

UTILIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS NA CONSTRUÇÃO E REABILITAÇÃO: CASOS DE ESTUDO, DESAFIOS CORRENTES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Jéssica Lima Coimbra de Jesus

**Mestrado em Conservação e Reabilitação do Edificado
Dissertação**

ORIENTADORES: Doutor António Pedro Carones Duarte
Engenheira Cristiana Nadir Gonilho Pereira

**Dezembro de 2021
Dissertação Definitiva**

UTILIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS NA CONSTRUÇÃO E REABILITAÇÃO: CASOS DE ESTUDO, DESAFIOS CORRENTES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Mestrado em Conservação e Reabilitação do Edificado

DECLARAÇÃO DE AUTORIA DO TRABALHO

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

Jéssica Lima Coimbra de Jesus



(assinatura)

DIREITOS DE COPIA OU COPYRIGHT

© **Copyright:** Nome Completo

O Instituto Politécnico de Setúbal tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicitar este trabalho através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de o divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

“A grandeza não consiste em receber honras, mas em merecê-las.”

Aristóteles

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me proporcionado a oportunidade de ingressar em um mestrado e ter me guiado e me dado força para não desistir.

À minha família pelo suporte e incentivo mesmo estando longe. Ao meu esposo Rafael que foi responsável por todo o processo, com todo seu companheirismo, paciência amor e compreensão.

Ao meu orientador António Duarte e coorientadora Cristiana Pereira que sempre estiveram presentes dando apoio à elaboração e desenvolvimento deste trabalho.

À Coordenadora do curso Eugénia Santos, e todos os professores da Escola Superior de Tecnologia do Barreiro do Instituto Politécnico de Setúbal que com paixão e dedicação sempre transmitiram seus conhecimentos a todos nos estudantes.

Aos amigos adquiridos ao longo desta jornada, em especial Thais Diniz, com quem sempre pude contar nas horas difíceis.

RESUMO

Nas últimas décadas, o desenvolvimento da construção civil tem tido grandes avanços, baseados em novos meios de investigação e em novos materiais e tecnologias que lhes estão associados. Por sua vez, as atividades de reforço e reparação têm vindo a incrementar devido ao envelhecimento e à degradação das estruturas existentes, o que consequentemente tem dado origem ao aparecimento de novos materiais, como é o caso dos compósitos de polímero reforçados com fibras, e tecnologias de reparação e reforço de estruturas. A utilização destes novos materiais na construção requer novas técnicas e mais estudos sobre o real comportamento dos mesmos, quer em termos de características mecânicas quer em termos de durabilidade.

Nesta dissertação, pretende-se apresentar as potencialidades e limitações dos compósitos de polímero reforçados com fibra, FRP, utilizados como material de reabilitação/reforço e aplicação em construções novas. Começa-se por descrever o desenvolvimento de materiais compósitos, em outras áreas até ao emprego em construções civis, mostrando as suas propriedades, processos de produção, aplicações em reabilitação e em construção nova, casos de estudos e investigações em curso. Por fim, apresentam-se algumas condicionantes e limitações das soluções atuais de reforço.

PALAVRAS-CHAVE: Reabilitação, reforço de estruturas, betão armado, materiais, polímeros reforçados com fibras (FRP).

ABSTRACT

In recent decades, the development of civil construction has made great advances, based on new means of investigation and new materials and technologies associated with them. On the other hand, the reinforcement and repair activities have been increasing due to the aging and degradation of existing structures, which has consequently given rise to the appearance of new materials, such as fiber-reinforced polymer composites, and structural repair and reinforcement technologies. The use of these new materials in construction requires new techniques and more studies on their actual behavior, both in terms of mechanical characteristics and in terms of durability.

In this dissertation, it is intended to present the potentials and limitations of fiber-reinforced polymer composites, FRP, used as rehabilitation/reinforcement material and application in new constructions. It begins by describing the development of composite materials, in other areas up to their use in civil construction, showing their properties, production processes, applications in rehabilitation and new construction, case studies and ongoing investigations. Finally, some constraints and limitations of current reinforcement solutions are presented.

KEYWORDS: Rehabilitation, strengthening of structures, reinforced concrete, materials, fibre-reinforced polymers (FRP).

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO

1

1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO	1
--------------------------------------	---

1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	2
-------------------------------------	---

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
-------------------------------------	---

2. ESTADO DA ARTE

5

2.1. SÍNTESE DO DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS	5
---	---

2.2. MATERIAIS COMPÓSITOS DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS (FRP)	10
--	----

2.2.1. Definição dos compósitos	10
---------------------------------------	----

2.2.2. Constituintes de compósitos	11
--	----

2.2.2.1. Matrizes	11
-------------------------	----

2.2.2.2. Reforço	15
------------------------	----

2.2.3. Classificação dos compósitos	17
---	----

2.2.3.1. Compósitos reforçados com partículas	17
---	----

2.2.3.2. Compósitos reforçados com fibras	18
---	----

2.2.3.3. Compósitos estruturais	23
---------------------------------------	----

2.2.4. Propriedades dos compósitos	25
--	----

2.2.4.1. Efeito da orientação das fibras	26
2.2.4.2. Fração volúmica de fibras	27
2.2.4.3. Comprimento da fibra.....	27
2.2.4.4. Interface matriz fibra	28
2.2.4.5. Vantagens da utilização de materiais compósitos	29
2.2.4.6. Comparação de algumas propriedades.....	29
2.2.5. Processos de produção	31
2.2.5.1. Moldação Manual.....	32
2.2.5.2. Moldação manual por projecção	32
2.2.5.3. Infusão a vácuo.....	33
2.2.5.4. Moldação por compressão a quente	34
2.2.5.5. Moldação em autoclave	34
2.2.5.6. Enrolamento Filamentar	36
2.2.5.7. Moldação por transferência de Resina (RTM)	36
2.2.5.8. Pultrusão.....	37
2.3. APLICAÇÃO DOS FRPs NA ENGENHARIA CIVIL	41
2.3.1. Utilização de FRPs em reabilitação.....	42
2.3.1.1. FRPs como reforço estrutural em estruturas de betão	44
2.3.1.2. FRPs como reforço estrutural em estruturas de madeira	50
2.3.1.3. FRPs como reforço estrutural em estruturas metálicas	51
2.3.1.4. FRPs como reforço sísmico	52
2.3.2. Aplicações de FRPs em construção nova	54
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE TRABALHOS DE INVESTIGAÇÃO EM COMPÓSITOS	57
3.1. PERFIS PULTRUDIDOS.....	57

3.1.1. Durabilidade dos perfis pultrudidos de GFRP	58
3.1.2. Sistemas de ligações dos perfis pultrudidos de GFRP	62
3.2. PAINÉIS SANDUÍCHE	68
3.2.1. Fluência dos painéis sanduíche	68
3.2.2. Comportamento térmico dos painéis sanduíche.....	73
3.3. VARÕES	81
3.3.1. Parâmetros condicionantes nas tensões de aderência entre o betão e GFRP	82
3.3.2. Comportamento ao fogo	87
3.4. SISTEMAS DE REFORÇO	93
3.4.1. Técnicas de reforço	93
3.4.2. Reforço sísmico	98
4. CASOS DE ESTUDO	103
4.1. APLICAÇÃO EM REABILITAÇÃO/REFORÇO	103
4.1.1. Caso de estudo 1: Ponte Nossa Senhora da Guia.....	103
4.1.2. Caso de estudo 2: Reabilitação do Viaduto Duarte Pacheco	104
4.1.3. Caso de estudo 3: Ponte de Mosteirô sobre o Rio do Douro.....	107
4.1.4. Caso de estudo 4: Ponte Sobre o Rio Caldo Geres	110
4.2. APLICAÇÃO COM PERFIS DE GFRP.....	113
4.2.1. Caso de estudo 1: Ponte São Silvestre	113
4.2.2. Caso de estudo 2: Ponte São Mateus.....	115
4.2.3. Caso de estudo 3: Remodelação Porto Palácio	118
4.2.4. Caso de estudo 4: Central de tratamento de água residual ETAR Barreiro.....	119
4.2.5. Caso de estudo 5: Central de tratamento de água ETA Asseiceira.....	120
4.2.6. Durabilidade dos perfis pultrudidos de GFRP	122
4.2.6.1 Inspeção visual após 10 anos dos elementos	122

4.2.6.2 Medidas preventivas	125
-----------------------------------	-----

5. LIMITAÇÕES CORRENTES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	127
--	------------

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	131
---	------------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133
---	------------

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Réplica do arco tipo cita feita por Adam Karpowicz	5
Fig. 2 – Ônibus espacial	6
Fig. 3 – Foto de uma seção da parte inferior da cabine da tripulação do Discovery junto a uma série de placas do sistema de proteção térmica (Li-900)	6
Fig. 4 – Capacete militar M1	7
Fig. 5 – Fabrico artesanal Capim dourado jalapão, Brasil	8
Fig. 6 – Fabrico artesanal fibra de bananeira, Brasil	8
Fig. 7 – Principais aplicações dos materiais compósitos	9
Fig. 8 – Evolução dos materiais utilizados no fabrico de componentes	10
Fig. 9 – Esquema dos materiais compósitos à escala microscópica	11
Fig. 10 – Esquema compósitos de matriz polimérica	11
Fig. 11 – Esquema compósitos de matriz metálica	13
Fig. 12 – Esquema compósitos de matriz cerâmica	14
Fig. 13 – Geometrias possíveis da fase de reforço: a) fibra, b) partícula e c) floco	15
Fig. 14 – Esquema de classificação dos materiais compósitos	17
Fig. 15 – Compósito reforçado com partículas (betão) à escala microscópica	17
Fig. 16 – Exemplo de compósito reforçado com partículas (betão)	18
Fig. 17 – Tipos de orientação de fibras a) fibras continuas unidireccionais, b) fibras continuas em forma de tecido e c) fibras descontínuas dispersas aleatoriamente	19
Fig. 18 – Configurações de tela de fibra de vidro a) bidirecional, b) multidirecional	20
Fig. 19 – Tipos de orientação de fibras de carbono: a) fio, b) fibras continuas em forma de tecido	21

Fig. 20 – Tipos de orientação de fibras de aramida Dupont a) malhas tubulares, b) tecido, c) fitas	22
Fig. 21 – Tipos de orientação de fibras de boro a) fios, b) tecido	23
Fig. 22 – Tipos de orientação de fibras de basalto a) mechas de filamento, b) manta flexível, c) tecidos	23
Fig. 23 – Composição de um laminado.....	24
Fig. 24 – Exemplo de um compósito sanduiche adaptado	25
Fig. 25 – Diagrama esquemático da curva de tensão/deformação: a) fibra e matriz, b) fibra, matriz e material compósito	25
Fig. 26 – Influência das orientações das fibras na resistência e fração de fibra	27
Fig. 27 – Comparação entre materiais compósitos, alumínio e aço	29
Fig. 28 – Esquema da moldação manual	32
Fig. 29 – Moldação por Spray Up	33
Fig. 30 – Esquema de montagem de vácuo	33
Fig. 31 – Esquema do processo de fabrico por compressão a quente	34
Fig. 32 – Representação esquemática da obtenção de um laminado através do processo de moldação em autoclave	35
Fig. 33 – Autoclave	36
Fig. 34 – Esquema do processo Enrolamento Filamentar	36
Fig. 35 – Esquema simplificado da moldagem por transferência de resina	37
Fig. 36 – Esquema simplificado do processo de pultrusão	38
Fig. 37 – Estrutura interna de um perfil GFRP	40
Fig. 38 – Perfis pultrudados para aplicação estrutural.....	40
Fig. 39 – Aplicação dos FRP na engenharia civil.....	41
Fig. 40 – Solução de sistema de reforço.....	43
Fig. 41 Compósitos de FRP: a) Sistema de FRP Pré-fabricado (laminado), b) Sistema de FRP curado “in situ” (manta e tecido)	44

Fig. 42 – Sistema especial de encamisamento automático de pilares	45
Fig. 43 – Exemplo de aplicação do método EBR.....	46
Fig. 44 – Técnica de colagem NSM de sistema FRP	47
Fig. 45 – Técnica de cintagem com manta em FRP a) pilar, b) viga	48
Fig. 46 – Técnicas da aplicação FRCM: a) aplicação de reforço, b) Pormenor da constituição do tecido de reforço FRCM	49
Fig. 47 – Comportamento à tração de vários sistemas de FRP e aço	50
Fig. 48 – Exemplo de aplicação de FRP numa estrutura de madeira	51
Fig. 49 – a) Exemplo de aplicação de resina com pincel b) Reparação com fibras de vidro e epóxi na tubagem danificada	51
Fig. 50 – Reforço de abóbodas com tecido CFRP	52
Fig. 51 – Aplicação de uma rede de polimérico revestimento de base cimentícia	53
Fig. 52 – Muretes reforçados com confinamento transversal contínuo	53
Fig. 53 – Ponte com estrutura betão utilizando arcos em CFRP	54
Fig. 54 – Ponte protótipo da RWTH-Aachen, Alemanha, 2002	55
Fig. 55 – Perfis pultrudidos.....	57
Fig. 56 – Interior da câmara climática equipada com lâmpadas fluorescentes UV.	59
Fig. 57 – Amostras expostas a) durante um dia de verão, b) durante um dia de inverno	60
Fig. 58 – Variação de massa durante o envelhecimento artificial.	60
Fig. 59 – Detalhes das conexões viga-coluna testadas	62
Fig. 60 – Ensaio de sobreposição dupla a) esquema ilustrativo, b) configuração do ensaio	64
Fig. 61 – Geometria do provete	66
Fig. 62 –Preparação da amostra a) rugosidade da superfície do SFRSCC, b) aplicação do adesivo epóxi, c) especto final da amostra	66
Fig. 63 – Modos de falha típicos: a) descolagem no SFRSCC (falha coesiva), b) descolagem no epóxi (falha adesiva), e c) rotura da junção do flange da alma	67
Fig. 64 – Teste de fluência à flexão de painel sanduíche em escala real	70

Fig. 65 – Visão geral da configuração do ensaio de fluência de corte: a) visão geral, b) detalhe de um provete sob carregamento, colado com adesivo a duas placas de aço e c) aplicação de carga morta usando acessórios de placa de aço personalizados	70
Fig. 66 – Testes de fluência por flexão: a) visão geral, b) detalhes da amostra e c) indicadores de manômetro com mostrador	72
Fig. 67 – Visão geral dos equipamentos e instrumentação utilizados para os testes de caracterização de materiais em temperatura elevada	74
Fig. 68 – Componentes do método de teste DTS	75
Fig. 69– Teste de compressão.....	75
Fig. 70 – Configuração da amostra medidas em mm	76
Fig. 71 – Configuração do ensaio de flexão quatro pontos em mm.	77
Fig.72 – Modos de falha das amostras: a) falha por corte da amostra U,b) encurvadura local na amostra GM , c) encurvadura local na amostra GP, d) rotura por corte da amostra GM, e) falha de corte da amostra G, f) falha por flexão amostra CS.	78
Fig. 73 – Configuração dos painéis.....	79
Fig. 74 – Configuração do forno e da carga aplicada	80
Fig. 75 – Varão de GFRP	81
Fig. 76 – Características dos varões (R1 – R7).....	83
Fig. 77 – Configuração do teste pull – out, a) aplicação da barra, b) equipamento	83
Fig. 78 – Varão GFRP revestido com areia	84
Fig. 79 – a) Configuração do teste pull – out, (b) visão geral do provete na câmara térmica; (c) visão externa da câmara térmica e extensômetro de vídeo	85
Fig. 80 – Tratamento de superfície de barras de FRP com incorporação de areia.....	86
Fig. 81 – Instalação de teste de temperatura elevada.....	87
Fig. 82 – Detalhes das armaduras, e cofragem da viga.	88
Fig. 83 – Vigas, cubos e cilindros sujeitos a fogo	88
Fig. 84 – Configuração de teste experimental, célula de carga e registrador e leitor de dados.....	89
Fig. 85 – Distribuição do reforço e posição dos termopares: (a) faixa de laje RC C2.5; (b) Tiras de laje GFRP-RC (dimensões em metros.....	90

Fig. 86 – Modos de falha típicos observados em testes de flexão à temperatura ambiente: a) rotura por corte, b) deslizamento do varões e fragmentação local do betão (laje GFRP LS30)	91
Fig. 87 – Configuração dos testes de resistência ao fogo: a) visão geral; b) longitudinal ec) esquema transversal do forno.....	92
Fig. 88 – Detalhe de vigas estudadas	94
Fig. 89 – Configuração de teste da viga reforçada com CFRP protendido junto com a configuração de pré-tensão.....	95
Fig. 90 – Geometria dos provetes: (a) vista longitudinal do provete com fixações mecânicas nas extremidades da tira de CFRP; (b) seção transversal atual; (c) seção transversal com ancoragem mecânica; (d) geometria longitudinal do sistema de proteção contra incêndio.	97
Fig. 91 – Visão geral do teste de forno.	98
Fig. 92 – Detalhes da grade CFRP: a) grade CFRP, b) junção da grade de CFRP, c) conexão conjunta.	99
Fig. 93 – Desenho esquemático configuração do teste.	100
Fig. 94 – Parede de alvenaria sem reforço e esquemas de reforço.	102
Fig. 95 – Ponte Nossa Senhora da Guia em ponte de Lima a) Aspeto geral da ponte b) Fendilhação longitudinal na face inferior do tabuleiro.....	103
Fig. 96 – Representação esquemática do esforço a efetuar	104
Fig. 97 – Aspeto de colocação do sistema curado in situ (mantas).....	104
Fig. 98 – Vista Geral e alçado do Viaduto Duarte Pacheco.....	105
Fig. 99 – Fendilhação típica das reacções alcalo-sílica no betão nas vigas do tabuleiro	105
Fig. 100– Fendilhação em betão e trabalho de injeção	106
Fig. 101 – Reforço de vigas e controlo de qualidade.....	107
Fig. 102 – Ponte de Mosteirô sobre o Rio Douro	107
Fig. 103 – Corte longitudinal da Ponte de Mosteirô sobre o Rio Douro.....	108
Fig.104 – Deterioração dos materiais: a) Zona de esmagamento dos pilares; b) Desgaste do pavimento	109
Fig. 105 – Fenda transversal com 1,20 mm na laje inferior.....	109

Fig. 106 – Procedimentos da colocação dos laminados na zona central do meio vão a) colocação do epóxi, b) colocação da argamassa de base epóxi de colagem sobre laminado, c) colocação do laminado na face superior da laje inferior.....	110
Fig. 107 – Aplicação dos laminados de carbono Disponível.	110
Fig. 108 – Ponte sobre o Rio Caldo, Geres.	111
Fig. 109 – Aplicação laminados de carbono.	111
Fig. 110 – Ancoragem nas extremidades por mantas de carbono.	112
Fig. 111 – Alívio da sobrecarga por auxílio de macaco hidráulico.....	112
Fig. 112 – Seção transversal do protótipo.	113
Fig. 113 – Construção do protótipo: a) pultrusão dos perfis de GFRP; b) transporte da subestrutura; c) betonagem do tabuleiro; d) instalação dos sistemas de conexão; e) montagem dos elementos em GFRP sobre o tabuleiro; f) posicionamento do protótipo.	114
Fig. 114 – Ponte São Silvestre, Ovar.....	115
Fig. 115 – Extrato da planta de perfis do Projeto do Parque Linear do Rio Paiva	115
Fig. 116 – Protótipo da ponte pedonal	116
Fig. 117 – Seções transversais dos painéis a) dimensões(mm), b) pormenor ligação snap fit	116
Fig. 118 – Esquema de montagem do tabuleiro por meio da ligação sucessiva entre painéis.....	117
Fig. 119 – Protótipo estrutura a) Guarda e viga de aço (Vista y-z), b) vista 3d de uma viga e respetiva guarda de segurança painéis	117
Fig. 120 – Ponte São Mateus, Viseu.....	118
Fig. 121 – Estrutura Hotel Porto Palácio, Porto	119
Fig. 122 – Estrutura em perfis GFRP, a) passadiço, b) guardas, ETAR Barreiro	120
Fig. 123 – Escada em perfis GFRP ETAR Barreiro	120
Fig. 124 – Estrutura em perfis GFRP, a) passadiço, b) guardas, ETA Asseiceira	121
Fig. 125 – Tampas estrutura em perfis GFRP, ETA Asseiceira	121
Fig. 126 – Fibras expostas ETA Asseiceira	122
Fig. 127 – Fibras expostas ETAR Barreiro	123

Fig. 128 – Degradação da pintura ETA Asseiceira	123
Fig. 129 – Degradação guarda ETAR Barreiro	124
Fig. 130 – Fissuras tampa ETAR Barreiro	124

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores de Seleção do material da matriz de um compósito	14
Tabela 2 – Características mecânica dos materiais	16
Tabela 3 – Energia absorvida no ensaio de impacto.....	20
Tabela 4 - Propriedades mecânicas das fibras utilizadas em sistemas de compósitos de FRP	30
Tabela 5 - Propriedades físicas e mecânicas das resinas termoendurecíveis.....	31
Tabela 6 - Descrição das mantas e tecidos empregues nos sistemas FRP curados in situ.....	48
Tabela 7 - Principais vantagens e desvantagens da estrutura sanduiche	68

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

FRP – Fiber Reinforced Polymer (Polímeros Reforçados com Fibras)

CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer (Polímero reforçado com fibra de carbono)

GFRP – Glass Fiber Reinforced Polymer (Polímero reforçado com fibra de vidro)

AFRP – Aramid Fiber Reinforced Polymer (Polímeros reforçados com fibras de aramida)

RTM – Resin transfer moulding (moldação por transferência de resina)

NSM – Near surface mounted (laminados inseridos na camada de recobrimento)

EBR – Externally bonded reinforcement (laminados aplicados externamente)

FRCM – Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (compósitos de matriz cimentícia reforçado com tecido)

AR – fibras álcalis-resistente

PAN – Poliacrilonitrilo

SFRSCC – steel fibre reinforced self compacting cementitious composite (betão autocompactável reforçado com fibra de aço)

DMA – análises mecânicas dinâmicas.

PU – poliuretano

PVC – policloreto de vinil

CCM – modelo de fluência composto

PET – Polietileno tereftalato

TGA – termogravimétricos

GM – glass magnesium (vidro de magnésio)

GP – gypsum plaster (placa de gesso)

CS – board or calcium silicate (placa de silicato de cálcio)

NRC – Canada National Research Council (Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá)

LVDTs – Linear Variable Differential Transformer (defletómetros)

TRC –Textile Reinforced Concrete(argamassa de betão reforçada com têxteis)

TRM –Textile Reinforced Mortar (argamassa reforçada com têxteis)

MCB– Mineral Based Composites (compósitos à base de minerais)

CTRC – carbon fibres embedded in a cementitious matrix (fibras de carbono incorporadas numa matriz cimentícia)

GTRC – glass fibres embedded in a cementitious matrix (fibras de vidro incorporadas numa matriz cimentícia)

σ_f – Tensão de resistência

σ_m – Tensão de rotura

ϵ_f – Extensão máxima das fibras

ϵ_m – Extensão máxima da matriz

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO

A deterioração dos edifícios, pontes e demais estruturas resultantes da ausência de conservação e falta de manutenção, da ocorrência de acidentes, de incêndios ou de sismos, ou por ações externas, defeitos de construções ou erros de conceção ou de projeto, tem levado a uma degradação crescente das estruturas. A necessidade de reabilitação é frequentemente combinada com a necessidade de reforço destas estruturas.

As limitações da durabilidade dos materiais tradicionais aplicados na construção civil, particularmente do aço e do betão armado, aliados aos crescentes ritmos de construção, tem influenciado as práticas de dimensionamento e a própria regulamentação em vigor, impulsionando o desenvolvimento de novos materiais estruturais.

No século XX, a investigação na área da ciência dos materiais contribuiu significativamente para o desenvolvimento de novos materiais, destacando-se os materiais compósitos. O objetivo consiste em desenvolver materiais com comportamentos mais eficientes nas aplicações específicas de engenharia. Deste modo, nesta última década, tem existido grande empenho na procura de materiais com características apropriadas aos novos projetos de engenharia, visto ser cada vez mais urgente a aplicação de materiais mais duráveis, muito resistentes, pouco deformáveis e capazes de absorver e dissipar energia, sem ocorrência de rotura frágil (Juvandes,1999).

É neste contexto que os polímeros reforçados com fibra (FRP - *Fiber Reinforced Polymer* na designação inglesa) foram surgindo como alternativa, no sector da construção, em várias áreas de aplicação, devido às suas excelentes propriedades. Entre elas, destacam-se o baixo peso específico, elevada resistência à fadiga, o bom amortecimento ao choque e isolamento eletromagnético, elevada resistência à tração e resistência à corrosão.

A família dos compósitos de FRP resulta, sobretudo, da conjugação de fibras contínuas de reforço, orgânicas ou inorgânicas, com uma resina termoendurecível e com cargas de enchimento designadas por "fillers". Para constituintes secundários, estes materiais incorporam aditivos e outros produtos, como por exemplo, os agentes catalisadores, os promotores ou os aceleradores de cura. As principais fibras comercializadas são o vidro, o carbono e a aramida, sendo os respetivos compósitos reforçados, denominados internacionalmente por GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*), CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) e AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymer*). O comportamento final de um compósito de FRP é acentuadamente dependente dos materiais que o constituem, da disposição das fibras principais de reforço e da interação entre os materiais que o constituem. Os fatores intervenientes nesse comportamento são a orientação, o

comprimento, a forma e a composição das fibras, as propriedades mecânicas da resina da matriz, assim como a adesão ou ligação entre as fibras e a matriz (Mendonça, 2019). Um número elevado de investigadores e organizações têm vindo a trabalhar, com êxito, no processo de integração destes materiais nas aplicações de engenharia civil. Constatase que, a nível mundial, este assunto despertou frentes de trabalho com algumas conotações geográficas peculiares. Sendo assim, destacam-se três potenciais frentes de trabalho: o Japão, interessado na pré-fabricação, no pré-esforço por pré-tensão e no reforço aos sismos; a América do Norte motivada pelas soluções de problemas de durabilidade de pontes e a Europa preocupada com a necessidade de preservar e reabilitar o património histórico (Juvandes, 1999).

Apesar das inúmeras vantagens da aplicação de materiais compósitos na construção civil, existem alguns obstáculos, que têm atrasado a aceitação mais generalizada dos FRP, nomeadamente algumas questões técnicas que carecem de esclarecimentos e estudos adicionais, falta de regulamentação e escassez de informação relativamente à durabilidade desses materiais. Embora o esforço desenvolvido por números investigadores, este é um material relativamente recente, o que implica que ainda não exista em Portugal regulamentação específica e devidamente normalizada em relação aos procedimentos para o projeto e sua aplicação. A grande escala de oferta de sistemas compósitos de FRP disponibilizados pelos fabricantes, tem contribuído para a dificuldade em obter consenso e sistematização dos procedimentos de execução de reforço utilizando esses sistemas.

A necessidade de proceder à reabilitação de estruturas em diversos ambientes, tem motivado a procura de diferentes tipos de soluções, que incluem técnicas e materiais diferentes dos utilizados tradicionalmente. Nesta dissertação, pretende-se apresentar as potencialidades e limitações dos compósitos de polímeros reforçados com fibra, FRP, utilizados como material de reabilitação/reforço e aplicação em construções novas. Começa-se por descrever uma breve resenha do desenvolvimento de materiais compósitos, em outras áreas até o emprego em construções civis, mostrando as suas propriedades, processos de produção, aplicações em reabilitação e construção nova, casos de estudos e investigações em curso desenvolvidas. Por fim, apresentam-se algumas condicionantes e limitações das soluções atuais de reforço.

1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação teve como principal objetivo contribuir para a utilização dos compósitos de polímero reforçado com fibras na construção e reabilitação, apresentando uma breve síntese da utilização de compósitos, bibliografia sobre as fibras e matrizes e suas propriedades, processo de fabricação dos materiais compósitos, propriedades mecânicas e físicas dos materiais. Foi também objetivo a apresentação de casos de estudo de aplicação de compósitos de fibras reforçados em reabilitação e em construções novas, como também das investigações em curso de natureza experimental, tendo em vista a durabilidade destes materiais e as suas limitações, desafios correntes e perspectivas futuras.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para além do presente capítulo, de introdução, esta dissertação encontra-se dividida em mais cinco capítulos.

No segundo capítulo, é apresentado o estado da arte, onde se introduz a temática dos compósitos FRP. Nesse capítulo, apresenta-se uma visão geral sobre os materiais constituintes dos compósitos, seguindo-se a descrição dos materiais constituintes, a definição do conceito de interação fibra-matriz, a descrição dos processos de fabrico e as principais aplicações dos compósitos FRP na construção.

No terceiro capítulo, é apresentado revisões bibliográficas de trabalhos de investigações em compósitos, focando-se nas principais investigações em curso de natureza experimental, tendo em vista a durabilidade destes materiais.

No quarto capítulo, são apresentados alguns casos de estudo em Portugal, focando-se com pormenor os materiais, os procedimentos utilizados e os estudos dessas aplicações.

No quinto capítulo, são apresentadas algumas das limitações correntes na utilização de FRP's no âmbito da construção e reabilitação bem como as principais investigações científicas em curso, perspetivando-se alguns dos possíveis desenvolvimentos futuros.

No sexto capítulo, são apresentadas as principais conclusões da presente dissertação.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. SÍNTESE DO DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

No passado, os materiais desenvolvidos para o uso cotidiano marcaram as diferentes eras (do Fogo, do Bronze, do Ouro) e o progresso das civilizações. Embora o desenvolvimento e conhecimento dos materiais poliméricos tenha ocorrido no início do século XX, os materiais poliméricos naturais foram sempre utilizados. Depois do controle do fogo e da invenção da roda, a fiação foi provavelmente o desenvolvimento mais importante da humanidade, pois permitiu a sua sobrevivência em diferentes zonas do planeta e o início da expansão humana por toda a superfície da terra. O fabrico manual de tecidos flexíveis e a fiação de fibras como o algodão, o linho e a juta foram um grande avanço, quando comparado com as peles de animais também muito utilizadas por povos antigos. Desta forma os recursos naturais começaram a ser utilizados em grande escala e rapidamente apareceram os primeiros compósitos. Por exemplo, paredes reforçadas com feixes de palha para aumentar a integridade estrutural, bem como carroças construídas pela união de paus, madeira e metal, e os arcos que eram constituídos por madeira e outros materiais como pele, ossos, chifre e tendões (800 anos a.C.): o arco cita, é um dos primeiros tipos de arco totalmente compósitos (Fig. 1). O arco cita possui um núcleo central formado por uma faixa de chifre em cada membro, intercalados com tiras de madeira, envolta em tendões com uma camada protetora de casca de bétula (Ventura, 2009).

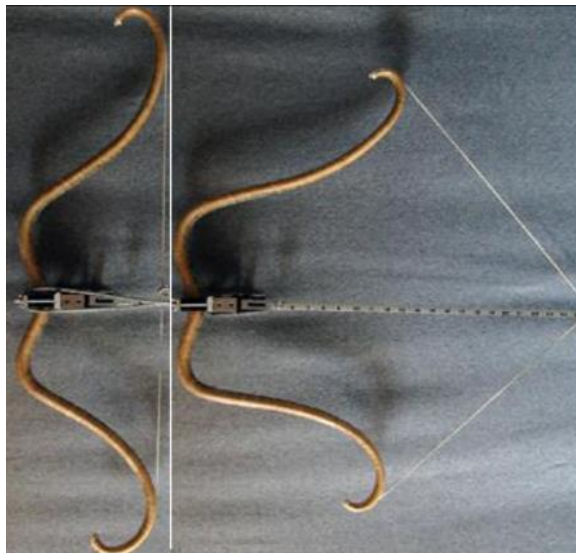


Fig.1 – Réplica do arco tipo cita feita por Adam Karpowicz (Chupel, 2018).

Inicialmente utilizado nas primeiras sociedades agrícolas, os compósitos, de certa forma, foram esquecidos durante séculos. O verdadeiro reaparecimento deu-se no século XX, onde eram utilizados em aplicações elétricas como dielétricos e cúpulas de radar pelas suas propriedades eletromagnéticas. Nas décadas de 80 e 90, o uso de compósitos tornou-se muito comum, por se tratar de estruturas leves para muitas soluções tecnológicas, tendo sido essenciais no desempenho de veículos espaciais e avões militares. Na Fig. 2 pode-se observar um vaivém espacial, onde grande parte da sua estrutura externa é constituída principalmente de cerâmica refratária. As cerâmicas refratárias possuem como principal característica a de resistir a altas temperaturas sem perder as suas propriedades físico-químicas. A Fig. 3 mostra em detalhes uma seção das placas de proteção térmica utilizadas na composição do vaivém espacial, construído com material Li 900 (cerâmica de sílica).



Fig. 2 – Vaivém espacial (Ciência e tecnologia em foco, 2021).



Fig. 3 – Foto de uma seção da parte inferior da cabine da tripulação do Discovery junto a uma série de placas do sistema de proteção térmica (Li-900) (Nasa, 2021).

A crescente preocupação com o ambiente e com a redução de custos de fabricação em conjunto com a reintrodução das fibras naturais nas tecnologias de compósitos de polímeros reforçados deu origem a novos desenvolvimentos no uso destes materiais, nomeadamente na proteção do Homem contra incêndios e impactos. Como exemplificado na Fig. 4, um capacete militar M1 da segunda guerra consistia num sistema de suspensão que podia ser encaixado no interior do casco de aço e removido para limpeza e substituição, inicialmente fabricado de papelão reforçado e, no curso da guerra, atualizado para um modelo de lona embebida em resina plástica (Ventura, 2009).



Fig. 4 – Capacete militar M1 (CHO, 2021).

As vantagens de materiais compósitos de fibras naturais como a madeira, ossos, ramos finos de plantas têm vindo a ser exploradas durante séculos, tal como demonstra o exemplo dos egípcios que usavam materiais compósitos de fibras naturais como o papiro para fazer barcos, velas e cordas desde o ano 4000 a.C. A palha é outro exemplo usado para reforçar argamassas de revestimentos de tijolos há mais de 2000 anos sendo este método ainda hoje utilizado.

Os compósitos de fibras naturais foram utilizados na produção de artesanato, os pequenos maços de hastes do capim dourado, Fig. 5, eram costurados com uma fibra fina e resistente obtida de folhas novas da palmeira buriti (*Mauritia flexuosa*). Estas duas espécies ocorrem naturalmente no Cerrado do Brasil Central e são muito abundantes no Jalapão. Outra fibra bastante utilizada é a fibra de bananeira (Fig. 6).



Fig. 5 – Fabrico artesanal Capim dourado jalapão, Brasil (Noticiário, 2021).



Fig. 6 – Fabrico artesanal fibra de bananeira, Brasil (Globo, 2021).

Os compósitos de fibras sintéticas são originários do século XIX quando o homem produziu o primeiro polímero, fenol-formaldeído. Com este material foi fabricada a baquelite, um material isolante, recentemente muito utilizado em equipamento elétrico. Ressalva-se, ainda, que os compósitos de fibras sintéticas passaram a ser mais utilizados durante a segunda metade do século XX com a fabricação de estruturas compósitas leves utilizadas em aplicações elétricas como dielétricos e cúpulas de radar (Ventura, 2009).

Com o avanço tecnológico, os requisitos exigidos aos materiais comuns mudaram, o que levou ao aparecimento de compósitos capazes de responder às novas necessidades. Cada vez mais, a fabricação dos materiais compósitos constitui um procedimento que pretende atingir valores ótimos de parâmetros como a forma, resistência, massa, rigidez durabilidade, custos, etc. Assim, o crescente desenvolvimento de novas tecnologias de fabricação desses materiais é acompanhado pela alteração e melhoramento destes mesmos parâmetros (Ventura, 2009).

O desenvolvimento e aplicação de materiais compósitos tem como o principal mercado os transportes (31%), seguido pela construção civil (19,7%), seguindo-se depois o material náutico (12,4%), o equipamento elétrico e eletrónico (9,9%), os produtos de consumo (5,8%), e no fim da lista aparece a indústria aeronáutica e aeroespacial (0,8%) (Ventura, 2009), conforme ilustrado na Fig. 7.

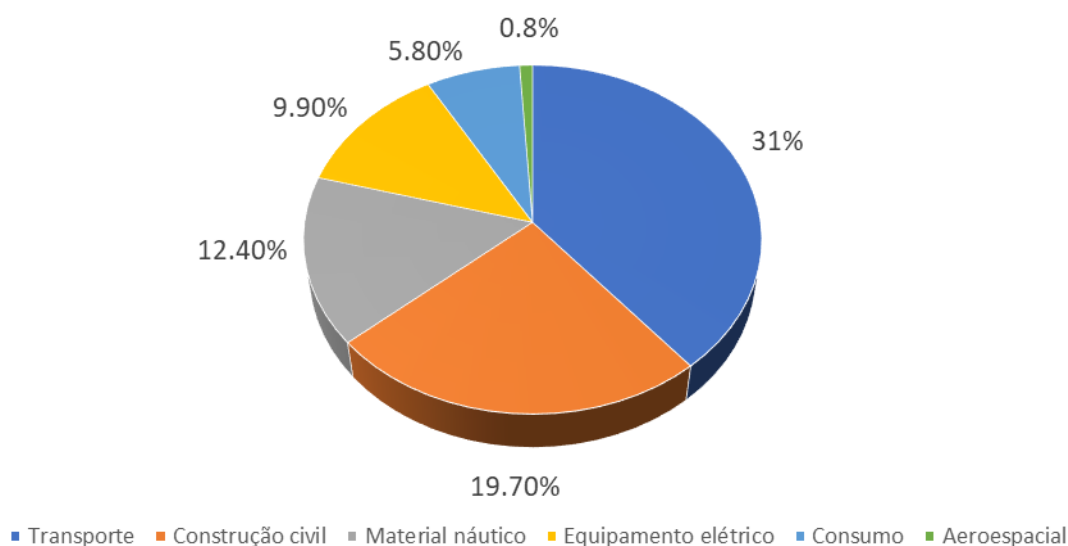


Fig. 7 – Principais aplicações dos materiais compósitos (Autor, 2021).

Na Fig. 8 pode ver-se, graficamente, a importância dos compósitos em relação a outros materiais e a forma como os materiais foram evoluindo no decorrer do tempo. É de salientar, a importância que o material compósito vem evidenciando desde os anos 90 do século XX, com a diminuição da dependência dos metais e ligas em detrimento dos outros materiais (Ashby *et al.*, 2004).

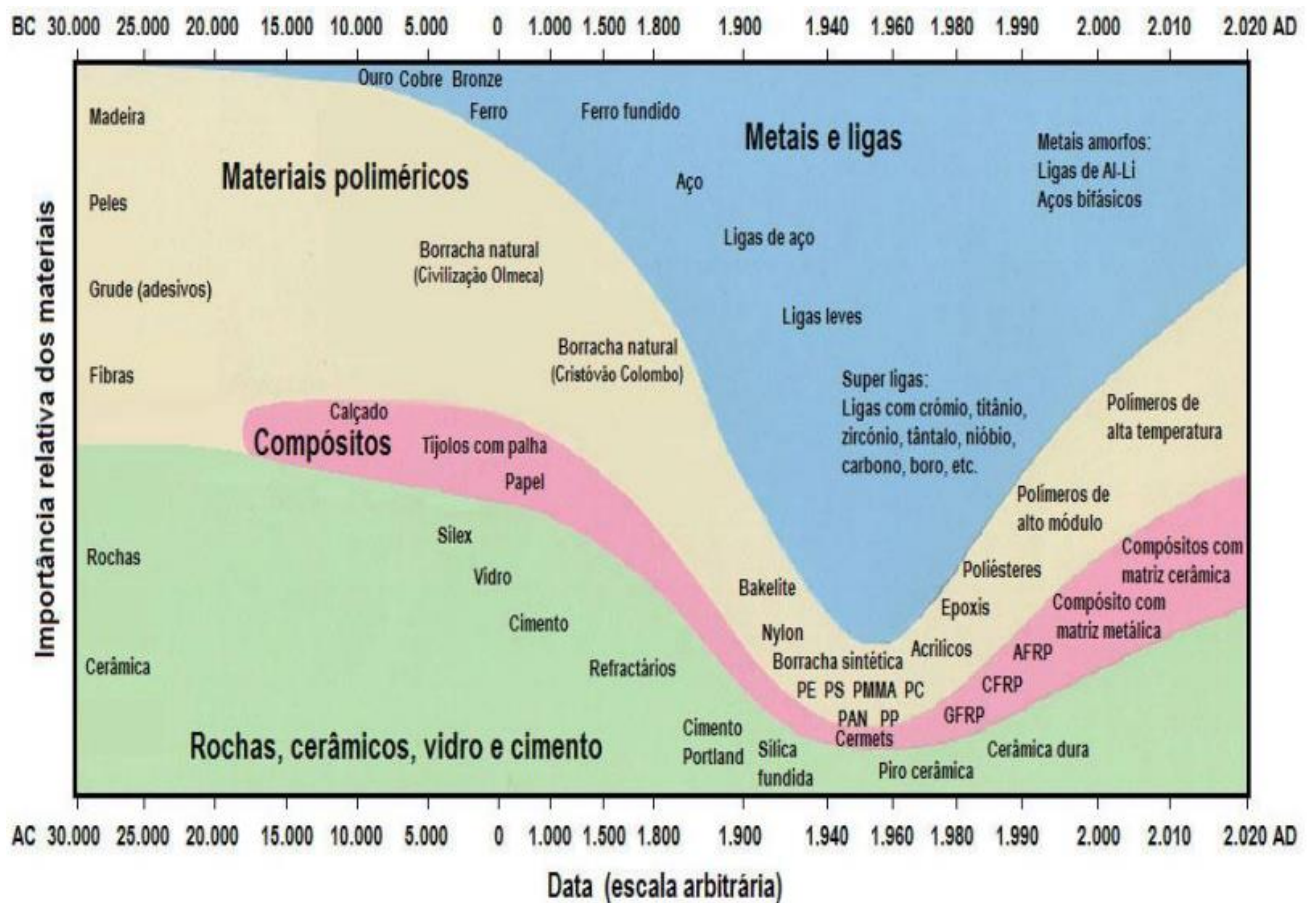


Fig. 8 – Evolução dos materiais utilizados no fabrico de componentes (Ashby *et al.*, 2004).

2.2. MATERIAIS COMPÓSITOS DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS FRP

2.2.1. DEFINIÇÃO DOS COMPÓSITOS

Os compósitos, consistem em dois ou mais materiais que são facilmente distinguíveis. Os compósitos poliméricos, geralmente, formam estruturas em que os componentes individuais conservam sua identidade e propriedades mecânicas. De igual modo, seus componentes deverão ser imiscíveis, compatíveis quimicamente, e com propriedades mecânicas complementares.

As propriedades do novo material são dependentes das propriedades dos materiais constituintes e da sua interface. Os compósitos são formados por duas ou mais fases denominadas, respetivamente, reforço e matriz. As propriedades mecânicas dos compósitos dependem da geometria, fração fibra/matriz, das propriedades do reforço e da matriz. Portanto, muitas vezes classifica-se os materiais compósitos com base na geometria e orientação do reforço utilizado (Pardini e Levy Neto, 2006). A Fig.9 representa um esquema

microscópico das fases constituintes de um material compósito polimérico, composto pela matriz, interface e reforço (fibra).

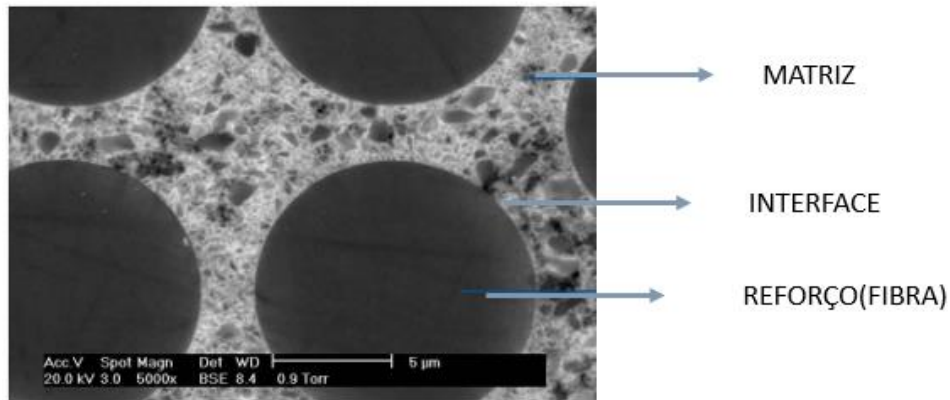


Fig. 9 – Esquema dos materiais compósitos à escala microscópica (Zenchetta, 2021).

2.2.2. CONSTITUINTES DOS COMPÓSITOS

2.2.2.1. Matrizes

As matrizes dos materiais compósitos permitem manter o material de reforço nas posições desejadas, garantindo assim a transmissão da carga através da repartição da mesma por toda a peça, bem como a proteção do material de reforço das agressões químicas e mecânicas extremas, nomeadamente, a absorção de água, a abrasão, os ataques químicos, o impacto, etc. (Juvandes,1999).

Os materiais utilizados como matriz apresentam-se numa única fase e podem ser classificados como matrizes poliméricas (termoplásticos e termoendurecíveis), matrizes metálicas e matrizes cerâmicas, dando origem às diversas categorias de materiais compósitos apresentados na Fig. 10.

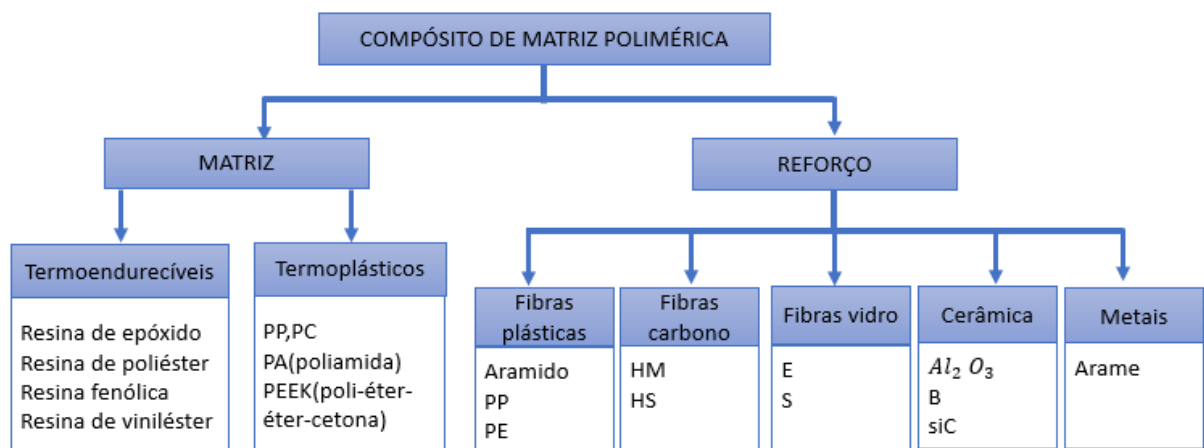


Fig. 10 – Esquema compósitos de matriz polimérica (adaptado de Branquinho, 2017).

- Compósitos de matriz polimérica

Os polímeros permitem grande variedade na fabricação de matrizes, sendo por isso o material mais utilizado nos dias de hoje: ao ser utilizada uma matriz polimérica pretende-se oferecer suporte às fibras ou às partículas usadas no material, absorver as deformações e conferir resistência quando sujeito a forças.

O material polimérico, que deriva das palavras “poli” e “mero”, o que significa muitas partes é caracterizado por ser constituído por muitas unidades (meros) ligadas quimicamente entre si formando um sólido. Dependendo da forma como estão ligados, química e estruturalmente, os polímeros podem ser divididos em três classes distintas: os termoplásticos, os termoendurecíveis e os elastómeros (Branquinho, 2017).

Os polímeros termoplásticos, na presença de calor, amolecem ganhando a forma pretendida, e após o seu arrefecimento mantêm essa mesma forma, sendo um processo reversível. Como não sofrem alterações na sua estrutura química durante o aquecimento, estes podem ser novamente fundidos após o arrefecimento. São aqueles que podem ser reciclados, o que é vantajoso dado que não se decompõem facilmente pela natureza. Alguns exemplos destes materiais são os polietilenos, os vinilos, os acrílicos e os nylons (Smith, 1998).

Os polímeros termoendurecíveis são os materiais plásticos que não se fundem com o seu reaquecimento, não podem, portanto, ser reaquecidos nem reprocessados, pois ao serem aquecidos degradam-se e decompõem-se (Smith, 1998). Estes resistem melhor a variações térmicas por comparação com os termoplásticos, possuem baixa massa molecular e ligações cruzadas. Exemplos típicos destes polímeros são as resinas epóxicas, poliésteres e fenólicas.

O elastómero (cujo exemplo típico é o da borracha) é um material macromolecular que recupera rapidamente a sua forma e dimensões iniciais após a remoção da força aplicada. A sua característica mais importante é o seu comportamento elástico após ser deformado. Sabe-se que é possível deformar um elastómero até dez vezes o seu comprimento inicial e após remoção da tensão aplicada, este voltará à forma e comprimentos originais. Este processo ocorre devido ao facto de as cadeias moleculares enroladas serem facilmente desenroladas pela aplicação da força, retomando a sua forma original quando esta deixa de ser aplicada devido ao reduzido número de ligações cruzadas entre as cadeias. Exemplos de elastómeros são o policloropreno e o copolímero butadieno. Um exemplo de um material compósito no qual é utilizado um elastómero é aquele que se utiliza em pneus de automóveis. Estes são constituídos por uma matriz de borracha natural e sintética, reticulada com enxofre (adição de enxofre ao poli-isopreno, que rompe as ligações duplas dos átomos de carbono e forma pontes de enxofre que aumentam a resistência e a dureza da borracha - vulcanização), que contém partículas de aço ou nylon como reforço (Branquinho, 2017).

- Compósitos de Matriz Metálica

Nos materiais compósitos de matriz metálica (Fig.11), tal como o nome indica, a matriz é constituída por um metal. Este tipo de compósito desenvolveu-se na década de 60 com a produção de fibra de boro e de carboneto de silício para reforço de ligas de alumínio (Ventura, 2009). Os compósitos de matrizes de alumínio são utilizados na indústria dos transportes (por exemplo, no fabrico de discos de travagem) e os de matriz de titânio na área da aviação militar e aeroespacial. Também utilizados na indústria de materiais desportivos (raquetes de ténis, componentes de bicicleta, tacos de golfe).

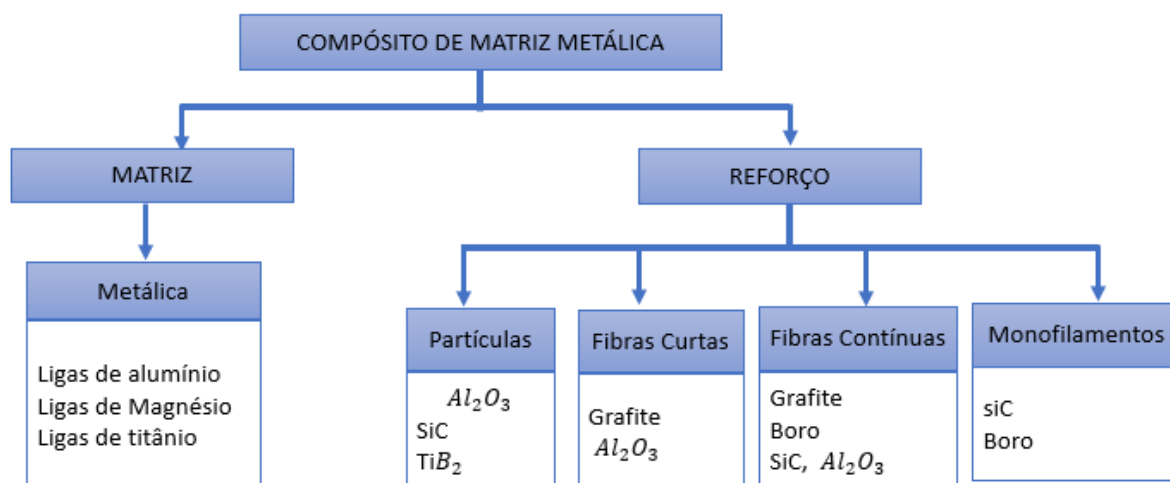


Fig. 11 – Esquema compósitos de matriz metálica (adaptado de Branquinho, 2017).

- Compósitos de Matriz Cerâmica

Os materiais compósitos de matriz cerâmica (Fig.12) encontram-se entre os materiais mais antigos, usados pelo ser humano, apesar da sua utilização ter ficado muito aquém dos outros tipos de matrizes, devido à sua dificuldade de fabricação. As elevadas temperaturas necessárias à sua fabricação fazem com que seja necessário a utilização de outro tipo de materiais no seu reforço, que suportem as elevadas temperaturas. Os materiais cerâmicos mais utilizados na matriz são, o cimento, a alumina, o nitreto de silício e a zircónia. Estes materiais apresentam como vantagens a elevada resistência à oxidação e a baixa densidade, só superada pela matriz polimérica. São quimicamente inertes e apresentam uma excelente resistência ao desgaste. Além da sua dificuldade de fabricação, estes materiais, apresentam uma predisposição à fratura (Ventura, 2009).

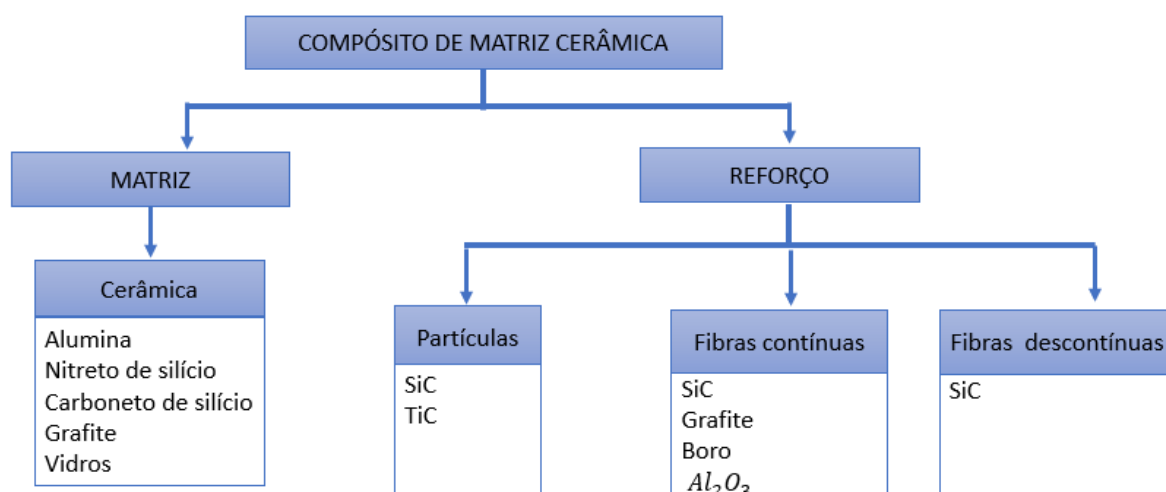


Fig. 12 – Esquema compósitos de matriz cerâmica (adaptado de Branquinho, 2017).

Dos compósitos apresentados na Tabela 1, os materiais mais versáteis para utilização em matrizes são os polímeros. No entanto, sobre elevadas temperaturas e ambientes agressivos, os materiais cerâmicos ou o carbono são mais indicados para utilização na matriz (Branquinho, 2017).

Tabela 1 – Fatores de seleção do material da matriz de um compósito (Branquinho, 2017).

Fator de Seleção	Avaliação dos Materiais da Matriz		
	Pobre		Bom
Facilidade de Processamento	Cerâmico	Metal	Polímero
Capacidade de deformação	Cerâmico	Metal	Polímero
Resistência ao Ambiente	Polímero	Metal	Cerâmico
Densidade	Metal	Cerâmico	Polímero
Custo	Metal	Cerâmico	Polímero

O aumento do uso destes materiais (polímeros) dá-se através da análise das propriedades destes materiais vs. o seu custo de fabrico. Ao apresentarem uma baixa densidade e baixo ponto de fusão, o seu processo produtivo é simplificado, pois não necessitam de elevadas temperaturas e/ou pressões, portanto, não necessitam de complexos equipamentos de fabrico, minimizando os custos de processo e fabrico. Apresentam como desvantagem na sua utilização a sua baixa estabilidade dimensional, elevado coeficiente de expansão térmica e a elevada sensibilidade à radiação.

2.2.2.2. Reforço

O reforço é o componente descontínuo do material, sendo mais resistente do que a matriz, e, por isso, o elemento responsável por suportar praticamente a totalidade das cargas aplicadas sobre o material. Os reforços têm como propósito a melhoria das características das propriedades mecânicas e físicas (Ramos, 2006).

Os reforços podem ter origem vegetal, mineral ou sintética. Podem ser constituídas por fibras, por partículas ou por flocos, sendo estes apresentados na Fig.13. A classificação dos materiais compósitos dá-se através dos seus mecanismos de reforço, que depende fortemente da geometria do mesmo.



Fig. 13 – Geometrias possíveis da fase de reforço: a) fibra, b) partícula e c) floco (Mendonça, 2019).

A fibra com pequeno diâmetro é muito mais resistente do que um material volumoso, a probabilidade da presença de um defeito superficial crítico ou de uma fratura, diminui com a redução do volume da amostra. Os materiais usados como fibra de reforço possuem altos limites de resistência a tração, com base no seu diâmetro e a sua natureza. As fibras são agrupadas em três classificações diferentes: nano fibras (*whiskers*), fibras e arames.

Os *whiskers* são monocristais muito finos que por terem pequenas dimensões possuem um alto grau de perfeição cristalina e são virtualmente livres de defeitos. Consequentemente, possuem resistências muito elevadas e encontram-se entre os materiais mais resistentes conhecidos. Apesar dessas altas resistências, os *whiskers* não são usados extensivamente como um meio de reforço, pois são extremamente caros, e de difícil incorporação numa matriz. Os materiais dos *whiskers* incluem grafite, carboneto de silício, nitreto de silício e óxido de alumínio; algumas das características mecânicas desses materiais estão apresentadas na Tabela 2.

As fibras podem tanto ser policristalinos quanto amorfos e têm pequenos diâmetros; os materiais fibrosos são geralmente polímeros ou cerâmicos (por exemplo, as aramidas poliméricas, vidro, carbono, boro, óxido de alumínio e carbetos de silício). A Tabela 2 apresenta algumas características mecânicas de alguns materiais utilizados na forma de fibra.

Já os arames, considerados finos, possuem diâmetro relativamente grande quando comparados com os anteriores. Os materiais típicos incluem o aço, o molibdênio e o tungstênio. Os arames são utilizados como um reforço radial de aço nos pneus de automóveis, nas carcaças de motores a jato, enroladas com filamentos e em mangueiras de alta pressão enroladas com arame, etc (Morgado, 2014).

Tabela 2 – Características mecânica dos materiais (Morgado, 2014).

Material	Densidade Relativa	Limite de Resistência à Tração [GPa (10 ⁶ psi)]	Resistência Específica (GPa)	Módulo de Elasticidade [GPa (10 ⁶ psi)]	Módulo Específico (GPa)
Whiskers					
Grafite	2,2	20(3)	9,1	700(100)	318
Nitreto de silício	3,2	5-7(0,75-1,0)	1,56-2,2	350-380(50-55)	109-118
Óxido de alumínio	4,0	10-20(1-3)	2,5-5,0	700-1500 (100-220)	175-375
Carbeto desilício	3,2	20(3)	6,25	480 (70)	150
Fibras					
Óxido de alumínio	3,95	1,38(0,2)	0,35	379 (55)	96
Aramida (marca kevlar49™)	1,44	3,6-4,1(0,525-0,600)	2,5-2,85	131 (19)	91
Carbono ^a	1,78-2,15	1,5-4,8(0,22-0,70)	0,70-2,70	228-724 (32-100)	106-407
Vidro-E	2,58	3,45(0,5)	1,34	72,5 (10,5)	28,1
Boro	2,57	3,6(0,52)	1,40	400 (60)	156
Carbeto de Silício	3,0	3,9(0,57)	1,30	400 (60)	133
UHMWPE(Spectra900™)	0,97	2,6(0,38)	2,68	117 (17)	121
Arames Metálicos					
Aço de alta resistência	7,9	2,39(0,35)	0,30	210 (30)	26,6
Molibdênio	10,2	2,2(0,32)	0,22	324 (47)	31,8
Tungstênio	19,3	2,89(0,42)	0,15	407 (59)	21,1

2.2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Os compósitos de matriz polimérica podem ser classificados em três grupos principais, de acordo com a morfologia do reforço, sendo eles classificados no esquema apresentado na Fig.14, como compósitos reforçados com partículas, reforçados com fibras e compósitos estruturais.



Fig. 14 – Esquema de classificação dos materiais compósitos (adaptado de Furtado, 2009).

2.2.3.1. Compósitos reforçados com partículas

Os compósitos reforçados por partículas podem ser carregados com partículas dispersas com dimensões distintas, diferenciadas por características físicas e químicas da carga. O exemplo mais conhecido deste tipo de compósito é o betão, que consiste num conjunto de partículas ligadas entre si (agregados grossos e agregados finos), num corpo sólido, através de uma matriz, no caso específico a pasta de cimento (Fig.15 e 16).

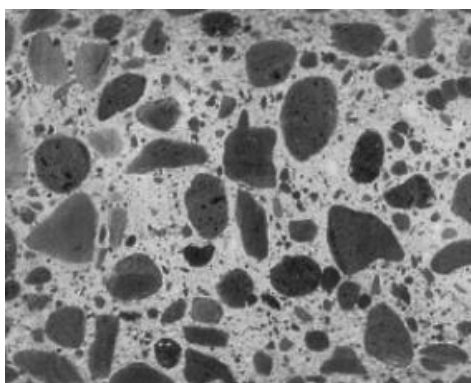


Fig. 15 – Compósito reforçado com partículas (betão) à escala microscópica (Soares, 2017).



Fig. 16 – Exemplo de compósito reforçado com partículas (betão) (Mapa da obra, 2018).

Os materiais compósitos reforçados com partículas de pequenas dimensões têm a sua resistência aumentada por dispersão. As partículas apresentam diâmetros compreendidos entre os 0,01 e 0,1 μm e são mais rígidas e resistentes do que a matriz. Numa matriz polimérica, estas partículas são designadas por aditivos e cargas de enchimento (*fillers*) e são adicionadas para ampliar a rigidez do material (módulo de elasticidade), reduzir custos ou modificar as propriedades térmicas e elétricas (Júnior, 2003).

2.2.3.2. Compósitos reforçados com fibras

Os materiais compósitos reforçados com fibras, FRP, baseiam-se no princípio de heterogeneidade. São formados por matriz polimérica no invólucro, fibras no interior como reforço e cargas de enchimentos designadas por (*fillers*). As fibras são materiais finos e alongados, como filamentos, que podem ser contínuos ou descontínuos e podem ser produzidas e comercializadas em diferentes configurações: fibras longas e contínuas enroladas em carretel; tecidos com fibras bidirecionais; ou mantas, com fibras curtas em direções aleatórias. Cada configuração resulta num material compósito de propriedades diferentes. A escolha da configuração depende da aplicação do material e do método de fabrico do mesmo. Assim, o desempenho dos materiais compósitos é proporcional ao volume de fibras orientadas em cada direção, cujo comportamento depende dos seguintes parâmetros: tipo, orientação, comprimento, grau de concentração, forma como se dispõe no seio da matriz, composição, propriedades mecânicas da resina da matriz, assim como a adesão entre fibras e a matriz polimérica (Soares e Martins, 2006).

A máxima resistência na direção das fibras (unidirecional) é obtida com fibras longas, contínuas e orientadas em uma direção. Uma resistência elevada, mas inferior à anterior, é também obtida através de tecidos de fibras dispostas em duas direções (bidirecional). A menor resistência é obtida por mantas de fibras orientadas aleatoriamente, onde as propriedades do material são menores do que nas anteriores e sem um sentido preferencial (aleatório) (Soares e Martins, 2006).

A Fig.17 representa os tipos de orientação de fibras, sendo elas contínuas unidirecionais, fibras contínuas em forma de tecido e por fim fibras descontínuas dispersas aleatoriamente.

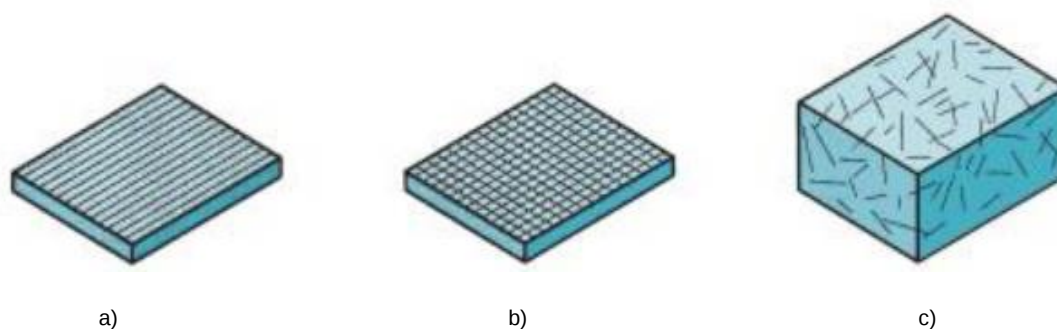


Fig. 17 – Tipos de orientação de fibras a) fibras contínuas unidirecionais, b) fibras contínuas em forma de tecido e c) fibras descontínuas dispersas aleatoriamente (Groover, 2002).

De entre os reforços mais utilizados na produção de matérias compósitos atualmente, merecem destaque as fibras de vidro, de carbono, de aramida, de boro e de basalto.

· Fibras de vidro

As fibras de vidro são utilizadas, na sua maioria, para reforço das matrizes poliméricas, sendo que cerca de 90% dos plásticos reforçados incorporam este tipo de fibra. A utilização deste tipo de fibra como reforço teve início na década de 40, no sector aeroespacial, sendo que devido à sua versatilidade a sua aplicação expandiu-se a outros sectores. (Moura *et al.*, 2005).

A fibra de vidro, representada de forma ilustrada na Fig.18, é popular como reforço devido à facilidade do processamento do vidro no estado fundido, à elevada disponibilidade, à boa aderência à matriz polimérica e a grande variedade de processos e técnicas de fabricação (Silva, 2016).

Os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de vidro apresentam as seguintes características favoráveis: elevada razão resistência e massa, elevada resistência mecânica, boa resistência ao impacto (tabela 3), boa estabilidade dimensional, boa resistência ao calor, à humidade e à corrosão, boas propriedades de isolamento elétrico, facilidade de fabricação e custo relativamente baixo. Como o vidro é um material praticamente inerte, as fibras também são imunes aos ataques biológicos e têm boa resistência aos ataques de solventes e produtos químicos (Silva, 2016).

Naglis *et al.* (1998), avaliaram o modo de falha de compósitos de matriz polimérica reforçada por fibras de vidro, carbono e aramida, submetidos a carregamento dinâmico. Chegando à conclusão que a energia absorvida (U_0) varia inversamente com o módulo de elasticidade (E) das fibras.

Tabela 3 – Energia absorvida no ensaio de impacto (Naglis *et al.*, 1998).

Compósito	$U_0(\text{kJ/m}^2)$	V_f Fração volumétrica (%)	E(GPa)
Vidro	319±20	50	70 ³
Aramida	216±24	65	125 ³
Carbono	84±12	50	230 ³

Existem diversos grupos de vidro utilizados para fabricação de fibra, como a sílica, o oxinitrito e o fosfato. Os diferentes tipos de fibra são denominados por uma letra, sendo as principais a fibra de vidro E (composta a partir de alumínio, cálcio e silicatos de boro) destinada a produtos que necessitem de boa resistência mecânica e isolamento elétrico; a fibra de vidro S (composta de magnésio e silicatos de alumínio) empregada quando se requer alta resistência mecânica; e a fibra de vidro C a qual oferece maior resistência a ataques químicos (Silva, 2016). As fibras de vidro são usadas há alguns anos com a finalidade de melhorar a resistência à tração e ao impacto de compósitos cimentícios. Mas, os álcalis do cimento Portland atacam essas fibras causando a degradação de suas propriedades mecânicas. Para contornar essa degradação, há alguns anos, foram desenvolvidas as fibras álcalis-resistente (AR).

As fibras de vidro do tipo “E” são as mais utilizadas devido ao baixo custo. Este tipo de fibra fornece um conjunto atrativo de propriedades mecânicas, químicas e elétricas. O uso desta fibra resulta em melhorias nas propriedades dos materiais como a resistência à tração e ao impacto (Silva, 2016).



a)



b)

Fig. 18 – Configurações de tela de fibra de vidro a) bidirecional, b) multidirecional (Moreira, 2009).

- Fibras de carbono

As fibras de carbono tiveram a sua origem nos anos 60, sendo obtidas através da oxidação/carbonização a 2800°C de fios seda natural (*Rayon*), fibras com excelentes propriedades mecânicas (elevada resistência e dureza e baixa densidade) (Gomes, 2008). A fibra de carbono é mais utilizada em aplicações de elevada solicitação estrutural, como por exemplo nas indústrias aeroespacial, automóvel de competição e, adicionalmente, em técnicas de reforço na construção civil.

Atualmente existem dois tipos de fibras de carbono: as fibras de grafite, nas quais a percentagem de carbono chega aos 99%, e as fibras de carbono, que compreendem percentagens de carbono entre 80 e 95%. (Moura *et al.*, 2005). Existem diversos processos para a produção das fibras de carbono: através da decomposição térmica de vários precursores orgânicos, a celulose (*rayon fibers*), o poliácridonitrilo (PAN) e o alcatrão (*pitch*). Estes diferentes precursores conduzem a fibras de carbono com características mecânicas distintas. (Moura *et al.*, 2005). O precursor mais utilizado é o PAN, que confere boas propriedades mecânicas, apresentando também vantagens económicas, enquanto o processo que utiliza a celulose caiu em desuso, pelo facto de conferir ao material compósito baixas propriedades mecânicas. Na Fig.19 apresentam-se alguns tipos e orientações de fibra de carbono.

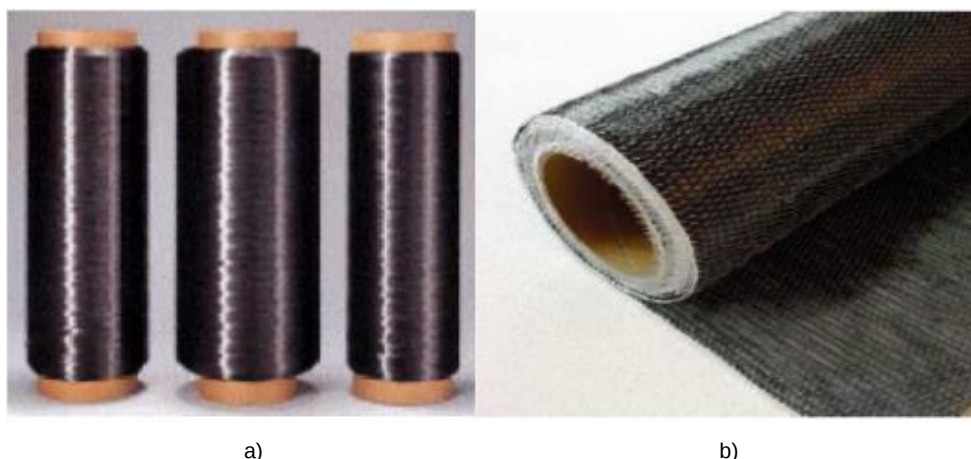


Fig. 19 – Tipos de orientação de fibras de carbono: a) fio e b) fibras continuas em forma de tecido (Filho, 2007).

- Fibra aramida

As fibras aramídicas foram comercializadas pela primeira vez pela DuPont (*E. I. du Pont de Nemours and Company*) é uma empresa multinacional americana). Estas foram introduzidas no mercado como fibras de alta resistência e alto módulo baseadas numa ligação de aramida (Kelly e Carl, 2000). Quando introduzidas no mercado tinham como principais vantagens, face a outras fibras de reforço, o facto de terem elevada resistência e boa relação rigidez/massa. Adicionalmente, apresentam excelente resistência química e mecânica, boa resistência ao impacto e à fadiga, boa capacidade de amortecimento de

vibrações, boas características dielétricas, elevada resistência a solventes orgânicos, combustíveis e lubrificantes. Assim, tornaram-se fortes candidatas ao uso como reforço de compósitos em aplicações de elevado desempenho (Moura *et al.*, 2011).

Estas fibras têm grande aplicabilidade na indústria balística, mais especificamente em coletes à prova de bala e blindagens. Isto porque têm uma elevada capacidade de absorção de energia. As resinas mais usadas nestas aplicações são o poliéster, viniléster e fenólica sendo que a sua percentagem no compósito é inferior a 30%. No entanto, para melhores propriedades mecânicas esta percentagem deverá variar entre os 30% e 50% (Kelly e Carl, 2000). Como desvantagens tem-se a baixa resistência à compressão e à flexão, bem como a elevada sensibilidade ao corte interlaminar (Moura *et al.*, 2011). A Fig.20 representa alguns tipos e orientações de fibra de aramida.

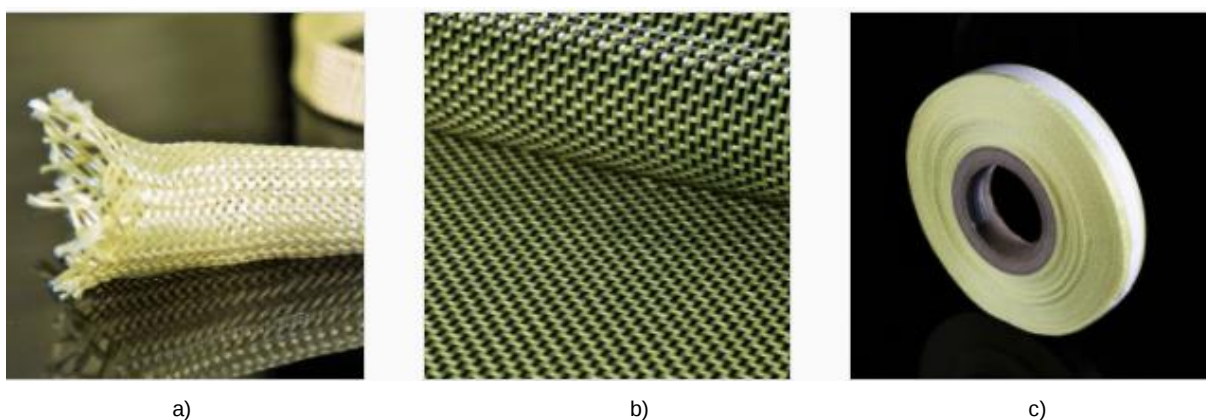


Fig. 20 – Tipos de orientação de fibras de aramida Dupont a) malhas tubulares, b) tecido, c) fitas (Castro Composites, 2021).

· Fibra de Boro

Dado que o seu processo de produção é muito dispendioso, o qual passa pela deposição química de vapores sobre um filamento de Tungsténio a uma temperatura de 1227 °C esta fibra não é utilizada frequentemente (Moura *et al.*, 2011). Comparando esta fibra com a fibra de vidro, o seu módulo de elasticidade é cinco vezes superior, mas apresenta um custo muito superior, pelas razões referidas. Um dos grandes obstáculos para a expansão do seu uso é seu elevado custo, sendo utilizada sobretudo na indústria aeroespacial. A Fig. 21 representa alguns tipos e orientações de fibra de boro.



Fig. 21 – Tipos de orientação de fibras de boro a) fios, b) tecido (Silva, 2017).

· Fibra de Basalto

O basalto é uma rocha de origem vulcânica, suas rochas são densas e resistentes e é a rocha mais abundante da superfície terrestre e da superfície dos oceanos. A composição do basalto é variável e nem sempre útil para a produção de fibras, devido à presença ou ausência de elementos (composições químicas - o controle da microestrutura é fundamental).

As fibras de basalto apresentam desenvolvimento mais recente se comparadas às tradicionais fibras utilizadas na fabricação de compósitos poliméricos, tais como fibra de vidro, aramida e carbono. As suas propriedades de resistência estão situadas entre aquelas oferecidas pelas fibras de vidro do tipo “E” e do tipo “S”. Apresentam maior temperatura de trabalho, boa resistência química e ao impacto, e menor libertação de gases na queima. Além disso, o seu baixo custo pode ser inferior ao da fibra de vidro do tipo “E”. É tipicamente utilizada na fabricação de vasos de pressão, cilindros, perfis, peças para automóveis, pás eólicas, em reforço de estruturas de betão, em aplicações marítimas e diversos outros produtos. (Lapena, 2017). A Fig.22 representa alguns tipos e orientações de fibra de basalto.

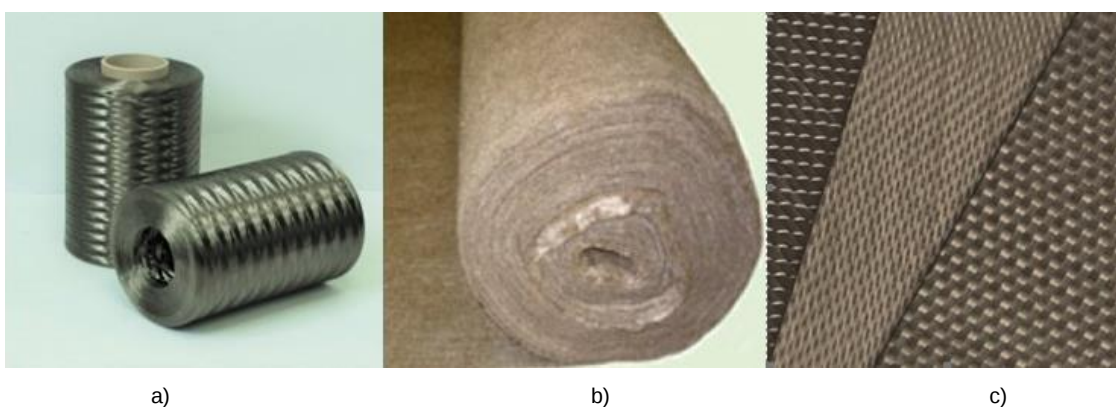


Fig. 22 – Tipos de orientação de fibras de basalto a) mechas de filamentos b) manta flexível c) tecidos (Kamenny Vek, 2021).

2.2.3.3. Compósitos estruturais

Os compósitos estruturais podem ser compostos por materiais homogêneos e por materiais compósitos e as suas propriedades não dependem apenas das propriedades dos materiais que o constituem porque existe uma forte influência do posicionamento dos diversos elementos. Estes encontram-se divididos em duas categorias, os compósitos laminados e os compósitos sanduíche (Moura, *et al.*, 2011).

- Compósitos laminados

Os compósitos laminados são constituídos por várias camadas empilhadas (lâminas) e orientadas em direções pré-definidas, sendo estes esquematicamente apresentados na Fig.23. As laminações podem ser concebidas, por exemplo, a partir de materiais de tecido, como algodão, papel ou fibras. As variabilidades das possíveis combinações de orientações, do tipo de material de cada lâmina e da sua espessura, determinam as características do material compósito. Normalmente, possuem elevada resistência em várias direções no plano bidimensional, no entanto, quando submetidos a uma força na direção perpendicular a sua resistência pode diminuir drasticamente (Mendonça, 2019).

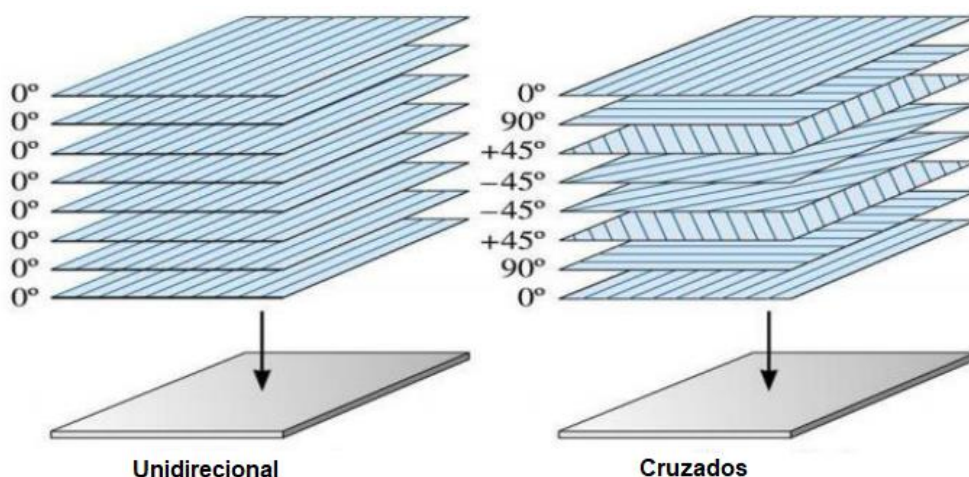


Fig. 23 – Composição de um laminado (adaptado de Callister, 2002).

- Compósitos sanduíche

Estes compósitos são constituídos por duas folhas ou duas faces externas com elevadas resistência e rigidez, separadas por uma camada interna menos densa, com menores resistência e rigidez, denominada núcleo. O núcleo apresenta duas principais funcionalidades: uma primeira diz respeito à separação das faces externas e resistência a solicitações perpendiculares ao plano da face; a segunda é a de conferir rigidez de corte ao compósito sanduíche. As faces externas têm como finalidade principal suportar a maior parte das tensões no plano. Nestes tipos de compósitos destaca-se a utilização de materiais como espumas poliméricas (material isolante térmico, copos para bebidas quentes, embalagens), madeiras leves e estruturas em forma de favos de mel. A Fig.24 ilustra um compósito sanduíche com núcleo em favos de mel (Mendonça, 2019).

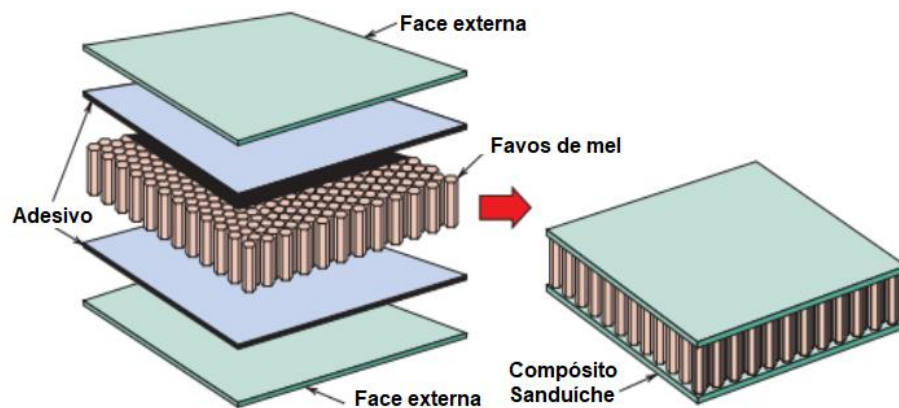


Fig. 24 – Exemplo de um compósito sanduiche (adaptado de Callister, 2002).

2.2.4. PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS

As propriedades mecânicas dos materiais são avaliadas através da resposta que estes apresentam quando são submetidos a determinadas solicitações (por exemplo, carregamentos em serviço ou ensaios mecânicos) que podem ser estáticas ou dinâmicas. O ensaio de tração consiste em submeter o provete a um deslocamento constante ao longo da direção longitudinal da peça, medindo a resposta do material (resistência) a esse deslocamento. As propriedades do material que podem ser medidas através deste ensaio são: tensão de rotura, módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson*.

Um carregamento aplicado na direção longitudinal das fibras assumindo uma matriz dúctil e fibras frágeis produz a curva tensão-deformação apresentada na Fig. 25 a) onde σ_f e σ_m correspondem à tensão e ϵ_f e ϵ_m às deformações na rotura, respetivamente, da fibra e da matriz. O comportamento do compósito resultante é representado na Fig. 25 b).

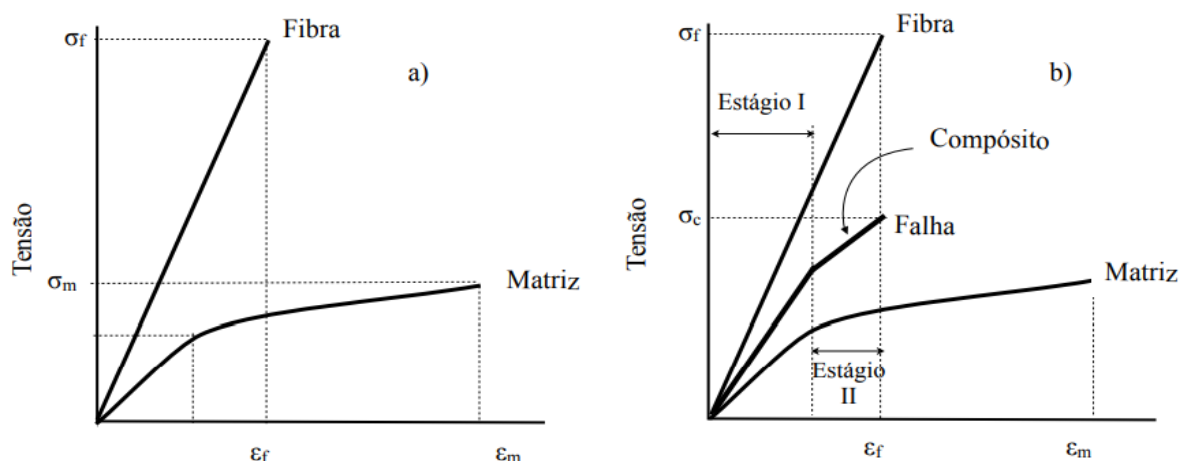


Fig. 25 – Diagrama esquemático da curva de tensão-deformação: a) fibra e matriz, b) fibra, matriz e material compósito (Callister, 2002).

O processo de deformação progressivo até a rotura total do compósito é identificado por 2 principais estágios. Durante as deformações iniciais (Estágio I), ambos os materiais se deformam elasticamente e quando as deformações do compósito fazem com que a matriz atinja a sua tensão de cedência, esta entra em regime de deformações plásticas (Estágio II) enquanto as fibras continuam a deformar-se elasticamente. A falha do compósito ocorre quando as fibras começam a fraturar, o que ocorre quando as deformações aplicadas ao compósito correspondem às deformações máximas das fibras (ϵ_f). O processo de rotura das fibras começa nas seções das fibras menos resistentes, à medida que as tensões aumentam, novas fibras vão sendo fraturadas. Devido à ductilidade da matriz, mesmo sofrendo deformações plásticas e ocorrendo a fratura contínua das fibras, a matriz ainda se encontra intacta e as fibras fraturadas são mantidas no seu interior. Assim, a matriz é ainda capaz de redistribuir as tensões para as restantes fibras enquanto as fibras fraturadas são ainda capazes de suportar cargas reduzidas até ocorrer o consequente colapso total do compósito. Logo, o comportamento dos compósitos em deformações próximas das de rotura são quase exclusivamente influenciadas pelo comportamento das fibras (Carvalho, 2005).

Dos diversos conjuntos de ensaios a que um material pode ser sujeito, normalmente de acordo com as especificações de projeto, podem-se determinar-se propriedades mecânicas que são classificadas:

quanto à integridade

- Destrutivos: provocam inutilização parcial ou total da peça (resistência à tração, dureza, fadiga, fluência, torção, flexão, impacto, tenacidade à fratura, corte).
- quanto à velocidade
- Estáticos: carga aplicada lentamente (tração, flexão, compressão, dureza e torção).
- Dinâmicos: carga aplicada rapidamente (fadiga e impacto).
- Carga constante: carga aplicada durante um longo período (fluência).

As características finais dos compósitos estão dependentes de diversos fatores, nomeadamente das características dos materiais de reforço, tanto as físicas como as mecânicas, bem como a orientação dos mesmos, a quantidade (fração volumica de fibra), tamanho e formato; propriedades mecânicas da resina; e da interface entre a matriz e as fibras (Lima, 1997).

2.2.4.1. Efeito da orientação das fibras

As fibras podem ser contínuas ou descontínuas e apresentar diversos tipos de orientações, tais como, no caso das fibras contínuas, unidirecionais, bidirecionais, ou multidirecionais e no caso das descontínuas, parcialmente alinhadas ou totalmente aleatórias.

A orientação das fibras na matriz pode ser alinhada (em uma ou várias direções) ou aleatória. Conforme o que se pretende a nível do projeto, as fibras são escolhidas para

serem solicitadas a esforços preferencialmente ao longo do seu comprimento, em detrimento da sua largura. Pode mesmo afirmar-se que a anisotropia cresce de forma mais significativa com o aumento do comprimento e com o aumento da fração volúmica de fibra (Romão, 2003).

Quando se consegue que o compósito seja processado de forma a que o alinhamento das cargas seja feito na direção das solicitações, consegue-se que o mesmo apresente resistência mecânica e módulo de elasticidade com melhores prestações contrariamente ao que acontece quando as solicitações são transversais à orientação preferencial do material de reforço, onde as propriedades mecânicas apresentaram valores inferiores. Se as solicitações forem em direções perpendiculares, a solução do problema pode ser minimizada com o recurso à orientação das fibras por camadas, com a orientação perpendicular em cada camada (Romão, 2003). Na Fig.26 apresenta-se um esquema genérico de como a orientação das fibras e a fração volúmica das fibras influenciam as suas propriedades resistentes. A resistência será máxima quando as fibras estiverem orientadas com o esforço, sendo mínima na direção perpendicular.

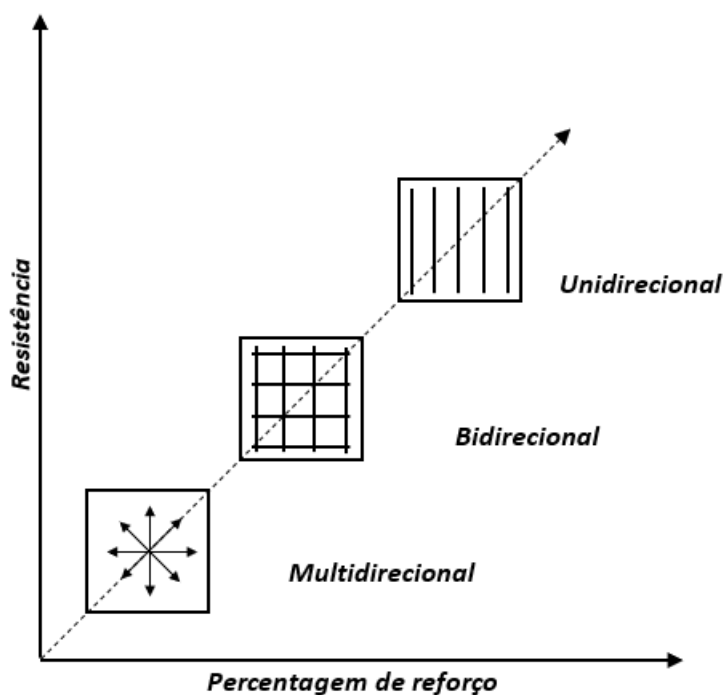


Fig. 26 – Influência da orientação e fração de fibra na resistência do compósito (adaptado de Ramos, 2006).

2.2.4.2. Fração volúmica de fibras

A quantidade de fibra carregada no compósito influencia o mesmo de forma muito significativa já que é a mesma que vai influenciar nas propriedades mecânicas dos compósitos. Os compósitos que apresentam fibras com menor espaço entre as mesmas são

os que têm maior valor de fração de volume de fibras no laminado (Franco, 2008). Para frações volúmicas maiores, as tensões aplicadas sobre o compósito são distribuídas de forma mais uniforme e o desempenho mecânico (módulo de elasticidade e resistência à tração) é superior (Lima, 1997).

O aumento da quantidade de fibras nem sempre é sinónimo de aumento da resistência do material sendo que a mesma tende a baixar de valor quando o binómio entre a fibra e a resina deixa de ser equilibrado. Isto acontece sempre que a resina deixa de facilitar a correta união entre as fibras. Este fenómeno é visível quando a resistência à tração começa a reduzir (Romão, 2003). Em matrizes com uma baixa fração volúmica de material fibroso, em que o espaço entre fibras é muito significativo é normal observar que a matriz apresenta deformações localizadas e que estas tendem a promover a rotura da ligação matriz-fibra (Fernandes, 2008).

2.2.4.3. Comprimento da fibra

As cargas são aplicadas sobre a matriz e só depois estas podem ser transferidas para os reforços, pelo que o seu desempenho no compósito é dependente de fatores como: comprimento, diâmetro, distribuição (no caso dos compósitos de fibras curtas) e a sua fração volúmica (Lima, 1997). As fibras contínuas apresentam muitas vantagens sobre as fibras descontínuas, tais como a resistência ao impacto e estabilidade dimensional, mas por outro lado as fibras descontínuas proporcionam um baixo custo e são mais fáceis de processar (Milanese, 2008). A fibra tem características físicas associadas ao seu comprimento, L , e à sua secção transversal (ou diâmetro d) em que $L > d$. A relação conhecida por esbelteza é o coeficiente entre comprimento e secção transversal. Este pode ser significativamente diferente entre fibras. A valores maiores da relação L/d estão associados melhores valores de resistência da fibra e consequentemente, melhor resistência mecânica no compósito (Fernandes, 2008).

2.2.4.4. Interface matriz-fibra

A transferência de solicitação da matriz para os reforços é feita na zona de fronteira entre a resina e as fibras, normalmente denominada por interface. Assim uma boa aderência na interface é primordial para a transferência da carga e, consequentemente, para as características mecânicas do compósito. A qualidade da aderência na interface é dependente da natureza química dos seus constituintes, os quais podem sofrer alterações na estrutura molecular durante a fase de polimerização. Os coeficientes de expansão térmica têm igualmente uma importância vital para a qualidade do compósito ao nível das prestações mecânicas, se durante o processo de cura os coeficientes não estiverem próximos as expansões e contrações das fibras e das resinas sendo diferentes, tendem a provocar cortes na zona de adesão, com consequência de falha prematura do componente (Lima, 1997).

2.2.4.5. Vantagens da utilização de materiais compósitos

As aplicações de novos materiais compósitos incentivam o crescimento de novos mercados nos seguintes setores: transporte, construção, infraestrutura, elétrico, aeronáutico e aeroespacial (Zandiacomi, 2002). As vantagens de usar materiais compósitos frente a outros materiais incluem:

- **resistência elevada** - Os materiais compósitos podem ser projetados de acordo com as exigências específicas da aplicação. Uma vantagem distinta dos compósitos, sobre outros materiais, é a habilidade de se poder usar diversas combinações de resinas e de reforços e, consequentemente, permitir a obtenção das propriedades mecânicas e físicas desejadas;
- **leveza** - Os compósitos podem ser projetados para as aplicações que necessitem de pouco peso. Pois possuem baixo peso próprio, devido à baixa densidade dos materiais usados, em particular na baixa densidade das resinas (cerca de 1100 kg/m^3) que constituem, em média, cerca de 50% da composição do compósito;
- **resistência à corrosão** - Os compósitos fornecem a resistência necessária a longo prazo em ambientes severos em contato com produtos químicos;
- **flexibilidade de formas** - Os compósitos podem ser moldados de forma complexa com um custo relativamente baixo.

2.2.4.6. Comparação de algumas propriedades

Como referido, um material compósito é um material formado por dois ou mais constituintes, insolúveis entre si e macroscopicamente distinguíveis, que são combinados de modo a formar um material com propriedades específicas. Um apresenta grande reforço, elevado módulo de elasticidade e tem forma de filamentos de pequenos diâmetros (fibras), o outro, a matriz, sendo relativamente dúctil envolve completamente a primeira fase, permitindo boa transferência de tensões entre as fibras e o plano. Da conjugação destas duas fases nasce a verdadeira força geradora da família dos compósitos de polímero reforçado e as suas relevantes propriedades mecânicas, físicas e químicas, quando comparados com os materiais tradicionais (EUROCOMP, 1996). Na Fig.27 apresenta-se um esquema comparativo das propriedades mecânicas de compósitos, alumínio e aço.

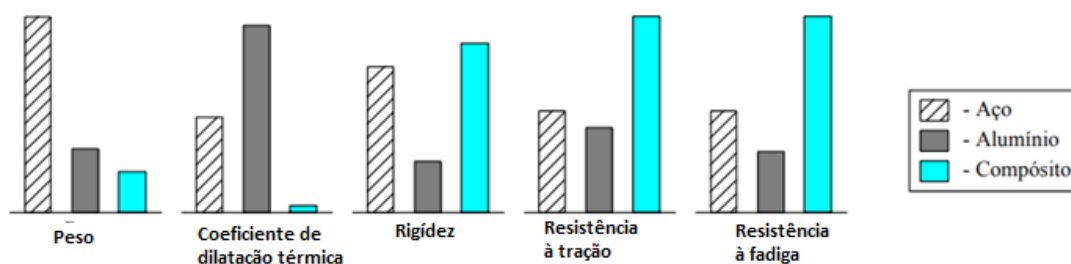


Fig. 27 – Comparação entre materiais compósitos, alumínio e aço (adaptado de Taly, 1998).

Embora o comportamento global de um compósito esteja condicionado pela sua composição, pelo processo de fabrico e pelos objetivos estruturais na fase de utilização, este apresenta propriedades interessantes para a engenharia como as elevadas resistências e rigidez, o baixo peso específico, a excelente resistência à agressividade ambiental, bem como a possibilidade em admitir propriedades direcionais a nível estrutural, elétricas e magnéticas, variáveis de acordo com a conveniência.

As fibras contínuas mais utilizadas são o vidro, o carbono e a aramida, que dão origem aos polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP), polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) e polímeros reforçados com fibras de aramida (AFRP). Na Tabela 4 apresenta-se as propriedades para cada um dos tipos de fibra. As fibras de vidro são as mais utilizadas em aplicações da indústria da construção, por combinarem uma resistência elevada com um custo relativamente reduzido. Contudo, por comparação com as fibras de carbono e de aramida, apresentam um módulo de elasticidade significativamente mais reduzido.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas das fibras utilizadas em sistemas de compósitos de FRP (Juvandes, 1999)

Propriedades	Vidro-E	Carbono	Aramida
Resistência à tração [MPa]	2350-4600	2600-3600	2800-4100
Módulo de elasticidade em tração [GPa]	73-88	200-400	70-190
Extensão na rotura em tração[%]	2,5-4,5	0,6-1,5	2,0-4,0
Densidade [g/cm³]	2,6	1,7-1,9	1,4

Como referido, as resinas termoplásticas apresentam uma menor resistência ao calor, podendo ser aquecidas e moldadas sucessivamente sem sofrer alterações químicas, uma vez que parte das suas ligações moleculares são realizadas por ligações secundárias (Van der Waals). Os materiais termoplásticos são, na sua generalidade, materiais mais dúcteis e mais resistentes, características que se devem ao facto de este tipo de materiais serem baseados em longas cadeias poliméricas, formam ligações cruzadas ao nível molecular, tornam-se mais flexíveis e enformáveis, sendo usados sem preenchimentos ou reforços em várias aplicações. No entanto este tipo de material tem melhor desempenho mecânico com a adição de reforços ou preenchimento, visto apresentarem valores de rigidez baixos. Os termoplásticos podem ser submetidos a ciclos térmicos, sem perda significativa de propriedades, o que permite serem fundidos e reciclados. Por outro lado, podem ser soldados tornando a reparação ou junção de componentes uma possibilidade (Toar, 2018).

No caso das resinas termoendurecíveis tem-se a formação de uma estrutura molecular tridimensional de ligações cruzadas. Apresentam uma estrutura molecular mais forte que não pode ser derretida e moldada novamente. Comparando os dois grupos verifica-se que as resinas termoendurecíveis, devido à sua reduzida viscosidade, permitem uma produção mais rápida, com menos custos, oferecendo melhor qualidade ao nível de adesão e de impregnação do reforço, uma maior resistência química contra solventes e são bons isolantes elétricos (Romeira, 2012).

Na Tabela 5 apresentam-se as principais propriedades de diferentes resinas termoendurecíveis.

Tabela 5 - Propriedades físicas e mecânicas das resinas termoendurecíveis (Romeira, 2012)

Propriedade	Poliéster	Viniléster	Fenólica
Resistência à tração [MPa]	20-100	68 - 90	30 - 50
Módulo de elasticidade [GPa]	2,0 - 4,0	3,5 – 5,2	3,6
Extensão na rotura [%]	1,0 – 6,0	3,0 – 5,2	1,8 – 2,5
Massa volúmica [g/cm³]	1,2 – 1,3	1,12 – 1,16	1,0 – 1,25
Temperatura de transição vítrea [°C]	55 - 120	102 - 280	260

Para além da resina, a matriz polimérica dos materiais FRP costuma incorporar materiais de enchimento (também designado por carga ou *filler*) e aditivos, que permitem reduzir o custo (no caso do material de enchimento) e melhorar certas propriedades específicas (no caso dos aditivos) como, por exemplo, a inflamabilidade, a cor, e a estabilidade à radiação UV, e também o próprio processo de fabrico.

2.2.5. PROCESSOS DE PRODUÇÃO

Os métodos de produção de materiais compósitos FRP são um fator importante na seleção dos seus constituintes, uma vez que a integração das fibras de reforço com a matriz polimérica depende do tipo de processo de fabrico utilizado (Correia, 2012).

Pode-se, de forma genérica, dividir os processos em dois, os com o molde aberto e os com molde fechado. No primeiro, apenas a superfície em contacto com o molde apresenta bons acabamentos, no entanto, este processo permite trabalhar com peças de grande dimensão e elevada complexidade. Em contrapartida o processo de molde fechado permite ter bom acabamento em toda a peça e uma boa reprodutibilidade. Como o processamento é em

molde fechado apresenta uma reduzida emissão de produtos voláteis (provenientes das resinas), com vantagens para os operadores e meio ambiente. De entre os de molde aberto destacam-se a moldação manual e moldação manual por projeção, enrolamento filamentar. De entre os de molde fechado, destacam-se a infusão a vácuo, moldação por compressão a quente, moldação em autoclave, por moldação por transferência de resina e a pultrusão, que serão descritas nas seções abaixo (Neves, 2009).

2.2.5.1. Moldação Manual

A moldação manual é um processo não automatizado e que é destinado à produção de compósitos em número reduzido. Neste método, a sobreposição e a impregnação de sucessivas camadas de reforço (sob a forma de manta ou tecido) é feito manualmente em molde aberto como se pode observar na Fig.28 até que a espessura final do compósito seja obtida. As principais vantagens do método são: simplicidade, reduzido investimento inicial, poucas restrições à geometria das peças a realizar. As desvantagens deste processo são relativas à necessidade de uma quantidade de mão-de-obra considerável, à forte dependência da habilidade e cuidado do operário, à baixa produtividade, ao bom acabamento superficial numa só face, ao teor de fibra heterogêneo, à necessidade de maquinação da peça para eliminação de rebarbas e ao melhoramento dos acabamentos (Moura *et al.*, 2005).

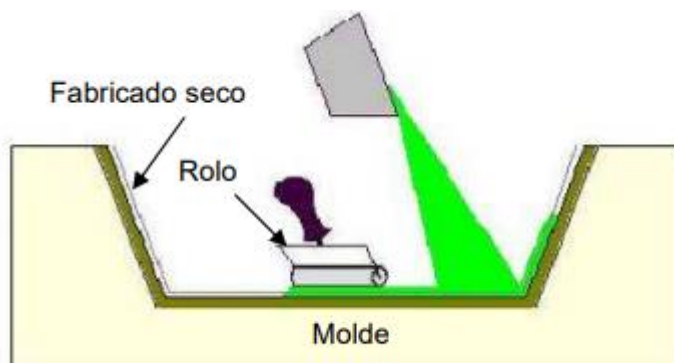


Fig. 28 – Esquema da moldação manual (Franco, 2008).

2.2.5.2. Moldação manual por projeção

A moldação manual por projeção, também conhecida por *Spray-up*, consiste na aplicação simultânea da resina e fibra sobre um molde, mas neste caso usando uma pistola de projeção de ar comprimido, como se pode observar na Fig. 29. O reforço, geralmente uma fibra, é alimentado em rolo, o qual é cortado nas dimensões pretendidas pela pistola. A camada depositada sobre o molde é compactada através da posterior passagem de um rolo, de forma a remover o ar e assegurar a impregnação das fibras de reforço, podendo ser adicionadas várias camadas até à obtenção da espessura pretendida. A moldação por *Spray-up* apresenta uma maior produtividade e maior homogeneidade entre a matriz e material de reforço, quando comparado com a técnica de moldação manual.

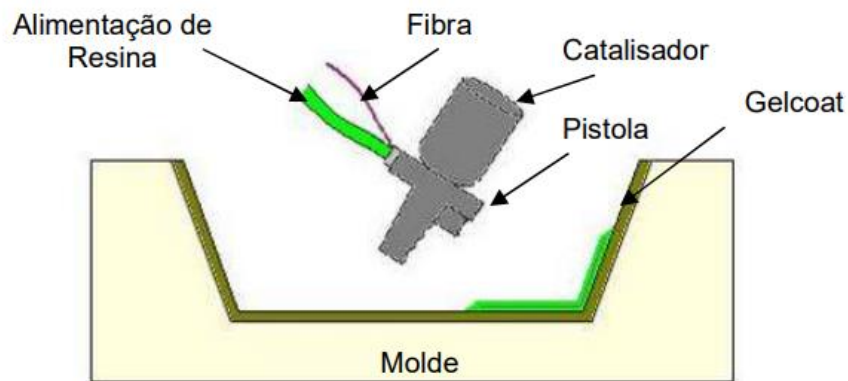


Fig. 29 – Moldagem por Spray Up (Franco, 2008).

2.2.5.3. Infusão a vácuo

A moldagem por infusão a vácuo é utilizada largamente para fabricação de peças de grandes dimensões. Consiste na colocação das fibras no interior do molde, seguida da introdução da resina, por ação de vácuo. A utilização de vácuo para espalhamento da resina permite a minimização de excessos de resina no produto final, sendo a mesma retirada do molde apenas após a polimerização da resina; o processo é representado na Fig.30 (Franco, 2008).

As principais vantagens deste processo remetem para a elevada fração de volume de fibra que se pode alcançar, baixa quantidade de espaços vazios, elevada impregnação das fibras e elevadas propriedades mecânicas. Contudo, as principais desvantagens remetem para os elevados riscos de saúde e segurança, devido às concentrações de estireno, custos de extração e tratamento dos compostos orgânicos voláteis, mão-de-obra adicional (Talreja, 2000).

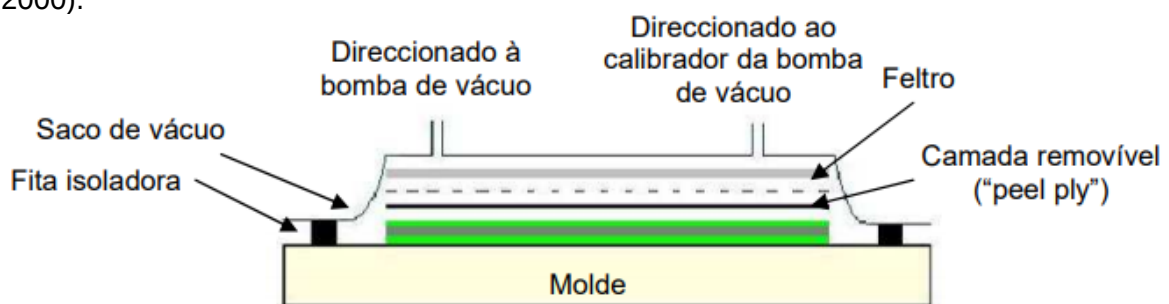


Fig. 30– Esquema de montagem de vácuo (Franco, 2008).

2.2.5.4. Moldação por compressão a quente

Este processo consiste na colocação do material correspondente ao volume do produto pretendido (reforço e matriz) na cavidade do molde, sendo que a parte superior e inferior, (macho e fêmea respectivamente) do molde se encontram aquecidas a uma temperatura específica, aplicando-se em seguida pressão no material pelo fecho da prensa, Fig.31. Este processo também pode ser utilizado para a compressão de semi-produtos, como é o exemplo dos pré-impregnados. Adicionalmente ao processo de compressão a frio, neste são aquecidos o prato superior e inferior a uma temperatura desejada do processo. Devido à temperatura e pressões do processo os moldes deverão ser metálicos. O ciclo de produção depende das condições do compósito a criar, ou seja, variam com o tipo de matriz, se for termoplástica de fibra longa para além do aquecimento, o arrefecimento deverá ser forçado, rápido e sob pressão. As matrizes termoplásticas fundem para viscosidades que são 500 a 1000 vezes superiores às das termoendurecíveis, e necessitam de altas pressões. Se a resina for termoendurecível, criam-se ligações cruzadas definitivas na polimerização dos monómeros, e estes cuidados já podem ser desprezados.

As peças obtidas incorporam maiores quantidades de reforço, produzindo peças de pequenas dimensões e geometrias menos complexas o que melhora as propriedades mecânicas conseguidas. As velocidades de produção, tolerâncias dimensionais e repetibilidade do processo aumentam significativamente quando comparadas ao processo de moldação manual (Moura *et al.*, 2011).

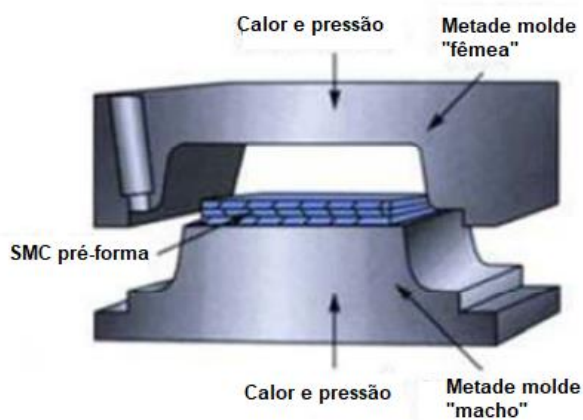


Fig. 31 – Esquema do processo de fabrico por compressão a quente (adaptado de Moura *et al.*, 2011).

2.2.5.5. Moldação em autoclave

O processo de moldação em autoclave consiste em consolidar um componente pré-formado através da aplicação simultânea de temperatura, pressão e vácuo. É um processo utilizado para produção de componentes em número reduzido, devido à morosidade na moldação, estando os mesmos sujeitos aos mais exigentes requisitos de desempenho mecânico e qualidade, como se verifica na indústria aeronáutica e no desporto automóvel. Permite a produção de peças de grandes dimensões, geometria complexa com elevada qualidade e

excelentes propriedades mecânicas, devido à elevada fração volúmica de reforço. Numa primeira fase procura-se baixar a viscosidade da resina para eliminação de voláteis e promover o fluxo de resina, de modo a garantir teores de fibra elevados e homogêneos. A aplicação de vácuo no molde é decisiva para eliminação de porosidades e aumentar a adesão das fibras à matriz. A etapa seguinte é a cura e consolidação do componente, na qual a pressão desempenha papel mais relevante (Moura *et al.*, 2011).

A lista de consumíveis para o processo de moldação em autoclave é extensa Fig.32 (Baillie, 2004):

- Agente de desmoldagem: permite a libertação do pré-impregnado dos moldes no fim do processo;
- Teflon poroso: camada opcional que permite o escoamento do excesso de resina e voláteis durante a cura. Pode ser removido facilmente após a cura para proporcionar uma superfície de ligação ou para pintura;
- Tecido absorvente: normalmente feito de tecido de vidro que tem como objetivo absorver a matriz em excesso. O fluxo da matriz pode ser regulado pela quantidade de tecido por forma a produzir compósitos com um volume de fibra conhecido;
- Filme de desmoldagem: esta camada impede a propagação da matriz, permitindo apenas a passagem de ar e voláteis para a camada de respiro acima;
- Tecido de respiro: proporciona os meios para a aplicação do vácuo e auxilia na remoção do ar e voláteis de todo o conjunto. São necessários respiradores mais grossos quando são utilizadas pressão de processo elevadas;
- Saco de vácuo e selante: fornece um saco selado para permitir a remoção do ar e a consequente formação de vácuo. Normalmente é uma película de Nylon e a vedação nas bordas é garantida pela aplicação de tiras de silicone.

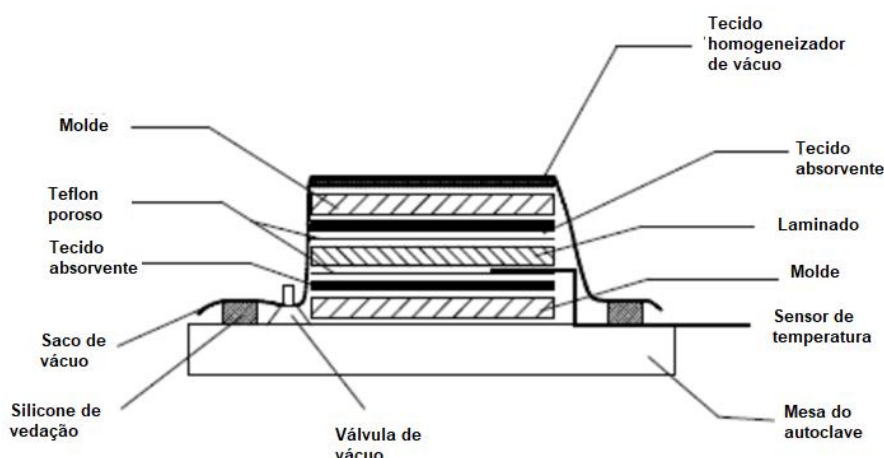


Fig. 32– Representação esquemática da obtenção de um laminado através do processo de moldação em autoclave (adaptado de Magalhães, 2014).



Fig. 33– Autoclave (NSHousehold Items, 2021).

2.2.5.6. Enrolamento Filamentar

Este processo é principalmente usado para componentes circulares, com espaços vazios ou com secções ovais, como tubagens e tanques. As fibras, com várias orientações controladas pelo sistema de alimentação, são “rebocadas” por uma peça cilíndrica rotativa e passam por um banho de resina. Este processo, ilustrado na Fig. 34, pode ser rápido e por isso um método económico (Franco, 2008).

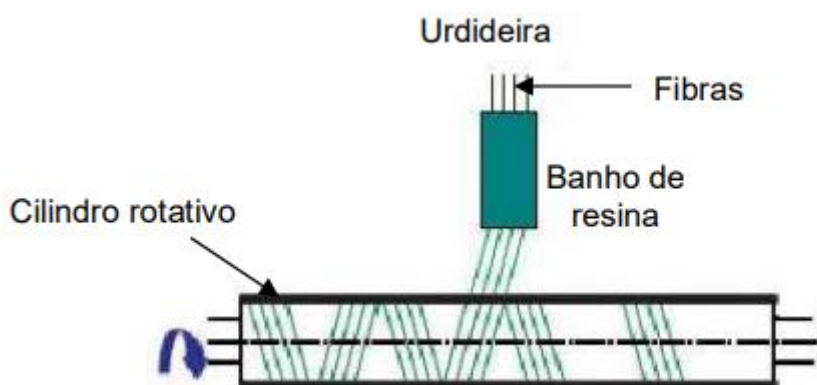


Fig. 34– Esquema do processo enrolamento filamentar (Franco, 2008).

2.2.5.7. Moldação por transferência de resina (RTM)

O processo de moldação por transferência de resina ou *resin transfer moulding*, conhecido por RTM, pertence aos processos designados de processos de molde fechado onde, neste caso, é possível executar componentes com frações volúmicas de fibra na ordem dos 60%. O processo consiste na colocação do reforço na cavidade do molde, que seguidamente é fechado com a outra metade do mesmo, para posteriormente, com recurso a pressão, ser injetada a mistura composta por resina, cargas, catalisador e outros possíveis compostos,

como se pode verificar na Fig.35. De seguida inicia-se o processo de cura no interior do molde que tem uma duração de 6 a 30 minutos, em função dos parâmetros de processamento seleccionados, tais como, catalisador, temperatura, materiais, entre outros.

O RTM possibilita o processamento de componentes próximos da sua forma final com bom acabamento nas duas superfícies, pelo facto de ser um processo de molde fechado. Este processo comparativamente com o processamento por infusão a vácuo e por moldação por compressão a quente, permite a utilização de reforços nos mais variados formatos. Permite produzir componentes com custos inferiores pelo facto de os custos das ferramentas serem menos dispendiosos. Neste processo tem-se como variáveis o fluxo de resina, o processo de cura e a transferência de calor, permite a produção de peças com pequenas dimensões e de geometrias menos complexas (Moura *et al.*, 2011).

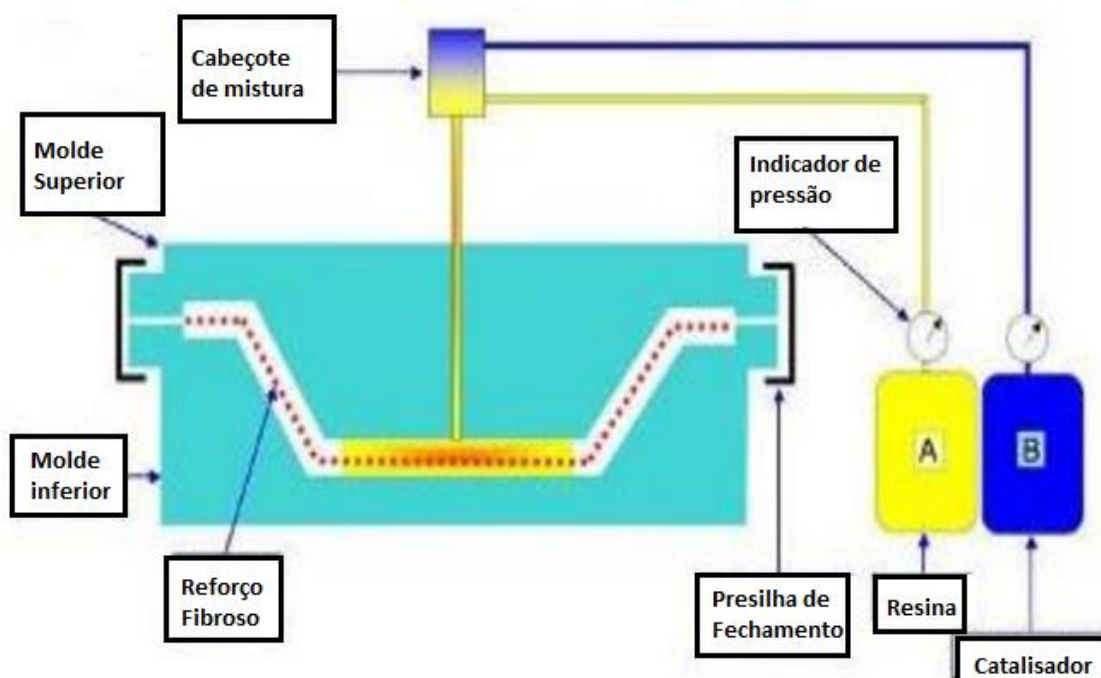


Fig. 35 – Esquema simplificado da moldagem por transferência de resina (adaptado de UFRGS, 2021).

2.2.5.8. Pultrusão

A pultrusão ou *pultrusion* é um processo automatizado para a fabricação contínua de perfis de materiais compósitos de secção constante e elevado desempenho. O processo de pultrusão é eficiente por apresentar um baixo trabalho de execução, pois possui pouca dependência do operador, e razoavelmente boa velocidade de linha. Permite criar canas de pesca, tacos de golfe, degraus de escada, caixilharias, para nomear algumas das suas aplicações.

Neste processo as fibras são puxadas de forma a serem colocados no laminado na configuração desejada, passando por um banho de resina e, posteriormente, por um

sistema com temperatura no qual se completa a impregnação de resina, se controla a quantidade de resina e se polimeriza o material na sua forma final. As propriedades estruturais dos laminados são de elevada qualidade e a impregnação de resina pode ser feita em processo fechado, minimizando as emissões de compostos voláteis. Contudo, este processo acarreta custos elevados de equipamento e sistemas de aquecimento. A Fig.36 representa o esquema de funcionamento (Franco, 2008).

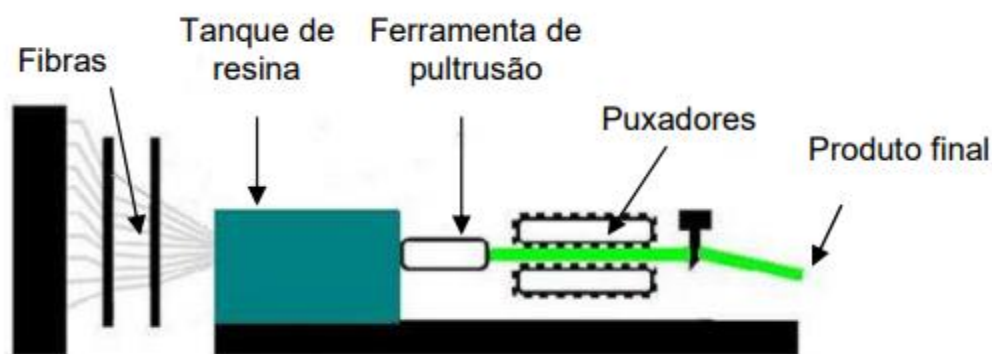


Fig. 36 – Esquema simplificado do processo de pultrusão (Franco, 2008).

Para o processo de pultrusão, alguns detalhes devem ser observados conforme descrito a seguir (Kersting, 2004):

- **Introdução do material** – Os rolos são os componentes da primeira parte do processo. Juntamente com estes carretéis de fibras têm-se rolos de mantas de fibra. As mantas consistem de fibras traçadas entre si e são utilizadas com a finalidade de oferecer uma melhor resistência ao perfil. Os perfis pultrudidos possuem uma excelente resistência à tração no sentido longitudinal (sentido das fibras) e com a utilização das mantas obtém-se uma boa resistência no sentido transversal (sentido perpendicular às fibras). Normalmente, as fibras e mantas mais utilizadas são feitas de fibra de vidro, podendo ser usadas também mantas a base fibra de poliéster. Como os materiais são puxados em direção à área de impregnação, é possível o emaranhamento dos fios, formação de nós e até o desfiamento das fibras;
- **Impregnação com resina / Pré-conformação da peça** – A passagem das fibras dentro da banho de resina é o método mais comumente utilizado. A pré-conformação é geralmente realizada após a impregnação, retirando o excesso de resina é ajustado a uma determinada superfície ou molde. O uso apropriado das aberturas, com espaçamentos bem proporcionados, propicia um alívio de tensão nas fibras molhadas e enfraquecidas, evitando uma elevada força hidrostática na entrada da matriz. Os materiais mais comuns na confecção de pré-formas são politetrafluoretileno, polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE) e aço inoxidável. Processos mais modernos já fazem uso de injeção de resina diretamente na cavidade do molde, dispensando a etapa de impregnação com um banho externo de resina. A escolha correta da resina é um dos

fatores críticos para a determinação da longevidade e qualidade dos materiais compósitos, ela é selecionada para a obtenção de propriedades específicas, tais como resistência química e à corrosão, resistência ao fogo, isolamento elétrico e ao intemperismo.

- Aquecimento da matriz - O aquecimento da matriz é provavelmente o parâmetro de controle mais crítico do processo. É ele que regula a taxa de reação, posição da reação e o ponto de liberação máximo de calor na matriz (temperatura máxima de reação ou pico exotérmico). A aparência dos perfis normalmente pode não corresponder à qualidade exibida pelo perfil, ocorrendo perfis com um bom acabamento externo, mas com pobres propriedades mecânicas e físicas devido a um procedimento de cura inadequado. Excesso de calor pode resultar em produtos de pouca qualidade, apresentando fissuras, que também reduzem bastante do compósito;
- Força de agarramento - A separação física entre a saída da matriz e o dispositivo de puxamento permite que as reações de cura iniciadas no interior da matriz terminem, fazendo com que o perfil possa ser puxado e não sofra danos externos;
- Estação de corte - A estação de corte é a última parte do processo de pultrusão. Todo produto produzido é cortado num comprimento adequado, sendo os cortes feitos por serras especiais. As serras geralmente são preparadas com grânulos de carbeto metálicos ou diamante, possuindo alta dureza e permitindo corte tanto a seco quanto molhado.

A Fig. 37 ilustra a estrutura interna do perfil de GFRP: a sua constituição incorpora camadas de fibras longitudinais contínuas agrupadas em mechas de filamentos, que se encontram por sua vez envolvidas em mantas de reforço orientadas em diferentes direções e que têm como finalidade, respetivamente, conferir reforço na direção axial e contribuir para o desempenho mecânico na direção transversal assim como resistência ao corte. Na generalidade dos casos, os perfis são “cobertos” com um véu de superfície, que possui um teor elevado em resina e no qual estão embebidas fibras curtas dispersas aleatoriamente (geralmente fibras de vidro). Esta camada superficial confere ao perfil um acabamento suave e uma proteção adicional face aos agentes atmosféricos, devido ao maior conteúdo em resina, que poderá ser epóxida, de viniléster ou, geralmente, de poliéster (Rosa, 2016).



Fig. 37 – Estrutura interna de um perfil GFRP (Rosa, 2016).

O processo de pultrusão teve início com a produção de barras sólidas e barras com seção I, com os reforços feitos de fibra de vidro axiais e resinas poliésteres como resina/matriz. Assim, produtos como canas de pesca e barras isoladoras elétricas foram fabricadas. Utilizando a combinação de fibras axiais e fibras multidirecionais (mantas), outra categoria surgiu foi a de perfis estruturais. As combinações das fibras propiciaram uma menor anisotropia de propriedades no perfil, sem incidência de corte longitudinal prevalecendo ainda maiores resistências na direção axial do material produzido (Kersting, 2004). A Fig. 38 mostra alguns tipos de perfis que podem ser fabricados.



Fig. 38 – Perfis pultrudidos para aplicação estrutural (ALTO, 2021).

2.3. APLICAÇÃO DOS FRP'S NA ENGENHARIA CIVIL

Nos últimos anos assistiu-se a um aumento significativo do número e diversidade de aplicações dos FRP's na Engenharia Civil (Fig. 39) quer como material de construção, em conjugação com outros materiais de construção tradicionais, como betão, aço e a madeira, quer como em reforço de estruturas em estruturas novas e reabilitação de estruturas existentes sendo nestas, por reparação ou reforço.



Fig. 39 – Aplicação dos FRP na engenharia civil (adaptado de Fonseca, 2021)

Os materiais compósitos FRP têm sido utilizados em aplicações da indústria da construção, na forma de componentes sobretudo sujeitos à tração (laminados, mantas e cabos) ou a flexão (perfis e painéis sanduíche). De um modo geral, podem ser distinguidas quatro áreas principais de aplicação de materiais FRP: (i) armadura de reforço (interior) de betão; (ii) reparação e reforço (exterior) de estruturas; (iii) estruturas híbridas novas, em que os materiais compósitos FRP são combinados com materiais tradicionais; e (iv) estruturas novas totalmente compósitas (Keller, 2003 e Correia, 2012).

Frequentemente na construção civil surgem situações em que é necessário aumentar a capacidade portante e o isolamento eletromagnético de uma estrutura de betão, devido a alteração de sua utilização, à subscrição de novas exigências normativas, deficiências de projetos ou modificações em elementos estruturais. Existem ainda outras situações de recuperação devido ao aparecimento de anomalias causadas por degradação dos materiais com o tempo ou por ações acidentais (explosão, incêndio, sismo, etc.). Perante estes factos, e definidos os objetivos a atingir com a estrutura em questão, torna-se necessário questionar qual tipo de intervenção mais adequada, seja ela, de reforço aos elementos existentes, a substituição de componentes estruturais ou a introdução de novos sistemas estruturais.

Na última década tem havido um empenho na procura de novos materiais com características apropriadas aos novos projetos de engenharia, procura por materiais mais resistentes, duráveis, não oxidáveis, pouco deformáveis e capazes de absorver e dissipar energia, sem ocorrência de rotura frágil (Brito, 1986). Os materiais compósitos, representam um enorme avanço sobre o esforço de otimização dos materiais estruturais.

Assim, para as situações de reforço e de reabilitação é possível recorrer a armaduras não metálicas e técnicas executadas com produtos compósitos, como as mantas ou laminados de FRP (pré-esforçados ou não), que são colocados nas faces dos elementos (para resistir a flexão e ao corte), ou como aplicações exteriores de cabos de FRP pós-tensionados e não aderentes. Para as anomalias em pilares devido à ação sísmica, destaca-se a técnica de reforço por encamisamento total ou parcial com fios ou mantas contínuas de FRP (reforço ao corte e aumento de ductilidade). Ao contrário dos materiais metálicos correntes, em qualquer caso, estes materiais apresentam imunidade a corrosão e facilidade de aplicações.

Em zonas particularmente agressivas em termos de durabilidade, tabuleiros de diversas pontes de betão têm sido exclusivamente armados com varões de GFRP, não só pela sua não corrosibilidade, mas também pelo seu custo cada vez mais competitivo. Este tipo de varões é também utilizado em paredes de contenção, túneis, lajes de edifícios e reforços de alvenarias (Keller, 2003 e Marinh, 2012).

2.3.1. UTILIZAÇÃO DE FRP'S EM REABILITAÇÃO

Na reabilitação das estruturas existentes, os FRP são normalmente utilizados com objetivos de reforço, reparação e melhoria do desempenho sísmico das estruturas:

- Reparação

Colmatação de uma deficiência funcional, ou substituição de um componente estrutural degradado; traduz as situações em que se recupera a resistência da estrutura onde esta está comprometida;

- Reforço

Relacionado com a melhoria do nível de desempenho da estrutura, por exemplo, aumento de capacidade de carga de uma ponte por alteração do seu tabuleiro; pode igualmente resultar da correção de anomalias decorrentes de deficiências de projeto e/ou construção ou falta de manutenção;

- Proteção sísmica

Associado à melhoria da capacidade da estrutura para resistir a sismos, nomeadamente por aumento da ductilidade e da resistência ao corte dos seus elementos estruturais, o que permite que se atinjam níveis de dissipação da energia e de capacidade de deformação

compatíveis com as exigências estabelecidas nos regulamentos aplicáveis à estrutura em causa.

De acordo com a natureza e especificidades da estrutura a reabilitar, poderão ser usadas diferentes estratégias de reabilitação. Segue-se uma breve descrição das principais aplicações de FRP na reabilitação de estruturas (i) de betão, (ii) metálicas, (iii) madeira e (iv) alvenaria. (Fonseca, 2021). A Fig.40 representa de forma ilustrada as soluções de sistema de reforço de aplicação de laminados aplicados externamente (EBR – *externally bonded reinforcement*), laminados inseridos na camada de recobrimento (NSM – *near surface mounted*), laminados pré-esforçados e mantas, em lajes, vigas, paredes resistentes e pilares.

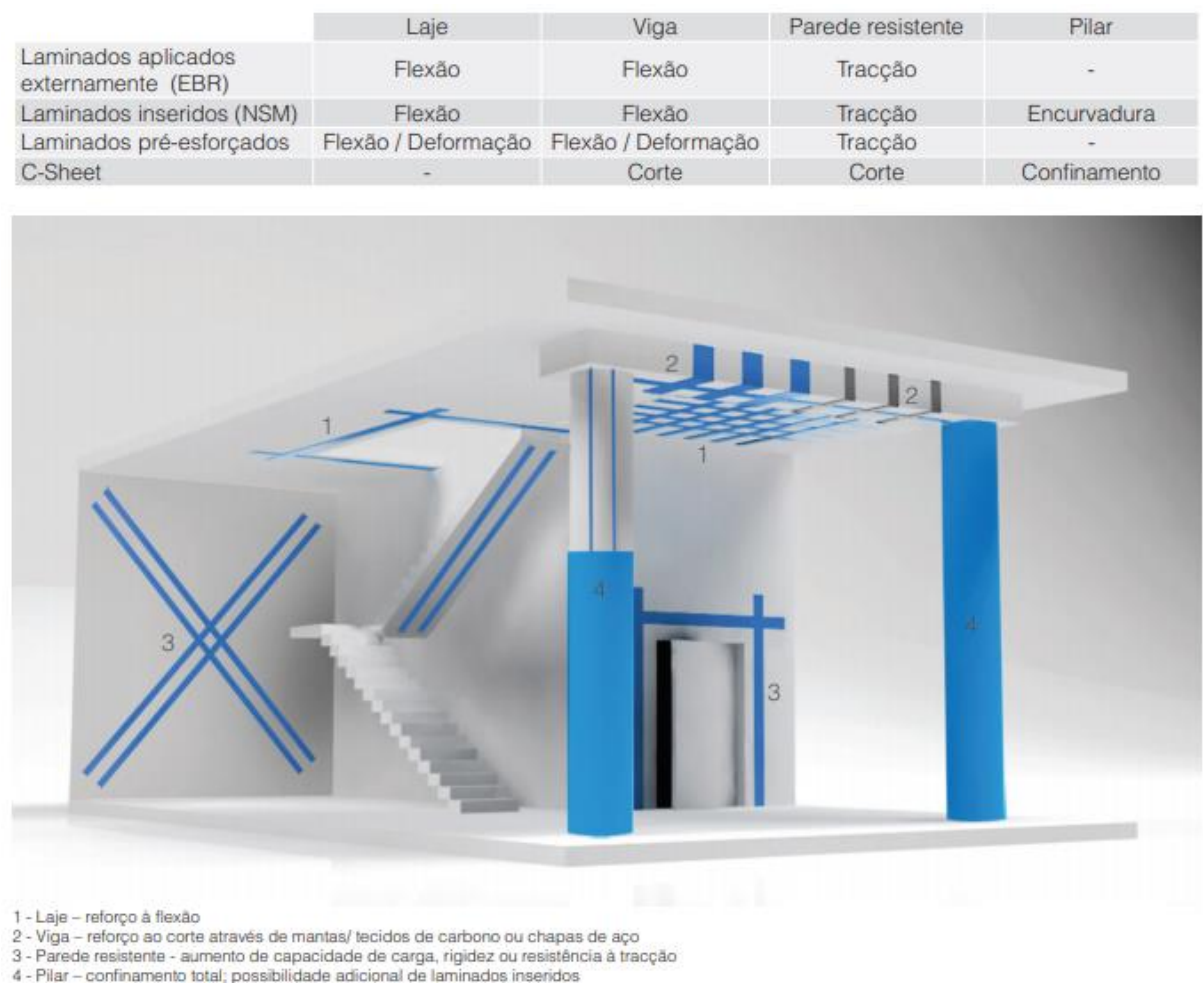


Fig. 40 – Solução de sistema de reforço (S&P, 2021).

2.3.1.1. FRP's como reforço estrutural em estruturas de betão

Uma das técnicas tradicionais utilizadas para reforçar/reparar estruturas de betão envolve a aplicação de chapas de aço na superfície externa da estrutura. Esta técnica, embora simples e efetiva, se forem considerados os aspetos relacionados com os custos e com o desempenho mecânico, apresenta os seguintes inconvenientes: (i) corrosão das chapas e deterioração da ligação aço-betão; (ii) necessidade de utilização de meios de transporte e de elevação potentes devido ao peso das chapas de aço; (iii) dificuldade de manipulação em espaços confinados e (iv) necessidade de juntas (soldaduras) por restrições dimensionais das chapas. A substituição das chapas de aço por placas de FRP no reforço externo de estruturas de betão pode permitir solucionar os problemas acima referidos (FIB, 2001).

O reforço estrutural com compósitos de FRP utiliza a denominada técnica de colagem, que se baseia na aderência dos FRP ao betão por intermédio de um adesivo. Uma das vantagens na utilização desta técnica rege-se pelo facto de não ser necessário sistemas de fixação mecânica, visto que os FRP aderem ao substrato a reforçar imediatamente após a colagem (Paula, 2003). Na técnica de colagem, os sistemas de FRP comercializados para reforço dividem-se essencialmente em: sistemas pré-fabricados laminados, Fig. 41a) e sistemas curados *in situ*, Fig.41b).

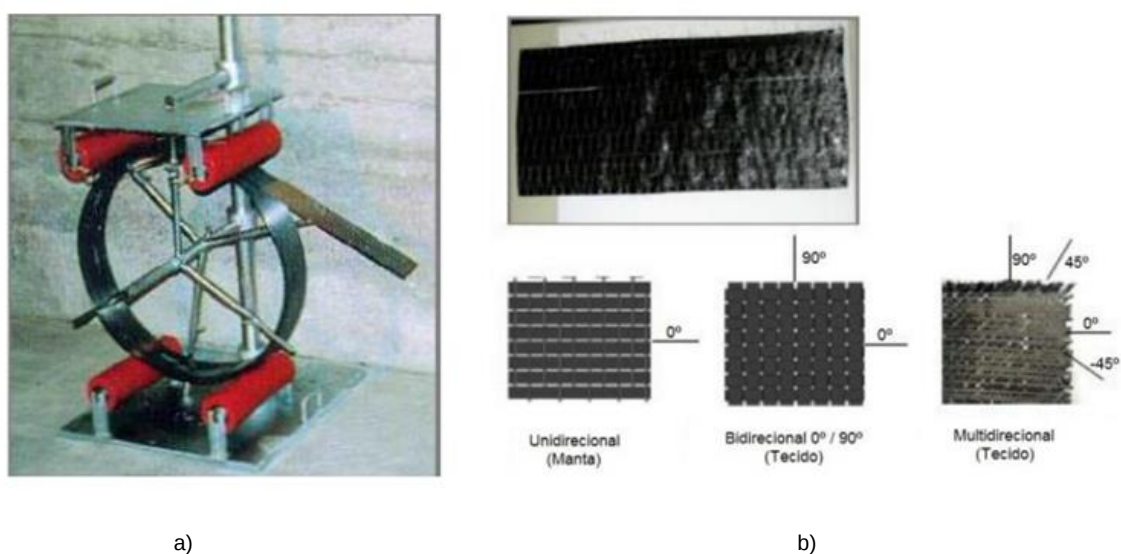


Fig. 41 – Compósitos de FRP: a) Sistema de FRP Pré-fabricado (laminado), b) Sistema de FRP curado “in situ” (manta e tecido) (Juvandes, 1999).

Os sistemas curados *in situ* consistem em impregnar no local as mantas ou tecidos de fibra, com uma resina de saturação, que tem a finalidade de ligar igualmente as fibras de FRP à superfície de betão (Rodrigues, 2005). Estas, são aplicadas após a devida preparação da superfície de betão.

Os sistemas pré-fabricados, resultam da impregnação com resina de um conjunto de feixes ou camadas de fibras que, através de adequados processos de fabrico, originam as formas geométricas finais pretendidas. São geralmente aplicados mediante a colagem na superfície

exterior do elemento a reforçar, com adesivo epóxico, de laminados pré-curados (endurecidos), tipicamente produzidos por pultrusão, mencionados anteriormente (Correia, 2012).

O reforço de um elemento por encamisamento com recurso ao betão armado, é uma das técnicas mais adequadas para aumentar a resistência das zonas comprimidas. Pode ser aplicado em vigas para aumentar a resistência à flexão e/ou a resistência ao esforço transversal. Já nos pilares o reforço garante um aumento de resistência à flexão e à compressão. Como ilustrado na Fig.42, este sistema pode consistir num mecanismo automático (existindo também a aplicação manual) que gira em torno do perímetro dos pilares e enrola as fibras de uma forma contínua ao longo da sua altura. As fibras podem ser pré-impregnadas e a resina é aplicada ao mesmo tempo que as fibras. As fibras podem também ser pré-esforçadas. Este sistema permite um bom controlo da qualidade e uma redução significativa do tempo de aplicação dos materiais. (Paula, 2013).

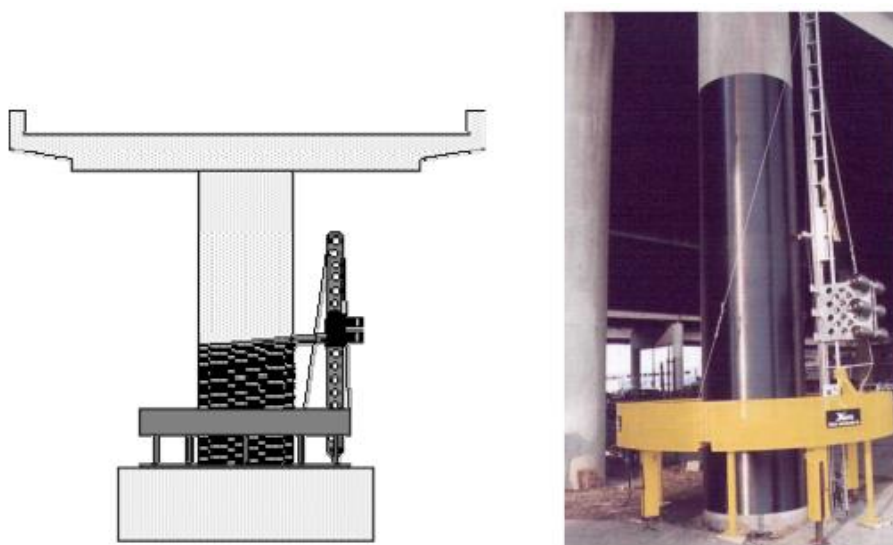


Fig. 42 – Sistema especial de encamisamento automático de pilares (Paula, 2003).

- LAMINADOS APLICADOS EXTERNAMENTE (EBR)

Ao longo do tempo têm sido desenvolvidas várias técnicas de reforço de estruturas de betão armado que recorrem a laminados de CFRP (Polímero reforçado com fibra de carbono). Contudo as mais utilizadas são a técnica EBR (laminados aplicados externamente) que consiste na aplicação de elementos de reforço no exterior do elemento de betão armado, seja colado, fixado mecanicamente ou uma combinação das duas soluções e a técnica NSM (laminados inseridos na camada de recobrimento) que consiste na aplicação dos laminados no interior da secção transversal do elemento de betão armado, nomeadamente no betão de recobrimento – descrita mais adiante.

A técnica EBR é a técnica de reforço com FRP mais comum no reforço de estruturas de betão. Esta técnica, geralmente após um tratamento de superfície na superfície de betão, consiste na colagem, com um adesivo epóxi, de mantas de FRP ou laminados na superfície tracionada de betão. O objetivo do tratamento de superfície é o de remover a presença de contaminantes, remover camadas de betão frágeis e proporcionar uma superfície rugosa que promova a aderência entre o betão e o adesivo (Danraka *et al.*, 2017).

A sua execução é relativamente simples e rápida, conseguindo-se aumentar a capacidade de carga e a rigidez dos elementos estruturais reforçados Fig. 43. No entanto, apresenta algumas desvantagens a serem consideradas, as quais estão relacionados com o fato de o material de reforço (FRP) ficar localizado à superfície do elemento a reforçar, ficando assim vulnerável à sua degradação e consequente redução da sua durabilidade, principalmente devido às condições ambientais, como incêndios, temperaturas elevadas, humidade ou até mesmo a atos de vandalismo. Deve-se ainda considerar que a opção por este método, envolvendo técnica de colagem, exige, à partida, a presença de um betão de boa qualidade, bem como a seleção de uma armadura de reforço e de um adesivo adequado para os objetivos em questão (Costa, 2016).



Fig. 43 – Exemplo de aplicação do método EBR (Sena, 2002)

- LAMINADOS INSERIDOS NA SUPERFÍCIE DO BETÃO(NSM)

Em razão dos inconvenientes da técnica descrita anteriormente foi estudada e desenvolvido o método de reforço denominado NSM (laminados inseridos na camada de recobrimento) que trata da aplicação dos materiais de reforço no interior do betão de recobrimento, Fig. 44. Em comparação com a anterior, apresenta diversas vantagens como: menor quantidade de trabalho local na preparação da superfície e na instalação dos elementos de reforço, ausência de preocupações com as irregularidades da superfície do betão, a remoção e/ou tratamento da camada superficial do betão deixa de ser necessária, o reforço de FRP está protegido pelo betão de recobrimento (menos exposto aos agentes agressivos) e, finalmente, a estética da estrutura reforçada mantém-se praticamente inalterada (Costa, 2016).

Não obstante, vários estudos têm demonstrado a ocorrência frequente de modos de rotura frágeis, como o destacamento do FRP no caso da técnica EBR, e desintegração do betão de recobrimento no caso da técnica NSM. Além de apresentarem modos de rotura frágeis, o material de reforço aplicado segundo estas técnicas não é eficientemente explorado, uma vez que a tensão máxima instalada no FRP aquando da rotura do elemento reforçado é muito menor que a sua resistência à tração. Para resolver o problema do destacamento prematuro do reforço de FRP têm sido aplicados sistemas de ancoragem nas extremidades do mesmo, com recurso a chapas metálicas aparafusadas e/ou mantas de FRP coladas. (Costa, 2016).

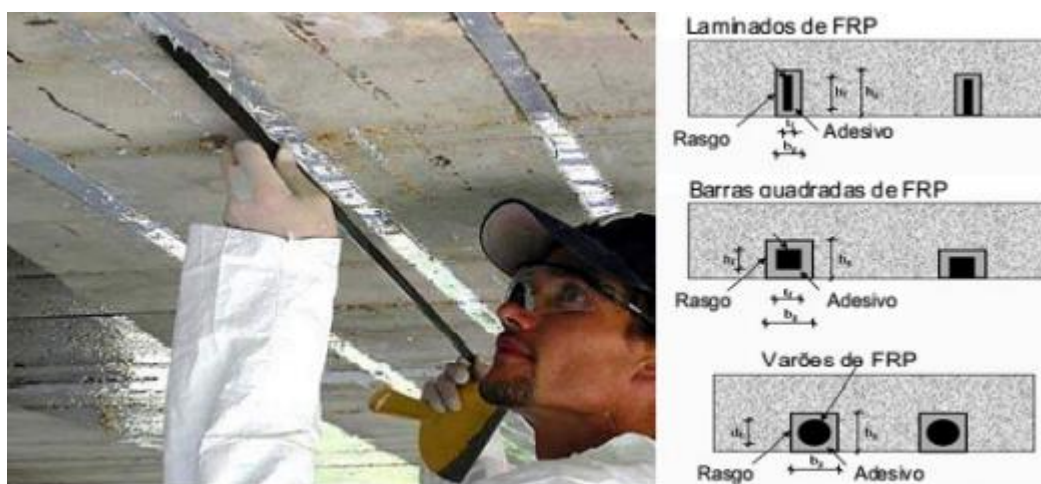


Fig. 44 – Técnica de colagem NSM de sistema FRP (Juvandes, 2019).

- MANTAS E TECIDOS

Constituído por mechas de filamentos contínuas em forma de mantas, folhas ou tecidos, que se encontram pré-impregnadas, ou não, com uma matriz polimérica; a resina utilizada durante a aplicação deste reforço em obra tem como função a consolidação deste em paralelo com a sua colagem ao substrato; esta técnica permite a conjugação de reforço em várias direções por aplicação de mantas com diferentes disposições/geometria de fibras (Costa, 2016).

Estas, são aplicadas após a devida preparação de reparação da superfície de betão. Na Fig.45 apresenta-se a aplicação de técnica de cintagem com manta FRP em pilares e vigas. Na Tabela 6 são apresentadas as descrições das Mantas e Tecidos empregues nos sistemas FRP curados *in situ*.

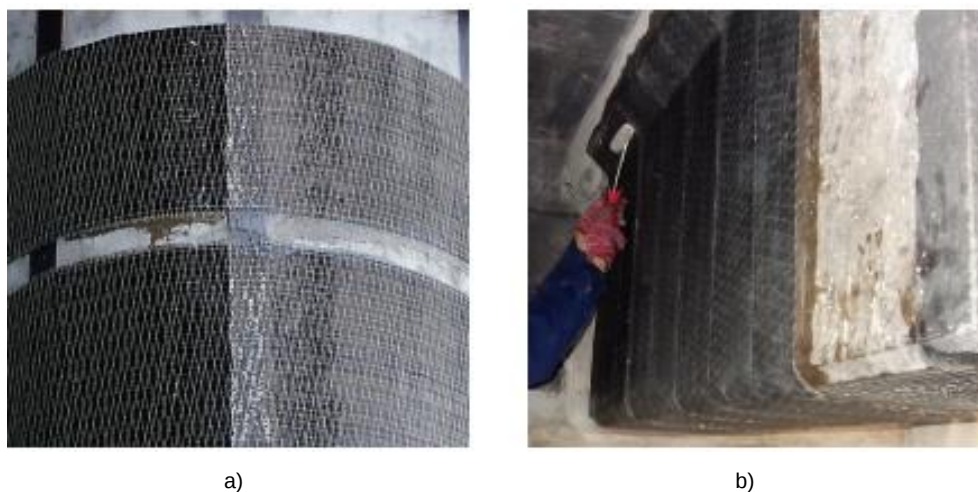


Fig. 45 – Técnica de cintagem com manta em FRP a) pilar, b) viga (S&P, 2021).

Tabela 6 - Descrição das mantas e tecidos empregues nos sistemas FRP curados *in situ* (Juvandes, 1999)

Designação	Descrição	Orientação das Fibras	Estado
Mantas (<i>sheets</i>)	Disposição de faixas contínuas e paralelas de fibras sobre uma rede de proteção (200 – 300 g/m ²)	Unidirecionais	Secas Pré-impregnadas*
<i>Woven roving**</i>	Entrelaçamento direcionado de dois fios ou mechas de filamentos (600 – 800 g/m ²)	Bidirecionais	Secos
Tecidos			
<i>Mat**</i>	Espalhamento aleatório das fibras num tapete rolante que, depois, é pulverizado com resina para adquirir consistência	Multidirecionais	Pré-impregnados*
<i>Fabric**</i>	Fios contínuos tecidos por um processo têxtil convencional (150 – 400 g/m ²)	Unidirecionais ou bidirecionais ou multidirecionais	Pré-impregnados

* *Prepreg* - aplicação de uma camada suave de resina sem cura total, criando alguma coesão entre as fibras.

** designação internacional para o arranjo das fibras no plano.

- Compósitos de Matriz Cimentícia Reforçada com Tecido (FRCM - Fiber-reinforced cementitious matrix)

A existência de diversas variações, como são *Textile Reinforced Concrete* (TRC), *Textile Reinforced Mortars* (TRM), *Mineral Based Composites* (MCB), no método base de aplicação da matriz cimentícia torna, por vezes, a definição genérica da técnica FRCM pouco clara. Contudo, de um modo geral, as técnicas centram-se na substituição dos agentes epoxídicos por materiais de base cimentícia. Ao nível do material compósito, opta-se geralmente pela utilização de malhas, grelhas, ou tecidos de FRP, de modo a maximizar a aderência entre as fibras e a matriz (Carvalho 2010).

Entre as principais vantagens destes sistemas, relatadas por Blanksvärd (2007) encontram-se a compatibilidade entre o substrato e o material de reforço (que conduz a uma consequente redução do escorregamento nas zonas de ancoragem), o incremento de resistência a forças de corte (dado o aumento da altura da secção a reforçar). A juntar a estas encontram-se a possibilidade de aplicação de reforço na presença de água, possibilitando o reforço em zonas costeiras, uma área para a qual o reforço FRP com resinas epoxídicas não apresenta soluções satisfatórias, pois todas as soluções poliméricas são suscetíveis de absorver humidade, isto resulta em geral numa redução do valor da temperatura de transição vítrea e das suas propriedades mecânicas. Coincide no fato de que existe deterioração da generalidade dos sistemas de FRP, particularmente os GFRP em meios alcalinos. A economia das soluções encontra-se também entre um dos fatores a ter em conta neste tipo de sistemas, dado o reduzido preço das matrizes cimentícias quando comparada com materiais epoxídicos (Carvalho 2010).

Na Fig.46 a) é apresentado o processo de aplicação de sistemas FRCM ao passo que na Fig.46 b) pode ver-se o pormenor da constituição típica dos tecidos utilizados neste tipo de reforço.

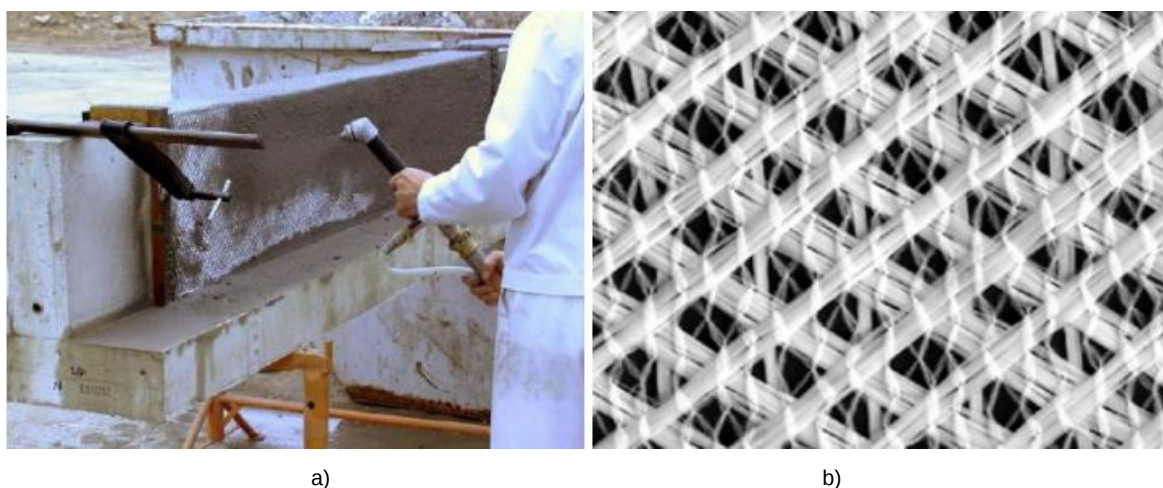


Fig. 46 – Técnicas da aplicação FRCM: a) aplicação de reforço, b) Pormenor da constituição do tecido de reforço FRCM (Steiger, 2001).

A conclusão comum de vários autores, nomeadamente Juvandes (1999), no domínio da investigação e na área da construção, é a de que, das várias fibras disponíveis no mercado, os sistemas reforçados com fibras de carbono são os que apresentam as melhores características para assumir os compromissos exigidos pelo reforço de estruturas de betão, através da técnica de colagem. Confrontando com as várias fibras, verifica-se um destaque relativamente a maiores resistências à tração e à compressão, o valor do módulo de elasticidade longitudinal mais próximo do do aço (Fig.47), o bom comportamento à fadiga e a boa resistência alcalina (Costa, 2016).

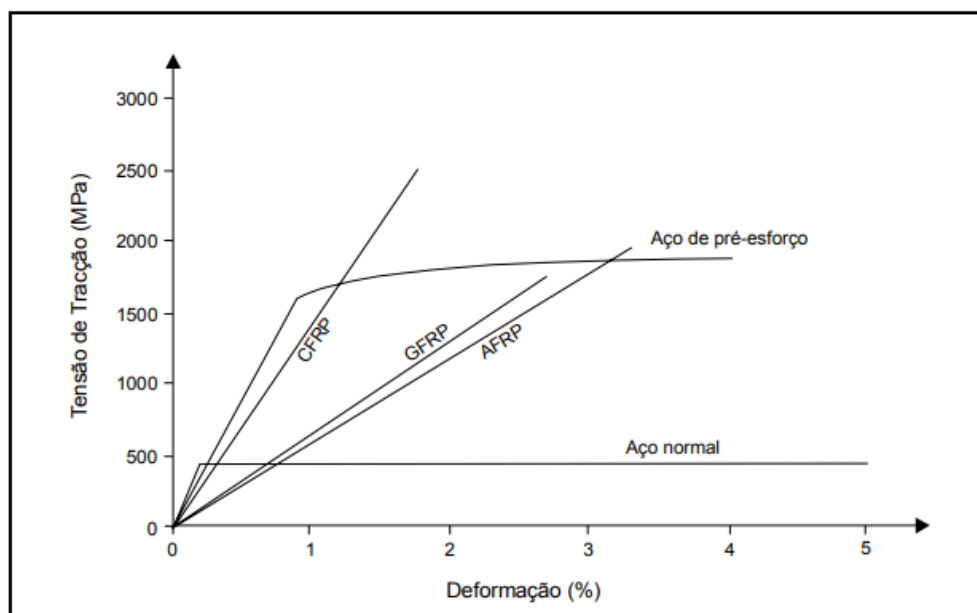


Fig. 47 – Comportamento à tração de vários sistemas de FRP e aço (Juvandes, 1999).

2.3.1.2. FRP's como reforço de estruturas de madeira

A leveza e a resistência dos laminados de FRP usados no reforço de estruturas de betão tornam esta técnica igualmente aplicável na reabilitação de estruturas de madeira (Steiger, 2001). Com efeito, existe atualmente um considerável número de estruturas de madeira que foram reforçadas através da colagem de chapas ou laminados de FRP ou com a aplicação de mantas ou tecidos pela técnica de cura *in situ*. Nestes projetos foi demonstrada a habilidade dos materiais compósito para melhorar a resistência à flexão e ao corte, a rigidez e a ductilidade de vigas e pilares de madeira (Meier, 2003). Outra aplicação muito importante dos FRP's na reabilitação de estruturas de madeira (Fig. 48), é no melhoramento do desempenho das ligações mecânicas que são, frequentemente, as zonas mais suscetíveis.



Fig. 48 – Exemplo de aplicação de FRP numa estrutura de madeira (SIKA, 2021).

2.3.1.3. FRP's como reforço estrutural em estruturas metálicas

A reabilitação de estruturas metálicas com FRP's apresenta um conjunto diferente de aspetos e problemas mais difíceis de resolver do que o reforço de betão armado, em particular porque os materiais metálicos são mais resistentes e rígidos e, portanto, mais difíceis de reforçar. Fundamentalmente, utilizam-se duas técnicas: (i) a colagem de bandas ou laminados, normalmente fabricadas por pultrusão; (ii) colocação de mantas, quando a geometria da estrutura é complexa, ou em reforço de ligações. Os FRP's mais utilizados no reforço externo de estruturas metálicas são os CFRP pelo facto de apresentarem melhores características mecânicas. Inúmeros projetos exploram a aplicação de laminados de CFRP pré-esforçados em estruturas de aço para melhorar a sua resistência à fadiga (Hollaway *et al.*, 2002).

No Brasil, é utilizada a técnica de reparação de dutos metálicos que contenham falhas na sua superfície devido à degradação causada pela corrosão. A técnica utilizada é a reparação através do compósito de matriz reforçada com fibra de vidro. Na Fig. 49 são apresentadas as etapas de aplicação e aspeto final da reparação com materiais compósitos de dutos danificados fornecidos pela empresa RUST Engenharia.



a)



b)

Fig. 49 – a) Exemplo de aplicação de resina com pincel e b) reparação com fibras de vidro e epóxi na tubagem danificada (Rust, 2021).

2.3.1.4. FRP's como reforço sísmico

A técnica de reforço com materiais compósitos de FRP consiste na aplicação de materiais poliméricos reforçados com fibras de carbono (CFRP), de vidro (GFRP) ou aramida (AFRP), colados sobre a parede de alvenaria com resinas de alto desempenho, geralmente resinas epoxídicas.



Fig. 50 – Reforço de abóbodas com tecido CFRP (Rodrigues, 2005).

Esta técnica consiste na colocação de uma armadura de reforço, que pode ser por exemplo, malha electrossoldada, rede de fibra de vidro, rede de metal distendido ou rede de polímero, fixada à parede por pregagens ou elementos de fixação, sendo projetada ou aplicada manualmente uma argamassa de revestimento, com espessuras na ordem dos 3-5 cm.

Este processo tem em vista confinar melhor a parede, de modo a contribuir para uma boa consolidação da alvenaria. Pode ainda ser aplicada num ou em ambos os lados (se tal for possível) da parede, com as redes ligadas, ou não, transversalmente por conectores. Aplica-se em paredes de alvenaria que requeiram proteção anti-sísmica e melhores propriedades mecânicas e também que possam exibir degradação superficial ou fendilhação. (Menezes, 2017).

O reforço de paredes resistentes de alvenaria consiste na aplicação de uma rede polimérica rígida e de uma argamassa de reboco à base de cal, Fig. 51. O desempenho do sistema resulta da interação entre a rede polimérica, com propriedades relevantes de dissipação de forças dinâmicas, e a alvenaria existente, através da argamassa. A instalação do sistema envolve ainda a utilização de peças auxiliares de montagem, para uma fixação adequada da rede na alvenaria, de forma a permitir a aplicação do reboco final.



Fig. 51 – Aplicação de uma rede de polimérico revestimento de base cimentícia (Menezes, 2017).

Pinho (2007), na sua tese de doutoramento, utilizou rebocos armados com rede de fibra de vidro para reforçar muretes de alvenaria de pedra irregular, Fig. 52. A solução de reforço consistiu na utilização de fios de aço como conectores que atravessam toda a espessura de alvenaria e se prolongam na diagonal em furos contínuos sendo, posteriormente, complementada com recurso a um reboco armado. Esta solução resulta num aumento da capacidade resistente das alvenarias intervencionadas verificando-se, nomeadamente, um aumento da resistência a esforços de compressão e corte.



Fig. 52 – Muretes reforçados com confinamento transversal contínuo (Pinho, 2007).

2.3.2. APLICAÇÃO DE FRP'S EM CONSTRUÇÃO NOVA

A indústria da construção tem desde tempos imemoriais feito uso de compósitos com fibras naturais (tijolos do antigo Egito). Na atualidade, o uso de fibras longas tem sido opção em estruturas que se querem leves, mas com boa resistência mecânica e rigidez. Na Fig.53 é apresentada uma ponte onde se faz uso de matérias-primas à base de polímeros reforçados com fibras de carbono. Este tipo de construção está a ser utilizado em zonas de elevada atividade sísmica como o Japão ou a Califórnia (Campilho, 2005). As vantagens da aplicação de sistemas de FRP's na reabilitação e reforço de pontes deve-se às suas propriedades mecânicas, dado que possuem elevada resistência mecânica, reduzido peso dos materiais e elevada resistência à corrosão, aliada à facilidade de aplicação e à disponibilidade de uma grande diversidade de sistemas de FRP's no mercado.



Fig. 53 – Ponte com estrutura betão utilizando arcos em CFRP (EngenhariaCivil.com, 2021).

Em estruturas novas totalmente compósitas os elementos estruturais são construídos unicamente com materiais FRP, sendo possível ajustar melhor a conceção estrutural às características dos materiais compósitos, permitindo explorar as potencialidades dos mesmos. A sua aplicação é mais significativa na construção de pontes. Contudo, geralmente, os pilares e os encontros ainda são construídos com materiais tradicionais (Correia, 2012).

Na Fig. 54 é apresentada a ponte protótipo desmontável projetada pela Universidade de Tecnologia de Aachen, na Alemanha no ano de 2002. A ponte é toda em material compósito, tem 20 metros de vão e capacidade para suportar um veículo sobre rodas com peso de cerca de 130 kN. Para aproveitar a elevada resistência do perfil pultrudido na

direção longitudinal e compensar o seu baixo módulo de elasticidade, foram adotadas vigas treliçadas nas bordaduras. As vigas e o tabuleiro da ponte constituem elementos estruturais independentes para possibilitar a substituição dos membros danificados. Foram adotadas ligações parafusadas entre os perfis, que foram reforçados com chapas de aço coladas na região dos furos, para compensar a sua baixa resistência ao corte paralelo às fibras (Teixeira, 2007).



Fig. 54 – Ponte protótipo da RWTH-Aachen, Alemanha, 2002 (Teixeira, 2007).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE TRABALHOS DE INVESTIGAÇÃO EM COMPÓSITOS

A utilização de FRP na construção civil, requer novas técnicas e mais estudos sobre o real comportamento dos mesmos, quer em termos de características mecânicas quer em termos de durabilidade. A revisão da literatura é uma parte vital do processo de investigação. Aquela envolve localizar, analisar, sintetizar e interpretar a investigação prévia (artigos em revistas científicas, livros, teses de doutoramento, dissertações de mestrado, artigos em atas de congressos, resumos, etc.). Desta forma, nos últimos anos publicaram-se diversos trabalhos sobre aplicações de materiais compósitos na construção civil, de diferentes perspectivas, nos quais se revê a evolução do conceito e se apontam os desafios mais importantes que se enfrentam. Neste capítulo pretende-se realizar a revisão bibliográfica de trabalhos científicos sobre alguns dos tópicos mais investigados no âmbito dos FRP. Assim, abordam-se a durabilidade e ligações de perfis pultrudidos, o comportamento em temperaturas elevadas e fluência de painéis sanduiche, a aderência e comportamento ao fogo de varões de GFRP e os sistemas de reforço, incluindo novas técnicas de reforço e reforço sísmico.

3.1. PERFIS PULTRUDIDOS

Conforme referido anteriormente a pultrusão consiste num processo de obtenção de materiais compósitos, sendo o único processo contínuo e automático capaz de produzir peças de seção transversal constante como apresentado na Fig. 55.



Fig. 55 – Perfis pultrudidos (Costa, 2009).

3.1.1 DURABILIDADE DOS PERFIS PULTRUDIDOS DE GFRP

Entre os materiais de FRP, os perfis pultrudidos de GFRP (Polímero reforçado com fibra de vidro) estão a ser utilizados num número crescente de aplicações, por se tratar de peças leves e com um custo relativamente competitivo. Já existem vários exemplos de pontes e edifícios compreendendo elementos estruturais em GFRP, tanto em novas construções como na reabilitação de infraestruturas degradadas. Um dos campos de aplicação mais importantes dos perfis GFRP é a substituição de tabuleiros de pontes de betão armado ou aço deteriorados, localizados em ambientes frios, com uso frequente de sais de anticongelantes que têm efeito corrosivo sobre os materiais tradicionais.

De facto, embora exista uma riqueza de informação disponível sobre o seu comportamento a curto prazo, a sua durabilidade ainda não foi investigada de forma a dar aos agentes da construção uma confiança suficiente, nomeadamente quando comparada com os materiais tradicionais. A necessidade de documentar, avaliar e quantificar o desempenho de durabilidade dos perfis GFRP é particularmente relevante para aplicações estruturais de engenharia civil, uma vez que a maioria dos projetos são desenvolvidos considerando vidas úteis relativamente longas, muitas vezes superiores a 50 anos.

Para a análise do comportamento estrutural, é necessário ter em conta os aspetos de durabilidade. Devido à escassez de informações sobre a durabilidade dos FRP's, por se tratar de materiais de aplicação recente, alguns autores, nomeadamente Liao *et al.*, (1998), Carra e Carveli (2013), Sousa *et al.* (2014), identificaram alguns dos principais agentes ambientais com influência na durabilidade dos FRP's utilizados em aplicações estruturais, e sobre os quais deverá incidir o esforço de investigação futuro.

Liao *et al.* (1998) estudou o comportamento de um perfil pultrudido de GFRP, incorporando uma matriz de viniléster reforçada com fibra de vidro. As amostras foram submetidas a ensaios de tração e flexão antes de serem expostas a agentes ambientais, para identificar a influência na durabilidade dos mesmos. Os perfis foram submetidos a envelhecimento ambiental a fim de estudar a sua durabilidade, uma vez que tais compósitos são utilizados em aplicações estruturais. Foram testados inicialmente, e após envelhecimento em água ou soluções de sal à temperatura ambiente (25 ° C) ou em água a 75 ° C.

Os testes de tração e flexão foram realizados em uma máquina de teste com um extensómetro usado para registar a deformação durante um teste de tração e um medidor de deslocamento foi usado para medir a deflexão no meio do vão sob carga de flexão de quatro pontos.

As soluções de água e sal foram escolhidas para simular chuva e névoa salina, duas componentes encontradas ambientes ao ar livre. As amostras envelhecidas em temperaturas elevadas foram consideradas uma vez que a temperatura elevada é frequentemente utilizada como uma forma de encurtar a vida útil e acelerar o teste.

Com base no estudo das amostras, Liao *et al.* (1998), concluíram que em águas e soluções salinas, os perfis apresentam degradação das suas propriedades em flexão e tração. A degradação das fibras de vidro foi medida através do aparecimento de fraturas. A

diminuição na densidade da fissura transversal após o envelhecimento pode ser atribuída à degradação da região de interface fibra / matriz ou à plastificação da matriz, ou a ambas. Se a região da interface da matriz estiver enfraquecida, a fissuração da superfície transversal pode crescer mais rapidamente na espessura da amostra, e isso pode reduzir os níveis de tensão na superfície.

Carra e Carveli (2013), apresentaram um estudo experimental sobre a durabilidade de perfis pultrudidos de GFRP, considerando a análise de três matrizes diferentes reforçadas com fibra de vidro-E: poliéster isoftálico, poliéster ortoftálico e viniléster. Estes compósitos foram submetidos a um procedimento de envelhecimento artificial acelerado em uma câmara climática Fig. 56, simulando o efeito combinado de temperatura elevada, ciclos de gelo-degelo, humidade e radiação ultravioleta (UV).

Os materiais foram expostos a uma combinação de temperaturas elevadas e abaixo de zero, umidade (altos níveis de humidade relativa, perto do grau de saturação) e radiação UV. As variações do desempenho mecânico e estético foram medidas ao longo de 24 semanas consecutivas (seis meses) e testadas a cada quatro semanas (intervalo mensal). O módulo e as resistências à tração e flexão, a resistência ao corte interlaminar e a mudança de cor foram medidos e comparados com a dos materiais não envelhecidos.

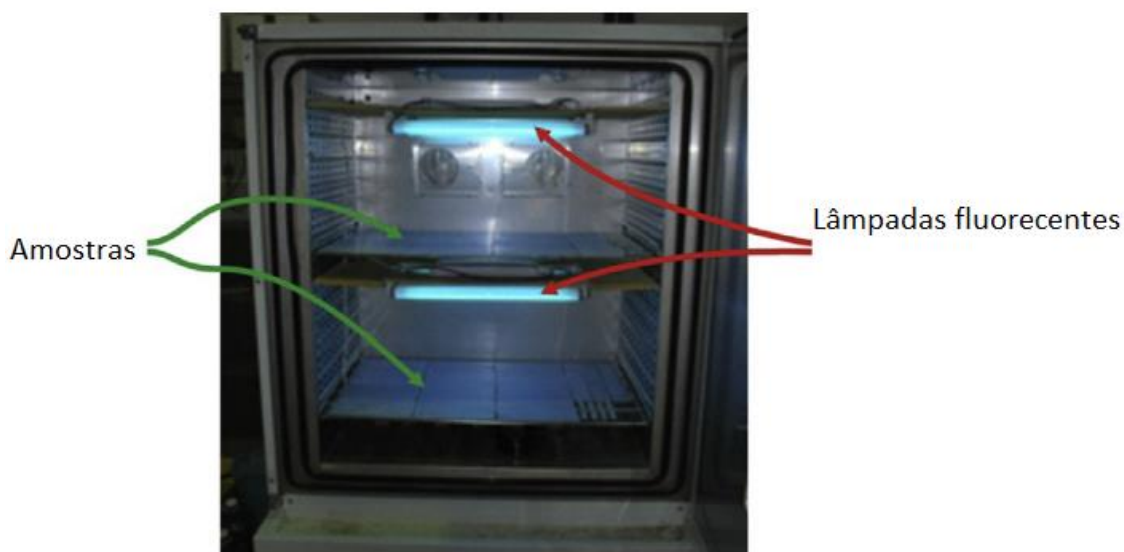


Fig. 56 – Interior da câmara climática equipada com lâmpadas fluorescentes UV
(adaptado de Carra e Carveli, 2013).

Um outro conjunto de amostras foi exposto ao envelhecimento natural no ambiente externo, em Milão. Placas pultrudidas das três composições foram colocadas sobre uma cobertura horizontal, 10 m acima do solo, durante doze meses consecutivo, temperaturas e humidades foram registadas. Fig. 57



Fig. 57 – Amostras expostas a) durante um dia de verão, b) durante um dia de inverno (Carra e Carveli, 2013).

Uma visão geral dos testes mecânicos apresentados no trabalho destes autores permite analisar e retirar algumas conclusões. As características mecânicas, principalmente as resistências médias à tração, apresentaram uma ligeira redução nos primeiros três meses de envelhecimento, tem ligeira variação no quarto e quinto mês e uma redução adicional no tempo restante de envelhecimento, para qualquer uma das três matrizes. Após seis meses, o compósito com matriz de poliéster isoftálico apresenta perda de resistência de 15,5%, o poliéster ortoftálico de 10,4% e o viniléster de 13,9%.

A Fig. 58 mostra a variação da massa das amostras com o tempo de exposição a envelhecimento acelerado. Como se pode observar, ocorre uma perda de massa no primeiro mês devido a uma perda de estireno. No segundo e terceiro meses, os materiais apresentam um incremento no peso, devido ao aumento de fissuras e à absorção de humidade. Este comportamento levou a uma maior redução da resistência. A massa é estável no quarto mês de envelhecimento artificial, oscilando sobre o mesmo valor nos últimos dois meses. Esta observação pode ser explicada com um padrão estável ou ligeiramente variável de fissuras já transmitidas.

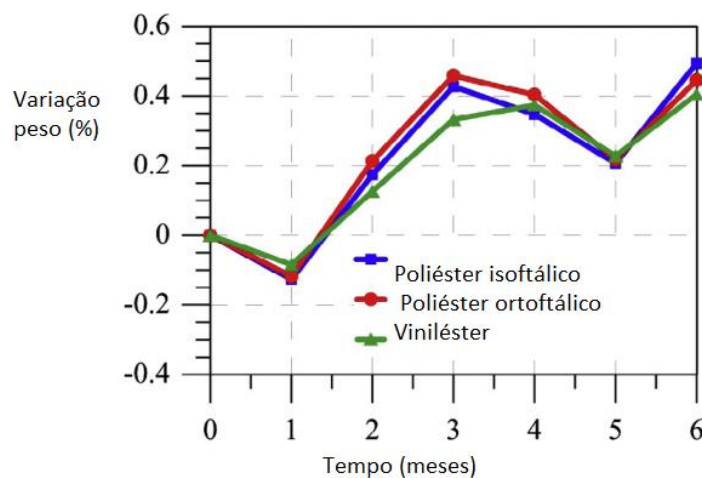


Fig. 58 – Variação de massa durante o envelhecimento artificial (Carra e Carveli, 2013).

Carla e Carveli (2013) concluíram que a combinação de vários agentes de intemperismo gera uma maior influência no desempenho mecânico dos materiais de GFRP se comparada com os dados da literatura obtidos através da aplicação de um ou dois agentes ambientais.

Sousa *et al.* (2014) apresentaram um estudo experimental sobre o comportamento de perfis pultrudidos sujeitos a ciclos térmicos. Os perfis de GFRP apresentam arquitetura de fibra semelhante, diferindo apenas na natureza da matriz: poliéster insaturado (UP) e viniléster (VE). Os ciclos térmicos são um dos mais relevantes tipos de agentes ambientais a que os materiais FRP estão sujeitos, nomeadamente em aplicações no exterior. As preocupações com os ciclos térmicos estão relacionadas não apenas com a exposição a temperaturas abaixo de zero, mas também com as variações térmicas (amplitude e taxas de aquecimento ou arrefecimento).

Pequenas amostras obtidas de ambos os tipos de perfis de GFRP foram expostos a uma faixa mediterrânea de variações térmicas (5 °C a 40 °C) por até 190 ciclos em uma condição seca. Os efeitos de tal exposição na resposta física e mecânica dos materiais GFRP foram avaliados e comparados usando as seguintes técnicas experimentais:

- análises mecânicas dinâmicas (DMA) para avaliar o comportamento viscoelástico;
- ensaios de tração, flexão e corte interlaminar, para avaliação das propriedades mecânicas;
- microscopia eletrônica de varrimento (MEV), para monitorar as possíveis alterações na microestrutura devido à degradação (caso exista) causada pelos ciclos térmicos, bem como as possíveis alterações nos principais mecanismos de fratura.

Os resultados obtidos na análise DMA não indicaram alterações estruturais evidentes na matriz da resina, bem como na interfase fibra-matriz, mostrando apenas pequenas mudanças na temperatura de transição vítrea de ambos os perfis.

Em termos de propriedades de tração e resistência ao corte interlaminar, ambos os tipos de perfis de GFRP sofreram ligeiras alterações. Para o perfil UP, as resistências à tração e ao corte interlaminar diminuíram 13% e 11%, respetivamente. Para o perfil VE, a resistência à tração apresentou tendência geral de aumento (oposta ao perfil UP). Após 190 ciclos, a resistência à tração do perfil VE aumentou 8%, enquanto a resistência ao corte interlaminar apresentou redução de 2%.

Com relação às propriedades de flexão, estas foram negativamente, e mais consideravelmente, afetadas em ambos os tipos de perfis de GFRP. A resistência à flexão diminuiu 11% e 13% para os perfis UP e VE, respetivamente, enquanto o módulo de flexão foi reduzido em até 24% e 25%, respetivamente. Tal magnitude (ou seja, quando comparada às propriedades de tração) é considerada como tendo sido causada pela dependência mais forte das propriedades de flexão na matriz da resina e na interfase fibra-matriz. A degradação das propriedades em flexão foi mais pronunciada no primeiro conjunto de ciclos e tendeu a estabilizar com o aumento dos ciclos térmicos.

As observações MEV em superfícies de fissuras forneceram evidências de que dois processos principais estão envolvidos na iniciação de fissuras: ruptura adesiva (descolamento da fibra) e ruptura coesiva (fissuração da matriz). As resinas VE apresentaram melhor adesão fibra-matriz e melhor resistência à interfase, em comparação com as resinas UP. Além disso, a matriz VE resistiu melhor aos ciclos térmicos do que a matriz UP: no compósito pultrudido anterior, a descolagem na interface entre as fibras e a matriz ocorre em menor extensão.

3.1.2 SISTEMAS DE LIGAÇÕES DOS PERFIS PULTRUDIDOS DE GFRP

Atualmente, as conexões em estruturas de FRP são comumente feitas por meio de conexões aparafusadas, semelhantes às usadas em estruturas de aço. Na verdade, alguns fabricantes de perfis de FRP e diretrizes de dimensionamento proíbem especificamente o uso de conexões adesivas ou restringem sua aplicação.

Segundo Ascione *et al.* (2016) a principal razão para a proibição de conexões adesivas é a falta de conhecimento e experiência com o desempenho de tais conexões. Portanto, há necessidade de pesquisas sobre conexões coladas para entender o seu comportamento, em termos de resistência e rigidez, e para avaliar o seu desempenho em relação a conexões aparafusadas semelhantes.

Ascione *et al.* (2016), no seu estudo experimental, testaram oito conexões viga-coluna GFRP em escala real: o seu modo de falha, resistência e rigidez rotacional foram investigados. Em cada amostra a viga e a coluna são conectadas por adesivo epoxídico.

Os autores investigaram quatro ligações diferentes, cada uma constituída por quatro cantoneiras (sobreposição 50 mm) de material GFRP: ligação entre banzos e ligação entre alma da viga e banzos da coluna. Na Fig. 59, apresentam-se os detalhes das conexões, correspondem à ligação localizada junto à extremidade superior livre da coluna de GFRP (com e sem reforço das ligações banzo-alma da coluna) e ligação localizada a meia altura da coluna (com e sem reforço das ligações banzo-alma da coluna).

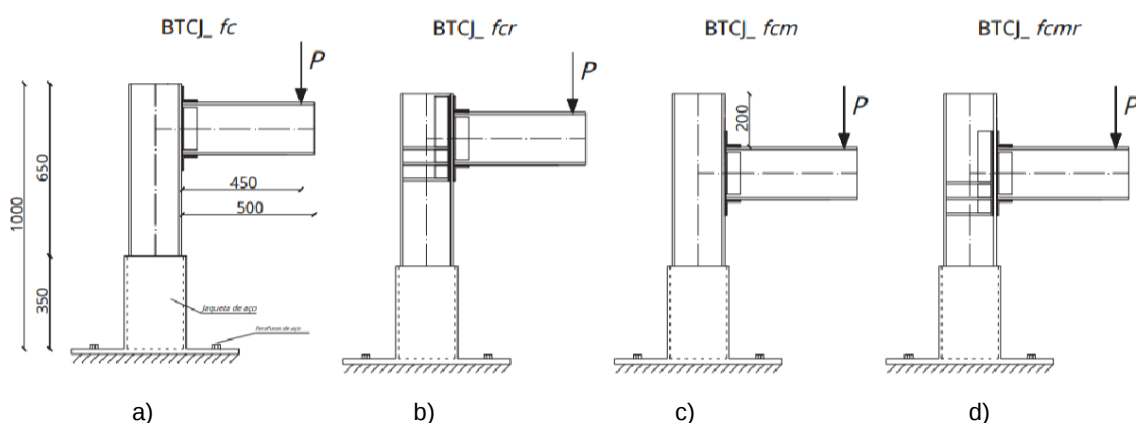


Fig. 59 – Detalhes das conexões viga-coluna testadas (Ascione *et al.*, 2016).

Os resultados experimentais mostraram que tanto as conexões adesivas padrões quanto as aprimoradas podem ter resistência comparável às conexões parafusadas correspondentes, independentemente de serem usados parafusos de aço ou GFRP.

A conexão padrão nos testes atuais falhou, num caso, devido ao descolamento no banzo da coluna, um modo de falha semelhante ao relatado para a conexão parafusada padrão. Por outro lado, as conexões aprimoradas falharam devido à falha coesiva dentro do adesivo ou na interface do banzo da coluna adesiva.

O reforço da coluna pode aumentar a carga de falha de conexão em aproximadamente 40%. Para evitar falha prematura na conexão iniciada pela separação da alma-banzo da coluna, a coluna precisa ser reforçada na região de conexão. A localização da conexão da viga ao pilar, em relação à extremidade livre do pilar, parece ter um efeito significativo na resistência da conexão. O reforço da ligação banzo-alma por laminados colados a ambos os banzos da coluna produziu um incremento de resistência mecânica de cerca de 25%.

Martins *et al.* (2021) desenvolveu um estudo experimental, numérico e analítico sobre o comportamento monotônico e cíclico de conexões viga-coluna de perfis pultrudidos GFRP de seção I usando cantoneiras de aço. Cinco séries de conexões não reforçadas e quatro séries de conexões reforçadas foram testadas sob carregamento monotônico, enquanto quatro séries (duas não reforçadas e duas reforçadas) foram testadas sob carregamento cíclico. A série de conexões diferia no número de parafusos/hastes, posicionamento das cantoneiras e espessura das cantoneiras.

O objetivo principal foi desenvolver um sistema de conexão viga-coluna para estruturas GFRP, utilizando peças prontamente disponíveis compatíveis com a resistência à corrosão do GFRP e explorando a ductilidade do metal. O programa experimental compreendeu quatro tipos de ensaios:

- ensaios de caracterização do material dos perfis de GFRP e placas de aço inoxidável utilizadas nas cantoneiras.
- ensaios em ligações por sobreposição dupla para avaliar a resposta da interface entre o GFRP e os parafusos de aço inoxidável usados nas conexões viga-coluna.
- testes monotônicos em conexões viga-coluna em escala real com diferentes espessuras de cantoneiras, para avaliar sua resistência, rigidez e modos de falha.
- testes cíclicos em conexões viga-coluna em escala real para avaliar sua resposta histéretica incluindo sua capacidade de dissipar energia.

A interação entre os parafusos de aço inoxidável e as placas de GFRP foi avaliada por meio de testes monotônicos de sobreposição dupla permitindo determinar as distâncias de aresta e passo que maximizaram a resistência das placas de GFRP sob cargas de rolamento.

As placas de GFRP foram aparafusadas a duas placas de aço, de acordo com o esquema apresentado na Fig. 60. Uma folga de 2 mm foi garantida entre as placas de aço auxiliares e as placas de GFRP para garantir que não existisse atrito durante os testes. Os testes foram

realizados em uma máquina de teste sob controle de deslocamento a uma taxa de 2 mm / min.

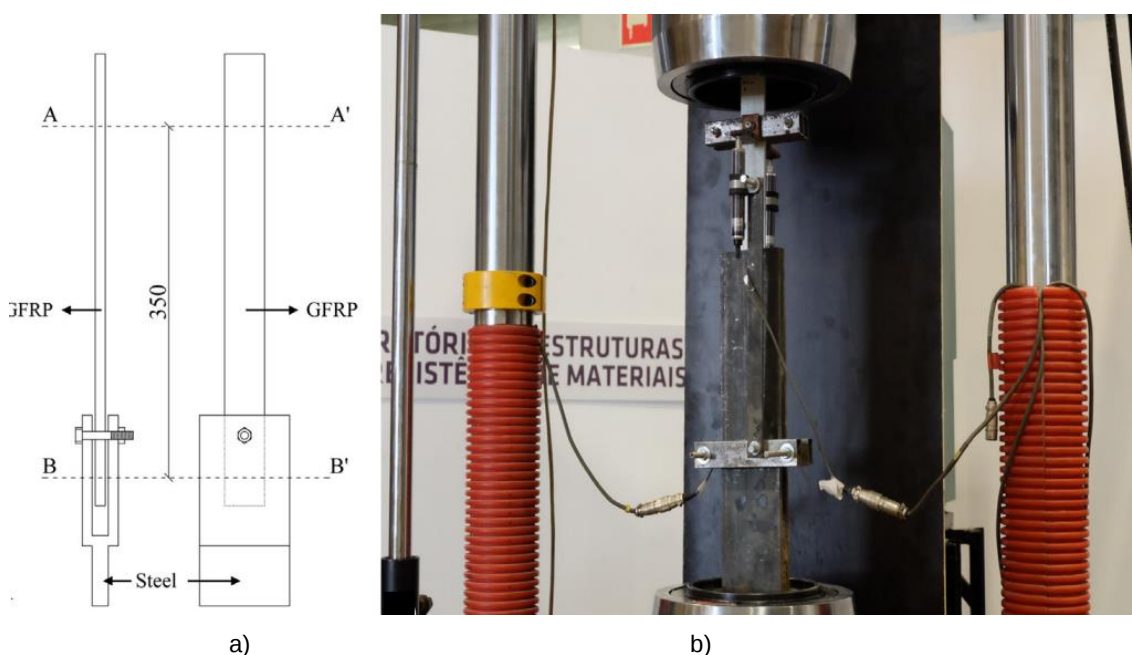


Fig. 60 – Ensaio de sobreposição dupla a) esquema ilustrativo, b) configuração do ensaio (Martins *et al.*, 2021).

No teste viga-coluna realizado, os provetes consistiam em conexões externas viga-coluna, representativas de uma coluna de fachada. As amostras compreendiam uma coluna GFRP com 900 mm de comprimento conectada na altura média a uma viga GFRP de 800 mm de comprimento por meio de cantoneiras de aço inoxidável conformadas a frio. Os testes viga-coluna compreenderam nove séries de conexões diferentes, quatro das quais incluindo reforços de coluna.

Todas as séries não reforçadas falharam prematuramente devido à falha na ligação banzo-alma; concluindo-se que, o número de parafusos, a espessura e o comprimento das cantoneiras tiveram pouca influência na resistência das conexões com cantoneiras do banzo.

Para ligações reforçadas, a rigidez inicial aumentou com o aumento da espessura da cantoneira e do número de carreiras de parafusos. Por outro lado, maiores espessuras de cantoneira (8 mm) levaram a menor resistência e ductilidade, com danos mais precoces no GFRP e menores deformações plásticas no aço inoxidável.

De forma geral, os resultados obtidos mostram a viabilidade de explorar a ductilidade do aço inoxidável, especialmente para séries com cantoneiras menos espessas, e os sistemas de conexão desenvolvidos foram capazes de suportar grandes rotações relativas antes de falhar, apresentando comportamento não linear acentuado.

Segundo Gonilha *et al.* (2018), os perfis pultrudidos de GFRP, são cada vez mais aplicados na engenharia civil, visto que apresentam grandes vantagens, devido à sua alta resistência, baixo peso próprio, facilidade de instalação, transparência eletromagnética e boa resistência química e à corrosão. Oferecem assim uma alternativa promissora para o desenvolvimento de estruturas mais duráveis e sustentáveis, pois possuem baixa necessidade de manutenção.

Um exemplo desse sistema híbrido é a ponte de São Silvestre, que compreende duas vigas GFRP pultrudidas coladas (com epóxi) e aparafusadas a uma plataforma muito fina feita de betão autocompactável reforçado com fibra de aço (SFRSCC). Embora as conexões adesivas tenham provado que fornecem interação virtualmente completa no curto prazo, pouco se sabe sobre a durabilidade de tais sistemas de conexão, principalmente quando submetidos a agentes de degradação ambiental, levantando assim a preocupações sobre o seu desempenho a longo prazo.

Gonilha *et al.* (2018), apresentam investigações experimentais e numéricas sobre a durabilidade de ligações adesivas entre perfis pultrudidos de GFRP e lajes de SFRSCC. O objetivo principal foi avaliar a influência de ciclos térmicos, provavelmente encontrados em aplicações externas, e ciclos húmido-seco, na rigidez e resistência da interface GFRP-SFRSCC. Utilizando amostras GFRP-SFRSCC submetidas a ciclos térmico e húmido-seco por até 32 semanas e, em seguida, submetidas a testes de *push-out*. Juntamente com o estudo experimental foram desenvolvidos modelos numéricos para simular os testes de *push-out*, em particular para calibrar leis de deslizamento dependentes do tempo representativas da conexão GFRP-SFRSCC e da sua degradação com o tempo. No fim, foram analisados os efeitos da degradação da interface na resposta estrutural em escala real da ponte de São Silvestre.

A Fig. 61 mostra a geometria da amostra composta por perfis de GFRP e SFRSCC. A preparação das amostras começou com a criação de rugosidade nas superfícies do SFRSCC (conforme mostrado na Fig. 64 a), a fim de aumentar a qualidade da colagem. O adesivo epóxi foi preparado de acordo com as recomendações do fabricante e aplicado à superfície SFRSCC, conforme apresentado na Fig. 64 b). Os perfis de GFRP foram posicionados no topo da laje e um peso foi colocado sobre estes elementos para apertar o excesso de adesivo, que foi então removido.

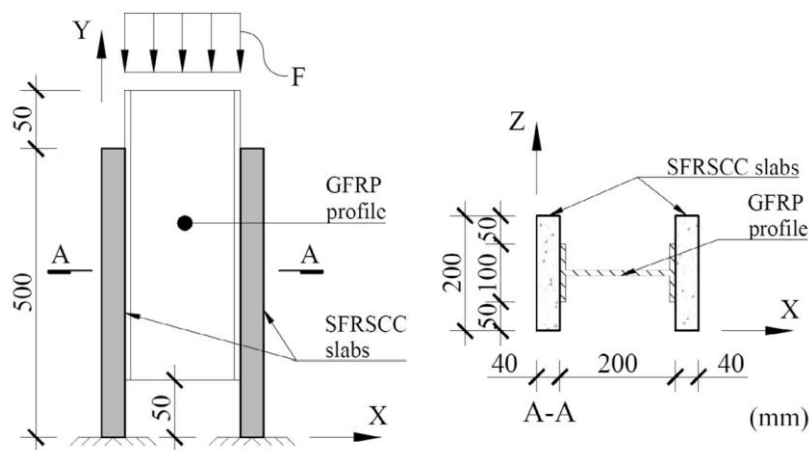


Fig. 61 – Geometria do provete (Gonilha *et al.*, 2018).

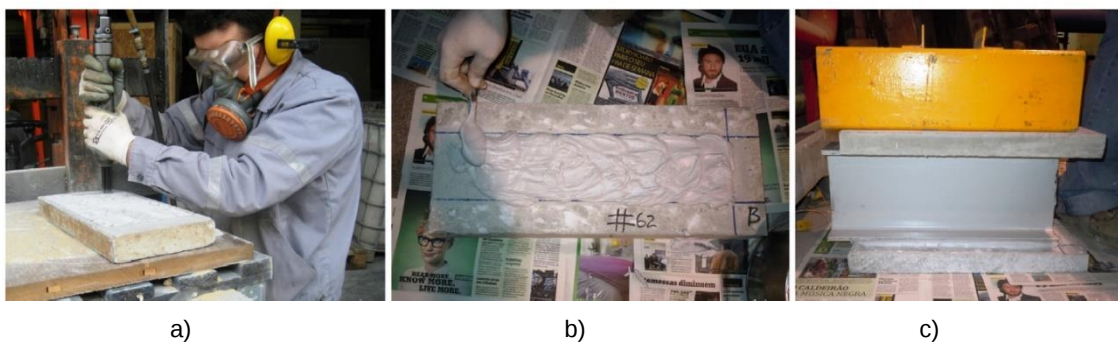


Fig. 62 – Preparação da amostra a) rugosidade da superfície do SFRSCC, b) aplicação do adesivo epóxi, c) especto final da amostra (Gonilha *et al.*, 2018).

Antes do teste *push-out*, todos os provetes submetidos a ciclos húmido-seco apresentavam sinais externos de envelhecimento, ou seja, corrosão das fibras de aço expostas. Por outro lado, para a exposição aos ciclos térmicos, esses sinais de dano só foram visíveis nos provetes submetidos a 224 ciclos. A carga foi aplicada às amostras com uma prensa hidráulica, com capacidade de 3000 kN. As amostras foram colocadas numa placa inferior (móvel) da prensa sobre um fino encaixe de gesso.

Foram observados três diferentes modos de falha, dois na conexão GFRP-SFRSCC: (i) falha coesiva no SFRSCC (uma fina camada de betão em contato com o adesivo - falha coesiva, Fig. 63 a); e (ii) falha adesiva na interface entre o adesivo epóxi e o GFRP – falha do adesivo, Fig. 63 b). O terceiro modo de falha observado foi causado pela rotura da junção banzo-alma dos perfis Fig. 63 c). Além disso, para alguns provetes, após a ocorrência do primeiro modo de falha (em um dos lados do provete), foi observado um segundo modo de falha, tipicamente do lado oposto, levando ao colapso dos provetes.

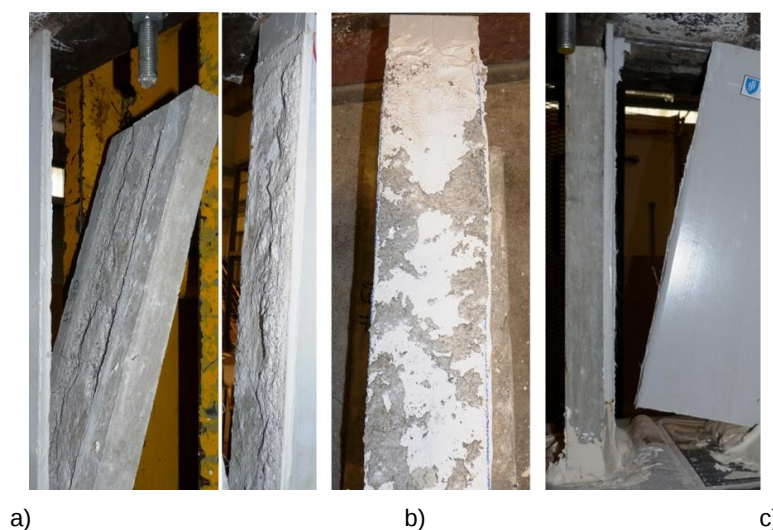


Fig. 63 – Modos de falha típicos: a) descolagem no SFRSCC (falha coesiva), b) descolagem no epóxi (falha adesiva), e c) ruptura da junção do flange da alma (Gonilha *et al.*, 2018).

Para as condições de teste utilizadas no estudo, os ciclos térmicos não tiveram efeito deletério sobre a resistência interfacial; na verdade, após 224 ciclos, a resistência aumentou 19%. Por outro lado, a rigidez apresentou uma redução significativa de 48%. Os ciclos húmido-seco não afetaram a resistência da interface, que apresentou variações marginais durante o período de exposição. Quanto aos ciclos térmicos, a rigidez foi fortemente afetada, apresentando uma redução acentuada já para os períodos anteriores de envelhecimento, com uma redução máxima de 58% após 16 ciclos.

No estudo numérico, as leis de aderência bi-linear representativas das mudanças sofridas pelas interfaces ligadas foram calibradas. Os modelos foram capazes de capturar as respostas mecânicas observadas nos ensaios experimentais, incluindo os efeitos do envelhecimento acelerado - os modelos previram com precisão as respostas carga vs. deslizamento e também os mecanismos de falha. Os modelos também mostraram que para menor rigidez da interface a distribuição da tensão de corte é mais uniforme e os picos de tensão são mais baixos, o que em certa medida explica porque a resistência interfacial não diminuiu nos ensaios de *push-out*.

Na parte final do artigo, as consequências da degradação da rigidez da interface foram avaliadas no nível estrutural em escala real. Para isso, foi tomado como exemplo a ponte de São Silvestre, concluindo que a redução muito significativa da rigidez da ligação causa um aumento da deformação elástica no meio do vão de apenas 5%. Isso significa que, embora os ciclos térmico e húmido-seco reduzam consideravelmente a rigidez da interface GFRP-epóxi-SFRSCC, tal não parece influenciar significativamente a segurança estrutural nos estados limites de serviço.

3.2. PAINÉIS SANDUÍCHE

A utilização dos painéis sanduiche apresenta, no geral, algumas vantagens face a outras soluções devido à sua elevada resistência e rigidez específica, bom comportamento acústico, bom comportamento em flexão, baixo peso, boa resistência ao impacto e bom isolamento térmico. Por outro lado, apresentam algumas desvantagens ao combinar materiais com diferentes propriedades, como temperatura, problemas de fadiga, incompatibilidade de materiais. Neste contexto, os projetistas adotam critérios muito conservativos conduzindo a um aumento do peso da estrutura. Por último, a difícil reciclagem destas estruturas no fim de vida, ou os desperdícios que surgem durante o processo de produção, conduzem a problemas ambientais. A Tabela 7 apresenta as principais vantagens e desvantagens das estruturas sanduiche.

Tabela 7 – Principais vantagens e desvantagens da estrutura sanduiche (Serra, 2013)

Vantagens	Desvantagens
Alta resistência específica	Perigoso para a saúde durante a construção
Alta rigidez específica	Fracas possibilidades de reciclagem e de Reparação (compósitos)
Baixo peso	Falta de informação dos engenheiros
Isolamento térmico e acústico	Problemas de temperatura/resistência ao fogo
Capacidade de resistência à corrosão	Mudança de mentalidades
Facilidade de construção de formas completas	Variedade de critérios de rotura
Poucas peças estruturais necessárias	Incompatibilidade de materiais
Múltiplas possibilidades de escolha de materiais	

3.2.1. FLUÊNCIA EM PAINÉIS SANDUÍCHE

A utilização de painéis sanduiche em construções é cada vez mais frequente, devido às elevadas relações rigidez- e resistência-peso. Além de apresentarem uma vasta escolha de materiais e opções geométricas permitem a integração de funções não estruturais valiosas que podem ser necessárias para diferentes aplicações.

No entanto, quando os painéis sanduíche são usados como elementos de suporte de carga em um sistema estrutural que suporta cargas permanentes significativas, como é o caso de muitas aplicações de engenharia, podem ocorrer importantes deformações devidas à fluência dada a natureza viscoelástica de alguns dos materiais tipicamente usados neste tipo de construção: adesivos poliméricos, resinas, espumas, favos de mel e madeira.

Estas deformações devem ser devidamente consideradas no dimensionamento de painéis sanduíche, principalmente considerando que a vida útil exigida em obras de engenharia civil normalmente não é inferior a 50 anos. No entanto, a falta de diretrizes de projeto universalmente aceites sobre fluência em painéis sanduíche e de informações precisas sobre as propriedades viscoelásticas de materiais relevantes ainda constituem um obstáculo para a consideração correta do fenómeno de fluência na fase de projeto.

Garrido *et al.* (2014) apresentaram investigações experimentais e analíticas sobre o comportamento à fluência de painéis sanduíche constituídos por faces de GFRP e núcleo de espuma rígida de poliuretano (PU). Os objetivos foram dois: compreender em maior profundidade a resposta viscoelástica deste tipo de painéis sanduíche e desenvolver um modelo capaz de prever a sua resposta à fluência de longo prazo. A primeira parte do artigo apresenta brevemente a lei de potência de Findley, usada para ajustar dados experimentais, nas suas formulações gerais e simplificadas, juntamente com coeficientes de fluência e curvas de redução do módulo de elasticidade. A segunda parte do artigo apresenta o programa experimental, que compreendeu um ensaio de fluência à flexão em painel sanduíche em escala real e testes de fluência por corte em provetes de espuma de PU em pequena escala, submetidos a diferentes níveis de carga. A parte final do artigo propõe um modelo de fluência composto para simular as deformações de fluência de longo prazo do painel sanduíche, considerando as contribuições viscoelásticas individuais do material do núcleo em corte e das faces GFRP em tração /compressão.

Um painel sanduíche em escala real foi testado em flexão por um período de 3600h, a fim de avaliar o seu comportamento viscoelástico a flexão, em configuração simplesmente apoiada, submetido a uma carga uniformemente distribuída correspondente a 20% da resistência à flexão do painel. O painel foi simplesmente apoiado num vão de 2,30m e carregado de acordo com um padrão de carregamento uniformemente distribuído usando blocos de betão, Fig. 66.



Fig. 64 – Teste de fluência à flexão de painel sanduíche em escala real (Garrido *et al.*, 2014).

Adicionalmente, provetes de espuma de poliuretano foram testados em fluência em corte por um período de 1200h, para três diferentes níveis de carga correspondentes a 10%, 20% e 30% da resistência ao corte da espuma.

Para realizar o teste de fluência em corte das amostras, uma configuração personalizada foi montada, em que as amostras do material do núcleo foram carregadas em corte simples usando pesos mortos. As amostras, foram suspensas na viga de uma estrutura de aço, Fig. 65, com uma das suas faces fixa à viga enquanto uma carga vertical uniformemente distribuída era aplicada na face oposta. Para este efeito, as amostras foram coladas a duas placas de aço usando um adesivo à base de PU; uma placa foi posteriormente fixada à viga e uma outra placa de aço continha um acessório para suspender a carga morta vertical e enquanto minimizava a componente de flexão devido à espessura da amostra. As cargas mortas consistiam em placas de base de aço e barris cheios de água, com o valor da carga tendo sido ajustado variando o nível de água dentro dos barris. O deslocamento vertical na face não restringida (carregada) dos provetes foi monitorado utilizando defletômetros.

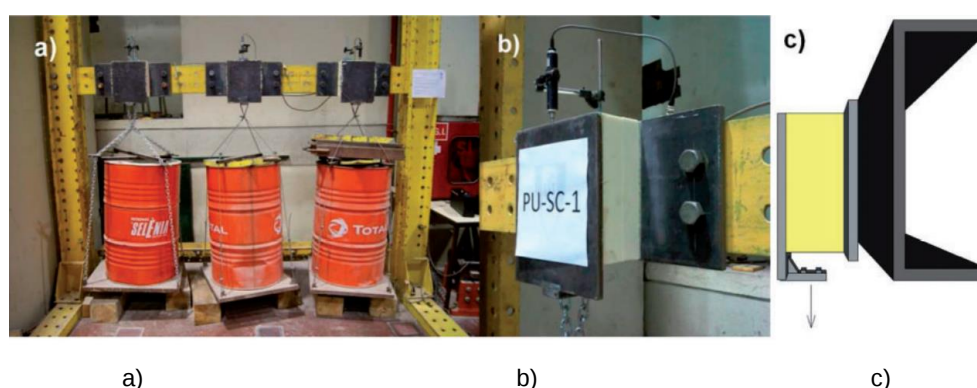


Fig. 65 – Visão geral da configuração do ensaio de fluência de corte: a) visão geral, b) detalhe de um provete sob carregamento, colado com adesivo a duas placas de aço e c) aplicação de carga morta usando acessórios de placa de aço personalizados (Garrido *et al.*, 2014).

concluíram que o painel sanduíche em escala real testado sob uma carga de flexão uniformemente distribuída exibiu aumentos de deslocamento a meio vão significativos devido à fluência. A resposta de fluência seguiu o desenvolvimento de uma lei de potência simples.

O conceito de um modelo de fluência composto foi apresentado e testado contra os dados experimentais de fluência recolhidos do painel sanduíche em escala real. O conceito de CCM parte do pressuposto de que essas deformações de longo prazo podem ser estimadas utilizando-se dados relativos apenas às propriedades viscoelásticas dos materiais constituintes do painel, usados como entrada num modelo adequado de comportamento estrutural do painel sanduíche. A implementação do conceito mostrado foi alcançada seguindo uma abordagem muito simples com o objetivo de ilustrar como o método pode ser usado para obter previsões de deformações de longo prazo devido à fluência em painéis sanduíche.

Segundo Garrido *et al.* (2016), a utilização de painéis sanduiche nos setores de construção e reabilitação está cada vez mais disseminada devido aos elevados rácios de resistência e rigidez para o peso. Este sistema estrutural apresenta alto potencial para aplicação em pisos de edifícios, especialmente em reabilitações de edifícios. Isto porque o peso do piso representa uma porção muito significativa da massa estrutural total em edifícios, e o uso de pisos leves tem o potencial de melhorar o desempenho estrutural geral, particularmente para cargas sísmicas, para as quais os requisitos de reforço de estruturas existentes (paredes verticais e fundações) podem ser consideravelmente reduzidos.

Além disso, o efeito da temperatura na resposta à fluência de tais materiais, embora seja qualitativamente conhecido, ainda não foi adequadamente quantificado e, conseqüentemente, há uma falta de informações e de modelos adequados para sua rápida consideração no projeto estrutural.

Garrido *et al.* (2016), num estudo experimental investigaram o comportamento de fluência em flexão de laminados de GFRP usados em painéis sanduíche produzidos por infusão a vácuo, expostos a diferentes temperaturas dentro de uma faixa tipicamente encontrada em pisos de edifícios. As faces dos painéis sanduíche sujeitos as flexões são comprimidas ou tracionadas, o que significa que a resposta à deformação do painel (normalmente dominada pelas faces) resulta da contribuição de ambas as respostas viscoelásticas.

Os ensaios experimentais de fluência foram realizados numa sala com temperatura e humidade relativa do ar (HR) controladas. Foram adotadas as temperaturas nominais de ensaio de 20°C, 24°C e 28°C, faixa que cobre as temperaturas mais comumente encontradas considerando as condições médias em serviço para pisos de edifícios com climatização. Três amostras de GFRP foram testadas para cada temperatura, cada uma submetida a um nível de carga diferente. As cargas adotadas corresponderam a 15%, 25% e 35% da resistência à flexão do laminado. A duração dos ensaios experimentais foi de 1320h, 1000h e 2215h para as condições de 20°C, 24°C e 28°C, respetivamente

Os laminados de GFRP utilizados neste estudo foram fabricados por infusão a vácuo, usando mechas de fibra de vidro-E e resina de poliéster ortoftálica.

Os ensaios de fluência foram realizados através de estruturas de suporte independentes montadas para cada amostra, conforme mostrado na Fig. 66 a). Estes continham cunhas de aço, usados para apoiar as amostras. Um vão de 200 mm foi adotado, e as cargas de meio vão foram aplicadas aos laminados GFRP usando pesos mortos. As manilhas retas de aço inoxidável (Fig. 66 b), foi utilizada para suspender as cargas das amostras. Fixada a amostra na manilha, foram então realizadas após as primeiras 72 h, medições da deformação numa seção transversal com uma distância de 20 mm do meio do vão, conforme mostrado na Fig. 66 c).

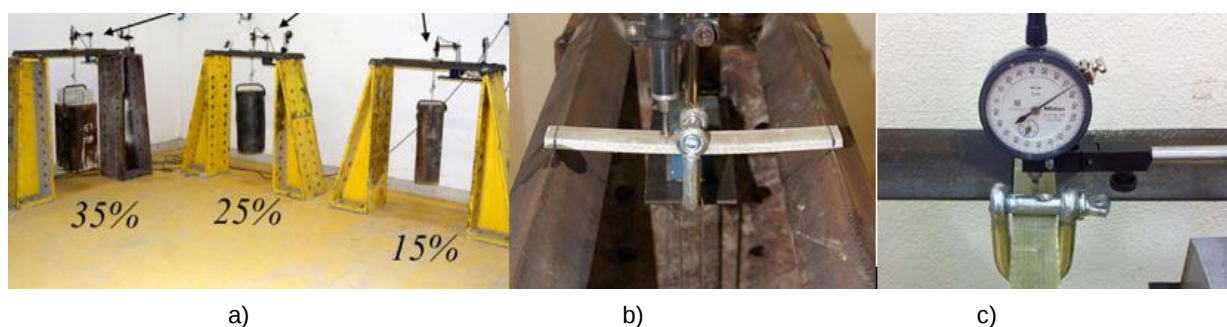


Fig. 66 – Testes de fluência por flexão: a) visão geral, b) detalhes da amostra e c) indicadores de manômetro com mostrador (Garrido *et al.*, 2016).

Verificou-se que a resposta em fluência do GFRP é fortemente dependente tanto do nível de tensão quanto da temperatura, mesmo para a amplitude de 8 °C considerada, com taxas de fluência mais altas sendo obtidas para tensões e temperaturas mais altas. Na verdade, essas diferenças consideráveis na viscoelasticidade foram obtidas para temperaturas que normalmente seriam rotuladas como “temperaturas ambientes”. Isso destaca a importância de ter uma temperatura controlada em todos os ensaios de fluência em tais materiais poliméricos.

Além disso, uma abordagem de modelação foi proposta com base na formulação da lei de potência de Findley, adaptada para incluir uma dependência da temperatura da lei de Arrhenius para os parâmetros da lei de potência que definem a taxa de fluência. Uma equação generalizada da lei de potência foi obtida, capaz de modelar as deformações do laminado GFRP em função do tempo, da tensão instalada e da temperatura de serviço. As expressões foram obtidas para o módulo de elasticidade dependente do tempo e da temperatura, coeficientes de fluência e fatores de redução do módulo de elasticidade, fornecendo ferramentas de projeto práticas para estimar deformações de fluência nos laminados GFRP.

Finalmente, o princípio de superposição tempo-temperatura-tensão (TTSSP) e o princípio de superposição tempo-tensão (TSSP) foram usados para obter “curvas mestras” que se comparam bem com as previsões do modelo proposto.

3.2.2. COMPORTAMENTO TÉRMICO DOS PAINÉIS SANDUÍCHE

As espumas poliméricas têm uma grande aplicação na engenharia civil. Na indústria da construção este tipo de materiais são mais utilizados para fins de isolamento térmico, uma vez que apresentam baixa condutibilidade térmica e, assim, contribuem para a eficiência energética dos edifícios. No entanto, nos últimos anos tem-se visto um interesse crescente pelo uso de espumas poliméricas como material de núcleo de painéis sanduíche para aplicações estruturais, como decks de pontes rodoviárias, estruturas de telhados de longo vão e piso de edifícios. Isso deve-se às suas vantagens face aos materiais de núcleo tradicionais (madeira balsa e favo de mel metálico), com elevados rácios de resistência- e rigidez-peso, baixa condutibilidade térmica e baixo custo. Além disso, outra característica relevante das espumas poliméricas diz respeito à sua estrutura celular inerente, que permite adaptar as suas propriedades mecânicas e térmicas alterando a morfologia celular (ou seja, orientação e tamanho da célula), permitindo assim um dimensionamento multifuncional leve de estruturas compósitas.

Apesar deste elevado potencial, uma questão desafiadora em relação ao uso de espumas poliméricas em diversas aplicações está relacionada ao seu desempenho mecânico quando submetidas a temperaturas elevadas e ao fogo. Devido à natureza viscoelástica dos materiais poliméricos, as propriedades mecânicas das espumas correspondentes (resistência e rigidez) sofrem reduções acentuadas com o aumento da temperatura, especialmente quando sua temperatura de transição vítrea (T_g), normalmente entre 65°C e 90°C para a maioria das espumas poliméricas disponíveis comercialmente, é atingida e ultrapassada.

A fim de atender às necessidades de pesquisa mencionadas acima, Mazzuca *et al.* (2021), apresentam investigações experimentais e analíticas sobre o corte e a resposta à compressão em temperatura elevada de uma espuma de PET termoplástica. Primeiramente, os processos de transição vítrea e decomposição do material foram estudados por meio de testes na análise mecânica dinâmica, DMA e termogravimétricos (TGA). Posteriormente, as respostas de compressão e corte da espuma PET foram avaliadas para temperaturas variando de 20°C a 190°C (cobrindo a faixa de temperatura de seu processo de transição vítrea), incluindo a determinação de curvas tensão vs. deformação, módulos, modos de deformação e falha. O objetivo principal destes testes foi determinar a variação com a temperatura das propriedades mecânicas de uma espuma PET, informação crucial para o projeto de estruturas sanduíche expostas a temperaturas de serviço elevadas ou onde a ação do fogo deve ser considerada.

O efeito da temperatura elevada na resposta à compressão e ao corte (na direção da espessura) da espuma PET foi avaliada através do uso de uma câmara ilustrados na Fig.

67. Os testes de corte foram realizados para temperaturas variando de 20°C a 100°C, enquanto os testes de compressão foram realizados até 190°C.

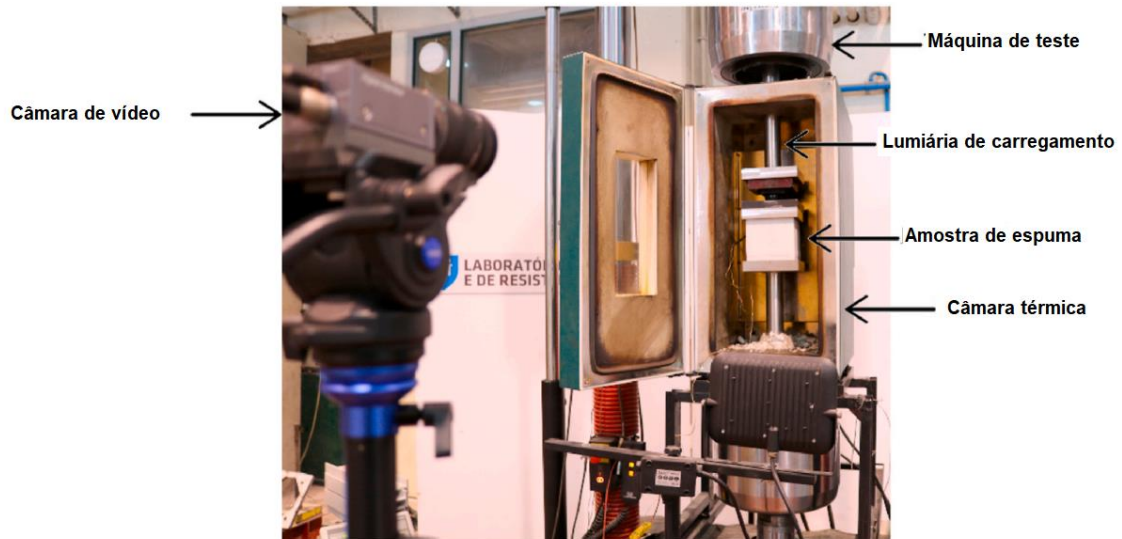


Fig. 67 – Visão geral dos equipamentos e instrumentação utilizados para os testes de caracterização de materiais em temperatura elevada (adaptado de Mazzuca *et al.*, 2021).

Quando o provete atingiu uma temperatura constante, uma carga monotónica crescente foi aplicada até a falha sob controlo de deslocamento, a uma velocidade predefinida.

Os ensaios de corte foram conduzidos em amostras cúbicas para quatro temperaturas alvo (20°C, 40°C, 60°C e 100°C).. Foi aplicada uma carga de tração no provete por meio de duas barras de carga posicionadas nos cantos superior e inferior da estrutura metálica que são foram estendidas em quatro blocos de metal, permitindo assim a conexão do acessório à máquina de testes universal, Fig. 68.

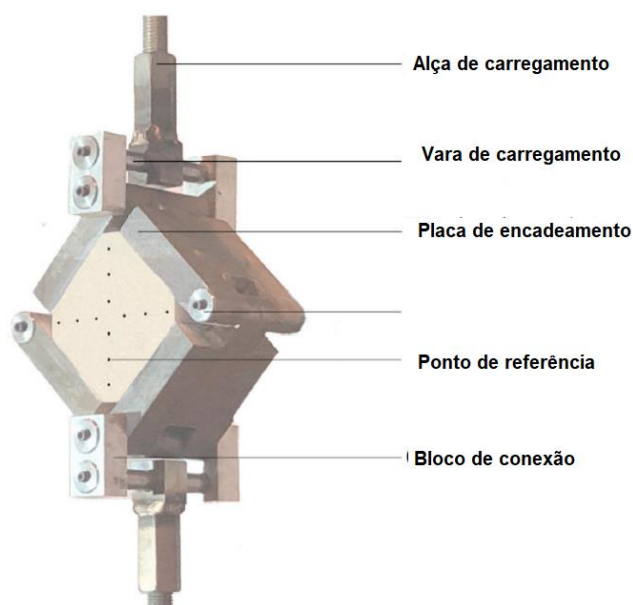


Fig. 68 – Componentes do método de teste DTS (adaptado de Mazzuca *et al.*, 2021).

Os testes de compressão plana foram conduzidos sob condição de estado estacionário nas seguintes temperaturas: 20°C, 40°C, 60°C, 100°C, 140°C e 19 °C. Para cada temperatura alvo, pelo menos três amostras foram testadas. Quando os provetes atingiram uma temperatura constante, a carga de compressão foi aplicada ao longo da direção da espessura do provete cúbico de, Fig. 69.

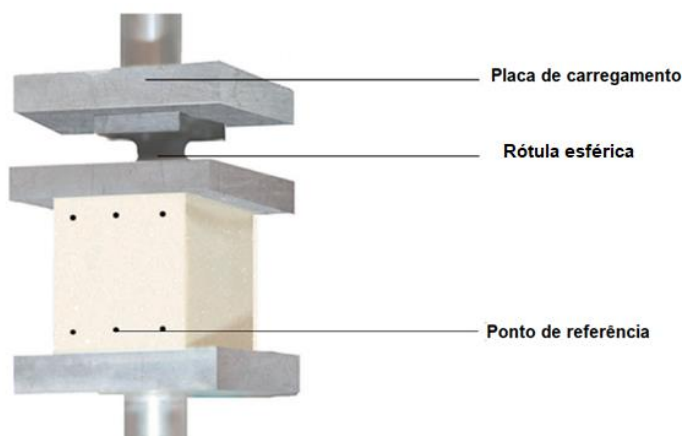


Fig. 69 – Teste de compressão (adaptado de Mazzuca *et al.*, 2021).

As respostas de compressão e corte da espuma PET foram fortemente afetadas pela temperatura elevada: para ambos os casos de carga, a não linearidade da curva tensão vs. deformação à temperatura ambiente torna-se mais pronunciada com o aumento da temperatura, isto deve-se principalmente ao amolecimento da espuma, sobretudo quando a sua temperatura é superior à Tg.

As propriedades de compressão e corte da espuma PET foram significativamente reduzidas com a temperatura elevada, ou seja, quando a temperatura de transição vítrea (T_g) do polímero é aproximada ou excedido, a resistência à compressão e o módulo são reduzidos para cerca de 10% dos valores à temperatura ambiente. Com relação às propriedades de corte, a 60°C, o módulo de corte e a resistência ao corte são reduzidos, respectivamente, a 48% e 67% daquelas propriedades à temperatura ambiente; a 100°C, o módulo de corte apresenta uma retenção de apenas 7%. No geral, a degradação das propriedades mecânicas da espuma PET ocorre para temperaturas mais baixas em comparação com outras espumas poliméricas (PU e PVC). Todos os modelos analíticos desenvolvidos por Mazzuca *et al.* (2021) foram capazes de estimar com boa precisão a variação das propriedades mecânicas da espuma PET em função da temperatura.

Além das espumas, também as propriedades mecânicas dos FRP's são sensíveis a temperaturas elevadas, como as que ocorrem em cenários de incêndio, devido aos processos físicos e químicos envolvidos na degradação da matriz polimérica e da fibra, bem como à delaminação. Tal resulta em reduções significativas da rigidez e da resistência. As propriedades mecânicas dos FRP's também podem degradar-se com a duração da exposição a temperaturas elevadas ou ao fogo. Portanto, as propriedades mecânicas pós-incêndio dos materiais GFRP são importantes para a avaliação do desempenho estrutural e avaliação da segurança estrutural após a exposição a estas solicitações.

Zhang *et al.* (2018), estudaram o desempenho mecânico pós-incêndio de estruturas em compósito de polímero reforçado com fibra de vidro às quais foram acoplados painéis pré-fabricados resistentes ao fogo. As estruturas GFRP consistiam de quatro painéis sanduíche multicelulares modulares, como ilustrado na Fig. 70. Os painéis resistentes ao fogo apresentam 12 mm de espessura e foram considerados os seguintes materiais: vidro de magnésio (GM), uma placa de gesso (GP) e uma placa de silicato de cálcio (CS).

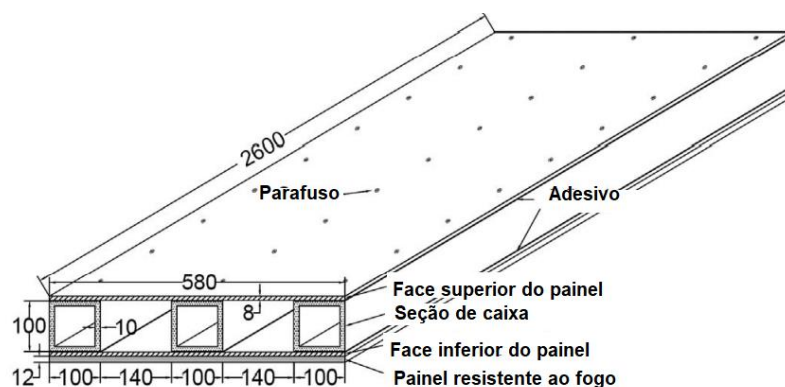


Fig. 70 – Configuração da amostra medidas em mm (adaptado de Zhang *et al.*, 2018).

Os três provetes foram expostos, do lado inferior, a uma curva de incêndio, os testes de fogo foram interrompidos após 90 min de exposição ao fogo para os provetes GM e CS; e após 72 min de exposição ao fogo para o provete GP devido ao colapso da placa de GP. Após os testes de incêndio, o forno e os provetes foram arrefecidos até à temperatura ambiente. Os painéis resistentes ao fogo nas superfícies inferiores dos provetes foram então removidos para posterior realização de testes mecânicos pós-incêndio.

O comportamento mecânico dos provetes expostos ao fogo (GM, GP e CS) e o provete U (não exposto) foi examinado através de um sistema de ensaio de flexão de 1000 kN, conforme mostrado na Fig. 71. As amostras foram simplesmente apoiadas com o comprimento do vão de 2300 mm e carregadas em flexão de quatro pontos.

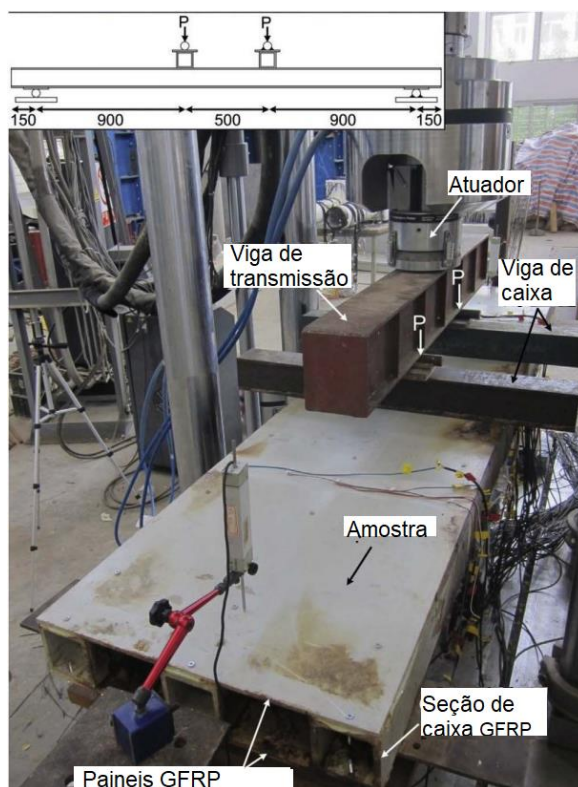


Fig. 71 – Configuração do ensaio de flexão quatro pontos (em mm) (adaptado de Zhang *et al.*, 2018).

O painel U (sem exposição ao fogo) apresentou rotura por corte longitudinal de fibras na região de corte entre os apoios e os pontos de aplicação da carga, cuja resistência pode ser prevista pela resistência ao corte do material. No entanto, os provetes GM, GP e CS (danificados pelo fogo) apresentaram inicialmente encurvadura local dos painéis da face superior na região de momento fletor máximo. Para níveis de carga superior, os provetes GM e GP falharam por corte longitudinal, com um padrão semelhante à do provete U, mas para um nível de tensão de corte muito mais baixo do que aquele observado para o provete U. Isto deveu-se à degradação da resistência ao corte do GFRP devido à exposição ao fogo. O provete CS apresentou rotura à flexão na região de flexão máxima, o que pode ser

explicado pela sua menor tensão de corte na zona alma em comparação aos provetes GM e GP, conforme a Fig. 72.



Fig. 72 – Modos de falha das amostras: a) falha por corte da amostra U, b) encurvadura local na amostra GM, c) encurvadura local na amostra GP, d) rotura por corte da amostra GM, e) falha de corte da amostra G, f) falha por flexão amostra CS (adaptado de Zhang *et al.*, 2018).

Foram ainda desenvolvidos modelos analíticos por Zhang *et al.* (2018) para estimar a rigidez de flexão pós-fogo e a capacidade de carga considerando (i) a recuperação da resina após a transição vítrea, mas antes da sua decomposição, (ii) bem como a contribuição das mechas contínuas restantes para a resistência dos materiais GFRP decompostos. Obteve-se boa concordância com os resultados experimentais. Foi demonstrado que o provete GM apresentou desempenho mecânico pós-fogo superior, com mais de metade da rigidez pós-fogo e da capacidade resistente remanescentes após 90 min de fogo.

Zhang *et al.* (2021), desenvolveram um estudo do comportamento ao fogo de cinco estruturas multicelulares de GFRP em grande escala que foram fabricadas usando tubos quadrados de GFRP e painéis, conectados por adesivo epóxi com espessura de 1 mm. Painéis de vidro magnésio (GM) ou gesso (GP), em camadas simples ou duplas, foram então montados na parte inferior das estruturas. Um dos banzos do painel sanduíche multicelular em GFRP estava desprotegido (ou seja, sem painel resistente ao fogo) como referência.

Cada uma das estruturas de painéis sanduíche de GFRP usadas neste estudo é composta de três seções vazadas quadradas de GFRP pultrudidas com uma dimensão de 3600 mm (comprimento) 75 mm (largura) 100 mm (altura) 10 mm (espessura da parede) e dois painéis pultrudidos de GFRP, conforme a Fig. 73.

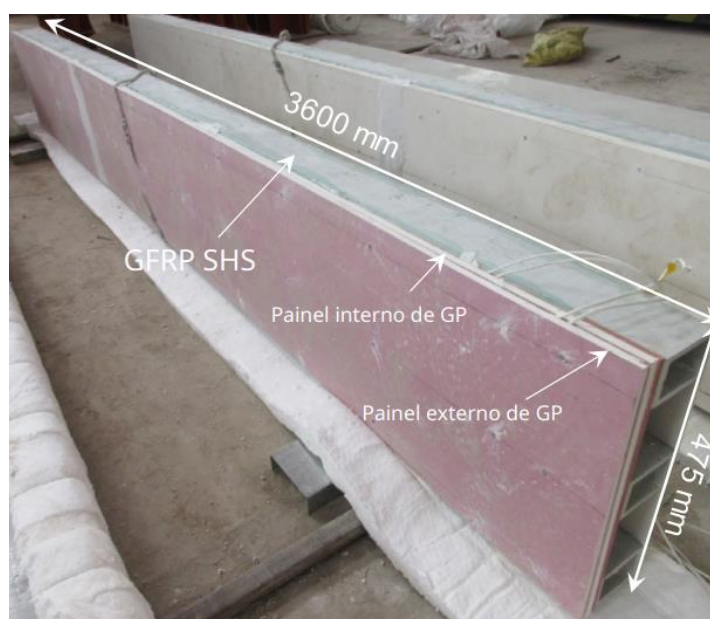


Fig. 73 – Configuração dos painéis (adaptado de Zhang *et al.*, 2021).

As estruturas foram submetidas à curva de incêndio ISO 834 da parte inferior onde os painéis GM ou GP foram instalados e uma carga constante no topo foi aplicada para introduzir flexão durante a exposição ao fogo. Os ensaios de exposição ao fogo foram conduzidos usando um forno horizontal, como mostrado na Fig. 74.

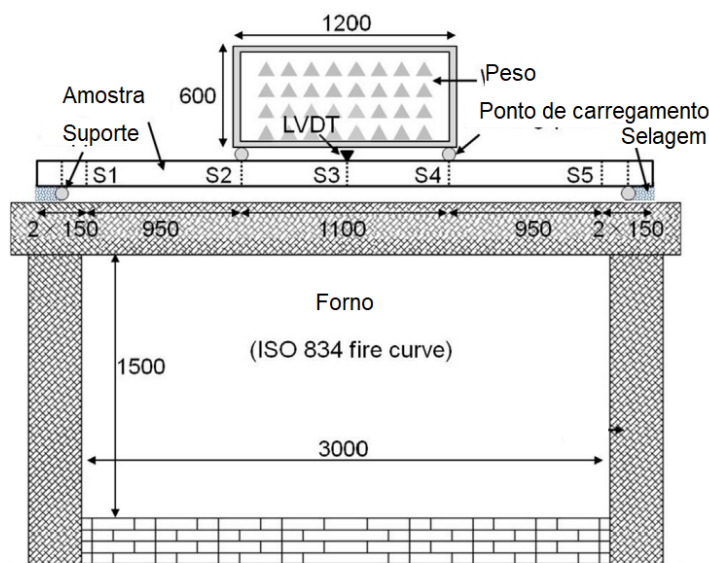


Fig. 74 – Configuração do forno e da carga aplicada (adaptado de Zhang *et al.*, 2018).

As variações de temperatura no interior dos provetes e os deslocamentos a meio vão foram continuamente registadas, e o desempenho ao fogo (considerando a capacidade de carga além dos desempenhos de isolamento e integridade) das amostras carregadas aprimoradas por painéis de resistência ao fogo foi avaliado. Foi também conduzido um estudo numérico envolvendo a modelação com elementos finitos com base nas propriedades dependentes da temperatura de materiais GFRP, GM e GP. Os modelos foram desenvolvidos para estimar as respostas dos provetes submetidos ao fogo. Os resultados da modelação foram então verificados com base nos cenários experimentais e posteriormente usados para investigar os efeitos da espessura do painel nas respostas térmicas da estrutura GFRP.

Os resultados experimentais mostraram que os tempos de resistência ao fogo das estruturas antes da falha foram estendidos de 54 min em painéis sem proteção para 83 min ou 103 min para painéis com uma única camada de GP ou GM. Quando as camadas duplas foram usadas, o tempo de resistência ao fogo aumentou para 113 min para painéis GP e 158 min para painéis GM. A modelação numérica foi posteriormente estabelecida para prever a distribuição da temperatura nas amostras. Os efeitos das camadas GM e GP no desempenho térmico e mecânico dos painéis expostos ao fogo puderam ser investigados em maior profundidade. O desempenho ao fogo de estruturas compostas de banzos e almas multicelulares em GFRP aprimoradas por painéis resistentes ao fogo pôde ser estudado experimental e numericamente com a condução do estudo de Zhang *et al.* (2021).

3.3. VARÕES

Estruturas de betão convencionais são reforçadas com aço (que pode ou não ser pré-esforçado). O aço inicialmente protegido contra a corrosão pela alcalinidade do betão, geralmente resulta numa construção durável e utilizável. No entanto, o reforço do betão com a armadura de aço apresenta alguns problemas, quando expostos a ambientes agressivos, como em estruturas marítimas, pontes e estruturas subterrâneas. A combinação da humidade, temperatura e a presença de iões cloreto ou de gás carbónico nas estruturas de betão armado reduz a alcalinidade do betão, provocando a despasseivação das armaduras.

O problema da corrosão incentivou o desenvolvimento de novos materiais com um comportamento melhorado e que pudessem ser utilizados em alternativa às armaduras em aço. Atualmente, os FRP's tornaram-se uma alternativa de reforço do aço para estruturas de betão, pois os materiais FRP's são não magnéticos e não corrosivos, apresentam várias propriedades como alta resistência à tração (Carvalho, 2018), que os torna adequados para o uso estrutural. Em relação ao aço, os GFRP's apresentam as seguintes principais vantagens: elevada resistência mecânica; reduzido peso próprio e, sobretudo, imunidade à corrosão.

Os varões de GFRP são materiais compósitos constituídos por fibras de vidro dispostas essencialmente de modo unidirecional, embebidas numa matriz que geralmente é constituída por viniléster ou poliéster insaturado e enquadram-se no grupo de materiais poliméricos reforçados com fibras (Fig. 75).



Fig. 75 – Varão de GFRP (Estêvão, 2017).

O comportamento mecânico do reforço de FRP difere do comportamento da armadura de aço convencional, os FRP são materiais anisotrópicos, caracterizados por alta resistência à tração apenas na direção das fibras de reforço. Esse comportamento anisotrópico afeta a resistência ao corte, bem como o desempenho da ligação. Além disso, os materiais não

cedem; em vez disso possuem um comportamento elástico até a falha, o que conduz à falta de ductilidade de estruturas de betão armado com varões de FRP. Outro inconveniente está relacionado com o elevado custo inicial e sensibilidade a temperaturas elevadas. Quando expostos a temperaturas elevadas, estes materiais passam por um processo de transição vítrea (que geralmente se inicia entre 40 e 120 °C) e que está associado a uma redução drástica das propriedades mecânicas (resistência e rigidez), assim como das propriedades de aderência ao betão. Apesar de este ser um aspeto bastante relevante para a indústria dos FRP's em geral, o uso de varões de GFRP para reforçar estruturas de betão, cuja resistência ao fogo é necessária para garantir a integridade estrutural, não é ainda recomendada visto que o calor excessivo enfraquece os polímeros.

3.3.1 PARÂMETROS CONDICIONANTES NAS TENSÕES DE ADERÊNCIA ENTRE O BETÃO E GFRP

O uso de barras de polímero reforçado com fibra de vidro, GFRP, como reforço interno de estruturas de betão vem crescendo, principalmente devido às vantagens que apresentam sobre as armaduras de aço, nomeadamente pelo seu baixo peso, elevada resistência e resistência à corrosão. No entanto, em temperaturas moderadamente elevadas, especialmente quando se aproxima da temperatura de transição vítrea (T_g) da matriz polimérica (geralmente entre 40 e 120 °C), sabe-se que a rigidez, resistência e propriedades de ligação desses varões são significativamente degradadas.

Ao contrário do aço, ainda não há padronização para as características da superfície das barras de FRP. Portanto, determinar as características de aderência de varões comerciais não padronizados é requisito fundamental para seu uso prático, pois influencia o mecanismo de transferência de carga entre a armadura e o betão.

Baena *et al.* (2009) apresentam os resultados de um programa experimental envolvendo 88 provetes de *pull-out* de betão preparados de acordo com as normas ACI 440.3R-04 e CSA S806-02. Foram utilizados varões (barras de reforço) de polímero reforçado com fibra de carbono e com fibra de vidro (CFRP e GFRP), bem como varões de aço, com comprimento de amarração constante de cinco vezes o diâmetro dos varões.

As barras FRP adquiridas de cinco empresas diferentes foram utilizadas neste estudo. Os tratamentos de superfície e as características dos varões usados são mostrados na Fig. 76.

A empresa A forneceu varões CFRP (R1) e GFRP (R2), ambos com superfície revestida de areia. A empresa B forneceu varões CFRP com uma superfície texturizada (R3) e varões GFRP com uma superfície de envolvimento helicoidal e algum revestimento de areia (R4). A empresa C forneceu varões GFRP com uma superfície ranhurada (R5). A empresa D forneceu varões (R6) semelhantes a R4: varões GFRP com um envoltório helicoidal na superfície, mas sem revestimento de areia. Finalmente, varões de aço (R7) foram usados para fins de comparação. Os diâmetros nominais dos varões eram 8, 12, 16 e 19 mm.



Fig. 76 – Características dos varões (R1 – R7) (Baena *et al.*, 2009).

Os testes de *pull-out* foram realizados de acordo com ACI 440.3R-04 e CSA S806-02 padrões. Um molde cúbico de 200 mm foi usado para fabricar as amostras removíveis. O comprimento de amarração das barras foi devidamente marcado e as barras foram colocadas na parte inferior do cubo de betão, Fig. 77 a). O betão foi vazado com as barras de FRP posicionadas dentro do molde, no centro do provete. A configuração do teste de *pull-out* é mostrada em Fig. 77 b). Os testes foram realizados utilizando uma máquina de teste servo-hidráulica com uma capacidade de 600 kN.

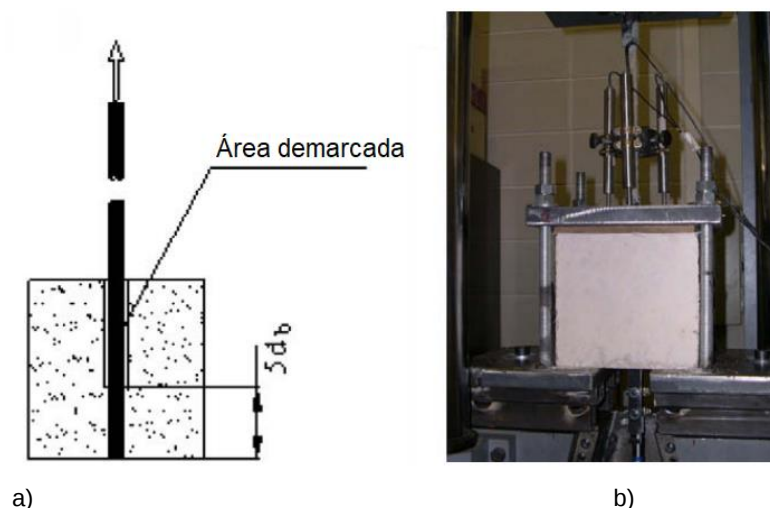


Fig. 77 – Configuração do teste *pull-out*, a) aplicação da barra, b) equipamento (Baena *et al.*, 2009).

Foi analisada a influência da superfície do varão, do diâmetro do varão e da resistência do betão nas curvas de tensão de aderência-deslizamento obtidas. Além disso, modelos analíticos sugeridos na literatura foram usados para descrever o ramo ascendente das curvas de tensão de aderência-deslizamento. Para calibrar os modelos, novas equações, levando em consideração a dependência do diâmetro do varão, foram apresentadas.

O comportamento de aderência entre as barras de FRP e o betão depende de muitos fatores, incluindo a resistência à compressão do betão, o diâmetro do varão e o tratamento da superfície. Um aumento na resistência de aderência e mudanças no modo de falha e superfície de falha foram observados ao alterar a resistência à compressão do betão.

Os resultados experimentais apresentados demonstraram que os varões com diâmetros maiores têm menor tensão máxima de aderência. No entanto, a rigidez inicial não é influenciada, principalmente pelo diâmetro do varão. Mudanças na rigidez inicial devido a uma mudança na resistência à compressão do betão foram observadas para alguns provetes com varões de GFRP. Os valores de deslizamento obtidos para GFRP foram maiores do que aqueles para barras de CFRP. Verificou-se também uma diferença no primeiro ramo de carregamento entre o deslizamento dos varões de aço e dos de FRP, uma vez que há um alto nível de rigidez sem deslizamento nos varões de aço, enquanto os varões de FRP desenvolvem deslizamento logo a partir do começo.

Rosa *et al.* (2018), apresentaram uma investigação experimental compreendendo testes de tração e arrancamento em varões GFRP revestidos com areia em temperaturas elevadas sob condições de estado estacionário.

Os varões GFRP utilizados neste estudo foram fornecidos por Owens Corning (modelo Aslan 100 - diâmetro comercial de 10 mm); estas barras são fabricadas através de um processo de pultrusão usando fibras de vidro e resina de viniléster, apresentando uma ligeira ondulação superficial criada por fibras helicoidais externas, juntamente com um revestimento de areia, Fig. 78. Tanto a areia quanto as fibras helicoidais são aplicadas após a pultrusão, mas antes do endurecimento da resina polimérica.

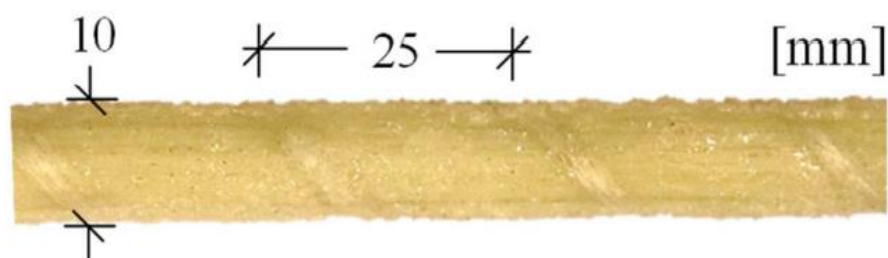


Fig. 78 – Varão GFRP revestido com areia (Rosa *et al.*, 2018).

Os provetes consistiam em cilindros de betão com um único varão de amarrado verticalmente ao longo do eixo central do cilindro.

A configuração usada nos testes de *pull-out* é ilustrada na Fig. 79. Os provetes foram posicionados numa moldura composta por duas placas de metal, conectadas com hastes de aço, que atuaram como um dispositivo de reação. A estrutura foi instalada dentro de uma câmara térmica Fig.79 b) que foi acoplada a uma máquina de teste universal com capacidade de carga de 250 kN, Fig.79 c).

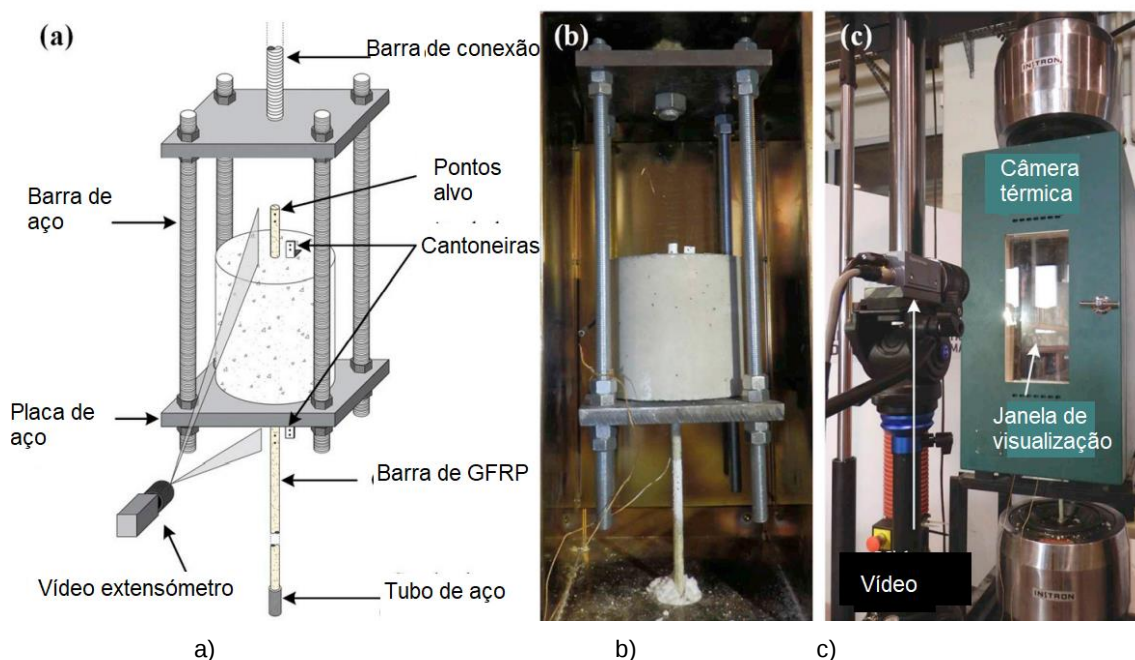


Fig. 79 – a) Configuração do teste pull-out, (b) visão geral do provete na câmara térmica; (c) visão externa da câmara térmica e extensômetro de vídeo (adaptado de Rosa *et al.*, 2018).

Os ensaios de tração foram realizados até 300°C, enquanto os ensaios de arrancamento foram realizados até 140°C (medidos na interface GFRP-betão); dois comprimentos de amarração dos varões foram considerados, como referido anteriormente.

Os resultados confirmaram a degradação das propriedades de tração dos varões GFRP com a temperatura elevada: a resistência à tração foi consideravelmente reduzida quando a T_g (98 °C) foi alcançada, com retenções de 60% e 57% a 150 °C e 300 °C, respetivamente; o módulo de elasticidade foi muito menos afetado, apresentando retenções de 95% e 87% para essas temperaturas.

Os resultados obtidos confirmaram que a rigidez e a resistência da interface do betão GFRP são significativamente reduzidas com o aumento da temperatura, especialmente quando a T_g dos varões GFRP é aproximada e excedida.

Observações visuais dos provetes após os testes mostraram que o dano sofrido pelos varões GFRP foi limitado principalmente à sua superfície, com a camada superficial de areia tendo sido completamente removida do núcleo dos varões; estas observações mostraram que o comportamento de aderência dos varões de GFRP revestidos a areia ao betão, tanto em temperatura ambiente quanto em temperaturas elevadas, é influenciado pela adesão (e atrito) entre o acabamento superficial e o núcleo do varão.

Um método numérico foi usado para modelar o comportamento da interface do betão GFRP, levando em consideração a natureza destes varões específicos; foram calibradas leis de tensão de aderência vs. escorregamento para diferentes temperaturas, as quais permitiram reproduzir os dados experimentais com elevada precisão.

Wang *et al.* (2006), propuseram um estudo experimental das propriedades mecânicas de varões de FRP, utilizadas como reforço interno em estruturas de betão, em temperaturas elevadas. Dois tipos de varões de FRP foram utilizados no estudo: (i) varões de poliéster reforçado com fibra de carbono, CFRP, de 9,5 mm de diâmetro e (ii) varões de poliéster reforçado com fibra de vidro, GFRP, de 9,5 mm e 12,7 mm de diâmetro. Para comparação, varões de reforço de aço convencionais de 10 mm e 15 mm de diâmetro também foram testados.

As amostras de teste foram obtidas pelo Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá (NRC) dos fabricantes e foram cortados para 1,35 m de comprimento e, em seguida, enviados para a Universidade de Manchester para a realização dos ensaios. Cada uma das amostras de teste de FRP tem uma superfície áspera consistente feita por incorporação de partículas de areia numa camada de resina de viniléster, como mostrado na Fig. 80. Observa-se que as cores dos varões GFRP e CFRP são cinzas e preto, respetivamente, devido às cores originais das fibras. A incorporação de partículas de areia na superfície dos varões é um dos métodos para aumentar a aderência entre os varões e o betão.

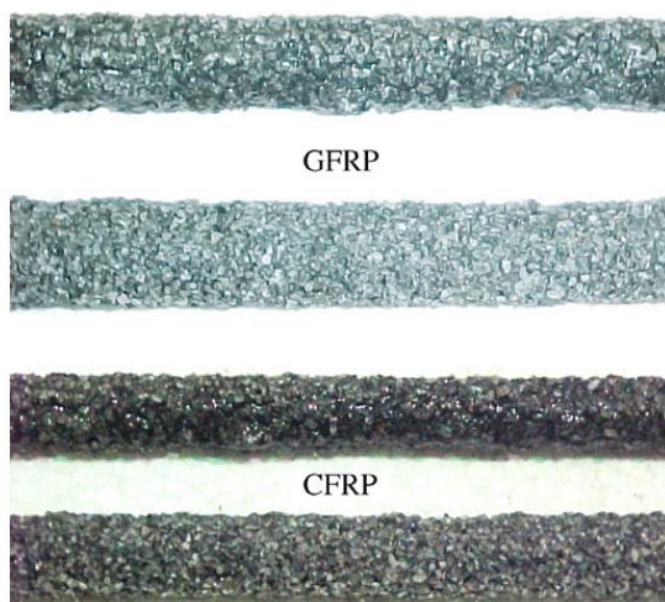


Fig. 80 – Tratamento de superfície de barras de FRP com incorporação de areia (Wang *et al.*, 2006).

Os testes de resistência a temperatura elevada foram realizados numa bancada de teste. Consiste em um macaco hidráulico e um forno aquecido eletricamente. As cargas foram aplicadas a partir do macaco hidráulico, conforme mostrado na Fig. 81. Durante o teste de força, a temperatura alvo foi mantida e a amostra de teste foi carregada até à rotura. Quatro defletómetros foram utilizados para monitorizar cada provete, conforme indicado na Fig. 81, dentro do forno para registar as deformações axiais da amostra em cada extremidade.

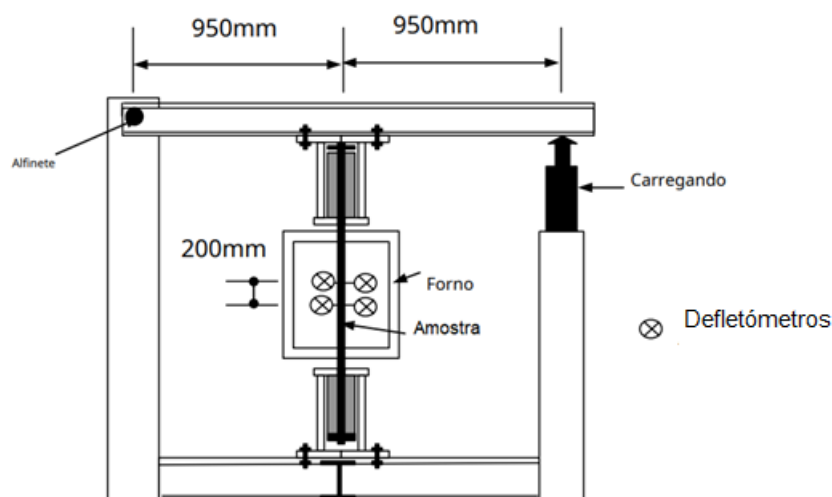


Fig. 81 – Instalação de teste de temperatura elevada (Wang *et al.*, 2006).

A principal conclusão de Wang *et al.* (2006) é a de que uma temperatura de cerca de 350°C parece ser crítica para barras de FRP. Abaixo desta temperatura, as barras de FRP retêm um nível muito alto (90%) da sua rigidez original. Além disso, os resultados dos testes com repetição foram semelhantes, apresentando menos de 10% de diferença, indicando alta confiabilidade das propriedades mecânicas dos FRP medidas. As reduções de resistência de diferentes barras de FRP são quase lineares, sendo cerca de 45% e 35% das resistências à temperatura ambiente original das barras compostas de GFRP e CFRP, respetivamente, a 350°C. Para temperaturas mais altas, algumas barras de FRP ainda podem ter alta resistência e rigidez. No entanto, a variabilidade nos testes com repetição foi muito alta e existem maiores incertezas se as barras de reforço de FRP terão confiabilidade suficiente nas suas propriedades mecânicas de tração a temperaturas elevadas para aplicações práticas.

3.3.2 COMPORTAMENTO AO FOGO

Os varões em polímeros reforçados com fibra de basalto (BFRPs), são novos materiais inorgânicos naturais com propriedades mecânicas distintas que têm sido investigados recentemente no campo da construção. Geralmente, os varões de FRPs não apresentam cedência antes da rotura, que é frágil, ao contrário dos varões em aço e o seu comportamento, quando expostas ao fogo, ainda está sob investigação, como documentado anteriormente.

Hassan *et al.* (2021) apresentaram um estudo experimental e analítico para obter maior conhecimento sobre as características e a resistência ao fogo de uma viga de betão reforçada com BFRPs e com varões de aço. Oito vigas de betão foram produzidas e testadas até a falha em temperatura ambiente e sob fogo direto a 500°C por 2 h.

Oito provetes de vigas de betão armado com secção de 150 mm x 300 mm, com um vão total de 1800 e de 1650 mm entre os eixos dos apoios foram testadas. Os provetes de viga foram classificados em dois grupos (G1, G2) de acordo com o grau de incêndio. A primeira

viga foi reforçada com três varões de aço, a segunda amostra usando dois varões de aço e um de BFRP, a terceira viga usando um varão de aço e dois de BFRP e a quarta amostra usando três varões de BFRP. O segundo grupo de vigas apresentou os mesmos conjuntos de reforços que o primeiro grupo, porém foram expostos ao fogo a uma temperatura de 500°C. Estribos convencionais de aço de 6 mm de diâmetro espaçados a 70 mm foram aplicados no vão de corte. Para o reforço superior, foram considerados dois varões de aço de 10 mm foram. Os detalhes do reforço e a seção transversal das vigas testadas são ilustrados na Fig. 82. As vigas foram produzidas e curadas regularmente por uma aspersão de água e cobertas para evitar a liberação de umidade da superfície de betão até a data do teste.



Fig. 82 – Detalhes das armaduras, e cofragem da viga (Hassan *et al.*, 2021).

Foi utilizado um forno de aço com sete queimadores alinhados paralelos entre; o forno foi aquecido até a temperatura necessária, ou seja, (500°C) e então mantida a esta temperatura por 2 h. As vigas, cubos e cilindros sujeitos a fogo direto são mostrados em Fig. 83. O regime utilizado para o arrefecimento das vigas após incêndio foi o ar.



Fig. 83 – Vigas, cubos e cilindros sujeitos a fogo (Hassan *et al.*, 2021).

Todos os provetes da viga foram submetidos a flexão em quatro pontos sob um controle de força incremental que aumentou de 2 em 2kN até o aparecimento de fendas e, em seguida, de 4 em 4kN até a carga de rotura. A configuração de teste e instrumentação são ilustradas na Fig. 84.



Fig. 84 – Configuração de teste experimental, célula de carga e registrador e leitor de dados (Hassan *et al.* 2021).

Os resultados mostram que as vigas com reforço de aço e basalto apresentaram melhor resistência ao corte, maior resistência à fissuração e menor grau de fragilidade na rotura. Os resultados também mostraram que as vigas com varões de FRP's tiveram melhor resistência à degradação quando foram expostas ao fogo, pois o fator de redução de carga de falha para a viga de FRP's não exposta foi de 6,17% em comparação com a viga de aço que foi de 22,32%. Os autores referem ainda que são necessários mais estudos para justificar as observações em detalhe e determinar as aplicabilidades destes materiais em diferentes condições.

Rosa *et al.* (2020), apresentaram investigações experimentais sobre a resistência ao fogo de faixas de laje de betão armado com barras de GFRP revestidas de areia. As faixas de laje, laje de betão armado com barras de GFRP, e aço e betão foram simultaneamente submetidas ao fogo padrão ISO 834 e a uma carga de serviço aplicada (flexão em quatro pontos).

As temperaturas foram monitorizadas no vão exposto, nas extremidades da armadura longitudinal (protegida do aquecimento direto) e ao longo das emendas (localizadas intencionalmente no vão exposto ao fogo); os ensaios permitiram traçar as respostas térmicas nessas interfaces GFRP-betão e relacionar essas respostas com os resultados dos ensaios de tração e arrancamento realizados anteriormente para temperaturas elevadas nos mesmos materiais.

A geometria das faixas de laje é ilustrada na Fig. 85. As faixas de laje tinham seção transversal de 250 × 110 mm (largura e espessura), 1500 mm de comprimento e vão livre de 1400 mm. A armadura interna foi composta por 3 barras longitudinais com diâmetros de 10 mm e 6 mm, respetivamente para as camadas inferior e superior. O reforço (6 mm de diâmetro) também foi aplicado no sentido transversal, nas camadas inferior e superior.

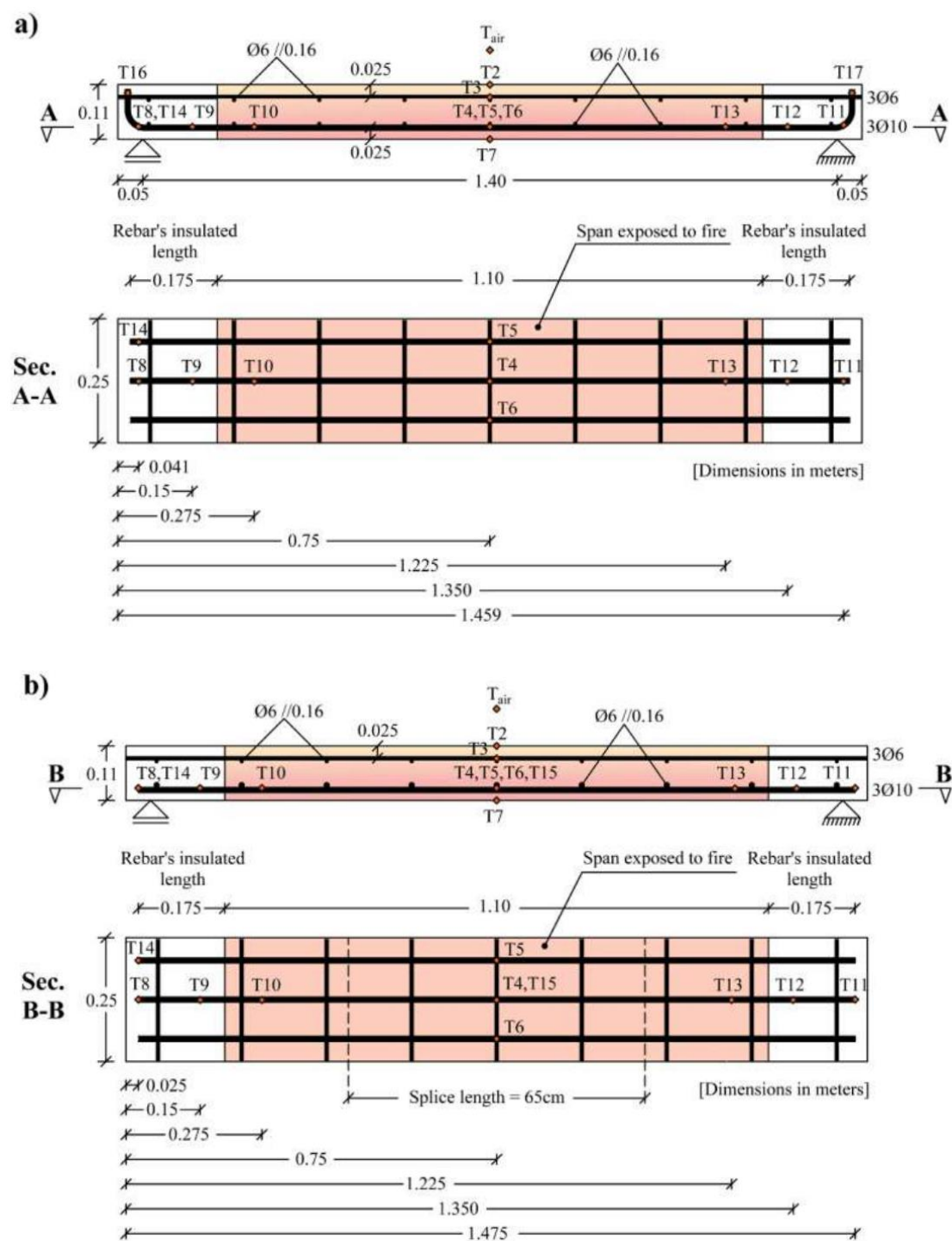


Fig. 85 – Distribuição do reforço e posição dos termopares: (a) faixa de laje RC C2.5; (b) faixa de laje GFRP-RC (dimensões em metros) (Rosa *et al.*, 2021).

Foram realizados ensaios de flexão à temperatura ambiente para caracterizar a resposta mecânica das faixas de laje. Os ensaios foram realizados na configuração de flexão em

quatro pontos simplesmente apoiada, com duas cargas concentradas aplicadas em terços do vão de 1,40 m; uma configuração semelhante foi usada nos testes de resistência ao fogo.

Ao contrário do que os autores esperavam (esmagamento do betão), as faixas de laje com armadura contínua GFRP (séries GFRP C2.5 e GFRP C3.5) e armadura de emenda sobreposta com comprimentos de sobreposição de 60 cm e 65 cm (GFRP LS60 e GFRP LS65) apresentaram falha por corte, conforme mostrado na Fig. 86 a). Duas razões principais explicam essa falha prematura: as propriedades mais baixas do betão em comparação com o que foi considerado no projeto; a possível sobrestimação, pelo CNR-DT 203/2006, da contribuição da armadura de FRP para a capacidade de corte das lajes. No caso da faixa de laje GFRP LS30, a falha ocorreu devido ao deslizamento dos varões ao longo das emendas sobrepostas Fig. 86 b), com fissuras extensas e delaminação local de parte do betão de recobrimento. Este era um dos modos de falha esperados, uma vez que o comprimento de sobreposição, de 30 cm, é cerca de metade do comprimento de sobreposição mínimo recomendado para o reforço com FRP (à temperatura ambiente).

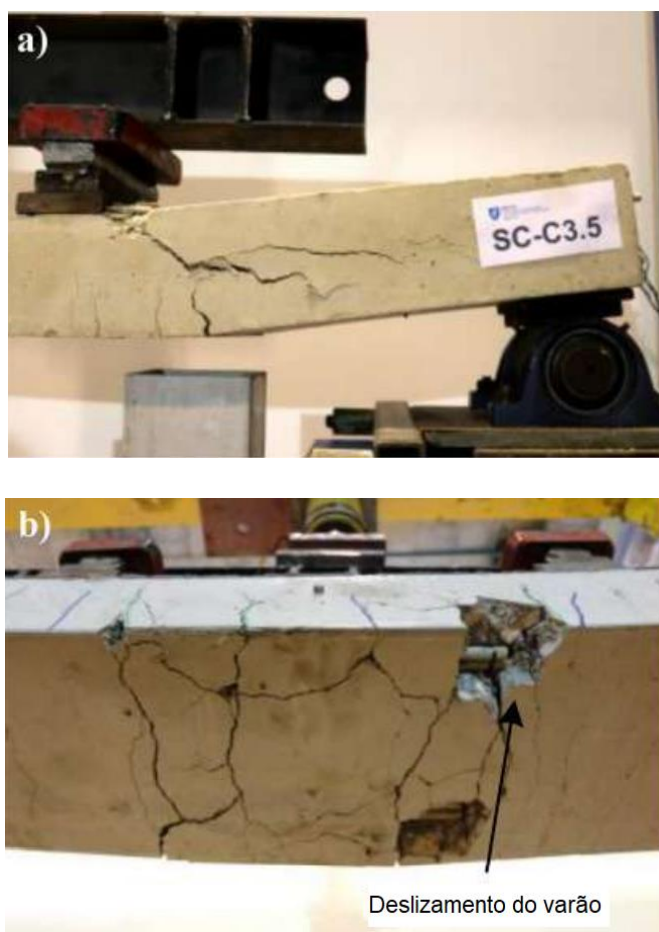


Fig. 86 – Modos de falha típicos observados em testes de flexão à temperatura ambiente: a) rotura por corte, b) deslizamento dos varões e fragmentação local do betão (laje GFRP LS30) (adaptado de Rosa *et al.*, 2021).

A Fig. 87 apresenta a configuração usada nos testes de resistência ao fogo. Para minimizar os fenômenos de convecção no ar acima da laje, o espaço entre as lajes e o sistema de exaustão foi coberto com um tecido não inflamável. As lajes foram expostas diretamente ao fogo na sua superfície inferior num comprimento de 1,10 m, conforme mostrado na Fig. 87 b) e foram aplicadas duas cargas concentradas nas lajes em terços de seu vão.

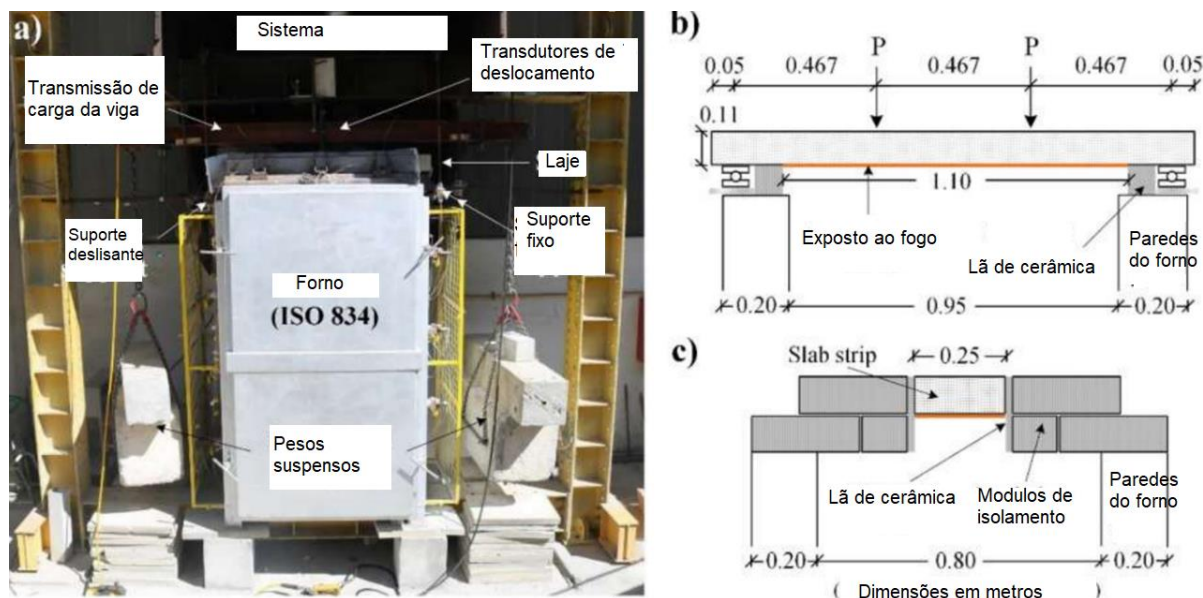


Fig. 87 – Configuração dos testes de resistência ao fogo: a) visão geral; b) longitudinal e c) esquema transversal do forno (adaptado de Rosa *et al.*, 2021).

Os resultados obtidos confirmam que as lajes de GFRP-RC podem atingir resistências ao fogo relativamente longas, desde que as zonas de ancoragem dos varões (onde as temperaturas foram monitorizadas continuamente), permaneçam suficientemente frias: a temperatura média da armadura ao longo do comprimento de ancoragem foi mantida abaixo de 108°C em todos os testes, ligeiramente acima da Tg dos varões (98°C). As faixas de laje reforçadas com varões GFRP contínuos atingiram resistências ao fogo entre 80 min e 150min, falhando devido à rotura à tração da armadura no meio do vão para temperaturas nos varões acima de 570°C, muito depois da aderência ao betão ter sido perdida na maior parte da extensão aquecida. Para as faixas de laje com varões com emendas expostas ao calor, a resistência ao fogo foi reduzida para menos de 20 min, destacando o impacto notável deste detalhe construtivo no desempenho ao fogo. Para emendas sobrepostas de 30 cm de comprimento, a falha prematura ocorreu devido ao deslizamento nas emendas para uma temperatura (105°C) próxima da Tg; em lajes com comprimentos de sobreposição mais longos, o deslizamento ocorreu para temperaturas moderadamente mais altas (146°C a 176°C). Conforme esperado, o aumento do recobrimento proporcionou uma proteção térmica adicional aos varões, mas resultou apenas num ligeiro aumento da resistência ao fogo. As faixas de laje com menor resistência do betão apresentaram menor resistência ao fogo, devido a fissuras mais extensas, o que levou a um maior aquecimento (localizado) da armadura.

3.4. SISTEMAS DE REFORÇO

Na década de 60, começam a surgir os primeiros estudos sobre o reforço exterior de estruturas de betão armado com chapas metálicas; este reforço era à flexão e consistia na introdução de armadura na zona tracionada das peças de betão, ou seja, eram coladas exteriormente através de um adesivo à base de resinas epoxídicas.

Na década de 80, houve a necessidade da redução dos custos de produção e deu-se uma expansão da produção de compósitos acompanhada pelo desenvolvimento de processos de fabrico em série, tais como a pultrusão. Assim, surge a utilização do sistema de reforço em estruturas, utilizando os compósitos de FRP, colados exteriormente (técnica EBR) em alternativa à colagem com chapas de aço. O início da investigação na área de fabrico de laminados para colagem deu-se na Suíça (Silva, 2013).

A partir desta altura, surgiram um número elevado de investigadores e organizações no sentido de integrar os FRP em aplicações de Engenharia Civil bem como a definição de critérios de dimensionamento, destacando-se três frentes: a Ásia nomeadamente, o Japão, interessado em alternativas de pré-esforço por pré-tensão e no reforço de estruturas aos sismos; a América do Norte, motivada pelas soluções de problemas de durabilidade de pontes e a Europa preocupada com a necessidade de preservar e reabilitar o património histórico edificado (Silva, 2013).

3.4.1 TÉCNICAS DE REFORÇO

Recentemente, os materiais compósitos de polímeros reforçados com fibras têm mostrado grande promessa na reabilitação de estruturas de betão armado existentes. A reabilitação destas estruturas pode ser na forma de reforço de membros estruturais, reparação de estruturas danificadas ou reforço para suprir deficiências para respostas sísmicas. Em qualquer caso, os materiais compósitos são uma excelente opção para uso como reforço externo devido à sua alta resistência à tração, leveza, resistência à corrosão, alta durabilidade e facilidade de instalação. Foi demonstrado que o reforço de FRP ligado externamente é aplicável para o reforço de muitos tipos de estruturas de betão armado, como colunas, vigas, lajes, paredes, túneis, chaminés e silos, e pode ser usado para melhorar as resistências à flexão e corte, fornecendo também ductilidade às estruturas quando sujeitas a compressão (e.g., encamisamento).

A fim de tirar o máximo proveito da potencial ductilidade da estrutura de betão armado, é desejável assegurar que a flexão ao invés do corte governe a resistência final. A rotura por corte é “catastrófica” e ocorre sem aviso prévio. Muitas das vigas de betão armado existentes foram consideradas deficientes no que diz respeito à resistência ao corte e precisam de reforço. As deficiências ocorrem por vários motivos, como reforço de corte insuficiente ou redução na área de aço devido à corrosão, aumento da carga de serviço e defeitos de construção. Nessas situações, foi demonstrado que a armadura de FRP ligada externamente pode aumentar a capacidade de corte.

Khalifa *et al.* (1999), no seu trabalho experimental, desenvolveram um estudo sobre o comportamento ao corte e os modos de rotura de vigas de betão armado com seção em T reforçadas com placas de CFRP, cuja resistência ao corte era insuficiente.

Os parâmetros investigados neste estudo incluíram os fatores que afetam a resistência ao corte, como esquemas de encamisamento, quantidade de CFRP, direção das fibras ($90^\circ/0^\circ$) e comprimento de ancoragem final de CFRP.

Foram utilizadas nos ensaios seis vigas betão em escala real com uma seção transversal em forma de T. Os provetes foram reforçados com barras de aço longitudinais sem nenhuma armadura de corte de aço na região de teste para favorecer esse modo de rotura. Os detalhes e as dimensões das vigas são mostrados na Fig. 88.

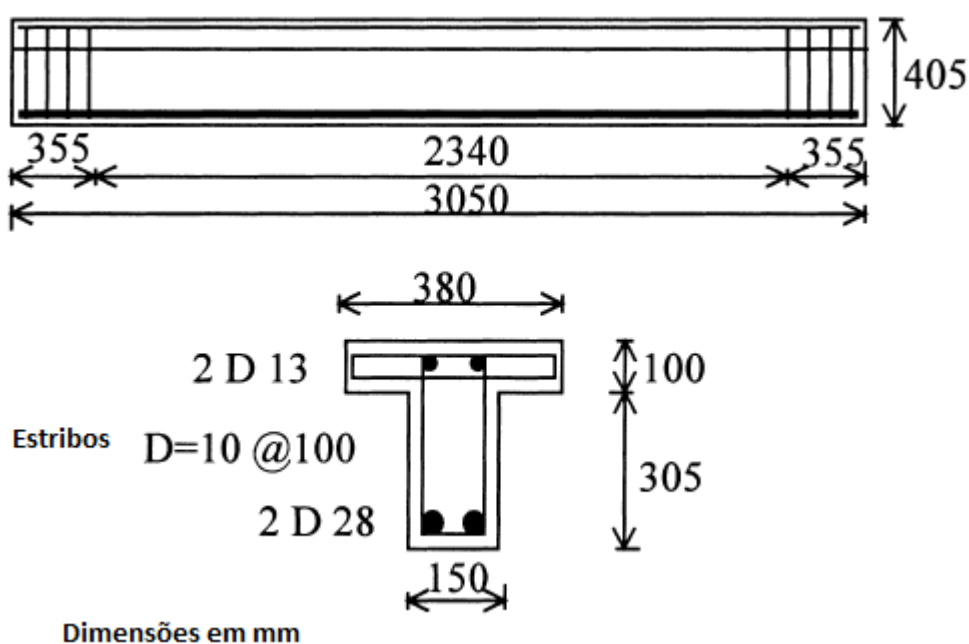


Fig. 88 – Detalhe das vigas estudadas (Khalifa *et al.* 1999).

A viga de referência tem a designação BT1. A amostra BT2 foi reforçado usando reforços em U contínuo ligado à superfície em todo o vão da viga. Os reforços foram feitos de laminas de CFRP de camada única com a direção orientada perpendicularmente ao eixo longitudinal da viga (90°). Nenhuma ancoragem de extremidade foi usada para a viga BT2. Os reforços de CFRP foram aplicados de acordo com as recomendações do fabricante.

A viga BT3 foi reforçada com duas camadas perpendiculares de direção transversal de folhas de CFRP ($90^\circ/0^\circ$). A primeira camada foi igual à viga BT2 e a segunda camada foi colada aos dois lados da viga com a direção paralela ao eixo da viga (ou seja, a 0°). O objetivo de adicionar uma camada horizontal (0°) foi o de investigar se tal teria algum efeito no aumento da capacidade de corte da viga, aumentando a resistência ao corte ao longo da fenda diagonal potencial entre a carga e a reação. A viga BT4 foi reforçada com tiras de CFRP em forma de U orientadas a 90° .

O provete BT5 foi reforçado com tiras de CFRP fixadas apenas nos dois lados das vigas e o BT6 foi reforçado de maneira semelhante ao BT2 mas as extremidades dos reforços em U foram ancorados às margens em ambos os lados da viga usando o sistema de âncora em U proposto.

Os resultados do teste indicaram que o reforço de CFRP ligado externamente pode ser usado para aumentar a capacidade de corte das vigas. Para as vigas testadas no programa experimental, foi obtido um aumento na resistência ao corte de 35 - 145%.

O desempenho do CFRP ligado externamente pode ser melhorado significativamente se a ancoragem adequada for fornecida. O sistema de âncora em U proposto é recomendado onde a ligação e/ou comprimento de desenvolvimento de FRP são críticos de acordo com o procedimento de projeto. A aplicação de CFRP nas laterais da viga oferece menor contribuição de corte em comparação com o reforço em U.

Rashid *et al.* (2019), propôs testar o desempenho à flexão de vigas de betão armado reforçadas com placas de polímero reforçado com fibra de carbono, CFRP, as quais foram aplicadas no intradorso das vigas e pré-tensionadas em vários níveis. Seis vigas foram preparadas, pré-tensionadas a 20 e 40% da resistência final da placa de CFRP e foram submetidas a testes de flexão de quatro pontos para avaliar a carga de fissuração, a carga de cedência e a carga de rotura. A deformação da placa de CFRP e o deslocamento a meio vão da viga foram monitorizadas ao longo do carregamento.

Para avaliar o desempenho das vigas de betão armado reforçadas com CFRP pré-tensionado, foram realizados ensaios de flexão de quatro pontos, Fig. 89.

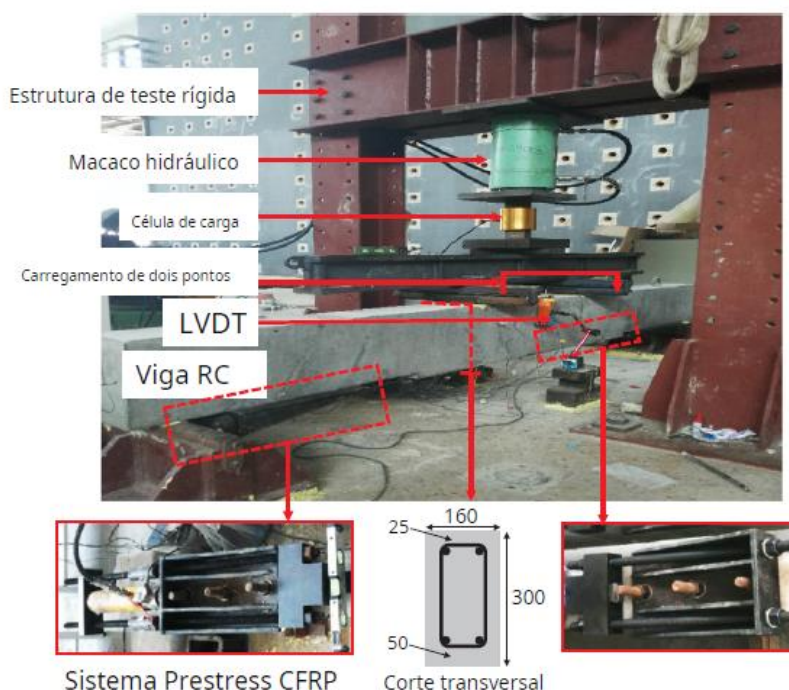


Fig. 89 – Configuração de teste da viga reforçada com CFRP pré-tensionado e configuração de pré-tensão (Rashid *et al.*, 2019).

Os resultados obtidos mostraram que a carga de fendilhação, carga de cedência e carga final foram aumentadas com a aplicação de placas de CFRP, e as cargas mencionadas foram aumentadas ainda mais com o nível de pré-tensão.

A rigidez inicial foi aumentada enquanto a ductilidade diminuiu com o nível de pré-tensão. Foi estabelecido uma relação linear entre o índice de ductilidade (deslocamento para a carga final/deslocamento para a carga de cedência) e o nível de pré-tensão, e concluiu-se que uma redução de 10% no índice de ductilidade foi observada com um aumento de 10% na pré-tensão; esta tendência foi válida de 0 a 50% do nível de pre-tensão.

A utilização significativa da placa de CFRP mesmo sem pré-tensionamento é atribuída ao sistema de ancoragem da extremidade, o que contribui substancialmente para aumentar a capacidade de flexão e reduzir a probabilidade de descolamento do laminado de CFRP, resultando no modo de falha por flexão-esmagamento. Firmo *et al.*, (2014), apresentaram investigações experimentais sobre o comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com faixas de polímero reforçado com fibra de carbono, CFRP, ligadas externamente. Diferentes esquemas de proteção contra o incêndio foram também estudados, compreendendo uma camada de isolamento mais fina ao longo do intradorso inferior das vigas e outra mais espessa nas zonas de ancoragem de CFRP. Os principais objetivos desta investigação foram compreender em maior profundidade a eficácia estrutural dos sistemas de reforço de CFRP durante o incêndio, validar a estratégia para o projeto de sistemas de proteção contra incêndio em temperaturas críticas e sistemas de ancoragem. Para tal, foram realizados ensaios de resistência ao fogo em vigas reforçadas à flexão com tiras de CFRP instaladas de acordo com a técnica EBR. Diferentes esquemas de proteção contra incêndio foram estudados, compreendendo camadas de isolamento mais finas ao longo do intradorso inferior das vigas e outras mais espessas nas zonas de ancoragem de CFRP. Além disso, os (potenciais) efeitos benéficos da aplicação de ancoragens mecânicas nas extremidades das tiras de CFRP e do uso de adesivos com elevada Tg também foram avaliados no desempenho ao fogo do sistema de reforço.

O programa experimental consistiu em nove testes de resistência ao fogo, conduzidos num forno de escala intermedia, de vigas reforçadas à flexão com tiras de CFRP instaladas de acordo com a técnica EBR. Como referência, uma viga de betão armado não reforçado também foi testada. As vigas tinham 1,50 m de comprimento, 0,10 m de largura, 0,12 m de profundidade (Fig. 90 a) a c)). A armadura interna de aço era composta por quatro varões longitudinais de 6 mm e estribos transversais de 6 mm distanciados de 0,06 m, Fig.90 b) e c). O sistema de reforço para flexão compreendeu laminados de CFRP e adesivos de ligação epóxi (foram usados dois adesivos diferentes, epóxi 1 e epóxi 2). O epóxi 1 é um adesivo convencional usado em sistemas de refoço com CFRP e o epóxi 2 é um adesivo de elevada Tg.

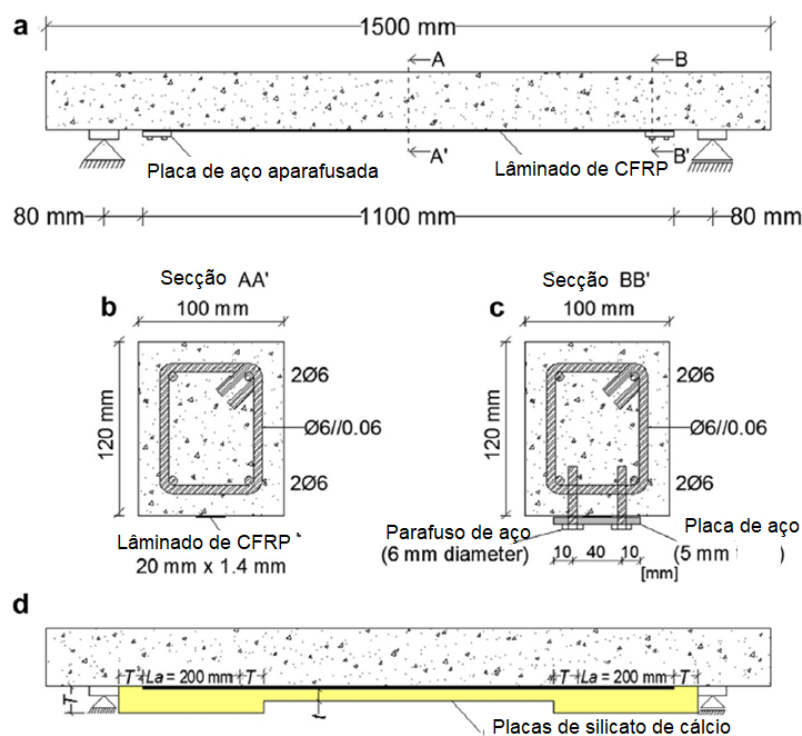


Fig. 90 – Geometria dos provetes: (a) vista longitudinal do provete com fixações mecânicas nas extremidades da tira de CFRP; (b) seção transversal atual; (c) seção transversal com ancoragem mecânica; (d) geometria longitudinal do sistema de proteção contra incêndio (adaptado de Firmo *et al.*, 2014).

Os testes de resistência ao fogo foram realizados num forno vertical a gás propano, com dimensões externas de 1,35 m (comprimento) 1,20 m (largura) 2,10 m (altura). As vigas testadas foram colocadas sobre a parte superior aberta do forno conforme mostrado na Fig. 91. Com relação às condições de contorno térmico, a face inferior das vigas foi diretamente exposta à curva padrão de incêndio (temperatura-tempo) definida na ISO 834, enquanto a sua face superior foi submetida à temperatura ambiente. A fim de selar as aberturas laterais do forno, duas camadas de isolamento feitas de lã de cerâmica foram colocadas adjacentes às vigas.

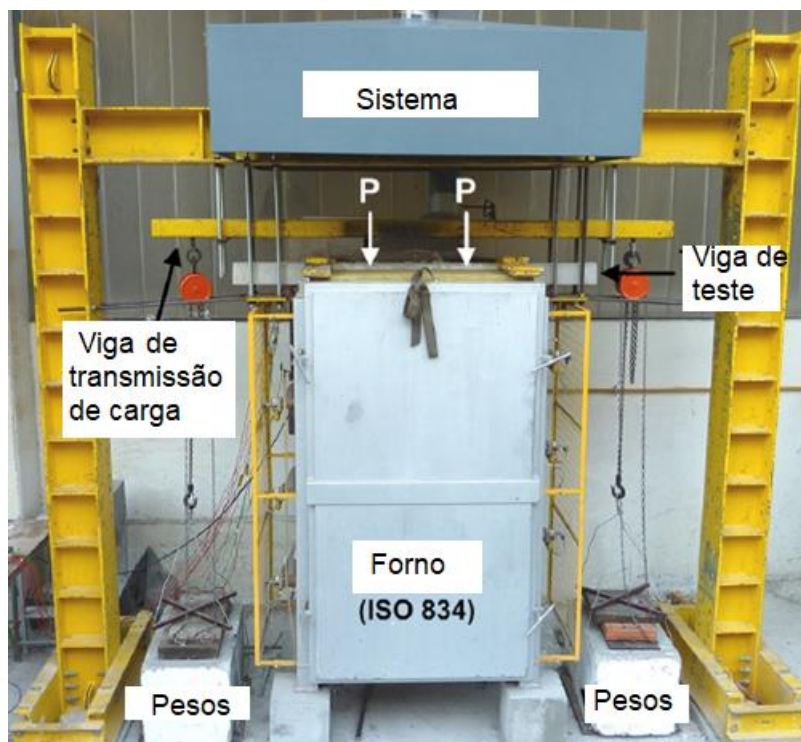


Fig. 91 – Visão geral do teste de forno (adaptado de Firmo *et al.*, 2014).

Os resultados obtidos mostraram que o sistema de reforço é capaz de reter sua eficácia estrutural através de um mecanismo de cabo, mesmo após o descolamento dos laminados de CFRP na zona central das vigas; foi possível estender a resistência ao fogo do sistema CFRP em até 70 min. Para as vigas testadas e esquemas de isolamento adotados, o descolamento do sistema de reforço ocorreu quando a temperatura média do adesivo nas zonas de ancoragem atingiu valores na faixa de 1,2 a 1,5 vezes a T_g , demonstrando assim que a temperatura crítica nas zonas de ancoragem é ligeira a moderadamente mais alta do que a T_g do adesivo (determinado a partir de testes de DMA).

3.4.2 REFORÇO SÍSMICO

As paredes resistentes (ao corte) em betão armado são um dos elementos mais comuns para edifícios altos devido à sua elevada rigidez lateral. Uma parede resistente é um elemento vertical que é projetado para resistir a forças laterais no plano, normalmente decorrentes da ação do vento ou de sismos.

No entanto, por muito tempo, tem sido bastante difícil lidar com questões como a reabilitação pós-sismo e corrosão em ambientes agressivos deste tipo de elementos. O uso de reforços de FRP em paredes resistentes é considerado uma solução promissora para esta questões.

Xinyu *et al.* (2020) propuseram dois tipos de grelhas híbridas de CFRP-aço, para avaliar o comportamento cíclico de paredes resistentes em betão armado. A influência da proporção híbrida de grades de aço e CFRP no comportamento cíclico da parede de corte foram

exploradas em relação a uma das configurações que foi considerada como tendo melhor resistência à corrosão. Seis paredes de corte em grande escala foram testadas sob carregamento cíclico reverso para avaliar o desempenho cíclico, incluindo os modos de falha, padrão de fendilhação, comportamento histerético, degradação das resistência e rigidez, ductilidade, capacidade de dissipação de energia e deformação residual dos provetes. A secção do compósito de polímero com fibra de carbono tinha 7 mm de largura e 1 mm de espessura. Uma grade bidimensional típica e a conexão da junta são mostradas na Fig. 92.

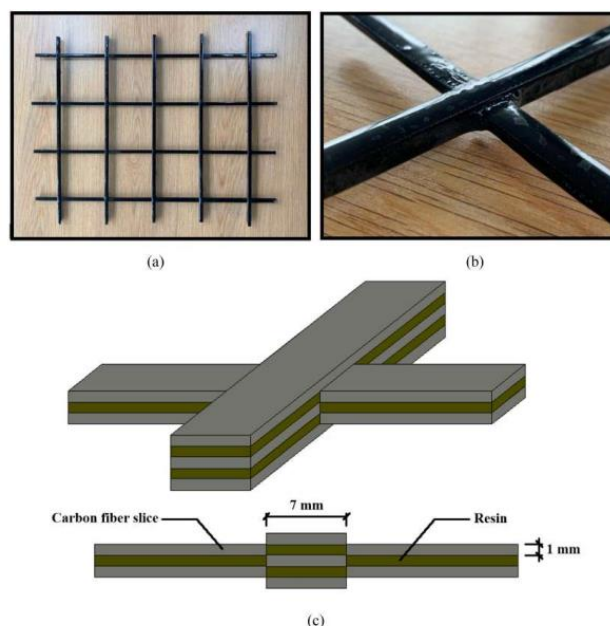


Fig. 92 – Detalhes da grade CFRP: a) grade CFRP, b) junção da grade de CFRP, c) conexão conjunta (Xinyu *et al.*, 2020).

A parede resistente de referência foi projectada com duas camadas verticais de rede de reforço de aço. Foram adotados reforços transversais em aço com um diâmetro de 10 mm e um espaçamento de 100 mm para evitar a ocorrência de rotura por corte. Esta configuração de reforço foi designada como SS. Para a segunda, terceira e quarta paredes resistentes, foram usadas três camadas de reforços, incluindo duas camadas externas de grades de CFRP e uma camada intermédia de aço; esta configuração de reforço híbrido foi designada como CSC. As relações de reforço vertical e horizontal dos provetes de CSC eram quase as mesmas, enquanto as relações de aço para grades de CFRP por área eram de cerca de 1:1, 2,5:1 e 1:2,5. A quinta parede de corte foi projetada com duas camadas externas de telas de reforço de aço e a camada interna de grade de CFRP, denominada SCS. Esta configuração de armadura híbrida foi projetada com a mesma taxa de armadura e proporção híbrida da segunda para investigar a influência de diferentes arranjos de malhas de CFRP no desempenho de paredes de corte. O reforço da última parede de corte também foi projetado com três camadas e totalmente reforçado com redes de CFRP; o provete foi designado de CCC.

A configuração do teste é ilustrada na Fig. 93. A carga axial constante foi de 10% da resistência à compressão axial das paredes e foi aplicada no topo do provete por um macaco hidráulico. Foi montado um sistema de rolamentos na estrutura de reação vertical acima do macaco para garantir que o macaco se podia mover com a amostra. Quatro apoios laterais foram dispostos em ambos os lados da amostra para evitar o movimento para fora do plano durante o processo de carregamento. Uma roldana foi montada na extremidade de cada haste de suporte para evitar resistência adicional ao painel de parede. As amostras foram carregadas por um atuador MTS de 50 toneladas fixado na parede de reação, que foi conectado à viga de carregamento superior.

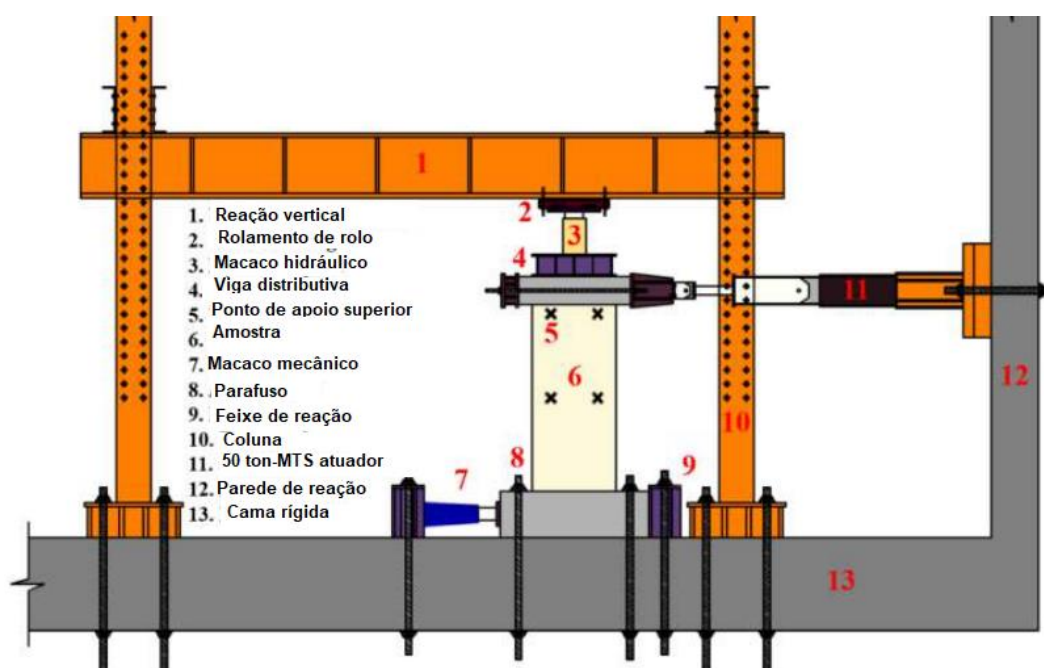


Fig. 93 – Desenho esquemático configuração do teste (adaptado de Xinyu *et al.*, 2020).

Os resultados experimentais mostraram que todas as paredes resistentes reforçadas com grades de CFRP exibiram maior capacidade de carga e menor deformação residual do que as paredes resistentes sem reforço. A capacidade de carga da parede resistente com grades de CFRP colocadas como camadas externas (CSC) foi 7,9% maior do que a parede com grades de CFRP no centro (SCS). Além disso, a capacidade de carga da parede resistente com arranjo CSC aumentou com a proporção de grades de CFRP na armadura, tendo-se verificado uma proporção híbrida ótima para a capacidade de dissipação de energia. Quando 50% da armadura de aço foi substituída por grades de CFRP, a capacidade de dissipação de energia foi mantida ao nível da parede resistente RC, enquanto a capacidade de carga aumentou em 25,8%.

O reforço em estruturas de alvenaria também tem aumentado nos últimos anos, chamando a atenção de muitos investigadores, sendo um dos requisitos o reforço sísmico. Isto porque as alvenarias estão sujeitas a apresentarem danos substanciais (se não falhas) quando são sujeitas a ações sísmicas. Os modos de falha de paredes de alvenaria não reforçada

sujeitas a carregamento no plano são fendas diagonais, deslizamento e colapso. Um dos métodos mais comumente usados nos últimos anos para o reforço das estruturas de alvenaria é a aplicação de materiais compósitos ligados externamente. O uso de FRPs tornaram-se populares também nestas aplicações devido ao seu peso reduzido e ao seu alto nível de desempenho mecânico (o que também implica custos significativos). No entanto, o potencial dos FRPs geralmente está longe de ser totalmente explorado quando são aplicados em materiais de alvenaria com baixa resistência à tração e ao corte. Além disso, apesar dos benefícios que proporcionam, os materiais FRP sofrem os efeitos indesejáveis dos ligantes orgânicos (resinas epóxi): mau comportamento em altas temperaturas (a sua temperatura máxima de serviço deve ser inferior à temperatura de transição vítrea da resina), dificuldades de aplicação sob condições húmidas (na ausência de qualquer formulação especial, a resina não deve ser aplicada em superfícies molhadas), forte impacto ambiental (dificuldade de remoção, por exemplo) e alguns riscos potenciais à saúde para as pessoas que executam sua aplicação.

Reboul *et al.* (2018) apresentaram os resultados de uma campanha experimental sobre paredes de alvenaria solicitadas no próprio plano e reforçadas com FRPs. Uma série de cinco paredes foi construída, sobre uma base de betão armado, possuindo também um capeamento em betão armado para distribuição das cargas laterais e verticais da maneira mais uniforme possível. Uma das paredes foi tomada como sendo a de referência e quatro foram reforçadas: duas foram reforçadas externamente com FRPs, enquanto as outras duas foram reforçadas com argamassa reforçada com têxtil. No trabalho deste mesmo autor, os materiais de reforço não foram aplicados em toda a superfície da alvenaria: as paredes foram reforçadas apenas com chapas de compósito verticais, espaçadas para reduzir a quantidade de materiais utilizados para o reforço. Cada parede foi testada sob uma carga de compressão vertical (mantida constante) e foram aplicados deslocamentos horizontais reversos cíclicos até a falha.

A parede CFRP (a parede de alvenaria não confinada reforçada com Polímero reforçado com fibra de carbono; Fig. 94 b) foi reforçada simetricamente pela aplicação de uma tira de CFRP de 70 mm de largura em ambos os lados de cada uma das faces da parede. A parede GFRP (a parede de alvenaria não confinada reforçada com GFRP; Fig 94 c) foi reforçada simetricamente pela aplicação de duas folhas de GFRP sobrepostas de 400 mm de largura em ambos os lados de cada uma das faces da parede.

A parede CTRC (a parede de alvenaria não confinada reforçada com CTRC (fibras de carbono incorporadas numa matriz cimentícia; Fig.94 d) foi reforçada simetricamente pela aplicação de uma faixa CTRC de 100 mm de largura em ambos os lados de cada uma das faces da parede. A parede GTRC (a parede de alvenaria não confinada reforçada com GTRC (fibras de vidro incorporadas numa matriz cimentícia); Fig. 94 e) foi reforçada simetricamente pela aplicação de duas faixas de GFRP sobrepostas de 200 mm de largura em ambos os lados e no centro de cada uma das faces da parede.

Todas as chapas de reforço, independentemente de serem em FRP ou TRC (argamassa reforçada com têxteis, foram ancoradas à fundação de betão armado por meio de fibras de carbono monodirecionais.

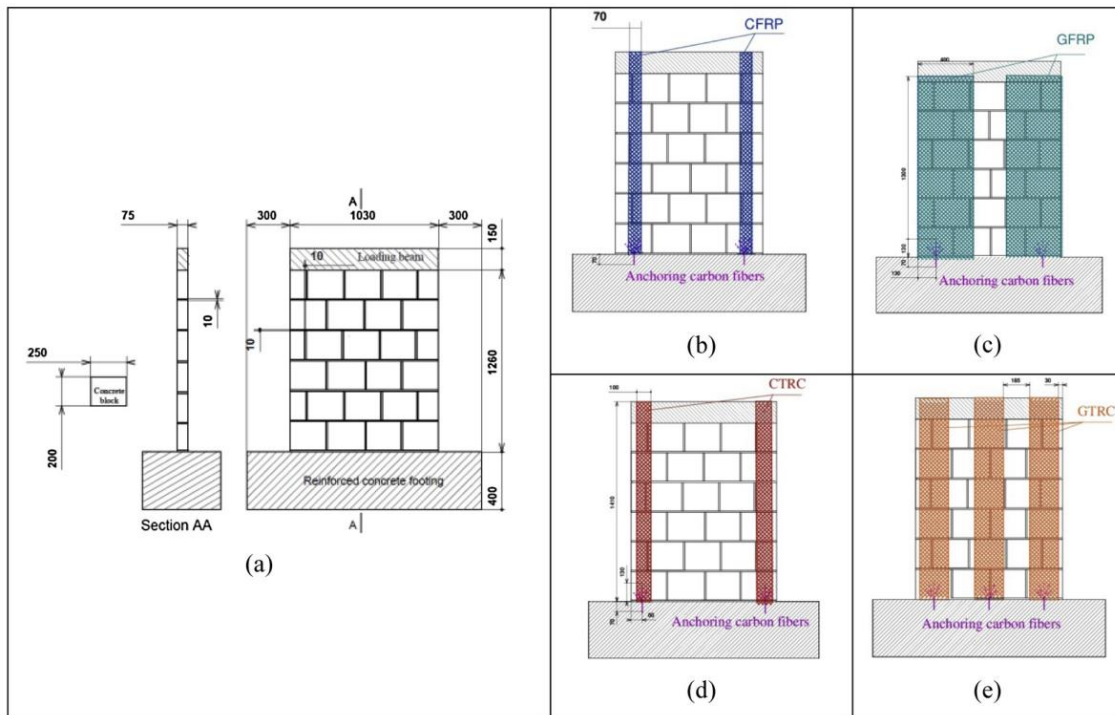


Fig. 94 – Parede de alvenaria sem reforço e esquemas de reforço (Reboul *et al.*, 2018).

O artigo apresentou depois os resultados em termos de curvas carga vs. deslocamento, destacando os potenciais benefícios do uso de materiais compósitos ligados externamente (adequadamente ancorados) para fortalecer as estruturas de alvenaria. Com efeito, todas as paredes reforçadas testadas exibiram um comportamento melhorado, tanto em termos de carga lateral máxima como de ductilidade. Dependendo das taxas de armadura adotadas, o aumento da capacidade lateral resistente trazido pelos FRP's variou de 128 a 267% e o ganho proporcionado pelos TRC's variou de 87 a 262%. Verificou-se que os materiais de reforço TRC contribuem mais efetivamente para um aumento da ductilidade do que os compósitos de FRP, mas os reforços de FRP provaram ser eficazes em retardar o início do dano.

4. CASOS DE ESTUDO

A indústria da construção, tem desde tempos imemoriais, feito uso de compósitos com fibras naturais (tijolos do antigo Egito). Na atualidade, o uso do compósito com fibras, tem sido uma boa opção em estruturas que se querem leves, mas com boa resistência mecânica e rigidez.

Nesta seção, descrevem-se alguns dos casos práticos de aplicações em Portugal de sistemas FRP, sendo aplicados na reabilitação/reforço, e em construção nova. Para se ter acesso às informações apresentadas em seguida foram realizadas diversas visitas de estudo a algumas locais de aplicação bem como análises de documentações específicas.

4.1. APLICAÇÃO EM REABILITAÇÃO/REFORÇO

4.1.1. CASO DE ESTUDO 1: PONTE NOSSA SENHORA DA GUIA

No âmbito do projeto I&D “Reforços e Pontes com compósitos avançados - Carbo ponte” tendo por parceiros para além da FEUP, O IEP, INEGIL, LNEC, e STAP foi estudada e efetuada à aplicação de sistemas de CFRP ao reforço de laje superior do tabuleiro da Ponte Nossa Senhora da Guia em Ponte de Lima.

Trata-se de uma ponte em betão armado pré-esforçado com cinco tramos e comprimento total de 250 metros, Fig. 95a). O tabuleiro com cerca de 12 metros de largura é constituído por um caixão bicelular de altura variável. A ponte construída há cerca de 20 anos apresenta na sua seção em caixão, sinais de fendilhação longitudinal e resistência insuficiente na face inferior do tabuleiro, Fig. 95b) (Juvandes, 1999).

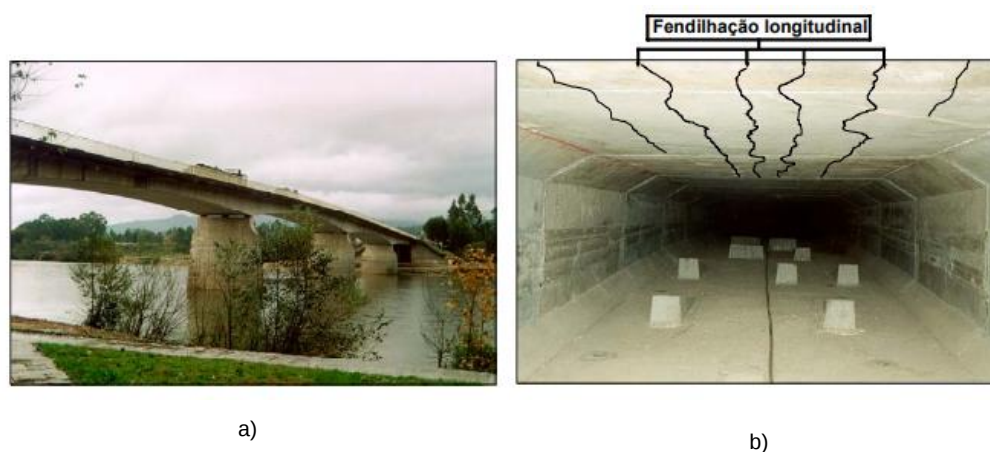


Fig. 95 – Ponte Nossa Senhora da Guia em ponte de Lima a) Aspecto geral da ponte b) Fendilhação longitudinal na face inferior do tabuleiro (Juvandes, 1999)

Para aumentar a capacidade resistente da laje perante esforços de flexão. Foi utilizada a colagem exterior de sistemas de CFRP unidireccionais, na face inferior do banzo superior do caixão, Fig.96 e 97. Concluiu-se que se trata de uma solução eficaz, aumentando o momento resistente na secção de meio vão em cerca de 92%. Complementarmente, o aumento de resistência da secção de vão irá ser aproveitado para permitir verificar a segurança das secções de extremidade, considerando para tal, com uma redistribuição plástica de esforços.

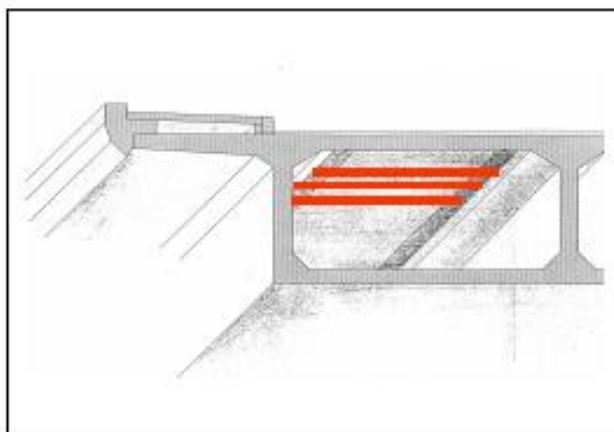


Fig. 96 – a) Representação esquemática do esforço a efetuar (Juvandes, 1999).



Fig. 97 – Aspeto de colocação do sistema curado *in situ* (mantas) (Juvandes, 1999) .

4.1.2. CASO DE ESTUDO 2: REABILITAÇÃO DO VIADUTO DUARTE PACHECO

O Viaduto Duarte Pacheco é composto por duas passagens superiores em arco, uma sobre a linha de caminho de ferro e outra sobre a Avenida do Parque Florestal de Monsanto, com 355,10 m de desenvolvimento entre eixos dos encontros. Foi projetado em 1937 pelo Eng. João Alberto Barbosa Carmona e a obra foi executada entre abril de 1939 e dezembro de 1944 pela "Sociedade de Empreitada de Obras Públicas, Lda" (SEOP, Lda). A secção transversal do tabuleiro é constituída por uma laje contínua com 9 vãos de 2,30 m e consolas de 1,65 m de vão, apoiada em 10 longarinas com 10 tramos de 4,00 m. As longarinas são contínuas em 5 tramos, entre os apoios extremos e os apoios sobre o fecho do arco. As longarinas apoiam em pilares ou sobre carlingas encastradas nas cabeças dos

pilares. As longarinas têm uma largura de 0,30 m e alturas de 0,65 m no vão e 0,81 m sobre os pilares. Os apoios extremos das longarinas, nos encontros ou nas pilastras intermédias, são realizados com chapas de chumbo.



Fig. 98 – Vista Geral e alçado do Viaduto Duarte Pacheco (Costa *et al.*, 2004).

Em 1993 e 1994, o LNEC realizou uma inspeção visual e um conjunto de ensaios para caracterizar o estado de deterioração do Viaduto Duarte Pacheco. Na inspeção visual verificou-se a ocorrência de fendilhação em vários elementos da estrutura. Essa fendilhação apresenta-se quer orientada ao longo das armaduras longitudinais, quer sem orientação preferencial definida (tipo “*craquelé*”). A inspeção e análise à estrutura e materiais revelou deterioração e existência de compostos típicos de reações álcalis-sílica e etringite. As reações álcalis-sílica estão associadas à presença de sílica reativa na brita utilizada no betão (Fig.99) que reage com os compostos alcalinos.



Fig. 99 – Fendilhação típica das reacções alcalo-sílica no betão nas vigas do tabuleiro (Costa *et al.*, 2004).

Verificou-se também a fendilhação em pilares (Fig. 100), em algumas zonas com aberturas significativas e grandes profundidades. Para além da fendilhação de geometria irregular observa-se nos pilares e arcos fendilhações orientadas segundo o eixo longitudinal, provocadas pelas reações expansivas, com ou sem corrosão de armaduras. Nas fendas de abertura superior a 1.0 mm foi realizado o seu preenchimento com calda de cimento e a selagem do bordo com poliuretano, Fig. 100. As fendas com abertura entre 0,4 mm e 1,0 mm foram somente seladas. Foi realizado uma impregnação hidrofugante, sistema aplicado por projeção e que penetra na estrutura porosa superficial do betão, revestindo os poros e repelindo a água, um barramento das fendas, incorporando malha de fibras de vidro e em seguida uma pintura (revestimento espesso e flexível) aplicado pelo menos em duas demãos cruzadas e com maior espessura nos seguintes elementos: arcos centrais, pilares sobre os arcos centrais, pilastras dos arcos centrais e vigas exteriores do tabuleiro (espessura superior ou igual a 500 μm).



Fig. 100 – Fendilhação em betão e trabalho de injeção (Costa *et al.*, 2004).

No tabuleiro foi realizado um reforço das vigas externas (Fig. 101) através de colagem de laminados de fibra de carbono. Estas vigas foram reforçadas por disporem apenas de cerca de metade da armadura das vigas interiores visto estarem originalmente localizadas sob o passeio e sujeitas a menores esforços.



Fig. 101 – Reforço de vigas e controlo de qualidade (Costa *et al.*, 2004).

4.1.3. CASO DE ESTUDO 3: PONTE DE MOSTEIRÔ SOBRE O RIO DOURO

A ponte de Mosteirô sobre o Rio Douro foi projetada em 1971 pelo Prof. Edgar Cardoso e finalizada em 1973, Fig.102. Esta obra foi uma construção nova com a exceção dos dois pilares e dos encontros, que foram uma reabilitação da antiga ponte metálica sobre o rio Douro.



Fig. 102 – Ponte de Mosteirô sobre o Rio Douro - Reforço Estrutural (Teixeira Duarte, 2021).

Os pilares de alvenaria de pedra estão situados na albufeira da Barragem do Carrapatelo, enquanto os encontros situam-se um no Concelho de Cinfães e o outro no Concelho de Baião. Construída com 194m de comprimento, a ponte permite a circulação em ambos os sentidos da EN211 sobre o Rio Douro, Fig. 103 (Branco, 2014).

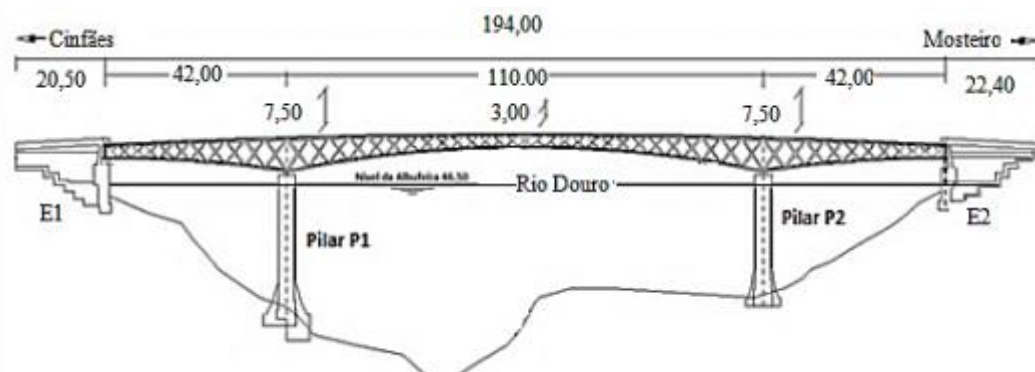


Fig. 103 – Corte longitudinal da Ponte de Mosteirô sobre o Rio Douro (Branco, 2014).

Relativamente a inspeções efetuadas à ponte, foram observadas algumas patologias associadas à deterioração dos materiais, desgastes do pavimento sobre o tabuleiro (Fig. 104) e outras referentes ao comportamento estrutural. As principais patologias encontradas foram:

Estados Limites Últimos (ELU)

- Insuficiente resistência à tração das diagonais tracionadas;
- Insuficiente resistência à tração da laje inferior na zona central do vão principal;
- Insuficiente resistência da ligação horizontal do tabuleiro ao encontro fixo em relação à ação sísmica.

Estados Limites Serviço (ELS)

- Fissuração excessiva na laje inferior do tabuleiro (Fig. 105);
- Deficiente ligação vertical do tabuleiro aos encontros.



Fig. 104 – Deterioração dos materiais: a) Zona de esmagamento dos pilares; b) Desgaste do pavimento (Branco, 2014).



Fig. 105 – Fenda transversal com 1,20 mm na laje inferior (Branco, 2014).

Para solucionar a patologia das fendas na laje inferior, foi realizado um reforço na zona central do vão principal. Foram colocados cabos de pré-esforço exterior e, por meio de colagem, laminados de fibras de carbono (CFRP), de modo a poder resistir ao estado limite último de tração e de serviço. Foram aplicados laminados com 120 mm de largura e 1,4 mm de espessura, sobrepostos, dois a dois, fixos à laje por meio de colagem através de resina epóxi. A aplicação do reforço com laminados, efetuou-se após a aplicação do pré-esforço exterior, e este último, após a selagem das fendas com resina epóxi. No entanto, antes de proceder à devida aplicação foi preparada a superfície de forma a estar limpa e regularizada. A primeira etapa consiste na colocação do primário epóxi (Fig. 106 a), no qual este permitiu que a superfície de betão ficasse mais aderente à colocação dos laminados. De seguida foi aplicado uma argamassa de base epóxi de colagem sobre os laminados, através do auxílio de uma régua de gabarito de forma a limitar a espessura a 3 mm

(Fig.106b). Por fim, foram colocados manualmente os laminados, de modo que ficassem bem pressionados contra a superfície, Fig. 109c, (Branco, 2014).

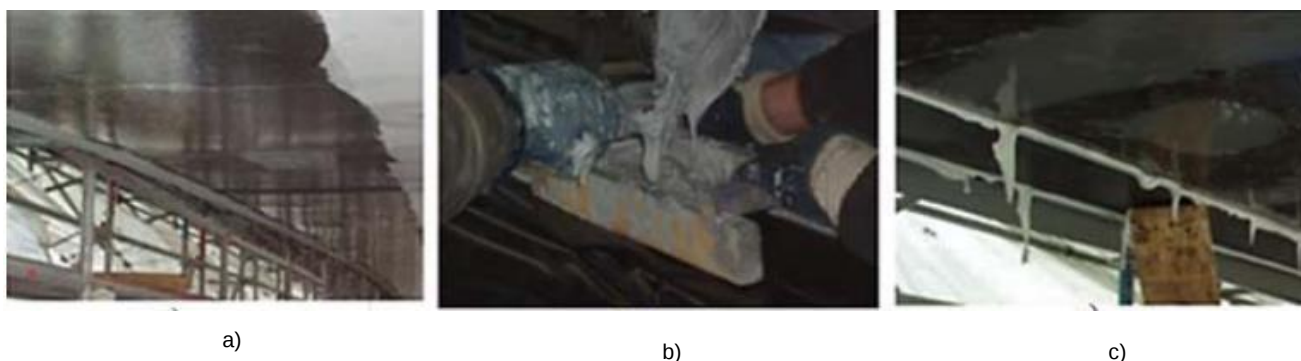


Fig. 106 – Procedimentos da colocação dos laminados na zona central do meio vão a) colocação do epóxi, b) colocação da argamassa de base epóxi de colagem sobre laminado, c) colocação do laminado na face superior da laje inferior (Branco, 2014).



Fig. 107 – Aplicação dos laminados de carbono (Pinho *et al.*, 2015).

4.1.4. CASO DE ESTUDO 4: PONTE SOBRE O RIO CALDO, GERÊS

A ponte sobre o rio Caldo, no Gerês (Fig.108) é uma obra realizada pela empresa Betar Consultores Lda, entre 2005 e 2009, composta por tabuleiros em arcos treliçados executados em betão armado, assentes em pilares ocos de alvenaria de pedra, com uma extensão de 199 metros, com vãos máximos de 23 metros.

Houve a necessidade de reforçar a obra de arte, com: (i) pré-esforço no tabuleiro, (ii) com mantas de fibra de carbono nas vigas e montantes diagonais do tabuleiro e (iii) com chapas metálicas nas nascenças dos arcos. A reparação incluiu a colocação de juntas de dilatação,

correção de destaques e delaminação de betão, selagem de fendas e impermeabilização do tabuleiro (Monteiro, 2017).



Fig. 108 – Ponte sobre o Rio Caldo, Gerês (Monteiro, 2017).

O reforço da armadura longitudinal da viga devido o excesso de carga, foi efetuado com laminados de carbono, Fig. 109 ancorados nas extremidades com mantas de carbono, Fig. 110, e, por fim, foi aplicada uma pintura para proteção aos raios ultravioleta. A sobrecarga foi previamente aliviada com auxílio de um macaco hidráulico, Fig.111, e, após cura dos materiais, reposta novamente.

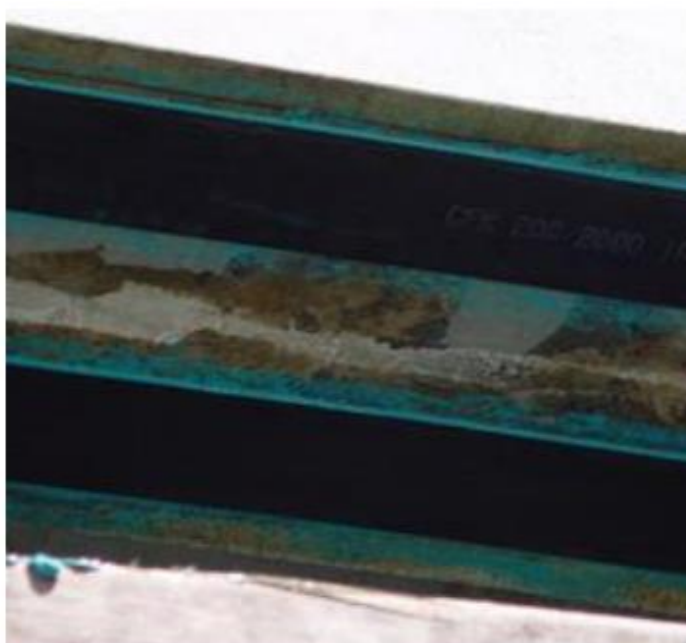


Fig. 109 – Aplicação laminados de carbono (Monteiro, 2017).



Fig. 110 – Ancoragem nas extremidades por mantas de carbono (Monteiro, 2017).



Fig. 111 – Alívio da sobrecarga por auxílio de macaco hidráulico (Monteiro, 2017).

4.2. APLICAÇÃO DE PERFIS DE GFRP

Em Portugal, há algumas obras que utilizam as estruturas de GFRP, contudo a maior parte das aplicações correspondem a elementos não estruturais ou estruturas secundárias. São vários os exemplos de obras importantes que utilizaram os perfis de GFRP, como exemplos as pontes pedonais, centrais de tratamento de água e obras de artes.

4.2.1. CASO DE ESTUDO 1: PONTE SÃO SILVESTRE

A ponte São Silvestre (Fig.114), foi inaugurada no dia 19 de dezembro de 2015, no centro da cidade de Ovar e é uma ponte pedonal em perfis pultrudidos de matriz polimérica, reforçadas com fibra de vidro (GFRP) e tabuleiro em betão auto compactável reforçado com fibras de aço (SFRSCC) com uma espessura de 40mm. Este último pode substituir o betão armado tradicional em aplicações mais leves, e mais duráveis.

Desenvolveu-se um protótipo de ponte pedonal mista GFRP-SFRSCC, construído em escala real, no âmbito do Projeto ID&T PONTALUMIS, financiado pela Agência da Inovação (ADI), envolvendo uma equipa de investigação composta por membros do Instituto Superior Técnico (IST), da Universidade do Minho (UM) e da empresa ALTO, Perfis Pultrudidos, Lda.

O protótipo, construído à escala real, apresenta um comprimento total de 11.0 m e uma largura de 2.0 m. Sua secção transversal é composta por uma laje em SFRSCC com 38mm de espessura, apoiada em dois perfis pultrudidos de GFRP com secção em I e dimensões de $400 \times 200 (\times 15) \text{ mm}^2$. A estrutura é de fácil e rápida montagem, possui um peso próprio reduzido (cerca de 3 toneladas), quando comparado com soluções tradicionais, apresenta elevada durabilidade e reduzidos requisitos de manutenção. A Fig.112 ilustra a secção transversal do protótipo (JPÉE, 2014).

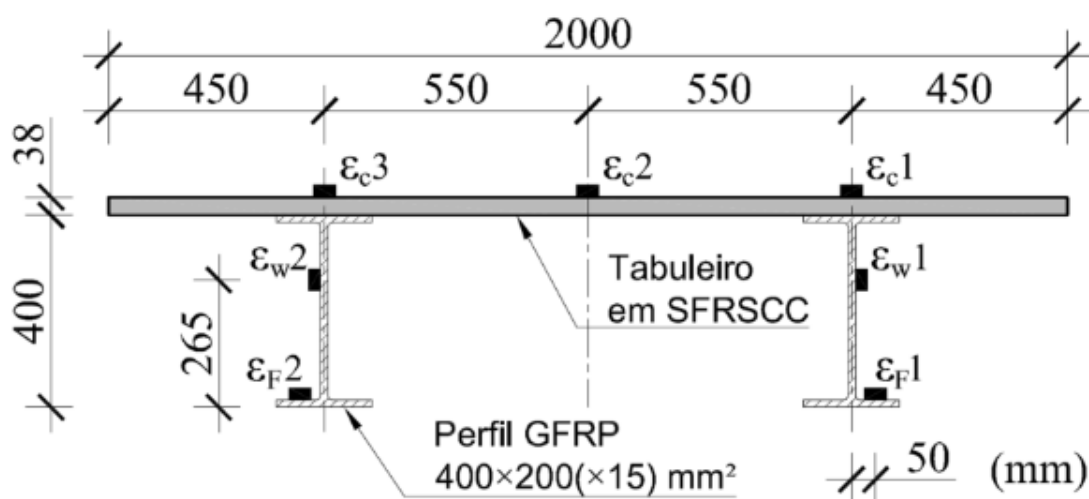


Fig. 112 – Seção transversal do protótipo (JPÉE, 2014).

A construção do protótipo foi realizada em várias etapas, tendo-se iniciado com a pultrusão das longarinas e das vigas secundárias (Fig. 113a) e com a furação das mesmas para se poder realizar, posteriormente, as ligações mecânicas entre o tabuleiro e as vigas. As ligações entre as longarinas e as vigas secundárias foram executadas, e a subestrutura do protótipo foi colocada num veículo de transporte (ligeiro), como se mostra na Fig. 113b. Em paralelo, o tabuleiro em SFRSCC e os encamisamentos entre os banzos foram betonados (Fig. 113c) e, após a respetiva cura, foram realizadas as furações no tabuleiro, com 30 mm de profundidade, de modo a permitir a instalação dos conectores. Os conectores foram instalados recorrendo a um adesivo epoxídico para garantir a sua solidarização com os elementos de SFRSCC. Os conectores foram então instalados no tabuleiro (Fig. 113d), à exceção dos conectores da zona dos apoios, que foram instalados nos encamisamentos de SFRSCC. As superfícies de conexão foram lixadas de modo a promover uma melhor adesão entre os materiais, tendo sido aplicada uma camada de 2 mm de adesivo epoxídico no tabuleiro (Fig. 113d). Os elementos em GFRP foram então instalados em cima do tabuleiro de SFRSCC e as ligações mecânicas foram efetuadas através do aparafusamento de porcas nos conectores. A estrutura foi mantida em posição invertida (Fig. 113e) durante nove dias, de modo a garantir a cura do adesivo e, posteriormente, foi rodada 180° e instalada na sua posição final (Fig. 113f) (JPÉE, 2014).

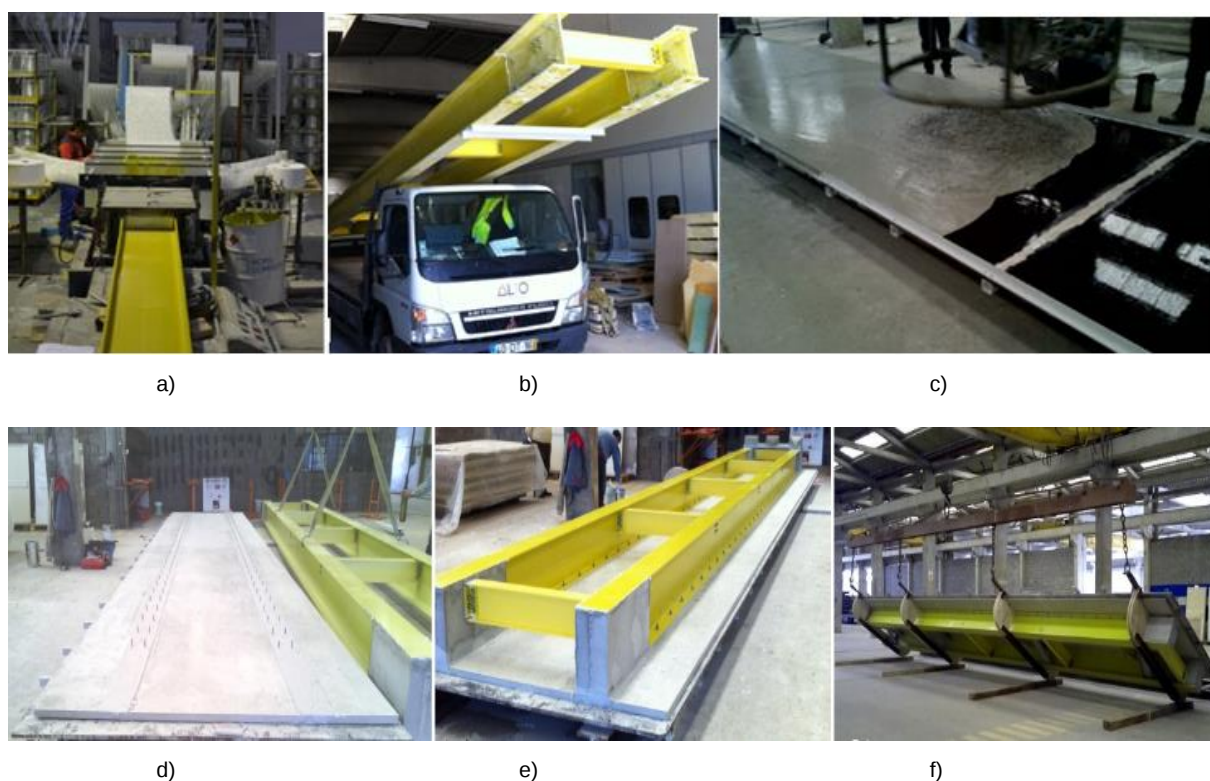


Fig. 113 – Construção do protótipo: a) pultrusão dos perfis de GFRP; b) transporte da subestrutura; c) betonagem do tabuleiro; d) instalação dos sistemas de conexão; e) montagem dos elementos em GFRP sobre o tabuleiro; f) posicionamento do protótipo (JPÉE, 2014).



Fig. 114 – Ponte São Silvestre, Ovar (Autor, 2021).

4.2.2. CASO DE ESTUDO 2: PONTE SÃO MATEUS

No ano de 2013, desenvolveu-se o trabalho de construção de uma ponte pedonal híbrida com tabuleiro em painéis multicelulares em GFRP. Esta obra resultou da investigação levada a cabo no IST sobre estruturas compósitas híbridas, e partindo de uma proposta de intervenção já existente entre a Câmara Municipal de Viseu e o Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico.

Já previsto pelo município, a solução procurou uma ligação infra-estrutural que reunisse dois pólos relevantes para a cidade de Viseu: Parque da Feira de S. Mateus e Rua Serpa Pinto – entre dois eixos viários afastados de cerca de 200 m, tal como se ilustra na Fig.115.



Fig. 115 – Extrato da planta de perfis do Projeto do Parque Linear do Rio Paiva (Martinho, 2013).

A ponte é concebida com base numa solução estrutural compósita para o tabuleiro em elementos de painéis de laje pré-fabricados em GFRP. É composta por um sistema conjunto híbrido, por uma estrutura vigada de suporte em aço. A ligação entre os dois elementos estruturais (perfil aço – painel GFRP) é efetuada por recurso a adesivos, complementados mecanicamente. A ponte vence uma distância de 13,30 m entre faces internas dos muros das margens. A Fig. 116 mostra um protótipo da estrutura.



Fig. 116 – Protótipo da ponte pedonal de S. Mateus - Viseu (Martinho, 2013).

O tabuleiro é composto por 19 painéis multicelulares de GFRP e aço estrutural. Relativamente à sua geometria, os painéis apresentam um comprimento (equivalente à largura da ponte em que são aplicados) de 2.50 m e uma secção transversal multicelular (7 células) de dimensões 90 x 75 mm - Fig.117. As paredes dos banzos e almas apresentam espessuras nominais que variam entre 4 e 5 mm.

A Fig. 117 mostra um esquema de montagem entre os painéis. O modo de interligação é realizado através de duas abas verticais que permitem um encaixe geométrico entre si por pressão, do tipo *snap fit*, podendo esta ligação ser ainda reforçada por colagem, com recurso a um adesivo.

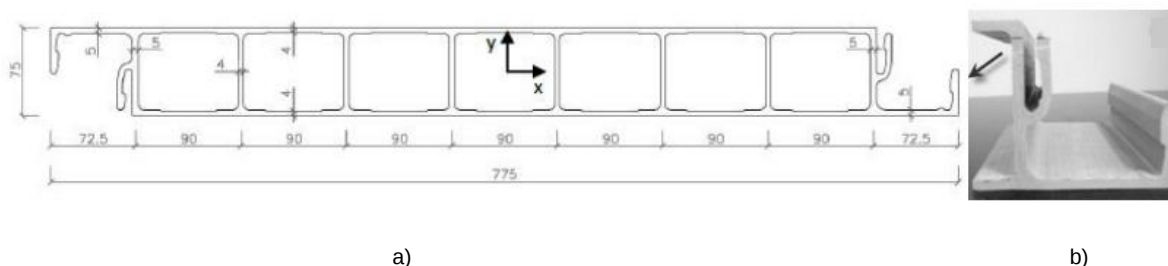


Fig.117 – Seções transversais dos painéis a) dimensões (mm) e b) pormenor ligação snap fit (Martinho, 2013).

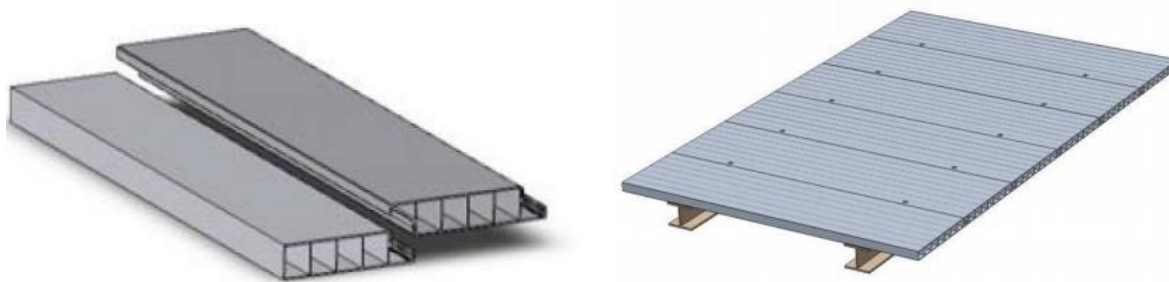


Fig. 118 – Esquema de montagem do tabuleiro por meio da ligação sucessiva entre painéis (Martinho, 2013).

A guarda de segurança escolhida é em aço, constituída por 8 prumos principais com barras horizontais e varão vertical devidamente afastado a fechar o conjunto. A guarda não “toca” no tabuleiro compósito, com os prumos em forma de costela a apoiarem-se lateralmente nas almas das vigas em aço (Fig. 119).

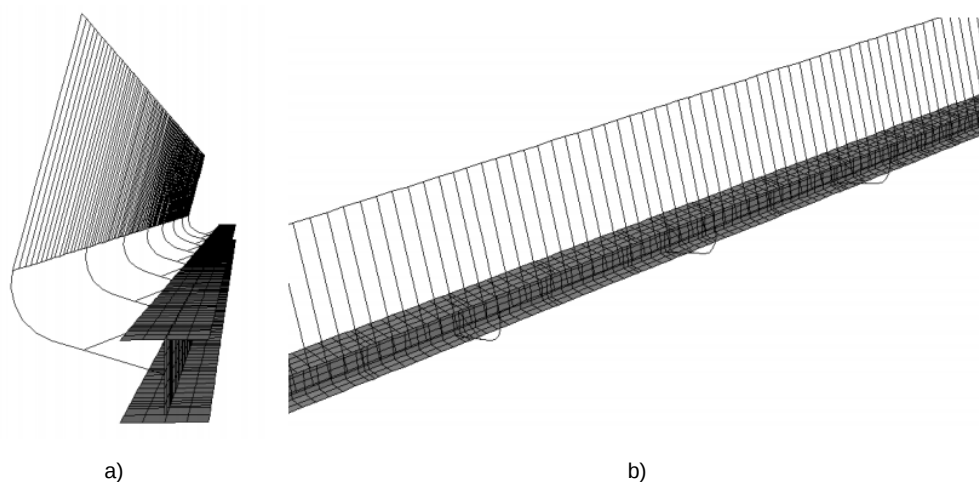


Fig. 119 – Protótipo estrutura a) Guarda e viga de aço (Vista y-z), b) vista 3d de uma viga e respetiva guarda de segurança painéis (Martinho, 2013).

Por fim, na Fig. 120, apresenta-se um registo fotográfico (vista lateral da ponte e vista longitudinal do tabuleiro) da ponte de S. Mateus nos dias de hoje, visitada no âmbito desta dissertação.



Fig. 120 – Ponte São Mateus, Viseu (Autor, 2021).

4.2.3. CASO DE ESTUDO 3: REMODELAÇÃO PORTO PALÁCIO HOTEL

No âmbito desta dissertação, visitou-se o exterior do Porto Palácio Hotel com o objetivo de proceder ao registo fotográfico e avaliação da estrutura em material compósito construída no seu exterior no decorrer da sua remodelação (Fig.121). Esta intervenção foi distinguida internacionalmente em várias vertentes tais como serviços, conforto, comodidade, bem-estar e inovação. O projeto implicou na construção de uma estrutura meramente estética em toda a envolvente exterior do hotel, concebida pelo artista plástico, Pedro Cabrita Reis. Recorreu-se a perfis pultrudidos de fibra de vidro (GFRP), na construção de vigas e pilares, onde foram usados cerca de 1500 metros de perfis, unidos com ligações aparafusadas entre si. Nesta estrutura, foi necessário o uso de uma chave dinamométrica, de forma a ter o torque controlado: devido ao comprimento de algumas vigas, de 12 metros, verificou-se que um excessivo aperto poderia ocasionar um esmagamento local do perfil (Martins, 2011).

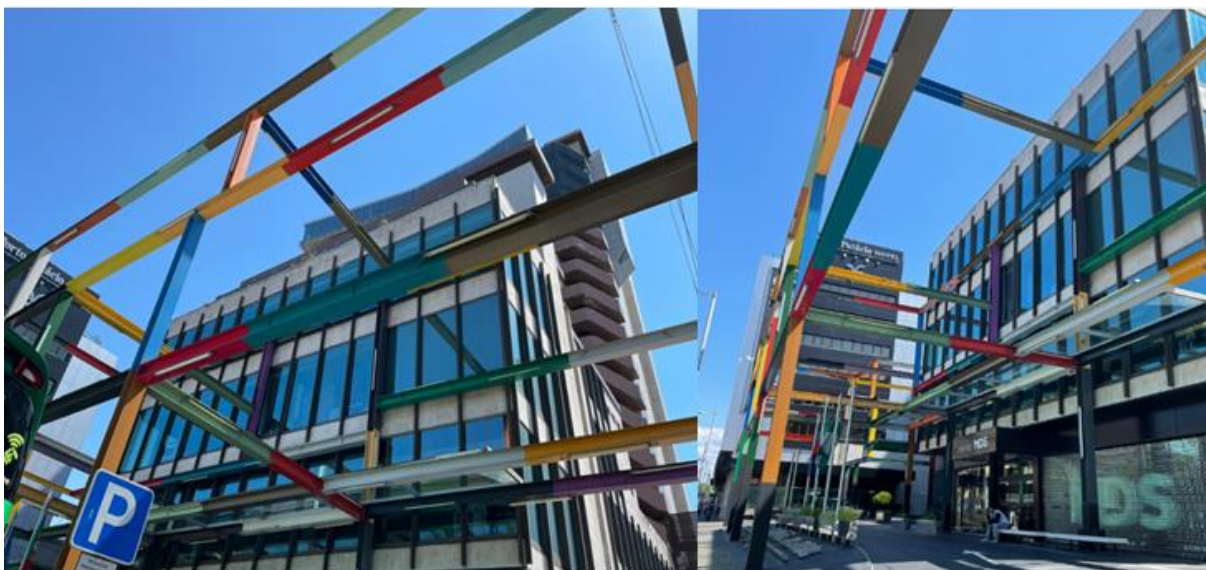


Fig. 121 – Estrutura Hotel Porto Palácio, Porto (Autor, 2021).

4.2.4. CASO DE ESTUDO 4: CENTRAL DE TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUAL ETAR BARREIRO

O tratamento de águas residuais é muito importante para o funcionamento de todos os países pois torna possível o consumo humano de águas e sua reintrodução nas bacias hidrográficas sem contaminar os rios, lençóis freáticos e solos. Sujeitos a agressões químicas provocadas não só pela água, mas como por todos os poluentes nela existentes, as antigas estruturas de estações de tratamento de águas necessitavam de manutenção e renovação, representado por isso largos custos para os contribuintes. Neste contexto, os perfis metálicos por sofrerem degradações constantes devido a exposição a diversos contaminantes, têm vindo a ser substituídos por perfis em compósitos.

Os perfis pultrudidos, usados não só em estruturas, mas também em passadiços, escadas, guarda-corpos e outras serralharias ligeiras, como se pode observar nas Fig.122 e 123 (registo fotográfico obtido no âmbito desta dissertação), aumentam a vida útil das Estações de Tratamento, por serem altamente resistentes aos elementos corrosivos existentes.



Fig. 122 – Estrutura em perfis GFRP, a) passadiço, b) guardas, ETAR Barreiro (Autor, 2021).



Fig. 123 – Escada em perfis GFRP ETAR Barreiro (Autor, 2021).

4.2.5. CASO DE ESTUDO 5: CENTRAL DE TRATAMENTO DE ÁGUA ETA ASSEICEIRA

Além da ETAR do Barreiro, procedeu-se também à visita da ETA da Asseiceira, a qual possui passadiços e guardas em GFRP sobre o tanque de apoio aos tanques principais, como demonstra a Fig.124. A grande mais-valia do uso destes perfis no tanque, prende-se com o facto de a estrutura estar inserida num meio bastante agressivo no que diz respeito à corrosão, pois as águas que estão no tanque são salinas. Foram substituídas também as

tampas e grelhas (Fig. 125), que à data da construção da instalação eram metálicas. O uso de elementos em GFRP, mais leves e menos suscetíveis à corrosão, facilita as manutenções no local.



Fig. 124 – Estrutura em perfis GFRP, a) passadiço, b) guardas, ETA Asseiceira (Autor, 2021).



Fig. 125 – a) Tampa e b) grelha em GFRP, ETA Asseiceira (Autor, 2021).

4.2.6. DURABILIDADE DOS PERFIS PULTRUDIDOS DE GFRP

4.2.6.1. Inspeção visual dos elementos após 10 anos

A visita à ETAR Barreiro e ETA Asseiceira foi realizada no mês de junho de 2021, sendo que ainda não havia sido feita nenhuma reabilitação nos elementos apresentados. Uma primeira inspeção visual dos elementos no interior das instalações (que não apresentam exposição solar - radiação U.V), mostrou que estes não apresentam sinais visíveis de degradação e as ligações dos perfis não apresentam problemas, incluindo nas zonas abaixo dos parafusos. Já os perfis expostos à radiação solar apresentaram algumas anomalias não estruturais nas superfícies dos perfis, descritas em seguida:

- Exposição de fibras

Os efeitos de degradação da radiação UV podem ser considerados em conjunto com a temperatura e humidade relativa. Como pode ser observado nas Fig. 126 e 127, o degrau da escada e guardas, respetivamente, apresentam perda da camada protetora a longo prazo, deixando expostas as fibras de reforço. Este tipo de degradação pode causar aos seus utilizadores irritações na pele após o contacto direto com estes materiais, além da evidente degradação visual das estruturas.



Fig. 126 – Fibras expostas ETA Asseiceira (Autor, 2021).



Fig. 127 – Fibras expostas ETAR Barreiro (Autor, 2021).

- Degradação pintura

A nível estético, os principais problemas decorrentes da exposição à radiação são a perda de brilho e o amarelecimento dos compósitos (Fig. 128), também devido à exposição à radiação UV, humidade relativa e temperatura.



Fig. 128 – Degradação da pintura ETA Asseiceira (Autor, 2021).

- Degradação superficial e fissurações

Os materiais expostos na ETAR do Barreiro apresentam degradações superfícies devido à perda de resistência das fibras (Fig.129), através da perda da proteção da resina e exposição das fibras. Por sua vez, as soluções alcalinas aceleram a degradação através da sua penetração nos poros e fissuras a interface/fibra matriz, reduzindo o nível de desempenho mecânico, tornando o material mais frágil. As fissuras apresentadas na Fig. 130 podem ocorrer através da aplicação de cargas elevadas durante algum tempo: as tampas são sujeitas à passagem de camiões constantemente para transporte de resíduos da ETAR.



Fig. 129 – Degradação guarda ETAR Barreiro (Autor, 2021).



Fig. 130 – Fissuras tampa ETAR Barreiro (Autor, 2021).

4.2.6.2. Medidas preventivas

Segundo Kharbari *et al.* (1997), embora os efeitos dos agentes ambientais sejam ainda limitados, é fundamental garantir a proteção das fibras de reforço devendo, para o efeito, ser adotada uma seleção adequada de resinas. Podendo ser adotadas as seguintes medidas:

- Dispor uma camada rica em resina à superfície do compósito laminado (véu de superfície), que permaneça não fendilhada durante o período de utilização pretendido. Deverá ainda ser considerada a necessidade de aplicação de uma pintura protetora;
- Assegurar a cura completa de as resinas antes do material ser colocado em serviço, tendo em conta o aumento da sucetibilidade à humidade em resinas não completamente curadas;
- Devem ser aplicados em perfis de GFRP, preferencialmente em exposição a ambientes húmidos ou alcalinos (embebidos ou colados ao betão), resinas de viniléster ou epóxi, em detrimento do poliéster;
- Como a humidade pode diminuir a temperatura de transição vítrea, deve-se assegurar que este valor é significativamente superior (pelo menos em 30° C) à temperatura máxima de serviço;
- Se existir um risco potencial de incêndio, deverão ser utilizadas matrizes fenólicas, em alternativa ao poliéster e ao viniléster, e aditivos retardadores de incêndio ou pinturas intumescentes.

5. LIMITAÇÕES CORRENTES E PERSPECTIVAS FUTURAS

O aumento na utilização de materiais compósitos, em geral, que se tem assistido nos últimos anos surge associado à necessidade de se dispor de elementos estruturais mais leves, resistentes, com rigidez elevada e duráveis. Na realidade, se continuarem a ser desenvolvidos esforços no sentido de se aprofundar o conhecimento relativo ao comportamento mecânico e ao dimensionamento estrutural e, em paralelo, se se conseguirem custos de produção mais reduzidos, é possível que estes materiais venham a conhecer uma maior aplicabilidade como elementos estruturais no sector da construção.

A revisão da literatura é uma parte vital do processo de investigação. Aquela envolve localizar, analisar, sintetizar e interpretar a investigação prévia. Desta forma, nos últimos anos publicaram-se diversos trabalhos sobre aplicações de materiais compósitos na construção civil, de diferentes perspetivas, nos quais se revê a evolução do conceito e se apontam os desafios mais importantes que se enfrentam. Apesar de existirem diversos estudos e pesquisas sobre construções novas e sistemas de reforço na reabilitação de edifícios, existem ainda algumas limitações relacionadas com as novidades deste tema que merecem ser discutidas e desmistificadas cientificamente.

A utilização dos perfis pultrudidos de GFRP na construção civil, como em pontes e edifícios em elementos estruturais estão a aumentar no número de aplicações, como referido anteriormente, por se tratar de um material leve, com um custo cada vez mais competitivo. Embora exista uma riqueza de informação disponível sobre o seu comportamento a curto prazo, a sua durabilidade ainda não foi investigada de forma a dar aos agentes da construção uma confiança suficiente, nomeadamente quando comparada com os materiais mais tradicionais. A necessidade de documentar, avaliar e quantificar o desempenho em termos de durabilidade dos perfis GFRP é particularmente relevante para aplicações estruturais de engenharia civil, uma vez que a maioria dos projetos são desenvolvidos considerando vidas úteis relativamente longas, muitas vezes superiores a 50 anos.

O sistema de ligação de perfis de GFRP é um tema ainda a ser analisado, assim como a durabilidade, cuja investigação ainda não está tão avançada. Há, portanto, ainda necessidades de investigação sobre conexões coladas, por exemplo, para compreender o seu comportamento, em termos de resistência e rigidez, e para avaliar seu desempenho em relação a conexões aparafusadas semelhantes.

A utilização de painéis sanduiche em construções é também cada vez mais frequente, devido às elevadas relações rigidez- e resistência-peso. No entanto, quando os painéis sanduíche são usados como elementos resistentes num sistema estrutural que suporta cargas permanentes significativas, como é o caso de muitas aplicações de engenharia,

importantes deformações de fluência podem ocorrer. Tal deve-se à natureza viscoelástica de alguns dos materiais tipicamente usados neste tipo de construção, como adesivos poliméricos, resinas, espumas, favos de mel e madeira de balsa. Estas deformações devem ser devidamente consideradas no dimensionamento de painéis sanduíche, principalmente considerando que a vida útil exigida em obras de engenharia civil normalmente não é inferior a 50 anos. No entanto, a falta de diretrizes de projeto universalmente aceites sobre fluência em painéis sanduíche e de informações precisas sobre as propriedades viscoelásticas de materiais relevantes ainda constituem um obstáculo para a consideração correta do fenómeno de fluência na fase de projeto.

Algumas propriedades mecânicas dos materiais GFRP são sensíveis a altas temperaturas, como em cenários de incêndio, devido aos processos físicos e químicos envolvidos na degradação da matriz polimérica e da fibra, bem como à delaminação, resultando em redução significativa da rigidez e da capacidade de carga. As propriedades mecânicas dos materiais GFRP também podem degradar com a duração da exposição a temperaturas elevadas e altas ou no fogo. Portanto, as resistências ao fogo de estruturas compósitas bem como as propriedades mecânicas pós-incêndio dos materiais GFRP são importantes para a avaliação do desempenho estrutural e avaliação da segurança estrutural em contextos de temperatura elevada e incêndios.

A utilização de varões em GFRP como armaduras para estruturas de betão, em alternativa à utilização aos varões de aço, deve-se às várias vantagens daquele material, distinguindo-se a elevada tensão de rotura, a reduzida massa volúmica e, sobretudo, o facto de não ser suscetível à corrosão. No entanto os varões de GFRP são suscetíveis a temperaturas elevadas. Este aspeto tem dificultado a implementação desta solução em edifícios, uma vez que a situação de incêndio constitui uma ação de projeto, como referido. Por outro lado, ao contrário do aço, ainda não há padronização para as características da superfície das barras de FRP. Portanto, determinar as características de aderência de varões comerciais não padronizados é requisito fundamental para seu uso prático, pois tal influência o mecanismo de transferência de carga entre a armadura e o betão.

A análise do comportamento de reforços quanto à sua durabilidade a longo prazo, levando em consideração as propriedades físicas, mecânicas e químicas dos sistemas de CFRP para reforço de estruturas de betão, é algo ainda em fase de investigação. Para tal devem realizar-se ensaios acelerados em laboratórios ao nível da durabilidade, da história da carga e do comportamento ao fogo.

O conhecimento da durabilidade do reforço estrutural através de compósitos de FRP, por colagem externa, carece ainda de investigação que permita esclarecer mecanismos de degradação e a sua correlação com as causas e parâmetros que as caracterizem. Algumas análises estão em curso, como a interpretação da resistência de colagem entre o betão e laminados de CFRP, através de ensaios de corte e tração.

De modo geral, a obtenção de um ótimo desempenho na utilização dos materiais compósitos na construção civil, assim como a utilização de outras matérias tradicionais, depende em larga escala da sua correta conceção de projeto (que terá que acarretar o

projeto face a algumas solicitações e fenómenos que ainda não estão totalmente documentados e estudados) e boa execução em obra. Estes fatos justificam que a investigação de materiais compósitos ainda mereça bastante atenção num futuro próximo.

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No presente capítulo apresentam-se, de modo resumido, os aspetos mais importantes do trabalho desenvolvido bem como as principais conclusões que o mesmo permitiu obter. Apresentam-se ainda propostas para possíveis desenvolvimentos futuros.

Neste trabalho foi apresentada uma breve síntese da utilização de compósitos ao longo dos anos, mostrando os seus desenvolvimentos e aplicações tanto no contexto de materiais compósitos naturais (tecidos flexíveis, argamassas reforçadas com feixes de palha), como no contexto de soluções tecnológicas (veículos espaciais). Mostrou-se também a sua importância na construção e reabilitação de obras, onde se apresentaram casos de estudo aplicados em reabilitações da ponte do Mosteiro, sobre o rio Douro, e do Viaduto Duarte Pacheco, e em construções novas, como foi o caso da aplicação dos perfis GFRP em pontes pedonais, sendo citadas e visitadas as pontes de São Silvestre e de São Mateus.

Dando ênfase à importância do desenvolvimento destes materiais e suas aplicações, foram também apresentadas investigações em curso de natureza experimental, que vêm contribuindo com produtos inovadores e métodos capazes de aumentar a viabilidade dos processos de reforço, assim como os tornar mais ágeis. Procura-se que o seu campo de utilização seja ampliado e que o seu tempo de intervenção e custos associados sejam reduzidos. Os compósitos de FRP surgem como uma alternativa com um elevado potencial, fundamentado pelas suas vantagens, com relação à durabilidade, facilidade de aplicação e de excelente desempenho mecânico.

No início do século XXI a indústria da construção civil, na aplicação em construções de estruturas novas, assim como a reabilitação e reforço das já existentes, encontra-se a ser conquistada pela utilização do FRP sob forma de inúmeros produtos inovadores.

A reabilitação de estruturas usando FRP irá continuar a crescer, prevendo-se que venha a ser a solução de muitos projetos de reforço, reparação e melhoria do desempenho antissísmico de pontes, edifícios, monumentos e outras estruturas. E com elas o desenvolvimento de códigos estruturais e ferramentas harmonizadas, assim como elaboração de guias de boas praticas e controlo de qualidade em obra irão continuar a surgir.

Nos desenvolvimentos futuros que se preveem para o alargamento do conhecimento sobre a utilização de compósitos reforçados com fibra, na expectativa de que os ensinamentos e campanhas experimentais, numéricas e analíticas desenvolvidas contribuam para resolver os problemas associados a construção civil, entende-se considerar os seguintes fatores:

-
- Definição de critérios de dimensionamento para projectos de reabilitação ou construção novas de estruturas de betão armado, betão pré-esforçado, metálicas, madeira, e estruturas em pedra;
 - Estabelecimento de um caderno de encargos normalizado, com integração de critérios de controlo e garantia de qualidade dos sistemas de FRP e respectivas técnicas de aplicação;
 - Estudo de novas técnicas de reforço em aplicação em estruturas de madeira, pedra, estruturas metálicas;
 - Desenvolvimento de novas técnicas de reforço, de materiais mais sustentáveis e materiais recicláveis, para contribuição da construção civil para um melhor ambiente;
 - Desenvolvimento de novas técnicas de promoção da durabilidade e conservação dos materiais compósitos em ambientes externos e mais agressivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 440.2R.02, "Guide for the design and construction of externally bonded FRP system for strengthening concrete structures", ACI Committee 440, American Concrete Institute, 2002.

Alto (2021). <http://alto.pt/produtos/>. Visitado em 14 de fevereiro de 2021.

Kelly, A., Zweben, C. "Polymer Matrix Composites", Vol.2, Elsevier Science Ltd., the Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX51GB, UK, 2000.

Ascione F., Lamberti M., Razaqpur A.G., Spadea S., "Strength and stiffness of adhesively bonded GFRP beam-column moment resisting connections Composite Structures". Volume 160, 15 January 2017, Pages 1248-1257.

Ashby M.F., Bréchet Y.J.M., Cebon D., Salvo L., "Selection Strategies for Materials and Processes". Materials and Design. Citado por Ventura, A., 2004

Baena M., Torres., Turon A., Barris C., "Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test". Composites: Part B 40 784–797. 2009.

Bailli, C., "Green Composites – Polymer composites and the environment", Woodhead Publishing Ltd. 2004

Blanksvärd. "Strengthening of concrete structures by the use of mineral based composites". Licentiate Thesis, Lulea University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, 2007

Branquinho, T., "Processamento e Caracterização de Compósitos com Filers de Argila Expandida". Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia de Design de Produtos. IPL, Leiria, 2017

Branco, J., "Reabilitação de pontes rodoviárias de betão armado". Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade da Madeira, 2014.

Callister, W.D., "Ciência e engenharia de materiais". Uma introdução 5ª edição. LTC Editora, RJ 2002.

Campilho, R., "Modelação da Execução de Reparações em Materiais Compósitos". Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial. Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia Mecânica, Porto 2005

Carvalho, R., “Composito de fibra sisal para uso em reforço de estruturas de madeira”. Tese apresentada à Área Interunidades, em Ciências e Engenharia de Materiais, para obtenção do título de Doutor USP, 2005

Carvalho, R., “Varões em compósito de GFRP para estruturas de betão armado. Estudo da aderência betão-GFRP a temperatura elevada”. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil. Instituto técnico de Lisboa, 2018.

Carvalho, T., “Reforço a flexão de vigas de betão armado com compósitos de CFRP”. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Civil – Estruturas e Gotecnia. FCT Universidade Nova de Lisboa, 2010.

Carra, G., Carvelli, V., “Ageing of pultruded glass fibre reinforced polymer composites exposed to combined environmental agents”. Composite Structures 1019–102.2014

Castro Composites (2021).<https://www.castrocompositesshop.com/pt>. Visitado em 13 fev. 2021.

Chawla, Kishan K., “Composite Materials Science and Engineering”. 1 ed. New York, Springer-Verlag, 1987. Citado por Cheker, Daniella, 2016.

Chupel, A., “O arco e arqueiro na Grécia pré-clássica”. Dissertação para obtenção do grau de mestre em História Militar. Universidade de Lisboa- Faculdade de letras, 2018.

Ciência e tecnologia em foco, 2021, <http://cienciatecnologiafoco.blogspot.com/2015/01/onibus-espacial.html>. Acedido em 06 maio 2021). Visitado em 06 de maio de 2021.

Correia J.R., “Ciência e Engenharia de Materiais de Construção: Compósitos de Matriz Polimérica”. Coleção Ensino da Ciência e da Tecnologia. Editoras M. Clara Gonçalves & Fernanda Margarido. Lisboa, Portugal: IST Press, 2012

Costa D.H., “Durabilidade de varões compósitos entrançados (BCR) submetidos a ambientes agressivos.” Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Construção e Reabilitação Sustentáveis. Universidade do Minho, 2016.

Costa, R. L., “Durabilidade de perfis pultrudidos de poliéster reforçado com fibras de vidro (GFRP)”. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Novembro 2009.

Costa, C., “Optimização de uma máquina de pultrusão”. Dissertação para grau de mestre em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2012.

Costa, A., Santos, J., Appleton, J., Delgado, J., Pedrinho, V., “Reabilitação do Viaduto Duarte Pacheco”. Encontro Nacional Betão estrutural 2004.

CHO (2021). <https://chomilitaria.com/2018/09/capacete-m1-da-segunda-guerra-mundial/>, Visitado em 06 maio 2021.

Danraka, M., H, Mahir., Ojo-Kupoluyi., Oluwatosin., “Strengthening of Reinforced Concrete Beams using FRP Technique”: A Review. 3199-13213.2017

Davies, J.M., “Lightweight sandwich construction”, Osney Mead, Osxford OX2 0EL: Blackwell Science Ltd, 370 p., 2001.

Diacenco, A., “Modelagem por elementos finitos de materiais compósitos estruturais incorporando material viscoelástico para o controle passivo de vibrações e ruído”. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

Estêvão, M., “Durabilidade de varões de GFRP para reforço de elementos de betão armado”. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, 2017

EngenhariaCivil.com(2021),<https://www.engenhariacivil.com/construcao-pontes-polimeros-reforçados-fibras-carbono-cfrp>. Visitado em 6 de março de 2021

Eurocomp – “Structural Design of Polymer Composites – Design Code and Handbook, the European Structural Polymeric”, Composites Group, Ed. J. L. CLARKE, London, UK, E & FN SPON. 1996.

Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, FIB - Technical report on the design and use of externally bonded fiber reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures, Fédération Internationale du Béton, 2001.

Fernandes, T., “Preparação e caracterização de novos materiais compósitos baseados em fibras de celulose”. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Química. Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008.

Ferreira, A.P.C., “Soluções técnicas para isolamento sonoro de edifícios de habitação”. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 86 p., 2007.

Filho, Silva, J., “Reforço à Torção de Vigas de Concreto Armado com Compósitos de Fibras de Carbono”. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Franco, R., “Produção de Componentes em Materiais Compósitos por Infusão de Resina”. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia e Arquitetura Naval. IST, Lisboa, 2008.

J.P. Firmo, J.R. Correia. “Fire behaviour of thermally insulated RC beams strengthened with EBR-CFRP strips: Experimental study”. Composite Structures Volume 122, April 2015, Pages 144-154.

Furtado, S., “Cálculo estrutural numérico e experimental da carenagem de um veículo”. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Mecânica. IST, Lisboa, 2009.

Gama D., “Análise das propriedades de tensão e flexão de compósitos sanduíche”. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia mecânica, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro , 2017.

Garrido, R., Correia, R., Branco, F., Keller, T., "Creep behaviour of sandwich panels with rigid polyurethane foam core and glass-fibre reinforced polymer faces: Experimental tests and analytical modelling", *Journal of Composite Materials* 2014, Vol. 48(18) 2237–2249.

Garrido, R., Correia, R., Keller, T “Effect of service temperature on the flexural creep of vacuum infused GFRP laminates used in sandwich floor panels”. *Composites Part B: Engineering* Volume 90, 1 April 2016, Pages 160-171.

Gomes, C. E.,”Desenvolvimento de um Painel Sandwich para a Indústria Aeronáutica”. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia mecânica.Universidade de Aveiro, 2008.

Gonçalves, J., “Aderencia de Varões GFRP no betão”. Dissertação para a obtenção do Grau de mestrado em Engenharia Civil. Universidade da Madeira, 2013.

Globo (2021). <https://globoplay.globo.com/v/2520121/>, Visitado em 06 maio 2021.

Gonilha, J. A., Correia, R., Branco, A., Cruz., “Durability of GFRP-concrete adhesively bonded connections: Experimental and numerical studies *Engineering Structures*”. Volume 168, 1 August 2018, Pages 784-798.

Hassan A., Khairallah, F., Elsayed, H., Salman, A., Mamdouh, H., “Behaviour of concrete beams reinforced using basalt and steel bars under fire exposure”. *Engineering Structures*. Volume 238, 1 July 2021, 112251.

Hollaway, L.C.; Cadei, J., “Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites”, *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4 (2002) 131-148.

Hull, D., “An introduction to composite materials”, Cambridge University Press, Cambridge, England, 1981.

Ishai, O., Hiel, C., Luft, M., “Long-term hygrothermal effects on damage tolerance of hybrid composite sandwich panels”. *Composites*, Vol. 26, No. 1, pág. 47-55, 1995.

Gonilha, A., Correia, R., Branco, F., Cruz J., Barros, J., Ramos, L., Gonçalves,D., Santos, T., Alvim, M., *Jornada portuguesa de engenharia de estruturas*, “Pontalumis: Ponte pedonal mista GFRP-BETÃO – Descrição da solução, ensaios e modelação”, 2014.

Juvandes, L., "Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP". Dissertação para a obtenção do Grau de Doutoramento, Universidade do Porto, setembro, 1999.

Juvandes, L., Marques A. T. e Figueiras, J.A., "Materiais compósitos no reforço de estruturas de betão", relatório técnico, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), DECivil, Porto, março, 112 pp.1996

Júnior, C., "Avaliação das propriedades mecânicas de poliuretano tendo como agente de reforço uma nova fibra inorgânica natural". Dissertação para a obtenção do Grau de mestre em Engenharia Mecânica. Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

Kamenny Vek (2021). <https://basfiber.com/>. Visitado em 13 fevereiro. 2021.

Karbhari, V.M., "Gap analysis for durability of fiber reinforced polymer composites in civil infrastructure – Chapter 1: Introduction", CERF, 2001.

Keller, T., "Use of fibre reinforced polymers in bridge construction". Structural Engineering Documents SED 7. Zurique, Suíça: IABSE, 2003.

KERSTING, D. F., "Avaliação de Resinas Epóxi para Fabricação de Materiais Compósitos pelo Processo de Pultrusão" Dissertação para a obtenção do Grau de mestre em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2004.

Khalifa, A., Nanni, A., "Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites". Cement & Concrete Composites .Pages 165-174.2000

Lapena M., "Estudo do comportamento mecânico de cilindros de compósito epoxí/fibra de basalto em ensaios hidrostáticos". Tese de mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais., Instituto de pesquisas energéticas , São Paulo, 2017.

Larena, A.; De la Orden, M.U.; Urreaga, J.M. "Effect of E-glass Short Fiber on the Degradation of Polypropylene", Polymer Degradation and Stability, v.36, n. 1, pp. 81-84, 1992.

Leal, R.P., "Processamento de materiais compósitos. Moldação fechada".Coimbra: s.n. 2007.

Lima, A., "Caracterização do comportamento à fractura de materiais compósitos". Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Universidade do porto – Faculdade de Engenharia, Porto, 1997.

Liao, K., Schultheisz, C. R., Hunston, D. L., "Effects of environmental aging on the properties of pultruded GFRP". Composites Part B, Vol. 30, No. 5, 485-493, 1999. M. P. Groover, Fundamental of modern manufacturin, New York: Jonh Wiley & Sonns, 2002.

Magalhães, G., “Apontamentos de Seleção de Materiais e Processos de Fabrico”, Instituto Superior de Engenharia do Porto,” 2014.

Mapa da obra (2021) . <https://www.mapadaobra.com.br/negocios/concreto-com-pegaprogramada/>. Visitado em 06 fevereiro 2021.

Marinho, A. M., “Durabilidade de Ligações Coladas com Adesivo Epoxídico entre Perfis de GFRP Utilizados em Reabilitação”. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2012.

Moura M., Morais, A., Magalhães, A., “Materiais compósitos – Materiais, fabrico e comportamento mecânico”, Publindústria, Produção de comunicação Lda. 2011.

Martins, J., “Manual de controle de qualidade e durabilidade de estruturas em GRFP”. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade técnica de Lisboa 2011.

Martinho, F., “Conexão de corte e fluência em pontes pedonais mistas constituídas por tabuleiros em materiais compósitos de GFRP”. Dissertação para grau de mestre em Engenharia civil, Universidade técnica de Lisboa, 2013.

Martins, D., Gonilha, J., Correia, J., Silvestre, N., “Exterior beam-to-column bolted connections between GFRP I-shaped pultruded profiles using stainless steel cleats”. Part 1: Experimental study Thin-Walled Structures. Volume 163, June 2021, 107719.

Mazzuca, P., Firmo, J, P., Correia, J., Castilho, E., “Mechanical behaviour in shear and compression at elevated temperature of polyethylene terephthalate (PET) foam”. Journal of Building Engineering Volume 42, October 2021, 102526.

Mazumdar, Sanjay K. “Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering”. 1 ed. Florida, CRC Press, 2002.

Mendonça, V., “Caracterização das propriedades mecânicas de uma resina epoxy reforçada com nanotubos de carbono e ferro” Dissertação para obtenção de grau de mestre em Engenharia Mecânica, IPL, 2019.

Menezes, P., “Comportamento mecânico de sistemas de reforço de paredes de alvenaria”. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de ciências e tecnologia Universidade Nova de Lisboa, 2017.

Meier, U., “Strengthening and stiffening of historic wooden structures with CFRP” – Euromat, Symposium P2 – Materials and Conservation of Cultural Heritage, EPFL – Lausanne.2003

Milanese, A., “Caracterização de Compósitos de Matriz Poliméricas Reforçadas com fibras de Sisal e de Vidro”. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2008.

Moreira, A., “Materiais de construção I”, Departamento de Engenharia Civil, ESTT 2009

Moura, Marcelo F.S.F., Morais, Alfredo B. e Magalhães, António G. 2005. “Materiais Compósitos – Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico”. Porto: Publindústria, 2005.

Morgad, A., “Compósito reforçado com fibras aramida, carbono e Vidro”. Rio de Janeiro 2014, p. 1–8, 2002.

Monteiro, C., “Estudo de viabilidade técnica e económica do reforço de elementos de elementos estruturais”. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto superior de engenharia de Lisboa, 2017.

Nasa (2021). https://www.nasa.gov/centers/kennedy/pdf/167473main_TPS-06rev.pdf. Visitado em 06 maio 2021.

Naglis, M., Almeida, J., “Avaliação dos modos de falha sob impacto de compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras”. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ,1998.

Nadège, R.,Zyed, M., Larbi, A., Ferrier, E., “Experimental study of the in-plane cyclic behaviour of masonry walls strengthened by composite materials Construction and Building Materials”.Volume 164, 10 March 2018, Pages 70-83.

Neves, V., “Comportamento mecânico de compósitos com aplicações navais”. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Mecânica Universidade de Aveiro, 2009.

Noticiário (2021). http://www.noticiario.com.br/noticia.php?cod_noticia=11732. Visitado em 06 maio 2021.

Nunes, F., “Comportamento estrutural de perfis pultrudidos de GFRP reforçados com mantas de CFRP”. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto superior de engenharia de Lisboa, 2012.

NSHousehold Items (2021). <http://pt.nshouseholditems.com/composite-autoclave/57344650.html>. Visitado em 14 de fevereiro. de 2021.

Paula, A., “Influência da Geometria das Seções no Confinamento de Pilares de Betão Armado com Compósitos de CFRP”. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal 2003.

Pardini, L.C., LEVY NETO, F. “Compósitos estruturais”. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.p19-35

Pinho, F., “Paredes De Alvenaria Ordinária - Estudo Experimental com Modelos Simples e reforçados”. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2007

Pinho et al., (2015). <http://www.civil.ist.utl.pt/~CP2015/Link/Papers/9539.pdf>, Visitado em 10 de julho de 2021.

Ramos, C., “Materiais Compósitos Inteligentes”. Tese de Doutoramento em Ciência da Engenharia. Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia, Porto .2016.

Rashid et al. “Experimental and analytical study on the flexural performance of CFRP strengthened RC beams at various pre-stressing levels”. Composite Structures. Volume 227, 1 November 2019, 111323.

Rodrigues, C., “Reparação e reforço de estruturas de betão armado com sistemas de compósitos de FRP”. Publicação UNIC-DTC6. Centro de investigação em estruturas e construção da UNL, 2005.

Romão, C., “Estudo do Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica Reforçados com Fibras Naturais”. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica. Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia, Porto, 2003.

Romeira, T., “Estudo do comportamento de vigas de betão simples e reforçadas com CFRP, sujeitas a envelhecimento”. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia civil, Perfil de estruturas. Universidade Nova de Lisboa, 2012.

Rosa, I., “Comportamento mecânico de materiais compósitos FRP a temperatura elevada”. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil. Técnico de Lisboa, 2016.

Rosa, I., Santos, P., Firmo, J.P., Correia, J.R., “Fire behaviour of concrete slab strips reinforced with sand-coated GFRP bars”. Composite Structures. Volume 244, 15 July 2020, 112270.

Rosa, I., Firmo, J.P., Correia, J., Barros, J.A., “Bond behaviour of sand coated GFRP bars to concrete at elevated temperature – Definition of bond vs. slip relations”. Composites Part B: Engineering. Volume 160, 1 March 2019, Pages 329-340.

Rust (2021). [http:// www.rust.com.br/](http://www.rust.com.br/), Visitado em 6 de março de 2021.

S&P (2021). https://www.sp-reinforcement.pt/sites/default/files/field_literature_file/n) Visitado em 14 de fevereiro. de 2021

Sena Cruz, J.M., Barros J.A.O. “Bond behavior of carbon laminate strips into concrete by pull-out bending tests. In: Proceedings of the international symposium “Bond in concrete – from research to standards”, Budapest (Hungary). p. 614–21, 2002.

Serra, G., “Resposta ao impacto de painéis sanduiche”. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Eletromecânica. Universidade da beira interior, Covilhã 2013.

Silva, A., “Reforço de estrutura de betão armado com CFRP”. Dissertação para o grau de mestre em Engenharia Civil. Instituto superior de Engenharia do Porto, 2013.

Soares (2017). <https://www.ucsminhaescolha.com.br/site/midia/arquivos/05-12-17-materiais-compositos-e-aplicacoes1.pdf>. Visitado em 06 fevereiro 2021.

Song, X. Huang, Z., Shen, J., Yao, Y., “Experimental study on cyclic behavior of hybrid CFRP grids-steel shear walls. Structures”. Volume 28, December 2020, Pages 496-511.

Sousa, J., Correia, J., Fonseca, S., Diogo, A., “Effects of thermal cycles on the mechanical response of pultruded GFRP profiles used in civil engineering applications Composite Structures”. Volume 116, September–October 2014, Pages 720-731.

Silva(2017).https://basedados.aeroubi.pt/pluginfile.php/1785/mod_resource/content/1/Aula_comp%C3%B3sitos.pdf. Visitado em 13 fevereiro 2021

SIKA(2021).<https://usa.sika.com/content/dam/dms/us01/6/broTCforSikaCarboDurStructuralStrengtheningSystems-us.pdf>. Visitado em 17 de fevereiro de 2021.

Teixeira Duarte (2021). <https://www.teixeiraduarte.pt/setores-de-atividade/construcao/> Visitado em maio de 2021.

Taly, N., “Design of modern highway bridges”, editado por Narendra Taly, Department of Civil Engineering, California State University, McGraw-Hill, ISBN 0070629978, EUA, 1352pp, 1998.

Talreja, Ramesh e Manson, Jan-Anders E. Comprehensive Composites Materials. [ed.] Elsevier. 2000. Vol. 2 Polymer Matrix Composites.

Teixeira A., “Ponte desmontável em amterual compósito de fibra de vidro”. Doutorado em ciências em Engenharia civil, UFRJ, Rio de janeiro, 2007.

UFRGS (2021). http://www.ufrgs.br/lapol/projetos/procad_arquivos/projeto0303054.htm, Visitado em 14 de fevereiro de 2021.

Ventura, A., “Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas”. Ciência e tecnologia dos materiais, vol. 21, 2009

Wiberg, A., “Strengthening of Concrete Beams Using Cementitious Carbon Fibre Composites”, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2003.

Zandiacomi, M., “Desenvolvimento e análise de compósitos reforçados com fibra de pano x fibra de aramida utilizados em materiais de fricção em freios de automotivos”. Dissertação para obtenção de grau de mestre em Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas Única, 2002.

Zhang, L., Bai, Yu., Yujun, Q., Bisheng, W., “Post-fire mechanical performance of modular GFRP multicellular slabs with prefabricated fire resistant panels”. Composites Part B: Engineering. Volume 143, 15 June 2018, Pages 55-67.

Zhang L., Dai Yi., Bai Yu., Chen W., Jihong Ye., "Fire performance of loaded fibre reinforced polymer multicellular composite structures with fire-resistant panels". Construction and Building Materials Volume 296, 16 August 2021, 123733.

Zenchetta(2021).<http://graduacao.iqsc.usp.br/files/Materiais-Comp%C3%B3sitos-2.pdf>
Visitado em 06 fevereiro 2021

Wang, Y., Wong, P., Kodur, V., "An experimental study of the mechanical properties of fibre reinforced polymer (FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures". Composite Structures 80 131-140.2007