicações típicas, através da seguinte equação:

$$\Delta_{(cp+sh)} = 0.6 \zeta (\Delta_i)_{sus} \quad (4.32)$$

É importante ter em consideração que tanto nas armaduras de aço como nas de FRP a fluência provoca uma redução da rigidez. Com a redução do módulo de elasticidade efetivo, devido à fluência do betão, e o aumento da profundidade do eixo neutro, ocorre um aumento do momento de inércia fendilhada. No caso das armaduras de FRP, o aumento da profundidade do eixo neutro pode ter maiores consequências, uma vez que estes materiais têm menor rigidez axial. Assim, pode-se esperar um aumento das deformações a longo prazo maior nos varões FRP do que nos tradicionais varões em aço, o que justifica o fator 0.6 de majoração da deformação. A variável ζ reflete no cálculo das deformações o período de vida útil pretendido para a estrutura, assumindo maioritariamente o valor de 2.0, uma vez que a maioria dos elementos são dimensionados para um período de vida útil superior a 5 anos.

iii) Limites de tensões

De forma a prevenir a rotura perante ações prolongadas e ciclos de fadiga é importante limitar as tensões exercidas. Como os varões FRP não apresentam comportamento plástico, a análise é feita em regime linear elástico. Os limites de tensão, que evitam a rotura por fluência e por fadiga, podem ser calculados através da seguinte equação:

$$f_{f,s} = M_{sv} \frac{n_f d(1-k)}{I_{cr}} \quad (4.33)$$

Sendo que para GFRP o limite de tensão para rotura em fluência é $0.20 f_{fu}$, para AFRP é $0.30 f_{fu}$ e para CFRP é $0.55 f_{fu}$. O M_{sv} considerado varia conforme se dimensiona à fadiga ou à fluência. Para BFRP (varões com fibras de basalto), não existem, até à data de realização deste documento, valores limite de tensão para rotura em fluência propostos.

4.3. ASPETOS CONSTRUTIVOS

4.3.1. RECOBRIMENTO

A adoção de um recobrimento adequado é essencial para garantir a durabilidade da estrutura, assim como o seu bom funcionamento.

De acordo com o documento ISIS (2007) [5], o recobrimento mínimo deve ser de 35 mm, com uma tolerância de aplicação em obra de 10 mm. Para elementos estruturais, são recomendados que se adote o maior dos valores apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7. – Recobrimento sugerido para vigas e lajes (ISIS 2007)

Exposição	Vigas	Lajes
Interior	$2.5d_b$ ou 40 mm	$2.5d_b$ ou 20 mm
Exterior	$2.5d_b$ ou 50 mm	$2.5d_b$ ou 30 mm

É também mencionado que na escolha do recobrimento a utilizar seja considerado o tipo de FRP, o uso destinado e as condições ambientais a que será exposto. É sabido que alguns tipos de GFRP expandem na direção transversal com o aumento da temperatura ou aumentam o seu volume total quando expostos a água, sendo que nestes casos um recobrimento maior do que o mínimo é aconselhável. O tipo de matriz envolvente da fibra do varão é determinante na decisão do recobrimento.

De acordo com o JSCE (1997) [4], o recobrimento pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$C_{min} = \alpha C_0 \quad (4.34)$$

Sendo o C_{min} o recobrimento mínimo a adotar, o α um fator de recobrimento dependente da resistência de cálculo do betão (f_{ck}) e o C_0 o recobrimento base correspondente ao elemento estrutural. Estes coeficientes podem ser obtidos com base na Tabela 4.8. e nas expressões seguintes:

$f_{ck} \leq 18 \text{ MPa}$	$\alpha = 1.2$
$18 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 34 \text{ MPa}$	$\alpha = 1.0$
$f_{ck} > 34 \text{ MPa}$	$\alpha = 0.8$

Tabela 4.8. – Recobrimento de betão base (JSCE 1997)

Elemento	Vigas	Lajes	Pilar
C_0	30	25	35

Este guia de dimensionamento menciona ainda algumas situações específicas onde o recobrimento mínimo a adotar terá de ser superior ao calculado previamente. Estas indicações são bastante semelhantes às adotadas com varões de aço. Entre estas destacam-se: a adoção de recobrimento igual ou superior a 75 mm em caso do betão estar em contacto direto com o solo ou ser submerso; adoção de um incremento de 10 mm ao recobrimento calculado se houver constante abrasão provocada por água; situações de ambiente quimicamente agressivo.

4.3.2. ESPAÇAMENTO ENTRE VARÕES

Segundo o ISIS (2007) [5], para assegurar que o betão seja corretamente disposto, evitando fissuração por mudanças de temperatura, devem ser cumpridas restrições de espaçamento.

Neste é referido que o espaçamento mínimo entre varões longitudinais para vigas é o máximo dos seguintes valores:

- $1.4 d_b$
- 1.4 vezes a dimensão máxima do agregado
- 30 mm

Para o reforço de lajes, o máximo espaçamento permitido deve ser o menor dos seguintes valores:

- 3 vezes a espessura da laje ou 300 mm (para reforço primário)
- 5 vezes a espessura da laje ou 500 mm (para reforço secundário)

De acordo com o ACI (2015), o controlo de espaçamento máximo entre varões para controlo de fissuração para vigas e lajes é dado pela seguinte equação:

$$S_{max} = 1.15 \frac{E_f w}{f_{fb} k_b} - 2.5 \leq 0.92 \frac{E_f w}{f_{fb} k_b} \quad (4.35)$$

4.3.3. EFEITOS DE SOBREPOSIÇÃO

Os efeitos da sobreposição de varões FRP em betão armado não obtiveram até à data muita atenção da comunidade científica. De acordo com o ACI (2015), é sugerida a adoção de um valor conservativo de $1.3 l_d$.

O JSCE 1997 propõe que o comprimento de sobreposição deve ser A_{fc} / A_f quando a área de armadura A_f for superior à área de armadura requerida A_{fc} . Por outro lado, se $A_{fc} / A_f > 350/f_d$, o comprimento de sobreposição requerido é $A_{fc} / A_f = 350/f_d$, sendo f_d a resistência à tração de cálculo do varão FRP.

4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O comportamento de elementos de betão armado com FRP à flexão apresenta três modos de ruína possíveis: rompimento da armadura, esmagamento do betão e rotura por perda de aderência betão-varão.

A principal diferença dos varões FRP face aos varões de aço no dimensionamento é a superior relação resistência/rigidez dos varões FRP, que leva a que estes, quando utilizados em betão armado, gerem maiores deformações.

Quando solicitados a esforço transversal, os elementos armados com FRP podem alcançar a ruína por rotura por corte-tração ou por rotura corte-compressão.

A resistência dos varões FRP quando dobrados reduz significativamente.

Embora os varões FRP não apresentem uma boa resistência à compressão, podem ser utilizados para armar pilares desde que o dimensionamento da mesma tenha em conta as fragilidades destes materiais, resultando, conseqüentemente, num maior número de varões e menor espaçamento do que numa armação tradicional em aço.

O comportamento à torção de uma estrutura de betão armado é um assunto bastante complexo dependente de vários fatores. Embora haja estudos recentes desta temática, não foram ainda estabelecidas “Guidelines” para o dimensionamento, pelo que se recomenda uma abordagem conservadora.

O modo de ruína obtido por rotura por fadiga é o “micro buckling”. Um dos fatores mais relevantes para um bom comportamento à fadiga é a garantia de uma boa aderência betão-varão, sendo também possível reduzir os danos provocados pela escolha de uma geometria de barra apropriada e o revestimento com certas resinas. As fibras de carbono (CFRP) são as que apresentam melhor comportamento à fadiga.

Os parâmetros principais que afetam a aderência dos varões de FRP ao betão são: comprimento e diâmetro do varão, tipo de FRP e tratamento da superfície. A escolha de varões nervurados com superfície revestida de areia é a melhor solução para melhorar a aderência betão-varão.

Os documentos propostos como modelos de dimensionamento pelo ACI (American Concrete Institute), pelo CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) e pelo JSCE (Japan Society of Civil Engineers) apresentam abordagens diferentes na concessão de coeficientes de segurança relativos a condições de exposição ambiental, sendo o do CNR o que leva em conta maiores ponderações.

O dimensionamento pelo documento ACI (2015) [1] de uma estrutura de betão armado com varões FRP face a ELU à flexão e/ou corte e ao ELS é relativamente completo. No entanto, necessita de ser melhorado em alguns aspetos, nomeadamente, o controlo de fendilhação face a cargas dinâmicas, punçoamento e efeitos de sobreposição.

5

VIABILIDADE DO BETÃO ARMADO COM VARÕES FRP

5.1. ANÁLISE DOS PROCEDIMENTOS DE CONSTRUÇÃO

5.1.1. MANUSEAMENTO, ARMAZENAMENTO E COLOCAÇÃO

A aplicação de varões FRP em estruturas de betão armado assemelha-se em alguns aspetos à do aço, sendo que as principais diferenças entre estes materiais residem no comportamento elástico linear dos varões FRP e o seu baixo módulo de elasticidade quando comparado ao do aço. Uma vantagem dos FRP no manuseamento e colocação é a sua leveza, que permite que o processo de montagem e transporte das armaduras seja muito mais ágil, resultando numa redução do tempo de construção. No entanto, também possuem algumas condicionantes que devem ser respeitadas durante a construção de modo a não prejudicar o seu comportamento estrutural. Os varões FRP são suscetíveis a danos na sua superfície quando manejados sem cuidado, pelo que requerem as mesmas precauções que varões de aço revestidos com epóxi. Segundo o ISIS Manual No.3 [26] e Educational module 6 [5], o correto manuseamento e armazenamento dos varões FRP impõe:

- Armazenar as barras num local limpo, que proteja as proteja da exposição a radiação UV, temperaturas elevadas e químicos. Recomenda-se que não sejam colocadas diretamente no chão, mas em cima de paletes de madeira
- Levantar conjuntos de barras com cuidado. Estas são leves e flexíveis, pelo que não devem ser manuseadas bruscamente
- Proceder com cuidado quando necessário cortar, evitando rasgar as fibras do varão. Recomenda-se a utilização de serras de alta velocidade com diamante.

Garantir a integridade dos materiais de construção é essencial para que o produto final corresponda com o que é definido em projeto. Além disso, é necessário garantir a segurança dos trabalhadores envolvidos no processo, pelo que o ISIS recomenda a adoção das seguintes medidas de segurança:

- Uso de luvas de proteção apropriadas. O manuseamento das fibras contidas nos varões pode levar ao aparecimento de farpas, cortes e irritação da pele.
- Uso de óculos e máscaras de proteção quando necessário cortar varões. O manuseamento de serras de corte faz com que fragmentos do varão sejam atirados pelo ar, podendo levar a ferimentos em zonas sensíveis, como o rosto.

A colocação e montagem das armaduras de reforço FRP em betão armado é similar à das armaduras de aço, com apenas alguns ajustes. Devido à sua leveza, é necessário que seja verificada a posição dos

varões na armadura depois de colocada na sua posição final, de modo a evitar que durante o processo de colocação algum varão se tenha deslocado.

Não é aconselhável o contacto direto entre barras de fibra de carbono (CFRP) e barras de aço. Quando dois materiais com diferente potencial elétrico entram em contacto é gerada uma pequena corrente elétrica. Isto pode levar a ocorrência de um fenómeno não desejado, denominado corrosão por galvanização. Esta preocupação não se aplica a varões de fibra de vidro, aramida e basalto, uma vez que não são eletricamente condutores. Para uma correta colocação em obra deve-se:

- Remover qualquer óleo, terra ou pó da superfície das barras previamente a sua utilização através da aplicação de um produto especificado pelo fabricante
- Dispor e unir os varões de acordo com as indicações de projeto, especificadas pelo engenheiro responsável
- Atar os varões em pontos de cruzamento para prevenir flutuação
- Ter cuidado ao andar sobre as barras, evitando danificar as mesmas e a sua disposição

Para garantir que todas as recomendações e indicações acima mencionadas são cumpridas, é necessário que tanto a equipa de trabalhadores como o engenheiro de obra tenham tido formação ou experiência prévia na construção com varões FRP. Embora a sua aplicação não seja dramaticamente diferente da tradicional em aço, se as recomendações mencionadas não forem respeitadas, é possível que haja consequências danosas à integridade física da equipa envolvida no projeto e/ou ao comportamento da estrutura. A Figura 5.1. demonstra exemplos da montagem de armaduras de varões FRP.



a) Varões de fibra de vidro atados



b) Operação de fixação dos varões de GFRP

Figura 5.1. – Exemplos de montagem de armaduras com varões FRP [26].

5.1.2. CONTROLO DE QUALIDADE

Garantir um bom controlo de qualidade é uma necessidade crítica em todas as fases da construção, especialmente com o uso de materiais e técnicas recentes, onde os fatores de segurança utilizados e as características dos materiais ainda não são completamente compreendidas. Se a qualidade dos materiais, no momento em que são utilizados, não corresponder com o que foi garantido pelo fornecedor, poderão surgir problemas. Como prevenção, os documentos do ISIS [5; 26] recomendada que a empresa de construção realize os seus próprios testes aos varões, se os referidos pelo fabricante não assegurarem de forma fidedigna as propriedades mecânicas, físicas e geométricas dos varões. Face a alguma

inconsistência/mudança no processo de fabrico dos materiais, as seguintes propriedades devem ser novamente ensaiadas:

- Resistência última
- Módulo de elasticidade
- Resistência à fadiga
- Aderência
- Resistência à exposição a alcalinos
- Coeficiente de dilatação térmica

Antes de iniciados os trabalhos, é fulcral que qualquer insegurança respetiva a certificação e viabilidade dos varões FRP seja devidamente tratada. Para que seja garantida a integridade do produto, é importante que sejam tomadas as devidas precauções no seu transporte, armazenamento e manuseamento, evitando qualquer degradação do mesmo. Devem ser realizadas inspeções regulares por um engenheiro treinado e certificado com conhecimentos sobre o uso de varões FRP em estruturas de betão armado (em adição às práticas correntes da construção) [4; 26].

5.2. ANÁLISE DE CUSTOS

Para que a construção de betão armado com varões FRP se torne uma prática comum, é necessário que esta apresente viabilidade económica. Esta viabilidade é, em certa medida, dependente da comparação com a atual técnica de construção dominante – betão armado com varões de aço.

Apesar de os varões FRP serem mais dispendiosos do que os varões de aço numa fase inicial, podem apresentar-se vantajosos a longo prazo. Contudo, essa análise a longo prazo sai do âmbito do presente trabalho, sendo de notar que se trata de uma análise muito complexa. A análise de custos engloba dois tipos de custos: o custo directo e o custo composto.

5.2.1. DIRETO

O custo direto consiste em obter o custo de produção de um varão considerando parâmetros como a forma, o acabamento superficial, os diâmetros correntes, as taxas locais obrigatórias etc.

A elaboração desta análise contou com a colaboração da empresa VHM (Vitor Hugo – Coordenação e Gestão de Projetos), Porto. Desta forma, foi possível obter informações médias correntes, necessárias para a realização de uma análise de custos fiável. Dentro dos valores fornecidos pela VHM, destacam-se os valores correntes do betão C25/30, do aço S500 e das cofragens para vigas e para lajes. Em contrapartida, devido ao sigilo comercial internacional, foi difícil obter uma amostra razoável de preços para varões FRP, noemadamente, os de GFRP. No sentido de estabelecer uma comparação adequada, optou-se pela utilização do valor fornecido pela empresa “Pultron Composites”, no pressuposto de se tratar de uma encomenda de grande porte (na ordem das toneladas).

A Tabela 5.1 resume os custos diretos médios em €/Kg. Pode-se inferir que o preço dos varões GFRP é cerca de 2.20 vezes superior ao dos varões de aço. No entanto, devido à densidade do GFRP ser cerca de 1/4 a 1/6 da do aço, o custo por metro cúbico de armadura em varões FRP acaba por ser inferior.

Apesar disso, os modelos de dimensionamento de estruturas de betão armado com FRP não seguem as mesmas indicações e coeficientes de segurança que o modelo de dimensionamento de estruturas de betão armado com aço (EC2). Na opinião de alguns autores [10; 24; 25], os primeiros resultam num maior volume de armadura relativamente aos segundos.

Por outro lado, segundo Vitor Reis [24], quando a comparação dos preços é realizada com base na força resistente à tracção mobilizada por cada varão, os varões de FRP revelam-se muito competitivos. Apesar de a área de FRP ser inferior à área de aço para se mobilizar a mesma força resistente, é necessária uma maior quantidade de armadura de compósito para que a peça de betão armado correspondente possua uma rigidez próxima da exibida pela peça de betão armado com aço e assim cumprir os requisitos de serviço (controlo de deformação). O aço possui um módulo de elasticidade cerca de três vezes superior ao GFRP.

Tabela 5.1. - Custo direto médio: varões de Aço e de GFRP (€/Kg)

Materiais / Varão	Custo médio (€/Kg)
Aço S500 (VHM)	1.67
GFRP (Pultron Composites)	3.66

Conclui-se que a comparação dos custos diretos entre as duas técnicas de construção é um assunto complexo, podendo apenas estabelecer-se uma comparação relativa, recorrendo a um caso concreto de aplicação, comparando os “custos compostos” destes materiais após se obter a quantidade de armadura necessária para ambos.

É importante ter em consideração que os varões de GFRP, no espectro dos varões FRP existentes, são dos que apresentam melhor custo-benefício, sendo os CFRP os mais caros [24].

Como foi referido no Capítulo 4, os elementos estruturais que têm maior potencial para a aplicação de armaduras de FRP são vigas e lajes. A Tabela 5.2. apresenta os custos diretos médios avançados pela empresa VHM para os restantes materiais envolvidos na construção desses elementos estruturais:

Tabela 5.2. - Custo direto médio: betão e cofragens (vigas e lajes – adaptado da VHM)

Materiais	Custo médio
Betão C25/30	76.28 €/m ³
Cofragem	19.70 €/m ² (Vigas)
	18.48 €/m ² (Lajes)

5.2.2. COMPOSTO

Segundo um documento do LNEC, referido por [24], o custo composto é o custo total dos elementos de betão armado e que engloba o custo dos materiais, o custo da mão-de-obra e o custo de transporte dos materiais e equipamentos necessários à execução dos elementos. Estes custos indiretos têm uma relação linear com a duração e a dimensão da obra.

O custo dos materiais envolve o custo do betão, o custo da armadura e o custo das cofragens. Em termos gerais, admite-se que os custos do betão e da cofragem são idênticos para os elementos armados com FRP e com aço. O custo da mão-de-obra inclui, praticamente, o custo com o betão (produção e colocação), o custo da cofragem (construção) e custo de armadura (preparação e colocação). Nesses, varia apenas os custos com a mão-de-obra da armadura que tende a ser menor no caso do FRP. Por fim,

o custo de transporte dos materiais como o betão, a cofragem e a armadura são idênticos com excepção deste último, porque o menor peso dos varões de FRP conduz a menores custos de transporte. Em resumo, o custo composto final vai depender sobretudo tipo varão usado, FRP ou aço.

Segundo a empresa VHM, a estimativa dos custos médios associados à mão de obra e ao transporte dos materiais e equipamentos estão indicados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. – Custos indiretos médios (adaptado da VHM)

Parcelas	Custo médio
Mão de obra	16.5 €/h (Oficial)
	12.5 €/h (Servente)
Transporte	0.38 €/Km (Viatura Ligeira)
	0.78 €/Km (Viatura Pesada)

É esperado que os custos indiretos da construção com FRP sejam equivalentes aos do aço em quase todos os parâmetros, exceptuando a colocação das armaduras e o transporte. A leveza destes materiais permite não só que a montagem das armaduras seja mais rápida, levando menos horas de trabalho, mas também que o transporte seja mais eficiente, tornando-se assim menos dispendioso.

5.3. CASO PRÁTICO

Embora o dimensionamento de elementos estruturais não fazer parte dos objetivos deste trabalho, é relevante a apresentação de um caso de estudo sugerido por outro autor/trabalho que permita:

- (i) avaliar diferenças entre o modelo de dimensionamento, ao ELU e ELS, pelo ACI 440.1R na versão 2006 (do autor/trabalho) e na versão 2015 (atual, retratada nesta dissertação);
- (ii) avaliar o custo composto de dois elementos sujeito às mesmas cargas, um executado em betão armado com varões de GFRPA comparativamente com outro em betão armado tradicional.

5.3.1. DADOS INICIAIS

Optou-se pela análise de uma viga contínua proposta na tese de Camacho (Caso Estudo 3). [25].

i) Geometria

As Figuras 5.2 e 5.3 apresentam a geometria da viga para este caso de estudo.

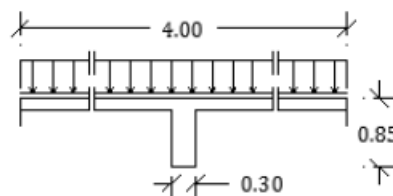


Figura 5.2. – Secção transversal da viga (adaptado de [25])

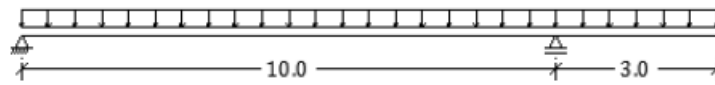


Figura 5.3. – Modelo de cálculo (adaptado de [25])

ii) Ações

A Tabela 5.4. apresenta as ações consideradas no dimensionamento da viga para este caso de estudo.

Tabela 5.4. – Ações consideradas no dimensionamento (adaptado de [25])

Tipo de ações	Cargas
Peso específico do betão armado	25 KN/m ³ (Aço)
	24 KN/m ³ (GFRP)
Carga do revestimento	2.0 KN/m ²
Sobrecarga ($\psi_2=0.2$)	3.0 KN/m ²

5.3.2. CÁLCULO E RESULTADOS

Com base nas indicações expostas no Capítulo 4, secção 4.2.1.1, Camacho procedeu ao dimensionamento da viga contínua relativamente ao ELU (flexão e corte) e ao ELS, conduzindo aos resultados expostos de modo resumido nas tabelas ilustradas na Figura 5.4. (ajuste das Tabelas de Camacho [25]). Sublinha-se que este dimensionamento foi realizado segundo as indicações da versão 2006 do ACI (ACI 440.1R-06).

Refeito o dimensionamento segundo a versão atual de 2015 (expostas na secção 4.2.1.1.), concluiu-se que não houve atualizações significativas relativamente à versão 2006, mudando apenas a fórmula de cálculo da inércia efetiva (I_e), equação 4.28 (secção 4.2.5. Estado Limite de Serviço), e adicionada uma proposta de cálculo de espaçamento máximo entre varões (S_{max}), equação 4.35 (secção 4.3.2.). Estas alterações, embora relevantes para o progresso científico, não originam uma mudança significativa na quantidade de armadura final de GFRP.

AÇO (EC2)		GFRP (ACI)	
1. Esforços Condicionantes (E.L.U.)		2. E.L.U. Flexão	
p_{Ed} : 60.4 KN/m	p_{Ed} : 53.3 KN/m	Armadura Negativa $\mu = 0.085$ $\omega = 0.090$ $A_s = 10.4 \text{ cm}^2$ Adoptar: 4Ø16 + 2Ø12	Processo iterativo de escolha da armadura. Assumir uma quantidade inicial de armadura negativa de: 6Ø16
V_{EdA} : 282.9 KN	V_{EdA} : 251.7 KN		$\rho_f = 0.0050$
$V_{EdB,esq}$: 329.2 KN	$V_{EdB,esq}$: 290.5 KN		$\rho_{fb} = 0.0030$
$V_{EdB,dire}$: 181.2 KN	$V_{EdB,dire}$: 159.9 KN		$\rho_f > \rho_{fb} \rightarrow$ Rotura por Esmagamento do Betão
M_{Ed}^- : 271.8 KNm	M_{Ed}^- : 239.8 KNm		M_{Rd} : 412.7 KN.m
M_{Ed}^+ : 662.6 KNm	M_{Ed}^+ : 594.3 KNm		
		Armadura Positiva $\mu = 0.207$ $\omega = 0.243$ $A_s = 28.0 \text{ cm}^2$ Adoptar: 6Ø25	Processo iterativo de escolha da armadura. Assumir uma quantidade inicial de armadura positiva de: 4Ø25 + 2Ø32
			$\rho_f = 0.0149$
			$\rho_{fb} = 0.0041$
			$\rho_f > \rho_{fb} \rightarrow$ Rotura por Esmagamento do Betão
			M_{Rd} : 619.7 KN.m

3. E.L.U. Esforço Transverso		3. E.L.U. Esforço Transverso	
$V_{EdA}(z, \cot\theta)$: 207.6 KN	$V_{EdA}(d)$: 209.1 KN	A_{swA} : Ø8//0.20 0m < x < 1.10m	A_{fvA} : Ø8//0.10 0m < x < 1.95m
$V_{EdB,esq}(z, \cot\theta)$: 253.9 KN	$V_{EdB,esq}(d)$: 238.7 KN	$A_{swB,esq}$: Ø8//0.15 8.30m < x < 10.0m	$A_{fvB,esq}$: Ø12//0.175 7.35m < x < 10.0m
$V_{EdB,dire}(z, \cot\theta)$: 105.9 KN	$V_{EdB,dire}(d)$: 117.3 KN	$A_{swB,dire}$: Ø8//0.25 10.0m < x < 13.0m	$A_{fvB,dire}$: Ø8//0.20 10.0m < x < 13.0m
$\sigma_{c,bielas} = 2.7 \text{ MPa}$ $\sigma_{adm} = 9.0 \text{ MPa}$ $\sigma_{c,apoio} = 5.7 \text{ MPa}$ $\sigma_{adm} = 14.2 \text{ MPa}$		$V_{cA} = 114.7 \text{ KN}$ $V_{cB} = 70.6 \text{ KN}$	

4. Esforços Condicionantes (E.L.S.)		6. Verificação da Deformação	
M_{cqp}^- : 138 KNm	M_{cqp}^- : 134 KNm	$a_t [mm]$	$a_t [mm]$
M_{cqp}^+ : 318 KNm	M_{cqp}^+ : 309 KNm	$a_t = 24 < 40$	$a_t = 30 < 41.7$
5. Verificação das Tensões		7. Verificação da Fendilhação	
$\sigma_{apoio} [MPa]$	$f_{f,apoio} [MPa]$	$w_{apoio} [mm]$	$w_{apoio} [mm]$
$\sigma_{c,Raro} = 7.0 < 15$	$f_f = 110.6 < 192.0$	$w = 0.2 \leq 0.4$	$w = 0.4 \leq 0.7$
$\sigma_{c,qp} = 5.4 < 11.3$		$w_{vão} [mm]$	$w_{vão} [mm]$
$\sigma_s = 189.7 < 320$		$w = 0.1 \leq 0.4$	$w = 0.3 \leq 0.7$
		8. Disposições Construtivas	
$\sigma_{vão} [MPa]$	$f_{f,vão} [MPa]$	$l_{bd}^- = 550mm$	
$\sigma_{c,Raro} = 11.4 < 15$	$f_f = 88.8 < 160.0$	$l_{bd}^+ = 600mm$	
$\sigma_{c,qp} = 8.7 < 11.3$			
$\sigma_s = 161.4 < 320$			

Figura 5.4. – Resultados de dimensionamento com varões de Aço e de GFRP (ajustado de [25])

5.3.3. CUSTO

Com o intuito de proporcionar uma visão comparativa adequada dos custos diretos da construção de uma viga armada em aço ou FRP, foram construídas as Tabelas 5.5. e 5.6. com as quantidades dos varões para duas as soluções. O custo de cofragens e o custo do betão são os mesmos para ambas as soluções construtivas, pelo que é irrelevante a sua inclusão nesta análise. Optou-se por analisar custos onde o caso prático envolvesse uso de varões de fibra de vidro (GFRP), por serem as fibras com maior relevância no mercado internacional, assim como as que apresentam preços mais competitivos.

Tabela 5.5. – Quantidade de Armadura de aço na viga

Tipo de armadura	Nº varões iguais	Comprimento do varão (m)	Comprimentos totais dos varões (m)			
			Ø8	Ø12	Ø16	Ø25
Superior	4	14			56	
Inferior	4	14.1				56.4
	2	7.2				14.4
Apoio intermédio	2	2.7		14.4		
Estribos	58	2.3	133.4			
Total (m)			133.4	5.4	56	70.8
Total (Kg)			52.7	4.8	88.4	272.6

Tabela 5.6. – Quantidade de Armadura de GFRP na viga

Tipo de armadura	Nº varões iguais	Comprimento do varão (m)	Comprimento total dos varões (m)				
			Ø8	Ø12	Ø16	Ø25	Ø32
Superior	4	14.95			59.8		
Inferior	2	16.25					32.5
	2	16.25				32.5	
	2	10.6				21.2	
Apoio intermédio	2	7.55			15.1		
Estribos	61	2.3	140.3				
	15	2.3		34.5			
Total (m)			140.3	34.5	74.9	53.7	32.5
Total (Kg)			18.3	10.1	39.0	65	63.05

Para o cálculo das quantidades de armadura, utilizaram-se os resultados do dimensionamento apresentados nos itens 5.3.1 e 5.3.2. No anexo A2 podem ser consultados os desenhos estruturais de betão armado das vigas em questão.

Da análise das Tabelas 5.5 e 5.6, pode-se concluir que, para o dimensionamento das vigas, se necessitou de 418.5 Kg de aço e de 195.45 Kg de GFRP. Considerando um preço médio de 1.67 €/Kg e de 3.66€/Kg do para o aço o GFRP, respectivamente, como foi indicado na Tabela 5.1., estima-se que o custo da armadura em aço seja aproximadamente 699€ e o da armadura de GFRP 715€.

Neste caso prático, o custo direto de armar em GFRP ficou 1.023 vezes mais caro do que armar em aço, que é equivalente a dizer que o custo da armadura em aço é 97.76% do custo da armadura em GFRP. No contexto de uma grande obra, em que elementos como vigas são abundantes, esta pequena diferença de preço resultaria, na totalidade, numa soma maior. No entanto, como já foi referido anteriormente, a leveza dos GFRP permitira reduzir os custos compostos de transporte e mão de obra. De momento, não existem estudos sobre as implicações, na redução dos custos compostos de transporte e mão de obra, que a leveza dos FRP pode proporcionar. Neste elemento em particular, concluiu-se que o preço de armar em GFRP se assemelha ao de armar com aço.

5.4. VIABILIDADE EM PORTUGAL

A viabilidade da construção de betão armado com varões FRP em Portugal depende de vários pontos. Primeiramente, na existência de documentos normativos de dimensionamento para fomentar a confiança nas empresas de construção. Desta forma, seria possível a formação de engenheiros e a adaptação de boas práticas na construção.

Outro pilar importante é viabilidade económica desta técnica na construção corrente. A existência de uma empresa nacional de produção de varões FRP, ou uma boa representação em Portugal por parte de uma empresa estrangeira, contribuiria positivamente para que os preços de mercado deste material se tornassem mais acessíveis. Isto seria alcançado através de uma redução nos custos de transporte e de taxas associadas à exportação.

Por representarem uma alternativa mais sustentável à construção, poderiam ser implementados benefícios fiscais para as empresas que optassem por esta solução.

Por fim, a standardização dos produtos a nível mundial, assim como dos métodos de ensaio realizados pelos fornecedores e das fichas técnicas dos varões, levaria a um processo de comercialização mais acessível e ágil, fomentando a sua aplicação em Portugal.

Atualmente, a deficiente investigação, aliada ao facto desta ser uma técnica recente no espectro histórico do setor da construção, leva a que os modelos de dimensionamento existentes estejam ainda relativamente dispersos e tenham carácter conservador, resultando em soluções menos eficazes com coeficientes de segurança por vezes exagerados. Em última análise, isto implica um incremento desnecessário dos custos de construção com varões FRP, diminuindo o seu potencial no setor da construção.

A atual inexistência de mão de obra qualificada e de engenheiros capazes nesta área revela-se um obstáculo a ultrapassar para que esta solução se torne viável. De momento existe uma escassez de mão de obra no setor da construção em Portugal, tornando ainda mais difícil a contratação de equipas especializadas na construção com varões FRP.

Como já foi referido nos capítulos anteriores, a construção de betão armado com varões FRP é excecionalmente boa em ambientes agressivos, como a proximidade do mar. A partir de uma simples

análise geográfica de Portugal, pode-se concluir que a linha costeira do país é consideravelmente extensa para a área que este ocupa. Desta forma, a construção com varões FRP pode trazer vantagens construtivas nas zonas costeiras, aumentando o período de vida útil destas infraestruturas.

Com base nos diversos pontos aqui expostos, pode-se concluir que não se reúnem ainda as condições necessárias para que a construção com varões FRP em Portugal seja viável. No entanto, nada aponta para que esta situação não se possa reverter nas próximas décadas.

5.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O armazenamento dos varões FRP requer cuidados extra comparativamente aos varões de aço. Estes devem ser armazenados num local limpo sem exposição a radiação ultravioleta e a temperaturas elevadas, preferencialmente evitando o contacto com o chão.

Quando necessário proceder ao corte de varões, devem ser usadas serras de alta velocidade com diamante, que permitam um corte limpo, evitando que se rasguem as fibras do varão. Durante este procedimento devem ser utilizados óculos e máscara de proteção.

No manuseamento e montagem das armaduras, é recomendado algum cuidado devido à flexibilidade dos varões, de modo a garantir que estes fiquem na posição desejada pelo projetista. É também importante conservar a integridade da superfície dos varões, assegurando que estes não sofrem nenhum dano durante o seu manuseamento e se encontram livres de poeiras e gorduras na hora de montagem. Como medida de segurança, é recomendado o uso de luvas de proteção pelos operários de construção, dado que as fibras contidas nos varões podem originar lesões e irritação da pele.

Antes de serem iniciados quaisquer trabalhos, recomenda-se que seja efetuado um controlo de qualidade dos materiais a utilizar. Em caso de haver alguma insegurança nas propriedades dos varões, devem-se realizar ensaios, de modo a garantir que os pressupostos tomados pelo projetista se aplicam.

O preço médio de mercado dos varões GFRP, em €/Kg, é 2.20 vezes superior ao dos varões de aço. No entanto, os varões FRP são cerca de 4 a 6 vezes mais leves, o que por sua vez torna o seu preço menor por €/m³. Apesar disso, as “Guidelines” de dimensionamento actuais sugerem que, de uma forma geral, o betão armado com FRP requer mais quantidade de armadura do que o betão tradicional. Assim sendo, torna-se bastante difícil perceber a viabilidade económica destes materiais, sendo apenas possível estabelecer uma análise comparativa justa visando cada caso em particular.

Pondera-se que o custo composto dos varões FRP é inferior ao do aço, dado que, devido à sua leveza, os custos de transporte e de mão de obra para a montagem das armaduras serão menores que os do aço.

No caso prático apresentado, o custo direto de armar em GFRP ficou 1.023 vezes mais caro do que armar em aço, equivalente a dizer que o custo da armadura em aço é 97.76% do custo da armadura em GFRP. Conclui-se assim, que existem situações onde o custo de armar com varões de FRP pode-se revelar economicamente viável.

As incertezas de comportamento estrutural, coeficientes de dimensionamento conservadores, a inexistência de mão de obra qualificada e de engenheiros com formação nesta área, falta de normalização e presença significativa no mercado internacional fazem com que esta solução não se apresente ainda viável em Portugal para uma aplicação recorrente.

6

CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES RELEVANTES

Este capítulo tem como objetivo principal, a formulação de uma síntese das conclusões relevantes já previamente referidas em cada capítulo no item relativo às considerações finais.

De um modo geral, o trabalho desenvolvido neste documento conseguiu dar resposta aos objetivos estabelecidos. Foram abordados vários temas, nomeadamente: a análise das propriedades dos varões FRP, o comportamento estrutural do betão armado com FRP face a tipos de cargas distintas, os modelos de dimensionamento existentes e a sua viabilidade ambiental e económica.

A aplicação de materiais compósitos FRP na construção civil é diversificada, abrangendo desde a construção de estruturas de raiz, que apresentam boa resistência quando expostas a ambientes quimicamente agressivos, ao reforço e reabilitação de estruturas existentes, com o intuito de prolongar o seu tempo de vida útil. As principais aplicações de materiais compósitos FRP na construção são (i) o reforço de estruturas com sistemas Laminados pré-fabricados ou com sistemas curados “in-situ” tipo manta/tecido, (ii) a construção de estruturas em betão armado com varões FRP e (iii) a construção de estruturas novas com o uso de perfis pultrudidos, muitas vezes utilizados em elementos não estruturais ou estruturas secundárias. As técnicas de reforço por colagem são EBR (“Externally Bonded Reinforcement”) e NSR (“Near-surface Mounted Reinforcement”) e ambas permitem que seja feita uma intervenção não invasiva à estrutura. A construção com perfis FRP pultrados, além de alternativa à construção com perfis metálicos, é igualmente indicada para elementos não estruturais e para estruturas secundárias como escadas, isolantes, painéis de fachada e plataformas, dado que a reduzida relação rigidez/resistência os torna propensos a sofrer elevadas deformações por encurvadura elástica.

A pegada ecológica dos varões FRP é menor relativamente à do aço. A produção destes materiais origina menos emissões de carbono e consome menos energia. Estima-se que vigas reforçadas com GFRP, BFRP e CFRP apresentam, respetivamente, cerca de 43%, 40% e 39% menos emissões de carbono do que vigas reforçadas com aço. Apresentam também reduções no consumo de energia na ordem dos 47%, 50% e 32%. Assim, conclui-se que esta técnica de construção se apresenta como sustentável. O seu potencial no setor da reabilitação permite uma redução da pegada ecológica, uma vez que permite evitar os desperdícios envolvidos na demolição e reconstrução.

As fibras comerciais existentes atualmente são as de vidro (G), carbono (C), basalto (B) e aramida (A), sendo que partilham de algumas características semelhantes, mas com outras diferentes entre si. As fibras de vidro são as mais económicas, no entanto, de um modo geral, as fibras de carbono são as que apresentam melhores características mecânicas, sendo a sua grande condicionante o custo. As fibras de

basalto são as mais recentes na área de construção em betão armado e possuem excelentes propriedades resistentes à corrosão e deterioração. As fibras de aramida, embora exceccionalmente leves, são bastante suscetíveis a absorver humidade, o que reduz bastante as suas propriedades resistentes.

As principais vantagens estruturais dos varões FRP são a sua resistência a ambientes agressivos, leveza, elevada resistência longitudinal à tração e tolerância à fadiga. Apresentam também neutralidade eletromagnética. Possuem um coeficiente de expansão térmica superior ao do betão endurecido, o que indica que variações de temperatura podem causar fendilhação no betão. As principais diferenças entre os FRP e o aço residem no comportamento elástico linear dos varões FRP e o seu baixo módulo de elasticidade.

Das empresas produtores de varões de FRP construção em betão armado a nível mundial destacam-se neste estudo: SHOECK, DEXTRA GROUP, PULTRALL, Pultron Composites e Kodiak. Através da análise das fichas técnicas fornecidas pelas diversas empresas, pode-se concluir que existe disparidade entre informações fornecidas e as características dos varões comerciais, indicativo de que o mercado dos varões FRP para construção em betão armado encontra-se muito disperso e pouco estandardizado. Para assegurar a qualidade dos produtos vendidos, devem ser respeitados um conjunto de requisitos, medidos por ensaios reconhecidos, propostos por entidades fidedignas.

De um modo geral, os varões de FRP apresentam bom comportamento à tração, uma má resistência à compressão e especial cuidado quando expostas a esforços de corte. Os modos de ruína por flexão dão-se por rotura da armadura, esmagamento do betão ou perda de aderência. Quando expostos ao corte, os elementos armados com FRP rompem corte-tração ou corte-compressão. Quando expostas a esforço axial, o modo de ruína dá-se por esgotamento da capacidade resistente à compressão dos varões FRP, passando por 3 fases distintas durante a sua resposta à solicitação. O comportamento à torção é um tema bastante complexo, pelo que atualmente se utilizam ainda coeficientes de segurança bastante conservadores. A ruína por ciclos de fadiga dá-se por “microbuckling” quando as fibras são sujeitas a cargas de compressão que excedem a carga crítica das fibras. A escolha de uma geometria diferente das barras e o uso de certas resinas de revestimento podem ser boas medidas no sentido de retardar a propagação das micro fendas, aumentando a resistência à fadiga dos varões. As condições de aderência condicionam bastante o comportamento da estrutura, uma vez que se não houver boa capacidade de transmissão de esforços entre os dois materiais, é falhado o propósito da sua junção, levando à ruína do elemento. Os parâmetros principais que afetam a aderência dos varões de FRP ao betão são: comprimento e diâmetro do varão, tipo de FRP e tratamento da superfície. A escolha de varões nervurados com superfície revestida de areia é a melhor solução para melhorar a aderência betão-varão. A resistência dos varões FRP quando dobrados reduz significativamente.

Das “Guidelines” abordadas, a do ACI (“American Concrete Institute”) mostrou ser a mais completa. No entanto, para obter os melhores resultados possíveis, sugere-se a leitura dos restantes, visto que todos têm pontos onde se destacam. Para uma melhor ponderação dos coeficientes de segurança, o CNR (“Consiglio Nazionale delle Ricerche”) propõe que nos coeficientes de resistência de cálculo se considere o tipo de FRP, o estado limite a dimensionar, um fator ambiental e um de fator efeitos a longo prazo.

Apesar da aplicação de varões FRP em estruturas de betão armado se assemelhar em bastantes aspetos à do aço, existem alguns cuidados no manuseamento, armazenamento e colocação fundamentais para o seu bom uso. Os varões FRP são suscetíveis a danos na sua superfície quando manejados sem cuidado, pelo que requerem as mesmas precauções que varões de aço revestidos com epóxi. Estes devem ser

armazenados num local limpo e escuro, não diretamente no chão. Devem ser manuseados com cuidado devido à sua grande flexibilidade e cortados com cuidado para não rasgar as fibras do varão. O uso de luvas de proteção é essencial na montagem das armaduras, juntamente com uso de óculos e máscara quando se procede ao corte. Recomenda-se que os técnicos de construção tenham experiência prévia ou formação específica na área.

Embora o preço dos varões GFRP, avaliado em €/Kg, seja cerca de 2.20 vezes superior ao dos varões de aço, a densidade dos varões FRP é cerca de 1/4 a 1/6 da dos varões de aço, o que implica que o custo por metro cúbico de armadura em varões FRP seja inferior. Apesar disso, o dimensionamento de estruturas armadas com FRP não segue as mesmas indicações e coeficientes de segurança que o dimensionamento de estruturas em aço, sendo sistematicamente necessário maior volume de armadura, implicando gastos maiores. A comparação dos custos diretos destas duas técnicas de construção é um assunto complexo, podendo apenas ser estabelecida uma comparação justa, fazendo recurso de um caso concreto de aplicação e comparando os custos destes materiais após se obter a quantidade de armadura necessária para ambos. É expectável que os custos indiretos da construção com FRP sejam menores que os do aço, dado que a leveza destes materiais permite um transporte e montagem mais eficiente. No caso prático apresentado, o custo direto de armar em GFRP ficou 1.023 vezes mais caro do que armar em aço, equivalente a dizer que o custo da armadura em aço é 97.76% do custo da armadura em GFRP. Conclui-se assim, que existem situações onde o custo de armar com varões de FRP pode-se revelar economicamente viável.

Apesar das suas vantagens, a falta de investigação, aliada ao facto de ser uma técnica recente no espectro histórico do setor da construção, leva a que os guias de dimensionamento existentes estejam ainda relativamente dispersos e tenham carácter conservador, resultando em soluções menos eficazes, com coeficientes de segurança por vezes exagerados, o que implica um aumento dos custos de construção com varões FRP. A falta de mão de obra qualificada em Portugal, a falta de standardização dos produtos a nível mundial, o custo superior à solução tradicional e a escassez de empresas produtoras nas proximidades levam a que esta solução construtiva não seja, de momento, viável em Portugal. No entanto, é possível que esta situação se reverta nas próximas décadas.

6.2. FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

A construção com betão armado reforçado com varões de FRP não é uma prática comum na construção civil em Portugal. Apesar de começar a existir alguma investigação nesta área e algumas propostas de “Guidelines”, nem sempre concordantes entre si, deve-se aprofundar o conhecimento das potencialidades deste material e técnica. A investigação numérica e experimental são fundamentais para que este método de construção ultrapasse as “dúvidas” sobre o seu comportamento na prática, sobretudo se forem implementados regulamentos para dimensionamento e para boas práticas de utilização, possibilitando a sua aplicação mais fiável na indústria da construção. Neste contexto, apresentam-se algumas sugestões para futuros estudos.

- Avaliar as implicações no dimensionamento da utilização de uma secção transversal de geometria não retangular.
- Relativamente ao comportamento à flexão, sugere-se que se realizem mais estudos do comportamento à flexão composta. No comportamento ao corte, deve ser aprofundado o conhecimento sobre o punçoamento de lajes armadas bidireccionalmente.

- Devem ser realizados mais estudos experimentais que permitam caracterizar o comportamento dinâmico de estruturas com varões FRP, assim como as suas limitações face a esforços de torção.
- Estabelecer um modelo universal de fichas técnicas de varões que permita uma standardização dos produtos a nível mundial assim como o ajuste dos ensaios de controlo de qualidade.
- Para ser possível efetuar uma comparação mais concreta dos custos implicados na construção com varões FRP com a construção com varões de aço, é recomendado que se analise diversos casos práticos, de modo a entender em que situações o uso de FRP se apresenta economicamente mais vantajoso.
- Reavaliar os coeficientes de segurança e o controlo de abertura de fendas, de modo que seja proposto um dimensionamento mais eficiente que explore melhor os limites físicos, mecânicos e geométricos dos varões FRP em betão armado.
- Aprofundar o conhecimento acerca das fibras de basalto, que aparentam ser bastante promissoras, uma vez que, para além de possuírem boas propriedades resistentes, não são dispendiosas.
- Estudar o impacto que a leveza dos FRP têm na redução de custos compostos de transporte e mão de obra para a montagem de armaduras, comparativamente ao aço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ACI 440.1R-15, Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars. American Concrete Institute, ACI Committee 440, 2015.
- [2] ACI 440.3R-12, Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRP) composites for reinforcing or strengthening concrete and masonry structures, American Concrete Institute, ACI Committee 440, 2012.
- [3] CNR-DT 203/2006, Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. Italian National Research Council, 2007.
- [4] JSCE. Recommendations for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing materials. Concrete Engineering Series 23, Japan Society of Civil Engineers, 1997.
- [5] ISIS. Educational module 6: Application and Handling of FRP Reinforcements for Concrete. Intelligence Sensing for Innovative Structures, ISIS Canada, 2006.
- [6] Wu, Zhishen & Wang, Xin & Iwashita, Kentaro. *State-of-the-Art of Advanced FRP Applications in Civil Infrastructure in Japan*, 2007.
- [7] Juvandes, L.F.P. *Aplicações de Compósitos FRP no Reforço de Estruturas*. 1^{as} Jornadas de Materiais na Construção, JMC, Porto, 2011.
- [8] Juvandes, L.F.P. *Materiais Compósitos Reforçados com Fibras na Construção Civil*. WORKSHOP “Os Materiais na Casa do futuro”, 2006
- [9] Żyjewski, A., Chróścielewski, J., Pyrzowski, Ł. *The use of fibre-reinforced polymers (FRP) in bridges as a favourable solution for the environment*. E3S Web of Conferences, 2017.
- [10] Mara, V., Haghani, R., Harryson, P. *Bridge decks of fibre reinforced polymer (FRP): A sustainable solution*, 2014.
- [11] Ruiz Emparanza, A., and de Caso Y Basalo, F.J. *State-of-the-Practice of Global Manufacturing of FRP Rebar and Specifications*. ACI Fall Convention, 2017.
- [12] Sonnenschein, R., Gajdosova, K., Holly, I. *FRP Composites and their Using in the Construction of Bridges*. Procedia Engineering, 2016.
- [13] Tu, J., Gao, K., He, L., Li, X. *Experimental study on the axial compression performance of GFRP-reinforced concrete square columns*, 2019.
- [14] Huanzi Wang, Belarbi, A. *Static and Fatigue Bond Characteristics of FRP Rebars Embedded in Fiber-reinforced Concrete*. Journal of Composite Materials, 2010.
- [15] Deifalla, A. et al. *Exploring GFRP bars as reinforcement for rectangular and L-shaped beams subjected to significant torsion: An experimental study*, 2014.
- [16] Gao, D., Zhang, C. *A Model for Shear Strength of FRP Bar Reinforced Concrete Beams without Stirrups*. Advances in Civil Engineering 2020, 2020.
- [17] Canning L. *Performance and 8-year load test on West Mill FRP Bridge*. Proceedings of CICE 2012, Rome, Italy, 2012.

- [18] Barcikowski, M., Lesiuk, G., Czechowski, K., Duda, S. *Static and Flexural Fatigue Behavior of GFRP Pultruded Rebars*, 2021.
- [19] Solyom, S., Balázs, G.L. *Bond of FRP bars with different surface characteristics. Construction and Building Materials*, 2020.
- [20] Sonnenschein, R., Gajdosova, K., Holly, I. *FRP Composites and their Using in the Construction of Bridges*. Procedia Engineering, 2016.
- [21] Shakir Abbood, I., Odaa, S.A., Hasan, K.F., Jasim, M.A. *Properties evaluation of fiber reinforced polymers and their constituent materials used in structures – A review*, 2021.
- [22] Ibrahim, M., Ebead, U., Al-Ansari, M. *Life Cycle Assessment for Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites Used in Concrete Beams: A State-of-the-Art Review*, 2020.
- [23] Rozsypalova, I., Prokes, J., Cairović, Đ., Girgle, F., Danek, P., Stepanek, P. *Research on the residual tensile strength of composite reinforcing bars exposed to elevated temperatures*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021.
- [24] Reis, V.L.F.R. *Construção de Estruturas de Betão Armado com varões de FRP*. Dissertação de mestrado, FEUP, 2009.
- [25] Camacho, L.F.C.C. *A utilização de varões de GFRP nas Estruturas de Betão Armado*. Dissertação de mestrado, UMa, 2011.
- [26] ISIS Design Manual No.3. Reinforcing concrete structures with fibre reinforced polymers. Intelligent Sensing for Innovative Structures, Canada, 2001.
- [27] <https://www.itke.uni-stuttgart.de/research/built-projects/road-bridge-with-frp-decks/>. 7/04/2022
- [28] <https://www.fibercore-europe.com/en/project/utrecht-a27-lunetten/>. 7/04/2022
- [29] <https://www.viapolmais.com.br/reforco-estrutural-com-fibra-de-carbono/>. 19/05/2022
- [30] <https://www.sp-reinforcement.eu/en-EU/projects>. 19/05/2022
- [31] <https://www.sp-reinforcement.pt/pt-PT/projectos/reforco-de-pilares-de-ponte-viaduto-sul-da-ponte-vasco-da-gama-lisboa-portugal>. 19/05/2022
- [32] <https://www.sp-reinforcement.pt/pt-PT/projectos/reforco-de-pisos-appartementen-bellavista-den-haag-netherlands/>. 19/05/2022
- [33] <https://www.tianjinlatino.com/product/frp-pultruded-profiles> . 19/05/2022
- [34] http://m.arvind-amd.com/building_construction.html . 19/05/2022 19/05/2022.
- [35] Nunes, F.F.N. *Comportamento estrutural de perfis pultrudidos de GFRP reforçados com mantas CFRP*. Dissertação de mestrado, IST, 2012.
- [36] Gonçalves, J.F.G. *Aderência de varões GFRP no betão*. Dissertação de mestrado, UMa, 2013.
- [37] Juvandes, L.F.P. *Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, DECivil, Porto, 1999.
- [38] Fib (2007). *FIB Bulletin 40 – FRP Reinforcement in RC Structures*, Federation Internationale du beton, Task Group 9.3, 2007.

A1

Anexo 1- Fichas técnicas de varões comerciais

Proposta de Modelo de Fichas técnicas de Varões Comerciais (ISIS, 2007)

TECHNICAL DATA SHEET: FRP bars for reinforced concrete structures				
THE MANUFACTURER SHALL REPORT THE STATISTICAL VALUES NEEDED FOR THE EVALUATION OF THE CHARACTERISTIC STRENGTHS (E.G. SAMPLE MEAN, STANDARD DEVIATION, POPULATION, PERCENTILE, CONFIDENCE INTERVAL).				
Description				
Commercial name, type of fiber, type of resin, manufacturing technology and any other information deemed useful				
Geometrical and physical properties				
Property		Measurement unit	Test method Reference standard	Note
bar cross section geometry			Appendix B	
bar equivalent area		mm ²	Appendix B	
bar equivalent perimeter		mm	Appendix B	(1)
color				
density	fiber	g/cm ³	ISO 1183-1:2004(E)	(2)
	matrix	g/cm ³		
fiber content	weight	%	ISO 11667:1997(E)	
	volume	%		
glass transition temperature of resin(T _g)		°C	ISO 11357-2:1999(E) (DSC) ISO 11359-2:1999(E) (TMA) ASTM E1640 (DMA)	
maximum operating temperature		°C		
electrical conductivity		S/m		
(1) Value to be used in case of non-circular bars to determine the anchorage length.				
(2) Value to be used to determine the fiber weight fraction when only the volume fraction is known or vice versa.				
Properties				
Property		Measurement unit	Test method Reference standard	Note
Tensile modulus of elasticity		GPa	Appendix B / ISO 527-4,5:1997(E)	
tensile strength (average and characteristic value)		MPa	Appendix B / ISO 527-4,5:1997(E)	
strain at failure		%	Appendix B / ISO 527-4,5:1997(E)	
creep			ISO 899-1:2003(E)	(3) %

relaxation (bars, cables)			(4)
bond: tangential stress (bars, cables)		pull-out test	(4)

(3) The ISO 899-1:2003(E) standard is the general reference standard for creep behaviour of FRP materials, while the ISO standard (TC71/SC6N) "Non-conventional strengthening of concrete - Test methods-Part 1: Fiber strengthened polymer (FRP) bars and grids" is under way for reinforcing FRP bars and prestressed grids, where a specific test is proposed for FRP bars ("Test Method for creep failure"). As an alternative, there is a test proposed in the document ACI 440.3R-04 "Guide Test Methods for Fiber-reinforced Polymers for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures" named "Test Method for creep rupture of FRP bars".

(4) In the ISO standard (TC71/SC6N) concerning FRP bars and grids the following two tests are proposed: "Test method for bond strength by pull-out testing" for bond, and "Test Method for long-term relaxation" for relaxation. Similar tests are included in the ACI 440.3R-04 document.

Storage Conditions
Description

Safety and handling
Description



Technical Information

Schöck Combar®

December 2015



Technical project service

Tel. +49 7223 967-449

Fax +49 7223 967-490

Combar@schoeck.com



**Planning tools –
downloads and requests**

Tel. +49 7223 967-449

Fax +49 7223 967-490

Combar@schoeck.com

www.schoeck-Combar.com

Schöck Combar®

All types at a glance

	straight bars¹⁾ Ø 8 mm Ø 12 mm Ø 16 mm Ø 20 mm Ø 25 mm Ø 32 mm	standard bar lengths 10m 10m 11.8m 11.8m 11.8m 11.8m bar length > 11.8m available on request	▶ As load bearing tensile reinforcement in concrete members
	bars with anchorage heads Ø 12 mm Ø 16 mm Ø 20 mm Ø 25 mm Ø 32 mm	standard bar lengths 0.25 to 4.0 m	▶ As end anchorage ▶ As shear reinforcement
	bent bars/stirrups Ø 12 mm Ø 16 mm Ø 20 mm	standard bar lengths size up to 1.95 m x 1.35 m special size up to 2 m x 3.2 m 0.5 to 6.5 m	▶ As ties / transverse reinforcement for confinement ▶ As edge reinforcement ▶ As shear reinforcement

¹⁾ load-bearing core diameters in mm

Delivery Times

Delivery times upon request at +49 7223 967-449.

Accessories

For applications where the reinforcement is to contain no metallic elements at all, Schöck carries plastic spacers (lattice tubes) and plastic clips for the connection of Combar® bars at a right angle. Alternatively, Combar® bars can be tied using conventional plastic cable ties.

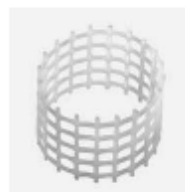
Metal coupler sleeves and wire rope grips are ideal for the connection of Combar® and steel reinforcing bars. The sleeves are glued onto the Combar® bars in the shop. Specially developed grips with a wire rope shackle can be used for the connection between Combar® bars and steel bars with a diameter greater than 32 mm.



clips



cable ties



spacers



wire rope grips

Schöck Combar® Product description

Schöck Combar® was conceptualized as internal reinforcement in concrete members. The mechanical properties and the bond properties are comparable to those of steel rebar. The material properties were tested under predominantly static loads in central European climates. They are certified for a design service life of 100 years.

Combar® bars are linearly elastic up to failure. For all bar diameters it occurs at stresses well above 1,000 MPa. As a result of the comparatively low modulus of elasticity of Combar®, the failure of Combar® reinforced concrete members is preceded by large deflections. When the load is removed the deflection returns to near zero.

Combar® bars can not be permanently deformed or bent. A bent bar returns to its original shape as soon as the applied force is removed. Bars with small diameters can be bent elastically (circular tunnel cross-sections). Customised bent bars and stirrups are prefabricated at the shop.

Material characteristics

- high corrosion resistance
- high chemical resistance
- electrically non-conductive
- non-magnetic
- ease of machining
- very low thermal conductivity

=>

Fields of application

open and underground parking garages, bridge caps, barrier walls, curbs, side walks, approach slabs, wing walls, slim facade elements, shore line stabilisation, hydraulic engineering

Industrial floors, industrial containers, sewage-treatment plants, agricultural facilities

machinery with high field-strengths, signals and switches of railways

sensitive electronic equipment, residential buildings, nano technology, MRIs

shaft walls in tunnelling, formwork anchors, pre planned demolition

energy saving, avoiding of thermal bridges, Schöck Thermoanker

properties*	steel rebar B500	stainless steel rebar	Schöck Combar®
ultimate tensile strength f_{tk} (N/mm ²)	550	550	> 1000 (see page 16)
characteristic value tensile strength f_{tk} (N/mm ²)	500	500	no yielding
design value tensile strength f_{td} (N/mm ²)	435	435	445 (see page 17-18)
strain at Ultimate Limit State	2.18 ‰	2.72 ‰	7.4 ‰
tension modulus of elasticity	200,000	160,000	60,000
design value bond strength f_{bd}	acc. EC 2	acc. EC 2	acc. EC 2 values see page 26
concrete cover (min.)	acc. EC 2	$d_f + 10$ mm	$d_f + 10$ mm
density γ (g/cm ³)	7.85	7.85	2.2
thermal conductivity (W/mK)	60	15	0,7 (axial) 0,5 (radial)
coefficient of thermal expansion (1/K)	$0.8 - 1.2 \times 10^{-5}$	$0.8 - 1.6 \times 10^{-5}$	0.6×10^{-5} (axial) 2.2×10^{-5} (radial)
specific resistance ($\mu\Omega\text{cm}$)	$1 - 2 \times 10^6$	7.2×10^6	$> 10^{12}$
magnetism	yes	very little	no

* all values according to EC 2

Schöck Combar® Product data sheet

Bar sizes, dimensions, weights

Combar® bar	designated diameter (ACI / CSA)	core diameter (mm)	exterior diameter (mm)	cross-sectional area (mm²) ¹⁾	weight per meter (kg/m)
ø 8	M8	8	9	50.3	0.13
ø 12	M13	12	13.5	113	0.29
ø 16	M15	16	18	201	0.52
ø 20	M20	20	22	314	0.79
ø 25	M25	25	27	491	1.21
ø 32	M32	32	34	804	1.94

¹⁾ Determination of load-bearing cross-sectional area:

Combar® bars are produced in a pultrusion process. The ribs are ground into the hardened bars. Therefore, they do not contribute in any way to the load-bearing capacity or the tensile strength of the bars.

To determine the load-bearing core cross-sectional area of the perfectly round Combar® bars the exterior diameter is measured using callipers. Twice the depth of the ribs, measured with callipers, is subtracted from this value to determine the core diameter.

Methods for the determination of the average cross-sectional area of FRP bars according to CSA S806, ISIS Canada and ACI440 have been developed for sand-coated bars or bars with a deformed surface. They are not applicable to Combar® bars.

Material properties straight bars

properties	symbol ¹⁾	values	remarks
characteristic value short-term tensile strength	f_{tk0}	> 1000 N/mm²	
char. value long-term tensile strength	f_{tk}	580 N/mm²	see page 17 - 18
material safety factor	γ_i	1.3	
design value long-term tensile strength ²⁾	f_{td}	445 N/mm²	
tension modulus of elasticity	E_t	60,000 N/mm²	see page 16
strain at Ultimate Limit State ²⁾	$\epsilon_{t,ULS}$	7.4 ‰	(at $f = 445$ N/mm²)
design value bond strength (good bond condition)	f_{bd}	2.08 (N/mm²) 2.33 (N/mm²) 2.45 (N/mm²)	C20/25 C30/37 C40/50 and higher
transverse shear strength ³⁾	τ	150 N/mm²	not for design of dowels!
concrete cover	c_v	$d_f + 10$ mm $d_f + 5$ mm (precast)	all exposition classes
density	γ	2.2 (g/cm³)	
thermal conductivity	λ	< 0.7 W/mK axial 0.5 W/mK radial	
coefficient of thermal expansion	α	0.6×10^{-5} 1/K (axial) 2.2×10^{-5} 1/K (radial)	concrete: $0.5 - 1.5 \times 10^{-5}$ 1/K
critical temperature	—	400°C	see page 24 and 25
specific resistance	—	> 10^{12} $\mu\Omega\text{cm}$	
chemical resistance	—	excellent	
electro-magnetic conductivity	—	none	
environmental properties	—	Z0	acc. to LAGA (Germany)
char. one thousand hour strength (40 °C) ⁴⁾	$f_{tk,1000h}$	950 N/mm²	all bar diameters
logarithmic temporal slope ⁴⁾	R10	< 15%	at 40°C; per log. decade

¹⁾ all symbols according to EC-2 / fib

²⁾ at 40°C (permanent); for statically determinate structures, for indeterminate structures: $f_{td} = 370$ N/mm², $\epsilon_{t,ULS} = 0.61$ ‰

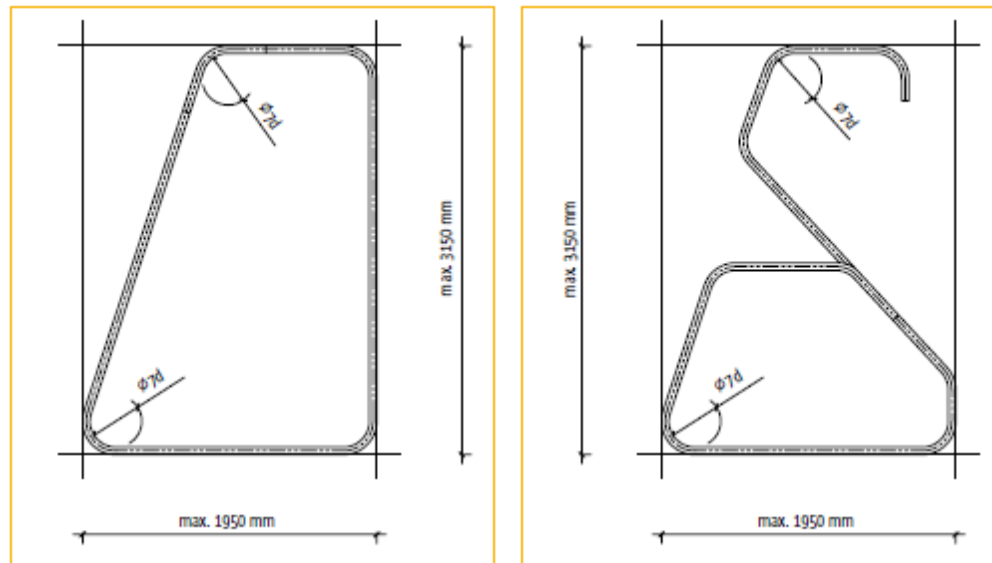
³⁾ values in tests according to ACI / CSA - not for design of shear dowels!

⁴⁾ for determination of long-term tensile strength acc. to fib bulletin 40 (see pages 17 - 18)

Schöck Combar® Combar® Bent bars and stirrups

Combar® bent bars and stirrups are produced by bending a bundle of glassfibres impregnated with epoxy vinyl ester resin, covered by a thin polypropylene coat. Afterwards these raw bars are thermally cured. This procedure allows for a high fibre content and nearly parallel alignment of fibres in the bent portion of the bars resulting in high strength and a modulus of elasticity similar to that of straight Combar® bars.

Combar® bent bars can be produced in all 2D shapes (e.g. z shapes and hat shapes). 3D bars like spirals can be produced on demand. The smallest pin diameter is seven times the nominal bar diameter. Bent Combar® bars are cured in a form with maximum dimensions 1.95 x 1.35, special sized stirrups up to 1.95 by 3.15 m.



Bar sizes, dimensions, weights of bent bars

nominal diameter (mm)	core diameter (mm)	exterior diameter (mm)	nominal cross section (mm ²)	weight (kg/m)	min. mandrel size 7 d _s (mm)	min. / max. bar lengths (m)
12	11.6	15.5	113	0.30	84	0.5 m / 6.5 m
16	15.6	19.8	201	0.49	112	
20	19.1	23.8	314	0.71	140	

Schöck Combar® Combar® Bent bars and stirrups

Fibre content, cure ratio

The fibre content of Combar® bent bars (all diameters) is approx. 65% (by weight, including the ribs).

Tensile strength, modulus of elasticity, durability

The modulus of elasticity of Combar® bent bars is 50 GPa. The partial factor of safety is 1.3 (German certification Combar®).

The long term tensile strength of Combar® bent bars has been determined according to the durability concept specified in the German approval of straight Combar® bars. The specified tensile strength is determined for sustained loads and a design service life of 100 years at 40°C effective temperature in highly alkaline concrete. (Please refer to pages 17 - 18)

nominal diameter (mm)	ultimate tensile strength*		characteristic value*** f_{tk}	design value*** f_{td}	modulus of elasticity E_t **
∅ 12	1000 N/mm ²	600 N/mm ²	250 N/mm ²	192 N/mm ²	50.000 N/mm ²
∅ 16	950 N/mm ²	600 N/mm ²			
∅ 20	600 N/mm ²	600 N/mm ²			

* larger value in straight section, smaller value in bend

** mean value of m. o. e.

*** based on nominal diameter

Bond properties

Maximum values of the bond strength f_{bd} in the straight portion of the bars and in the bends (end anchorage of bar) are (embedment length 5 and 10 times bar diameter C20/25):

nominal diameter	straight section	bend
∅ 12, 16	8 N/mm ²	10 N/mm ²
∅ 20	10 N/mm ²	12 N/mm ²

For all bar diameters (bent bars) and independently of the concrete strength the design value of the bond strength should be set to

$$f_{bd} = 2.3 \text{ N/mm}^2$$

In poor bond conditions this value is to be reduced to 1.6 N/mm² in accordance with EC 2.

Critical temperature

The critical temperature of Combar® bent bars is approximately 120°C.

Schöck Combar®

Approvals, certifications and test reports

International certifications

Organisation, country	title	issue date
DIBt, Berlin, Germany	General construction authority permit Schöck Combar® Thermo Anchor	Nov. 2009 expanded Dec. 2011
DIBt, Berlin, Germany	General construction authority permit Schöck Combar® glass fibre reinforced polymer rebar; nominal diameter: ϕ 16 mm	Dec. 2008 expanded June 2014
KOMO, KIWA, The Netherlands	Combar® glass fibre reinforcement in concrete ϕ 8, 12, 16 mm	Feb. 2009
University of Toronto, Canada	Compliance of 16 mm Combar® GFRP bars with ISIS Canada Certification Specifications	Oct. 2007 Nov. 2010
Syracuse University, USA	Evaluation and Certification of GFRP bars Combar®; Tests with Respect to the Requirements of the ACI 440.R3-04 Report (12, 16 and 32 mm)	July 2006

Test reports and expert opinions

Combar® bars have been extensively tested by independent experts around the world and at the in-house laboratory of Schöck in conjunction with the certifications in Germany, in the Netherlands and in Canada. The majority of these tests was performed at the Schöck lab, which was specifically certified to perform them. These tests were monitored by independent experts.

Selected English language reports and expert opinions on tests of the material and mechanical properties of Combar® are listed below. See www.schoeck-combar.com.

material property	title of report	author
human health and safety	Continuous Filament Glass Fibre and Human Health	European Glass Fibre Producers Association, APFE
environmental impact	Categorisation of GFRP bars Combar® into the group Z0	Chemical Lab Dr. Vogt, Karlsruhe, Germany
tensile strength	Report on mechanical testing of GFRP rebars (8, 12, 16mm)	Arab Center for Engineering Studies, Doha, Qatar
fire performance	Combar® bond fire performance	Danish Technological Institute, Taastrup, Denmark
temperature dependence	Determination of temperature-dependent tensile strengths of Combar® reinforcement bars	Materials Testing Institute Braunschweig, Germany
durability	Durability and creep-rupture tests performed on straight GFRP bars with standard coating d=16mm	Schöck Bauteile GmbH (certification tests)

Composite Fiberglass (GFRP) Rebar - Introduction

Features of Durabar™



- Stronger & Lighter than steel**
- 2x the tensile strength of steel
 - 1/4 weight of a steel bar of same diameter



- Non-corrosive, non-conductive**
- Material doesn't corrode and offer high resistance to chlorides and alkali.
 - Particularly suitable for environments exposed to water, salt, & humidity.
 - Non-conductive. It's the perfect reinforcement solution for high voltage currents and magnetic fields.



- Design optimization**
- Bond strength of 10 MPa, allowing shorter lapping length.
 - Can substitute steel bar of larger diameter – or increase the rebar spacing.
 - Further saving on the concrete cover = less volume of concrete.



- Simplified Installation**
- Delivered in straight bars up to 11.8m or in coils.
 - Labor required for installation reduced by 2x to 3x.

Why choose Durabar™



Stronger & lighter than steel, with 6x to 8x times less material needed than conventional steel rebars.



Material is safe & easy to handle, requiring much less labor for installation, generating both time & money saving.



Durable material, allowing to design for a longer lifetime of the structure. As no maintenance nor repair work is needed, Durabar™ generates savings during the whole project life.



Sustainable material, with significantly less energy required & CO₂ emission, both at production stage and for its transportation & installation.

About Us

Established in 1983, Dextra is a leading manufacturer and distributor of engineered construction products for the building and civil industries.

Dextra is a leader of the composite industry for the past 25 years, manufacturing high quality FRP solutions supplied on large infrastructure projects.

The company excels in offering comprehensive solutions to its customer, with expertise in designing concrete structures reinforced with GFRP rebars.

All Durabar™ GFRP rebars are produced in Dextra ISO-9001 and ISO-14001 certified factory, following the company stringent quality assurance policy.

Ideal for Flat-work / slab on grade





Composite Fiberglass (GFRP) Rebar - Datasheet

Physical & Mechanical Properties							
Reference	Bar Dia.	Nominal Cross Sectional Area	Ultimate Tensile		Ultimate Tensile Strain	Modulus of Elasticity	Weight
	mm	mm ²	kN	MPa	%	GPa	kg/m
Durabar-DIY	6	32	26.00	820	1.82	45	0.08
	8	45	37.00	820	1.82	45	0.11
	10	71	53.00	750	1.67	45	0.16
	13	129	87.00	685	1.52	45	0.27
Durabar-SLIM	6	32	29.00	910	1.94	47	0.08
	8	45	41.00	910	1.94	47	0.11
	10	71	59.00	830	1.77	47	0.16
	13	129	96.00	760	1.62	47	0.27

ACI (American Concrete Institute) Design & Testing Guide

ACI 440.1R-15

Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars

ACI 440.3R-12

Guide Test Methods For Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites For Reinforcing Or Strengthening Concrete And Masonry Structures

ACI 440.5R-08

Specification for Construction with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars

Application for Durabar™-DIY & SLIM

Slab on grade	Architectural Precast	Driveways	ICF Construction
Decorative Concrete	Residential Foundations	Sidewalks	Warehouse Floors
Agricultural Projects	Pour Back Slabs	Pool Decks	Flatwork
Basement Floors	Swimming Pools	Agricultural Slabs	
Parking Slabs	Industrial Slabs	Paving Projects	

Packaging										
Ref.	Bar Dia.	Straight bar				Coil				
		Unit Length	Quantity	Unit Length	Quantity	Total Coil Qty. in 20' Container	20' Container Total G.W. (kg)	Total Coil Qty. in 40' Container	40' Container Total G.W. (kg)	Length per Coil (m/coil)
	mm	mm / Piece	Pieces / 20' FCL	mm / Piece	Pieces / 40' FCL					
	6	5,800	43,100	11,800	21,200	168	4,030	340	8,160	300
	8	5,800	31,400	11,800	15,500	168	4,070	340	8,228	220
	10	5,800	21,600	11,800	10,600	126	3,120	255	6,311	150
	13	5,800	12,800	11,800	6,300	52	1,240	106	3,023	90

* Unit Bar length can be customized upon specific request, max length for 20 ft container load =5,800mm, max length for 40 ft container load =11,800mm.
* Each large coil is divided by 4x coils from large to small, inside each coil one by one.

Handling Placement and Store



- Cutting: Do not shear fiberglass bars. Field cut fiberglass bars using a fine blade saw, grinder, and carborundum or diamond blade. Sealing the ends of fiberglass bars is not necessary.



- Chairing: Place chairs at a spacing that ensures adequate concrete cover.



- Tying: Use same tying methods as for steel rebar. Tie wire material based on contractor preference.



- DURABAR™ should remain covered and protected from UV exposure until ready for use and placement.

Accessory	Availability for Bar Dia. (mm)				
	6	8	10	13	
 Chair	✓	✓	✓	x	
 Clip	✓	✓	x	✓	

- As with any reinforcement placement, be sure to follow best practices in all phases of your concrete project, from planning to construction, including pouring, curing, joint cutting, and maintenance for optimal performance.

For further inquiry, please contact
Ms. Tina Huang
Email: thuag@dextragroup.com





Composite Fiberglass (GFRP) Rebar-Durabar™-120 Datasheet

Physical & Mechanical Properties														
Reference	Nominal Diameter			Nominal Cross Sectional Area		Guaranteed Ultimate Tensile Force		Guaranteed Ultimate Tensile Strength		Ultimate Tensile Strain	Mean Tensile Modulus of Elasticity		Unit Weight / Length	
	Bar Size	in	mm	in ²	mm ²	kip	kN	ksi	MPa	%	Msi	GPa	lb/ft	kg/m
Durabar-120	#2	0.250	6	0.05	32	6.52	29.00	133.5	920	1.84	7.25	50.00	0.05	0.08
	#3	0.375	10	0.11	71	14.61	65.00	132.0	910	1.82	7.25	50.00	0.11	0.16
	#4	0.500	13	0.20	129	25.63	114.00	130.5	900	1.80	7.25	50.00	0.18	0.27
	#5	0.625	16	0.31	199	39.79	177.00	129.0	890	1.78	7.25	50.00	0.29	0.43
	#6	0.750	19	0.44	284	56.20	250.00	127.5	880	1.76	7.25	50.00	0.41	0.61
	#7	0.875	22	0.60	387	74.86	333.00	124.5	860	1.72	7.25	50.00	0.54	0.81
	#8	1.000	25	0.79	510	96.22	428.00	121.5	840	1.68	7.25	50.00	0.71	1.05
	#9	1.128	29	1.00	645	118.92	529.00	119.0	820	1.64	7.25	50.00	0.94	1.40
	#10	1.270	32	1.27	819	141.85	631.00	111.5	770	1.54	7.25	50.00	1.11	1.65
	#11	1.625	41	2.07	1338	222.56	990.00	107.0	740	1.48	7.25	50.00	1.85	2.75

ACI (American Concrete Institute) Design & Testing Guide

ACI 440.1R-15

Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars

ACI 440.3R-12

Guide Test Methods for Fiber Reinforced Polymer (FR) Composites For Reinforcing Or Strengthening Concrete And Masonry Structures

ACI 440.5R-08

Specification for Construction with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars

Application for Durabar™-120

Prefab / Precast - Box Culvert

Prefab / Precast - Thermal Insulation

Marine and Water Environment

Concrete Masonry

Truck Aprons

Jetty repair / external strengthening

Quay and Jetty

Petrochemical Complex

Footings

Marine Repair

Basement walls

Electromagnetic facilities

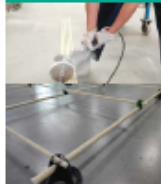
Lading Docks

Packaging										
Reference	Bar Dia.	Straight bar				Coil				
		Unit Length	Quantity	Unit Length	Quantity	Total Coil Qty. In 20' Container	20' Container Total G.W.	Total Coil Qty. In 40' Container	40' Container Total G.W.	Length per Coil
	In	ft / Piece	Pieces / 20' FCL	ft / Piece	Pieces / 40' FCL		(lb)		(lb)	(ft/coil)
Durabar - 120	0.250	19.00	43,100	38.70	21,200	168	8,889	340	17,990	984
	0.375	19.00	21,600	38.70	10,600	168	8,964	340	18,140	722
	0.500	19.00	12,800	38.70	6,300	126	6,876	255	13,913	492
	0.625	19.00	8,200	38.70	4,000	52	2,734	106	6,665	295
	0.750	19.00	5,700	38.70	2,800					
	0.875	19.00	4,500	38.70	2,200					
	1.000	19.00	3,400	38.70	1,700					
	1.128	19.00	2,700	38.70	1,300					
	1.270	19.00	2,200	38.70	1,100					
	1.625	19.00	1,300	38.70	600					

* Unit bar length can be customized upon specific request, max length for 20 ft container load = 19.00 ft, max length for 40 ft container load = 38.70 ft.

* Each large coil is divided by 4x coils from large to small, inside each coil one by one.

Handling Placement and Store



- Cutting: Do not shear fiberglass bars. Field cut fiberglass bars using a fine blade saw, grinder, and carbide or diamond blade. Sealing the ends of fiberglass bars is not necessary.
- Chaining: Place chains at a spacing that ensures adequate concrete cover.
- Tying: Use same tying methods as for steel rebar. Tie wire material based on contractor preference.
- DURABAR™ should remain covered and protected from UV exposure until ready for use and placement.
- As with any reinforcement placement, be sure to follow best practices in all phases of your concrete project, from planning to construction, including pouring, curing, joint cutting, and maintenance for optimal performance.

Accessory		Availability for Bar Dia. (in)			
		0.250	0.375	0.500	0.625
Chair		✓	✓	✓	✗
Clip		✓	✓	✗	✓

For further inquiry, please contact
Ms. Tina Huang
Email: thuang@dextragroup.com



Technical Data

Mateenbar™ 46

Mateenbar 46 (ASTM D7957, ACI 440.6)

	Units	#2 (6mm/0.23in)	#3 (10mm/0.39in)	#4 (13mm/0.51in)	#5 (16mm/0.62in)	#6 (19mm/0.74in)	#7 (22mm/0.86in)	#8 (25mm/0.98in)	#10 (32mm/1.25in)
Guaranteed tensile force	kN	27	59	96	130	182	241	297	437
	kip	6.1	13.2	21.6	29.1	40.9	54.1	66.8	98.2
	MPa								
	ksi								
Elastic Modulus	GPa	46							
	ksi	6670							
Guaranteed transverse shear capacity	kN								
	kip								
	MPa	150							
	ksi	23.2							
Primary Materials	Epoxy Backboned Vinylester and Corrosion Resistant E-CR Glass								
Weight	g/m	97	144	315	415	589	780	1030	1680
	lb/ft	0.07	0.096	0.211	0.278	0.395	0.524	0.692	1.128
Nominal cross-sectional area	mm ²	32	71	129	199	284	387	510	819
	in ²	0.049	0.11	0.20	0.31	0.44	0.60	0.79	1.27
Outer diameter (including ribs)	mm	8.2	10.0	14.0	16.0	19.0	21.8	25.0	31.4
	in	0.250	0.375	0.500	0.625	0.750	0.875	1.000	1.270

Please contact our team for information on the material properties, shape availability and dimensional limitations of bent bars.

Direct comparisons: Steel and mateenbar

Material Properties	Units	Mateenbar™	Stainless Steel (ASTM A955)	Steel (ASTM A615)
Tensile strength	MPa	800 - 1100	420	420
	ksi	116 - 159	60	60
Tensile modulus	GPa	46 - 60	200	200
	KSI	6675 - 8700	29000	29000
Bond strength	MPa	10	10	10
	PSI	1450	1450	1450
Thermal conductivity	W/(m·°C)	< 1 ^(f)	16	54
	BTU/(hr·ft·°F)	< 0.6 ^(f)	10	32
Electrical resistivity	Ω·m	> 200 x 10 ¹⁰	1 x 10 ⁻⁴	1.5 x 10
	Ω·in	> 8 x 10 ¹²	4 x 10 ⁻⁵	6 x 10
Unit weight	kg/m ²	2100	7800 - 8000	7850
	lb/ft ²	130	485 - 500	490

(f) Approximate value

Leading the world in durable rebar
mateenbar.com



Technical Data

Mateenbar™ 60

Mateenbar 60 (CSA Grade III)

	Units	#2 (5mm)	#3 (10mm)	#4 (13mm)	#5 (15/16mm)	#6 (19/20mm)	#7 (22mm)	#8 (25mm)	#9 (30mm)	#10 (32mm)
Guaranteed tensile force	kN	27	71	129	199	284	387	510	600	735
	kip	7.2	16.0	29.0	44.0	64.0	87.0	115.0	134.9	165.2
	MPa									
	ksi									
Elastic Modulus	GPa	60								
	ksi	8700								
Guaranteed transverse shear capacity	kN									
	kip									
	MPa	180								
	ksi	26.1								
Primary Materials		Epoxy Backboned Vinylester and Corrosion Resistant E-CR Glass								
Weight	g/m	97	185	315	476	702	960	1252	1575	2050
	lb/ft	0.07	0.12	0.21	0.32	0.47	0.64	0.84	1.06	1.37
Nominal cross-sectional area	mm ²	32	71	129	199	284	387	510	645	819
	in ²	0.049	0.110	0.200	0.310	0.440	0.600	0.790	1.000	1.270
Outer diameter (including ribs)	mm	8.2	10.8	14.0	17.2	20.6	24.1	27.4	30.8	35.0
	in	0.315	0.425	0.551	0.677	0.807	0.949	1.087	1.213	1.378

Please contact our team for information on the material properties, shape availability and dimensional limitations of bent bars.

Direct comparisons: Steel and mateenbar

Material Properties	Units	Mateenbar™	Stainless Steel (ASTM A955)	Steel (ASTM A615)
Tensile strength	MPa	800 - 1100	420	420
	ksi	116 - 159	60	60
Elastic Modulus	GPa	46 - 60	200	200
	KSI	6675 - 8700	29000	29000
Bond strength	MPa	10	10	10
	PSI	1450	1450	1450
Thermal conductivity	W/(m°C)	< 1 ⁽¹⁾	16	54
	BTU/(hr-ft²°F)	< 0.6 ⁽¹⁾	10	32
Electrical resistivity	Ω-m	> 200 x 10 ¹⁰	1 x 10 ⁻⁴	1.5 x 10
	Ω-in	> 8 x 10 ¹⁰	4 x 10 ⁻⁵	6 x 10
Unit weight	kg/m²	2100	7800 - 8000	7850
	lb/ft³	130	485 - 500	490

(1) Approximate values

Leading the world in durable rebar
mateenbar.com





Product Data Sheet – V-ROD 46

		#2 (6 M)	#3 (10 M)	#4 (12 M)	#5 (15 M)	#6 (20 M)	#7 (22 M)	#8 (25 M)	#9 (30 M)	#10 (32 M)
Guaranteed tensile strength* (ASTM D7205)	MPa	1000	1000	1000	1000	1000	950	850	800	800
	ksi	145.0	145.0	145.0	145.0	145.0	137.8	123.3	116	116
Minimum tensile modulus (ASTM D7205)	GPa	46								
	ksi	8800								
Guaranteed transverse shear capacity (ASTM D7617)	MPa	160								
	ksi	23.2								
Resin		vinylester								
Weight	g/m	73.4	150.8	264.5	403.7	567.4	760.5	1012.6	1281.6	1582.2
	lb/ft	0.049	0.101	0.178	0.271	0.381	0.511	0.680	0.861	1.063
Effective cross-sectional area (including sand coating)** (CSA S806 Annex A)	mm ²	36.5	71.12	123.9	195.8	277.1	377.2	477.8	604.7	746.6
	in ²	0.057	0.110	0.192	0.303	0.430	0.585	0.741	0.937	1.157
Effective diameter	mm	6.65	9.49	12.56	15.61	18.52	21.71	24.66	27.7	30.8
	in	0.262	0.374	0.494	0.615	0.729	0.855	0.971	1.091	1.213
Nominal cross-sectional area (CSA S807 Table 1)	mm ²	32	71	129	199	284	387	510	645	819
	in ²	0.050	0.110	0.199	0.308	0.440	0.599	0.790	1	1.269

COMPLIES WITH THE FOLLOWING STANDARDS:

- GRADE I CSA S807-10
- GRADE I MTO
- ASTM D7957 D7957-17

* The nominal guaranteed tensile strength must not be used to calculate the strength of the bent portion of a bent bar. Instead use the minimum guaranteed tensile strength found in the technical data sheet of bent V-ROD bars.

** Please contact Pultrall for dowelling applications. Development and splice length are available upon request but should be determined by the design engineer.

The guaranteed value presented in this document is the mean value minus 3 times the standard deviation.

It is the responsibility of the design engineers to contact the bar manufacturer to get the latest updates of this technical data sheet (also available at www.vrod.ca). For any additional technical results or literature, please contact Pultrall.

PULTRALL

700, 9^e Rue Nord, Thetford Mines (Quebec) CANADA G6G 6Z5
Phone: 418 335-3202 | Fax: 418 335-5117 | www.vrod.ca



Product Data Sheet – V-ROD 50

Product Data Sheet – V•ROD 50		#2 (6 M)	#3 (10 M)	#4 (12 M)	#5 (15 M)	#6 (20 M)	#7 (22 M)	#8 (25 M)	#9 (30 M)	#10 (32 M)	#12 (38 M)
Guaranteed tensile strength* (ASTM D7205)	MPa	1000	1000	1000	1000	1000	1000	900	800	800	800
	ksi	145	145	145	145	145	145	130.5	116	116	116
Minimum tensile modulus (ASTM D7205)	GPa	50									
	ksi	7252									
Guaranteed transverse shear capacity (ASTM D7617)	MPa	170									
	ksi	24.7									
Resin		vinylester									
Weight	g/m	77	157	278	431	619	867	1122	1420	1862	2425
	lb/ft	0.052	0.105	0.187	0.290	0.416	0.583	0.754	0.954	1.251	1.621
Effective cross-sectional area (including sand coating)** (CSA S806 Annex A)	mm²	41	81	139	214	309	397	529	670	825	1230
	in²	0.063	0.126	0.215	0.332	0.479	0.615	0.820	1.039	1.279	1.91
	mm	7.2	10.2	13.3	16.5	19.8	22.5	26.0	29.2	32.3	39.6
Effective diameter	in	0.284	0.400	0.523	0.650	0.781	0.885	1.022	1.15	1.271	1.56
	mm²	32	71	129	199	284	387	510	645	819	1140
Nominal cross-sectional area (CSA S807 Table 1) [Not applicable for #12 (38M)]	in²	0.050	0.110	0.199	0.308	0.440	0.599	0.790	1	1.269	1.76

COMPLIES WITH THE FOLLOWING STANDARDS:

- GRADE II CSA S807-10
- GRADE II MTO
- ASTM D7957 D7957-17

* The nominal guaranteed tensile strength must not be used to calculate the strength of the bent portion of a bent bar. Instead use the minimum guaranteed tensile strength found in the technical data sheet of bent V-ROD bars.

** Please contact Pultrall for dowelling applications. Development and splice length are available upon request but should be determined by the design engineer.

The guaranteed value presented in this document is the mean value minus 3 times the standard deviation.

It is the responsibility of the design engineers to contact the bar manufacturer to get the latest updates of this technical data sheet (also available at www.fiberglassrebar.com). For any additional technical results or literature, please contact Pultrall.

627-C Graves Street, Kenersville, NC 27284
Phone: 336-993-2461 | www.fiberglassrebar.com

V-ROD
USA

V•ROD 60										
GLASS FIBER REINFORCED POLYMER (GFRP) REBAR										
REVISION: May 2019										
Product Data Sheet – V•ROD 60										
		#2 (6 M)	#3 (10 M)	#4 (12 M)	#5 (15 M)	#6 (20 M)	#7 (22 M)	#8 (25 M)	#9 (30 M)	#10 (32 M)
Guaranteed tensile strength* (ASTM D7205)	MPa	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1000	1000
	ksi	159.5	159.5	159.5	159.5	159.5	159.5	159.5	145	145
Minimum tensile modulus (ASTM D7205)	GPa	60								
	ksi	8702.3								
Guaranteed transverse shear capacity (ASTM D7617)	MPa	180								
	ksi	26.1								
Resin		vinylester								
Weight	g/m	78	175	310	442	633	863	1127	1426	1761
	lb/ft	0.052	0.118	0.208	0.297	0.425	0.58	0.757	0.958	1.183
Effective cross-sectional area** (including sand coating) (CSA S806 Annex A)	mm²	37.2	83.8	145	232.9	326.8	438.2	572.3	724.3	894.2
	in²	0.058	0.130	0.225	0.361	0.507	0.679	0.887	1.123	1.386
Effective diameter	mm	6.9	10.33	13.58	17.22	20.39	23.6	26.89	30.4	33.7
	in	0.272	0.407	0.535	0.678	0.803	0.929	1.063	1.197	1.327
Nominal cross-sectional area (CSA S807 Table 1)	mm²	32	71	129	199	284	387	510	645	819
	in²	0.05	0.110	0.199	0.308	0.440	0.6	0.790	1	1.269

Available Anchor Heads

		#4 GFRP	#5 GFRP	#6 GFRP
Minimum pull-out strength	kN	80	100	100
	kips	18	22	22

Please refer to the V•ROD Grade III data sheet for the properties of the bars.
Product homologated for use in TLS barriers.

COMPLIES WITH THE FOLLOWING STANDARDS:

- GRADE III CSA S807-10
- GRADE III MTO ASTM D7957

* The nominal guaranteed tensile strength must not be used to calculate the strength of the bent portion of a bent bar. Instead use the minimum guaranteed tensile strength found in the technical data sheet of bent V•ROD bars.

** Please contact Pultrall for dowelling applications.
Development and splice length are available upon request but should be determined by the design engineer.

The guaranteed value presented in this document is the mean value minus 3 times the standard deviation.

It is the responsibility of the design engineers to contact the bar manufacturer to get the latest updates of this technical data sheet (also available at www.vrod.ca).
For any additional technical results or literature, please contact Pultrall.

700, 9^e Rue Nord, Thetford Mines (Quebec) CANADA G6G 6Z5
Phone: 418 335-3202 | Fax: 418 335-5117 | www.vrod.ca

BASALT FIBER REINFORCED POLYMER (BFRP) REBAR

Product Data Sheet – V•ROD BASALT 60 GPa

		#2 (6 M)	#3 (10M)	#4 (12 M)	#5 (15 M)	#6 (20M)	#7 (22 M)	#8 (25 M)
Guaranteed tensile strength* (ASTM D7205)	MPa	1400	1400	1350	1300	1250	1200	1150
	ksi	203	203	195,8	188,5	181,3	174	166,8
Minimum tensile modulus (ASTM D7205)	GPa	60						
	ksi	8702						
Guaranteed transverse shear capacity (ASTM D7617)	MPa	230	220	220	210	200	190	180
	ksi	33,4	31,9	31,9	30,5	29	27,6	26,1
Resin		vinylester						
Effective cross-sectional area** (ASTM D7205 including sand coating)	mm²	37	82	144	228	344	475	610
	in²	0,057	0,127	0,223	0,353	0,533	0,736	0,945
Effective diameter	mm	8	11	14,3	17,8	21,3	25	28
	in	0,31	0,43	0,56	0,70	0,84	0,98	1,10
Nominal cross-sectional area (ASTM D7957 tabel 3)	mm²	32	71	129	199	284	387	510
	in²	0,049	0,11	0,2	0,31	0,44	0,60	0,79
Linear weight	kg/m	0,09	0,18	0,32	0,48	0,72	0,96	1,24
	lbs/ft	0,06	0,12	0,21	0,32	0,48	0,65	0,83

* The nominal guaranteed tensile strength must not be used to calculate the strength of the bent portion of a bent bar. Instead use the minimum guaranteed tensile strength found in the technical data sheet of bent V•ROD bars.

** Please contact Pultrall for dowelling applications.

Development and splice length are available upon request but should be determined by the design engineer.

The guaranteed value presented in this document is the mean value minus 3 times the standard deviation.

It is the responsibility of the design engineers to contact the bar manufacturer to get the latest updates of this technical data sheet (also available at www.vrod.ca).

For any additional technical results or literature, please contact Pultrall.

700, 9^e Rue Nord, Thetford Mines (Quebec) CANADA G6G 6Z5
Phone: 418 335-3202 | Fax: 418 335-5117 | www.vrod.ca



Product Data Sheet - V•ROD BENT BARS 50

REVISION: Feb 2018

		#3 GFRP	#4 GFRP	#5 GFRP	#6 GFRP	#7 GFRP	#8 GFRP
		bent bar	bent bar	bent bar	bent bar	bent bar	bent bar
Minimum tensile strength (straight portion) (ASTM D7205)	MPa	1022	1019	1001	1029	1005	992
	ksi	148	148	145	149	146	144
Nominal tensile modulus (straight portion) (ASTM D7205)	GPa	50					
	ksi	7246					
Minimum tensile strength (bent portion) (ACI 440.3R B5)	MPa	460	459	450	463	452	446
	ksi	67	66	65	67	66	65

Glass content (ASTM D3171)	% weight	77.8	78	77.5	78.9	78.4	76.1
Weight	g/m	167	292	443	651	987	1136
	lb/ft	0.112	0.196	0.298	0.437	0.596	0.763
Nominal cross-sectional area	mm ²	71.26	126.68	197.93	285.02	387.95	506.71
	in ²	0.1105	0.1963	0.3068	0.4418	0.6013	0.7854
Effective cross-sectional area (CSA S806 Annex A)	mm ²	81.80	145.70	240.29	332.96	439.40	582.72
	in ²	0.1265	0.2259	0.3725	0.5161	0.6811	0.9032

COMPLIES WITH THE FOLLOWING STANDARDS:

- CSA S807 Grade II
- MTO Grade III
- ASTM D7957

It is the responsibility of the design engineers to contact the bar manufacturer to get the latest updates of this technical data sheet (also available at www.vrod.ca).

PULTRALL

700, 9^e Rue Nord, Thetford Mines (Quebec) G8G 6Z5 CANADA
Phone: 418 335-3202 | Fax: 418 335-5117 | www.vrod.ca



A2

Anexo 2- Desenhos estruturais de betão armado da viga

