



Bruno Alexandre Falhas Amaral

Licenciado em Engenharia Civil

Vigas de GFRP Reforçadas com Ligas de Memória de Forma

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Professor Doutor Filipe Amarante Santos

Júri:

Presidente: Professor Doutor Armando Antão

Arguente: Professor Doutor Hugo Biscaia



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro, 2014

Vigas de GFRP Reforçadas com Ligas de Memória de Forma

Copyright © Bruno Alexandre Falhas Amaral, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

*"Do not go where the path may lead,
go instead where there is no path and leave a trail."*

Ralph Waldo Emerson

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de prestar os meus sinceros agradecimentos ao professor Filipe Santos, orientador desta dissertação, pela sua disponibilidade, sábios conselhos e que por acreditar na qualidade do trabalho contribuiu decisivamente para a conclusão do mesmo.

Aos meus amigos de longa data, em particular ao João Campilho, João Coelho, Ludjero Silva e Tiago Luz, por todas as aventuras, viagens e risos, mas principalmente pela grande amizade, motivação e companheirismo.

Para a Tatiana Teixeira e Luise Costa um agradecimento muito querido por serem tão especiais para mim e por estarem sempre prontas a ouvir-me e a responder-me com palavras de incentivo.

Aos meus pais, Carlos e Idalina, e aos meus irmãos, Miguel e Mário, por todo o amor, carinho e apoio incondicional.

Por fim, gostaria de agradecer à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL) por ter disponibilizado os materiais necessários para a realização desta dissertação.

Resumo

Os materiais poliméricos reforçados com fibras (FRP – *Fiber Reinforced Polymer*) apresentam grande potencial de aplicações na Engenharia Civil. A sua utilização aumentou consideravelmente nas duas últimas décadas, em virtude das vantagens em relação aos materiais tradicionais, como a leveza, elevada resistência e boas propriedades de isolamento. Todavia, o conhecimento e investigação a cerca destes materiais compósitos é insuficiente, limitando as suas aplicações práticas.

A perda das propriedades exibidas por este tipo de materiais, quando sujeitos a temperaturas próximas da temperatura de transição vítrea (T_g) da resina, condiciona algumas das suas aplicações. Uma das formas de mitigar a problemática da degradação das propriedades mecânicas destes materiais, associadas a temperaturas moderadamente elevadas, pode passar pela incorporação de uma reserva de pré-esforço, utilizando ligas de memória de forma (LMF). Estes cabos metálicos, ao serem aquecidos, são capazes de recuperar a sua forma inicial mobilizando esforços de compressão excêntricos na secção transversal da viga.

Foram realizados ensaios experimentais para determinar a resposta mecânica do polímero reforçado com fibras de vidro e ligas de memória de forma em função do aumento de temperatura, em termos de curvas força-deslocamento. Os resultados obtidos mostram a degradação das propriedades com a temperatura e a redução da aderência entre o compósito e as LMF. Por sua vez, o efeito pretendido por parte das ligas de memória de forma, na diminuição da flecha da viga, foi alcançado.

Após a validação experimental de um conjunto de modelos numéricos e analíticos desenvolvidos, foi realizado o dimensionamento de perfis comerciais híbridos tendo em conta os Estados Limites Últimos e os Estados Limites de Serviço.

Palavras-chaves: GFRP, temperaturas elevadas, LMF, estruturas adaptativas, ensaio de flexão.

Abstract

The Fibre-Reinforced Polymer (FRP) have great potential in Civil Engineering. Its applications increased considerably in the last two decades, due to its multiple advantages compared to traditional materials such as lightness, high resistance and good insulating properties. However, the lack of knowledge and research about FRP restricts its practical applications.

The loss of properties in FRP materials induced by temperatures near the glass transition temperature of the resin (T_g), places limitations to some of their applications. One way to mitigate the problem related to degradation of mechanical properties of these composites, associated with moderately elevated temperatures, is through the incorporation of a reserve of prestressing, using shape memory alloys (SMAs). These wires recover its initial shape, when heated, mobilizing eccentric compressive stresses in the cross section of the beam.

Experimental tests were carried out to determine the mechanical response of the glass fiber and smart memory alloy reinforced polymer as a function of the temperature increase, in terms of force-displacement curves. The results obtained show the degradation of properties with temperature and the decreasing grip between the composite material and the SMAs. In turn, the intended effect by shape memory alloys, in reducing the maximum deflection, was achieved.

After experimental validation, analytical and numerical models were developed as well as the design of commercial hybrid beams considering the Ultimate and Serviceability Limite State.

Keywords: GFRP, high temperatures, SMAs, adaptive structures, bending test.

Simbologia

Notações Romanas

Símbolo	Descrição
A	Área da secção transversal
dT	Variação da temperatura
E	Módulo de elasticidade
e	Excentricidade
G	Módulo de distorção
H	Altura do perfil I
I	Momento de inércia
L	Comprimento do elemento
M	Momento flector
N	Força mobilizada pela LMF
P	Carga vertical
T	Temperatura
V	Esforço transversal
V1	Provelte de GFRP
V2	Provelte híbrido
W	Módulo de resistência à flexão elástico
y	Distância do centro de gravidade da secção à fibra mais afastada
A_f	Temperatura de fim da austenite
A_s	Temperatura de início da austenite
A_v	Área resistente ao esforço transversal
C_v	Coefficiente de variação
E_A	Modelo de elasticidade da LMF na austenita
E_L	Módulo de elasticidade longitudinal

Simbologia

E_M	Módulo de elasticidade da LMF na martensita
E_{V1}	Módulo de elasticidade do “V1”
E_{V2}	Módulo de elasticidade homogeneizado do “V2”
M_{Ed}	Momento flector actuante
M_f	Temperatura de fim da martensite
M_P	Momento flector devido a carga vertical
M_{Rd}	Momento flector resistente
M_s	Temperatura de inicio da martensite
$P_{hibrido}$	Carga máxima distribuída admissível para o perfil híbrido
$P_{H=200}$	Carga máxima distribuída admissível para o perfil com H=200
T_{crt}	Temperatura a partir da qual há uma redução acentuada das propriedades
t_f	Espessura do banzo
T_g	Temperatura de transição vítrea
$T_{g,mech}$	Temperatura para qual o material perde 50% da sua resistência
t_w	Espessura da alma
V_{Ed}	Esforço transversal actuante
V_{Rd}	Esforço transversal resistente
X_d	Valor de dimensionamento
X_k	Valor característico
\bar{x}	Valor médio
y_1	Distância do centro da LMF até ao centro de gravidade da secção transversal
$1/R$	Curvatura

Notações gregas

Símbolo	Descrição
Δ_P	Variação da carga no ensaio de flexão
γ_m	Coefficiente parcial de segurança
Δ_f	Variação da flecha a meio vão
$\delta_{m\acute{a}x}$	Flecha máxima num elemento
σ_f	Resistência à flexão longitudinal
$\sigma_{r,c}$	Tensão resistente a compressão
$\sigma_{r,t}$	Tensão resistente a tracção
\emptyset	Diâmetro da secção transversal das LMF
α	Coefficiente de dilatação térmica
δ	Flecha num elemento
δ_{ensaio}	Flecha para o ensaio sem bloqueio das LMF
ΔP	Variação da carga máxima distribuída numa viga
ε	Deformação
ρ	Densidade
$\bar{\sigma}$	Desvio-padrão
τ_{rd}	Tensão resistente de corte
ν	Coefficiente de Poisson

Siglas

Símbolo	Descrição
DMA	Ensaio Mecânico Dinâmico
DSC	Ensaio de Calorimetria Diferencial de Varredura
ELS	Estados Limites de Serviço
ELU	Estados Limites Últimos
FRP	Polímeros Reforçados com Fibras
GFRP	Polímeros Reforçados com Fibra de Vidro
HDT	Temperatura de Distorção Térmica
LMF	Ligas de Memória de Forma
NiTi	Nitinol

Índice Geral

Agradecimentos	I
Resumo	III
Abstract	V
Simbologia	VII
Índice Geral	XI
Índice de Figuras	XIII
Índice de Tabelas	XV
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Enquadramento geral e motivação	1
1.2 Objectivos	2
1.3 Organização da dissertação	3
Capítulo 2 - Estado da Arte	5
2.1 Contexto histórico	5
2.2 Constituintes dos Compósitos de FRP	7
2.2.1 Fibras	7
2.3 Resinas Poliméricas	10
2.4 Carga de enchimento.....	14
2.5 Aditivos	14
2.6 Processo de fabrico	15
2.6.1 Pultrusão	15
2.6.2 Moldagem Manual.....	17
2.7 Propriedades dos perfis pultrudidos de GFRP	18
2.8 Vantagens e desvantagens na utilização de perfis pultrudidos de GFRP	21
2.9 Estruturas adaptativas	22
2.10 Compósitos híbridos com memória de forma.....	23
2.11 Transformação martensítica.....	23
2.12 Efeito de memória de forma e Superelasticidade	25
2.13 Efeito de memória de forma simples e duplo	26
Capítulo 3 - Caracterização experimental de um provete híbrido e modelação	29
3.1 Objectivos do ensaio.....	29
3.2 Materiais e Instrumentação.....	29
3.3 Preparação dos elementos ensaiados.....	30
3.4 Esquema de ensaio e procedimento experimental.....	31

Índice Geral

3.5	Resultados e discussão	33
3.6	Modelos	39
3.6.1	Modelo numérico.....	39
3.6.2	Modelo analítico	40
Capítulo 4 - Dimensionamento de vigas híbridas de GFRP e LMF		43
4.1	Estados Limites Últimos.....	43
4.1.1	Coeficientes parciais de segurança para os materiais.....	43
4.1.2	Rotura do material por flexão.....	46
4.1.3	Rotura do material por corte	46
4.2	Estados Limites de Serviço (ELS)	47
4.3	Geometria dos perfis I e coeficientes parciais de segurança utilizados	48
4.4	Resultados e discussão	51
Capítulo 5 - Conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuros		59
5.1	Conclusões do trabalho realizado.....	59
5.2	Perspectivas de desenvolvimentos futuros.....	60

Índice de Figuras

Capítulo 2 - Estado da Arte	5
Figura 2.1 – Primeiras aplicações de compósitos de FRP	5
Figura 2.2 – Diferentes tipos de reforços unidireccionais (Fiberline, 2014).....	8
Figura 2.3 – Diferentes tipos de mantas (Fiberline, 2014).....	8
Figura 2.4 - Mantas de GFRP (Nanni et al., 1996).	8
Figura 2.5 – Ligações em polímeros (adaptado de Mallick, 1993).	11
Figura 2.6 – Efeito da temperatura nas propriedades mecânicas (Morgado, 2012).	13
Figura 2.7 – Formas de perfis pultrudidos (de acordo com Strongwell, 2014).	15
Figura 2.8 – Esquema da linha de fabrico do processo de pultrusão (adaptado de afp fiberglass, 2014).....	16
Figura 2.9 – Pormenor do processo de pultrusão (de acordo com Strongwell, 2014).	16
Figura 2.10 - Composição típica de laminados de GFRP (adaptado de Strongwell, 2014).	17
Figura 2.11 – Esquema do processo de moldagem manual de laminados de GFRP (adaptado de Nuplex, 2014).	18
Figura 2.12 – Comparação do peso específico [Kg/m ³] dos perfis de GFRP com outros materiais (de acordo com ALTO, 2014).	20
Figura 2.13 – Comparação do coeficiente de dilatação térmica dos perfis de GFRP com outros materiais (de acordo com ALTO, 2014).....	20
Figura 2.14 - Comparação do módulo de elasticidade [GPa] dos perfis de GFRP com outros materiais (de acordo com ALTO, 2014).	20
Figura 2.15 - Comparação da tensão de rotura à tracção [MPa] dos perfis de GFRP com outros materiais (de acordo com ALTO, 2014).....	20
Figura 2.16 – Relações constitutivas de diferentes materiais sob tracção uniaxial (ALTO, 2014).....	21
Figura 2.17 – Conceito de estrutura adaptativa (adaptado de Ceballos, 2012).....	22
Figura 2.18 - Estrutura cristalina (Santos, 2011).	24
Figura 2.19 - Transformação martensítica livre de tensões (adaptado de Song et al., 2006).....	25
Figura 2.20 - Esquema do efeito de memória de forma e superelasticidade (adaptado de Santos, 2011).....	26
Figura 2.21 - Esquema dos efeitos de memória de forma I) Simples; II) Duplo (Zanaboni, 2007).....	27
Capítulo 3 - Caracterização experimental de um provete híbrido e modelação	29
Figura 3.1 - manta de fibra de vidro Flexinol.	30
Figura 3.2 – Resina de poliéster	30
Figura 3.3 – Montagem dos equipamentos. Legenda: 1. Controlador da fonte de alimentação, 2. Termopares, 3. Controlador de aquisição de dados, 4. fios eléctricos.	30

Índice de Figuras

Figura 3.4 – Flexinol.....	30
Figura 3.5 – Colocação do peso para retirar o excesso de resina no material híbrido.	31
Figura 3.6 – Esquema geral do ensaio de flexão com dimensões do provete (V1) e distância das LMF a base do provete [mm].	32
Figura 3.7 – Composição geral do ensaio de flexão.	32
Figura 3.9 – Provetes V1 e V2 ancorado nas extremidades.	33
Figura 3.8 – Pormenor do apoio do provete.....	32
Figura 3.10 – Relação força vs deslocamento no ensaio a flexão na viga V1.	34
Figura 3.11 - Relação força vs deslocamento no ensaio a flexão na viga V2.	34
Figura 3.12 - Teoria de Euler-Bernoulli e Timoshenko (de acordo com Wikipédia, 2014).	35
Figura 3.13 – Influência da deformação por esforço transversal em vigas de GFRP	36
Figura 3.14 - Evolução da flecha com a temperatura, no provete V2.....	37
Figura 3.15 - Representação esquemática de um cabo não aderente (adaptado de Camposinhos, 1991).....	38
Figura 3.16 – Modelo numérico.....	39
Figura 3.17 - Curvas [F(N) vs T (°C)] de aquecimento e arrefecimento da LMF (Santos, 2014).	40
Figura 3.18 – Flexão composta	41
Figura 3.19 - Diagrama de momentos devido a flexão composta.....	41
Figura 3.20 - Comparação da variação da flecha a meio vão entre o ensaio com bloqueio das LMF e os modelos.	42
Capítulo 4 - Dimensionamento de vigas híbridas de GFRP e LMF	43
Figura 4.1 - Dimensões da secção transversal do perfil em I (adaptado de fiberline composites, 1995).....	48
Figura 4.2 - Perfil híbrido H=160.....	49
Figura 4.3 – Degradação da resistência a flexão longitudinal a longo prazo com a temperatura.	50
Figura 4.4 – Degradação do módulo de elasticidade longitudinal a longo prazo com a temperatura.	50
Figura 4.5 - Carga máxima P (kN/m) em perfis I (H=160mm).	51
Figura 4.6 - Carga máxima P (kN/m) em perfis I (H=200mm).	52
Figura 4.7 - Esquema da acção das ligas de memória de forma nos perfis de GFRP.....	53
Figura 4.8 - Perfil híbrido H=160mm - 150Ø1mm.....	54
Figura 4.9 - Carga máxima P (kN/m) para perfis híbridos H=160mm - 150Ø1mm.	55
Figura 4.10 - Comparação da carga resistente entre o perfil híbrido e o perfil H=160mm da Fiberline.	56
Figura 4.11 – Variação da carga P do perfil híbrido H=160mm - 150Ø1mm em relação ao perfil I (H=160mm).....	57
Figura 4.12 - Variação da carga máxima do perfil híbrido H=160mm - 150Ø1mm em relação ao perfil I (H=200mm).....	58

Índice de Tabelas

Capítulo 2 - Estado da Arte	5
Tabela 2.1 – Propriedades das fibras de reforço (Correia, 2008).	9
Tabela 2.2 - Propriedades das resinas termoendurecíveis (Correia, 2008).	12
Tabela 2.3 - Propriedades mecânicas de perfis de GFRP (Correia, 2008).	19
Tabela 2.4 - Propriedades físicas de perfis de GFRP (Correia, 2008).	19
Capítulo 3 - Caracterização experimental de um provete híbrido e modelação	29
Tabela 3.1 – Deslocamentos para as diferentes cargas aplicadas no provete V1.....	34
Tabela 3.2 – Deslocamentos para as diferentes cargas aplicadas no provete V2.....	34
Tabela 3.3 - Módulo de elasticidade para V1 e módulo de elasticidade homogeneizado para V2.	37
Tabela 3.4 – Valor médio da flecha do provete V2 (δ) e respectivos desvios padrões (σ), coeficientes de variação (C_v) e variação da flecha a meio vão em percentagem (Δf).	38
Tabela 3.5 - Propriedades do material híbrido modelado.....	39
Capítulo 4 - Dimensionamento de vigas híbridas de GFRP e LMF	43
Tabela 4.1 - Valores para o coeficiente de segurança γ_{m1} (Clarke, 1996).....	44
Tabela 4.2 - Valores para o coeficiente de segurança γ_{m2} (Clarke, 1996).....	44
Tabela 4.3 - Valores para o coeficiente de segurança γ_{m3} (Clarke, 1996).....	45
Tabela 4.4 – Valores para γ_{m4} de acordo com a temperatura de operação (de acordo com fiberline composites, 1995).	45
Tabela 4.5 – Limites de deformação a longo prazo (Clarke, 1996).....	47
Tabela 4.6 - Propriedades do material GFRP (de acordo com fiberline composites, 1995).	48
Tabela 4.7 – Geometria dos perfis I (de acordo com fiberline composites, 1995).	49
Tabela 4.8 - Força mobilizada por uma LMF de 1mm de diâmetro (de acordo com Santos, 2014) ...	53
Tabela 4.9 – Área de LMF necessária para manter a carga distribuída máxima, para 20 °C, em perfis I (H=160mm).....	54
Tabela 4.10 – Área de LMF necessária para manter a carga distribuída máxima, para 20 °C, em perfis I (H=200mm).	54

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Enquadramento geral e motivação

O Homem desde muito cedo que entendeu que combinando diferentes materiais poderia tirar partido das vantagens de cada um deles. A criação dos adobes que junta tijolos de terra reforçados com palha ou mais recentemente o betão armado que apresenta melhor resposta a tracção e não corrói com tanta facilidade que o aço, são alguns exemplos. Trata-se de uma procura permanente para obter melhores desempenhos nas suas construções, promovendo o aparecimento de novos materiais (Pires, 2012).

Os problemas de durabilidade associados aos materiais tradicionais, em simultâneo com a necessidade de maior rapidez de construção e com as crescentes exigências funcionais, impulsionaram o desenvolvimento de novos materiais inovadores, como é o caso dos polímeros reforçados com fibras (FRP). Este material é composto por fibras de reforço (geralmente carbono, vidro ou aramida) embebidas numa matriz polimérica (poliéster, viniléster ou epoxy).

Os materiais compósitos actualmente assumem uma relevância particular devido à sua elevada resistência, leveza, maleabilidade e facilidade de aplicação, que se traduz num reduzido custo de manutenção. Apesar das suas vantagens, estes apresentam também inconvenientes que condicionam consideravelmente a sua aplicação em termos práticos. As principais restrições estão associadas ao comportamento frágil, susceptibilidade para fenómenos de instabilidade e perda de propriedades para temperaturas inferiores à temperatura de transição vítrea das resinas (Correia, 2008).

Apesar do uso do GFRP ter crescido consideravelmente nos últimos anos, ainda há alguma relutância por parte dos engenheiros e empresas de construção na sua utilização, devido ao insuficiente conhecimento a cerca deste material e os custos associados à sua produção. A solução para estes problemas pode passar pelo aumento da procura destes compósitos, o que levaria a redução dos custos de produção por parte dos fabricantes. Ao mesmo tempo, a investigação desempenha um papel crucial para o desenvolvimento de regulamentos apropriados para o dimensionamento de estruturas com este tipo de materiais e melhor percepção relativamente a um conjunto de questões, como as tecnologias de ligação GFRP/betão e o comportamento do material compósito para temperaturas elevadas (Correia, 2008).

Quando o compósito de GFRP é aquecido a temperaturas moderadamente elevadas (70°C até 120°C) as suas propriedades mecânicas são significativamente reduzidas, condicionando a segurança da estrutura. Neste sentido, é essencial desenvolver medidas de protecção para o GFRP de forma a contrariar o efeito das temperaturas na redução da resistência e, desta forma, garantir a segurança estrutural.

A utilização de materiais compósitos juntamente com materiais capazes de alterar a sua forma ou propriedades mecânicas é um conceito que permite resolver algumas das desvantagens associadas à sua utilização. Estes materiais denominados “inteligentes” conseguem adaptar-se ao meio que os rodeia alterando a sua forma e propriedades por intermédio de estímulos externos, como, por exemplo, variações de temperatura ou aplicação de tensões. Em engenharia este tipo de materiais é bastante procurado, desde o mais simples até ao mais complexo sistema mecânico. A incorporação de ligas de memória de forma na matriz dos materiais compósitos são uma das principais áreas de pesquisa para o desenvolvimento destes compósitos denominados híbridos (Ceballos, 2012).

As LMF são uma classe única dos metais que apresentam duas propriedades particulares: o efeito de memória de forma e a superelasticidade. A primeira permite ao material recuperar a sua geometria original durante o aquecimento, depois de ter sido sujeito a deformação. A superelasticidade possibilita a LMF resistir a ciclos de carga e descarga, sem ocorrência de tensões residuais, desenvolvendo histerese, que permite ao material dissipar energia. Estas propriedades combinadas com a sua relativa elevada resistência, fazem dos LMF uma tecnologia com vasta aplicação para a Engenharia Civil. A maioria destas aplicações estão ligadas a segurança anti-sísmica devido à sua elevada capacidade de amortecimento e reposicionamento (Santos, 2011).

O estudo nesta dissertação consiste em mitigar a redução da resistência do compósito quando sujeito a temperaturas elevadas, avaliando o comportamento de um compósito híbrido constituído por GFRP e LMF.

1.2 Objectivos

A presente dissertação tem como principal objectivo o estudo do comportamento mecânico, a temperaturas moderadamente elevadas do compósito híbrido constituído por polímeros reforçados com fibra de vidro e ligas de memória de forma. Como já foi referido, a sensibilidade que os perfis de GFRP apresentam para estas temperaturas é umas das suas principais desvantagens. Com o estudo desta solução híbrida, pretende-se mitigar a sensibilidade dos perfis de GFRP a temperaturas moderadamente elevadas.

Para estudar este efeito, foram fabricados dois provetes de GFRP com secção rectangular pelo processo de moldagem manual, sendo que num dos provetes foram incorporados duas LMF. Ambos

os provetes foram sujeitos a um conjunto de ensaios experimentais de flexão, para diversos níveis de cargas, à temperatura ambiente. No material híbrido as LMF foram submetidas a diferentes temperaturas, através da passagem de corrente eléctrica (Efeito de Joule¹). Com estes ensaios procurou-se caracterizar experimentalmente o módulo de elasticidade do material fabricado, e estudar o efeito da temperatura na viga híbrida.

Durante o ensaio de flexão procurou-se perceber o efeito da temperatura de serviço na deformabilidade do material compósito. Tendo em conta a perda de aderência entre os LMF e o GFRP, devido ao aumento da temperatura, foram colocados dois dispositivos de ancoragens nas extremidades da viga.

Por fim, foram elaborados e validados modelos numéricos e analíticos para simular o comportamento do sistema e assim conceber e testar diversos critérios de dimensionamento para vigas híbridas.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos.

No presente capítulo, é feita uma introdução do tema desenvolvido na dissertação e a sua importância para a Engenharia Civil, definindo-se também os objectivos do trabalho.

O capítulo 2 é constituído por uma introdução histórica dos perfis pultrudidos de GFRP, seguindo-se a descrição dos constituintes mais utilizados na produção dos compósitos, processos de fabrico mais usuais, as suas propriedades, vantagens e desvantagens e a decomposição térmica de compósitos em situação de incêndio. Para terminar o capítulo, é feita uma descrição geral das estruturas adaptativas e dos LMF, incluindo uma descrição detalhada das transformações martensíticas que são responsáveis pela efeito de memória de forma e superelasticidade.

No terceiro capítulo, está especificado o trabalho experimental efetuado, em termos de materiais e instrumentação, preparação, procedimento experimental e respectivo esquema de ensaio. São também apresentados e discutidos os resultados obtidos nesta campanha experimental, assim como resultados das modelações realizadas. A viabilidade deste modelo em traduzir a variação das deformações do estrutura adaptativa quando sujeita a temperaturas elevadas é avaliada e validada.

No quarto capítulo, é feito o dimensionamento das vigas de GFRP reforçadas com LMF. São descritos os coeficientes parciais de segurança, cálculo da área de reforço necessária para suprimir

¹ A passagem da corrente eléctrica num condutor metálico provoca a libertação de energia sobre a forma de calor. Este efeito de transformação de energia eléctrica em energia calorífica é designado por efeito de Joule, em homenagem ao físico Inglês James Prescott Joule (Guedes, 2000).

Introdução

a redução da resistência da viga devido ao efeito da temperatura, e uma solução geométrica para a incorporação dos LMF. Finalmente, com o propósito de explorar as capacidades dos LMF é demonstrado o caso de substituição de perfis I de GFRP por perfis híbridos com dimensões inferiores. Neste capítulo são também expostos e discutidos os resultados atingidos.

No quinto capítulo, são expostas as conclusões gerais da dissertação e propostas para investigações futuras.

Capítulo 2 - Estado da Arte

2.1 Contexto histórico

A procura de novos materiais com melhores desempenhos é uma busca constante por parte do Homem, remontando à antiguidade. Nas civilizações do Antigo Egipto e Mesopotâmia eram utilizados tijolos de terra crua reforçados com palha, que preveniam problemas associados a fendilhação devido a secagem do tijolo.

Os materiais compósitos são constituídos por dois ou mais materiais, de modo a obter um novo material que possui melhores propriedades. Actualmente, o material compósito mais utilizado nas construções é o betão armado, este material explora as melhores propriedades do betão e do aço.

Apesar do conceito e da produção de materiais compósitos já existir há vários séculos, a incorporação de fibras de reforço numa matriz polimérica é recente. Esta técnica foi desenvolvida no início do séc.XX, com o desenvolvimento da indústria dos plásticos. A primeira aplicação destes materiais data da década de 1930, com a sua aplicação em barcos (Correia, 2008).

A aplicação dos materiais compósitos na construção só teve lugar muito depois do seu aparecimento, sendo que as indústrias aeronáutica e naval foram as principais promotoras do desenvolvimento destes materiais. Em 1940 foram aplicados em coberturas de radares e em navios (Fig. 2.1). Oito anos depois, viriam a ser também utilizados pela primeira vez na indústria petrolífera (Correia, 2008).



a) Cobertura de radares
(Gomes *et al.*, 2008)



b) Cascos de navios
(Gomes *et al.*, 2008)



c) Indústria petrolífera
(de acordo com *CIP composite*,
2014)

Figura 2.1 – Primeiras aplicações de compósitos de FRP.

Em 1950, os compósitos de FRP começaram a ser utilizados na indústria química, papel, automóvel, estações de tratamentos de águas e esgotos e estações eléctricas. Devido às suas propriedades,

cumprem os requisitos destas indústrias em relação aos ambientes quimicamente agressivos, comportamento térmico e electromagnético (Pires, 2012).

Posteriormente, em 1960, foram criados os “materiais compósitos avançados”, compostos por fibras de carbono, que conferem um elevado módulo de elasticidade e resistência. Porém, a sua utilidade restringiu-se às indústrias navais e aeronáuticas onde a relação custo/benefício era mesmo assim favorável. Ainda assim, com o intuito de abranger novos mercados e em consequência da crise energética, na década de 1970 os custos associados à produção foram reduzidos, originando novas aplicações, nomeadamente em artigos de desporto e lazer, como barcos de recreio, raquetes de ténis, bicicletas e aviões. Ainda nesta década, a indústria da construção ganhou interesse nos FRP (Correia, 2008), essencialmente como elementos constituintes de fachadas de edifícios, que se caracterizavam por apresentarem uma arquitectura moderna. No entanto, por razões financeiras e rejeição por parte de engenheiros e arquitectos, devido sobretudo a falta de informação técnica, levaram ao abandono desta solução, ainda pioneira (Pires, 2012; Morgado, 2012).

Durante a década de 90, a grande evolução dos processos de fabrico dos compósitos de FRP, particularmente do processo de pultrusão, que levou à redução dos custos dos materiais compósitos, aliada a necessidade de renovação de algumas infraestruturas existentes, foram factores que permitiram a crescente aceitação destes materiais na indústria da construção. Nas últimas décadas, verifica-se um maior esforço na investigação, que resulta no desenvolvimento de uma grande gama de produtos com grande sucesso comercial, destacando-se os seguintes: varões e cabos de pré-esforço para reforço de estruturas de betão, laminados, mantas e cabos para o reforço exterior de estruturas de betão, aço ou alvenaria, cabos de pré-esforço para pontes suspensas, perfis ou painéis estruturais. Os produtos referidos são utilizados não só em obras de reforço e de reabilitação, mas também para novas construções (Morgado, 2012).

Nos últimos anos, foram desenvolvidos um conjunto de ligas metálicas que combinam a suas capacidade inerentes de dissipação de energia com propriedades de resistência relativamente elevadas, designadas de ligas de memória de forma. Duas das suas principais propriedades são o efeito de memória de forma e a superelasticidade.

O efeito de memória de forma é uma propriedade singular das ligas metálicas que exibem transformações martensíticas, possibilitando recuperar deformações aparentemente permanentes quando são aquecidos acima de uma determinada temperatura. A superelasticidade está associada a uma recuperação não linear das deformações (até 8%) durante ciclos de carga e descarga (Santos, 2011).

As primeiras observações do efeito de memória aconteceram em 1932 pelo físico Sueco Arne Ölander quando usou ligas AuCd (Ouro-Cádmio). Em 1938, Greninger e Mooradian observaram o aparecimento e desaparecimento da estrutura cristalina martensítica com o aumento e diminuição da

temperatura de uma liga de CuZn (Cobre-Zinco). As propriedades termoelásticas da fase martensítica de uma liga AuCd foram amplamente divulgadas por Kurdjumov e Khandros (1949), e mais tarde por Chang e Read, em (1951). Nos anos 60, no “*Naval Ordnance Laboratory*”, Buehler e Wiley descobriram o efeito de memória de forma numa liga de níquel e titânio, a qual denominaram de Nitinol. O Nitinol apresentava um grande potencial, mas devido à dificuldade no fabrico e processamento deste material, apenas nos anos 90 é que estas questões técnicas foram ultrapassadas e o produto foi comercializado (Santos, 2011).

As ligas com memória de forma e outros materiais chamados “inteligentes” têm vindo a ser progressivamente introduzidos nas aulas de cursos de engenharia por todo o mundo, sendo objecto de diversos estudos e investigações inovadoras. A incorporação destes materiais em estruturas adaptativas é alvo de grande interesse por parte da comunidade científica (Santos, 2011).

2.2 Constituintes dos Compósitos de FRP

Polímeros reforçados com fibras são materiais compósitos, que tal como o próprio nome sugere, resultam da combinação de diferentes materiais culminando num produto com propriedades superiores a qualquer um dos seus constituintes. A matriz assegura a união, forma, rigidez e transmite os esforços para cada uma das fibras que são os elementos mais resistentes. Para além das fibras podem juntar-se os “fillers” que possibilitam uma maior resistência com diminuição de custos, tal como os aditivos que conferem características especiais ao material (Mazumdar, 2001).

Os compósitos de FRP (fiber reinforcement polymer) são ideais para uma grande amplitude de aplicações utilizando-se em inúmeras indústrias, sobretudo devido à maleabilidade das suas propriedades que são ajustadas de acordo com a utilidade pretendida. Estes compósitos têm o potencial para substituir o aço e alumínio sendo frequentemente usados em construção, e por vezes com melhor desempenho. A substituição de estruturas de aço por compósitos diminui de 60 à 80% o peso da estrutura e no caso do alumínio 20 à 50% (Mazumdar, 2001).

2.2.1 Fibras

As fibras são o principal constituinte do material compósito. Ocupam a maior fracção do volume e resistem a cerca de 70 a 90% da carga actuante no material, transmitindo as forças ao longo da sua direcção longitudinal (Mazumdar, 2001). Uma adequada selecção do tipo de fibras, a sua orientação e quantidade é essencial pois influencia as características do compósito como a resistência, módulo de elasticidade, fadiga, condutividade térmica, eléctrica e custo final do material compósito (Mallick, 1993).

A disposição das fibras pode ser feita de diferentes formas desde fibras curtas de 3 a 50 mm até longos filamentos contínuos quase paralelos, que podem ser torcidos ou não torcidos, Figura 2.2. As fibras podem também ter o formato de mantas de reforço, Figura 2.4. As mantas podem ser compostas por fibras, curtas ou contínuas, dispostas aleatoriamente ou só por fibras contínuas biaxiais (mais comuns $0^\circ/90^\circ$ ou $+45^\circ/-45^\circ$) ou triaxiais ($0^\circ/\pm 45^\circ$), com a possibilidade de serem entrelaçadas ou sobrepostas. Estas formas podem ser combinadas originando fibras contínuas direccionadas, com fibras curtas ou contínuas, dispostas aleatoriamente (Figuras 2.3 e 2.4).

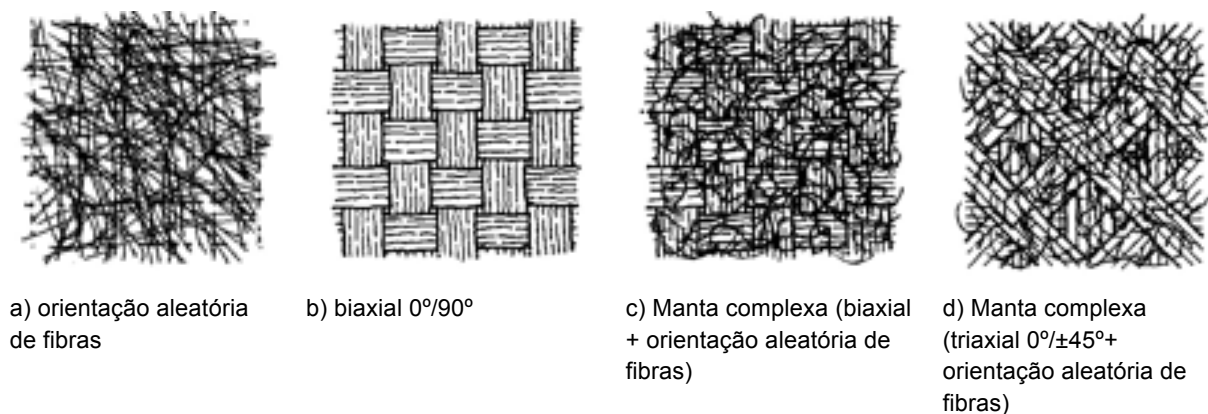
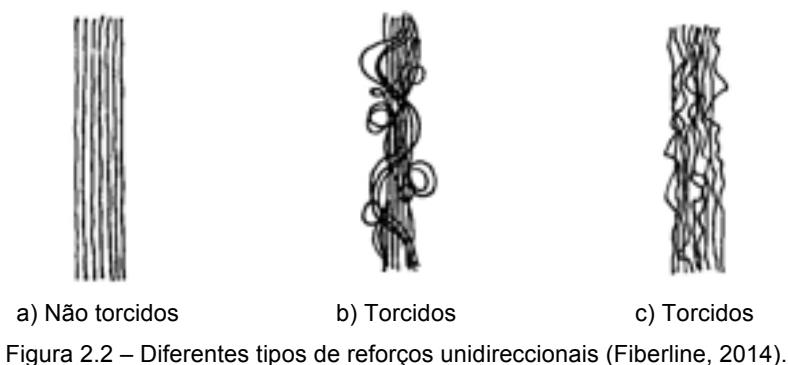
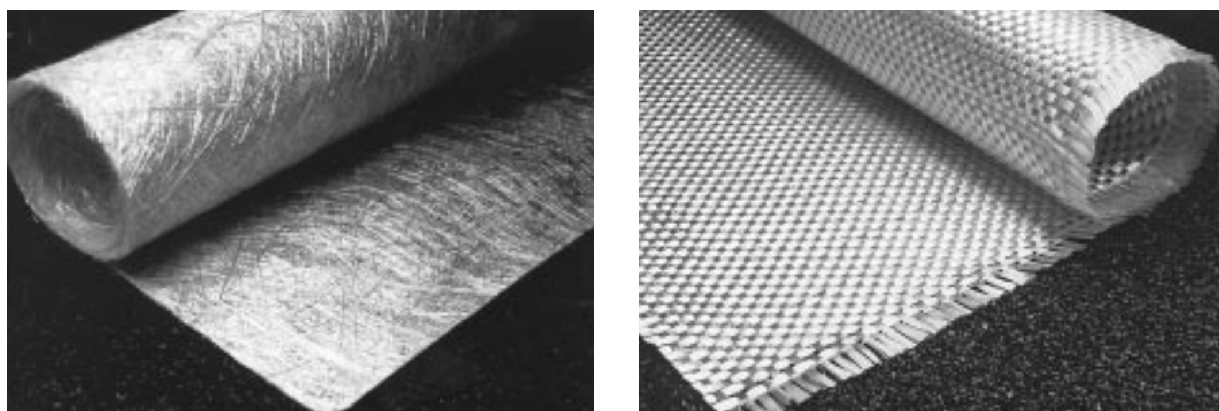


Figura 2.3 – Diferentes tipos de mantas (Fiberline, 2014).



a) Manta de fibras curtas b) Manta com orientação biaxial

Figura 2.4 - Mantas de GFRP (Nanni *et al.*, 1996).

Fibras longas e contínuas organizadas segundo uma orientação unidireccional têm grande resistência e rigidez na direcção em que se desenvolvem, contudo, na direcção transversal estes valores são significativamente baixos. Para uma lâmina com fibras nas duas direcções (bidireccional) os valores de resistência e da rigidez variam conforme o tipo e quantidade de fibras aplicadas nas respectivas orientações. Este tipo de soluções são usadas preferencialmente para aplicações estruturais. No que diz respeito às fibras descontínuas (curtas), são organizadas segundo uma direcção ou dispostas aleatoriamente. Apesar de apresentarem valores de resistência mais baixos que as fibras contínuas, devido à sua disposição aleatória, obtém-se propriedades mecânicas e físicas muito semelhantes em qualquer direcção no plano da lâmina (Mallick, 1993). Estas fibras são geralmente recomendadas para aplicações não estruturais (Mazumdar, 2001).

Assim, os FRP são materiais anisotrópicos, com máxima resistência e rigidez ao longo da sua direcção principal. À medida que nos desviamos dessa orientação estes valores diminuem até um mínimo correspondente à direcção transversal das fibras.

Existem dois grupos de fibras, as fibras naturais e as sintéticas. Usualmente as fibras sintéticas são as mais utilizadas pois adequam-se melhor às necessidades do homem, exibindo melhores propriedades que as fibras naturais (Wallenberger, 2004). De entre o grupo de fibras sintéticas, as mais utilizadas são as fibras de vidro, carbono e aramida, cujas principais propriedades físicas, mecânicas e térmicas são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Propriedades das fibras de reforço (Correia, 2008).

Propriedade	Unidade	Vidro - E	Carbono	Aramida
Resistência	<i>MPa</i>	2350 - 4600	2600 - 3600	2800 – 4100
Módulo de elasticidade	<i>GPa</i>	73 – 88	200 – 400	70 – 190
Extensão na rotura	%	2,5 – 4,5	0,6 – 1,5	2,0 – 4,0
Densidade	<i>g/cm³</i>	2,6	1,7 – 1,9	1,4

As fibras de vidro são um dos materiais com maior sucesso como reforço dos materiais compósitos, tendo sido muito usadas ao longo dos últimos 20 anos, com aplicações a nível militar e civil (Galasso, 1989; Kutz, 2002). A sua popularidade deve-se à combinação das suas propriedades de resistência à tracção elevada, baixo custo, estabilidade química e da aptidão como material isolante (Mallick, 1993). Contudo, possui um módulo de elasticidade relativamente baixo, fraca resistência à abrasão e fadiga, aumentando a sua susceptibilidade à rotura.

Existem diferentes classe de fibras de vidro (E, S, C) de acordo com a sua composição química. Todas têm como base a sílica (SiO_2) e outros óxidos (Al_2O_3 , Na_2O , CaO , B_2O_3 , K_2O , Li_2O , MgO etc.) (Galasso, 1989) mas apresentam propriedades distintas. As fibras de classe E têm boas propriedades de isolamento eléctrico, resistência à corrosão, para a maioria dos ácidos e são as fibras mais baratas, representando cerca de 80 à 90% da produção de fibras de vidro. As fibras do tipo S têm maior resistência mecânica tal como melhor comportamento a temperaturas elevadas, contudo são mais caras. A classe C possui boa estabilidade química em ambientes corrosivos, sendo por isso de grande utilidade na indústria química (Pires, 2012).

As fibras de carbono apresentam inúmeras vantagens, salientando-se a elevada resistência e alto módulo de elasticidade, associados a um peso próprio baixo, reduzida condutividade térmica e elevada resistência à fadiga (Mallick, 1993). No entanto é mau isolante eléctrico e o seu uso traz custos elevados, sendo a sua utilização comercial muito limitada. As fibras de carbono são bastante utilizadas na indústria aeroespacial pois a poupança no peso é mais condicionante que o custo da sua utilização.

As fibras de aramida têm alta resistência à tracção, cerca de 50% superior do que a fibra de vidro E. Tal como as fibras de carbono exibem baixo coeficiente de dilatação térmica (Pires, 2012). Porém, a sua fraca resistência à compressão torna-se indesejável na aplicação em elementos comprimidos ou sujeitos à flexão. Isto, associada ao facto de sofrerem degradação quando expostas à radiação ultravioleta tornam-nas pouco atractivas para a indústria da construção civil.

2.3 Resinas Poliméricas

As resinas poliméricas têm como função distribuir os esforços entre fibras promovendo uma melhor eficiência estrutural, e conferir rigidez global a estrutura do compósito (May, 1987). Somam-se ainda as seguintes funções da resina no material compósito (Mallick, 1993):

- Protecção contra o ambiente adverso;
- Isolante eléctrico;
- Retardante de fogo, contribuindo para a resistência no estado limite último do FRP;
- Aumenta da resistência à encurvadura das fibras quando sujeitas à compressão, mantendo-a na sua posição;
- Acabamento superficial.

Um polímero é uma molécula de cadeia longa, também designada de macromolécula, unida por ligações covalentes. O material polimérico (ex.: plástico) é um conjunto de vários polímeros que são divididos em dois grandes grupos: termoplásticos e termoendurecíveis. A diferença entre os dois está no facto dos materiais termoplásticos poderem assumir novas formas, sobre o efeito de pressão ou

temperatura, enquanto que nos termoendurecíveis uma vez arrefecidos não são passíveis de adquirirem outra forma (Mallick, 1993).

As resinas termoendurecíveis são usadas na matriz dos materiais compósitos e possuem ligações químicas cruzadas (Fig. 2.5). Estas ligações originam estruturas rígidas tridimensionais que, quando formadas, durante a cura da resina, não permitem ao polímero adquirir novas formas. Estas resinas têm como vantagens a baixa viscosidade, que possibilita a impregnação das fibras sem ajuda de calor ou pressão, boa resistência química e estabilidade térmica. Quando, em comparação com os polímeros termoplásticos, exibem menor fluência. Porém, são materiais com baixa ductilidade e com tempo de armazenamento limitado (Mallick, 1993; Nanni *et al.*, 1996).

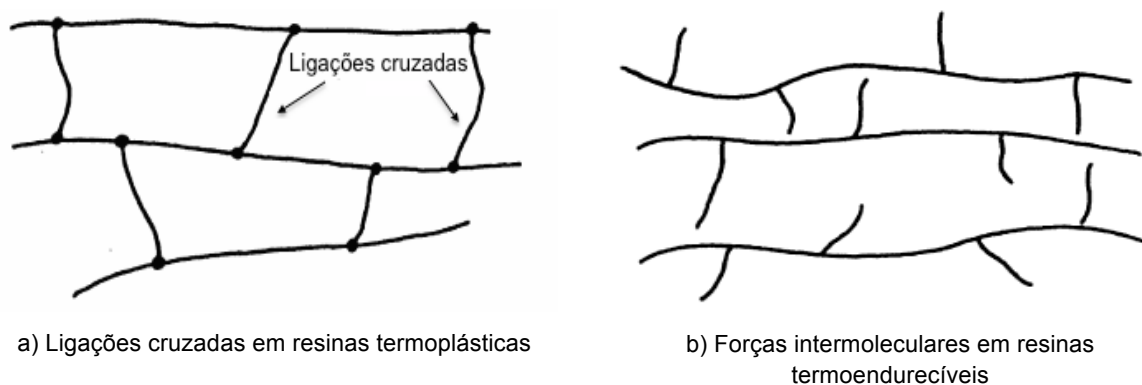


Figura 2.5 – Ligações em polímeros (adaptado de Mallick, 1993).

Nas resinas termoplásticas não existem ligações químicas, mas sim ligações secundárias mais frágeis (forças intermoleculares) que mantêm as moléculas nas suas posições (Fig. 2.5). Com o efeito do calor e da pressão as ligações podem romper-se, temporariamente, permitindo o movimento das moléculas para outras posições. Depois do arrefecimento as ligações secundárias restituem-se e as moléculas permanecem nas suas novas posições, resultando numa nova forma sólida. As principais vantagens em relação as resinas termoendurecíveis reside na elevada resistência ao choque, serem materiais mais dúcteis e por oferecerem maior resistência às fissuras. Outras vantagens destes polímeros são:

- Curto tempo de fabricação;
- Não há limite de tempo para armazenamento;
- Reciclável;
- Fácil de manusear e reparar.

Apesar destas vantagens o uso e desenvolvimento destas resinas tem crescido mais lentamente devido a sua viscosidade, que torna difícil a impregnação das fibras na matriz. Em comparação com

as resinas termoendurecíveis exibem baixa estabilidade térmica e menor resistência a fadiga (Mallick, 1993; Nanni *et al.*, 1996).

De acordo com o que foi descrito anteriormente, as resinas mais utilizadas na matriz dos FRP são as termoendurecíveis, e dentro destas destacam-se a poliéster, viniléster, epoxídicas e fenólicas. As suas principais propriedades estão indicadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Propriedades das resinas termoendurecíveis (Correia, 2008).

Propriedades	Unidade	Poliéster	Viniléster	Epoxídica
Resistência	<i>Mpa</i>	20 - 70	68 - 62	60 - 80
Módulo de elasticidade	<i>GPa</i>	2 -3	3.5	2 - 4
Extensão na rotura	%	1 - 5	3 - 4	1 - 8
Densidade	<i>g/cm³</i>	1,2 – 1,3	1,12 – 1,16	1,2 – 1,3
Temp. de transição vítrea	<i>°C</i>	70 - 120	102 - 150	100 - 270

A resina epoxídica possui uma grande variedade de propriedades que a tornam num material com diversas finalidades, podendo ser utilizado na matriz do material compósito mas também como adesivo para uma grande variedade de fibras ou de outros materiais, como o aço ou betão, devido à sua excelente adesão. São resinas de baixa retracção durante a cura e com óptima resistência aos solventes e químicos. As desvantagens são o custo mais elevado, em relação as resinas de poliéster e de viniléster, e o longo tempo de cura (Mouritz e Gibson, 2010; May, 1987).

A resina de poliéster é, de longe, a mais utilizada, comum em barcos ou na produção de grandes estruturas em material compósito, muito devido ao seu baixo custo. O preço é cerca de 25% mais baixo que as resinas de viniléster e cerca de 33-50% em relação às resinas epoxídicas. As vantagens não se limitam ao preço mas também à facilidade com que são moldadas por serem de baixa viscosidade e à versatilidade das suas propriedades. No entanto, são frágeis e com fraca durabilidade, o que não impede que sejam as resinas mais utilizadas no fabrico de FRP em engenharia (Strong e Ploskonka, 1989).

As resinas de viniléster combinam as melhores propriedades da resina poliéster e epoxídica, apresentando um custo intermédio. Possuem viscosidade reduzida e baixo tempo de cura, tal como a resina de poliéster e as suas aplicações são também comuns a estas resinas. Apresentam, em geral, melhores propriedades mecânicas e químicas que as resinas poliéster. Estas resinas são

particularmente adequadas ao reforço de estruturas de betão com materiais compósitos, devido à sua flexibilidade e estabilidade em ambientes altamente alcalinos (Nanni *et al.*, 1996).

Como já foi referido, as resinas poliméricas são muito úteis. Contudo, a sua temperatura de degradação é inferior à das fibras, à qual está associada uma considerável redução das suas propriedades. De facto, há uma transformação do seu estado vítreo para o estado viscoso, a que se dá o nome de transição vítrea, comprometendo o correto funcionamento do material e impedindo o aproveitamento pleno das propriedades mecânicas das fibras. É por isso importante conhecer o valor de T_g do polímero, que se pretende para uma determinada aplicação.

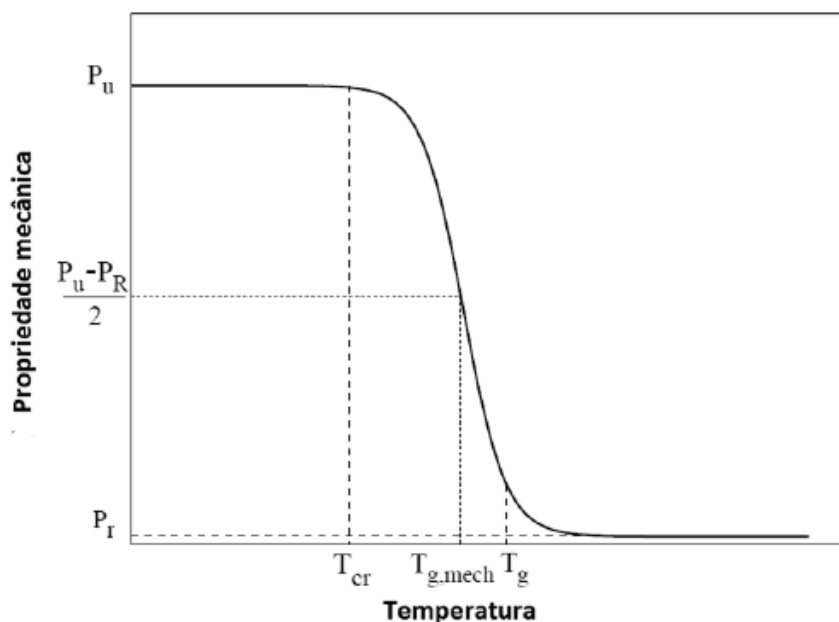


Figura 2.6 – Efeito da temperatura nas propriedades mecânicas (Morgado, 2012).

A curva representada na Figura 2.6 relaciona as propriedades mecânicas (P) de um laminado com a temperatura (considerada constante ao longo do material). As variáveis P_u e P_r correspondem aos valores das propriedades à temperatura ambiente e a temperaturas elevada, respectivamente. A curva traçada é representativa das alterações no módulo de elasticidade, módulo de distorção e resistência à compressão (Pires, 2012).

Como se pode observar, o compósito mantém as suas propriedades praticamente constantes para temperaturas inferiores a temperatura crítica, a partir da qual dá-se uma redução acentuada das propriedades iniciais do material, passando pelo estado de transição vítrea em que, como já foi referido, o material perde a rigidez associada ao estado vítreo. $T_{g,mech}$ é a temperatura associada a uma redução de 50% das propriedades mecânicas, sendo normalmente 15 a 20°C inferior à T_g (Pires, 2012).

2.4 Carga de enchimento

Normalmente designados por “fillers” na literatura internacional, são materiais de enchimento inorgânicos que reduzem o custo dos compósitos e melhoram o comportamento do FRP, que dificilmente não seria alcançado apenas com fibras e resinas (de acordo com *Composite Institute*, 1998).

Quando usados em FRP, representam cerca de 40-65% do peso, influenciando bastante o comportamento do material. Em comparação com as resinas e as fibras são o material mais barato, reduzindo, portanto, os custos globais do compósito (de acordo com *Composite Institute*, 1998).

Seguem-se alguns exemplos da influência dos “fillers” no desempenho do laminado (de acordo com *Composite Institute*, 1998):

- Menor retracção da resina
- Aumento da resistência mecânica do compósito;
- Diminuem o conteúdo orgânico, traduzindo-se no acréscimo de resistência ao fogo;
- Ajudam a prevenir o aparecimento de fissuras e aumentam a resistência ao aparecimento das mesmas;
- Promove a transferência de esforços entre a resina e as fibras, melhorando o comportamento físico e mecânico.

2.5 Aditivos

Os aditivos são muito importantes, em qualquer FRP, sendo usados em menor quantidade que os restantes constituintes. Ainda assim permitem modificar certas propriedades, melhorando o desempenho do compósito (de acordo com *Composite Institute*, 1998).

Nas resinas de poliéster os catalisadores são os aditivos mais importantes. Quando juntos com promotores aceleram a cura da resina, havendo também inibidores, que retardam a cura. Para além destes aditivos existem os colorantes, agentes de libertação que facilitam a remoção do FRP nos moldes e outros com as seguintes funções (de acordo com *Composite Institute*, 1998):

- Reduzir a retracção;
- Diminuir a viscosidade;
- Libertação do ar durante à aplicação da resina evitando “bolhas”;
- Aumentar a dureza do compósito;
- Diminuir a inflamabilidade e a produção de fumos tóxicos em caso de incêndio (retardadores de incêndio);

- Retardar a oxidação dos polímeros e da resultante degradação dos mesmos (antioxidantes);
- Reduzir a tendência dos polímeros para atrair carga eléctrica (anti-estáticos);
- Melhoramento das características de processamento (plastificantes).

Note-se que os aditivos aumentam as propriedades do FRP ao nível mecânico, de processabilidade, de aparência e químico, constituindo elementos praticamente indispensáveis no desempenho do compósito.

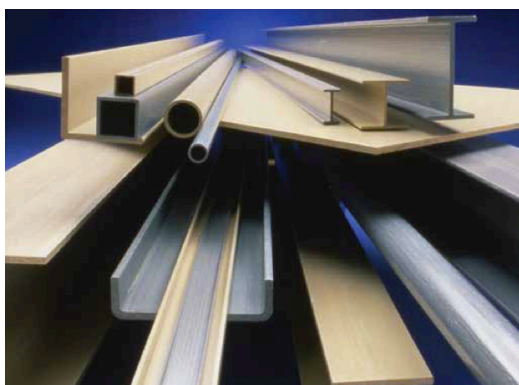
Se, por um lado, aumentam o custo do material, por outro, permitem o uso de resinas mais baratas em detrimento de outras mais caras.

2.6 Processo de fabrico

Existem múltiplas técnicas de produção de compósitos de FRP, que são escolhidas de acordo com a complexidade, quantidade, dimensões, custos e propriedades físicas e mecânicas pretendidas pelo cliente para o produto final (Starr, 2000). Nesta secção são apresentadas as técnicas mais comuns para o fabrico destes materiais.

2.6.1 Pultrusão

O processo de pultrusão, que teve origem nos E.U.A. na década de 1950, é o processo de fabrico mais utilizado na produção de compósitos de FRP. Este método tem vindo a sofrer múltiplas transformações ao longo dos anos tornando-se cada vez mais eficaz (Pires, 2012). Actualmente existem diversas formas de perfis possíveis de se obter, como as barras circulares ou rectangulares, secções transversais abertas (I, H, L ou U), fechadas (tubulares, circulares ou rectangulares) e secções multicelulares fechadas (Fig. 2.7).



a) Perfis pultrudidos



b) Secções multicelulares fechadas

Figura 2.7 – Formas de perfis pultrudidos (de acordo com *Strongwell*, 2014).

Neste processo, as fibras são posicionadas em rolos e bobinas e puxadas por dispositivos de tracção, ao longo de guias que garantem a correta posição das mesmas. De seguida, são impregnadas numa solução que contém resina, “fillers” e aditivos, ficando completamente saturadas. À saída as fibras são posicionadas na pré-forma para ser retirado o excesso de resina antes da cura feita nos moldes, que são aquecidos electricamente. O compósito já endurecido é puxado para ser cortado por uma serra, nas dimensões pretendidas, sem ser arrefecido para evitar roturas ou deformações quando em contacto com os dispositivos de tracção (de acordo com *afp fiberglass*, 2014).

Nas Figuras 2.8 e 2.9, estão esquematizadas as linhas de produção de perfis pultrudidos.

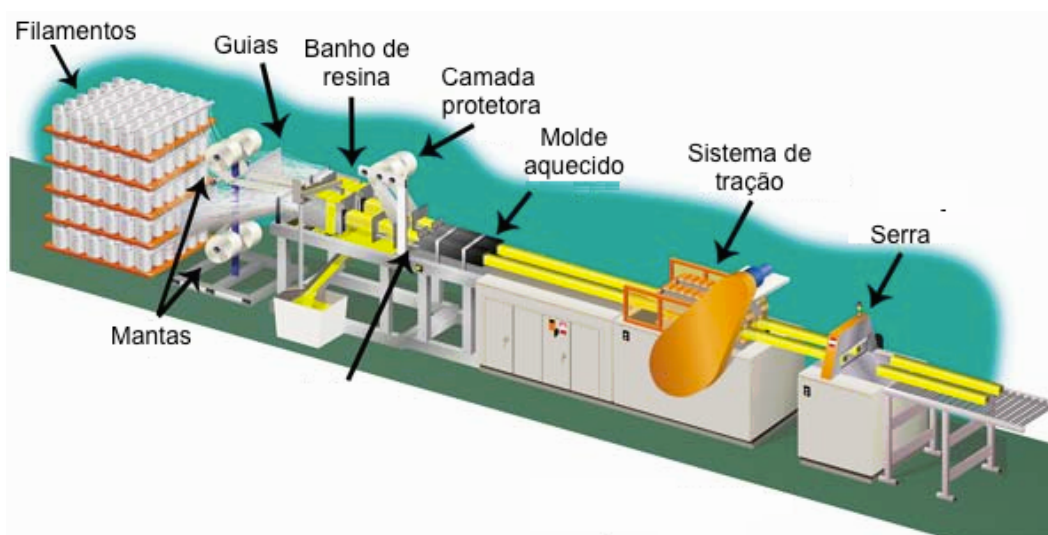


Figura 2.8 – Esquema da linha de fabrico do processo de pultrusão (adaptado de *afp fiberglass*, 2014).



a) Sistema de manuseamento do reforço b) Passagem pelo molde c) Sistema de corte

Figura 2.9 – Pormenor do processo de pultrusão (de acordo com *Strongwell*, 2014).

Este método, quando em comparação com outros, produz um material com melhores propriedades mecânicas e proporciona um maior rendimento quer em termos de tempo quer de material, pois cerca de 95% do material é efectivamente utilizado no processo de fabrico. A sua maior limitação reside nas secções serem geralmente uniformes, contudo já há novos métodos que permitem

variações na espessura da secção por intermédio de moldes móveis, sem, no entanto, alterar o formato da secção do perfil (Strong e Ploskonka, 1989).

O reforço do compósito pultrudido pode combinar filamentos, contínuos e paralelos, com mantas de fibras dispostas em diferentes direcções, constituindo estas o reforço na direcção transversal dos elementos produzidos. É possível também aplicar mantas nas superfícies do laminado (véu de superfície) que contêm uma quantidade de resina superior, em comparação com as mantas referidas anteriormente, com o objectivo de melhorar a resistência química do material, protegendo as fibras contra ambientes adversos (Pires, 2012). Na Figura 2.10, está ilustrado a disposição típica das camadas de reforço que constituem o elemento pultrudido.



Figura 2.10 - Composição típica de laminados de GFRP (adaptado de Strongwell, 2014).

2.6.2 Moldagem Manual

A moldagem manual é uma das técnicas mais antigas, simples e mais comuns na produção de compósitos reforçados por fibras. Normalmente, o processo de moldagem manual é feito em obra, onde são usados moldes de face única (molde aberto) nos quais se depositam sucessivas camadas de fibras, posteriormente impregnadas com o auxílio de trinchas e/ou rolos apropriados (Fig. 2.11). O molde pode ser de madeira, metálico ou mesmo em plástico reforçado (Pires, 2012).

O processo típico da moldagem manual consiste no seguinte (Brameshuber, 2006):

- Garantir boa qualidade superficial do molde, pois vai determinar o aspecto do produto final;
- Aplicação de um agente desmoldante, evitando possíveis danos no material;
- Para um melhor acabamento deve-se aplicar uma camada fina de resina especial (gelcoat), pigmentada ou não, que permite obter uma superfície regular. Esta resina faz com que o reforço não seja visível ficando mais protegido do ambiente;
- Espalhar pelo molde uma quantidade adequada da matriz, seguida da impregnação das fibras. A impregnação é feita com o auxílio de rolos ou escovas que permitem consolidar a

matriz com as fibras e retirar as bolhas de ar. Este processo é repetido tantas vezes quanto necessário até atingir a espessura pretendida;

- Desmoldagem, assim que atingir a rigidez necessária.

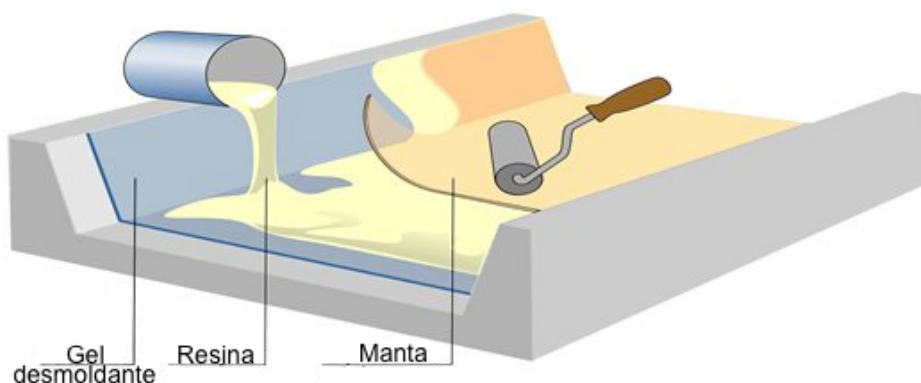


Figura 2.11 – Esquema do processo de moldagem manual de laminados de GFRP (adaptado de *Nuplex*, 2014).

A moldagem manual apresenta vantagens, na sua simplicidade, já que requer pouca tecnologia, tendo custos de produção relativamente baixos. É também um método que requer equipamentos simples, não exige mão-de-obra qualificada, é muito versátil, sendo possível utilizar moldes de diferentes dimensões e formas juntamente com a multiplicidade de configurações de reforço existentes (Pires, 2012; Brameshuber, 2006).

Como desvantagens salientam-se a baixa produtividade associada ao cariz manual das operações e a necessidade de haver conhecimento e experiência por parte do trabalhador, no sentido de se obter um material homogêneo e com poucos vazios. Por fim, a necessidade de usar resinas de baixa viscosidade, de forma a tornar a moldagem viável, comprometem as características mecânicas e térmicas do material (Pires, 2012; Brameshuber, 2006).

2.7 Propriedades dos perfis pultrudidos de GFRP

As propriedades dos produtos de FRP dependem particularmente das características dos materiais constituintes (reforço e matriz), orientação e teor das fibras, tal como a interação entre as fibras e a matriz. A anisotropia das propriedades dos produtos de FRP, particularmente dos perfis pultrudidos de GFRP, constitui uma das grandes diferenças entre os compósitos e os materiais comuns usados em construção, como o betão ou aço.

Pelo facto dos perfis comercializados não estarem ainda normalizados só é possível apresentar intervalos de valores típicos para as suas propriedades.

Tabela 2.3 - Propriedades mecânicas de perfis de GFRP (Correia, 2008).

Propriedade	Uni.	Direcção paralela às fibras	Direcção transversal às fibras
Resist. à tracção	<i>MPa</i>	200 - 400	50 - 60
Resist. à compressão	<i>MPa</i>	200 - 400	70 - 140
Resist. ao corte	<i>MPa</i>		25 - 30
Módulo de elasticidade	<i>GPa</i>	20 - 40	5 - 9
Módulo de distorção	<i>GPa</i>		3 - 4
Coefficiente de Poisson	–	0,23 – 0,35	0,09 – 0,15

A anisotropia do compósito de GFRP, já mencionada neste capítulo, é bastante evidente na Tabela 2.3. Todas as propriedades, com a excepção do módulo de distorção e da resistência ao corte, apresentam valores mais elevados na direcção paralela às fibras do que na direcção transversal. A resistência à tracção é a propriedade com maior decréscimo na direcção transversal, cerca de 75-85%, já na resistência à compressão a redução é cerca de 65%. O módulo de elasticidade também apresenta uma diferença considerável, por volta dos 75%.

Na Tabela 2.4 estão representados os intervalos de valores usuais para as propriedades térmicas e físicas dos perfis de GFRP. Note-se que, ao contrário das propriedades mecânicas, a anisotropia é pouco notória, visto que as propriedades são praticamente idênticas em ambas as direcções, com excepção do coeficiente de dilatação térmica (40-50% superior na direcção transversal).

Tabela 2.4 - Propriedades físicas de perfis de GFRP (Correia, 2008).

Propriedade	Uni.	Direcção paralela às fibras	Direcção transversal às fibras
Densidade	<i>g/cm³</i>		1,5 – 2,0
Teor em fibras	%		50 - 70
Coefficiente de dilatação térmica	<i>K⁻¹</i>	8 – 14 x 10 ⁻⁶	16 – 22 x 10 ⁻⁶
Coefficiente de condutibilidade térmica	<i>W/K.m</i>		0,20 – 0,28

Nas Figuras 2.12 à 2.15, faz-se uma comparação das propriedades mecânicas entre os perfis pultrudidos de GFRP (ALTO) com alguns materiais de grande utilização em obras de Engenharia Civil, como o alumínio, a madeira, o aço e o PVC. As indicações “Pul 1” e “Pul 2” indicam perfis só

com reforço unidireccional de fibra de vidro e com reforço unidireccional mais a manta de fibra de vidro, respectivamente.

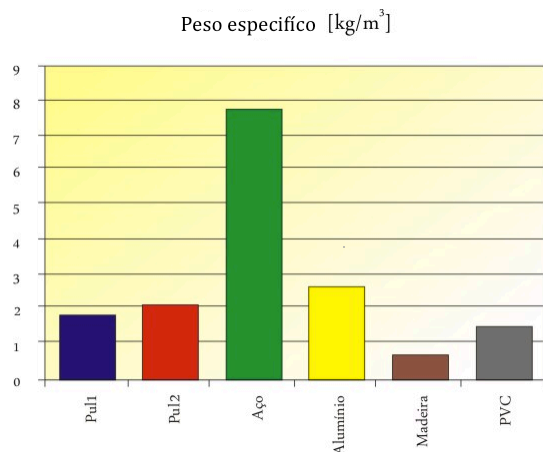


Figura 2.12 – Comparação do peso específico [Kg/m³] dos perfis de GFRP com outros materiais (de acordo com ALTO, 2014).

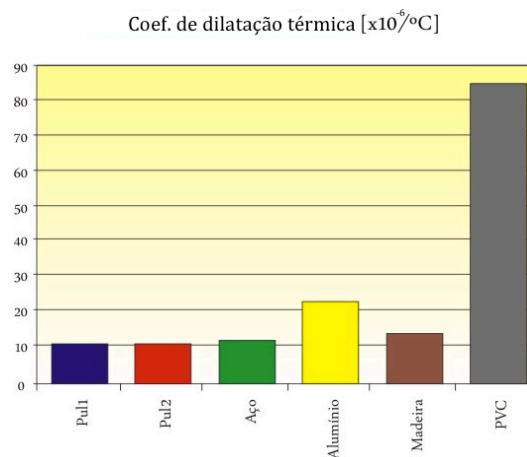


Figura 2.13 – Comparação do coeficiente de dilatação térmica dos perfis de GFRP com outros materiais (de acordo com ALTO, 2014).

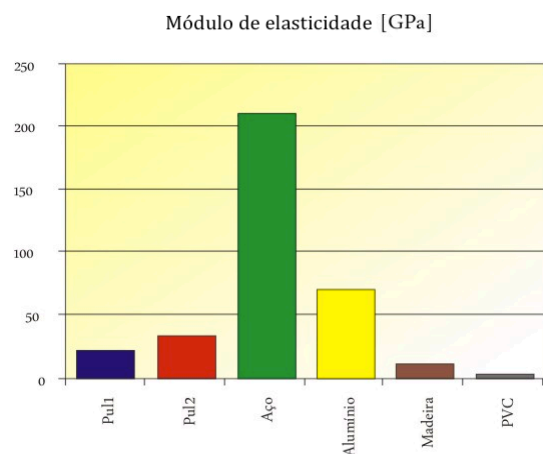


Figura 2.14 - Comparação do módulo de elasticidade [GPa] dos perfis de GFRP com outros materiais (de acordo com ALTO, 2014).

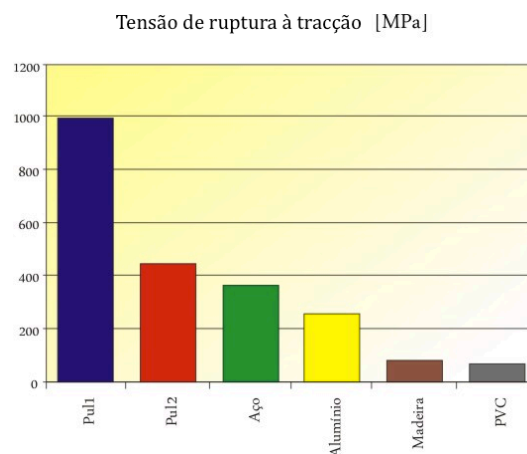


Figura 2.15 - Comparação da tensão de ruptura à tracção [MPa] dos perfis de GFRP com outros materiais (de acordo com ALTO, 2014).

Analisando as Figuras 2.12 a 2.15 e tendo em conta que o aço é o principal material concorrente, sobressaem as seguintes conclusões:

- Os perfis de GFRP são 4 vezes mais leves que o aço;
- A tensão de ruptura dos perfis de GFRP, principalmente dos perfis “Pul 1”, é claramente superior à tensão de ruptura do aço;
- O comportamento frágil do GFRP é contrastante com a ductilidade apresentada pelo aço (Fig. 2.16);
- O módulo de elasticidade é reduzido em cerca de 10-15% do aço;

- O coeficiente de expansão térmica do aço e do GFRP são semelhantes.

2.8 Vantagens e desvantagens na utilização de perfis pultrudidos de GFRP

Comparativamente aos materiais de construção mais comuns, como o betão ou o aço, os perfis de GFRP exibem as seguintes vantagens (Correia, 2008):

- Versatilidade na forma estrutural;
- Baixo custo de manutenção;
- Facilidade de transporte e instalação em obra;
- Elevada resistência à corrosão;
- Elevada resistência à fadiga;
- Reduzido peso próprio;
- Óptima relação resistência/peso próprio.

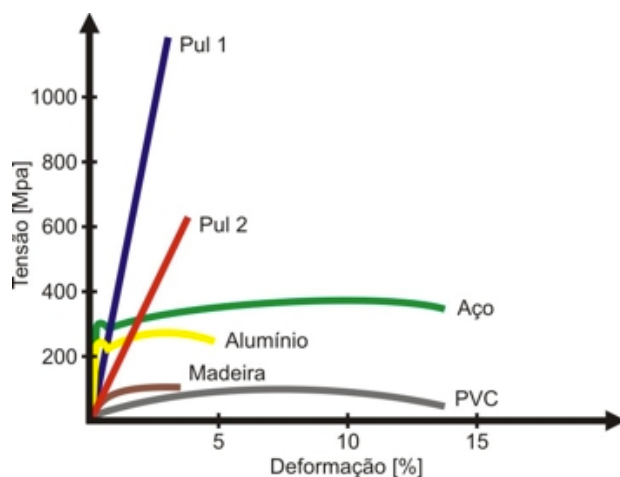


Figura 2.16 – Relações constitutivas de diferentes materiais sob tração uniaxial (ALTO, 2014).

Todavia, a sua utilização estrutural apresenta algumas contrariedades relativamente aos materiais tradicionais (Correia, 2008):

- Comportamento frágil;
- Escassez de regulamentação específica;
- Custos iniciais pouco competitivos;
- Módulo de elasticidade reduzido,

Quando os compósitos são expostos a temperaturas elevadas (300-400°C) a matriz orgânica e os reforços orgânicos, como a aramida, sofrem decomposição libertando calor, fumo e gases voláteis.

No que diz respeito ao desempenho do material compósito, verifica-se uma elevada redução das suas propriedades para temperaturas moderadamente elevadas (70-120°C), a partir das quais o material amolece, deforma e sofre distorção, resultando na encurvadura ou no colapso da estrutura (Mouritz e Gibson, 2010).

2.9 Estruturas adaptativas

As estruturas designadas “inteligentes” ou adaptativas pretendem reproduzir determinadas qualidades excepcionais que os seres vivos presentes na natureza evidenciam, como por exemplo, a precisão, eficiência, durabilidade e a regeneração. Para tal é necessário estarem equipadas com sensores que registem estímulos internos e externos, actuadores para realizar trabalho ou aplicar força e sistemas de controle para tomar decisões e executar. Estes três elementos combinados geram uma resposta e conferem “inteligência” às estruturas (Fig. 2.17), permitindo não só executarem tarefas mas também adaptarem-se a mudanças. Para que tudo isto seja possível são necessários materiais capazes de realizar determinadas funções variando as suas propriedades em resposta a alterações do ambiente externo. Exemplos deste tipo de materiais são os fluídos electorreológicos e magnetorreológicos que contêm nanopartículas que alteram a densidade do fluído por indução de electricidade ou de um campo magnético, respectivamente, materiais piezoeléctricos que geram carga eléctrica sob acção de uma tensão mecânica e, por fim, as ligas de memória de forma (Ceballos, 2012).

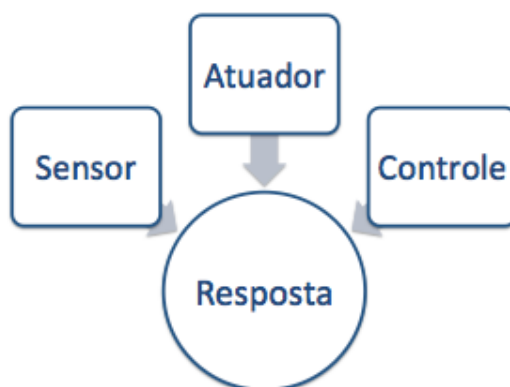


Figura 2.17 – Conceito de estrutura adaptativa (adaptado de Ceballos, 2012).

As ligas com memória de forma são ligas metálicas que mesmo depois de deformadas têm a capacidade de recuperar a sua forma, reordenando a sua estrutura cristalina. Esta transformação pode ser induzida por temperatura ou pela aplicação de tensões. Os três principais tipos de LMF são as ligas cobre-zinco-alumínio, cobre-alumínio-níquel e o níquel-titânio (Nitinol). O Nitinol é geralmente mais caro e tem propriedades mecânicas superiores em relação as LMF compostos por cobre.

As LMF têm uma abrangente área de aplicações, pois, para além da grande força que conseguem desenvolver, apresentam outras propriedades úteis como amortecimento, resistência a corrosão, natureza não magnética, baixa densidade e alta resistência a fadiga. Quando integrados em estruturas de engenharia civil, as LMF podem ser componentes activas alimentadas por uma fonte exterior ou passivas, em que a resposta está directamente relacionada com o movimento da estrutura. São também utilizadas para limitar a largura das fendas em vigas de betão (auto-reparação) (Song *et al.*, 2006) e como elementos de pré-esforço na reabilitação do património histórico edificado, tendo a vantagem de não ser necessário utilizar macacos hidráulicos (Santos, 2011).

Um das maiores implicações na utilização das LMF prende-se com os custos elevados em comparação com os materiais mais tradicionais. Porém os preços destes materiais têm vindo a reduzir (a baixo de 150€/Kg), tendo entretanto surgido ligas alternativas baseadas em ferro, com preços mais competitivos. Outra restrição prende-se com a falta de interacção entre as ciências dos materiais e a engenharia estrutural, o que contribui para dificultar o uso generalizado das LMF em obras de engenharia (Santos, 2011).

2.10 Compósitos híbridos com memória de forma

Quando um compósito é formado por dois ou mais tipos de fibras no interior de uma única matriz, denomina-se de compósito híbrido. Os compósitos híbridos mais comuns são obtidos pela combinação de fibras de vidro e de carbono na mesma matriz polimérica. A variedade de compósitos híbridos é vasta, podendo ser utilizadas diversas combinações de fibras e de fios metálicos na matriz, sendo que o objectivo destes materiais híbridos consiste em obter um produto com propriedades melhores em relação aos compósitos simples (Ceballos, 2012).

Ao utilizar ligas NiTi (Nitinol), com memória de forma, como actuadores embebidos nos materiais compósitos obtém-se uma nova forma de aplicação de materiais adaptativos. É este tipo de estrutura adaptativa que será estudada nos próximos capítulos.

2.11 Transformação martensítica

Nas ligas de NiTi, com memória de forma, dão-se alterações de fase no estado sólido, através do movimento cooperativo e homogéneo por parte dos átomos de níquel e titânio, resultando numa alteração da sua estrutura cristalina, mas mantendo a mesma composição química (Santos, 2011). São estas alterações de fase reversíveis denominadas de transformação martensítica, induzidas por um ciclo térmico ou por aplicação de tensões, que permitem ao material voltar a sua forma inicial.

Dependendo da temperatura, o Nitinol exibe uma de duas estruturas cristalinas. A fase de alta temperatura denomina-se de austenite, nesta fase o Nitinol possui uma estrutura cúbica de corpo centrado (ccc) contendo um átomo em cada vértice do cubo e um átomo no seu centro (Fig. 2.18), tornando o material bastante duro devido a simetria existente na sua estrutura cristalina. A fase de baixa temperatura é chamada de martensite, neste caso a estrutura cristalina é muito menos simétrica sendo bastante mais flexível e por isso mais deformável (Fig. 2.18). As temperaturas em quem as LMF alteram a sua estrutura cristalográfica é característico de cada tipo de liga, de acordo com o rácio dos elementos que o compõem. Note-se que estas transformações de fase ocorrem de forma muito rápida (Reynolds, 2003; Santos, 2011).

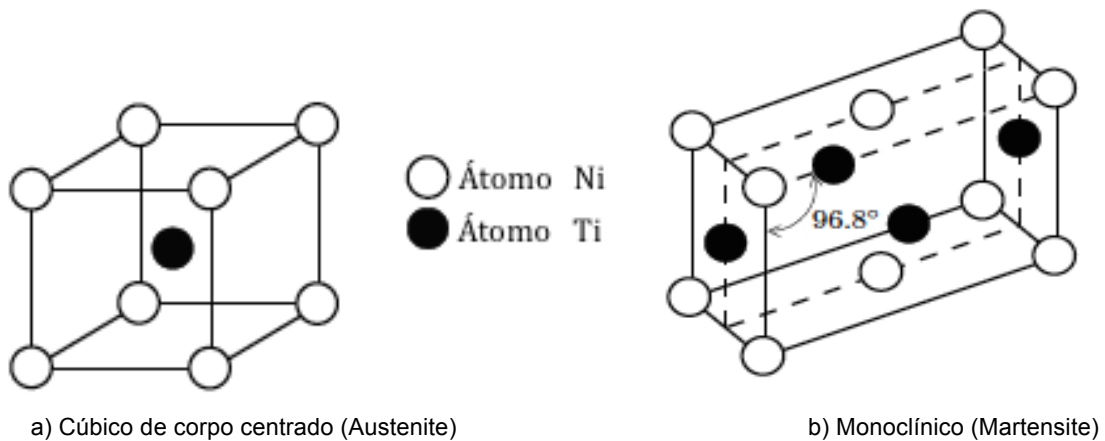


Figura 2.18 - Estrutura cristalina (Santos, 2011).

As tensões e a temperatura têm uma grande influência nas transformações martensíticas, pois estas transformações podem ser induzidas por calor (ou arrefecimento) ou por aplicação de tensões. Num estado livre de tensões, as LMF são caracterizadas por 4 temperaturas de transformação: M_s e M_f durante o arrefecimento e A_s e A_f durante o aquecimento (Fig. 2.19). As duas primeiras ($M_s > M_f$) indicam a temperatura de início e de fim da martensite, respectivamente. As últimas ($A_s < A_f$) são as temperaturas de início e fim da transformação inversa (Santos, 2011).

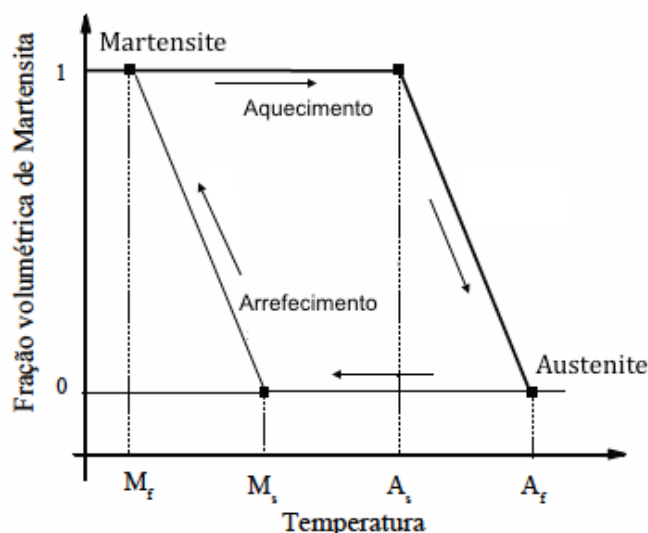


Figura 2.19 - Transformação martensítica livre de tensões (adaptado de Song *et al.*, 2006).

A estrutura cristalina das LMF, procura atingir estados mínimos de energia potencial para uma determinada temperatura. Quando o material é arrefecido, o estado de energia muda entre um mínimo correspondente a fase da austenite e um mínimo correspondente a fase da martensite. Na martensite, apenas há uma única orientação da estrutura cristalina correspondente à esta situação. Contudo, devido à falta de simetria na estrutura cristalina, o material ao ser deformado na martensite pode assumir várias variantes correspondentes ao mesmo estado de energia da martensite indeformada (Reynolds, 2013). Se, neste momento, o material for aquecido, a estrutura cristalina regressa a fase da austenite (Fig. 2.19).

Note-se que as temperaturas de transição (A_s , A_f , M_s , M_f) são diferentes. A transformação da martensite para austenite ocorre para temperaturas mais elevadas, do que a transformação da austenite para a martensite. Devido a esta diferença de temperaturas, surge o fenómeno da histerese. A área contida pelo ciclo corresponde a energia absorvida pelo material durante a transformação de fase. É esta característica que confere a LMF uma grande capacidade de amortecimento e por isso é tão útil na supressão de cargas dinâmicas.

2.12 Efeito de memória de forma e Superelasticidade

Quando as LMF, na martensite ($T < M_f$), são sujeitas a um carregamento sendo depois descarregadas, verifica-se a presença de deformação residual. No entanto, quando o material é aquecido acima de A_f , o cristal sofre uma transformação martensítica inversa retomando a forma correspondente à austenite. Este fenómeno, designado por efeito de memória de forma, permite que o material recupere a sua forma original (Reynolds, 2003). A Figura 2.20 ilustra este processo.

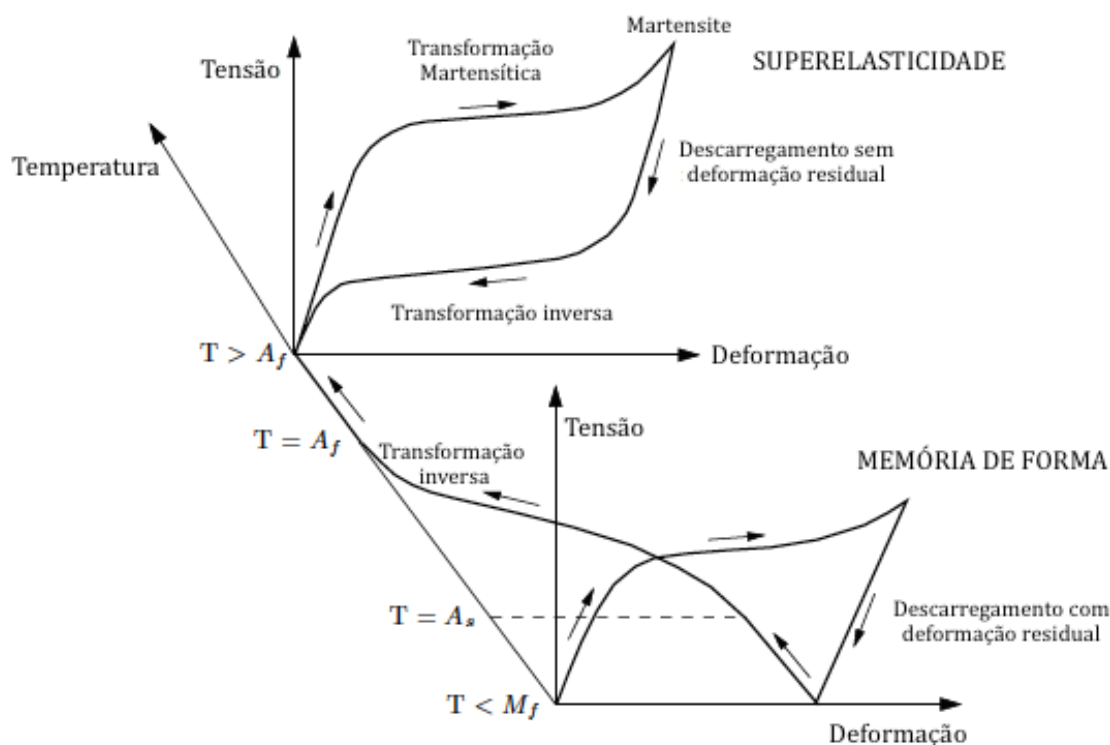


Figura 2.20 - Esquema do efeito de memória de forma e superelasticidade (adaptado de Santos, 2011).

Porém, as LMF permitem um segundo meio de transformação de fase, com aplicação de tensões no material, em oposição à transformação induzida por temperatura. Esta transformação ocorre na fase de alta temperatura, onde a austenite corresponde ao estado estável do material. Nesta gama de temperaturas, as LMF na fase da austenite, sofrem uma transformação martensítica quando são sujeitas à tensões. Ao retirar a carga o material passa por um fenómeno semelhante à elasticidade, ao recuperar completamente a sua forma inicial (Fig. 2.20). Este processo, é caracterizado por uma capacidade de absorção de energia sem que haja presença de deformações residuais, designado de pseudoelasticidade ou superelasticidade (Ceballos, 2011; Song *et al.*, 2006).

2.13 Efeito de memória de forma simples e duplo

De acordo com o comportamento mecânico da liga em função do ciclo térmico, o efeito de memória de forma é classificado em simples ou duplo. Quando há recuperação da deformação induzida a $T < M_f$, por aquecimento a $T > A_f$, mas o arrefecimento posterior até uma temperatura inferior a M_f não provoca nova alteração de forma, classifica-se como efeito de memória simples (one-way shape memory effect). Por outro lado, no efeito de memória de forma duplo (two way shape memory effect) o material “memoriza” duas formas diferentes: uma forma abaixo de M_f e outra a temperatura superior a A_f . Estas formas podem ser obtidas sem aplicação de carregamento, através de tratamentos termomecânicos adequados, como a deformação sob tensão. Se um material com efeito

de memória de forma duplo for aquecido para lá de uma determinada temperatura perderá esse efeito, isto é conhecido como amnésia (Ceballos, 2012; Zanaboni, 2003).

Um esquema dos efeitos simples e duplos de memória de forma está representado na Figura 2.21. O processo é semelhante para os dois casos: começa na martensite (a), a LMF é deformada (b), posteriormente aquecida até a austenite (c) e arrefecida de volta à martensite (d). Note-se que no efeito de memória duplo está descrito um dos processos termomecânicos. A liga, na martensite, é deformada para além do seu limite e ao ser aquecida não recupera totalmente a sua forma inicial. No entanto, ao voltar a fase da martensite assume uma forma diferente da Austenite.

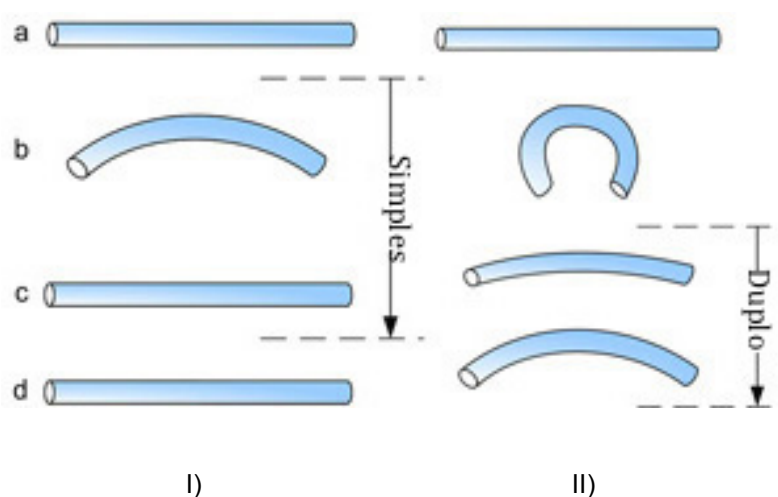


Figura 2.21 - Esquema dos efeitos de memória de forma I) Simples; II) Duplo (Zanaboni, 2007).

Estas mudanças de fase da martensite para austenite induzida pela temperatura provoca variações no valor do módulo de elasticidade da liga, da ordem de três vezes, ou seja, $E_A \approx 3E_M$ sendo E_A e E_M os módulos de elasticidade da liga na fase austenite e martensite, respectivamente (Ceballos, 2012). A Tabela 2.5 apresenta as propriedades do Nitinol na martensite e na austenite.

Tabela 2.5 – Propriedades do Nitinol (Santos, 2011).

Propriedades	Uni.	Martensite NiTi	Austenite NiTi
Densidade	g/cm^3	6.45	6.45
Módulo de Elasticidade	GPa	21 - 41	30 - 83
Coef. de Poisson	-	0.33	0.33
Tensão de cedência	MPa	70 - 140	195 - 690
Tensão de ruptura	MPa	895 - 1900	895 - 1900
Deformação recuperável	%	até 8	até 8

Capítulo 3 - Caracterização experimental de um provete híbrido e modelação

3.1 Objectivos do ensaio

Foram realizados ensaios de flexão com aplicação de uma carga a meio vão em provetes simplesmente apoiados. Desta forma, foi possível caracterizar o módulo de elasticidade do material e observar a influência da LMF. Para tal foram ensaiados dois provetes, o primeiro é um provete de GFRP sem reforço (V1) e o segundo (V2) é reforçado com duas LMF.

3.2 Materiais e Instrumentação

Foram utilizadas mantas contínuas de fibras de vidro biaxiais ($0^\circ/90^\circ$) e de 208g/m^2 da *Seabase* (Fig. 3.1), enquanto que para a matriz usou-se resina de poliéster (Fig. 3.2) e como aditivo um catalisador para acelerar a polimerização. Note-se que nenhum “filler” foi aplicado na matriz. Posteriormente, recorreu-se a uma serra circular para o corte do compósito, juntamente com uma máquina rebarbadora que permitiu um melhor acabamento dos provetes.

Para os ensaios de flexão, recorreu-se a um laser de controlo de distâncias *VYDAS* com tempo de resposta $<10\text{ms}$. Dois termopares T-type (*Copper-Constantan*), com um alcance de -40°C até 100°C , conectados ao amplificador NI SCXI-1112 de 4 canais e cabos eléctricos conectados a uma fonte de alimentação DC da *Sorensen* modelo, XHR 40-25. Estes aparelhos foram ligados à placa de aquisição de dados da *National Instruments (NI)* multifunction M Series, modelo PXI-6221 (Fig. 3.3). Para simulação da carga actuante a meio vão recorreu-se a pesos de 9,5, 17,5 e 24,5N. Foram também utilizados ligas com efeito de memória de forma duplo com 0,5mm de diâmetro da marca *Flexinol* (Fig. 3.4). A plataforma para controlo e aquisição de dados é um NI PXI-1052. O assistente DAQ express VI, que utiliza um software NI-DAQmx, foi utilizado para criar, editar e correr a informações correspondentes a leitura das voltagens O controlo da corrente eléctrica no NiTi foi feito com o modo controlo de voltagem, com o máximo de entrada de corrente de 2 A.

Caracterização experimental de um provete híbrido e modelação



Figura 3.1 - manta de fibra de vidro Flexinol.



Figura 3.2 – Resina de poliéster.

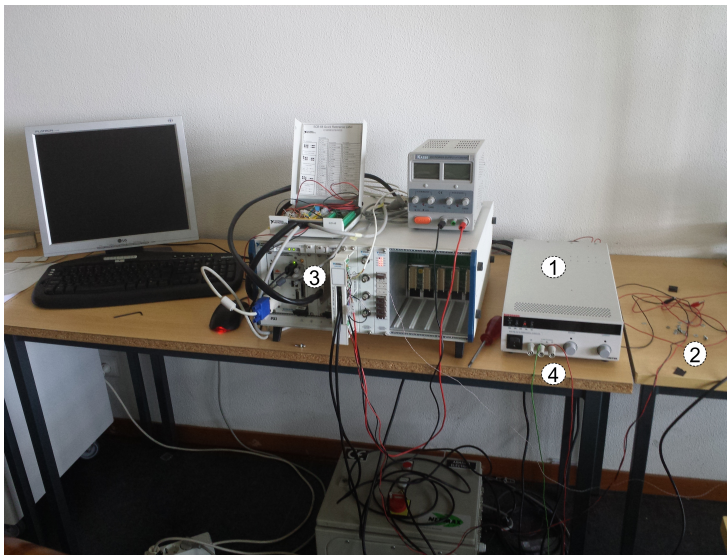


Figura 3.3 – Montagem dos equipamentos. Legenda: 1. Controlador da fonte de alimentação, 2. Termopares, 3. Controlador de aquisição de dados, 4. fios eléctricos.



Figura 3.4 – Flexinol.

3.3 Preparação dos elementos ensaiados

Os elementos ensaiados à flexão foram obtidos por moldagem manual com fibras de vidro embebidas em resina poliéster. Antes de mais procedeu-se à preparação da matriz, recorrendo-se a resina poliéster e ao catalisador que corresponde 1% da quantidade de resina utilizada. As fibras foram dispostas por cima de uma placa de vidro e com o auxílio de um pincel espalhou-se a resina pelas diferentes camadas de fibras utilizadas. Optou-se pelas placas de vidro por não aderirem as

fibras. De forma a retirar o excesso de resina, foi colocada outra placa por cima do material e um peso por cima do vidro (Fig. 3.5). Para o caso do material híbrido o processo foi na sua maioria semelhante ao anterior, mas após a sexta fibra posicionaram-se duas LMF ao longo do comprimento da fibra, sendo depois colocadas as restantes fibras.

Após um período de polimerização de 48 horas, foi feito o desmolde do material compósito e procedeu-se ao corte do mesmo com as dimensões pretendidas. Para o corte do material foi usada uma serra circular obtendo um perfil com um comprimento de 342mm e uma secção rectangular de 25,3 mm de altura e com de 2,8 mm de espessura média. Para um melhor acabamento das vigas utilizou-se uma rebarbadora e uma lima metálica.

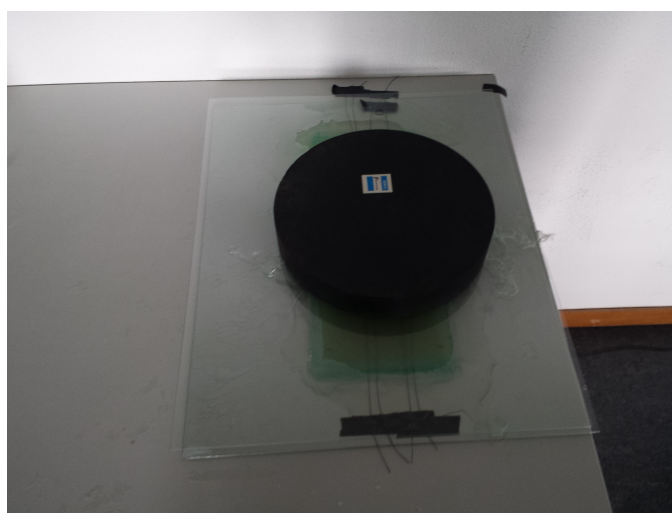


Figura 3.5 – Colocação do peso para retirar o excesso de resina no material híbrido.

3.4 Esquema de ensaio e procedimento experimental

A Figura 3.6 mostra o esquema do ensaio de flexão e as medidas dos provetes. Para o provete com reforço, as LMF foram colocadas a uma distância de 5mm da base de forma a estarem excêntricas ao centro de gravidade da secção transversal do provete. Para medição dos deslocamentos máximos do provete posicionou-se um laser de controlo de distâncias a meio vão (Fig. 3.7). De seguida, para observar a acção das ligas de memória de forma, foram dispostos o termopar e os fios eléctricos na LMF, conforme se mostra na Figura 3.8, para medição da temperatura e simular o efeito de Joule.

Caracterização experimental de um provete híbrido e modelação

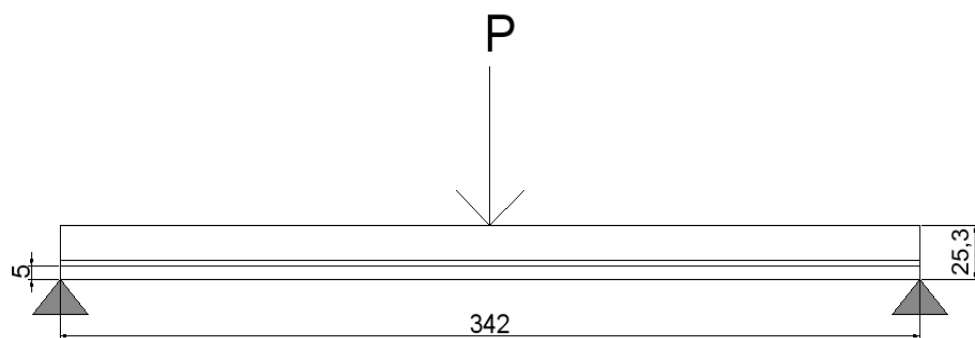


Figura 3.6 – Esquema geral do ensaio de flexão com dimensões do provete (V1) e distância das LMF a base do provete [mm].

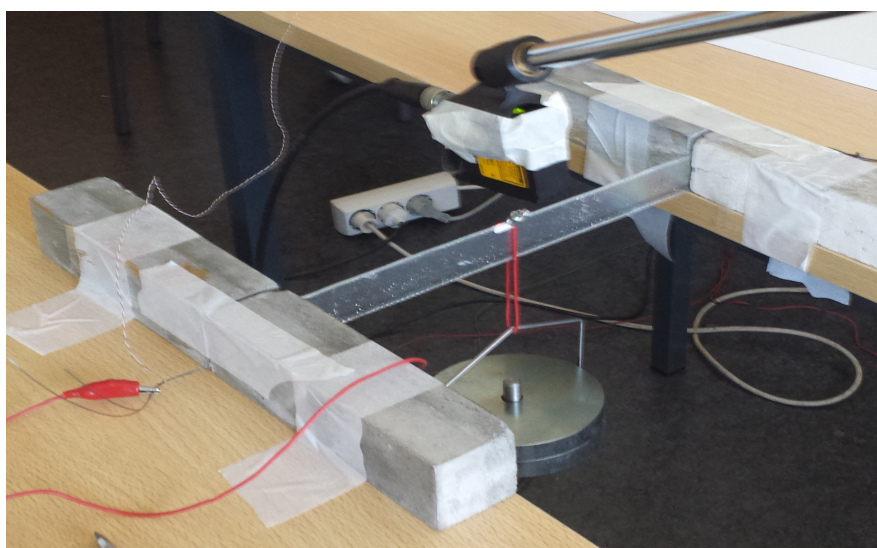


Figura 3.7 – Composição geral do ensaio de flexão.

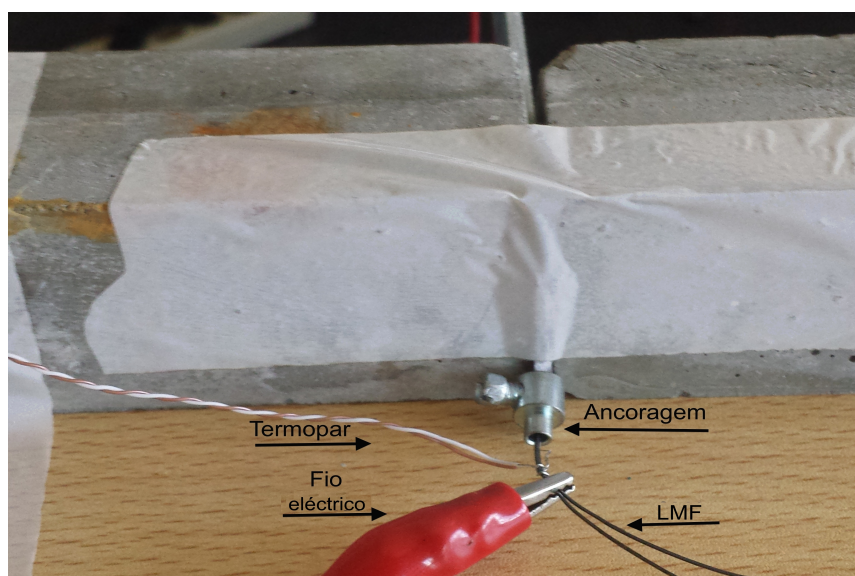


Figura 3.8 – Pormenor do apoio do provete.

Uma vez montado o ensaio procedeu-se à aplicação das forças à temperatura ambiente ($\approx 20^{\circ}\text{C}$) a meio vão do provete V1, por intermédio de pesos. Inicialmente, a força aplicada foi de 9,5N, seguindo-se a leitura da flecha. O ensaio prossegue com acréscimo de carga, aplicando-se forças de 17,5 e 24,5N à temperatura ambiente.

O provete V2 foi ensaiado conforme o esquema do provete V1 e com as mesmas cargas aplicadas. Contudo, para observar o efeito das LMF no provete, foi imposta uma variação da temperatura para a carga de 17,5N. As temperaturas estudadas foram de 20, 30, 40 e 50°C . Por último a viga foi ensaiada com e sem bloqueio das LMF na extremidade, registando-se as diferenças entre ambos os casos. Este ensaio foi repetido 3 vezes.

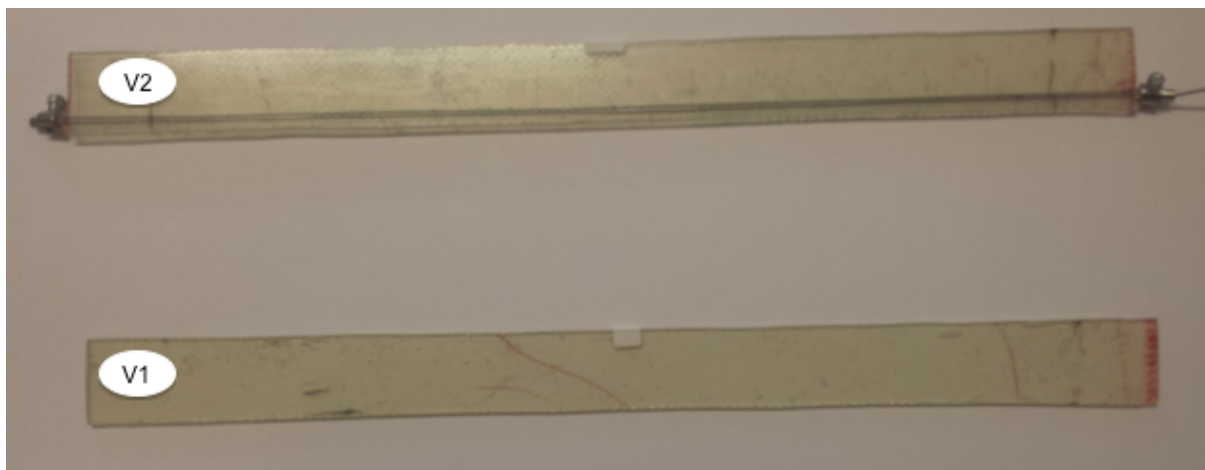


Figura 3.9 – Provetes V1 e V2 ancorado nas extremidades.

3.5 Resultados e discussão

As tabelas 3.1 e 3.2 apresentam os valores da leitura para as flechas (δ) e deslocamento dos valores obtidos pelo equipamento de aquisição de dados de leitura (Δ_f).

As Figuras 3.10 e 3.11 representam as relações obtidas entre as forças aplicadas e os respectivos deslocamentos para o ensaio de flexão dos provetes V1 e V2, respectivamente, à temperatura ambiente.

Caracterização experimental de um provete híbrido e modelação

Tabela 3.1 – Deslocamentos para as diferentes cargas aplicadas no provete V1.

F (N)	Δ_F(N)	δ (mm)	Δ_f (mm)
9,5	-	0,15	-
17,5	8	0,3	0,15
24,5	7	0,4	0,1

Tabela 3.2 – Deslocamentos para as diferentes cargas aplicadas no provete V2.

F (N)	Δ_F(N)	δ (mm)	Δ_f (mm)
9,5	-	0,12	-
17,5	8	0,22	0,1
24,5	7	0,32	0,1

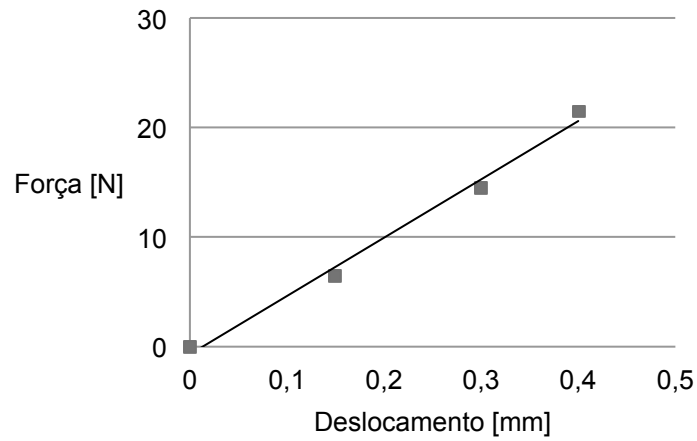


Figura 3.10 – Relação força vs deslocamento no ensaio a flexão na viga V1.

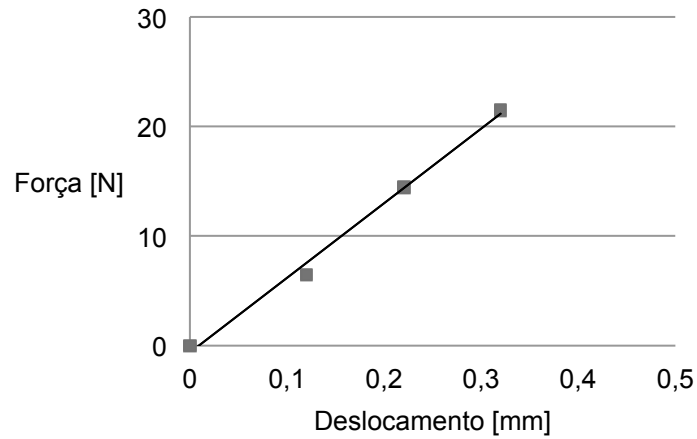


Figura 3.11 - Relação força vs deslocamento no ensaio a flexão na viga V2.

A flecha máxima, segundo a teoria de Euler-Bernoulli é dada por:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{PL^3}{48EI} \quad (1)$$

- P – Carga a meio vão;
- L – Comprimento efetivo da viga no ensaio de flexão;

Contudo trata-se de uma simplificação e não tem em conta a influência do esforço transversal. A teoria de Euler-Bernoulli difere da teoria de Timoshenko pelo facto da primeira representar uma aproximação ao considerar que a secção transversal permanece perpendicular a linha neutra após flexão da viga, enquanto que na teoria de Timoshenko considera-se a rotação entre a secção transversal e a linha neutra (Fig. 3.12). Esta aproximação é apenas válida para peças grandes em relação às dimensões da secção transversal, pois as deformações por esforço transversal são desprezadas em comparação com as deformações provocadas pelo momento flector.

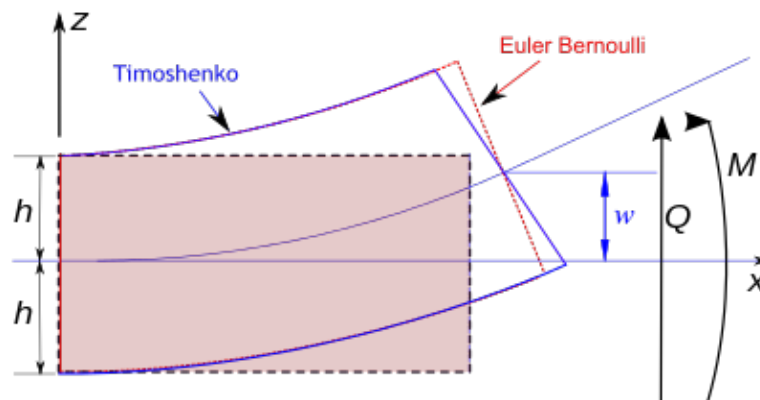


Figura 3.12 - Teoria de Euler-Bernoulli e Timoshenko (de acordo com *Wikipédia*, 2014).

Todavia, como se pode observar na Figura 3.13 as deformações por corte e vigas de GFRP não são desprezáveis. Para vão inferiores a 6m a carga máxima admissível é menor se for tido em conta as deformações por corte. A teoria de vigas de Timoshenko considera este tipo de deformação.

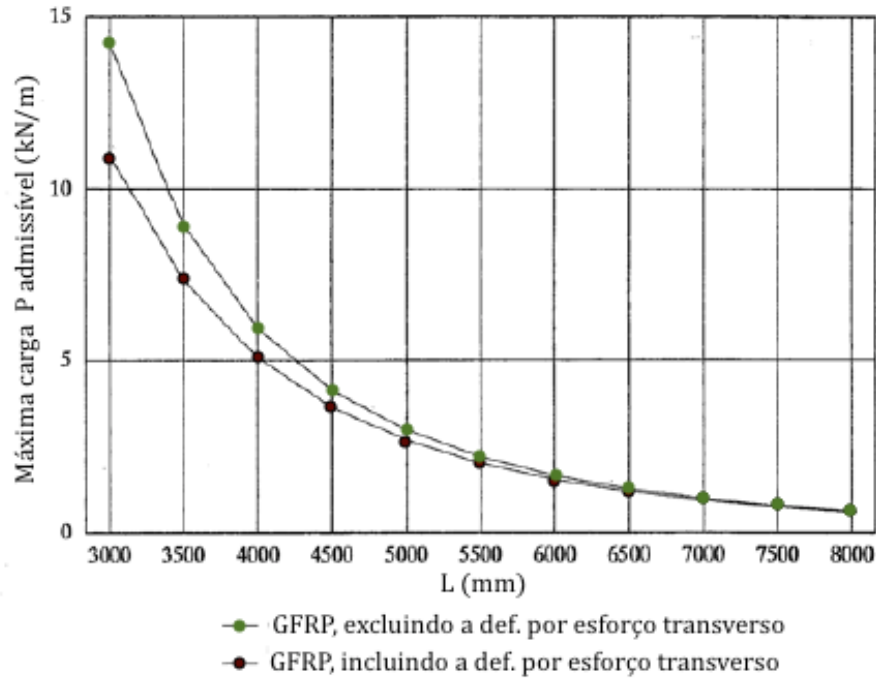


Figura 3.13 – Influência da deformação por esforço transversal em vigas de GFRP

Tendo em conta uma viga simplesmente apoiada com carga concentrada, pela teoria de Timoshenko tem-se (Teixeira, 2010):

$$\delta = \frac{PL^3}{48EI} + \frac{PL}{4GA_v} \quad (2)$$

Para um material isotrópico, o módulo de distorção é dado por:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3)$$

Substituindo na Eq. (1) e resolvendo em ordem ao módulo de elasticidade,

$$E = \frac{\Delta_f L^3}{48I\Delta_f} + \frac{\Delta_f L 2(1 + \nu)}{4A_v\Delta_f} \quad (4)$$

Para o coeficiente de Poisson, ν , adoptou-se o valor de 0,22 conforme sugerido pelo fabricante *Fiberline*.

Para o módulo de elasticidade (E), foi feita uma média aritmética do valor obtido para cada deslocamento, de forma a ter um único E que caracterize cada provete.

Tabela 3.3 - Módulo de elasticidade para V1 e módulo de elasticidade homogeneizado para V2.

E_{V1} (GPa)	E_{V2} (GPa)
12,51	15,33

Os valores para o módulo de elasticidade são significativamente mais baixos do que o valor teórico para perfis pultrudidos, pois o processo de fabrico utilizado, moldagem manual, não garante um bom controlo de qualidade. Para além deste aspecto, a falta de experiência com este tipo de materiais leva à piores resultados.

A figura 3.14 mostra a evolução da flecha máxima a meio vão com o aumento da temperatura, para o provete com bloqueio das LMF e sem bloqueio das LMF.

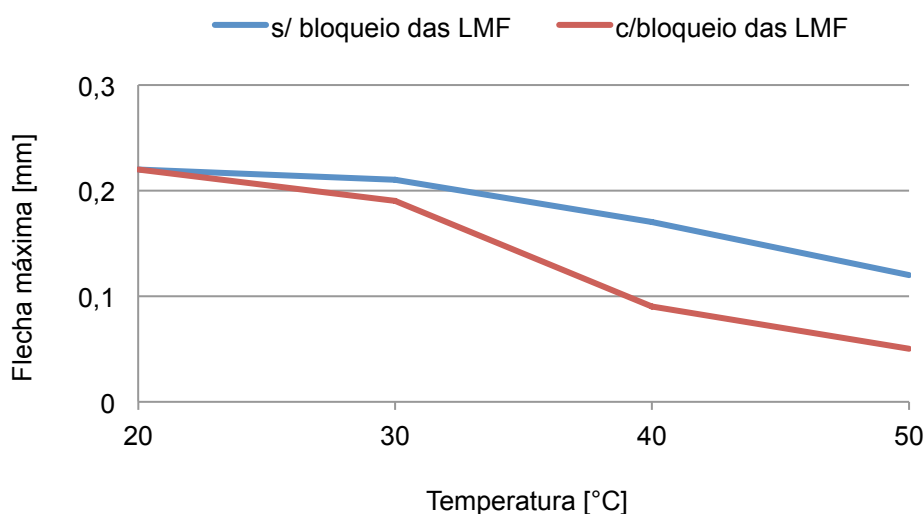


Figura 3.14 - Evolução da flecha com a temperatura, no provete V2.

Comparando agora os dois casos, com bloqueio e sem bloqueio das LMF, o aumento da temperatura provoca uma diferença de deslocamentos cada vez maior até aos 50°C sendo o deslocamento do com bloqueio das LMF, cerca de 10% mais baixo do que o provete sem bloqueio. Tal evidência deve-se à perda de aderência entre a LMF e o GFRP, que é tanto pior quanto maior for a temperatura, devido a degradação da resina. A falta de aderência faz com haja um deslize das LMF em relação ao compósito, não conseguindo mobilizar totalmente a força nas LMF. No entanto, ao bloquear as extremidades o deslizamento é contrariado, dando origem a forças de compressão na extremidade que, por serem excêntricas relativamente ao centro de gravidade da secção transversal do provete criam momentos opostos ao da carga aplicada, aumentando a resistência à flexão.

Esta técnica assemelha-se ao pré-esforço não aderente, que consiste em cordões embainhados com um produto anticorrosivo e lubrificante, sem qualquer injeção de ligante, existindo deslocamento relativo entre o betão e as armaduras, ao longo das peça, a não ser nas ancoragens onde estão concentradas as forças do pré-esforço (Camposinhos, 1991).

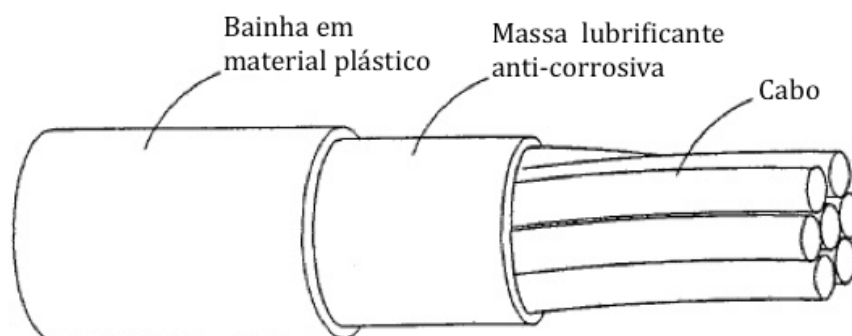


Figura 3.15 - Representação esquemática de um cabo não aderente (adaptado de Camposinhos, 1991)

A Tabela 3.4, apresenta os resultados para a flecha do provete V2, de acordo com a temperatura, em termos de valor médio ($\bar{\delta}$), desvio padrão (σ), coeficiente de redução (Cv) e variação da flecha em percentagem em relação a 20°C (Δ_f), para os casos com e sem bloqueio nas extremidades das ligas de memória de forma.

Tabela 3.4 –Valor médio da flecha do provete V2 ($\bar{\delta}$) e respectivos desvios padrões (σ), coeficientes de variação (Cv) e variação da flecha a meio vão em percentagem (Δ_f).

	T (°C)	$\bar{\delta}$ (mm)	σ (mm)	Cv (%)	Δ_f (%)
sem bloqueio das LMF	20	0,22	0,0	0,0	100
	30	0,20	0,017	8,7	90,9
	40	0,15	0,029	18,8	69,7
	50	0,10	0,029	27,9	47,0
com bloqueio das LMF	20	0,22	0,0	0,0	100
	30	0,19	0,0	0,0	86,4
	40	0,14	0,006	4,2	56,1
	50	0,10	0,023	31,5	25,8

Observe-se que as LMF ao serem bloqueadas e sujeitas a um aumento de temperatura até 50°C, provocam uma redução de sensivelmente 74% da flecha máxima inicial, à temperatura ambiente. Ainda assim, a temperatura em que ocorre esta redução não corresponde à máxima força mobilizada pelas LMF, pois tal aconteceria entre os 100°C/110°C (Fig. 3.17).

3.6 Modelos

3.6.1 Modelo numérico

Para obter um modelo que permite simular o ensaio recorreu-se ao programa SAP2000 (Fig. 3.16) onde foi simulado o comportamento do compósito híbrido obtido experimentalmente. As dimensões são iguais às do provete V2 e com as propriedades descritas na Tabela 3.5. O efeito de memória de forma das LMF no perfil está previsto com elementos tendão que permitem aplicar cargas horizontais excêntricas nas extremidades da viga. O GFRP foi modelado como elemento de barra e como material isotrópico.

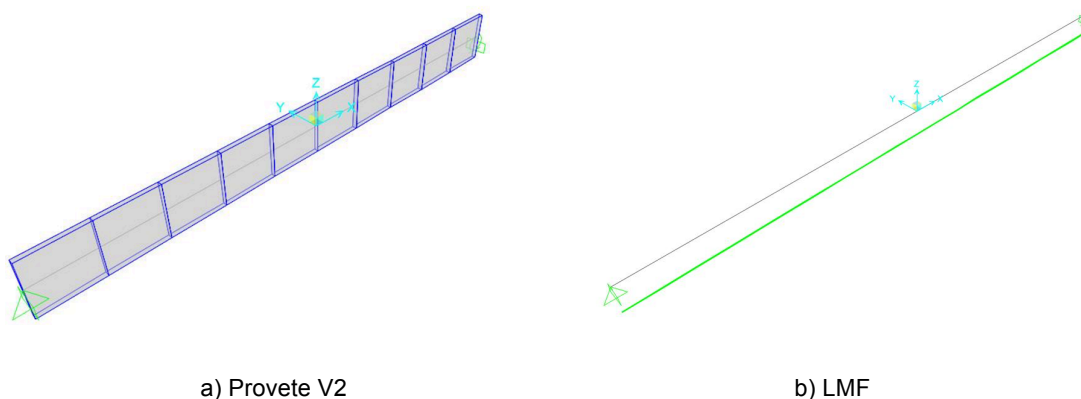


Figura 3.16 – Modelo numérico.

Tabela 3.5 - Propriedades do material híbrido modelado.

ρ (g/cm ³)	E (GPa)	ν
1,43	15,33	0,22

A influência da temperatura no efeito de memória de forma foi simulada de acordo com a curva F vs T da LMF representada na Figura 3.17. A Tabela 3.6 apresenta os deslocamentos obtidos pelo modelo com bloqueio das LMF sujeito a uma carga concentrada a meio vão e respectiva comparação com o ensaio de flexão.

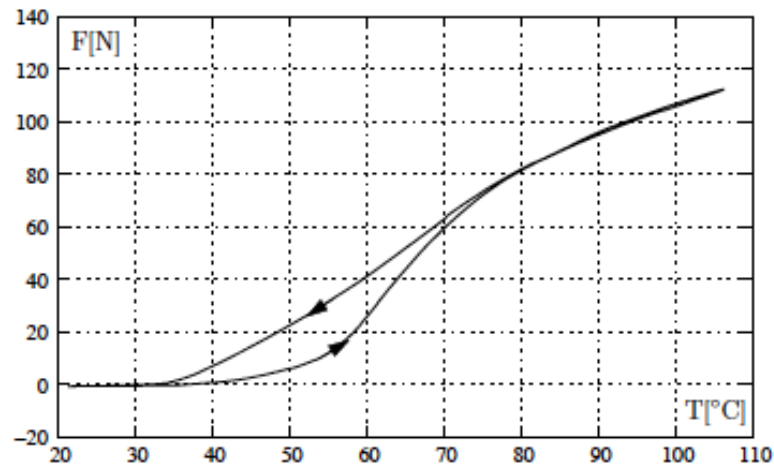


Figura 3.17 - Curvas [F(N) vs T (°C)] de aquecimento e arrefecimento da LMF (Santos, 2014).

Tabela 3.6 – Flecha ($\bar{\delta}$) e variação da flecha (Δ_f) a meio vão do modelo computacional e flecha a meio vão do ensaio com bloqueio das LMF ($\bar{\delta}_{ensaio}$).

T(°C)	$\bar{\delta}$ (mm)	Δ_f (%)	$\bar{\delta}_{ensaio}$ (mm)
20	0,22	100	0,22
30	0,20	92,9	0,19
40	0,17	75,9	0,14
50	0,11	51,5	0,10

Os resultados dos ensaios experimentais e do modelo computacional são bastante aproximados, sugerindo que o modelo é válido e que se trata de uma representação realista do comportamento do provete.

3.6.2 Modelo analítico

Neste subcapítulo desenvolveu-se um modelo analítico que permitirá estudar a influência das LMF na estrutura adaptativa. Tendo em conta as forças horizontais mobilizadas e excentricidade das mesmas, está-se perante um fenómeno de flexão composta (Fig. 3.18).

A partir deste modelo analítico e juntamente com critérios de dimensionamento será realizado, no capítulo 4, uma extrapolação para perfis comerciais de GFRP dos compósitos híbridos obtidos experimentalmente.

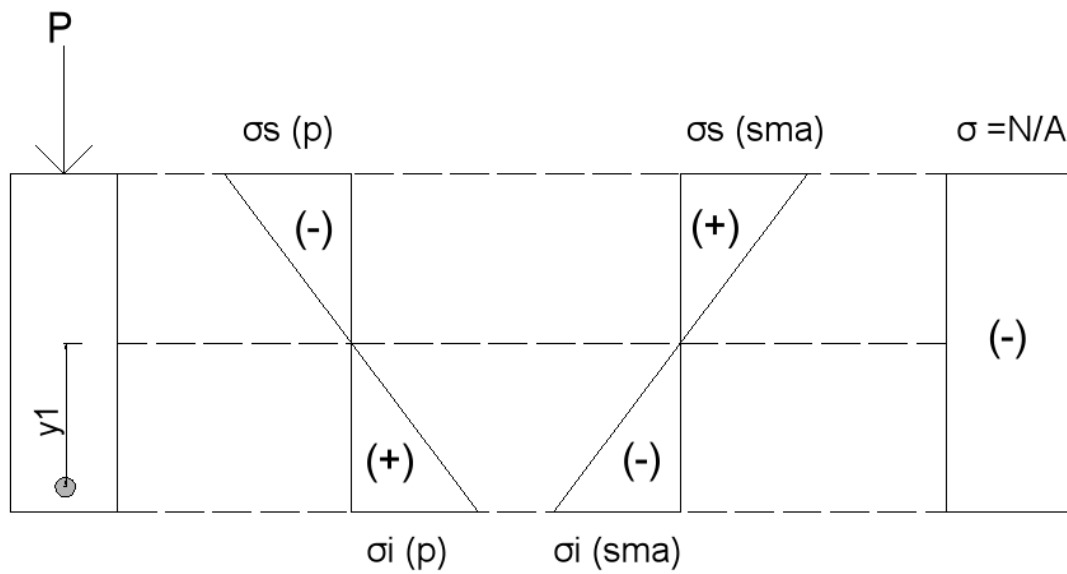


Figura 3.18 – Flexão composta

Para verificar a validade desta hipótese são calculadas as flechas a meio vão que são posteriormente comparadas com o modelo computacional.

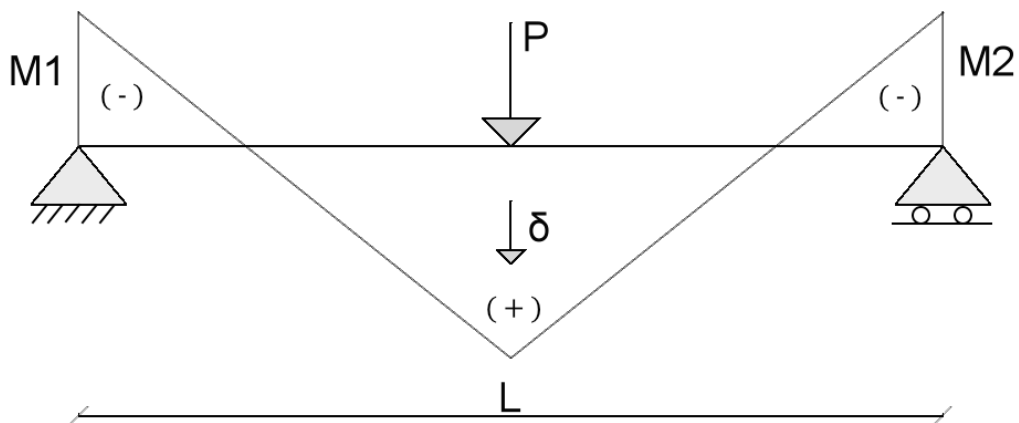


Figura 3.19 - Diagrama de momentos devido a flexão composta.

Pelo princípio dos trabalhos virtuais e tendo em conta o efeito do esforço transversal na flecha da viga é possível calcular a flecha a meio vão:

$$\delta = \left[\frac{PL^3}{48EI} + \frac{PL}{4A_vG} - \frac{L^2(M1 + M2)}{16EI} \right] \quad (5)$$

Para o caso em questão $M1=M2$.

$$\delta = \left[\frac{PL^3}{48EI} + \frac{PL}{4A_vG} - \frac{L^2M1}{8EI} \right] \quad (6)$$

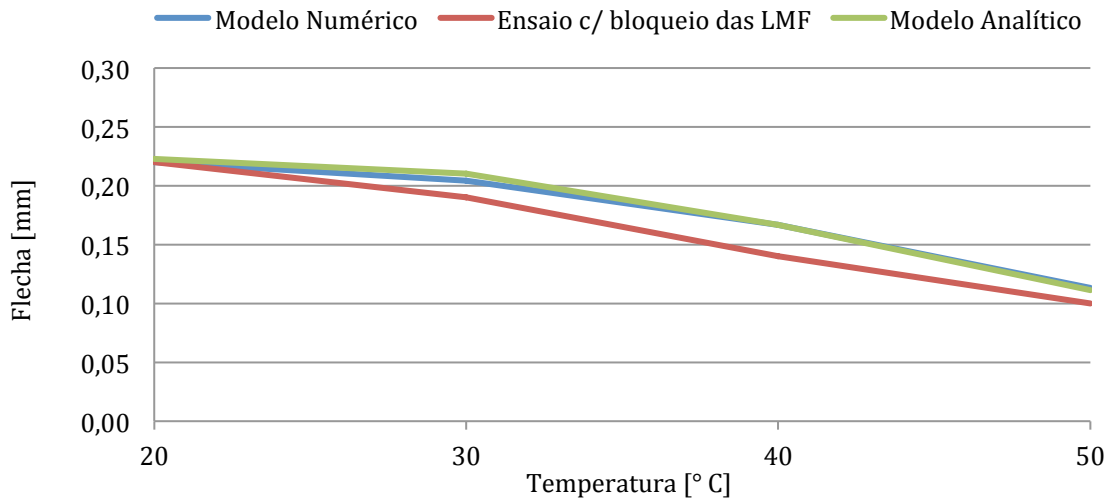


Figura 3.20 - Comparação da variação da flecha a meio vão entre o ensaio com bloqueio das LMF e os modelos.

Os resultados indicam que a hipótese adoptada para o modelo analítico está bastante aproximada do modelo numérico. Conclui-se, então que ambos os modelos reproduzem o ensaio de flexão com bastante precisão.

Capítulo 4 - Dimensionamento de vigas híbridas de GFRP e LMF

Na presente dissertação o dimensionamento da viga híbrida trata-se de um problema de flexão composta em que a instabilidade local ou global não será tida em conta, assumindo-se que as partes comprimidas do perfil estão seguras para prevenir a encurvadura lateral. O dimensionamento e verificação de segurança de uma viga deverá então satisfazer os seguintes estados limites:

Estados Limites Últimos (ELU):

- Resistência aos esforços por corte
- Resistência do material compósito por flexão
- Interação momento flector e esforço transversal

Estados Limites de Serviço (ELS):

- Deformabilidade

4.1 Estados Limites Últimos

4.1.1 Coeficientes parciais de segurança para os materiais

A propriedade de um material deverá, sempre que possível, ser representada por um valor característico, X_k , que faz com que dimensionemos a estrutura para suportar uma tensão maior que a tensão limite prevista nos ensaios. Na verdade, este processo é absolutamente necessário para obter total certeza nos resultados.

O valor de dimensionamento da propriedade do material é definido por:

$$X_d = \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (7)$$

O coeficiente parcial de segurança da propriedade do material, γ_m , para os estados limites últimos é definido no Eurocomp (Clarke, 1996) pela seguinte expressão:

$$\gamma_m = \gamma_{m1} \gamma_{m2} \gamma_{m3} \quad (8)$$

Para edifícios γ_m não deve ser menor que 1,5 nem maior que 10. Os coeficientes parciais de segurança γ_{m1} , γ_{m2} e γ_{m3} estão quantificados nas tabelas 2.3 a 2.6 do Eurocomp. Na secção de caracterização dos materiais e coeficientes de segurança, apresentam-se os valores utilizados para o γ_m .

O coeficiente parcial de segurança γ_{m1} relaciona o nível de incerteza na derivação das características dos laminados, painéis ou perfis pultrudidos. Os valores para γ_{m1} estão apresentados na Tabela 4.1, sendo que estes valores podem ser mais reduzidos caso haja informação mais detalhada ou os ensaios experimentais assim o justifiquem (Clarke, 1996).

Tabela 4.1 - Valores para o coeficiente de segurança γ_{m1} (Clarke, 1996).

Determinação das propriedades	γ_{m1}
Propriedades dos constituintes (ex.: fibras e matriz) derivam de ensaios experimentais	2,25
Propriedades do laminado derivam de fundamentos teóricos	2,25
Propriedades dos laminados, painéis ou perfis pultrudidos derivam de fundamentos teóricos	2,25
Propriedades de telas derivam de ensaios experimentais	1,5
Propriedades dos laminados, painéis ou perfis pultrudidos derivam de ensaios experimentais	1,15

O coeficiente parcial de segurança γ_{m2} está relacionado com o tipo de processo de produção utilizado. Os valores apresentados na Tabela 4.2 podem ser mais reduzidos caso haja informação mais detalhada ou os ensaios experimentais assim o justifiquem (Clarke, 1996).

Tabela 4.2 - Valores para o coeficiente de segurança γ_{m2} (Clarke, 1996).

Método de produção	γ_{m2}	
	Com pós cura	Sem pós cura
Moldagem manual com aplicação de spray	2,2	3,2
Processo com máquina controladora de aplicação de spray	1,4	2,0
Moldagem manual	1,4	2,0
Moldagem com injeção de resina	1,2	1,7
Moldagem de fibras pré-impregnadas	1,1	1,7
Processo de enrolamento filamentar	1,1	1,7
Pultrusão	1,1	1,7

O coeficiente parcial de segurança γ_{m3} está associado ao efeito da temperatura de operação dos compósitos e da temperatura de distorção térmica em relação a duração das cargas actuantes. Os valores apresentados na Tabela 4.3 podem ser mais reduzidos caso haja informação mais detalhada ou os ensaios experimentais assim o justifiquem (Clarke, 1996).

Tabela 4.3 - Valores para o coeficiente de segurança γ_{m3} (Clarke, 1996).

Temperatura de operação	HDT ² (°C)	γ_{m3}	
		Carga de curta duração	Carga de longa duração
25 - 50	55 - 80	1.2	3.0
	80 - 90	1.1	2.8
	>90	1.0	2.5
0 - 25	55 - 70	1.1	2.7
	70 - 80	1.0	2.6
	>80	1.0	2.5

O “*Fiberline Design Manual*” (de acordo com *fiberline composites*, 1995) sugere um coeficiente adicional de redução, γ_{m4} , associado à dependência da resistência e rigidez do material com a temperatura de serviço, apresentando valores para cargas de curta duração e de longa duração (Tabela 4.4). Para temperaturas que não estão presentes na tabela, os coeficientes são obtidos por extrapolação linear.

Tabela 4.4 – Valores para γ_{m4} de acordo com a temperatura de operação (de acordo com *fiberline composites*, 1995).

Temperatura de operação (°C)	γ_{m4}	
	Carga de curta duração	Carga de longa duração
-20	1.0	2.5
0	1.0	2.5
20	1.0	2.5
40	1.0	2.5
60	1.0	2.5
80	1.25	3.13

² Temperatura que, durante o aquecimento a uma taxa constante de 2 C/min, uma barra de secção rectangular de espessura de 13mm e comprimento entre apoios de 100mm, tensionada no centro, deforma 0,25mm (ASTM 648).

4.1.2 Rotura do material por flexão

O carregamento transversal nas vigas, cargas permanentes e sobrecargas, originam momentos flectores actuantes, sendo que na secção mais condicionante corresponde ao máximo momento flector, ou seja, tensões normais máximas na secção da viga que podem levar à rotura do material. Define-se como o momento flector de rotura o valor do momento associado à tensão de rotura das fibras mais solicitadas, e é dado por:

$$M_{Rd} = \frac{\sigma_w}{\gamma_m} \quad (9)$$

onde:

$$w = \frac{I}{y} \quad (10)$$

em que I é o momento de inércia da área da secção transversal em relação a linha neutra e y é a distância do centro de gravidade da secção à fibra mais afastada.

Para verificar a segurança da rotura do material por flexão o valor do momento transversal resistente deverá verificar o seguinte:

$$M_{Rd} > M_{Ed} \quad (11)$$

4.1.3 Rotura do material por corte

As cargas transversais actuantes não produzem apenas momento flector, mas também esforço transversal na direcção das mesmas. O esforço transversal a que a viga está sujeita é equivalente a distribuição de tensões tangenciais nas paredes do perfil.

O valor do esforço transversal de dimensionamento, V_{Sd} , deverá satisfazer o seguinte:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (12)$$

onde, V_{Rd} , representa a resistência da secção, dada por:

$$V_{Rd} = \frac{A_v \tau_{Rd}}{\gamma_m} \quad (13)$$

em que A_v é a área resistente ao esforço transversal, τ_{Rd} é o valor da tensão resistente ao corte do GFRP e γ_m é dado pela Eq. (8).

Conforme referido no regulamento italiano de FRP, a segurança da interacção entre o momento flector e esforço transversal deve ser verificada pela seguinte expressão (de acordo com *CNR*, 2008):

$$\left(\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}}\right)^2 \leq 1 \quad (14)$$

4.2 Estados Limites de Serviço (ELS)

Pelo facto das vigas de GFRP apresentarem uma resistência bastante superior em relação a sua rigidez, os valores para Estado Limite de Serviço são, normalmente, os mais condicionantes. Em consequência do reduzido módulo de elasticidade do material GFRP, os limites de deformação admissíveis são, frequentemente, atingidos sem que a viga esteja próxima dos seus limites da sua resistência. Por conseguinte, devido a sua elevada deformabilidade as vigas de GFRP apresentam tipicamente vãos curtos, comparativamente às vigas de aço. Sendo assim, normalmente, dimensiona-se as vigas de GFRP em relação à deformabilidade e depois verificam-se os ELU (Teixeira, 2010).

De acordo com a Equação (1), o valor máximo da deformação de uma viga de GFRP determina-se pela teoria de vigas de Timoshenko.

Na Tabela 4.4 apresentam-se os limites de deformação a longo prazo para diferentes condições de utilização, adoptados pelo Eurocomp (Clarke, 1996).

Tabela 4.5 – Limites de deformação a longo prazo (Clarke, 1996).

Condições de utilização	$\delta_{m\acute{a}x}$
Passadiço com acesso ocasional e não-público	$\frac{L}{150}$
Aplicações não especificadas	$\frac{L}{175}$
Piso com acesso público	$\frac{L}{250}$
Piso a suportar elementos frágeis e não- estruturais	$\frac{L}{250}$
Piso a suportar colunas (excepto se a deformação causada por esta esteja incluída na análise global para ELU)	$\frac{L}{400}$
Situação em que $\delta_{m\acute{a}x}$ pode prejudicar a aparência da estrutura	$\frac{L}{250}$

Na corrente tese limitou-se a flecha a $\delta_{\text{máx}} < \frac{L}{250}$, correspondendo à pisos com acesso público e situações em que $\delta_{\text{máx}}$ pode prejudicar a aparência da estrutura.

Para cargas distribuídas em vigas simplesmente apoiadas, $\delta_{\text{máx}}$ é dado por:

$$\delta = \frac{5PL^4}{384 \frac{E}{\gamma_{m4}} I} + \frac{PL}{4 \frac{G}{\gamma_{m4}} A_V} \quad (15)$$

4.3 Geometria dos perfis I e coeficientes parciais de segurança utilizados

O dimensionamento dos perfis híbridos de GFRP foi realizado com base nas especificações dos perfis em I do fabricante *Fiberline* (de acordo com *fiberline composites*, 1995). Na Tabela 4.6 estão descritas as propriedades do compósito de GFRP, enquanto que a Figura 4.1 e a Tabela 4.7 mostram as dimensões de diversos perfis em I indicados pelo fabricante *Fiberline*.

Tabela 4.6 - Propriedades do material GFRP (de acordo com *fiberline composites*, 1995).

E_L (GPa)	G (GPa)	ν_L	σ_f (MPa)	$\tau_{r,d}$ (MPa)
28 (ou 23) ³	3,0	0,23	240	25

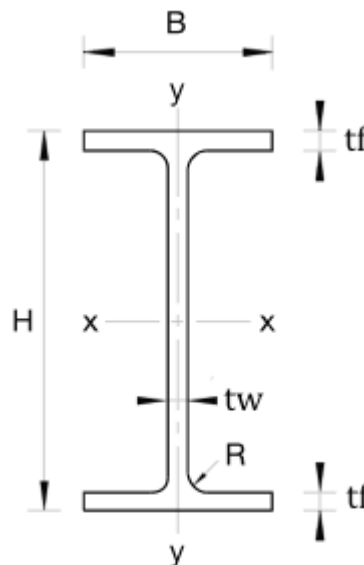


Figura 4.1 - Dimensões da seção transversal do perfil em I (adaptado de *fiberline composites*, 1995).

³ Varia com as dimensões do perfil. Ver Tabela 4.6 para o perfil H=120

Tabela 4.7 – Geometria dos perfis I (de acordo com *fiberline composites*, 1995).

<i>H</i> (mm)	<i>B</i> (mm)	<i>t_w</i> = <i>t_f</i> (mm)	<i>A</i> (mm ²)	<i>A_v</i> (mm ²)	<i>I_{xx}</i> (x10 ⁶ mm ⁴)	<i>E_L</i> (GPa)
120	60	6	1 416	684	3,1	23
160	80	8	2487	1 216	9,7	28
200	100	10	3 886	1 900	23,6	28
240	120	12	5 596	2 736	48,9	28
300	150	15	8 743	4 275	119,4	28
360	180	18	12 590	6 156	247,6	28

A Figura 4.2 é um exemplo para a secção transversal de um perfil em I híbrido. De acordo com as dimensões dos perfis I da *Fiberline* (Tabela 4.7), é apresentado uma solução para o reforço de perfis de GFRP. Para tal, aconselha-se a utilização de LMF com 1mm de diâmetro, para que no seu conjunto se assemelhem a mantas e assim seja mais fácil a sua aplicação nos processos de pultrusão e de moldagem manual. Sugere-se também uma distância entre mantas de 1mm, na espessura do banzo.

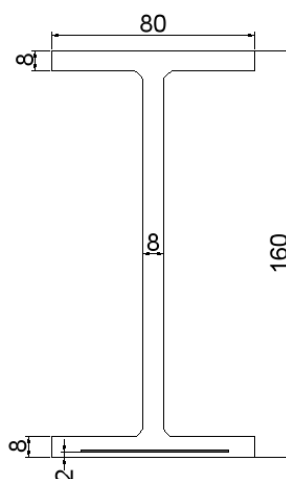


Figura 4.2 - Perfil híbrido H=160.

Para definir os coeficientes parciais de segurança (γ_m), adoptados nos perfis de GFRP, teve-se em consideração as indicações da *Fiberline* (de acordo com *fiberline composites*, 1995):

- (1) $\gamma_{m1} = 1,15$ - As propriedades do material pultrudido foram determinadas por ensaios experimentais, efectuados pela *Fiberline*.
- (2) $\gamma_{m2} = 1,1$ - O material é pultrudido e está completamente curado.

- (3) $\gamma_{m3} = 2,5$ - No ELU contribuem carregamentos de curta duração, como o de longa duração. Nesse sentido utilizou-se o valor mais condicionante.⁴

Pela Eq. (8) obteve-se o valor a considerar para o coeficiente parcial de segurança de $\gamma_m = 3,163$.

Visto que as vigas são materiais poliméricos e vão estar sobre o efeito de temperaturas moderadamente elevadas, interessa definir a degradação das propriedades do material GFRP em função da temperatura de operação. Com base no coeficiente de segurança γ_{m4} , para cargas de longa duração, e tendo em conta as propriedades de resistência à flexão e módulo de elasticidade do GFRP (Tabela 4.6), foi feito o traçado das curvas de degradação destas propriedades com a temperatura (Figuras 4.3 e 4.4).

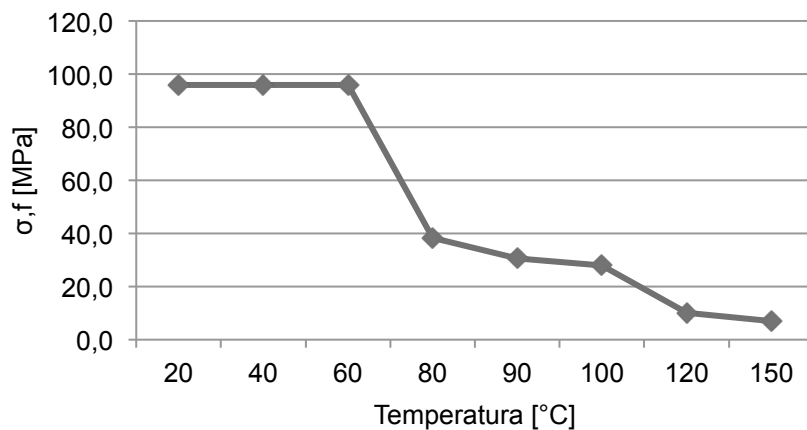


Figura 4.3 – Degradação da resistência a flexão longitudinal a longo prazo com a temperatura.

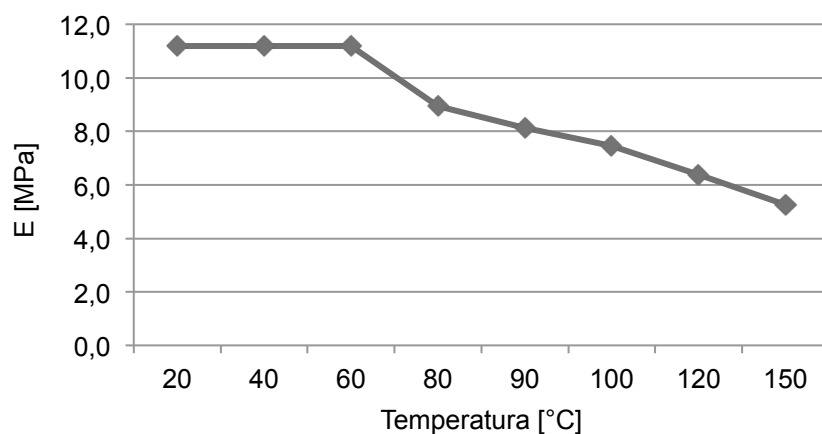


Figura 4.4 – Degradação do módulo de elasticidade longitudinal a longo prazo com a temperatura.

⁴ Os perfis do *Fiberline* garantem estabilidade em relação a temperatura de distorção térmica (HDT) até aos 100°C (de acordo com *fiberline composites*, 1995).

No próximo subcapítulo serão apresentadas as curvas de degradação das cargas máximas admissíveis dos perfis de GFRP simplesmente apoiados, assim como as áreas de reforço necessárias para mitigar a problemática associada a diminuição da carga máxima para temperaturas moderadamente elevadas.

4.4 Resultados e discussão

As Figuras 4.5 e 4.6 indicam a máxima carga distribuída uniforme admissível para perfis I 160X80X8 e I 200x100x10 simplesmente apoiados, relacionando a temperatura e comprimento do vão. Nestas figuras são apresentados os valores para o ELU, à tracejado, e para o ELS, com linha contínua. Os comprimentos do vão dos perfis analisados variam entre 2 a 6 metros.

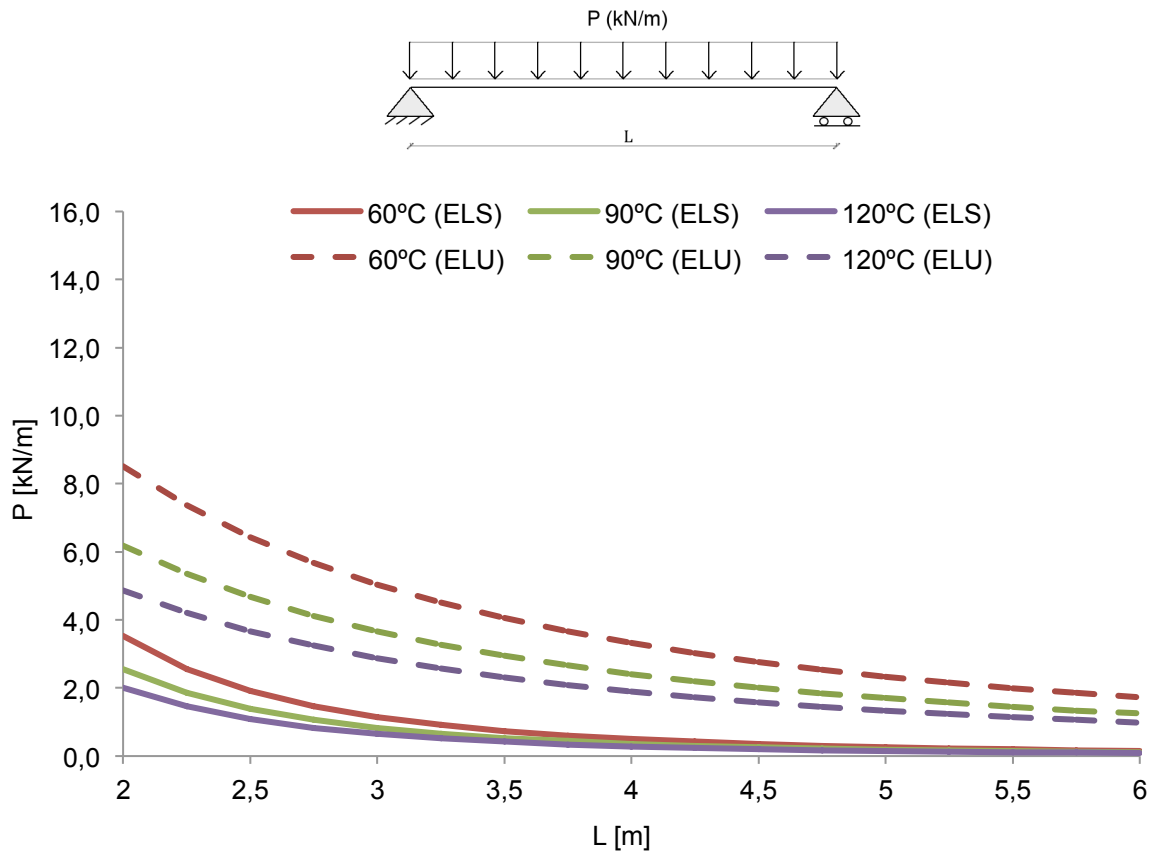


Figura 4.5 - Carga máxima P (kN/m) em perfis I ($H=160$ mm).

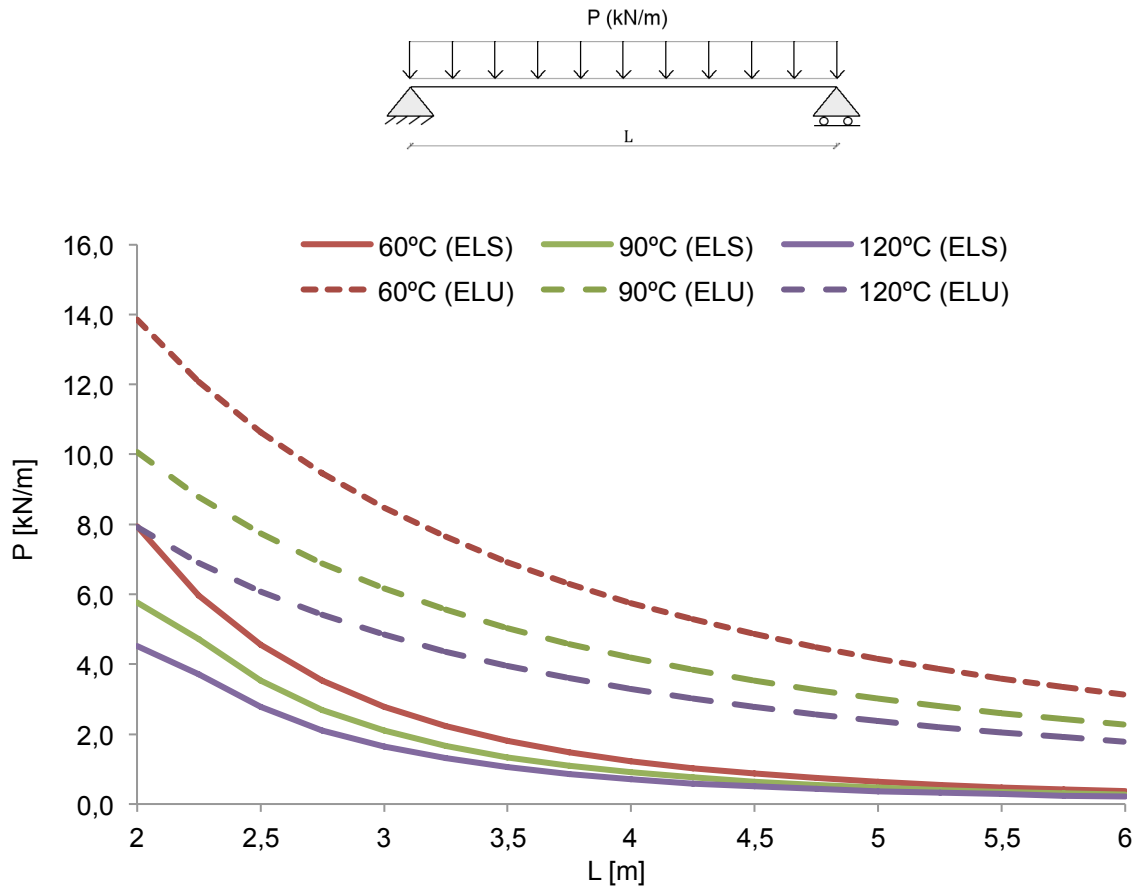


Figura 4.6 - Carga máxima P (kN/m) em perfis I (H=200mm).

Com os resultados das Figuras 4.5 e 4.6, conclui-se que os estados limites de serviço são os mais condicionantes pois apresentam valores mais baixos para a carga máxima admissível. Portanto, serão estes os valores a considerar nos cálculos das áreas resistentes para as LMF. Note-se que a carga máxima P foi calculada para garantir o limite de deformabilidade, $\frac{L}{250}$, de acordo com a Eq. (15).

Com o aumento da temperatura os deslocamentos nos perfis de GFRP vão sendo sucessivamente maiores, afastando-se do limite de deformação. O objectivo da incorporação das LMF consiste em reduzir os valores da flecha máxima de forma a satisfazer a segurança da estrutura. A Figura 4.7 ilustra a acção das ligas de memória de forma.

Dimensionamento de vigas híbridas de GFRP e LMF

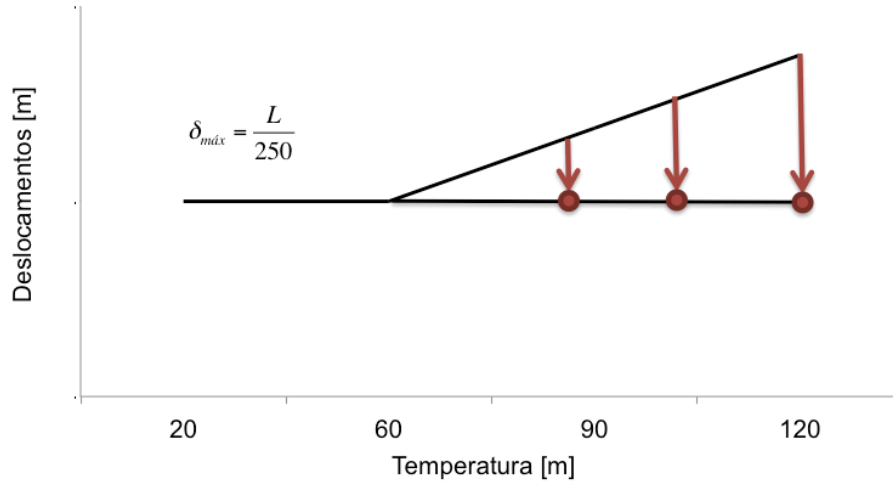


Figura 4.7 - Esquema da ação das ligas de memória de forma nos perfis de GFRP.

Para o cálculo das áreas resistentes de LMF necessárias para contrariar o efeito da temperatura na redução da resistência dos perfis de GFRP, teve-se em conta o modelo numérico (Figura 3.19) e a necessidade de manter constante a carga máxima, P (kN/m), com o aumento da temperatura. Portanto, tem-se que:

$$\delta = \frac{5PL^4}{384 \frac{E}{\gamma_{m4}} I} + \frac{PL}{4A_v \frac{G}{\gamma_{m4}}} - \frac{L^2 M1}{8 \frac{E}{\gamma_{m4}} I} \quad (16)$$

em que $\delta = \frac{L}{250}$.

Resolvendo em ordem a $M1$, momento criado pelas LMF, e sabendo que:

$$M1 = F y_1 \quad (=) \quad F = \frac{M1}{y_1} \quad (17)$$

em que F é a força mobilizada pelas LMF.

Sabendo a força, F , necessária e conhecendo a força mobilizada por uma liga de memória de forma a diferentes temperaturas (Tabela 4.8), é possível obter a área de reforço de LMF.

Tabela 4.8 - Força mobilizada por uma LMF de 1mm de diâmetro (de acordo com Santos, 2014)

T (°C)	F (kN)
60	0,1
90	0,4
120	0,5

As tabelas 4.9 e 4.10, apresentam as áreas resistentes necessárias de LMF para contrariar o efeito da temperatura na redução da resistência dos perfis de GFRP.

Tabela 4.9 – Área de LMF necessária para manter a carga distribuída máxima, para 20 °C, em perfis I (H=160mm).

T(°C) \ L(m)	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5	5,75	6
	60	43,1	40,1	37,2	34,6	32,2	30,0	28,1	26,4	24,8	23,5	22,2	21,1	20,1	19,2	18,3	17,5
90	57,2	51,3	46,5	42,4	39,0	36,1	33,6	31,4	29,4	27,7	26,2	24,8	23,6	22,5	21,5	20,5	19,7
120	73,1	65,3	59,1	53,9	49,5	45,7	42,5	39,7	37,3	35,1	33,2	31,4	29,9	28,4	27,2	26,0	24,9

Tabela 4.10 – Área de LMF necessária para manter a carga distribuída máxima, para 20 °C, em perfis I (H=200mm).

T(°C) \ L(m)	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5	5,75	6
	60	71,9	68,3	64,4	60,4	56,6	53,1	49,9	47,0	44,4	42,0	39,9	37,9	36,1	34,5	33,0	31,6
90	106,8	96,0	87,2	79,7	73,4	68,0	63,3	59,2	55,5	52,3	49,5	46,9	44,6	42,5	40,6	38,8	37,2
120	137,5	123,2	111,5	101,8	93,6	86,6	80,5	75,3	70,6	66,5	62,9	59,6	56,6	54,0	51,5	49,3	47,3

Aconselha-se a utilização de LMF com diâmetros de 1mm, permitindo que no seu conjunto formem uma manta de reforço. Assim, as alterações feitas no perfil de GFRP são reduzidas e torna a colocação dos cabos significativamente mais facilitada, tanto no processo de pultrusão como na moldagem manual.

Para tirar maior partido das capacidades resistentes das mantas de reforço, foi feito o estudo de um perfil híbrido I 160X80X8, reforçado com uma manta com 150 LMF de 1mm de diâmetro (H=160mm - 150Ø1mm), Figura 4.8.

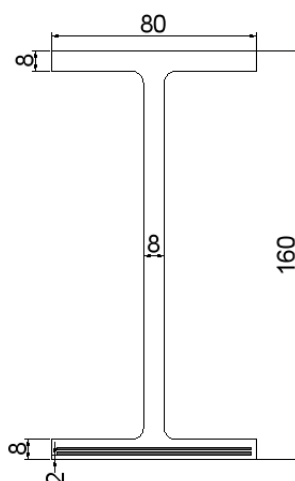


Figura 4.8 - Perfil híbrido H=160mm - 150Ø1mm.

Ao contrário do que se passa para as vigas de GFRP sem reforço, os resultados apresentados pela Figura 4.9 mostram que devido à incorporação de LMF nas vigas, os Estados Limites Últimos nem sempre serão os mais condicionantes. Para temperaturas iguais ou inferiores aos 60°C os ELS são os mais condicionantes. No entanto, para 90°C e para vãos inferiores a 4m os ELU apresentam valores mais baixos para a carga P. Por fim, aos 120°C os ELU são os mais condicionantes para qualquer comprimento do vão.

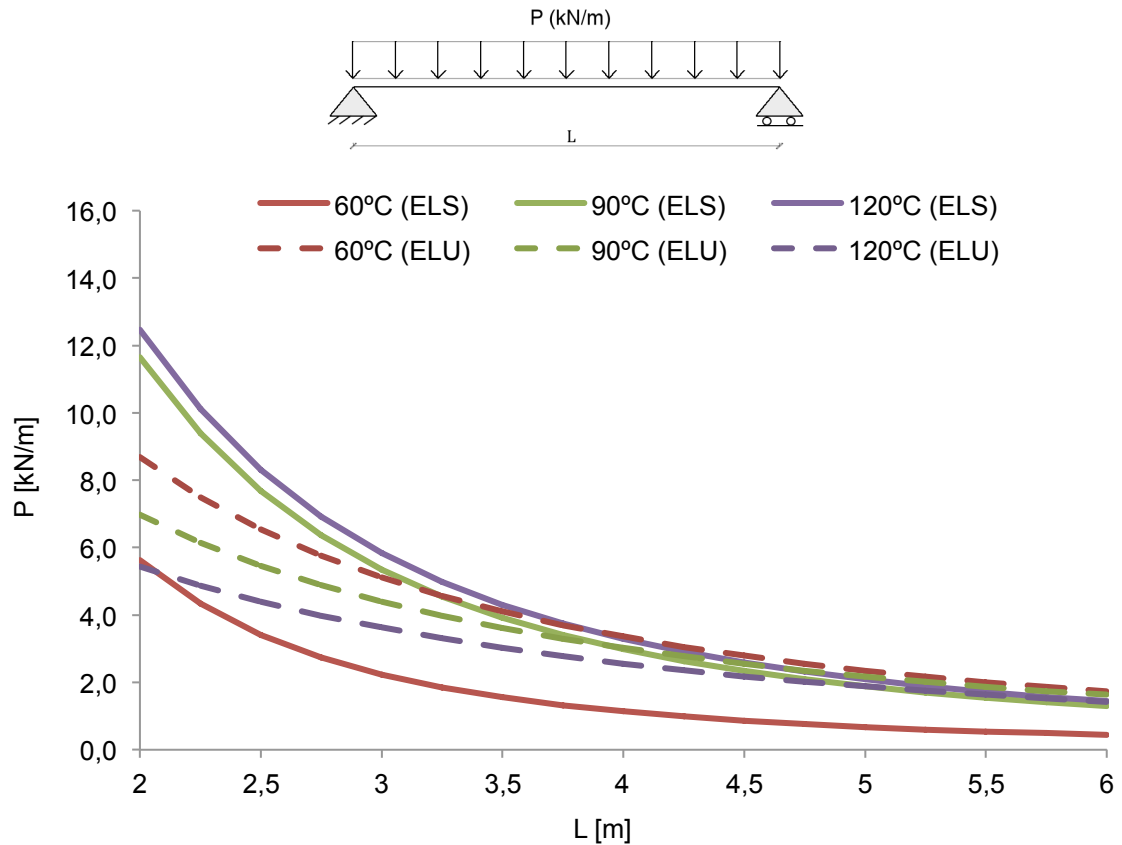


Figura 4.9 - Carga máxima P (kN/m) para perfis híbridos H=160mm - 150Ø1mm.

A Figura 4.10 compara a carga máxima admissível, a diferentes temperaturas, para vigas com e sem reforço de LMF. A temperatura ambiente as duas curvas estão sobrepostas porque apesar das LMF apresentarem um módulo de elasticidade mais elevado que o GFRP, conferindo maior rigidez ao perfil, considerou-se que os cabos são não aderentes.

Dimensionamento de vigas híbridas de GFRP e LMF

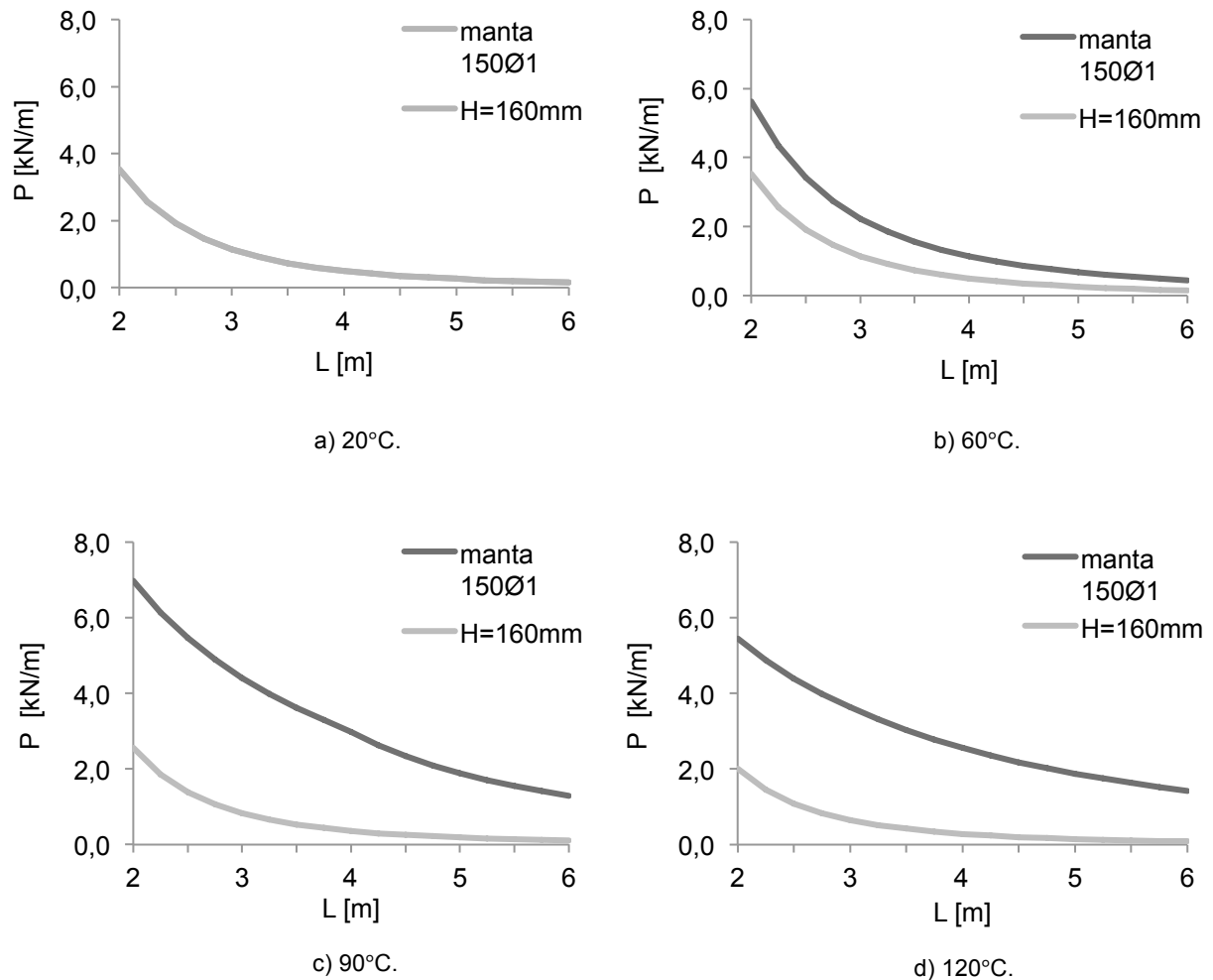


Figura 4.10 - Comparação da carga resistente entre o perfil híbrido e o perfil H=160mm da *Fiberline*.

Como se pode observar pela Figura 4.11, que representa o aumento da carga máxima resistente do perfil H=160 por incorporação das LMF, ao atingir os 60°C as LMF são já bastante eficientes, causando um incremento da carga resistente superior à 60% para qualquer comprimento do vão. Com temperaturas mais elevadas, as diferenças são ainda mais significativas.

Note-se que as curvas de 120°C e 90°C são bastante semelhantes, mas a medida que o vão aumenta apresentam um andamento diferente. Esta discrepância está de acordo com a Figura 4.9, pois aos 90°C e para vãos superiores a 4 metros os ELS são mais condicionantes. Porém, a medida que a temperatura for aumentada os ELU serão os mais condicionantes e esta diferença é cada vez menos notória.

Dimensionamento de vigas híbridas de GFRP e LMF

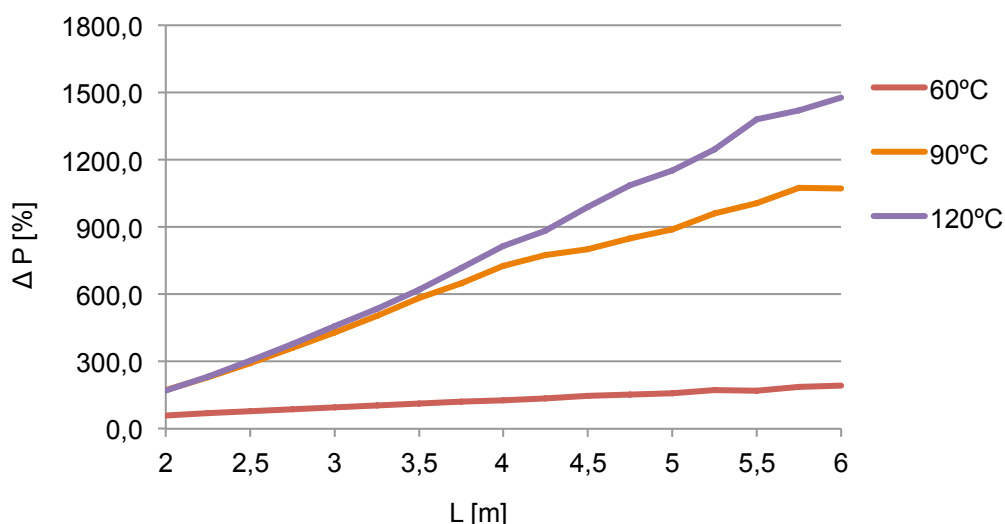


Figura 4.11 – Variação da carga P do perfil híbrido H=160mm - 150Ø1mm em relação ao perfil I (H=160mm).

Os valores para ΔP , são dados por:

$$\Delta P = \frac{P_{híbrido} - P_{H=200}}{P_{H=200}} \cdot 100 \quad (18)$$

em que $P_{híbrido}$ é a carga máxima distribuída admissível para o perfil híbrido e $P_{H=200}$ para os perfis comerciais com H=200.

Neste último caso, para além do perfil da *Fiberline* H=160mm, foi também feita uma comparação com o perfil em que H=200mm.

A Figura 4.12 mostra que o perfil híbrido aumenta significativamente a capacidade de carga da viga. Contudo, só é possível recorrer a esta solução caso a temperatura de serviço seja superior aos 60°C, ou se as LMF forem activadas por corrente eléctrica e mantidas a esta temperatura. Caso contrário, as vigas colapsam. Assim, a utilização desta solução para substituição de perfis superiores aparenta ser pouco viável.

Dimensionamento de vigas híbridas de GFRP e LMF

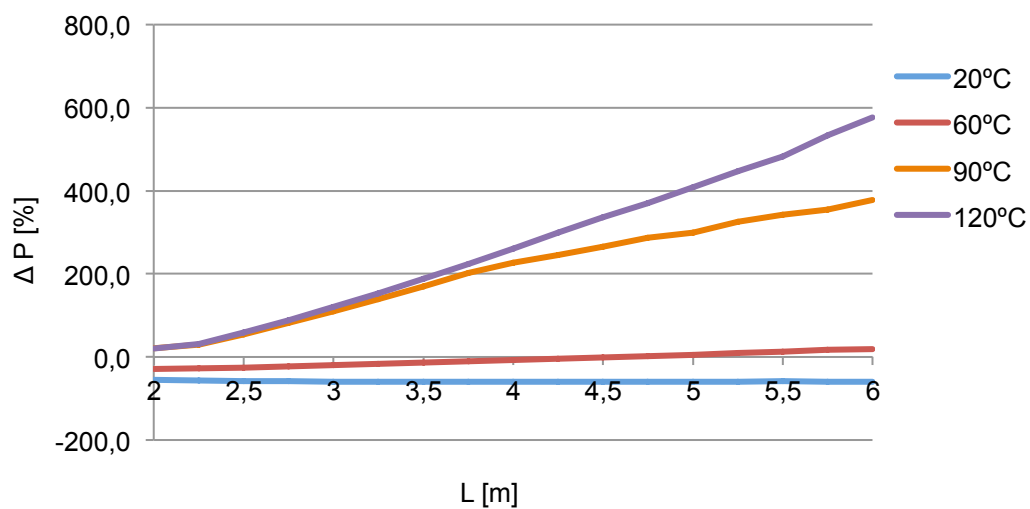


Figura 4.12 - Variação da carga máxima do perfil híbrido H=160mm - 150Ø1mm em relação ao perfil I (H=200mm).

Capítulo 5 - Conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuros

5.1 Conclusões do trabalho realizado

Para o estudo do comportamento de vigas de GFRP reforçadas com ligas de memória de forma, sujeitas a um aumento de temperatura, foram realizados ensaios experimentais complementados com um estudo bibliográfico, permitindo atingir os objectivos estipulados para a dissertação.

Para a caracterização do provete híbrido, foram ensaiados dois espécimes diferentes. De acordo com os resultados do ensaio, o material híbrido recuperou, progressivamente com o aumento da temperatura, a flecha associada à carga aplicada. Ainda assim, o provete híbrido apresenta comportamentos distintos em relação a recuperação da flecha com e sem ancoragens nas LMF. Este facto está relacionado com a perda de aderência entre o GFRP e os cabos, em consequência da perda das propriedades mecânicas do material compósito. No caso em que as LMF estão bloqueadas houve uma redução de 74% da flecha inicial.

Foram propostos dois modelos, um numérico e outro analítico. Verificou-se que, de um modo geral, todos os modelos conseguem reproduzir com bastante precisão a acção das LMF na variação da flecha do provete híbrido.

Por último, com base na hipótese do modelo analítico e tendo em conta a perda das propriedades mecânicas de perfis pultrudidos de GFRP e da acção das cargas a longo prazo, foram utilizados coeficientes parciais de segurança para ter em conta, no dimensionamento da viga híbrida, a degradação das propriedades do material com a temperatura. Inicialmente, calculou-se a carga distribuída máxima em perfis I de fibra de vidro para temperaturas de operação entre 20°C e 120°C. Tal como seria de esperar os Estados Limites de Serviço são os mais condicionantes, apresentando uma redução de 40-45% da capacidade de carga à 120°C. Posteriormente, determinou-se a área necessária de LMF para manter a carga distribuída máxima a temperatura ambiente nas diferentes temperaturas de operação.

Para terminar, com o intuito de aproveitar o máximo das capacidades das LMF, aumentou-se a quantidade de reforço no perfil. Os resultados indicam um aumento de carga até 15 vezes em relação a perfis do mesmo tamanho, assim como, um perfil I híbrido (160x80x8mm) que apresenta melhor comportamento do que o perfil de GFRP acima (200x100x10mm). Porém, para este último

caso, as ligas de memória de forma passam a ser uma componente activa, pois necessitam de ser controladas por uma fonte exterior, caso contrário, para temperaturas inferiores ou próximas de 60°C a viga colapsa.

5.2 Perspectivas de desenvolvimentos futuros

Os objectivos da dissertação foram alcançados. Contudo há diversos aspectos que podem complementar o estudo realizado. Neste capítulo são apresentadas sugestões para futuros desenvolvimentos.

- Proceder a ensaios mecânicos dinâmicos (DMA) ou calorimetria diferencial de varredura (DSC) para conhecer com exactidão a temperatura de transição vítrea dos provetes, permitindo obter resultados mais conclusivos a cerca da eficácia das LMF a cima desta temperatura;
- Entender a influência do aquecimento nos espécimes sujeitos a cargas durante um período de tempo razoável. Está seria uma abordagem mais próxima da realidade, pois em situações com temperaturas elevadas de operação os elementos estruturais já estão esforçados, podendo este factor alterar a resposta das vigas;
- Estudos experimentais semelhantes ao apresentado nesta dissertação, em vigas de tamanho real e matrizes compostas por resinas diferentes da poliéster. Com o intuito de analisar a contribuição de cada uma das matrizes no comportamento da viga híbrida;
- Elaboração de modelos analíticos e numéricos que permitam ter em conta a anisotropia do material e a variação das propriedades do GFRP e LMF por acção do calor;
- Por outro lado é também importante realizar ensaios de fotoelasticidade com um polariscope circular e desenvolvimento de modelos numéricos para conhecer os deslocamentos e tensões desenvolvidas entre a LMF e o material compósito, quando as ligas são activadas, assim como o efeito da temperatura na aderência entre os materiais;
- Seria também interessante efectuar uma análise dos custos associados à utilização dos compósitos híbridos com memória de forma em relação aos materiais mais tradicionais.

Referências

A. B. STRONG AND C. A. PLOSKONKA, "Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications". Society of Manufacturing Engineers, 1989.

NANNI *et al.*, "State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures". American Concrete Institute, 1996.

P. MOURITZ AND A. G. GIBSON, "Fire Properties of Polymer Composite Materials", Softcover reprint of hardcover 1st ed. 2006 edition. Springer, 2010.

ASTM 648, "Standard test method for deflection temperature of plastics under flexural load in the edgewise position". Pensilvânia, 2001.

INSTITUTE, "SPI/CI Introduction to Composites", Fourth Edition. CRC Press, 1998.

MAY, Epoxy Resins: Chemistry and Technology, Second Edition. CRC Press, 1987.

CNR – Nation Research Council of Italy, "Guide for the Design and Construction of Structures made of FRP Pultruded Elements, Roma, 2008.

CEBALLOS, "Análise do comportamento elástico de vigas adaptativas com ligas de Ni-Ti em temperaturas inferiores a M_f e superiores a A_f ". Universidade de Brasília, 2012.

REYNOLDS, "A Nonlinear Thermodynamic Model for Phase Transitions in Shape Memory Alloy Wires". Rice University, Houston, Texas, 2003.

E. ZANABONI, "One Way and Two Way-Shape Memory Effect: Thermo-Mechanical Characterization of Ni-Ti wires". Università Degli Studi di Pavia, Itália, 2007.

F. DOS SANTOS, "Vibration Control of an underslung cable footbridge using shape memory alloys". FCT/UNL, Caparica, 2014.

F. DOS SANTOS, "Vibration Control With Shape-Memory Alloys". FCT/UNL, Caparica, 2011.

F. S. GALASSO, "Advanced Fibers and Composites". CRC Press, 1989.

T. WALLEMBERGER AND N. E. WESTON, "Natural Fibers, Plastics and Composites". Springer Science & Business Media, 2004.

FIBERLINE COMPOSITES, "Fiberline Design Manual", 1995.

SONG, N. MA, AND H.-N. LI, "Applications of shape memory alloys in civil structures," Engineering Structures, vol. 28, no. 9, pp. 1266–1274, Jul. 2006.

L. CLARKE, Structural Design of Polymer Composites: "Eurocomp Design Code and Background Document", 1 edition. Londres: CRC Press, 1996.

J. PIRES, "Comportamento mecânico a temperaturas elevadas de perfis pultrudidos de compósito de GFRP", Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2012.

J.R. CORREIA, "GFRP Pultruded Profiles in Civil Engineering: Hybrid Solutions, Bonded Connections and Fire Behaviour". Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2008.

GOMES; J. CORREIA; F. BRANCO, "Comportamento mecânico à tracção a temperaturas elevadas de perfis pultrudidos de GFRP", Relatório IST-3-1, Tarefa 3 –"Small scale fire resistances experiments on GFRP pultruded laminates", 2008.

GUEDES, "A Lei de Joule". FEUP, 2000.

M. KUTZ, "Handbook of Materials Selection". John Wiley & Sons, 2002.

K. MALLICK, "Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design, Second Edition". CRC Press, 1993.

P. M. TEIXEIRA, "Análise e Dimensionamento de Perfis Pultrudidos de GFRP". Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2010.

CAMPOSINHOS, "Lajes Pré-Esforçadas Por Cabos Não Aderentes: Um Guia De Dimensionamento E Projecto". FEUP, Porto, 1991.

MAZUMDAR, "Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering". CRC Press, 2001.

T. MORGADO, "Comportamento ao fogo de vigas de compósito de GFRP",. IST, Lisboa, 2012.

T. STARR, "Pultrusion for Engineers". Elsevier, 2000.

W. BRAMESHUBER, "Report 36: Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC". RILEM Publications, 2006.

Website da empresa CIP Composite, www.cipcomposites.com, em 08/29/2014.

Website da empresa Nuplex: www.nuplex.com, em 17/8/2014.

Website da enciclopédia online, wikipédia: www.wikipedia.org, em 2/06/2014.

Website do fabricante Advanced Fiber Products: www.afpfiberglass.com, em 23/5/2014.

Website do fabricante Alto: www.alto.pt, em 3/6/2014.

Website do fabricante Fiberline: www.fiberline.com, em 11/4/2014.

Website do fabricante Strongwell: www.strongwell.com, em 20/5/2014.

