



TÉCNICO
LISBOA

Sensores Embebidos em Materiais Compósitos Sanduíche com Núcleo de Aglomerado de Cortiça

Joana Osório Gomes Rosado de Sousa

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Aeroespacial

Orientadores: Prof. Virgínia Isabel Monteiro Nabais Infante
Prof. Pedro Miguel Gomes Abrunhosa Amaral

Júri

Presidente: Prof. Fernando José Parracho Lau
Orientador: Prof. Virgínia Isabel Monteiro Nabais Infante
Vogal: Prof. Luís Filipe Galvão dos Reis

Julho 2019

Aos meus pais, Carla e Luís

Agradecimentos

Aos meus orientadores, Professora Doutora Virgínia Infante e ao Professor Doutor Pedro Amaral, pela oportunidade de desenvolver este estudo, pelas orientações e disponibilidade mostrada no esclarecimento de dúvidas.

Ao Professor Doutor Agostinho Fonseca, pelo apoio e disponibilidade na partilha de conhecimento na área dos sensores.

Ao Carlos Diogo Henriques, pela partilha de conhecimento relativo a sensores embebidos.

Ao Pedro Pereira e ao Pedro Carvalho, por me apoiarem na utilização do software LabVIEW.

Ao João Marques e à Madalena Garcia, por me terem acompanhado ao longo deste percurso, pelo apoio, pela partilha e pelas novas ideias que contribuíram para o desenvolvimento deste estudo.

Ao Sr. Pedro, por manter as máquinas sempre impecáveis para que eu pudesse trabalhar.

Ao tio Rui, pela disponibilidade em cortar provetes. À minha prima Inês, pela ajuda em algumas ilustrações.

A todos os meus amigos, pelos bons momentos e pelo apoio incondicional.

A toda a minha família, pelo apoio constante e por estarem sempre presentes.

Ao meu Joyce, companheiro de quatro patas, por me ter aturado todos os dias em que eu tinha de estudar e não podia brincar.

Ao Luís, por todo o amor, carinho e partilha de sonhos.

Aos meus pais, Carla e Luís, por tudo.

Resumo

O presente estudo exploratório procura avaliar a influência de sensores embebidos nas propriedades mecânicas de um compósito sanduíche com núcleo de aglomerado de cortiça e *skins* de fibra de vidro e resina epóxi. Analisou-se o comportamento do material à tração, flexão e fluência, em três situações distintas: sem sensores, com sensores à superfície e com sensores embebidos. Os sensores estudados foram os extensómetros e os sensores de Bragg.

Os provetes foram produzidos utilizando o método de *hand lay-up* que demonstrou permitir uma boa leitura dos sensores embebidos.

A incorporação de sensores afetou a resistência e o modo de falha à flexão do material. No caso da fluência, a amostra do material em teste foi sensível à temperatura mais elevada, sendo que todas as leituras dos sensores embebidos traduziram essa diferença. O estudo da rigidez nos ensaios de tração e flexão não permitiu tirar conclusões, devido ao número reduzido de provetes testados, mas o facto de alguns provetes com sensores embebidos não terem sofrido alterações de rigidez significativas, comparativamente com provetes sem sensores e com sensores à superfície, reforça a necessidade de se prosseguir com estudos nesta área que permitam validar e generalizar resultados.

O estudo foi de encontro aos objetivos traçados, tendo permitido desenvolver conhecimento relativamente a este tema. Os resultados obtidos abrem caminho para investigações futuras que permitam testar uma amostra maior, efetuar simulações numéricas para comparação de resultados e realizar outro tipo de ensaios que permitam caracterizar a longo termo os efeitos da incorporação de sensores embebidos no comportamento do material.

Palavras-chave: sensores embebidos, extensómetros, sensores de Bragg, monitorização estrutural, compósito sanduíche, *hand lay-up*.

Abstract

This study intends to assess how embedded sensors can change the mechanical properties of a sandwich composite material with cork agglomerate core and fiberglass and epoxy resin skins. The behaviour of the material was analysed during tensile, flexural and creep tests, in three different situations: without sensors, with surface sensors and embedded sensors. The sensors tested were strain gages and fiber Bragg grating.

The manufacturing process used to produce the composite specimens was the hand lay-up process, which proved to allow good measurements from the embedded sensors.

Collected data analysis showed that embedded sensors affected the flexural resistance and failure modes. In the creep test, the specimens were sensible to the highest temperature, in comparison with room temperature, and all the data collected by the embedded sensors translated this difference. The stiffness analysis in the tensile and flexural tests did not allow to draw conclusions due to the small number of specimens, but the fact that some specimens with embedded sensor showed no significant changes in stiffness, compared with specimens without sensors and surface sensors, reinforces the need to continue with studies in this area that allow to validate and generalize results.

This study followed the objectives proposed, increasing knowledge regarding this subject. The conclusions open a way to future studies that can test a larger number of specimens, numerical simulations to compare results and perform other tests that allow to characterize in long term the effects of embedded sensors in the behaviour of composite materials with cork agglomerate core.

Keywords: embedded sensors, strain gage, fiber Bragg grating, structural health monitoring, sandwich composite, hand lay-up.

Conteúdo

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de Tabelas	xv
Lista de Figuras	xvii
Lista de Símbolos	xix
Glossário	xxii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo geral:	3
1.2.2 Objetivos específicos:	3
1.3 Estrutura da Dissertação	4
2 Estado da Arte	5
2.1 Materiais Compósitos	5
2.2 Materiais Compósitos Sanduíche	6
2.2.1 Componentes	6
2.2.1.1 <i>Skins</i>	6
2.2.1.2 Núcleo	7
2.2.1.3 Adesivos	7
2.2.2 Modos de falha	7
2.3 Cortiça e aglomerados de cortiça	9
2.3.1 Estrutura e constituição química da cortiça	9
2.3.2 Propriedades mecânicas da cortiça	10
2.3.2.1 Comportamento em compressão	10
2.3.2.2 Comportamento em tração	11
2.3.2.3 Coeficiente de Poisson	12
2.3.3 Matérias-Primas da cortiça	12
2.3.4 Aglomerado de cortiça como núcleo de compósitos sanduíche	14

2.3.5	Aplicações da cortiça no setor aeroespacial	15
2.4	Polímero reforçado com fibras de vidro	15
2.5	Resina epóxi	16
2.6	Métodos de produção de compósitos	18
2.6.1	Método de <i>hand lay-up</i>	18
2.7	VIC - <i>Visual Image Correlation</i>	19
2.8	Sensores	20
2.8.1	Extensómetros	20
2.8.1.1	Circuito em ponte de Wheatstone	21
2.8.1.2	Compensação do efeito da temperatura	23
2.8.1.3	Sistema de medição e condicionamento de sinal	24
2.8.2	Rede de Bragg em fibra ótica	25
2.8.2.1	Sensibilidade à deformação longitudinal e à temperatura	26
2.8.2.2	Compensação do efeito da temperatura	27
2.8.2.3	Sistema de aquisição	27
2.8.3	Comparação entre extensómetros e sensores de Bragg	28
2.9	Investigação relacionada	29
3	Conceção e Realização Experimental	31
3.1	Descrição do compósito sanduíche	31
3.2	Determinação da quantidade de resina e endurecedor	32
3.3	Método de produção dos provetes	34
3.4	Sensores selecionados	35
3.4.1	Extensómetros	36
3.4.2	Sensores de Bragg	38
3.5	Procedimento para a integração dos sensores	38
3.5.1	Extensómetros à superfície	39
3.5.1.1	Colagem	39
3.5.1.2	Soldadura	39
3.5.2	Extensómetros embebidos	40
3.5.2.1	Colagem	40
3.5.2.2	Soldadura	40
3.5.3	Sensores de Bragg embebidos	41
3.5.3.1	Colagem	41
3.6	Sistemas de aquisição de dados	42
3.6.1	Extensómetros	42
3.6.2	Sensores de Bragg	43
3.7	Plataforma de teste	43
3.7.1	Máquina de ensaios e software	43

3.7.2	Instrumentos para validação/comparação de resultados	44
3.7.2.1	Sistema VIC-2D	44
3.7.2.2	Clip Gage	45
3.8	Ensaio de Tração	45
3.8.1	Descrição do ensaio	45
3.8.2	Geometria do provete	47
3.8.3	Prototipagem	47
3.8.4	Calibração dos sensores	49
3.8.5	Sincronização dos dados	49
3.8.6	Parâmetros calculados	50
3.8.6.1	Determinação do coeficiente de Poisson	50
3.8.6.2	Determinação do módulo de Young	51
3.8.6.3	Análise da influência local e global do sensor no provete	51
3.9	Ensaio de Flexão	52
3.9.1	Descrição do ensaio	52
3.9.2	Geometria do provete	53
3.9.3	Prototipagem	54
3.9.4	Calibração dos sensores	55
3.9.5	Sincronização dos dados	55
3.9.6	Parâmetros calculados	56
3.9.6.1	Determinação da carga máxima	56
3.9.6.2	Determinação da posição da linha neutra e do módulo de Young à flexão	56
3.9.6.3	Análise do sensor na resistência do material	59
3.10	Ensaio de Fluência	59
3.10.1	Descrição do ensaio	60
3.10.2	Prototipagem	60
3.10.3	Calibração dos sensores	61
3.10.4	Sincronização dos dados	61
3.10.5	Parâmetros obtidos	61
3.10.5.1	Medição do valor da deformada ΔL_{Final}	61
3.10.5.2	Representação gráfica dos dados obtidos pelos sensores embebidos	62
4	Resultados	63
4.1	Ensaio de Tração	63
4.1.1	Determinação do Coeficiente de Poisson	63
4.1.2	Determinação do Módulo de Young	65
4.1.3	Análise das Áreas	68
4.2	Ensaio de Flexão	69
4.2.1	Determinação da carga máxima	69

4.2.2	Determinação da posição da linha neutra e do módulo de Young à flexão	71
4.2.3	Análise da influência do sensor na resistência do material	73
4.3	Ensaio de Fluência	74
5	Conclusões	77
5.1	Sumário das contribuições	77
5.2	Trabalhos Futuros	79
	Bibliografia	81
A	Tabelas complementares aos resultados	91
A.1	Ensaio de Tração	91
A.2	Ensaio de Flexão	93
A.3	Ensaio de Fluência	96
B	Imagens de suporte à extensometria	97

Lista de Tabelas

1	Sinais correspondentes a ε_M e ε_W para todos os extensómetros ligados em ponte completa [62].	24
2	Especificações técnicas do extensómetro 1-LY16-6/350 [83].	37
3	Especificações técnicas do sensor de Bragg FS62 - <i>Miniature Polyimide Strain Sensor</i> [87].	38
4	Principais características do interrogador sm-125 [92].	43
5	Variáveis e dimensões do provete de tração.	47
6	Prototipagem dos provetes de tração.	48
7	Restrições na geometria do provetes para um ensaio de flexão em quatro pontos.	53
8	Prototipagem dos provetes de flexão.	54
9	Prototipagem dos provetes de fluência.	61
10	Valores do coeficiente de Poisson (ν) de cada provete, média ($\bar{\nu}$) e desvio padrão (SD).	64
11	Erros relativos entre o valores de E calculados através do sensor e do sistema VIC ou <i>clip gage</i> , para os lotes TD e TE.	65
13	Diferenças percentuais (DP) entre os valores de E dos ensaios de repetibilidade dos provetes do lote TD e TE.	67
14	Análise das áreas dos provetes sem sensores dos lotes TD e TE.	68
15	Análise das áreas dos provetes com sensores embebidos TD/SG1/E e TE/SG1/E.	68
16	Análise das áreas do provete TD/FBG1/E.	69
17	Valores de $\sqrt{\lambda}$ dos três ensaios de repetibilidade dos provetes dos lotes FB e FC.	71
18	Valores de E_F , média ($\overline{E_F}$) e desvio padrão (SD).	71
19	Diferenças percentuais entre os valores de $\overline{E_F}$ dos provetes 1 e 2.	72
20	Valores de carga máxima (F_{max}), tensão máxima (σ_{max}), média ($\overline{\sigma_{max}}$) e desvio padrão (SD) dos provetes do lote FC.	74
21	Valores de ΔL_{final} medidos após cada ensaio de fluência.	75
22	Valores de largura, comprimento e espessura para os provetes de tração.	91
23	Condições de teste do provete TD/SG1/S.	92
24	Condições de teste do provete TD/SG1/E.	92
25	Condições de teste do provete TD/FBG1/E.	92
26	Condições de teste do provete TE/SG1/S.	92

27	Condições de teste do provete TE/SG1/E.	92
28	Valores do coeficiente de Pearson (R^2).	93
29	Valores de largura, comprimento e espessura para os provetes de flexão.	93
30	Condições de teste do provete FB/SG1/S.	94
31	Condições de teste do provete FB/SG2/S.	94
32	Condições de teste do provete FC/SG1/S.	94
33	Condições de teste do provete FC/SG2/S.	94
34	Condições de teste do provete FC/SG3/S.	94
35	Condições de teste do provete FC/SG1/E.	95
36	Condições de teste do provete FC/SG2/E.	95
37	Condições de teste do provete FC/SG3/E.	95
38	Condições de teste do provete FD/FBG1/E.	95
39	Condições de teste do provete FD/SG1/E.	95
40	Erros relativos entre os valores de $\overline{E_F}$ e os valores de $\overline{E_{B_T}}$ e $\overline{E_{B_C}}$	96
41	Valores médios das medições da largura, comprimento e espessura para os provetes de fluência.	96
42	Condições de teste dos provetes de fluência.	96

Lista de Figuras

1	Esquema resumo do presente estudo.	3
2	Comparação entre um compósito sanduíche e um perfil em I [22].	6
3	Modos de falha em adesivos [29].	9
4	Curvas de compressão da cortiça: a) representação esquemática, evidenciando as três regiões da curva e b) curvas experimentais em compressão radial (R) e em compressão não radial (NR) [32].	11
5	Curva tensão-extensão da cortiça à tração [9].	12
6	Duas representações de um circuito em ponte de Wheatstone [61].	21
7	Diferentes tipos de pontes Wheatstone [62].	23
8	Rede de Bragg em fibra ótica [65].	26
9	Esquema do compósito sanduíche produzido e testado.	31
10	Materiais utilizados: a) placa de cortiça ACC NL20, b) resina epóxi resoltech 1050 e endurecedor 1059S e c) fibra de vidro 205 g/m^2	32
14	Sequência do método de produção dos provetes.	35
15	Curva da distribuição de extensão na vizinhança de uma zona de concentração de tensão [85].	36
16	Sensor de Bragg K-FS62.	38
17	a) Abordagem 1, b) abordagem 2 e c) abordagem 3.	40
18	Sensor de Bragg embebido.	41
19	Sistemas de aquisição: a) dos extensômetros e dos b) sensores de Bragg.	42
20	Máquina de ensaios Instron® 5566 com amarras para o ensaio de flexão e <i>software</i> Bluehill®.	44
21	Sistemas de validação dos ensaios: a) VIC-2D e b) <i>clip gauge</i>	45
22	Procedimento escolhido para o ensaio de tração.	46
23	Esquema de um provete de tração.	47
24	Provetes dos Lotes TD e TE.	49
25	Obtenção das extensões no VIC.	50
26	Provete TD1 com as três áreas assinaladas (A1, A2 e A3).	52

27	a) Ensaio em três pontos, b) ensaio em quatro pontos <i>Quarter Point Loading</i> e c) ensaio em quatro pontos <i>Third Point Loading</i> [101].	53
28	Dimensões dos provetes de flexão.	54
29	Provetes dos lotes a) FC e b) FD.	55
30	Posição do extensómetro no ensaio de flexão quatro pontos: a) extensómetro na face à compressão e b) extensómetro na face à tração [104].	57
31	a) Secção vertical longitudinal de uma viga em flexão pura [106] e b) secção vertical longitudinal do compósito em estudo.	58
32	Provetes de fluência (Lotes C1, C2 e C3).	61
33	Esquema de um provete com a medição de ΔL_{Final} representada.	62
34	Obtenção dos valores para calibração, no início de um ensaio de fluência.	62
35	Provetes de tração após os ensaios destrutivos: a) lotes TA, TB e TC e b) lotes TD e TE.	63
36	Curvas da carga em função da flecha dos lotes FA e FB.	70
37	Provetes dos lotes FA e FB, após os ensaios de flexão destrutivos.	70
38	Curvas de tensão em função da extensão referentes ao primeiro ensaio de repetibilidade de cada provete dos lote FC.	72
39	Provetes dos lotes FC, após os ensaios de flexão destrutivos.	74
40	Provetes C2/SG1 e C2/SG2, após o último ensaio de fluência a 70°C.	76
41	Curvas de fluência.	76
42	Placa de aquisição NI 9237: a) esquema de ligações e b) descrição dos pinos de ligação [111].	97
43	Esquema de ligações na placa de aquisição NI 9237: a) meia ponte e b) ponte completa [111].	97

Lista de Símbolos

Simbolos gregos

α	Coeficiente de expansão térmica da fibra.
β_e	Coeficiente de sensibilidade do sensor de Bragg à extensão.
β_T	Coeficiente de sensibilidade térmica do sensor de Bragg.
Λ	Período da rede de difração.
λ_B	Comprimento de onda de Bragg.
ν	Coeficiente de Poisson.
ρ	Raio do arco.
σ	Tensão.
σ_{max}	Tensão máxima.
$\sqrt{\lambda}$	Posição da linha neutra.
ε	Extensão.
ε_L	Extensão devida à expansão térmica.
ε_M	Extensão devida à tensão mecânica.
ε_T	Extensão transversal.
ε_W	Extensão longitudinal.
ζ	Coeficiente termo-ótico.

Simbolos romanos

$A_{contacto}$	Área de contacto entre a face e o núcleo do compósito sanduíche.
b	Largura do provete.
c	Espessura do núcleo do provete.
D_f	Densidade das fibras.

D_m	Densidade da matriz.
$d_{i_{fibra}}$	Diâmetro da fibra ótica.
$d_{i_{nucleo}}$	Diâmetro do núcleo da fibra ótica.
E	Módulo de Young à tração.
E_F	Módulo de Young à flexão.
F	Carga.
F_{max}	Carga máxima.
h_c	Espessura do provete de flexão à compressão.
h_T	Espessura do provete de flexão à tração.
l	Comprimento do provete.
m_c	Declive do gráfico força-extensão, quando o sensor se encontra na face que está à compressão do provete de flexão.
m_T	Espessura do provete de flexão à tração.
m_t	Declive do gráfico força-extensão, quando o sensor se encontra na face que está à tração do provete de flexão.
n_{ef}	Índice de refração médio do núcleo da fibra.
p_e	Constante fotoelástica da fibra.
R	Resistência do extensómetro.
r	Resistividade.
R_0	Resistência inicial do extensómetro.
S	Distância entre os apoios inferiores no ensaio de flexão.
T	Temperatura.
t	Espessura total do provete.
t_F	Espessura da fibra.
V_0	Tensão de saída.
V_f	Volume das fibras.
V_m	Volume da matriz.
V_s	Tensão de excitação.

V_T Volume do compósito.

W_f Massa das fibras.

W_m Massa da matriz.

Glossário

ACC Amorim Cork Composites

ADC Analog to Digital Converter

ASTM American Society for Testing and Materials

DIC Digital Image Correlation

DP Diferença Percentual

ESA European Space Agency

FBG Fiber Bragg Grating

GF Gage Factor

HBM Hottinger Baldwin Messtechnik

ISQ Instituto de Soldadura e Qualidade

IST Instituto Superior Técnico

LED Light Emitting Diode

LIFE Lighter, Integrated, Friendly and Eco-efficient

NASA National Aeronautics and Space Administration

NI National Instruments

NR Não Radial

PEEK Polyetheretherketone

RTM Resin Transfer Molding

R Radial

SD Standard Deviation

SG Strain Gage

UAV Unmanned Aerial Vehicle

USB Universal Serial Bus

UV Ultraviolet

VIC Visual Image Correlation

Capítulo 1

Introdução

O presente trabalho, realizado no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Aeroespacial, centra-se num estudo exploratório da influência de sensores embebidos nas propriedades mecânicas de um compósito sanduíche com núcleo de aglomerado de cortiça, com vista à sua futura implementação na monitorização de estruturas de engenharia, nomeadamente na indústria aeroespacial. O aglomerado de cortiça foi escolhido como núcleo devido às inúmeras propriedades benéficas da cortiça, salientando-se o facto de ser um material natural, ecológico e reciclável e, como tal, um forte candidato a integrar estruturas sustentáveis. Neste sentido, neste capítulo introdutório faz-se um enquadramento geral do tema, onde se procura justificar a motivação e a pertinência do estudo, seguindo-se uma definição dos objetivos do trabalho e, por último, uma descrição da estrutura do documento.

1.1 Enquadramento

Muitas indústrias, como a indústria aeroespacial, não teriam alcançado os seus níveis de elevado desempenho se os materiais compósitos não tivessem sido utilizados. Em comparação com os restantes materiais estruturais mais tradicionais, tais como as ligas metálicas, os materiais compósitos destacam-se: pela sua elevada rigidez e força específicas, baixo peso, elevada resistência à fadiga e capacidade de obter as propriedades desejadas, nomeadamente através da escolha dos materiais constituintes da fibra e da matriz, da geometria e arquitetura da fibra [1].

Em aeronaves civis, a percentagem em peso de materiais compósitos utilizados comparativamente com o peso total da aeronave tem aumentado nos últimos 30 anos. O Boeing 787 foi a primeira aeronave a possuir uma maior percentagem de peso de material compósito, de aproximadamente 50% da totalidade do peso da aeronave [2].

De entre os vários tipos de materiais compósitos, os painéis em sanduíche são amplamente utilizados em várias aplicações como satélites, aeronaves, navios, automóveis, sistemas de energia eólica e pontes [2]. A construção em sanduíche consiste tipicamente em duas faces externas ou *skins*, que se encontram separadas por um núcleo interno mais espesso. A grande vantagem das estruturas em sanduíche é que permitem obter estruturas ideais para diferentes aplicações, escolhendo diversos ma-

teriais e configurações geométricas das faces e do núcleo. Neste tipo de estruturas, a rigidez e a resistência à flexão são substancialmente aumentadas em comparação com um compósito laminado, sem a adição de muito peso [3] [4].

Apesar de os compósitos sanduíche serem sobretudo empregues em componentes secundários de estruturas aeroespaciais, como nos lemes de profundidade e de direção, existem várias investigações que propõem a sua utilização em componentes primários, como são exemplos a fuselagem e as asas [2] [5] [6] [7]. No entanto, para uma aplicação mais generalizada das estruturas em sanduíche, vários objetivos para melhorar o seu desempenho, incluindo tolerância ao dano, segurança da falha e eficiência na manutenção, deverão ser considerados [2].

Existem vários tipos de núcleos utilizados em compósitos sanduíche. A cortiça, sendo um material que possui uma elevada resistência mecânica ao corte, baixo peso específico, resistente ao atrito, com uma boa capacidade de isolamento térmico, acústico e supressão de vibrações, constitui um forte candidato para núcleo [8]. Devido ao facto de Portugal ser o maior produtor de cortiça e processar cerca de três quartos da cortiça mundial [9], existe uma motivação adicional para estudar este tipo de material e as suas possíveis aplicações futuras na indústria aeroespacial.

A cortiça integrou vários projetos espaciais, iniciando-se na missão Apolo 11 [10]. Na indústria aeronáutica, destacam-se os seguintes projetos: o projeto LIFE (*Lighter, Integrated, Friendly and Eco-efficient*) [11], que propõem a integração de cortiça no interior de aeronaves executivas, e o projeto AEROCORK [12], que pretende testar a utilização de painéis sanduíche com núcleo de cortiça em aviões ultraleves.

Conforme acima referido, as estruturas em compósito sanduíche apresentam vantagens relativamente aos restantes tipos de compósitos, no entanto possuem complexos modos de falha nas faces, núcleo e interface, que podem causar diminuições significativas nas propriedades mecânicas do material [2] [13]. Como tal, e face ao aumento da utilização destes materiais na indústria aeroespacial, torna-se essencial monitorizar continuamente estas estruturas, de modo a garantir a sua integridade estrutural [14].

O processo de implementação de uma estratégia de deteção e caracterização de danos para estruturas de engenharia é referido como monitorização estrutural (SHM - *Structural Health Monitoring*). Neste contexto, o dano é definido como uma mudança nas propriedades do material ou na resposta da estrutura. Este processo monitoriza uma estrutura ao longo do tempo, usando medições periódicas de uma série de sensores. O SHM de estruturas aeronáuticas permite realizar inspeções em tempo real, reduzindo os custos e melhorando a fiabilidade e o desempenho das estruturas [14] [15].

Uma ampla gama de potenciais tecnologias de SHM têm sido desenvolvidas e as opções mais promissoras incluem a utilização de extensómetros e sensores de Bragg [15], que correspondem aos dois tipos de sensores que serão utilizados neste projeto.

A configuração em camadas dos compósitos torna difícil prever o seu comportamento estrutural utilizando apenas sensores à superfície, dado que estes não conseguem monitorizar eficazmente os danos internos. Para resolver este problema, os sensores embebidos surgem como a melhor alternativa, atuando em pontos dificilmente acessíveis pelo exterior. Outras vantagens no embebedimento dos

sensores consistem no facto de estes se encontrarem protegidos dentro da estrutura contra os agentes atmosféricos, que poderiam reduzir o seu desempenho, e de poderem ser utilizados em casos em que a necessidade de ter superfícies “limpas” impede o uso de dispositivos externos [14] [16]. Os sensores embebidos podem, no entanto, interferir com o material e alterar a estrutura [17].

Com a finalidade de concluir sobre a influência dos sensores embebidos nas propriedades mecânicas de um compósito sanduíche com núcleo de aglomerado de cortiça e *skins* de fibra de vidro e resina epóxi, com vista à sua aplicação em futuros projetos de engenharia, realizou-se um estudo exploratório em que se analisaram os comportamentos à tração, flexão e fluência deste material, em três situações distintas: sem sensores, com sensores à superfície e com sensores embebidos. A figura 1 apresenta um esquema resumo do trabalho.

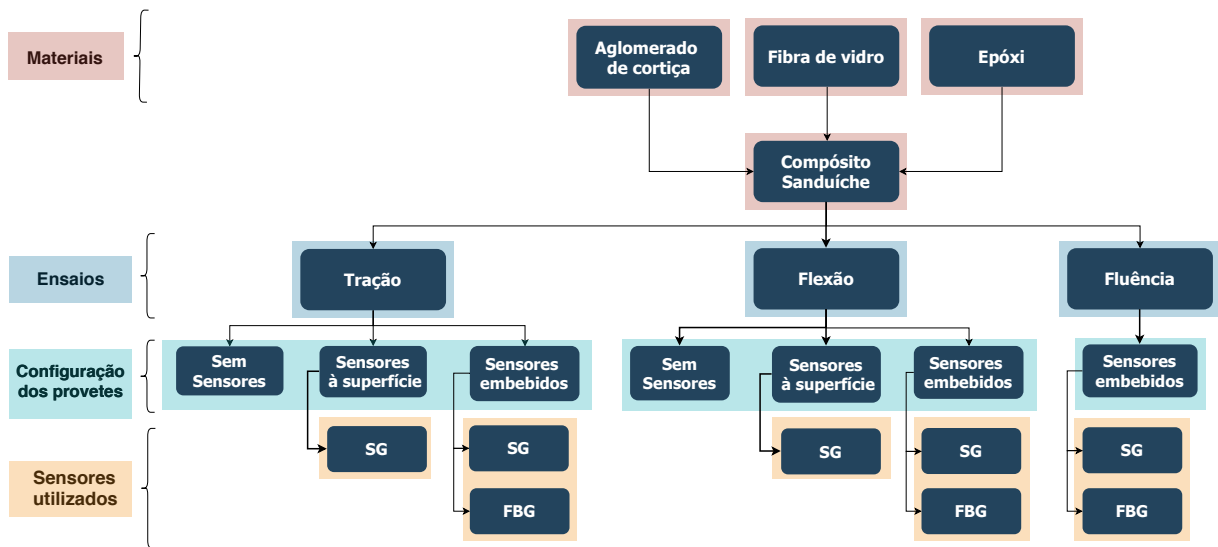


Figura 1: Esquema resumo do presente estudo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral:

- Contribuir para ampliar o conhecimento sobre sensores embebidos em compósitos sanduíche com núcleo de aglomerado de cortiça e *skins* de fibra de vidro e resina epóxi.

1.2.2 Objetivos específicos:

- Verificar a eficácia do método utilizado na produção dos provetes;
- Desenvolver uma metodologia para a incorporação de sensores nos provetes;
- Realizar ensaios de flexão e tração em provetes sem sensores, com sensores à superfície e sensores embebidos e comparar estes protótipos, averiguando a existência de alterações significativas das propriedades à flexão e tração do material;

- Realizar ensaios de fluência, com o intuito de testar os sensores em condições de temperatura extrema e analisar a influência destas condições no comportamento do material;
- Validar/Comparar os resultados obtidos através dos sensores com outros sistemas.

1.3 Estrutura da Dissertação

Do ponto de vista estrutural, este trabalho encontra-se organizado em cinco capítulos. O primeiro consiste nesta introdução que faz referência à pertinência do tema escolhido, aos seus objetivos e a toda a organização do trabalho.

No segundo capítulo, é feita uma revisão de literatura, com o objetivo de conhecer o estado da arte e contextualizar o estudo, estando dividido em dez pontos. No primeiro ponto, é apresentada uma definição geral de material compósito e sua categorização. No segundo ponto, é apresentada uma descrição mais detalhada do material compósito em estudo - o compósito sanduíche. No terceiro, quarto e quinto pontos são descritos os três materiais constituintes do compósito sanduíche que será testado - o aglomerado de cortiça (ponto três), as fibras de vidro (ponto quatro) e a resina epóxi (no ponto cinco). No sexto ponto, são nomeados alguns dos métodos de produção dos compósitos sanduíche e é descrito detalhadamente o método utilizado no estudo - o método de *hand lay-up*. No sétimo ponto, é descrito o sistema de correlação digital de imagem utilizado para a validação/comparação dos resultados - o VIC. No ponto oito, são abordados em pormenor os dois tipos de sensores utilizados: os extensómetros e os sensores de Bragg. O capítulo é concluído com o ponto nove que é dedicado à investigação que tem vindo a ser efetuada sobre este tema.

O terceiro capítulo apresenta a conceção e a realização experimental em nove pontos. No primeiro ponto, são descritos os materiais utilizados na composição do compósito sanduíche e as suas especificações. No segundo ponto são apresentados os cálculos para a determinação da quantidade de resina e endurecedor necessárias no método de produção, que se encontra descrito no ponto três. Seguidamente, no quarto ponto, são apresentados os tipos de sensores que foram selecionados e discutidos os critérios que estiveram na base dessa seleção. No quinto ponto, são apresentadas as diferentes metodologias para a colocação dos sensores à superfície e dos sensores embebidos. No sexto ponto, são descritos os sistemas de aquisição de dados utilizados. No sétimo ponto, é apresentada a máquina de ensaios utilizada e o respetivo *software*. Nos pontos oito, nove e dez são descritos os três tipos de ensaios que se realizaram - tração (ponto oito), flexão (ponto nove) e fluência (ponto dez) -, sendo que para cada um se especificam as normas seguidas, a geometria dos provetes, os protótipos desenvolvidos, a calibração efetuada, a sincronização dos dados e os parâmetros calculados.

Os resultados e a sua análise são apresentados no quarto capítulo, encontrando-se este subdividido pelos três ensaios realizados. No quinto capítulo, são apresentadas as conclusões do estudo, com recomendações para investigações futuras nesta área.

Capítulo 2

Estado da Arte

Neste capítulo, será apresentada inicialmente uma definição geral de material compósito, seguida de uma caracterização mais detalhada do compósito sanduíche. Posteriormente, serão apresentados os três materiais constituintes do compósito sanduíche estudado - aglomerado de cortiça, fibras de vidro e resina epóxi - e o método de produção utilizado no seu fabrico. Logo após a descrição dos materiais, será referido o sistema de correlação digital de imagem utilizado, para comparação de resultados, e serão abordados em pormenor os dois tipos de sensores que se utilizaram - extensómetros e sensores de Bragg. Por último, serão apresentadas algumas investigações já desenvolvidas no âmbito da temática deste estudo.

2.1 Materiais Compósitos

Um material compósito resulta da combinação de dois ou mais materiais macroscópicos, cuja junção permite alcançar melhores propriedades do que as dos seus constituintes isolados. De notar que existem materiais constituídos por dois ou mais componentes, tais como os aços ou misturas de polímeros, que não são classificados como compósitos, uma vez que a sua unidade estrutural é formada ao nível microscópico [18] [19].

A maioria dos materiais compósitos é constituída apenas por duas fases: a matriz, que corresponde à fase contínua, e que envolve a outra fase de dispersão, denominada reforço, normalmente constituído por partículas ou fibras. O polímero reforçado com fibra de vidro é um exemplo de um compósito em que a matriz é um material polimérico (epóxi ou poliéster) e as fibras de vidro são o reforço. As propriedades de um compósito são função das propriedades dos constituintes das fases, nomeadamente das suas quantidades relativas, e da geometria da fase dispersa. Neste contexto, “geometria da fase dispersa” refere-se à forma, ao tamanho, à distribuição e orientação das partículas ou fibras [20].

Callister, Jr. [20] divide os materiais compósitos em três categorias: reforçados com partículas, reforçados com fibras e estruturais. Os compósitos estruturais subdividem-se em laminados e painéis em sanduíche.

2.2 Materiais Compósitos Sanduíche

Os painéis em sanduíche são constituídos tipicamente por duas faces finas, denominadas *skins*, que se encontram separadas por um núcleo mais espesso. As *skins* encontram-se ligadas ao núcleo através de um adesivo [21]. A separação das *skins* pelo núcleo permite aumentar o momento de inércia do painel sem aumentar significativamente o peso, o que resulta numa estrutura com elevada resistência mecânica, rigidez à flexão e razão força/peso. Por possuir todas estas características que aumentam a eficiência das estruturas, salientando-se o facto de ser extremamente leve, o compósito sanduíche é amplamente utilizado tanto no setor aeroespacial como em outras indústrias comerciais [22] [23].

A construção em sanduíche é extremamente eficiente em termos estruturais, especialmente em aplicações de rigidez críticas. A conceção básica de uma estrutura em sanduíche é que o revestimento suporta as tensões de tração e compressão, enquanto o núcleo suporta as tensões de corte. Este tipo de comportamento é análogo ao comportamento de uma viga com perfil em I para solicitações de flexão, como mostra a figura 2. Tal como acontece nas vigas, quanto mais afastados estiverem os banzos, maior a rigidez à flexão, do mesmo modo, quanto maior for a espessura do núcleo, melhores propriedades de rigidez terá a estrutura. Os painéis sanduíche distinguem-se destas vigas com perfil em I, geralmente metálicas, por terem um elevado rácio rigidez/peso, boas propriedades de isolamento e absorção de energia, entre outras [22].

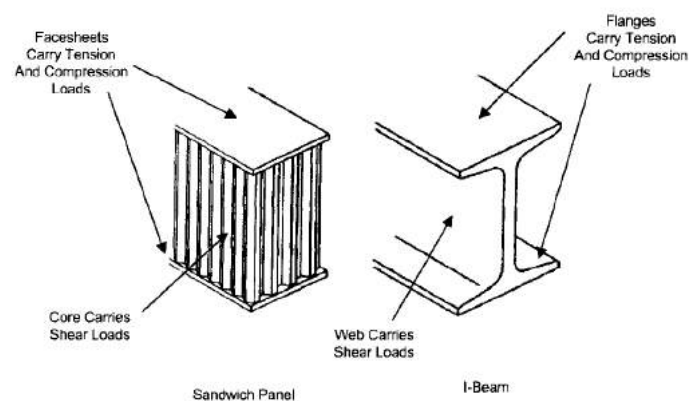


Figura 2: Comparação entre um compósito sanduíche e um perfil em I [22].

2.2.1 Componentes

2.2.1.1 *Skins*

As faces externas ou *skins* suportam as tensões de tração e de compressão que resultam do carregamento e, como tal, são normalmente constituídas por materiais com elevada rigidez e resistência mecânica e, geralmente, mais densos do que o núcleo. De entre os materiais utilizados, destacam-se os materiais metálicos como as ligas de alumínio, aço ou titânio e os compósitos, nomeadamente polímeros reforçados com fibras de vidro ou de carbono [20].

É importante salientar que as *skins* são geralmente o próprio revestimento da estrutura e, como tal, encontram-se sujeitas a fatores ambientais externos, pelo que na escolha das mesmas é importante ter em conta propriedades como a resistência ao impacto, humidade, corrosão, erosão, resistência ao fogo, entre outras [24].

2.2.1.2 Núcleo

O núcleo, para além de fornecer suporte contínuo às faces, suporta as tensões de corte. Como tal, o material que o constitui deve ter resistência ao corte suficiente para suportar tensões de corte transversais e ser espesso o suficiente para fornecer rigidez de corte. De notar que as tensões de tração e compressão no núcleo são muito menores do que nas faces [20]. Outras propriedades de interesse primário de materiais do núcleo consistem em baixa densidade e boas características de isolamento térmico e acústico [8].

Os materiais do núcleo mais utilizados enquadram-se nas seguintes categorias: poliméricos rígidos, espumas (i.e. fenicos, epoxi, poliuretanos), madeira de balsa e favos de mel [20]. Desenvolvimentos recentes resultaram em novas alternativas, como a utilização de núcleos de aglomerado de cortiça [8].

2.2.1.3 Adesivos

Um adesivo consiste num material cuja função é garantir a adesão entre as diferentes camadas de um compósito sanduíche (denominadas “aderentes”), transmitindo forças de corte e de *peeling* entre as faces e o núcleo e permitindo que atuem como um sistema único com elevada rigidez à flexão e torção [25] [26].

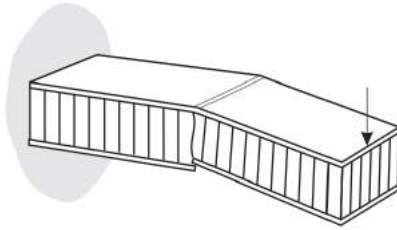
A capacidade que um compósito sanduíche tem de suportar cargas é muitas vezes limitada não pela força que os materiais das faces e do núcleo suportam, mas sim pela força de ligação adesiva entre os dois componentes. Por exemplo, quando o compósito é sujeito a um carregamento de impacto localizado, os seus componentes frequentemente falham como resultado da propagação de falha dentro da ligação adesiva núcleo-face [27].

Os adesivos podem ser constituídos por um único tipo de material, como uma resina, reforçados com outros componentes, como fibras, ou fabricados para se aplicarem como um elemento líquido, normalmente dois reagentes como uma resina e um endurecedor. De entre os vários adesivos utilizados, destacam-se as resinas epóxi, poliéster e fenólicas [24].

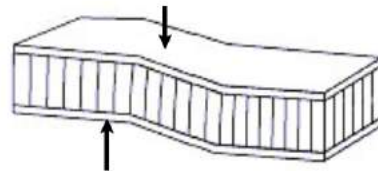
2.2.2 Modos de falha

Seguidamente, resumem-se as falhas mais comuns em painéis sanduíche e as suas principais causas [13] [25]:

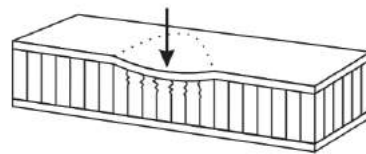
Falhas das faces: espessura e/ou resistência mecânica insuficientes das faces podem causar falhas nas mesmas, quando sujeitas a solicitações de tração ou compressão [25].



Falha por esforço transversal: ocorre quando a resistência ao corte do núcleo ou a espessura do painel são insuficientes [13].



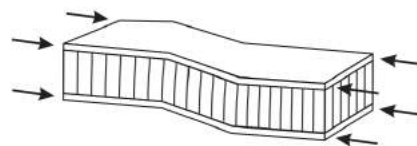
Esmagamento local do núcleo: ocorre quando a resistência à compressão do núcleo é baixa [25].



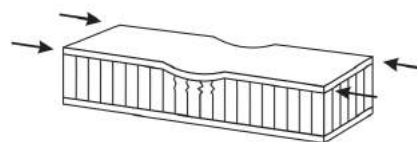
Engelhamento local (Panel Buckling): é causado quando a espessura do painel ou a rigidez ao corte do núcleo são demasiado baixas [25].



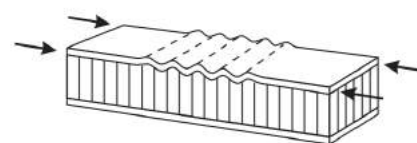
Engelhamento geral: ocorre quando o módulo de corte do núcleo ou a resistência ao corte do adesivo são demasiado baixos e pode ser uma consequência do engelhamento local [25].



Engelhamento das faces: ocorre quando há falha do núcleo por compressão ou falha nos adesivos, dependendo da resistência relativa do núcleo à compressão em comparação com a resistência dos adesivos à tensão no plano [25].



Instabilidade local: ocorre apenas em materiais celulares, quando as faces são muito finas em relação ao tamanho da célula, provocando uma falha se este efeito se propagar para células adjacentes [25].



Numa ligação através de um adesivo, existem dois principais tipos de falha: a falha adesiva e a falha coesiva, representados na figura 3. A falha adesiva é a falha que ocorre na interface entre o adesivo e o aderente, em que a junta apresenta baixa resistência mecânica, e a falha coesiva é a rotura do adesivo ou do substrato, que ocorre quando a ligação é mais forte do que a resistência interna dos dois materiais. Para haver uma boa ligação entre os dois materiais, a falha deve ser coesiva do substrato, ou seja, a força que se estabelece na interface deve ser superior à resistência do substrato. Outro modo de falha esperado é a falha coesiva do adesivo, em que a rotura ocorre no meio do adesivo mas este continua firmemente colado a ambos os substratos. Quando a falha é adesiva, em que o adesivo se liberta dos substratos, a ligação é considerada fraca e, como tal, a evitar [28].

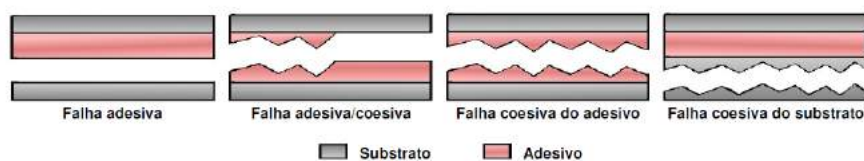


Figura 3: Modos de falha em adesivos [29].

2.3 Cortiça e aglomerados de cortiça

A cortiça é um material natural extraído diretamente da casca do sobreiro (*Quercus suber L.*), geralmente com uma periodicidade de 9 a 12 anos, dependendo da região. A qualidade e espessura da casca variam de acordo com as condições de crescimento específico de cada árvore [9].

A cortiça é um material reciclável, leve, hipoalergénico, elástico, praticamente impermeável a líquidos e gases, resistente ao atrito, isolante térmico, isolante acústico e inócuo. Caracteriza-se também por ser um material que dissipa a energia de deformação, possui uma notável estabilidade química e biológica e uma boa resistência ao fogo. Possui uma massa volúmica média de aproximadamente 200 kg/m^3 [30].

No desenvolvimento deste subcapítulo, apresenta-se uma descrição mais detalhada da estrutura da cortiça, a justificação das suas principais características acima mencionadas, as suas propriedades mecânicas e matérias-primas, onde se incluem os aglomerados. Por último, serão apresentados alguns estudos que revelam as vantagens da utilização deste material como núcleo de compósitos sanduíche e algumas das suas aplicações no setor aeroespacial.

2.3.1 Estrutura e constituição química da cortiça

A cortiça é um tecido constituído por células de formato alveolar, dispostas de modo compacto e sem espaço intercelular [9]. O volume das paredes das células é cerca de 10-15% do volume total, sendo que 85-90% é constituído por um gás, geralmente o ar, ou, mais raramente, um líquido, o que confere a este material a sua leveza característica e as suas propriedades de isolamento e resiliência. Como consequência de os elementos gasosos estarem fechados em pequenos comparti-

mentos impermeáveis e isolados uns dos outros, a cortiça possui uma baixa condutividade de calor, som e vibração, o que explica a sua elevada capacidade de isolamento térmico e acústico. Acresce o facto de estes microscópicos compartimentos gasosos aumentarem a sua capacidade de absorção de choques, tornando-a resistente ao atrito [30].

Devido às suas propriedades térmicas e fraca combustão, a cortiça é um retardador natural do fogo. Durante a combustão, não liberta fumo nem gases tóxicos [31].

A constituição química da cortiça tem sido largamente estudada e descobriu-se ser dependente de fatores como a origem geográfica, o clima, as condições do solo, origem genética, dimensões da árvore, idade e condições de crescimento. As suas propriedades particulares de elevada elasticidade e impermeabilidade devem-se, em parte, à sua composição química específica, especialmente à composição química de suberina. A suberina é o componente que existe em maior abundância, cerca de 40%, a lenhina corresponde a cerca de 20%, os polissacarídeos (celulose e hemicelulose) a 18% e as ceras extractáveis a 15%, entre outros [9]. A lenhina confere rigidez e, juntamente com os polissacarídeos, é um dos componentes estruturais das paredes celulares. Os extractivos dividem-se em ceróides, que repelem a água e conferem impermeabilidade, e em compostos fenólicos, que desempenham funções de proteção contra os ataques de organismos biológicos [30].

A cortiça possui uma estrutura anisotrópica. As três principais direções definidas para a cortiça são a radial (paralela aos raios da árvore), a axial (direção vertical na árvore) e a tangencial (perpendicular às outras duas, tangente à circunferência da secção da árvore). No entanto, a anisotropia deixa de se verificar quando se tem um aglomerado de cortiça, devido à orientação aleatória dos granulados. Neste caso, a cortiça pode ser considerada, numa primeira aproximação, como um material transversalmente isotrópico, o que implica que todas as direções perpendiculares à direção radial (ou seja, as direções axial e tangencial) sejam quase equivalentes [9] [30].

2.3.2 Propriedades mecânicas da cortiça

2.3.2.1 Comportamento em compressão

Os ensaios de compressão uniaxiais da cortiça permitem obter as propriedades elásticas e as não-elásticas, que caracterizam as grandes deformações. Como referido anteriormente, sendo a cortiça um material anisotrópico, estas propriedades deveriam ser avaliadas nas três direções principais, no entanto verificou-se experimentalmente que as propriedades nas direções não-radiais são aproximadamente iguais. Por conseguinte, pode considerar-se apenas a compressão na direção radial e numa qualquer direção não-radial [32].

Os materiais celulares têm, em geral, curvas de compressão semelhantes à representada na figura 4a), com um patamar extenso bem definido entre ε_c e ε_f . No caso da cortiça, as curvas de compressão têm o aspeto que se mostra na figura 4b), em que o patamar é substituído por uma região de declive ($d\sigma/d\varepsilon$) baixo. Independentemente da direção de compressão, as curvas de compressão da cortiça apresentam três regiões, associadas a mecanismos de deformação distintos [32].

Na primeira região, correspondente aos valores de tensão e extensão mais baixos, ocorre a flexão

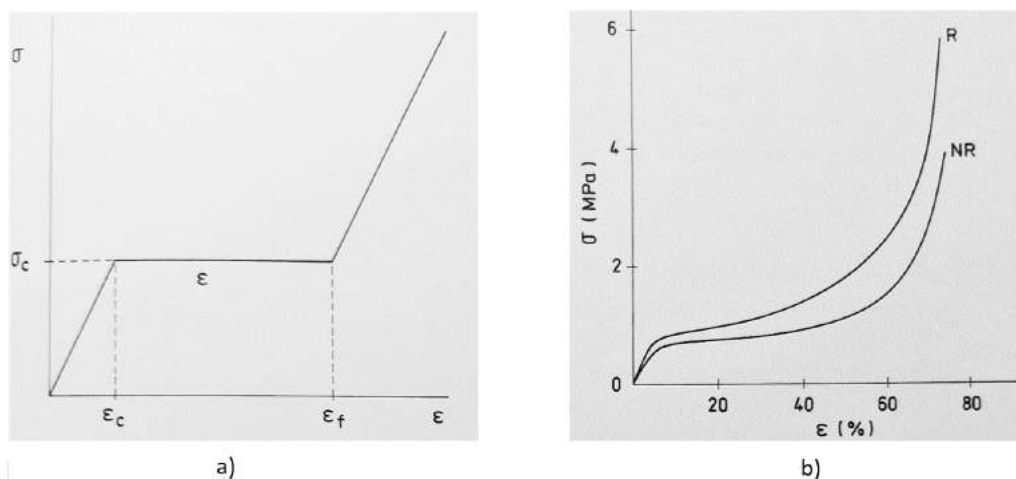


Figura 4: Curvas de compressão da cortiça: a) representação esquemática, evidenciando as três regiões da curva e b) curvas experimentais em compressão radial (R) e em compressão não radial (NR) [32].

elástica das paredes celulares da cortiça; apesar de nesta região a deformação ser considerada elástica, esta é na verdade viscoelástica (a deformação desaparece parcialmente quando se retira a força de compressão) e não linear (a rigidez diminui ligeiramente na região elástica, à medida que ϵ aumenta, pelo que a curva $\sigma(\epsilon)$ tem a concavidade para baixo). O módulo de Young, E , é dado pela inclinação média da curva nesta zona, sendo portanto uma medida aproximada de rigidez (elástica). O valor de E médio para a cortiça é de 12 MPa, no entanto estes valores podem variar entre 7 e 25 MPa, dependendo do tipo de cortiça, da direção de compressão, do grau de humidade, da temperatura e da rapidez de deformação [9] [32].

A segunda região é um patamar quase horizontal, que se inicia na extensão de cedência e se estende até cerca de 70% da extensão, e é causada pelo colapso das células por encurvadura de algumas paredes celulares e arestas mais solicitadas, acompanhada de deformação permanente. Na terceira região, o declive da curva aumenta abruptamente; as paredes celulares começam a ser comprimidas umas contra as outras, ocorrendo o esmagamento (ou densificação) das células [9] [32].

2.3.2.2 Comportamento em tração

Na figura 5, encontram-se representadas as curvas obtidas em ensaios de tração até à fratura com $\dot{\epsilon} = 8,3 \times 10^{-4} s^{-1}$, à temperatura ambiente, para uma cortiça com cerca de 6% de humidade [32].

As curvas $\sigma(\epsilon)$ nas duas direções não radiais (direção tangencial T e direção axial A) são bastante próximas, sendo que a direção tangencial possui maior resistência, como acontece no caso da compressão. Os provetes solicitados nestas duas direções fraturam-se para tensões de tração de aproximadamente 0,8 MPa após uma extensão de cerca de 7%. No caso da direção radial (R), a curva é bastante diferente das outras duas, ocorrendo a fratura para tensões e extensões mais elevadas, respetivamente, cerca de 1,2 MPa e 18% [32].

Quando se realiza o ensaio de tração nos provetes de cortiça, as paredes celulares são esticadas, diminuindo as ondulações, e tendem a rodar de modo a orientarem-se paralelamente ao eixo de

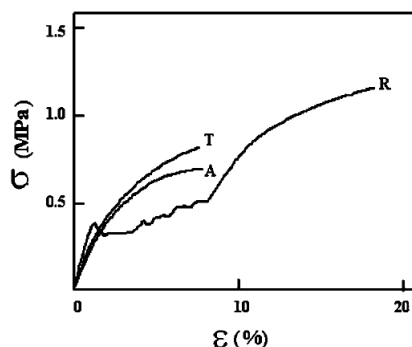


Figura 5: Curva tensão-extensão da cortiça à tração [9].

tração. Esta tendência é contrariada pelas paredes celulares adjacentes, o que dificulta uma descrição pormenorizada do resultado da tração [32].

A parte inicial das curvas, correspondente a pequenas deformações, não é linear, no entanto é possível aplicar a teoria da elasticidade, sendo necessário definir um módulo de Young médio, entre dois valores pequenos de ε , por exemplo, 0,1 e 0,2 %, tal como em compressão. Este módulo, e portanto a inclinação inicial da curva $\sigma(\varepsilon)$, é cerca de 25 MPa para as direções não-radiais (NR) e 38 MPa para a direção radial (R), ou seja, bastante maior do que o módulo em compressão (cerca de 3 vezes maior, para velocidades de deformação comparáveis) [32]. Isto ocorre uma vez que quanto maior for a ondulação das paredes celulares, fenómeno que ocorre na compressão, menor a rigidez, logo, menor é o módulo de Young. O inverso ocorre para uma solicitação de tração, em que a ondulação das paredes diminui e, conseqüentemente, a rigidez aumenta, aumentando o módulo de Young [9].

O serrilhado (ou flutuações de carga) que aparece nas curvas de tração radial foi investigado efetuando observações *in situ*, num microscópio eletrónico de varrimento, e concluiu-se ser possivelmente devido a fraturas localizadas das paredes laterais das células, isto é, que se propagam apenas às células mais próximas e depois cessam. Este comportamento não ocorre em tração não-radial [32]

2.3.2.3 Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson consiste na razão entre a extensão transversal e a extensão longitudinal de um material, quando submetido a cargas no seu regime elástico [33]. A cortiça é caracterizada por possuir um coeficiente de Poisson reduzido, quase nulo [9].

Jardin *et al.* [34] verificaram que o coeficiente de Poisson dos aglomerados de cortiça varia com o nível de deformação imposto e o colapso das células constituintes, não sendo possível obter um valor fixo. Realizaram um ensaio de compressão estático e observaram que no início do ensaio todos os aglomerados testados apresentavam um coeficiente de Poisson de 0.15; quando a deformação começou a aumentar, o coeficiente diminuiu para um valor de cerca de 0.05.

2.3.3 Matérias-Primas da cortiça

Os sobreiros jovens só podem ser descortiçados quando possuem cerca de 0,7 m de perímetro de tronco a 1,3 m do solo [30] [32]. O intervalo mínimo entre dois descortiçamentos é de nove anos,

designada por idade legal da cortiça [32].

O primeiro descortiçamento (ou desbóia) produz a cortiça virgem, que possui muitos sulcos e fendas verticais. Estas irregularidades devem-se a fraturas causadas por fortes tensões tangenciais originadas pelo crescimento radial do tronco da árvore. Por este motivo, a cortiça virgem não é utilizada no fabrico de rolhas e destina-se apenas à trituração e produção de aglomerados [32].

Na extração da cortiça virgem, o felogénio, que consiste na camada geradora da cortiça, é destruído. No entanto, regenera-se um novo felogénio (felogénio traumático) nos tecidos interiores, no entrecasco, que começa a produzir células de cortiça [32].

A segunda camada de cortiça produzida pelas árvores designa-se por cortiça de reprodução segunda, produzida pelo felogénio traumático formado após o primeiro descortiçamento. Neste período em que o sobreiro continua numa fase jovem, as tensões resultantes do crescimento radial da árvore permanecem, o que faz com que a cortiça segunda também apresente inúmeras fraturas verticais que impedem a sua utilização para rolhas [32].

Após a remoção da cortiça segunda, o felogénio é novamente substituído por um novo que se forma no entrecasco, permitindo a continuação da produção de cortiça. Como a árvore já se encontra numa fase adulta, o seu crescimento radial é menor, o que permite que as tensões resultantes desse crescimento não sejam suficientes para provocarem a fratura do tecido. A cortiça obtida neste período, designada por cortiça de reprodução amadia, possui uma camada de espessura uniforme, com poucas fraturas, o que faz com que esta seja a cortiça utilizada como matéria-prima na produção de rolhas [32].

Os desperdícios (pó, aparas, rolhas defeituosas) originados no fabrico das rolhas de cortiça representam cerca de 75 a 80% do peso inicial da cortiça preparada. De modo a que ocorra uma utilização integral de toda a cortiça produzida, estes desperdícios são utilizados, juntamente com as cortiças virgem, segunda e amadia de má qualidade, no fabrico de aglomerados de cortiça. Para tal, são inicialmente triturados em moinhos apropriados, obtendo-se o granulado de cortiça (pedaços de cortiça com granulometria entre 0,25 e 45 mm). De seguida, os granulados obtidos passam por crivos adequados para a sua separação dimensional e densimétrica, são secos e limpos [32].

Os aglomerados de cortiça podem ser divididos em duas categorias: aglomerados compostos ou aglomerados puros [35].

O objetivo do fabrico de aglomerados compostos é conseguir um produto semelhante à cortiça natural, mas com formas geométricas mais complexas. Estes aglomerados são constituídos por grânulos de cortiça ligados entre si por meio de adesivos, tais como resinas sintéticas termoendurecíveis (fenólicas, epoxídicas, poliéster, poliamida) e termoplásticas (poliuretanos) [32].

No fabrico destes aglomerados, o granulado de cortiça é colocado num misturador, onde se adiciona o adesivo. Seguidamente, a mistura é vazada para um molde, de modo uniforme, e estes são fechados e prensados. A prensagem provoca uma redução do volume da mistura e facilita o contacto entre os grânulos de cortiça e a distribuição do adesivo. Os moldes prensados são depois aquecidos numa estufa, para facilitarem a cura do adesivo. Após a cura, efetua-se a desmoldagem e um arrefecimento/estabilização obtendo-se um bloco de aglomerado que é cortado em lâminas e placas de espessura e dimensões convenientes [30] [32] [36].

A cortiça degrada-se quimicamente quando é aquecida a temperaturas superiores a 200-250°C. Nos aglomerados puros, a aglutinação dos grânulos de cortiça é realizada através dos produtos resultantes da degradação térmica da cortiça, sem que seja necessário utilizar outro agente de ligação. Os aglomerados puros mais importantes são os expandidos ou negros (em virtude da sua coloração escura). O granulado utilizado no fabrico dos aglomerados expandidos é obtido usualmente por trituração de cortiça virgem e outros tipos de cortiça de qualidade inferior, sendo o tamanho médio dos grânulos entre 5 e 20 mm. Os aglomerados expandidos são atualmente fabricados através de um processo de autoclavagem [32] [35].

2.3.4 Aglomerado de cortiça como núcleo de compósitos sanduíche

As propriedades de interesse primário para os materiais do núcleo são: baixa densidade, elevado módulo de corte, elevada resistência ao corte, elevada rigidez perpendicular às faces e boas características de isolamento térmico e acústico. Algumas propriedades dos aglomerados de cortiça sugerem que este material natural pode evidenciar algumas propriedades notáveis ao ser utilizado como núcleo de compósitos em sanduíche, nomeadamente uma elevada tolerância ao dano causado por cargas de impacto, boa capacidade de isolamento térmico e acústico, como referido acima, e excelentes características de amortecimento para a supressão de vibrações [8].

Castro *et al.* [8] desenvolveram uma investigação para avaliar o desempenho de aglomerados de cortiça como núcleo de compósitos sanduíche. Numa primeira fase, vários tipos de aglomerados comerciais de cortiça foram testados, mostrando um desempenho mecânico inferior quando comparados com materiais do núcleo convencionais. Para melhorar o comportamento mecânico da cortiça como matéria-prima, três novos tipos de aglomerados de cortiça foram fabricados com granulados de cortiça convencionais, mas utilizando a resina epóxi como elemento de adesão.

No ensaio de flexão em três pontos, concluíram que os aglomerados de cortiça/epóxi, quando comparados com os restantes materiais de núcleo, apresentavam um limite de tensão de corte do núcleo significativamente superior, reduzindo a região de propagação da falha. Esta descoberta pode colocar os aglomerados de cortiça com epóxi no topo dos materiais atualmente utilizados em estruturas sanduíche [8].

Os resultados obtidos pelos testes de impacto mostraram que todos os compósitos sanduíche com aglomerado de cortiça (independentemente do tamanho do grão) apresentavam um valor de carga suportado consideravelmente superior aos valores obtidos para outros tipos de materiais de núcleo de elevado desempenho. A excelente capacidade de recuperação verificada nas curvas do deslocamento é uma característica exclusiva e intrínseca da cortiça, independentemente do tipo de aglomerado utilizado e do método de fabricação. Quando comparada com espumas de elevado desempenho, os componentes sanduíche com aglomerado de cortiça otimizados possuem uma capacidade de absorção de energia superior, com um mínimo de ocorrência de dano, o que resulta em melhores propriedades quando se esperam a ocorrência de cargas de impacto durante o serviço [8].

Os testes de condutividade térmica mostraram que os aglomerados de cortiça com epóxi possuem

boas propriedades de isolamento térmico, similares a outros tipo de materiais de núcleo. Os aglomerados de cortiça com menor densidade apresentam melhores propriedades térmicas, o que é um fator importante a ter em conta quando se pretende projetar estruturas eficientes com requisitos de baixo peso, como sejam os componentes aeroespaciais [8].

2.3.5 Aplicações da cortiça no setor aeroespacial

A Corticeira Amorim tem sido o principal parceiro no fornecimento de soluções de isolamento para a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e para a *European Space Agency* (ESA). A incorporação da cortiça em projetos aeroespaciais iniciou-se com a missão Apolo 11, que levou o primeiro Homem à lua, no final da década de 1960. Posteriormente, a cortiça portuguesa integrou com sucesso os programas Titan, Delta, Mars Rovers e Atlantis da NASA e tem sido encarregue da integração de soluções de cortiça em escudos térmicos e antivibráticos, com importantes contribuições no âmbito do projeto Ariane 5 e do novo foguetão Vega, da ESA [37] [38].

Os materiais de isolamento para a indústria aeroespacial, comercializados sob a marca *Thermal Protection Systems* (TPS), desempenham um importante papel no êxito do lançamento e funcionamento dos veículos espaciais. Quando um foguetão ou uma nave espacial são projetados para o espaço, a sua estrutura é sujeita a elevadas temperaturas, correndo o risco de ser carbonizada. Os materiais TPS são pioneiros na proteção térmica de blindagens e têm resistido a décadas de viagens espaciais [38] [39].

Na indústria aeronáutica, destacam-se os projetos LIFE e AEROCORK. O projeto LIFE, vencedor do prémio “Crystal Cabin Awards” na categoria de “Conceitos Visionários” em 2012, propõe a utilização de materiais naturais e sustentáveis, como o couro e a cortiça, para conforto térmico e acústico na cabine de uma aeronave executiva [11]. O projeto AEROCORK propõem a utilização de materiais compósitos de cortiça na construção de aeronaves ultraleves, com o objetivo de substituir os materiais sintéticos, utilizando um material natural, ecológico e reciclável, que permitirá diminuir o impacto ambiental da indústria aeronáutica [12].

2.4 Polímero reforçado com fibras de vidro

Um dos materiais compósitos mais utilizados é o polímero reforçado com fibras de vidro, que consiste em pequenas fibras de vidro embebidas num material polimérico (normalmente, uma resina epóxi ou poliéster). As fibras de vidro caracterizam-se por serem resistentes e moderadamente rígidas, no entanto são frágeis. O material polimérico, pelo contrário, caracteriza-se por ser dúctil e flexível. Quando combinados, o compósito resultante possui características superiores às dos seus constituintes isolados, nomeadamente uma maior rigidez, resistência, flexibilidade e ductilidade. Para além destas propriedades, possui baixa densidade [20].

O vidro é popular como um material de reforço de fibra pelas seguintes razões: é facilmente convertido em fibras de alta resistência a partir do estado fundido; encontra-se facilmente disponível e pode

ser convertido em fibras através de uma ampla variedade de técnicas de fabricação de compósitos, com baixo custo; quando incorporado numa matriz polimérica, produz um compósito com uma resistência específica muito elevada; quando acoplado a vários polímeros, possui uma inércia química que torna o compósito útil numa variedade de ambientes corrosivos [20].

As fibras de vidro resultam da mistura de diferentes composições baseadas em sílica, com adições de óxidos de cálcio, boro, sódio, ferro e alumínio, dependendo das propriedades que se pretendem obter no final. O processo de produção das fibras inicia-se com a fusão da mistura, colocando-a num forno sujeito a altas temperaturas, em torno de 1400°C. Após a fusão, segue-se a fase da fibragem, que se divide em dois processos: a extrusão, no qual o vidro derretido passa por uma série de casquilhos eletricamente aquecidos, sendo que a sua temperatura é mantida constante de modo a controlar a viscosidade do fluido, e à saída é arrefecido para temperaturas à volta dos 1200°C, por meio de jatos de água; por último, a atenuação, que consiste em estirar mecanicamente o vidro em elementos fibrosos (filamentos) com um diâmetro entre 4 a 34 μm , através de enroladores mecânicos [40][41].

Na fase seguinte, segue-se a aplicação de um revestimento e/ou tratamento químico, como silano composto ou um termoendurecível, cujos objetivos são protegerem as fibras enquanto são manuseadas e forçarem o material fibroso a ter uma melhor afinidade com uma determinada resina, de modo a melhorar as propriedades mecânicas do compósito final [42]. Na última fase, os filamentos são recolhidos e cortados, entrelaçados, enrolados em tubos e postos a secar até à perda de água e outras soluções [40][41].

Os polímeros reforçados com fibras de vidro possuem algumas limitações. Não só não exibem a rigidez necessária para algumas aplicações (por exemplo, como membros estruturais para aviões e pontes), como também a sua utilização é limitada a temperaturas abaixo de 200°C, uma vez que a temperaturas mais altas a maioria destes polímeros começa a deteriorar-se [20].

As fibras de carbono possuem maior resistência e rigidez do que as fibras de vidro, menor densidade e são mais resistentes à fadiga, o que faz com que sejam amplamente utilizadas no setor aeroespacial em aplicações estruturais como a fuselagem [42] [43]. Ainda assim, as fibras de vidro possuem um bom equilíbrio de propriedades mecânicas e um baixo custo de fabricação, sendo utilizadas na indústria aeroespacial em componentes que não precisam de suportar grandes cargas ou que não necessitam de operar sob esforço, como por exemplo nos compartimentos para arrumação da bagagem de mão [44].

2.5 Resina epóxi

A resina epóxi utilizada no compósito sanduíche funciona, simultaneamente, como um adesivo, garantindo a adesão entre as fibras e o núcleo de um compósito, e como matriz no polímero reforçado com fibras de vidro que constitui as faces, envolvendo e aglutinando as fibras de modo a garantir uma adequada transferência de tensões entre as mesmas e protegê-las contra o desgaste e agressões ambientais [40].

As resinas dividem-se em dois tipos: termoendurecíveis, sendo as mais usuais as resinas de epóxi, poliéster, viniléster e poliuretano; e termoplásticas, que possuem polietileno, poliestireno ou metacrilato

na sua composição. As resinas termoplásticas possuem a vantagem sobre as resinas termoendurecíveis de serem mais resistentes a impactos e a microfissuração, por possuírem maior ductilidade e tenacidade. No entanto, a sua utilização e fabrico são limitados, pois a sua alta viscosidade dificulta a incorporação de fibras longas. As resinas termoendurecíveis apresentam um processamento mais fácil, uma vez que se encontram inicialmente no estado líquido e possuem requisitos de pressão e temperatura inferiores às termoplásticas [40].

O efeito da temperatura pode afetar negativamente as propriedades das resinas. A temperatura de transição vítrea, que corresponde ao valor que separa o comportamento dúctil do comportamento frágil da resina, constitui um fator crítico, pois quando o seu valor é ultrapassado o valor do módulo de Young da resina pode diminuir significativamente devido a alterações na sua estrutura interna [40] [45].

A resina epóxi consiste numa ampla classe de polímeros termoendurecíveis caracterizados pela presença de um grupo epóxido - um éter cíclico com três átomos (um átomo de oxigénio ligado a dois átomos de carbono) que formam um anel. As suas moléculas são muito pequenas, na ordem dos 20 a 30 ligações carbono-carbono (C-C), em comparação com as moléculas de resinas termoplásticas, que possuem algumas centenas ou milhares de ligações C-C. Consequentemente, o material possui baixa viscosidade e aparece no estado líquido à temperatura ambiente ou a temperaturas moderadamente altas (cerca de 100°C). Na passagem para o estado sólido, as moléculas devem ser ligadas a outras moléculas de agentes de cura ou endurecedores. Como estas moléculas reagem facilmente com as moléculas de epóxi, as duas não podem ser misturadas até o momento em que o fabricante está pronto para incorporar os sistemas de resina junto com as fibras [41].

Ao contrário dos termoplásticos, o processamento das resinas termoendurecíveis necessita de reações de cura [46]. A cura pode ser definida como uma alteração nas propriedades químicas e físicas de uma determinada formulação resina/endurecedor, por intermédio de reações químicas, expondo o material a temperaturas e pressões elevadas durante um duração predeterminada [47] [48]. As temperaturas elevadas aplicadas durante a cura fornecem o calor necessário para iniciar e manter as reações químicas na resina que causam as mudanças desejadas na estrutura molecular. A pressão aplicada fornece a força necessária para retirar o excesso de resina para fora do material e para consolidar as camadas do compósito [48].

O processo de cura inicia-se com o crescimento e ramificação das cadeias moleculares, causando um aumento do peso molecular e da viscosidade da resina. O processo de transformação de líquido viscoso para gel elástico, denominado por ponto de gel, é irreversível. Durante este período, ocorre geralmente uma diminuição do volume da resina, devido à reorientação das moléculas enquanto estão no estado líquido ou de semi-gel [46].

As resinas possuem excelentes propriedades, tais como excelente adesão, elevada resistência, boa resistência à corrosão, a cura ocorre por mecanismos de reação que não resultam na geração de produtos voláteis (como a água), baixo encolhimento durante a cura (em comparação com a resina de poliéster), boa resistência química e são altamente versáteis, no sentido em que se pode alcançar uma ampla gama de características de processamento, cura e propriedades. Apresentam melhores propriedades mecânicas do que as resinas de poliéster e viniléster, como baixa retração durante o pro-

cesso de cura, elevada resistência à humidade e maior durabilidade. A sua baixa viscosidade permite uma saturação e impregnação adequada das fibras, sem apresentar desalinhamentos entre os seus fios. Apresentam grande estabilidade dimensional, baixa absorção de água e têm um temperatura de transição vítrea na ordem dos 220°C. Além disso, o processamento de resinas epoxi não envolve gases tóxicos como o estireno. A faixa de temperaturas de operação das resinas epóxi pode ir até aos 140°C. Uma das desvantagens das epóxis é que estas são mais caras [41][40] [45] [49].

A epóxi é utilizada numa variedade de *designs* de compósitos não metálicos em aplicações aeroespaciais, incluindo painéis de revestimento, condutas, estabilizadores verticais e horizontais, asas e até na fuselagem [50].

2.6 Métodos de produção de compósitos

As estruturas em compósito sanduíche podem ser produzidas através de vários métodos, tais como moldagem por saco de vácuo, autoclavagem, transferência de resina, moldagem manual ou *hand lay-up*, entre outros. As técnicas de produção podem ser divididas em três tipos, sejam elas por molde aberto, como por exemplo a moldagem manual, por molde fechado, que é o caso da moldagem por transferência de resina (RTM), ou continuamente, tal como a poltrusão [51]. De seguida, será apenas descrito o método utilizado, que corresponde ao método de *hand lay-up*.

2.6.1 Método de *hand lay-up*

O método de *hand lay-up* consiste em aplicar manualmente sucessivas camadas de fibra e resina num molde. Por outras palavras, coloca-se um tecido de fibras sobre o molde, verte-se a resina sobre o mesmo e espalha-se esta sobre todo o pano recorrendo a pequenos rolos ou pincéis. Consoante as necessidades do cliente, podem ser aplicados produtos (desmoldantes) e/ou certos tipos de tecidos ou redes plásticas, para melhorar o acabamento das peças e facilitar a desmoldagem da mesma. De notar ainda que o alinhamento relativo das malhas de fibra (ou seja, dos "panos" de fibra), que confere as propriedades mecânicas desejadas à peça, é feito manualmente e por método visual [51].

Este método é o mais simples para fabricar compósitos e é utilizado em várias indústrias, principalmente em séries de produção pequenas, sendo um método pouco competitivo para produções em larga escala. Apesar de ser o mais simples em termos de técnica e ferramentas, é o que requer mais trabalho manual e especializado. Com este método é possível produzir peças de dimensões reduzidas, como a asa de um aeromodelo, ou de grande dimensões, como o casco de um barco [52].

As principais limitações do *hand lay-up* são:

- A elevada quantidade de bolhas de ar e humidade que ficam dentro do compósito, reduzindo a sua durabilidade;
- A limitação do tempo de laminação ao *gel-time* da resina;

- Ser prejudicial à saúde dos operários, essencialmente devido ao contacto prolongado com as resinas e produtos químicos do processo;
- A variabilidade da quantidade de resina necessária na aplicação de cada peça, condicionando fortemente a consistência das propriedades físicas do produto [52].

2.7 VIC - Visual Image Correlation

O sistema VIC (*Visual Image Correlation*), da *Correlated Solutions*, consiste num sistema que utiliza câmaras digitais para captar imagens sucessivas de um provete submetido a um ensaio mecânico, de modo a analisar as alterações que ocorrem na sua superfície. Como tal, permite medir várias propriedades, tais como os deslocamentos do provete, sem interagir com o material. Este método ótico de análise experimental de deformações consiste num sistema de correlação digital de imagem (DIC). Para além do VIC, existem múltiplos *software* DIC disponíveis com diferentes características [53] [54].

O método DIC baseia-se na análise de imagens consecutivas, obtidas antes e após a deformação de um objeto, através de um algoritmo de correlação. A imagem inicial é dividida em vários blocos ou *subsets* que são procurados na imagem seguinte. Cada bloco corresponde a um conjunto de pixels e o algoritmo permite determinar a sua nova posição, procurando os valores de intensidades desses pixels, e calcular o movimento que o bloco realizou de uma configuração para outra, obtendo assim os deslocamentos e as extensões [55].

Para que não exista mais do que uma correspondência para um bloco, a superfície do objeto a analisar deve ser preparada convenientemente através da aplicação de um padrão aleatório - *speckled* - de alto contraste. O padrão pode ser facilmente criado pintando inicialmente a amostra com um *spray* de cor branca e, em seguida, colocando-se pontos com um *spray* de cor preta, tentando que os grãos do padrão tenham um diâmetro semelhante [56] [53]. Se a superfície do provete contiver um padrão repetitivo, pode haver mais do que uma correspondência para o bloco que se quer encontrar, o que significa que ocorre um fenómeno de descorrelação em que os deslocamentos medidos não são fiáveis.

O sistema VIC utilizado divide-se em duas partes: a primeira parte é constituída por uma ou duas câmaras e pelo *software* *VIC Snap*, responsável por captar as imagens durante o ensaio; a segunda parte é formada pelos *software* *Vic-2D* ou *Vic-3D*, que efetuam o processamento e a análise das imagens. Quando se pretende efetuar uma análise bidimensional dos deslocamentos, utiliza-se apenas uma câmara e o *software* *Vic-2D*. Quando se pretende efetuar uma análise tridimensional, utilizam-se duas câmaras e o *software* *Vic-3D* [57] [58]. No presente trabalho, foi utilizado o *Vic-2D*, pelo que apenas se irá abordar este *software* em específico.

O *software* trabalha com base no mapeamento e seguimento dos pixels das imagens, como tal, é necessário efetuar uma calibração da relação mm/pixel. A calibração é efetuada definindo uma imagem de calibração, onde é indicada uma distância conhecida e que é expectável que se mantenha inalterada durante toda a fase do ensaio. Também deve ser escolhida uma imagem de referência (a partir da qual

se comparam as restantes imagens a correlacionar), sendo esta usada para a definição da área de interesse [56].

Durante o pré-processamento no *Vic-2D*, são necessários definir uma área de interesse, correspondente à área na qual se pretende efetuar a correlação de imagem, e o tamanho dos parâmetros *subset* e *step*, que determinam a “malha” que é gerada, correspondente a subáreas de expectável deformação como num programa de elementos finitos. O *subset*, já acima mencionado, controla a área da imagem que é utilizada para a obtenção de dados e deve ser suficientemente grande para garantir que essa área inclui um padrão (conjunto de pixels) identificativo da mesma. O *step* define o espaçamento dos pontos que são analisados no decorrer da correlação. Por exemplo, se se escolher um tamanho de *step* igual a um, a análise de correlação irá ser realizada em cada pixel no interior da área de interesse. Um tamanho de *step* igual a dois significa que uma correlação vai ser levada a cabo a cada dois pixels, isto é, com um de intervalo não analisado, e assim sucessivamente. De notar que o tempo de análise é inversamente proporcional ao quadrado do *step*, ou seja, um tamanho de *step* de um demora vinte e cinco vezes mais tempo a analisar do que um tamanho de *step* de cinco [57] [59].

Após a análise, o programa fornece, para além de outras variáveis, os deslocamentos em cada uma das direções, através de um gradiente de cores representativo da gama de valores [57].

2.8 Sensores

2.8.1 Extensómetros

Existem diversos métodos para medir extensões num determinado material, nomeadamente através de um sistema de correlação de imagem, mas o mais comum consiste na utilização de um extensómetro (em inglês, *strain gage*). O extensómetro é um sensor elétrico resistivo, cuja principal característica consiste na variação da sua resistência elétrica com a variação da extensão. Por outras palavras, se se tiver de determinar a extensão num componente, um extensómetro é ligado ao componente e a variação da resistência é medida, para diferentes solicitações de carga aplicadas no componente [60].

A medição da deformação usando extensómetros assume que a extensão no objeto sob investigação seja transferida sem perda para o sensor. Isto requer que haja uma ligação bastante próxima entre o extensómetro e o objeto, que é obtida através da utilização de um adesivo [61].

Os extensómetros que serão utilizados no decorrer deste trabalho correspondem aos do tipo *metal foil*. Existem outros tipos tais como os semicondutores, que não serão aqui abordados [61].

O princípio de funcionamento do extensómetro metálico é baseado na relação extensão/resistência de condutores elétricos, que foi descoberta por Wheatstone e Thomson [61]. Qualquer condutor elétrico varia a sua resistência devido à aplicação de uma tensão mecânica (por exemplo, forças de tração ou compressão). Esta variação da resistência é devida à deformação do condutor e à variação da resistividade r do material, como consequência das alterações microestruturais. Este processo é descrito através da seguinte expressão:

$$\frac{dR}{R_0} = \varepsilon(1 + 2\nu) + \frac{dr}{r} \quad (2.1)$$

em que dR corresponde à variação da resistência elétrica, R_0 à resistência inicial, ε à extensão, ν ao coeficiente de Poisson, r à resistividade do material e dr à variação da resistividade [61].

A relação entre a extensão aplicada ε ($\varepsilon = \Delta L/L_0$) e a variação relativa da resistência do extensómetro é proporcional e descrita através da seguinte equação:

$$\frac{\Delta R}{R} = GF \cdot \varepsilon \quad (2.2)$$

em que GF , conhecido como fator de *gage* (*gage factor*), é uma característica do extensómetro e é obtido experimentalmente. O valor exato é especificado em cada sensor. Em geral, o fator de *gage* para extensómetros metálicos é igual a 2 [62].

Os valores de extensão medidos são normalmente muito baixos, raramente envolvem valores superiores a 10^{-3} . Consequentemente, as variações de resistência são também muito pequenas e não podem ser medidas diretamente (por exemplo, com um ohmímetro). Deste modo, o extensómetro deve ser integrado num sistema que permita medir com elevada precisão as variações da sua resistência. Este sistema consiste geralmente num circuito em ponte de Wheatstone [61] (em inglês, *Wheatstone bridge circuit*), que será descrito de seguida.

2.8.1.1 Circuito em ponte de Wheatstone

Em 1843, o cientista inglês Sir Charles Wheatstone apresentou um circuito que possibilitava uma medição precisa das resistências elétricas, denominado circuito de ponte de Wheatstone. O circuito em ponte Wheatstone permite que as variações relativas de resistência dos extensómetros, que geralmente rondam a ordem de 10^{-4} a 10^{-2} , sejam medidas com elevada precisão [61].

De seguida, o circuito em ponte de Wheatstone será apenas considerado no que diz respeito à sua aplicação neste tipo de extensómetros. A figura 6 apresenta duas representações da ponte de Wheatstone: a figura 6a) corresponde à representação típica em losango e a figura 6b) corresponde a uma representação mais intuitiva do mesmo circuito. As duas representações são, de facto, idênticas nas suas funções elétricas [61].

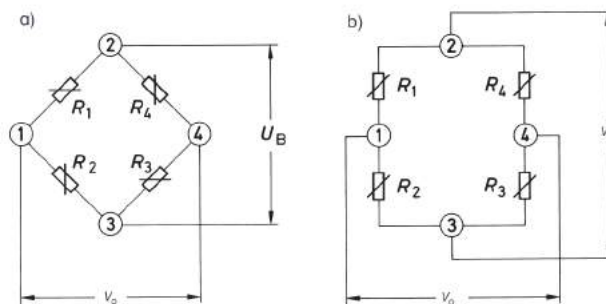


Figura 6: Duas representações de um circuito em ponte de Wheatstone [61].

Os quatro ramos do circuito são constituídos pelos resistores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 e existe uma tensão

de excitação V_s aplicada. A ponte de Wheatstone equivale a dois circuitos divisores de tensão em paralelo: R_1 e R_2 formam um circuito divisor de tensão e R_4 e R_3 formam o segundo circuito divisor de tensão. A saída da ponte de Wheatstone, V_o , é medida entre os nós médios desses dois divisores de tensão [61].

Uma variação na resistência de qualquer um dos ramos da ponte vai resultar numa tensão de saída V_0 diferente de zero. Deste modo, se se substituir R_4 por um extensómetro ativo, qualquer variação na resistência do sensor irá desequilibrar a ponte e produzir uma tensão de saída diferente de zero, que será função do valor da deformação. Nestas condições, diz-se que a ponte não está balanceada e o valor da tensão V_0 é dado pela expressão [61]:

$$V_0 = V_s \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right). \quad (2.3)$$

Se a ponte se encontra balanceada:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (2.4)$$

o que significa que o valor da tensão V_0 é zero [61].

Com uma extensão predefinida, a resistência do extensómetro vai variar ΔR , o que origina:

$$V_0 = V_s \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \right). \quad (2.5)$$

Com algumas simplificações, descritas por Hoffmann (1989) [61], obtém-se a seguinte equação:

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right). \quad (2.6)$$

Substituindo a equação 2.2 em 2.6, tem-se que:

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{GF}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4). \quad (2.7)$$

A equação anterior assume que todas as resistências no circuito variam. Para aplicações práticas de extensómetros, os pares R_1, R_2 e R_3, R_4 ou todos os resistores R_1 a R_4 deverão ter o mesmo valor nominal para assegurar que as variações relativas nos ramos individuais da ponte sejam proporcionais à variação relativa da tensão de saída. Não é significativo R_1 e R_4 (ou R_2 e R_3) terem ou não o mesmo valor nominal de resistência. Por esta razão, assume-se sempre que $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ [62].

Os principais campos de aplicação de extensómetros são a análise experimental de tensões e o projeto e fabricação de transdutores. Dependendo do problema em questão, um ou mais extensómetros poderão ser utilizados no ponto de medição. Os diferentes arranjos existentes designam-se por ponte completa (*full bridge*), meia ponte (*half bridge*) e quarto de ponte (*quarter bridge*) e encontram-se representados na figura 7. Na verdade, o circuito utilizado na medição é sempre completo e poderá ser total ou parcialmente formado pelos extensómetros no provete. É então completado por resistores fixos, que são incorporados nos instrumentos [62].

Na figura 7, o circuito externo (*external circuit*) é constituído pelos extensómetros que estão ligados

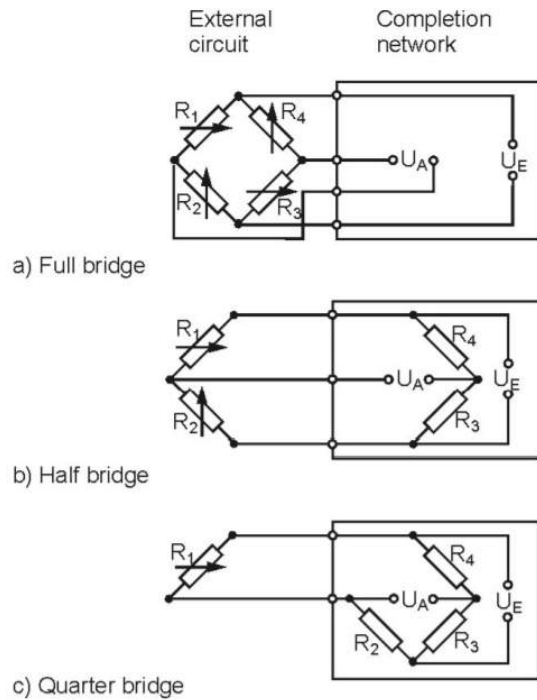


Figura 7: Diferentes tipos de pontes Wheatstone [62].

aos provetes e o *completion network* é constituído pela placa que vai ligar a esses sensores e que tem dentro dela o circuito completo, sendo que os fios vão ser ligados de acordo com o tipo de ponte de Wheatstone que se pretende.

2.8.1.2 Compensação do efeito da temperatura

A variação da temperatura do provete pode afetar os valores da resistência de um extensómetro que se encontre ligado a este. Isto pode ser causado, por exemplo, devido à expansão térmica do provete, que é também transmitida para o sensor [62].

Se esta variação de temperatura ocorrer durante o carregamento mecânico da peça estrutural, obtém-se um sinal de deformação composto. O primeiro componente é o efeito desejado da tensão mecânica ε_M e o segundo componente é o efeito indesejado da expansão térmica ε_W . Reescrevendo a equação 2.2, obtém-se [62]:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = GF(\varepsilon_M + \varepsilon_W). \quad (2.8)$$

Se quatro extensómetros estiverem colocados no provete e ligados através de uma ponte completa (*full bridge*) presente na figura 7, os sinais correspondentes a ε_M e ε_W encontram-se resumidos na tabela 1.

É possível observar que o componente correspondente à expansão térmica ε_W possui o mesmo sinal para os quatro extensómetros, o que significa que estão todos sujeitos à mesma variação de temperatura. Tendo como base a equação 2.7, é possível reescrevê-la do seguinte modo:

Tabela 1: Sinais correspondentes a ε_M e ε_W para todos os extensômetros ligados em ponte completa [62].

Extensômetro	ε_M	ε_W
1	Positivo	Positivo
2	Negativo	Positivo
3	Positivo	Positivo
4	Negativo	Positivo

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{GF}{4} \cdot [(\varepsilon_M + \varepsilon_W)_1 - (-\varepsilon_M + \varepsilon_W)_2 + (\varepsilon_M + \varepsilon_W)_3 - (-\varepsilon_M + \varepsilon_W)_4] = \frac{GF}{4} 4\varepsilon_M. \quad (2.9)$$

Como é possível observar na equação 2.9, os efeitos de interferência ε_W são compensados. O mesmo método de compensação pode ser utilizado em circuitos de meia ponte (*half bridge*), isto é, com apenas dois sensores ligados [62].

No entanto, este método de compensação não pode ser implementado num circuito em quarto de ponte (*quarter bridge*), que é amplamente utilizado na análise experimental de tensões. A única maneira de superar este problema é usando um extensômetro “compensador” (*dummy gauge*) para expandir o quarto de ponte em meia ponte. O extensômetro “compensador” pode ser ligado a um provete extra do material e o arranjo pode ser colocado próximo do provete com o extensômetro “ativo”. Isso levará a uma compensação adequada dos efeitos de interferência (de temperatura) sem a influência de tensões, uma vez que não há acoplamento mecânico [62].

2.8.1.3 Sistema de medição e condicionamento de sinal

De seguida, serão descritos as características de aquisição de dados e condicionamento de sinais necessários para se efetuarem medições válidas com extensômetros [61] [63]:

- Excitação da Ponte - os condicionadores de sinais dos extensômetros geralmente fornecem uma fonte de tensão constante para alimentar a ponte. Não existe um nível de tensão reconhecido como padrão, mas é comum encontrar níveis de tensão de excitação entre 3 a 10 V.
- *Excitation Sensing* - se o circuito do extensômetro estiver muito afastado do condicionador de sinal e da fonte de excitação, uma possível fonte de erro é a queda de tensão causada pela resistência nos fios que conectam a tensão de excitação para a ponte. Como tal, alguns condicionadores de sinal possuem uma funcionalidade designada *remote sensing* para compensar esse erro. Um dos métodos mais comuns de *remote sensing* designa-se por *feedback remote sensing* e consiste em conectar fios extra no ponto em que os fios da tensão de excitação se ligam ao circuito de ponte; os fios extra servem para regular a fonte de excitação para compensar as perdas e fornecer a tensão necessária na ponte.
- Amplificação do sinal - o *output* dos extensômetros e pontes apresenta valores muito baixos. A maioria das pontes de extensômetros possuem um sinal de *output* inferior a 10 mV/V (10 mV de saída por volt de tensão de excitação). Para uma tensão de excitação de 10 V, o sinal de saída é de 100 mV. Deste modo, os condicionadores de sinais dos extensômetros normalmente incluem

amplificadores, que aumentam o nível do sinal para ampliar a resolução da medição e melhorar o rácio sinal/ruído.

- Balanceamento e anulação do *offset* da ponte - quando se instala uma ponte, o mais provável é que esta não apresente exatamente 0 V na sua saída, mesmo na ausência de deformação. As pequenas diferenças de resistência entre os braços da ponte e as resistências dos cabos geram uma tensão de *offset* inicial diferente de zero. Existem diferentes métodos para um sistema poder lidar com a tensão de *offset* inicial:
 - Compensação de *software* - o primeiro método compensa a tensão inicial no *software*. Através deste método, efetua-se uma primeira medição antes da realização do ensaio. A desvantagem é que o *offset* da ponte não é eliminado.
 - Circuito de anulação do *offset* - o segundo método usa uma resistência ajustável para ajustar a saída da ponte em 0 V.
 - Anulamento de *offset* com *buffer* - o terceiro método não afeta diretamente a ponte, como o primeiro método. No anulamento com *buffer*, um circuito de anulamento soma uma tensão de corrente contínua (CC) ajustável à saída do amplificador.
- *Shunt Calibration* - este procedimento envolve a simulação da entrada da extensão, alterando a resistência de um braço na ponte para um valor conhecido. Isto é conseguido conectando um resistor de valor conhecido através de um braço da ponte, criando um ΔR conhecido. A saída da ponte pode então ser medida e comparada com o valor de tensão esperado. Os resultados podem então ser usados para corrigir os erros da medição.

2.8.2 Rede de Bragg em fibra ótica

Em ótica, uma rede de difração consiste numa estrutura regular periódica utilizada com o objetivo de decompor a luz policromática nos seus comprimentos de onda constituintes. É formada por um substrato transparente ou refletor que contém na sua superfície uma série de estruturas paralelas e equidistantes entre si, que causam variações periódicas na fase ou amplitude de uma onda [64].

As rede de Bragg em fibra ótica são redes de difração que resultam de uma modulação local e periódica do índice de refração do núcleo de uma fibra ótica, ao longo da direção longitudinal da fibra. A existência dessa modulação faz com que a fibra ótica funcione como um filtro espectral, refletindo apenas determinados comprimentos de onda específicos e transmitindo os restantes, sem perdas. De uma forma simplificada, observando a figura 8, quando a rede de Bragg é iluminada por uma fonte de espectro largo (I_{in}) (por exemplo, um LED ou uma fonte superflourescente), cada interface entre duas regiões de índice de refração diferentes irá refletir uma porção do espectro inicial, sendo a intensidade total da onda refletida resultante (I_r) determinada pela sobreposição de todas as componentes individuais refletidas, apresentando um máximo de amplitude quando estas se encontram em fase (dispersão em fase em modo contrapropagante). Este valor máximo de amplitude é designado por comprimento de onda de Bragg, λ_B , e é dado por uma condição de ressonância denominada condição de Bragg:

$$\lambda_B = 2n_{ef}\Lambda \quad (2.10)$$

em que n_{ef} corresponde ao índice de refração médio do núcleo da fibra e Λ ao período da rede de difração [65][66].

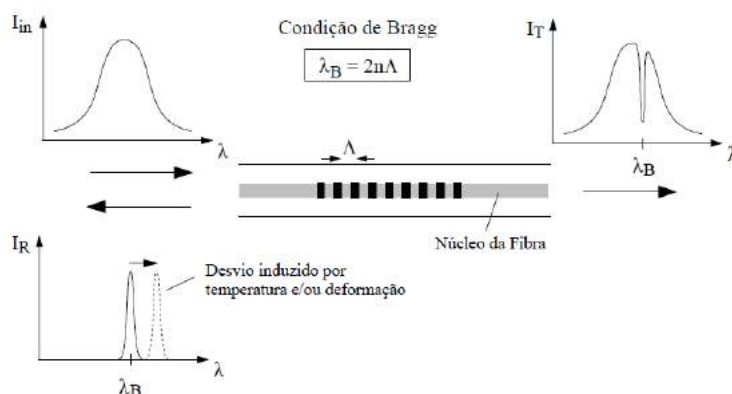


Figura 8: Rede de Bragg em fibra ótica [65].

As redes de Bragg possuem dimensões reduzidas (aproximadamente 10 mm de comprimento) e são inscritas no núcleo das fibras óticas ($di_{nucleo} \approx 10\mu m$ e $di_{fibra} \approx 125\mu m$) por métodos diversos, utilizando radiação ultravioleta (UV) emitida por um laser. Um dos processos mais utilizados na criação destas estruturas consiste no método da máscara de fase [67].

Analisando a condição de Bragg 2.10, conclui-se que o comprimento de onda de Bragg é função de todas as grandezas físicas que alterem o índice de refração médio e o período da rede de difração. Como tal, as redes de Bragg em fibra ótica podem também designar-se por sensores de Bragg (*Fiber Bragg Gratings*), uma vez que podem ser utilizadas na medição de uma grande variedade de grandezas, tais como a temperatura, as deformações axial e transversal e a pressão [67].

2.8.2.1 Sensibilidade à deformação longitudinal e à temperatura

Quando é aplicada uma tensão mecânica axial na estrutura onde se encontra inserido o sensor de Bragg, este sofre um alongamento, alterando o período Λ , o que por sua vez origina um deslocamento do comprimento de onda de Bragg refletido. A variação do comprimento de onda permite conhecer a extensão que a provocou, o que faz com que a fibra ótica funcione como um extensómetro. Desprezando o efeito das variações de temperatura no sensor, a relação entre a variação do comprimento de onda de Bragg e a variação da extensão correspondente é dada pela seguinte equação:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta(n_{ef}\Lambda)}{n_{ef}\Lambda} = \left(1 + \frac{1}{n_{ef}} \frac{\partial n_{ef}}{\partial \varepsilon}\right) \Delta\varepsilon = (1 - p_e)\Delta\varepsilon = \beta_\varepsilon \Delta\varepsilon \quad (2.11)$$

onde $\Delta\lambda_B$ representa a variação de comprimento de onda de Bragg, p_e é a constante fotoelástica da fibra (para uma fibra de sílica, $p_e \approx -0.22$) e β_ε é o coeficiente de sensibilidade do sensor de Bragg à extensão. A dependência da constante fotoelástica no comprimento de onda é praticamente

desprezável, o que permite obter relações lineares entre o comprimento de onda de Bragg e a extensão, mesmo em gamas de deformação da ordem dos 3%, isto é, 30 $m\varepsilon$ [66] [67].

Para além do efeito de tensões mecânicas, o comprimento de onda de Bragg também sofre um deslocamento devido à mudança de temperatura. De maneira análoga à tensão, a dependência de um sensor de Bragg da temperatura pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta(n_{ef}\Lambda)}{n_{ef}\Lambda} = \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n_{ef}} \frac{\partial n_{ef}}{\partial T} \right) \Delta T = (\alpha + \zeta)\Delta T = \beta_T \Delta T \quad (2.12)$$

em que β_T é o coeficiente de sensibilidade térmica do sensor de Bragg, α é o coeficiente de expansão térmica da fibra e ζ é um coeficiente termo-ótico que estabelece a dependência entre o índice de refração efetivo e a temperatura. Relativamente ao coeficiente α , a contribuição essencial vem do coeficiente de expansão térmica da sílica pura: $\alpha = 0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$. O coeficiente ζ depende ligeiramente do comprimento de onda e da temperatura e, para comprimentos de onda na zona do infravermelho e temperaturas até 200°C, possui um valor típico de $\zeta = 6.7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ [67].

2.8.2.2 Compensação do efeito da temperatura

Os sensores de Bragg possuem uma elevada sensibilidade à temperatura, o que pode constituir uma limitação em algumas aplicações de monitorização estrutural. Existem dois tipos de abordagens a este problema: medição exclusiva da deformação utilizando sensores especificamente produzidos para serem imunes a variações de temperatura ou medição simultânea da deformação e da temperatura [67]. Relativamente à segunda abordagem, Rao [68] propõe a utilização de um sensor de Bragg sensível às duas grandezas, juntamente com um segundo sensor imune à deformação, ou seja, que se encontra desacoplado da estrutura e que funciona como o sensor de referência. O sensor de referência encontra-se localizado no mesmo ambiente térmico do que o sensor de extensão. O erro de extensão causado pela variação da temperatura pode ser compensado subtraindo o deslocamento do comprimento de onda induzido pela variação de temperatura do sensor de referência, do deslocamento total do comprimento de onda obtido com o sensor de extensão [68] [67].

2.8.2.3 Sistema de aquisição

A medição precisa da variação do comprimento de onda do sensor de Bragg é crucial para alcançar um bom desempenho do sensor. Os requisitos gerais para um sistema de interrogação ideal são os seguintes: elevada sensibilidade, i.e. a capacidade de medir desvios de comprimento de onda com resolução elevada (tipicamente uma resolução de deslocamento de comprimento de onda a variar do sub-picómetro a alguns picómetros é necessária para a maioria das aplicações); associada a esta resolução, a capacidade de medir largas variações do sensor, suficientes para obtenção de gamas dinâmicas no intervalo de 60 a 100 decibéis (dB); baixo custo; facilidade de multiplexagem; estabilidade relativamente a perturbações externas, nomeadamente variações de temperatura, em situações em que seja difícil proteger de forma adequada todo o sistema [67] [68].

Os espectrómetros convencionais possuem uma resolução típica de 0.1nm, como tal, são normalmente utilizados para a avaliação das propriedades óticas dos sensores de Bragg durante a sua fabricação e não para a deteção das variações do comprimento de onda [68]. Consequentemente, têm sido desenvolvidos vários sistemas de interrogação ao longo dos anos, com técnicas de funcionamento que permitem detetar a variação do comprimento de onda [68].

2.8.3 Comparação entre extensómetros e sensores de Bragg

Os sensores de Bragg apresentam várias vantagens, quando comparados com sensores mais tradicionais como os extensómetros, que os tornam adequados para um grande número de aplicações:

- Devido à sua intrínseca imunidade ao ruído electromagnético, são os mais adequados em ambientes com campos eletromagnéticos extremos. Neste tipo de ambientes, os extensómetros não podem ser utilizados, por serem suscetíveis a interferências eletromagnéticas e elétricas [15] [69].
- A capacidade de multiplexagem permite que vários sensores possam ser integrados em série numa única fibra óptica, uma vez que cada sensor de Bragg possui uma faixa de operação de comprimento estreito, permitindo efetuar medições simultâneas de vários pontos recorrendo a um único equipamento [67].
- Possuem uma cablagem reduzida, uma vez que muitos sensores com diferentes comprimentos de onda de Bragg podem ser integrados numa única fibra, como já referido [69]. Os extensómetros, pelo contrário, possuem uma cablagem complexa, já que são necessários dois cabos por sensor e não possuem a capacidade de multiplexagem [15].
- Podem ser facilmente embebidos em estruturas compósitas, devido às suas dimensões reduzidas, permitindo identificar danos nas estruturas, bem como monitorizar a cura do compósito durante a sua fabricação [15] [69].
- Conseguem medir diferentes variáveis como extensão, temperatura, vibração ou humidade [69].

No entanto, os sensores de Bragg possuem algumas desvantagens, que tornam, por exemplo, a utilização dos extensómetros mais adequada:

- As extensões podem ser de natureza tridimensional, como tal, é necessário realizar uma análise cuidadosa do *output* para extrair as extensões axiais [70].
- A tecnologia de extensometria permite configurar a mudança na resistência de modo a que o coeficiente de expansão térmica possa ser compensado. Este tipo de tecnologia não se encontra disponível em sistemas óticos [69].
- Relativamente às características físicas dos sensores de Bragg, a fragilidade das fibras óticas que constituem estes sensores representa um fator limitativo na sua utilização [52].
- O seu custo tornam-nos menos competitivos face aos extensómetros [52].

2.9 Investigação relacionada

Kim, Breslauer & Springer [17] realizaram uma investigação para avaliar a influência de sensores embebidos, de entre os quais se destacam os extensómetros, na resistência de dois tipos de materiais compósitos laminados: fiberite T300/976 grafite - epoxi e fiberite APC-2 grafite - PEEK. Foram efetuados ensaios de compressão e flexão em três pontos em provetes sem sensores e com sensores embebidos, entre as camadas do laminado, e foram obtidos os valores das forças máximas suportadas. Os resultados mostraram que os extensómetros embebidos não tiveram praticamente nenhum efeito nas resistências à compressão e à flexão nos dois tipos de materiais. Esta análise sugere que este tipo de sensores pode ser utilizado sem reduzir seriamente a resistência do material. Deve-se, no entanto, ter em atenção a extrapolação destes resultados para outros tipos de sensores, configurações do laminado e condições de carregamento.

Hackney & Peters [71] realizaram um estudo com o objetivo de identificar a progressão dos modos de falha num compósito sanduíche, constituído por um núcleo de espuma e faces de fibra de carbono, através da utilização de sensores de Bragg embebidos, durante ensaios de impacto. Concluíram que os sensores de Bragg, embebidos entre o núcleo e as faces, podem ser utilizados para monitorizar o progresso da falha na espuma, durante múltiplos impactos de baixa velocidade.

Ramly, Kuntjoro & Rahman [72] apresentaram o projeto de um estabilizador vertical de uma aeronave constituído por um compósito sanduíche com núcleo *honeycomb*, duas faces de polímero reforçado com fibra de carbono em cada lado do núcleo e sensores de Bragg embebidos, responsáveis pela monitorização da integridade estrutural. Os objetivos consistiam em descrever a produção deste material e o processo de embebedimento e caracterizar os sinais do comprimento de onda do sensor de Bragg antes e após este ser incorporado no painel sanduíche. Os sensores foram colocados entre as duas faces, em cada lado do painel. Obtiveram-se os comprimentos de onda de Bragg antes e após os sensores serem embebidos e os resultados mostraram que os sinais eram quase idênticos, com uma diferença inferior a 1 nm.

Ruzek *et al.* [73] elaboraram dois artigos que descrevem o projeto, a implementação e a validação de um sistema de monitorização da extensão e do dano para painéis sanduíches rígidos constituídos por polímero reforçado com fibras de carbono, constituintes de uma fuselagem, utilizando sensores de Bragg. O primeiro artigo descreve o projeto do sistema, o embebedimento dos sensores no painel durante a sua produção e o teste de impacto. O segundo artigo apresenta os resultados da concretização dos ensaios mecânicos e a validação do sistema de monitorização proposto. Os ensaios mecânicos incluíram três cenários (com 3 painéis diferentes): compressão do painel não danificado, compressão de painel que sofreu impacto e compressão de painel que sofreu impacto e fadiga. Em todos os casos, o painel falhou por *buckling*. Para monitorizar o comportamento dos painéis durante os ensaios e ser capaz de validar a precisão das medições dos sensores de Bragg, foram utilizados extensómetros. Os danos por impacto e fadiga diminuíram a carga e o deslocamento de rutura do painel. As medições dos sensores de Bragg captaram todas as mudanças nos modos de *buckling* do painel e mostraram uma boa correlação com as medições dos extensómetros. Estes resultados permitiram validar o sistema de

monitorização proposto.

Madukauwa-David & Drissi-Habti [74] realizaram simulações numéricas para preverem o comportamento mecânico de uma plataforma aparafusada com vigas constituídas por um polímero reforçado com fibra de vidro do tipo E, sob cargas estáticas de flexão a três pontos. A presença de sensores de fibra ótica embebidos numa viga da plataforma foi investigada numericamente para determinar o efeito da presença de sensores na estrutura mecânica da viga. Os resultados mostraram uma variação mínima na rigidez entre os cenários com e sem sensores incorporados. Resultados da simulação posteriores com diâmetros de fibra ótica ligeiramente maiores também mostraram alterações insignificantes na rigidez da viga e no limite da tensão para o início do dano. Deste modo, a influência da presença de sensores de fibra ótica em feixes dessa magnitude foi demonstrada ser insignificante no âmbito do estudo.

Zeng *et al.* [75] estudaram a aplicabilidade de sensores de Bragg na monitorização de danos internos de perfis em L de compósitos sanduíche, com faces de polímero reforçado com fibras de vidro e núcleo de espuma. Para tal, foram realizados ensaios de flexão e os valores obtidos pelos sensores colocados na interface entre as faces e o núcleo foram comparados com as medições numéricas e com extensómetros colocados à superfície. A carga máxima e a localização de falhas obtidas através de uma simulação numérica por elementos finitos foram verificadas experimentalmente. As extensões medidas pelos sensores de Bragg apresentaram anomalias com o aumento da carga, indicando o início e a propagação do dano. As medições por simulação numérica e extensómetros colocados à superfície provaram ser menos sensíveis a danos internos, justificando a importância da utilização de sensores de Bragg embebidos para monitorização dos danos internos.

Gururajan *et al.* [76] desenvolveram métodos para embeber sensores na estrutura de uma aeronave. No decorrer deste trabalho, demonstraram que os extensómetros podem ser incorporados na secção da cauda de um UAV (*Unmanned aerial vehicle*) pequeno constituído por um polímero reforçado com fibra de vidro, sem ar retido ou delaminação durante a fabricação. Isso demonstra que pequenos sensores estruturais leves podem ser incorporados em pequenos UAVs para ensaios em voo.

Henriques [52] desenvolveu uma dissertação com o objetivo de avaliar a influência de sensores embebidos, de entre os quais se destacam os extensómetros e os sensores de Bragg, nas propriedades de polímeros reforçados com fibras de carbono. Os provetes foram inicialmente produzidos através do método de infusão a vácuo. Posteriormente, foram realizados ensaios de tração sem sensores e com sensores embebidos, utilizando o *clip gauge* como instrumento de validação. Os ensaios de tração mostraram que os valores obtidos pelos extensómetros e pelos sensores de Bragg eram concordantes com os do *clip gauge*, o que permitiu validar as medições efetuadas pelos sensores embebidos. Comparando os resultados obtidos sem sensores, concluiu-se que os extensómetros utilizados não modificaram significativamente as propriedades do compósito.

Tendo como ponto de partida testar a incorporação de sensores em compósitos sanduíche com núcleo de aglomerado de cortiça e face à escassez de informação e ausência de estudos empíricos sobre este tema, foi desenhado este estudo que procura ampliar o conhecimento nesta área.

Capítulo 3

Conceção e Realização Experimental

Neste capítulo, são apresentados inicialmente os materiais utilizados no compósito sanduíche, com as suas especificações, e é descrito o método empregue na produção do compósito final. Seguidamente, são enunciados os tipos de sensores que foram selecionados, os procedimentos para a sua colocação à superfície e para o embebimento e os sistemas de aquisição de dados utilizados. São também apresentados a máquina de ensaios e os instrumentos que se utilizaram para a validação dos resultados. Por último, são descritos os três tipos de ensaios realizados, sendo que em cada um se especificam a descrição do ensaio, a geometria dos provetes, os protótipos desenvolvidos, com e sem sensores, a calibração dos sensores, a sincronização dos dados e os parâmetros calculados.

3.1 Descrição do compósito sanduíche

O material em estudo consistiu num compósito sanduíche com núcleo de aglomerado de cortiça e duas *skins* constituídas por fibras de vidro e resina epóxi. A figura 9 apresenta um esquema ilustrativo do material.

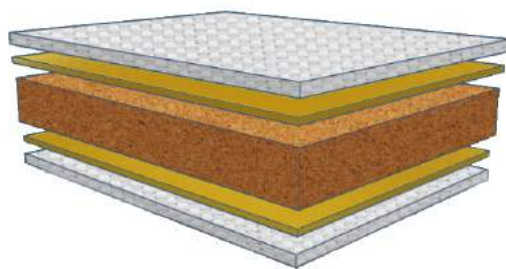


Figura 9: Esquema do compósito sanduíche produzido e testado.

O aglomerado de cortiça utilizado foi o NL20, fornecido pela ACC[®], com espessura de 10 *mm*. Este tipo de aglomerado possui uma densidade de 200 kg/m^3 e pode ser integrado num compósito através de processos de produção por *hand lay-up* ou por métodos de infusão, suportando temperaturas até 150°C [77].

Relativamente ao número de camadas de fibras de vidro, foi utilizada apenas uma camada em cada

lado do núcleo de aglomerado de cortiça. As camadas de fibra de vidro utilizadas, disponíveis em laboratório e fornecidas pela Castro Composites[®], eram constituídas por uma gramagem de 205 g/m² e um peso do tecido de 3.61 g [78]. Estas fibras são do tipo contínuas *crossply* (com orientação de 0 e 90°C)[79].

A resina utilizada foi a epóxi *Resoltech 1050 Infusion Epoxy Resin* com endurecedor *1059S*, fornecidos pela Castro Composites[®]. Na ficha técnica da resina, considerando um ciclo de 16 horas a 60°C, constataram-se que algumas propriedades mecânicas, como a resistência máxima à flexão, são superiores para o endurecedor 1059S [80], em comparação com os restantes. Acresce o facto de este endurecedor possuir um tempo de gel inferior aos restantes (cerca de 10 min) [80], o que permite aumentar a rapidez do processo de produção, sem grandes diferenças de custo.

A figura 10 apresenta os materiais utilizados para o fabrico do compósito acima descritos.

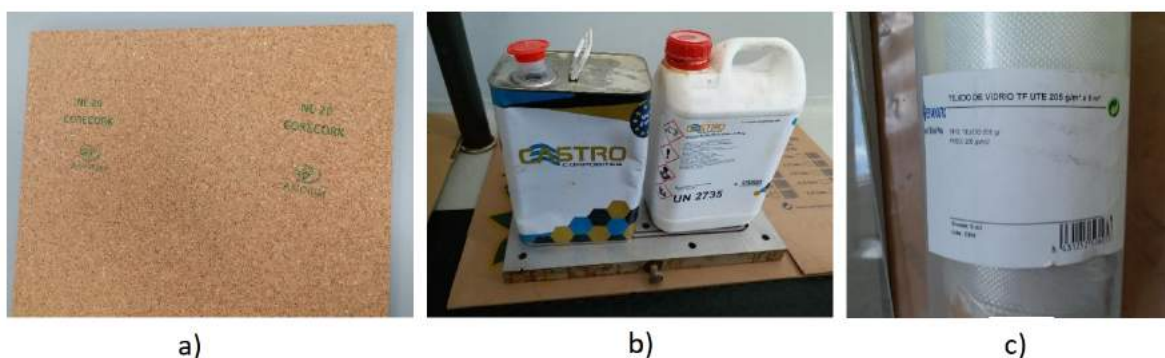


Figura 10: Materiais utilizados: a) placa de cortiça ACC NL20, b) resina epóxi resoltech 1050 e endurecedor 1059S e c) fibra de vidro 205 g/m².

3.2 Determinação da quantidade de resina e endurecedor

Na determinação da quantidade total de resina necessária para a produção do material compósito, seguiu-se o método descrito por Ramos [81], que consiste na soma dos seguintes três parâmetros:

1. Quantidade necessária para a *skin* (laminado):

Começou-se por considerar um volume de fibras de 60% e um volume de matriz de 40% do volume total, que são valores recomendados para o fabrico de um compósito laminado. Devido ao facto de uma relação de volumes não ser prática para calcular a quantidade de resina necessária, cuja unidade é *kg*, converteu-se a relação de volumes numa relação de massas, através da seguinte equação:

$$\frac{V_f}{V_m} = \frac{W_f \times D_m}{W_m \times D_f} \quad (3.1)$$

em que V_f corresponde ao volume das fibras, V_m ao volume de matriz, W_f à massa das fibras, W_m à massa de matriz, D_f à densidade das fibras e D_m à densidade da matriz.

Substituindo os valores $V_f = 0.6V_T$ e $V_m = 0.4V_T$ na expressão 3.1, em que V_T corresponde ao volume do compósito, e as densidades da resina e da fibra a serem utilizadas [80] [78], obtém-se um rácio W_m/W_f de:

$$\frac{W_m}{W_f} \approx 67\%. \quad (3.2)$$

Multiplicando a gramagem da fibra [78] pela área da mesma a ser utilizada, obtém-se a massa do tecido de fibra. Conhecendo este valor, é possível conhecer a massa total de resina necessária para cada *skin* (W_{m1}).

2. Quantidade necessária para a adesão entre as faces e o núcleo:

Para além da quantidade de resina necessária para o laminado, é também necessário considerar a quantidade para a adesão entre as faces e o núcleo. Este parâmetro pode ser calculado através da seguinte expressão, obtida experimentalmente:

$$W_{m2} = 6,90 \times 10^{-5} \times A_{contacto} \quad (3.3)$$

em que W_{m2} corresponde à massa total de resina necessária para a adesão, em g (gramas), e $A_{contacto}$ à área de contacto entre a face e o núcleo, em mm^2 .

3. Quantidade absorvida pelo aglomerado de cortiça:

O aglomerado de cortiça absorve uma quantidade de resina durante a produção, que não é utilizada na adesão entre as faces e o núcleo, e que é designado por *uptake*. Considerou-se este valor como sendo $55,2 g/m^2$. A expressão seguinte permite calcular a quantidade do *uptake* de resina, em g :

$$W_{m3} = 5,52 \times 10^{-5} \times A_{contacto}. \quad (3.4)$$

Para calcular a quantidade de resina total necessária para a produção do compósito, incluindo o endurecedor, é então necessário considerar os três parâmetros anteriores: o da laminagem (W_{m1}), calculada com a percentagem de 67%; o da adesão (W_{m2}), calculada através da equação 3.3, e a do *uptake* da cortiça (W_{m3}), calculada através da expressão 3.4.

Para determinar apenas a quantidade de endurecedor, multiplicou-se a quantidade total calculada acima pela percentagem total de endurecedor pretendida. Apesar de a percentagem de endurecedor ser 35% do total segundo a ficha técnica da resina [80], por experimentação verificou-se que era necessário aumentar este valor para 40%.

3.3 Método de produção dos provetes

Os provetes foram produzidos no Laboratório de Compósitos do Departamento de Engenharia Mecânica, no Instituto Superior Técnico. O método de *hand lay-up* foi o selecionado porque, apesar das suas limitações mencionadas no capítulo 2, continua a ser o método mais simples no que concerne à técnica de produção e às ferramentas utilizadas, no contexto das disponibilidades oferecidas pelo laboratório. De seguida, descreve-se este método de produção, que se encontra esquematizado na figura 11:

1. Medir a quantidade de resina e de endurecedor necessários, utilizando uma balança digital, com o auxílio de um copo de plástico;
2. Misturar os dois componentes, durante aproximadamente 1 min, até atingir a homogeneidade da solução;
3. Verter metade do conteúdo do copo em cima da placa de aglomerado de cortiça e espalhar uniformemente em toda a superfície, com uma espátula de plástico;
4. Colocar o pano de fibra em cima de um dos lados da placa de aglomerado de cortiça, de modo a que as fibras fiquem corretamente alinhadas. Verter o resto do conteúdo presente no copo, espalhando-o uniformemente com a espátula;
5. Após o tempo de gel ter sido respeitado (cerca de 10 min), o processo de cura inicia-se colocando o material na prensa, a uma pressão de 1 *bar*, durante 30 min e à temperatura de 60°C;
6. Repetir o mesmo processo para o lado oposto da placa;
7. Iniciar o processo de pós-cura, colocando o material num forno à temperatura de 60°C, durante 8 horas;
8. Aguardar o processo de arrefecimento, que termina quando a placa atinge a temperatura ambiente;
9. Cortar a placa em provetes com as dimensões pretendidas.



(a)



(b)



(c)



Figura 14: Sequência do método de produção dos provetes.

Foram utilizados os valores de tempo e temperatura que são recomendados por Gomes [82] na sua dissertação de mestrado, na qual pretendeu otimizar o processo produtivo de materiais compósitos sanduíche constituídos por um núcleo de aglomerado de cortiça NL20, com espessura de 10 *mm*. No seu estudo, provou que fazendo a cura na prensa a uma temperatura de 60°C, à pressão de 1 *bar*, durante um tempo mínimo de 20 min, consegue-se otimizar o comportamento mecânico do provete quando sujeito a forças de flexão.

3.4 Sensores selecionados

De seguida, apresentam-se os sensores utilizados neste estudo, as suas características e uma justificação para a sua escolha. Apesar de os extensómetros terem sido selecionados de acordo com as suas características específicas, a escolha dos sensores de Bragg foi limitada pelo seu elevado custo.

3.4.1 Extensómetros

Os extensómetros utilizados na superfície dos provetes e para o embebimento foram os 1-LY16-6/350, da marca HBM®, tendo estes sido escolhidos com base em vários critérios de seleção específicos. O primeiro critério de escolha consistiu no facto de apenas se pretenderem medir as extensões numa única direção e, como tal, selecionaram-se sensores do tipo LY [83], que são os mais apropriados para este tipo de medições. O segundo critério assentou na configuração do próprio sensor, tendo-se optado por um sensor já com fios soldados (representado pelo algarismo "1" a seguir ao LY [83]), com o intuito de não danificar a grelha ao efetuar uma solda próxima da mesma. O terceiro critério baseou-se na escolha de um extensómetro com compensação térmica de temperatura para um material compósito (representado pelo algarismo "6" a seguir a LY1), que corresponde a um sensor que neutraliza a deformação aparente, isto é, a expansão induzida pela temperatura no corpo de medição [84].

O quarto critério é referente ao comprimento da resistência/grelha do extensómetro que se encontra ativo (ou *gage length*), isto é, que é sensível à extensão. O fim da grelha e as abas de soldar são insensíveis à extensão, por terem baixa resistência elétrica. Os tamanhos preferíveis para o *gage length* são de 3 a 6 mm [85].

O *gage length* não deverá ser superior a 6 mm. As medições de deformação são geralmente feitas em pontos críticos do material, isto é, nos pontos que sofrem maior tensão. É muito comum que estes pontos de maior tensão estejam associados a concentrações de tensão, onde o gradiente de extensão é bastante íngreme e a área de máxima extensão é restrita a uma região muito pequena. O extensómetro tende a integrar, em média, a extensão sobre a área coberta pela rede. Como a média de qualquer distribuição de extensão é sempre menor do que o máximo, um extensómetro que é visivelmente maior do que a região de extensão máxima indicará uma magnitude de extensão muito baixa. O gráfico da figura 12 apresenta a distribuição de extensão na vizinhança de uma concentração de tensão e mostra o erro de extensão dado por um extensómetro com um *gage length* elevado, relativamente à zona do pico de extensão [85].

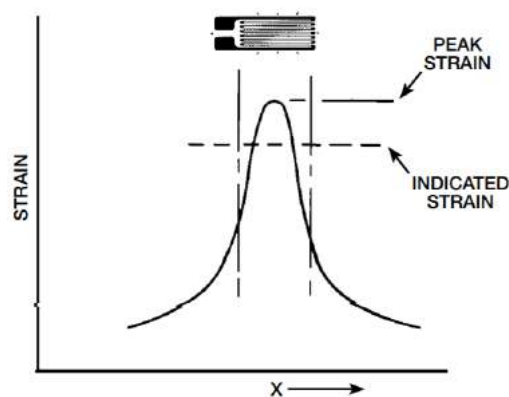


Figura 15: Curva da distribuição de extensão na vizinhança de uma zona de concentração de tensão [85].

Os extensómetros com um *gage length* inferior a 3 mm tendem a apresentar um desempenho inferior

devido a várias razões. São mais difíceis de manusear nos procedimentos de instalação e fixação dos fios e dissipam menos o calor porque introduzem, para a mesma resistência nominal do sensor, maior potência por unidade de área da grelha. Esta consideração é importante quando o sensor é instalado num material com baixa transferência de calor. Uma dissipação de calor inadequada provoca elevadas temperaturas na grelha, no adesivo e na superfície da amostra em estudo, podendo afetar visivelmente o desempenho e a precisão do sensor [85].

Em materiais não homogêneos, como a cortiça, que possui vários grânulos agregados, é desejável usar um sensor com um *gage length* superior a 3 mm, que abranja as várias partes do agregado, a fim de medir uma extensão representativa da estrutura e não as flutuações locais nas interfaces entre as partículas agregadas [86] [85]. Tendo todos estes fatores descritos em consideração, optou-se por um *gage length* de 6 mm.

Relativamente à resistência nominal (variável R da equação 2.2), a série LY1 é constituída por sensores com 120 Ω ou 350 Ω . Sensores com uma resistência nominal de 350 Ω são preferíveis, uma vez que reduzem por um fator de três a quantidade de calor gerada pela tensão de excitação e reduzem as variações de sinal provocadas por alterações na resistência dos fios condutores, devidas a flutuações de temperatura. Quando o circuito de medição inclui interruptores ou outras fontes de variação de resistência, a relação sinal-ruído é otimizada com a utilização de uma resistência elevada [85]. Por estas razões, foi escolhido o extensómetro de 350 Ω .

O limite de temperatura para sensores da série LY é de -200 a 200 °C [83]. Como tal, suportam a temperatura de 60 °C na cura e pós-cura.

Os extensómetros ideais para o embebimento seriam os HBM® LI66, que foram projetados especificamente para serem embebidos no material compósito durante o seu processo de produção. Estes possuem dois pinos de contacto de 15 mm, que eliminam a necessidade de incorporar os fios de ligação dentro do compósito, e possuem uma maior proteção da grelha, facilitando o embebimento [83]. No entanto, estes não puderam ser utilizados nos provetes devido à compressão de 1 bar na prensa durante o processo de produção por *hand lay-up*, que iria danificar os pinos. Assim, foram escolhidos os extensómetros 1-LY16-6/350, tendo-se tido o cuidado prévio de saber que estes suportam a pressão de 1 bar à temperatura de 60 °C, durante o método de produção do provete. Esta informação foi fornecida por engenheiros da HBM® que comercializam estes sensores. As especificações técnicas do sensor 1-LY16-6/350 encontram-se resumidas na tabela 2.

Tabela 2: Especificações técnicas do extensómetro 1-LY16-6/350 [83].

Forma	Linear
Resistência	350 $\Omega \pm 0.35\%$
Fator de Gage	2.03 $\pm 1.0\%$
Sensibilidade Transversal	0.2%
Compensação Térmica	Compósito
Intervalo de temperatura	-200 a 200 °C

3.4.2 Sensores de Bragg

Os sensores de Bragg escolhidos foram os *K-FS62 - Miniature Polyimide Strain Sensor*, da marca HBM® [87]. Apesar de existirem outros sensores de Bragg com características superiores, tais como os *FS62 - Composite Strain Sensor* [88], específicos para integração em materiais compósitos, e os *FS62 - Athermal Strain Sensor* [89], que efetuam a compensação de temperatura, estes não foram escolhidos devido ao seu elevado custo.

Tal como nos extensómetros, teve-se o cuidado prévio de saber junto aos engenheiros da HBM® que estes sensores de Bragg suportam a pressão de 1 *bar* à temperatura de 60 °C, quando estão embebidos no provete, durante o seu método de produção.

Devido ao seu elevado custo, foram apenas adquiridos três sensores K-FS62, para serem utilizados nos três ensaios - tração, flexão e fluência. A tabela 3 resume as especificações técnicas do sensor de Bragg *FS62 - Miniature Polyimide Strain Sensor* [87] e a figura 13 apresenta um dos sensores de Bragg utilizados.

Tabela 3: Especificações técnicas do sensor de Bragg *FS62 - Miniature Polyimide Strain Sensor*[87].

Forma	Linear
Resistência	350 $\Omega \pm 0.35\%$
Sensibilidade	830 $\pm 2\%$
Fator de Gage	0.79 $\pm 2\%$
λ à T (°C) ambiente	1528.997 nm
Temperaturas de operação	-20 a 80 °C
Peso	1 g



Figura 16: Sensor de Bragg K-FS62.

3.5 Procedimento para a integração dos sensores

Neste estudo, testaram-se os dois tipos de sensores já referidos: extensómetros, à superfície e embebidos no compósito final, e sensores de Bragg, apenas embebidos no compósito final. De seguida,

descrevem-se os procedimentos para a integração de cada um destes sensores, especificado-se os métodos de colagem e soldadura.

3.5.1 Extensómetros à superfície

3.5.1.1 Colagem

O procedimento para a colagem dos sensores foi igual para ambos os tipos de sensores, tanto à superfície do compósito final como à superfície do aglomerado de cortiça, no caso dos sensores embebidos, e encontra-se abaixo descrito [87]:

- Marcar a posição e orientação exatas do sensor;
- Limpar a superfície onde vai ser colocado o sensor, utilizando uma compressa com um líquido próprio da HBM® ou acetona, tendo cuidado para não apagar as marcações desenhadas;
- Retirar o sensor da caixa com uma pinça e colocá-lo numa caixa de petri;
- Segurar o sensor por uma das faces usando fita-cola;
- Colocar o adesivo ou super-cola na superfície limpa do provete e na parte do sensor não colada à fita cola;
- Colar o sensor dentro das marcações, usando uma lupa, e com uma compressa pressioná-lo durante algum tempo para garantir a sua fixação;
- Retirar a fita cola com cuidado e devagar para evitar a mobilização do sensor.

Destaca-se a importância de desenhar as marcações e utilizar uma lupa na colocação do sensor, pois um pequeno desvio no seu alinhamento pode introduzir erros nas medições. Na colagem, foi utilizada super-cola em vez do adesivo, por ser a que se encontrava disponível em laboratório. No entanto, sempre que possível, aconselha-se a utilização de um adesivo, pois este permite uma melhor fixação a longo prazo.

3.5.1.2 Soldadura

A soldadura foi efetuada entre cada fio do sensor e cada fio condutor que vai ser conectado ao sistema de aquisição. Para efetuar esta ligação, os fios foram entrelaçados e soldados, colando-se a solda resultante em cima de uma fita adesiva de plástico, para evitar que a mesma fosse removida por acidente.

Existe uma outra técnica de soldadura que consiste em utilizar terminais de solda ou *solder terminals*, para extensómetros com fios, que não foi possível ser aplicada devido à indisponibilidade deste material em laboratório. O uso desta técnica permite a realização de uma solda perfeita, fornecendo um alívio de tensão para as conexões do extensómetro. Os terminais de solda são instalados no provete da mesma maneira que os extensómetros.

3.5.2 Extensómetros embebidos

3.5.2.1 Colagem

No caso dos extensómetros embebidos, estes foram colados à superfície do aglomerado de cortiça, seguindo o mesmo procedimento descrito em 3.5.1.1.

3.5.2.2 Soldadura

Devido à ausência de estudos conclusivos sobre qual a melhor metodologia relativa a procedimentos para colocação de sensores embebidos em provetes produzidos por *hand lay-up*, testaram-se diferentes abordagens em provetes teste e escolheu-se a que pareceu mais adequada. Um dos fatores importantes que se teve em conta consistiu na necessidade de isolamento dos fios, de modo a evitar a seu contacto com a resina durante o processo de produção. Para tal, utilizou-se uma fita autocolante específica para isolamento de fios elétricos, que aparece na figura 14 a verde e amarelo.

A técnica de soldadura utilizada foi idêntica à descrita em 3.5.1.2, exceto a colagem à fita adesiva de plástico. O que variou entre as abordagens foi a posição e o momento em que a soldadura foi aplicada.

Consideraram-se, então, as seguintes abordagens, representadas na figura 14:

1. Extensómetro colado ao núcleo de aglomerado de cortiça, com cada um dos seus fios protegidos por uma camisa de plástico de diâmetro reduzido (camisa branca que aparece na abordagem 1 da figura 14). A fibra de vidro é colocada por cima do núcleo e os dois fios do sensor atravessam a fibra, sendo exteriorizados. A solda é efetuada à superfície do provete, após a produção deste.
2. Extensómetro colado ao núcleo de aglomerado de cortiça. Os fios do sensor (fios A) são soldados aos fios condutores que vão ser conectados ao sistema de aquisição (fios B) e a ligação resultante é envolvida com a fita autocolante de isolamento. A fibra de vidro é colocada por cima do núcleo e os dois fios B atravessam a fibra, sendo exteriorizados. Nesta configuração, a solda é, então, efetuada na interface entre o aglomerado de cortiça e a fibra.
3. Igual à segunda configuração, mas em vez de os dois fios B serem exteriorizados, mantêm-se na interface.

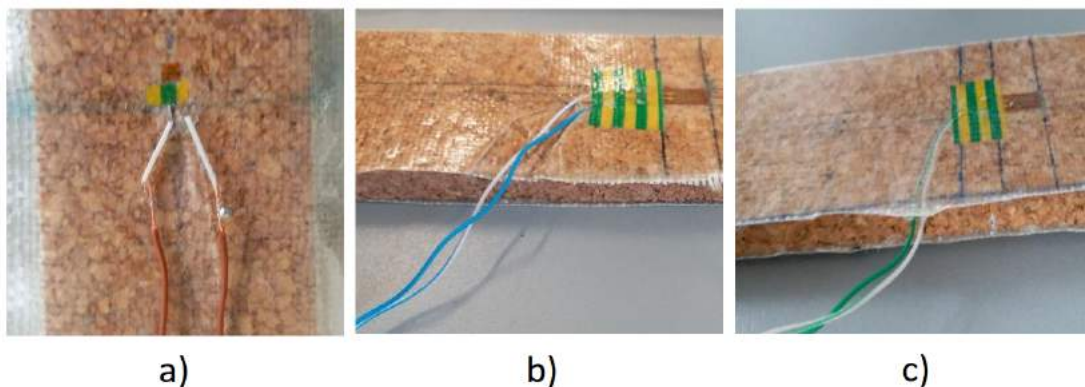


Figura 17: a) Abordagem 1, b) abordagem 2 e c) abordagem 3.

Testaram-se inicialmente as duas primeiras configurações, em provetes que não foram utilizados nos ensaios finais.

A grande vantagem da primeira abordagem, em relação às restantes, reside no facto de existir menos material incorporado na interface que possa interferir com a rigidez e a resistência do provete. No entanto, em laboratório, este procedimento revelou ser bastante difícil, dado que por vezes a luva deixava a descoberto um bocado de fio durante a colocação da fibra e da resina. Acresce-se o facto de, em alguns provetes testados, após serem sujeitados às condições de pressão e temperatura durante a cura, a luva ficava fortemente aderente ao fio, não se conseguindo removê-la de modo a entrelaçar os fios A e B. Devido a estes problemas, rejeitou-se esta configuração.

Relativamente à segunda abordagem, devido aos efeitos da pressão e da temperatura durante a cura do provete na prensa, verificou-se que os fios B marcavam bastante o material, o que poderia afetar as suas propriedades mecânicas. Como tal, para aliviar esta marca, colocou-se uma esponja entre o provete e os fios B. A esponja não impedia totalmente a marca, minimizando-a apenas um pouco. Esta abordagem ainda foi utilizada no ensaio de flexão do lote FC (subsecção 3.9.3), acabando por ser posta de parte, devido à dificuldade de execução em laboratório.

A terceira abordagem, apesar de ter os fios dentro da interface, que era o que se pretendia minimizar ao início, revelou ser a de mais fácil execução em laboratório e a que marcava menos o provete, em comparação com a segunda abordagem. Como tal, foi a escolhida para os restantes ensaios com extensómetros embebidos.

3.5.3 Sensores de Bragg embebidos

3.5.3.1 Colagem

Os sensores de Bragg embebidos foram colados à superfície do aglomerado de cortiça de acordo com o procedimento descrito em 3.5.1.1. A fibra de vidro foi depois colocada em cima do aglomerado, com os dois cabos de conexão do sensor também na interface, como se encontra representado na figura 15. Devido ao facto de os cabos já se encontrarem protegidos, não foi necessário utilizar fita adesiva de isolamento.

Devido ao facto de os sensores de Bragg já terem neles integrados os fios de ligação que contactam diretamente com o sistema de aquisição, não foi necessário efetuar a soldadura.

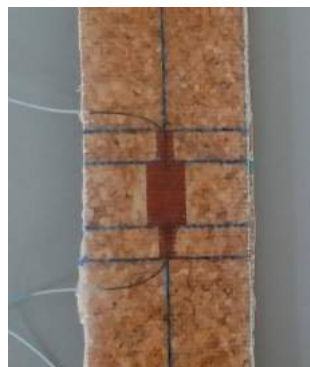


Figura 18: Sensor de Bragg embebido.

3.6 Sistemas de aquisição de dados

Os sensores transformam uma grandeza física num sinal eletrônico que, na maioria dos casos, é necessário condicionar, isto é, adequar a saída do sensor à entrada do sistema que o vai receber - o sistema de aquisição de dados. O condicionamento depende do tipo de sensor em causa, da saída que fornece (tensão contínua ou alternada, corrente, impedância) e do tipo de medida que efetua. Existem vários tipos de condicionamento de sinal, como a amplificação, a translação, desmodulação e codificação. Após o condicionamento de sinal, ocorre a conversão do sinal analógico gerado pelo sensor (contínuo no tempo) num sinal digital (quantizado no tempo) e, finalmente, o sinal digital é armazenado e visualizado. O dispositivo que efetua esta conversão é denominado de *Analog to Digital Converter* (ADC) e devolve um valor digital com uma determinada resolução em bits. Quanto maior o número de bits, maior a resolução obtida [90].

São descritos, de seguida, os sistemas de aquisição utilizados para a leitura dos dados dos extensómetros e dos sensores de Bragg, representados na figura 16.

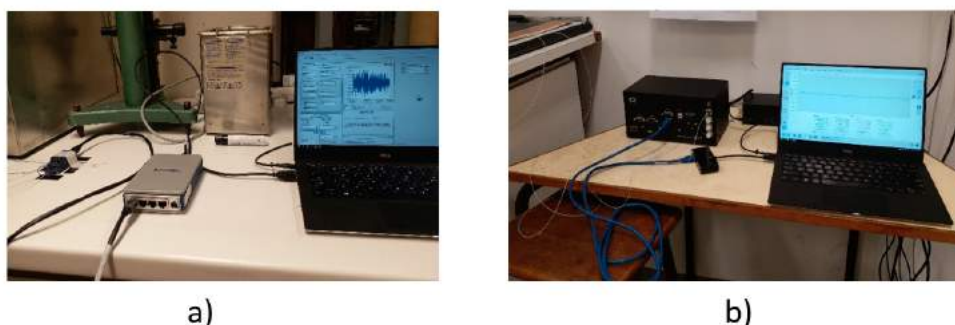


Figura 19: Sistemas de aquisição: a) dos extensómetros e dos b) sensores de Bragg.

3.6.1 Extensómetros

Para a aquisição dos dados de extensometria, utilizou-se o equipamento NI cDAQ-9178 com o módulo de interface com pontes de Wheatstone NI-9237, ambos produzidos pela National Instruments®. O módulo NI-9237 possui quatro portas de entrada, cada uma com um ADC independente com uma resolução de 24 bits e um amplificador de sinal, permitindo obter sinais de cada canal simultaneamente. Este módulo fornece também a tensão de excitação ao circuito, possui uma frequência de amostragem de 25 kHz e consegue desempenhar funções *offset null*, bem como *shunt calibration* e *remote sensing* [91]. Para tipologias de pontes de Wheatstone que incluam dois ou mais sensores, o módulo complementa internamente o circuito sem a necessidade de inclusão de elementos de circuito externos ao módulo.

O módulo NI-9237 possui quatro portas de entrada para os cabos RJ50, que depois se ligam aos adaptadores NI-9949 [91]. Nestes adaptadores, são ligados os fios dos sensores com uma configuração de ponte de Wheatstone. Para realizar uma configuração em quarto de ponte sem *dummy gauge*, são ainda necessários os adaptadores NI-9944 ou NI-9945 [91], que não se encontravam disponíveis em laboratório. Face a esta limitação, apenas foi possível efetuar meias pontes, pontes completas e quarto

pontes com *dummy gauge*. As figuras 39 e 40 do apêndice B apresentam esquemas das ligações efetuadas na placa de aquisição NI-9237.

Após efetuar estas ligações, o equipamento NI cDAQ-9178 comunica com um computador com o *software* LabVIEW[®], através de uma porta USB. O LabVIEW[®] é uma plataforma de programação gráfica desenvolvida pela National Instruments[®], que disponibiliza todas as funcionalidades da placa de aquisição num ambiente gráfico. O *software* permite transferir os dados para o computador, para visualização e análise [91].

3.6.2 Sensores de Bragg

O sistema de aquisição de dados utilizado para os sensores de Bragg consistiu no interrogador sm125-200, da marca uMicron[®]. Este sistema permite analisar o espectro e detetar a posição e o deslocamento do comprimento de onda de Bragg, tendo um conversor ADC incluído. A tabela 4 apresenta as principais características deste equipamento [92].

Tabela 4: Principais características do interrogador sm-125 [92].

Número de canais	4
Frequência de amostragem	1 Hz
Resolução	1 pm
Gama de medida	1510-1590 nm
Protocolo de comunicação	<i>Ethernet</i>

Como se pode observar no quadro, o interrogador ótico possui uma elevada precisão absoluta, com uma resolução de 1 *pm*, no entanto apenas pode ser utilizado para aplicações quase estáticas, devido à sua frequência de amostragem ser muito reduzida (1 *Hz*). Esta frequência é um fator limitativo, que inviabiliza a sua utilização em aplicações dinâmicas.

O *software* ENLIGHT[®] é responsável pela interface com o utilizador e comunica com o computador através de uma porta *ethernet*. Este *software* permite visualizar o espectro recebido em cada canal, monitorizar o estado dos sensores em tempo real e, no final da medição, exportar os dados [92] [93].

3.7 Plataforma de teste

3.7.1 Máquina de ensaios e software

A máquina de ensaios utilizada foi a Instron[®] 5566 com células de carga de 500 *N*, para os ensaios de flexão, e 10 *kN*, para os ensaios de tração. Esta máquina encontrava-se ligada ao *software*, Bluehill[®], como se pode observar na figura 17. Depois de ligar a máquina, coloca-se o provete a ser testado e abre-se o *software*. Cria-se um método (*test method*), escolhendo os parâmetros como a velocidade de deslocamento do travessão e os critérios de finalização do ensaio. Os valores de *input*

variam de acordo com o tipo de ensaio executado. Todos os dados recolhidos pelo *software* e as curvas de teste são fornecidas pelo programa, podendo ser utilizadas para análises posteriores.

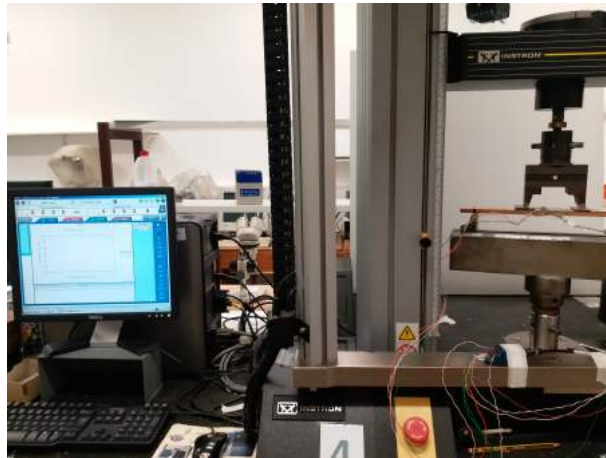


Figura 20: Máquina de ensaios Instron® 5566 com amarras para o ensaio de flexão e *software* Bluehill®.

3.7.2 Instrumentos para validação/comparação de resultados

Os instrumentos utilizados para validação/comparação dos resultados obtidos através da máquina de ensaios e dos sensores foram o sistema de correlação digital de imagem da Correlated Solutions®, constituído pelo VIC-Snap e pelo VIC-2D, e o *clip gage*.

3.7.2.1 Sistema VIC-2D

Contrariamente à máquina de ensaios, que mede os dados de deslocamento relativos ao travessão, o VIC-2D permite obter as extensões reais do provete.

O procedimento para a implementação deste sistema dividiu-se em quatro tarefas principais: a preparação do provete, colocação adequada da câmara, aquisição das imagens e análise das mesmas. A preparação do provete consistiu na aplicação de um padrão aleatório na superfície a analisar, pintando inicialmente a amostra com um *spray* de cor branca e, de seguida, colocando pontos com um *spray* de cor preta.

Relativamente à colocação adequada da câmara, tentou-se sempre garantir um nível correto de alinhamento com o provete, de modo a captar a totalidade da área de interesse a analisar, e focar de modo a obter uma imagem nítida. Como a iluminação no laboratório onde se efetuaram os ensaios não era suficiente para obter uma imagem nítida, utilizou-se o sistema de iluminação do VIC.

Após a aquisição das imagens durante o ensaio, através do VIC-Snap, procedeu-se à sua análise no VIC-2D. Neste *software*, selecionou-se inicialmente uma imagem de calibração, captada com o provete ainda em repouso, onde foi indicada uma distância bem conhecida. Escolheu-se também a imagem de referência, a partir da qual se compararam as restantes imagens a correlacionar e onde foi definida a área de interesse, igual à de calibração.

Na área de interesse, escolheu-se sempre o valor de 15 para o *subset* e de 4 para o *step*. Estes valores foram definidos com base no trabalho realizado por Garcia [59].

3.7.2.2 Clip Gage

Foi utilizado um *clip gauge* 2630-106 com *gauge length* de 25 *mm* e gama de medida de +12.5 *mm* a -2.5 *mm*. Esta ferramenta é um instrumento fiável e preciso, certificado pelo Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ), verificado regularmente e constitui um acessório da máquina de ensaios mecânicos Instron® utilizada.

Os dois sistemas de validação/comparação encontram-se representados na figura 18.

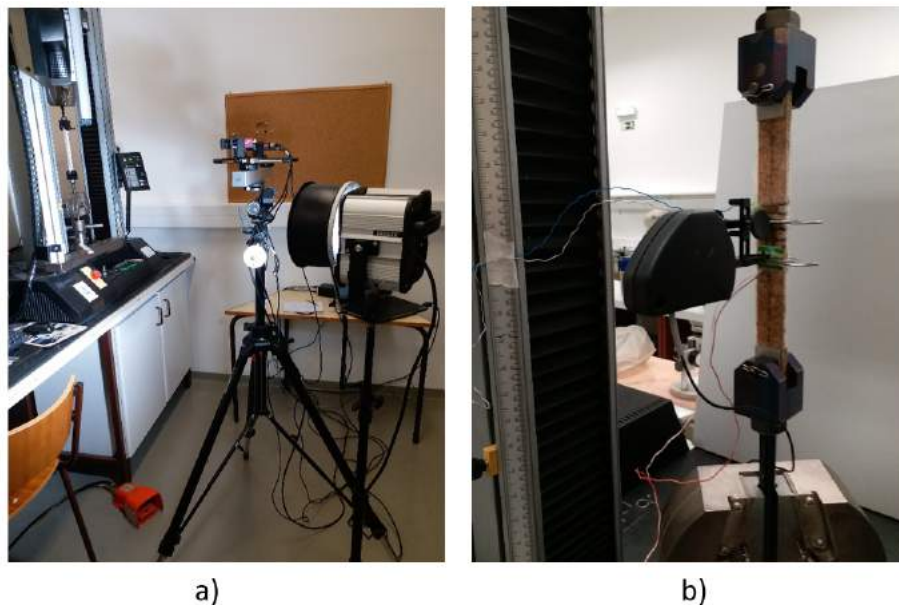


Figura 21: Sistemas de validação dos ensaios: a) VIC-2D e b) *clip gauge*.

3.8 Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi realizado com os objetivos de calcular o coeficiente de Poisson, um parâmetro necessário para a leitura dos dados dos extensómetros, e avaliar a influência da incorporação de sensores nas propriedades à tração do material. São apresentados, de seguida, uma descrição do ensaio, a geometria do provete, os protótipos desenvolvidos, a calibração efetuada, a sincronização dos dados e os parâmetros calculados.

3.8.1 Descrição do ensaio

No ensaio de tração, utilizou-se a norma *D3039/D3039M Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials* [94] apenas como referência para o cálculo do módulo de Young. Não sendo uma norma específica para o material compósito em estudo, foi necessário efetuar algumas alterações no procedimento para a colocação das amarras.

Segundo a norma, as amarras seguram diretamente o provete, mas neste estudo verificou-se que a pressão exercida pelas mesmas causava um esmagamento da cortiça nesse local, criando uma concentração de tensões que causava a rotura junto à amarra. Como tal, utilizou-se o método descrito por Ramos [81], que consistiu em colar dois pares de peças metálicas em cada extremidade do provete e fazer um furo no centro de cada par, de modo a atravessar o provete de um lado ao outro. Em cada furo, atravessou-se um pino metálico, que se encaixou numas peças metálicas azuis (figura 19), peças estas que por sua vez se prendiam nas amarras.

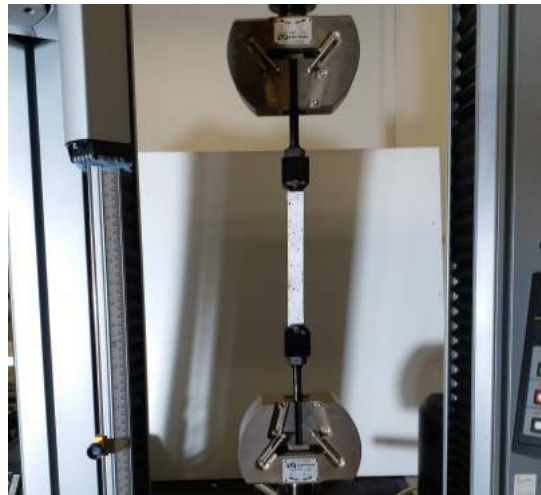


Figura 22: Procedimento escolhido para o ensaio de tração.

Inicialmente, colaram-se as peças metálicas com a resina epóxi utilizada no fabrico do compósito, como presente no estudo de Ramos [81]. No entanto, verificou-se que estas descolavam durante o ensaio, não se conseguindo chegar à rotura do material. Isto ficou a dever-se ao facto de o furo ter criado uma zona de concentração de tensões que fragilizou aquela região e como o provete suportou cargas bastante elevadas, a epóxi não resistiu e as peças saíram. No trabalho desenvolvido por Ramos [81], foi possível aplicar este método, uma vez que os provetes testados eram apenas constituídos por aglomerado de cortiça, que suporta cargas bastante menores do que o compósito agora estudado, e tem uma superfície que adere melhor à cola do que a superfície de fibra e resina.

Numa segunda tentativa, experimentou-se embeber a totalidade da peça metálica utilizando a mesma resina epóxi, em vez de colar apenas as peças, de modo a aumentar a rigidez nessa região. No entanto, esta tentativa também não solucionou o problema.

Numa terceira tentativa, experimentou-se uma resina diferente, a Akepox 2030, com o respetivo endurecedor, utilizada na colagem de materiais pétreos. Apesar de se ter esperado os sete dias de cura indicados, com pressão adicional para garantir uma melhor fixação, esta cola também não foi suficiente para garantir a adesão das peças ao material durante o ensaio.

Uma quarta tentativa pensada foi utilizar outra cola, a 3M Scotch-Weld™ Adesivo Epóxi DP490, recomendada por alunos da Formula Student, no entanto não foi possível entrar em contacto com os fornecedores deste material em tempo útil. Devido ao tempo limitado da dissertação, não se testaram mais alternativas.

Os problemas acima mencionados não permitiram validar o ensaio de tração, isto é, obter o valor de carga máximo médio suportado pelo material em estudo. Ainda assim, foi possível obter gráficos com uma região de regime elástico representativa do material, pelo que se continuou com esta metodologia nos ensaios com os sensores.

Relativamente à velocidade do deslocamento do travessão da máquina de ensaios, não existe nenhum valor recomendado pela norma. Como tal, utilizou-se o valor de 3 mm/min, utilizado por Ramos [81] nos ensaios de tração dos aglomerados de cortiça.

3.8.2 Geometria do provete

A geometria do provete foi escolhida com base nos valores presentes na dissertação de mestrado de Ramos [81]. Mantendo o mesmo valor de espessura dos provetes usados no ensaio de flexão estudado, as dimensões escolhidas encontram-se representadas na tabela 5 e na figura 20.

Tabela 5: Variáveis e dimensões do provete de tração.

Variáveis	Dimensões escolhidas
b - largura do provete	$b = 20\text{mm}$
l - comprimento do provete	$l = 200\text{mm}$
t - espessura total do provete	$t = 10\text{mm}$



Figura 23: Esquema de um provete de tração.

3.8.3 Prototipagem

Os ensaios de tração dividiram-se em duas fases: ensaios em provetes não instrumentados (sem sensores) e instrumentados (com sensores). Na tabela 6, descrevem-se todos os provetes de tração que foram produzidos e ensaiados, incluindo o método de colagem das peças metálicas utilizado.

Para facilitar a distinção entre provetes, utilizou-se a seguinte nomenclatura: 'T' (*Tensile*) por serem provetes de tração; as letras a seguir ('A', 'B', ...), distinguem placas de lotes diferentes; se tiverem números a seguir ('1', '2', ...) são provetes não instrumentados; se tiverem uma barra '/' a seguir, são provetes instrumentados. Nos provetes instrumentados, os '/SG' (*Strain Gage*) possuem extensómetros

e os '/FBG' (*Fiber Bragg Grating*) possuem sensores de Bragg; os '/S' (*Surface*) possuem esse sensor à superfície e os '/E' (*Embedded*) possuem esse sensor embebido.

No método de colagem, os provetes com M1 têm as peças metálicas apenas coladas com resina epóxi, com M2 têm as peças metálicas coladas e embebidas em epóxi e com M3 têm as peças metálicas apenas coladas com Akepox 2030. Em cada provete instrumentado, é referido o número de sensores que possui e a respetiva configuração da ponte. A figura 21 mostra os provetes dos lotes TD e TE.

É de salientar que quando se faz aqui referência a provetes de lotes diferentes, se está a considerar provetes do mesmo material e produzidos da mesma forma, com o mesmo operador, mas em tempos diferentes. No método de *hand lay-up*, existem diferentes parâmetros que podem variar de forma imprevisível ao produzir placas em tempos diferentes: a pressão e a temperatura da prensa durante a cura, a distribuição da resina e a temperatura do forno durante a pós-cura. As próprias placas de aglomerado fornecidas possuem variabilidade entre si. O objetivo de testar placas de lotes diferentes foi o de verificar a variabilidade do material compósito final e a consistência do método de produção.

Tabela 6: Prototipagem dos provetes de tração.

Lote	Identificador	Colagem	N° Sensores	Posição Sensor	Configuração ponte
LOTE TA	TA1	M1	0	Não instrumentado	-
	TA2	M1	0	Não instrumentado	-
LOTE TB	TB1	M2	0	Não instrumentado	-
	TB2	M2	0	Não instrumentado	-
LOTE TC	TC1	M1	0	Não instrumentado	-
	TC2	M1	0	Não instrumentado	-
	TC3	M1	0	Não instrumentado	-
	TC4	M1	0	Não instrumentado	-
	TC5	M1	0	Não instrumentado	-
	TC6	M1	0	Não instrumentado	-
	TC7	M1	0	Não instrumentado	-
LOTE TD	TD1	M3	0	Não instrumentado	-
	TD2	M3	0	Não instrumentado	-
	TD3	M3	0	Não instrumentado	-
	TD/SG1/S	M3	1	Superfície	Quarto ponte
	TD/SG1/E	M3	1	Embebido	Quarto ponte
	TD/FBG1/E	M3	1	Embebido	Quarto ponte
LOTE TE	TE1	M3	0	Não instrumentado	-
	TE2	M3	0	Não instrumentado	-
	TE3	M3	0	Não instrumentado	-
	TE/SG1/S	M3	1	Superfície	Quarto ponte
	TE/SG1/E	M3	1	Embebido	Quarto ponte

Todos os sensores, à superfície e embebidos, foram posicionados longitudinalmente na zona central de uma das faces do provete.

Os lotes TA, TB e TC foram o lotes iniciais produzidos apenas para obter a carga máxima suportada pelo material à tração, utilizando os diferentes métodos de colagem referidos. Apesar de nenhum dos métodos ter resultado, continuaram-se os ensaios com os sensores.

Uma das maiores dificuldades encontradas devido ao problema da colagem das peças metálicas foi o facto de, em alguns provetes, estas terem saído no momento em que o furo era realizado, antes de o provete ser ensaiado, inutilizando o mesmo, reduzindo o tamanho da amostra. A tabela 6 mostra apenas os que puderam ser utilizados após a realização do furo.

Relativamente ao sensor de Bragg, testou-se apenas um (TD/FBG1/E) devido ao número limitado destes sensores, não se tendo realizado a compensação de temperatura. Como tal, foi necessário verificar a existência de variações significativas de temperatura que pudessem afetar os resultados.

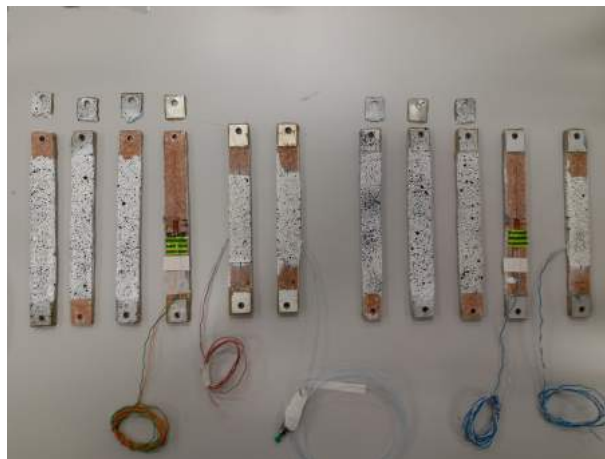


Figura 24: Provetes dos Lotes TD e TE.

3.8.4 Calibração dos sensores

Como referido no ponto 2.8.1.2. do capítulo 2, quando inicialmente se leem os valores do sensor com o provete em repouso, o mais provável é que estes sejam diferentes de zero. Para tal, é necessário efetuar uma calibração de modo a considerar este *offset* nos valores experimentais dados pelo sensor.

Para efetuar esta calibração, antes de colocar o provete na máquina de ensaios, colocou-se o mesmo em repouso em cima da mesa, onde se registaram os valores iniciais do *offset*. Optou-se por esta posição, por ser uma posição estável. Este valor do *offset* foi obtido sempre antes do primeiro ensaio de repetibilidade, para cada provete, tendo depois sido deduzido nos valores de extensão obtidos em todos os ensaios. Uma procedimento alternativo seria efetuar diretamente a calibração através do comando *offset null* do LabVIEW®.

3.8.5 Sincronização dos dados

Para calcular os parâmetros que serão descritos no subcapítulo 3.8.6, foi necessário obter dados da máquina de ensaios Instron®, dos sensores utilizados e dos sistemas de validação - VIC-2D e

clip gage. Cada um destes instrumentos possui frequências de amostragem diferentes. Além disso, as medições temporais foram independentes umas das outras. Por este motivo, foi necessário efetuar a sincronização no início de cada ensaio com os dados obtidos. Para efetuar a sincronização, desenvolveu-se um código em MATLAB®, baseado no algoritmo apresentado por Pinheiro [95].

3.8.6 Parâmetros calculados

São apresentados, de seguida, os parâmetros obtidos nos ensaios de tração: coeficiente de Poisson e módulo de Young. Por último, é realizada uma análise da influência local e global do sensor no provete.

3.8.6.1 Determinação do coeficiente de Poisson

Para obter os valores dos extensómetros, em configurações de meia ponte e ponte completa, é necessário ter o valor do coeficiente de Poisson do material. Como não existe nenhum valor teórico calculado para o material compósito em estudo, procedeu-se à sua determinação, seguindo a norma *E 132 - 04 Standard Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature* [96]. A norma propõe a utilização de extensómetros para este cálculo, no entanto seguiu-se a mesma abordagem utilizando o *software* VIC-2D em vez dos extensómetros.

Em vez de se utilizarem dois extensómetros, um colocado longitudinalmente e outro transversalmente, traçaram-se duas retas perpendiculares no centro do provete, na análise do VIC-2D, cada uma com um comprimento de 20 *mm*, utilizando o comando *Inspect Extensometer*, como se observa na figura 22. Este comando permite obter extensões de engenharia, que são iguais às extensões dadas pelo extensómetro.

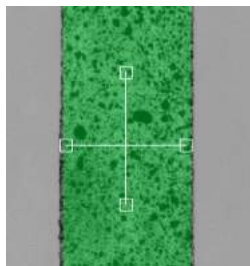


Figura 25: Obtenção das extensões no VIC.

Seguindo a norma, obtiveram-se dois gráficos: a extensão longitudinal em função da carga aplicada e a extensão transversal em função da carga. Através de uma regressão linear, calcularam-se os declives das duas retas e, aplicando a equação 3.5, obteve-se o coeficiente de Poisson de cada provete.

$$\mu = \frac{d\varepsilon_T/dP}{d\varepsilon_L/dP} \quad (3.5)$$

O coeficiente de Poisson final foi o resultado da média dos coeficientes obtidos para todos os provetes não instrumentados.

3.8.6.2 Determinação do módulo de Young

Na determinação do módulo de Young, seguiu-se a norma *E 111-97 Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus* [97].

Para a maioria dos sistemas de carga e dos provetes, efeitos como o *backlash*, a curvatura do provete e o alinhamento inicial da amarra introduzem erros significativos no *output* do extensômetro, quando são aplicados os valores iniciais de carga. Para evitar estes efeitos, fez-se uma correção a todos os gráficos de tensão-extensão, conhecido como *Toe Compensation*, descrito na norma *D882-02 Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting* [98].

Devido aos efeitos anteriores, a norma define que o módulo de Young deverá ser calculado entre um valor de pré-carga, suficientemente elevado para minimizá-los, até um valor de carga elevado, correspondente ao limite de proporcionalidade ou ao limite elástico do material. Para o intervalo de valores utilizado para o módulo de Young, escolheu-se o intervalo de 150N a 500N, que garante que se está no regime elástico na maioria dos provetes.

Nos sensores à superfície, para validar o valor do módulo de Young obtido, comparou-se este valor com o módulo de Young calculado através das extensões dadas pelo *clip gage*. Nos sensores embebidos, compararam-se os valores do módulo de Young calculado através das extensões dadas pelo sensor com os valores do módulo de Young obtidos através das extensões dadas pelo VIC-2D.

Para todos os valores, calculou-se o coeficiente de Pearson (R^2), que é uma medida de ajustamento da regressão linear aos valores observados. Quanto mais próximo de 1, mais explicativo é o modelo, isto é, melhor ele se ajusta à amostra.

Para cada provete instrumentado, foram efetuados três ensaios de repetibilidade. A repetibilidade é um fator indispensável à garantia de resultados fiáveis e consiste na capacidade de um sensor indicar o mesmo valor, ao longo de várias medições. Para que a repetibilidade seja estabelecida, as condições de medição devem ser iguais, com os mesmos observadores, o mesmo procedimento de medição, sistema de medição, condições de operação e local, assim como medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares durante um curto período de tempo [99].

O tempo de espera entre os ensaios de repetibilidade de cada provete foi de aproximadamente meia hora. Este valor de tempo foi definido para cumprir dois objetivos: permitir a recuperação do material e realizar os ensaios durante um dia, de modo a não alterar as ligações da ponte de *Wheatstone* que poderiam comprometer a semelhança entre os resultados.

3.8.6.3 Análise da influência local e global do sensor no provete

Nesta análise, utilizaram-se os provetes dos lotes TD e TE, pintados com o padrão necessário para a análise do VIC-2D. Obtiveram-se os módulos de Young médios correspondentes a três áreas diferentes selecionadas nos provetes, utilizando o comando *Inspect Rectangle* do VIC-2D. Este comando permite obter extensões de Lagrange que, para valores de extensão muito pequenos, são aproximadamente iguais às extensões de engenharia [100]. A primeira área corresponde à que abrange uma maior região pintada do provete, a segunda área corresponde à região do sensor e a terceira área corresponde a

uma região acima do sensor, como se pode observar na figura 23.

Um dos objetivos desta análise foi verificar se o sistema VIC era sensível à presença do extensômetro, isto é, se detetava influência da incorporação do sensor na rigidez, por comparação com os provetes não instrumentados. O outro objetivo foi verificar se a presença do extensômetro embebido influenciava a área lida fora dessa região.

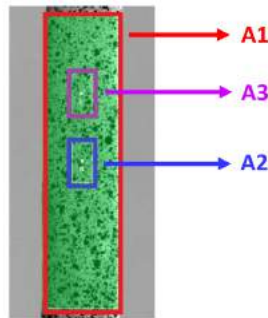


Figura 26: Provete TD1 com as três áreas assinaladas (A1, A2 e A3).

3.9 Ensaio de Flexão

Dadas as potenciais aplicações do material em estudo integrar aeronaves ultraleves [12], entre outras, foram realizados ensaios de flexão, uma vez que a principal solicitação nestas estruturas é normal à superfície, exercendo um esforço em flexão. São apresentados, de seguida, uma descrição do ensaio, a geometria do provete, os protótipos desenvolvidos, a calibração dos sensores, a sincronização dos dados e os parâmetros calculados.

3.9.1 Descrição do ensaio

Na realização dos ensaio de flexão, seguiram-se duas versões da norma ASTM C393: *C393/00 Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions* e *C393/C393M Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure* [101] [102]. Ambas definem os procedimentos para a determinação das propriedades de compósitos sanduíche sujeitos a flexão, de tal modo que os momentos aplicados produzam curvatura das faces do compósito. A segunda versão acrescenta que as formas do material do núcleo permitidas incluem superfícies de colagem contínuas (como madeira de balsa e espumas), bem como superfícies de colagem descontínuas (como favo de mel) [102]. Apesar de o aglomerado de cortiça não ser referenciado, considerou-se que estas seriam as normas mais adequadas na ausência de normas específicas para este tipo de material.

As normas apresentam duas metodologias de teste: o ensaio em três pontos (*Three Point Bending*) e o ensaio em quatro pontos (*Four Point Bending*). O ensaio em quatro pontos poderá ser *Third Point Loading* ou *Quarter Point Loading* [101] [102]. Relativamente à escolha de qual das metodologias deverá ser seguida, as normas ASTM não propõem recomendações específicas, no entanto, existem diferenças significativas entre cada uma. A figura 24 esquematiza estas metodologias.

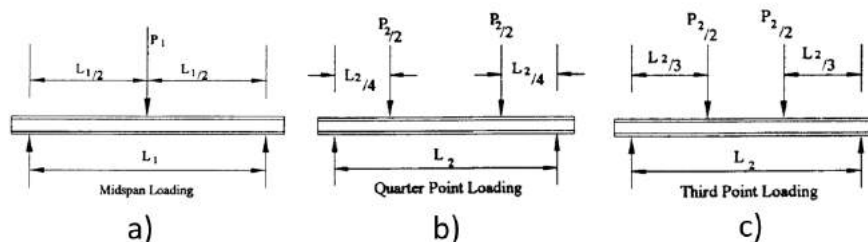


Figura 27: a) Ensaio em três pontos, b) ensaio em quatro pontos *Quarter Point Loading* e c) ensaio em quatro pontos *Third Point Loading* [101].

A escolha recaiu sobre o ensaio em quatro pontos, dado que no ensaio em três pontos o rolete de cima iria coincidir com a posição central do sensor, nos provetes instrumentados, danificando-o. Dentro das duas metodologias do ensaio em quatro pontos, optou-se pelo *Third Point Loading*, dado que para o mesmo momento fletor, esta metodologia necessita de menos carga aplicada, que é o desejável, dado que uma maior força resultaria em cargas pontuais superiores nos pontos de aplicação da carga, o que poderia levar a um esmagamento local na zona dos roletes que causasse a falha precoce do provete, tal como referenciados nos trabalhos realizados por Sequeira [103] e Correia [24].

No ensaio de flexão realizado, a carga é aplicada em dois pontos equidistantes dos apoios, separados entre si por uma distância igual a um terço da distancia entre apoios como referido acima. O deslocamento do travessão é responsável pela aplicação da carga. Foi definida para todos os ensaios de flexão uma velocidade de deslocamento do travessão de 6 *mm*/minuto, que corresponde ao valor sugerido pela norma C393/C393M [102].

Para atenuar as concentrações de tensões sobre os roletes, utilizaram-se em todos estes ensaios borrachas protetoras por debaixo dos dois roletes de cima.

3.9.2 Geometria do provete

A norma C393/C393M impõe as restrições na geometria dos provetes, para uma configuração em quatro pontos (também designada por configuração *Non-Standard*) [102]. Seguindo estas restrições, foram definidas as dimensões para todos os provetes de flexão, apresentadas na tabela 7 e na figura 25.

Tabela 7: Restrições na geometria do provetes para um ensaio de flexão em quatro pontos.

Variáveis	Restrições	Dimensões escolhidas
b - largura do provete	$2t \leq b \leq 6t$	$b = 50\text{mm}$
c - espessura do núcleo do provete	$3c \leq b$	$c = 10\text{mm}$
t - espessura total do provete	$b \leq \frac{1}{2}S$	$t = 11\text{mm}$
S - distância entre os apoios inferiores	$l = S + 50$	$S = 270\text{mm}$
l - comprimento do provete		$l = 320\text{mm}$

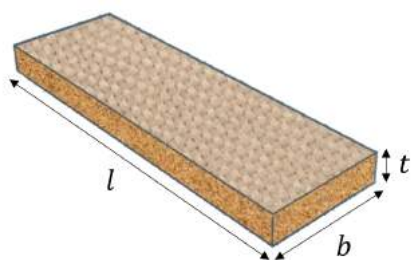


Figura 28: Dimensões dos provetes de flexão.

3.9.3 Prototipagem

Os ensaios de flexão dividiram-se em duas fases: ensaios em provetes não instrumentados (sem sensores) e instrumentados (com sensores). Na tabela 8, descrevem-se todos os provetes de flexão que foram produzidos e ensaiados, sendo que em cada provete instrumentado é referido o número de sensores que possui e a respetiva configuração da ponte (quarto ponte, meia ponte ou ponte completa).

Para facilitar a distinção entre cada um dos provetes, utilizou-se a mesma nomenclatura do que os ensaios de tração, com a substituição do 'T' inicial por 'F' (*Flexural*).

Tabela 8: Prototipagem dos provetes de flexão.

Nome lote	Identificador	Nº Sensores	Posição Sensor	Configuração ponte
LOTE FA	FA1	0	Não instrumentado	-
	FA2	0	Não instrumentado	-
	FA3	0	Não instrumentado	-
LOTE FB	FB1	0	Não instrumentado	-
	FB2	0	Não instrumentado	-
	FB3	0	Não instrumentado	-
	FB/SG1/S	2	Superfície	Meia ponte
	FB/SG2/S	2	Superfície	Meia ponte
LOTE FC	FC1	0	Não instrumentado	-
	FC2	0	Não instrumentado	-
	FC/SG1/S	1	Superfície	Quarto ponte
	FC/SG2/S	2	Superfície	Meia ponte
	FC/SG3/S	4	Superfície	Ponte completa
	FC/SG1/E	1	Embebido	Quarto ponte
	FC/SG2/E	2	Embebido	Meia ponte
	FC/SG3/E	4	Embebido	Ponte completa
LOTE FD	FD/FBG1/E	1	Embebido	Quarto ponte
	FD/SG1/E	1	Embebido	Quarto ponte

Todos os sensores em configuração de quarto de ponte e ponte completa, à superfície e embebidos, foram posicionados longitudinalmente na zona central do provete. No caso dos dois sensores utilizados em configuração de meia ponte, um deles foi posicionado longitudinalmente na zona central e o outro foi posicionado transversalmente e próximo do primeiro.

Face à variabilidade entre lotes diferentes verificada nos primeiros ensaios dos lotes FA e FB, surge o lote FC (figura 26), produzido com um maior número de provetes, nas configurações não-instrumentadas e com sensores à superfície e embebidos, para que as comparações dos resultados entre estas diferentes configurações pudessem ser mais fiáveis. Neste lote, optou-se por testar os três tipos de pontes de Wheatstone - quarto de ponte, meia ponte e ponte completa - em três provetes com sensores à superfície e em três provetes com sensores embebidos. O objetivo foi comparar as diferentes pontes, com o intuito de verificar de que modo o aumento do número de sensores integrado num provete influenciava a resistência e a rigidez do mesmo.

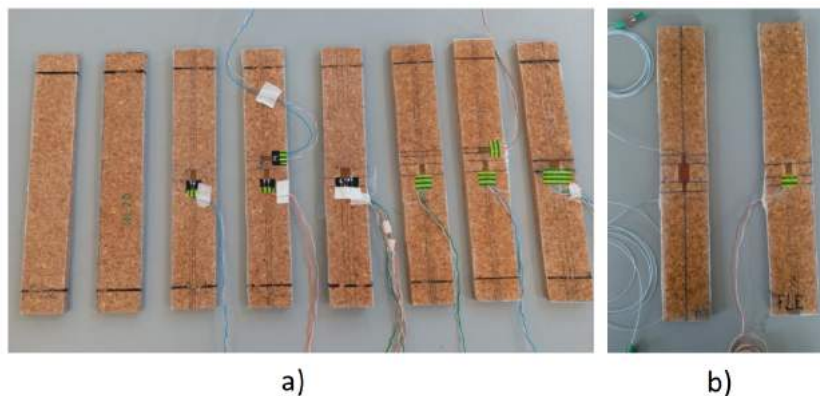


Figura 29: Provetes dos lotes a) FC e b) FD.

Não foi possível integrar o sensor de Bragg no lote FC, como inicialmente previsto, devido a um atraso no fornecimento destes sensores. Como tal, foi criado um último lote - lote FD (figura 26) - com dois provetes, um com o sensor de Bragg embebido e outro com um extensômetro embebido, com o objetivo de fazer uma comparação entre os dois sensores.

Optou-se por não se fazer compensação da temperatura no provete com o sensor de Bragg, devido ao número limitado destes sensores. Como tal, foi também necessário verificar a existência de variações significativas da temperatura no laboratório, que pudessem afetar os resultados.

3.9.4 Calibração dos sensores

A calibração foi a mesma efetuada nos ensaios de tração, descrita no ponto 3.8.4.

3.9.5 Sincronização dos dados

A sincronização dos dados foi a mesma efetuada nos ensaios de tração, descrita no ponto 3.8.5.

3.9.6 Parâmetros calculados

São apresentados, de seguida, os parâmetros obtidos nos ensaios de flexão: carga máxima do material, localização da linha neutra e módulo de Young à flexão. Por último, é feita uma análise da influência da colocação de sensores à superfície e embebidos na resistência do material.

3.9.6.1 Determinação da carga máxima

Os ensaios não instrumentados realizaram-se de modo a obter a região do regime elástico e o valor da carga de rotura do material. A finalidade de obter este parâmetro foi a de poder realizar posteriormente ensaios de repetibilidade nos provetes instrumentados, até um valor de carga máximo dentro da região do regime elástico, de modo a que não ocorresse a rotura. Este valor de carga máximo foi obtido diretamente a partir do gráfico carga-flecha dado pela máquina de ensaios. Consideraram-se os valores iniciais de flecha iguais aos do deslocamento do travessão e utilizou-se o VIC para validá-los.

Para o cálculo deste parâmetro, testaram-se os provetes não instrumentados do lote FA e do lote FB.

3.9.6.2 Determinação da posição da linha neutra e do módulo de Young à flexão

Para o cálculo destes parâmetros, tomou-se como referência o trabalho desenvolvido por Mujika *et al.* [104]. Estes autores propõem um método de determinação da linha neutra e dos módulos de Young à tração, compressão e flexão de um material compósito. Para desenvolver esta análise, assume-se que:

- A viga é isotrópica, transversalmente isotrópica, ou se a viga é ortotrópica, o eixo da viga é um eixo principal de ortotropia;
- O comportamento da viga é linearmente elástico;
- Secções planas que são inicialmente normais ao eixo longitudinal da viga permanecem planas e normais durante a flexão. Esta é a hipótese básica da Teoria Clássica de Vigas (TCV);
- Os módulos de tração e compressão podem ser diferentes.

Segundo este método, em cada provete testado, devem ser efetuados dois ensaios de flexão em quatro pontos: um ensaio com o sensor na face à compressão (a ler extensões negativas) e outro ensaio com o sensor na face à tração (a ler extensões positivas), como se encontra representado na figura 27.

Com os valores de extensão dados pelo sensor e as forças provenientes da célula de carga da máquina de ensaios, obtém-se o gráfico força-extensão ($F-\epsilon$) para cada um dos dois ensaios. Sendo m_t o declive do conjunto de dados força-extensão quando o sensor se encontra à tração, m_c o declive do conjunto de dados força-extensão quando o sensor se encontra à compressão e F a carga a que o provete é submetido, é calculada a posição da linha neutra, $\sqrt{\lambda}$, através da seguinte equação:

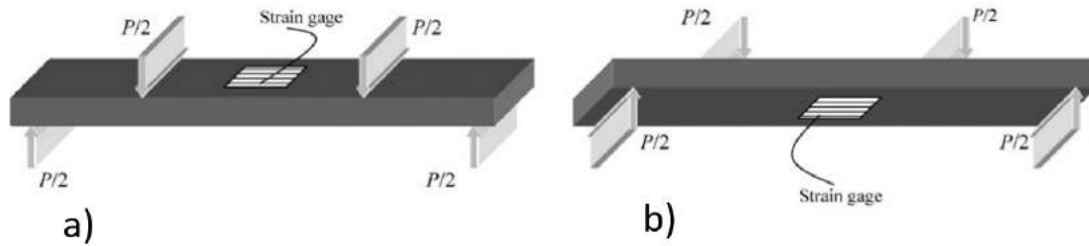


Figura 30: Posição do extensômetro no ensaio de flexão quatro pontos: a) extensômetro na face à compressão e b) extensômetro na face à tração [104].

$$\frac{m_t}{m_c} = \frac{\frac{F}{\varepsilon_t}}{\frac{F}{\varepsilon_c}} = \frac{h_C}{h_T} = \sqrt{\lambda}. \quad (3.6)$$

A equação acima também mostra a localização da linha neutra, expressa em termos da relação entre a espessura do provete à compressão (h_C) e a espessura do provete à tração (h_T).

Tendo o valor de $\sqrt{\lambda}$, calcula-se o parâmetro β (3.7), que permite obter o módulo de Young à flexão, E_f (3.8):

$$\beta = \frac{4}{(1 + \lambda)^2} \quad (3.7)$$

$$E_f = \beta \frac{3m_t S}{8bt^2} (1 + \sqrt{\lambda}). \quad (3.8)$$

Cada ensaio termina quando a carga atinge aproximadamente 40% da carga máxima obtida no ponto 3.9.6.1 [105], permitindo garantir que o provete se mantém em regime elástico.

Para o caso dos sensores embebidos, não foi possível aplicar diretamente os cálculos anteriores para obter o módulo de Young à flexão, pois as equações foram deduzidas considerando a medição de extensões à superfície [104]. Os extensômetros embebidos leem valores de extensão na interface entre o núcleo e as *skins*, o que significa que a *skin* que está por cima deste funciona como uma outra “placa rígida”, o que invalida o uso das mesmas expressões para este caso. Para corrigir esta situação, tendo o valor de extensão na interface lido pelo sensor, calculou-se o valor esperado à superfície, considerando que o provete está em flexão pura. Segue-se a descrição do procedimento para este último cálculo, tendo como ponto de partida a equação geral 3.9 deduzida por Ferdinand *et al* [106], apresentada de seguida.

Sendo ρ_0 o raio do arco DE, correspondente à linha neutra, e ρ o raio do arco JK, localizado a uma distância y acima da superfície neutra, representados na figura 28a), a deformação longitudinal específica ε_x nos elementos que constituem o arco JK é obtida através da seguinte expressão geral:

$$\varepsilon_x = -\frac{y}{\rho_0} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \quad (3.9)$$

Partindo da equação anterior e considerando ρ_1 o raio do arco LM, correspondente à face onde se encontra o sensor à superfície, ρ_2 o raio do arco NO, correspondente à face onde se encontra o

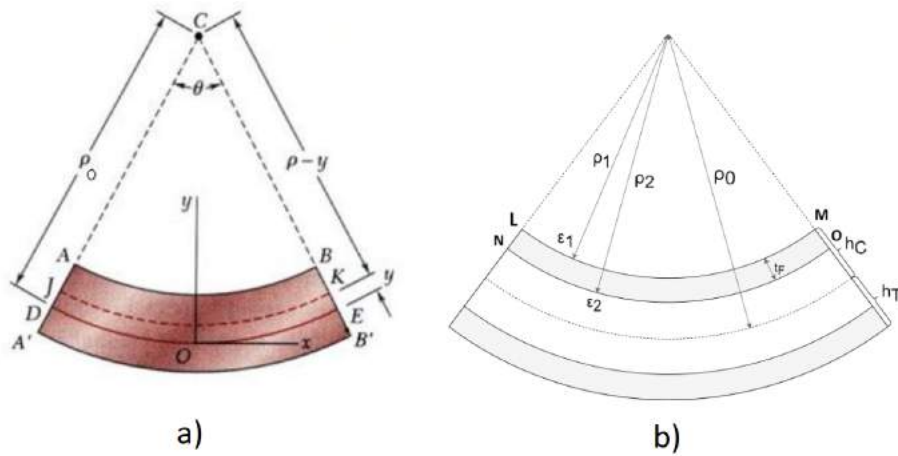


Figura 31: a) Secção vertical longitudinal de uma viga em flexão pura [106] e b) secção vertical longitudinal do compósito em estudo.

sensor embebido, ε_1 o valor da extensão à superfície que se quer obter e ε_2 o valor da extensão lido na interface pelo sensor embebido, representados na figura 28b) obtém-se a seguinte relação entre os dois valores de extensão:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_2 - \rho_0} = \frac{\rho_1 - \rho_0}{(\rho_1 + t_F) - \rho_0} = \frac{(\rho_0 - h_C) - \rho_0}{(\rho_0 - h_C + t_F) - \rho_0} = \frac{h_C}{h_C - t_F} \quad (3.10)$$

em que t_F corresponde ao valor da espessura da fibra.

Colocando a equação 3.10 em ordem a ε_1 , obtém-se:

$$\varepsilon_1 = \frac{h_C}{h_C - t_F} \varepsilon_2. \quad (3.11)$$

Na equação 3.11, é possível observar que para obter o valor de extensão ε_1 , é necessário saber *a priori* o valor de h_C . Para tal, começaram por se testar os provetes com os extensómetros à superfície dos lotes FB e FC, de modo a obter o valor de $\sqrt{\lambda}$, calculado através da equação 3.6. Obteve-se um valor médio de $\sqrt{\lambda}$ dos dois lotes diferentes, de modo a que este fosse representativo do material e não apenas de um lote. Tendo este valor e sabendo que $h_c + h_t = t$ e $h_C = \sqrt{\lambda} h_T$, foi possível determinar o valor de h_C .

Tendo o valor médio de h_C e os valores de ε_2 dados pelos sensores embebidos, calcularam-se os valores de ε_1 correspondentes, obtiveram-se os declives $F-\varepsilon_1$ à tração e à compressão e com esses valores calcularam-se os valores de E_F para os provetes com os sensores embebidos.

Em cada provete instrumentado, foram efetuados três ensaios de repetibilidade com o provete com o sensor à compressão e três ensaios de repetibilidade com o provete com o sensor à tração. O tempo de espera entre os ensaios de cada provete foi de aproximadamente meia hora, igual ao dos ensaios de tração. Para os ensaios de repetibilidade, não foi possível usar o VIC para validar as extensões lidas pelos sensores, uma vez que a posição em que este sistema se encontrava colocado apenas permitia ler as flechas e não as extensões longitudinais das faces em contacto com os roletes, onde se encontravam os sensores. A incapacidade de utilizar o VIC resultou na opção de efetuar a comparação

entre os valores de E_F obtidos através dos extensômetros e os valores de E_F calculados através da norma ASTM D6272-00 *Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending* [107]. Não se tratou de uma validação, uma vez que esta norma não é específica para o material compósito em estudo.

A norma acima referida apresenta a equação 3.12 para o cálculo de E_F de polímeros reforçados ou não reforçados, numa configuração do ensaio em flexão em 4 pontos:

$$E_B = 0.21L^3m/bd^3 \quad (3.12)$$

em que E_B é o módulo de elasticidade à flexão (MPa), L é a distância entre os apoios de baixo, b é a largura do provete, d é a espessura e m o declive da tangente à linha reta inicial do gráfico carga-flecha obtido.

Os valores das tensões (σ_f) à flexão foram calculados através da seguinte equação [81]:

$$\sigma_f = \frac{3F(S - S_i)}{2bt^2} \quad (3.13)$$

emq que S_i corresponde à distância entre os apoios superiores no ensaio de flexão.

3.9.6.3 Análise do sensor na resistência do material

Após os ensaios de repetibilidade, efetuaram-se novamente ensaios de flexão nos provetes do lote FC mas desta vez até à rotura, incluindo os instrumentados, de modo a verificar de que forma a introdução de extensômetros à superfície e embebidos influenciava a resistência dessa amostra.

Não se repetiu esta análise para o lote FD, que contém o provete com o sensor de Bragg, porque optou-se por não danificar este sensor, dado o seu elevado custo, permitindo um aproveitamento do mesmo para futuros ensaios.

3.10 Ensaio de Fluência

O ensaio de fluência é um ensaio que permite medir a deformação do material, quando sujeito a elevadas temperaturas e a uma tensão constante, abaixo da tensão de cedência, em função do tempo. A deformação é medida através de um extensómetro. Este ensaio é de particular importância para projetar em segurança componentes sujeitos a altas temperaturas.

A realização deste ensaio teve como objetivo estudar as condições de funcionamento dos sensores e o comportamento do material em condições de fluência, a uma temperatura elevada. A concretização deste ensaio aumenta teoricamente a aplicabilidade dos sensores embebidos em condições reais, cujas temperaturas frequentemente ultrapassam a temperatura ambiente de 23°C. São apresentados, de seguida, uma descrição do ensaio, os protótipos desenvolvidos, a calibração efetuada, a sincronização dos dados e os parâmetros calculados.

3.10.1 Descrição do ensaio

Não existem normas para o ensaio de fluência do material estudado. Como tal, seguiram-se os valores de temperaturas definidos pela norma *ASTM D2990-01: Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep Rupture of Plastics* [108]. O ensaio de fluência realizado foi à flexão, pelo que a configuração *set-up* e as dimensões do provete foram as mesmas do que o ensaio de flexão, tendo sido utilizadas cargas distribuídas.

O teste foi realizado na estufa *Memmert incubator*, presente no laboratório, como representado na figura 31, para que fosse possível controlar a temperatura. Os cabos dos extensómetros ficaram no exterior para poderem ser ligados ao sistema de aquisição.

Todos os provetes de fluência foram testados a duas temperaturas definidas pela norma acima: 23°C e 70°C. As normas apresentavam valores de temperatura mais altos, no entanto escolheu-se um valor de temperatura máximo de 70°C, uma vez que para aplicações de engenharia, até mesmo para integração em aeronaves ultraleves, dificilmente se registam na Terra temperaturas superiores a esta. Apesar de o tempo de um ensaio de fluência ir até 3000h, para cada temperatura, optou-se por testar cada provete durante um intervalo de tempo de fluência curto, cerca de 5 horas. Este valor de tempo foi definido de modo a cumprir dois objetivos: permitir a realização do ensaio durante um dia, devido ao tempo limitado da dissertação, e evitar a ocorrência de uma deformação plástica que impossibilitasse a reutilização do provete para novos ensaios.

A concretização de cada ensaio seguiu uma ordem: o provete foi colocado inicialmente em repouso fora do forno, com os sensores ligados ao sistema de aquisição, para efeitos de calibração; posteriormente foi colocado dentro do forno, sem desligar o sistema de aquisição, e a temperatura foi aumentada; quando o termómetro indicava o valor pretendido, abriu-se o forno, colocaram-se as cargas distribuídas e fechou-se novamente, iniciando o ensaio de fluência.

Foi escolhida uma carga de fluência de 12N, que corresponde a um valor dentro do regime elástico em flexão. Não se utilizaram cargas superiores, uma vez que o provete poderia ficar bastante deformado durante o primeiro ensaio, impossibilitando a sua utilização nos ensaios seguintes.

3.10.2 Prototipagem

Na tabela 9, descrevem-se todos os provetes de fluência que foram produzidos e ensaiados, em termos do tipo e do número de sensores que possuem, da sua posição e a respetiva configuração da ponte. A figura 29 mostra todos os provetes ensaiados. A nomenclatura seguida foi igual à dos ensaios de tração, com a substituição do 'T' inicial por 'C' (*Creep*).

Tal como nos ensaios de tração e de flexão, todos os sensores encontravam-se posicionados longitudinalmente na zona central de uma das faces do provete, como se encontra representado na figura 29.

O lote C1 foi produzido com um sensor de Bragg (C1/FBG1) e um extensómetro (C1/SG1), de modo a permitir comparar o comportamento destes dois sensores.

Tabela 9: Prototipagem dos provetes de fluência.

Nome lote	Identificador	N° Sensores	Posição Sensor	Configuração ponte
LOTE C1	C1/FBG1	1	Embebido	-
	C1/SG1	1	Embebido	Quarto ponte com <i>dummy</i>
LOTE C2	C2/SG1	1	Embebido	Quarto ponte com <i>dummy</i>
	C2/SG2	1	Embebido	Quarto ponte com <i>dummy</i>
LOTE C3	C3/SG1	1	Embebido	Quarto ponte com <i>dummy</i>

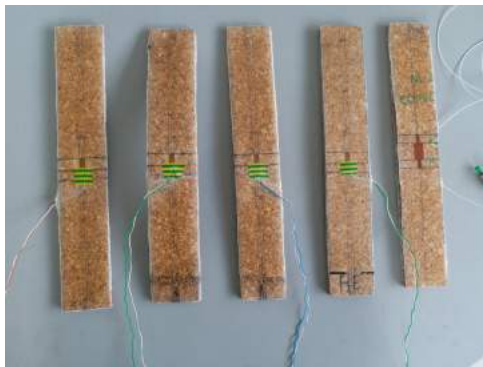


Figura 32: Provetes de fluência (Lotes C1, C2 e C3).

3.10.3 Calibração dos sensores

A calibração foi a mesma efetuada nos ensaios de tração, descrita no ponto 3.8.4.

3.10.4 Sincronização dos dados

A sincronização dos dados foi a mesma efetuada nos ensaios de tração, descrita no ponto 3.8.5.

3.10.5 Parâmetros obtidos

Em cada ensaio de fluência, foram obtidos dois parâmetros: o valor da deformada ΔL_{Final} (figura 30) e o gráfico da extensão longitudinal, medida pelo sensor, em função do tempo.

3.10.5.1 Medição do valor da deformada ΔL_{Final}

Após cada ensaio de fluência, foi medido o valor da deformada ΔL_{Final} (figura 30) de cada provete, recorrendo à utilização de uma folha de papel milimétrico. O objetivo da obtenção deste parâmetro foi o de verificar a influência do aumento da temperatura e da carga distribuída no comportamento do provete com o sensor embebido.

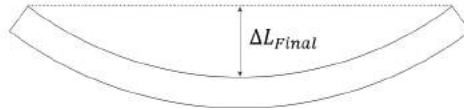


Figura 33: Esquema de um provete com a medição de ΔL_{Final} representada.

3.10.5.2 Representação gráfica dos dados obtidos pelos sensores embebidos

O segundo parâmetro obtido, após cada ensaio de fluência, foi o gráfico da extensão longitudinal, medida pelo sensor, em função do tempo. O objetivo foi o de verificar o comportamento do sensor com o aumento da temperatura e as diferenças observadas entre os dois tipos de sensores (extensômetros e sensor de Bragg).



Figura 34: Obtenção dos valores para calibração, no início de um ensaio de fluência.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de tração, flexão e fluência descritos no capítulo 3 e a respetiva análise.

4.1 Ensaio de Tração

Como referido no capítulo 3, as configurações adotadas com as peças metálicas não permitiram validar o ensaio de tração deste material, uma vez que estas descolaram antes de a rotura ocorrer, como se pode observar na figura 32. Apesar de não se ter obtido o valor da resistência máxima à tração do material, foi possível obter a região do regime elástico que possibilitou a continuação de ensaios não destrutivos em provetes com sensores. No apêndice A, na secção A.1, apresenta-se a tabela 22 com os valores de largura, comprimento e espessura medidos para cada provete de tração, bem como outras tabelas com as condições de teste em cada ensaio.

Seguidamente, serão apresentados os resultados referentes à determinação do coeficiente de Poisson e do módulo de Young e a análise das áreas efetuadas.



Figura 35: Provetes de tração após os ensaios destrutivos: a) lotes TA, TB e TC e b) lotes TD e TE.

4.1.1 Determinação do Coeficiente de Poisson

Na tabela 10, apresentam-se os coeficientes de Poisson (ν) calculados, seguindo o procedimento descrito em 3.8.6.1, a média ($\bar{\nu}$) e o desvio padrão (SD).

Tabela 10: Valores do coeficiente de Poisson (ν) de cada provete, média ($\bar{\nu}$) e desvio padrão (SD).

Nome Lote	Identificador	ν	$\bar{\nu}$	SD
LOTE TA	TA1	0,18		
	TA2	0,19	0,19	0,01
LOTE TB	TB1	0,18		
	TB2	0,15	0,17	0,02
LOTE TC	TC1	0,17		
	TC2	0,19		
	TC3	0,18		
	TC4	0,18		
	TC5	0,18		
	TC6	0,19		
	TC7	0,16	0,18	0,01
LOTE TD	TD1	0,18		
	TD2	0,18		
	TD3	0,16	0,17	0,01
LOTE TE	TE1	0,18	-	-
			0,18	0,01

Segundo a literatura, a média do coeficiente de Poisson dos aglomerados de cortiça AC216, AC157, AC178 e AC199 é aproximadamente 0,15 [34] e de *skins* constituídas por fibras de vidro 300 g/m^2 , resina epóxi e endurecedor 1050/1058S é aproximadamente 0,19 [109]. Verifica-se que a média de 0,18 obtida para o material compósito em estudo se encontra dentro deste intervalo de valores.

Analisando a tabela 10, verifica-se que existiram pequenas variações entre valores de ν de provetes do mesmo lote e de provetes de lotes diferentes. A variabilidade verificada em provetes do mesmo lote pode dever-se: à heterogeneidade do aglomerado de cortiça; à variação da distribuição da resina ao longo do provete, como consequência do processo de *hand lay-up*; à menor ação da pressão e da temperatura sobre os provetes posicionados na zona mais periférica da prensa.

A variabilidade que se verifica em provetes de lotes diferentes é, para além das causas referidas anteriormente, devida ao facto de terem sido produzidos em tempos diferentes. Por terem sido colocados na prensa e no forno em momentos diferentes e, apesar de se ter mantido a pressão de 1 *bar* e a temperatura de 60°C, não é possível assegurar a ausência de flutuações nestes parâmetros, que ocorrem em diferentes tempos de fabrico.

Estas variações poderão estar associadas não só às causas mencionadas acima, mas também devido à utilização do VIC. As imprecisões na aplicação do VIC poderão estar relacionadas com os seguintes fatores: diferença de tamanho entre os pontos pretos, que podem ter causado efeito de *aliasing* [109]; a colocação da luz não ter sido a mais adequada, diminuindo o detalhe da imagem; um alinhamento incorreto das linhas que se traçaram no *software* VIC-2D, utilizando o comando *Inspect Extensometer*.

4.1.2 Determinação do Módulo de Young

A tabela 12 apresenta as curvas de tensão em função da extensão obtidas para os provetes sem sensores, com sensores à superfície e com sensores embebidos, dos lotes TD e TE. Nos provetes sem sensores, os valores da extensão foram obtidos utilizando apenas o sistema VIC. Nos provetes com extensômetros à superfície, os valores foram obtidos utilizando o sensor e o *clip gage* e, nos provetes com sensores embebidos, utilizando o sensor e o sistema VIC.

Para cada curva tensão *versus* extensão obtida, calculou-se o módulo de Young (E), utilizando um modelo de regressão linear simples. Importa salientar que só se verifica a existência de uma relação linear quando em simultâneo o gráfico evidencia essa relação e o coeficiente de correlação de Pearson (R^2) apresenta valores próximos de 1, no caso de declives positivos (correlação positiva). Os valores de E apresentam-se na tabela 12 e os valores de R^2 na tabela 28 do apêndice A. Observando os gráficos da tabela 12 e os valores de R^2 da tabela 28, constata-se que os gráficos evidenciam uma relação linear e os valores de R^2 são próximos de 1, o que se traduz numa correlação positiva forte.

Considerando os provetes sem sensores dos lotes TD e TE, verifica-se que no caso do lote TD, a média dos valores de E dos três provetes é de 856,5 MPa, sendo o desvio padrão de 19,7. No lote TE, apenas se apresentam os resultados de dois provetes, uma vez que no terceiro as peças metálicas saíram no início do ensaio. O provete TE2 apresenta um intervalo de carga mais reduzido, uma vez que as peças saíram antes de atingir a carga de 500 N.






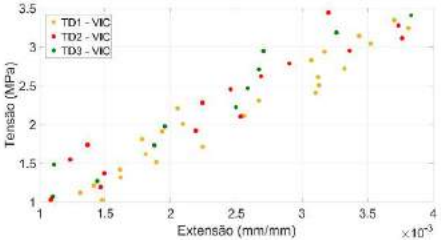
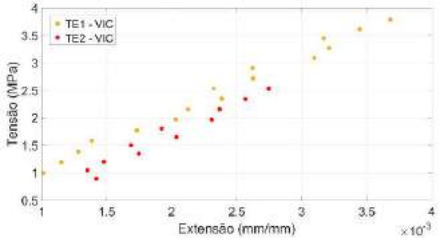


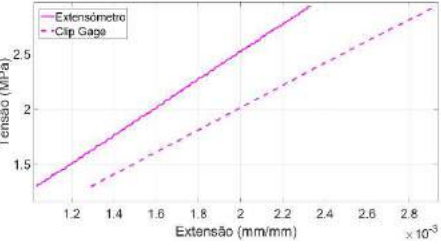
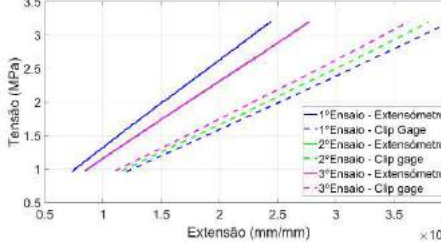



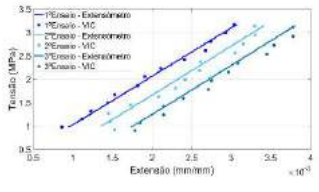
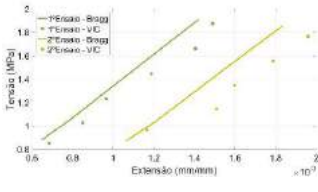
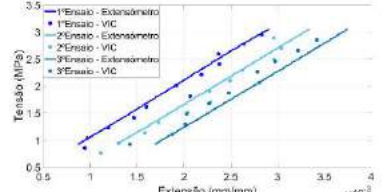
Comparando os provetes sem sensores das duas placas, é possível constatar que os dois valores de E da placa TE são superiores aos três valores de E da placa TD, segundo os dados obtidos pelo VIC, o que sugere que a placa TE é a mais rígida. As diferenças que se observam na rigidez entre os dois lotes e dentro de cada lote poderão ter ocorrido devido às causas associadas à variabilidade entre provetes e a possíveis erros associados à utilização do VIC, mencionados no ponto 4.1.1.

A tabela 11 apresenta os erros relativos definidos como sendo a razão em que o numerador corresponde à diferença entre os valores de E obtidos através do sensor e de um dos sistemas (VIC ou *clip gage*), e o denominador corresponde ao valor de E do sensor. Estes erros foram calculados com o objetivo de comparar os dados dos sensores com os dos sistemas de validação/comparação (*clip gage* e sistema VIC).

Tabela 11: Erros relativos entre o valores de E calculados através do sensor e do sistema VIC ou *clip gage*, para os lotes TD e TE.

Identificador	Sensor / Sistema	1º Ensaio Erro (%)	2º Ensaio Erro (%)	3º Ensaio Erro (%)	Média Erro (%)
TD/SG1/S	Extensómetro superfície / C. Gage	21	-	-	-
TD/SG1/E	Extensómetro embebido / VIC-2D	1	2	3	2
TD/FBG/E	Sensor Bragg embebido / VIC-2D	10	20	-	15
TE/SG1/S	Extensómetro superfície / C. Gage	32	27	23	27
TE/SG1/E	Extensómetro embebido / VIC-2D	2	1	1	1

Tabela 12: Esquema ilustrativo dos resultados dos ensaios de tração.

LOTE TD			LOTE TE	
Provetes sem sensores			Provetes sem sensores	
 TD1	 TD2	 TD3	 TE1	 TE2
 <p> $E_{TD1} = 853,8 \text{ MPa}$ $E_{TD2} = 833,8 \text{ MPa}$ $E_{TD3} = 881,9 \text{ MPa}$ </p>			 <p> $E_{TE1} = 1034,9 \text{ MPa}$ $E_{TE2} = 1098,1 \text{ MPa}$ </p>	
Provete com sensor à superfície			Provete com sensor à superfície	
 TD/SG1/S			 TE/SG1/S	
 <p> $E_{EXT} = 1263,8 \text{ MPa}$ $E_{CLIP \ GAGE} = 1003,3 \text{ MPa}$ </p>			 <p> 1º Ensaio: $E_{EXT} = 1185,5 \text{ MPa}$ $E_{CLIP \ GAGE} = 801,9 \text{ MPa}$ 2º Ensaio: $E_{EXT} = 1152,0 \text{ MPa}$ $E_{CLIP \ GAGE} = 839,3 \text{ MPa}$ 3º Ensaio: $E_{EXT} = 1149,5 \text{ MPa}$ $E_{CLIP \ GAGE} = 881,6 \text{ MPa}$ </p>	
Provetes com sensor embestado			Provete com sensor embestado	
 TD/SG1/E	 TD/FBG1/E	 TE/SG1/E		
 <p> 1º Ensaio: $E_{EXT} = 1035,3 \text{ MPa}$ $E_{VIC} = 1027,2 \text{ MPa}$ 2º Ensaio: $E_{EXT} = 1045,2 \text{ MPa}$ $E_{VIC} = 1022,4 \text{ MPa}$ 3º Ensaio: $E_{EXT} = 1048,5 \text{ MPa}$ $E_{VIC} = 1017,2 \text{ MPa}$ </p>	 <p> 1º Ensaio: $E_{BRAGG} = 1337,6 \text{ MPa}$ $E_{VIC} = 1208,1 \text{ MPa}$ 2º Ensaio: $E_{BRAGG} = 1284,9 \text{ MPa}$ $E_{VIC} = 1033,8 \text{ MPa}$ </p>	 <p> 1º Ensaio: $E_{EXT} = 1056,8 \text{ MPa}$ $E_{VIC} = 1070,7 \text{ MPa}$ 2º Ensaio: $E_{EXT} = 1039,1 \text{ MPa}$ $E_{VIC} = 1048,5 \text{ MPa}$ 3º Ensaio: $E_{EXT} = 1034,4 \text{ MPa}$ $E_{VIC} = 1028,7 \text{ MPa}$ </p>		

Considerando os provetes com extensómetros à superfície dos lotes TD e TE, verifica-se que no provete TD/SG1/S, apenas foi possível efetuar um ensaio, uma vez que as peças metálicas saíram logo nesse ensaio com a carga de 451 *N*. No provete TE/SG1/S, foi possível efetuar os três ensaios sem as peças saírem. Os erros relativos entre os valores de *E* obtidos através dos extensómetro e do *clip gage* foram de 21% no provete TD/SG1/S e cerca de 27% no provete TE/SG1/S, como se pode observar na tabela 11. Estes desvios poderão ter sido devidos a erros na colocação do *clip gage* no provete, à baixa exatidão do *clip gage* para utilização num provete com espessura pequena ou por má calibração do aparelho.

Considerando os provetes com extensómetros embebidos dos lotes TD e TE, umas das conclusões é a constatação de que os sensores embebidos, no caso dos extensómetros, permitiram ler os valores de extensão, o que significa que o método para o embebimento durante a produção funcionou. As curvas correspondentes ao 2º e 3º ensaios destes provetes foram sujeitas a um *offset* de 0.0004 (*mm/mm*), segundo o eixo *xx*, para facilitar a visualização.

Para o caso do sensor de Bragg, incorporado no provete TD/FBG1/E, verificou-se durante o ensaio que o sistema de aquisição de dados deixava de registar os valores do comprimento de onda, a partir de um determinado valor de carga. Nos dois primeiros ensaios, foi possível registar valores até 300 *N*, sendo que no terceiro já não foi possível. Este problema poderá estar associado a um defeito de fabrico no próprio sensor de Bragg ou a um erro introduzido durante a sua incorporação.

No caso dos extensómetros embebidos dos dois lotes, observam-se que os dados do VIC se encontram próximos dos dados destes sensores. A tabela 11 quantifica essa pequena diferença, com um erro relativo médio de 2% para o provete TD/SG1/E e de 1% para o provete TE/SG1/E. O facto de as diferenças entre os valores de extensão lidos à superfície (VIC-2D) e os valores lidos na interface (extensómetros) ser pequena, sugere que o embebimento no compósito sanduíche foi bem executado, o que significa que a incorporação do extensómetro na interface não interferiu na adesão entre a fibra e o aglomerado de cortiça.

Para analisar a repetibilidade dos sensores, calcularam-se para cada provete as diferenças percentuais (DP) em relação ao maior valor de *E* dos três ensaios. Por exemplo, no caso do provete TD/SG1/E, o maior valor de *E* correspondia ao valor que foi obtido no terceiro ensaio, pelo que foram calculados as seguintes DP: $(E_{3^\circ \text{Ensaio}} - E_{1^\circ \text{Ensaio}})/E_{3^\circ \text{Ensaio}}$ e $(E_{3^\circ \text{Ensaio}} - E_{2^\circ \text{Ensaio}})/E_{3^\circ \text{Ensaio}}$.

Tabela 13: Diferenças percentuais (DP) entre os valores de *E* dos ensaios de repetibilidade dos provetes do lote TD e TE.

Identificador	1º Ensaio / 2º Ensaio DP (%)	1º Ensaio / 3º Ensaio DP (%)	2º Ensaio / 3º Ensaio DP (%)
TD/SG1/E	-	1	0
TD/FBG1/E	4	-	-
TE/SG1/S	3	3	-
TE/SG1/E	2	2	-

Constata-se que os valores apresentados na tabela 13 são baixos, incluindo nos provetes com os

sensores embebidos, o que significa que os sensores possuem uma boa repetibilidade.

Em ambos os lotes, verificou-se que os valores de E dos provetes sem sensores e com extensômetros embebidos foram inferiores aos valores de E dos provetes com extensômetros à superfície. Uma possível razão para a diferença na rigidez entre as configurações dos sensores poderá ter sido devido à colagem à superfície, que introduziu um aumento da rigidez local.

Relativamente à comparação entre os provetes sem sensores e provetes com sensores embebidos, no lote TD houve um aumento de rigidez com a incorporação do extensômetro embebido, enquanto que no lote TE o valor do provete TE1 foi próximo dos valores dos três ensaios do provete com sensor embebido TE/SG1/E. Esta discrepância entre os lotes não permitiu tecer considerações sobre a alteração das propriedades de rigidez da amostra em estudo com a integração de sensores embebidos.

4.1.3 Análise das Áreas

Seguidamente, serão apresentados os resultados da análise das áreas, cuja metodologia se encontra descrita em 3.8.6.3. Nas tabelas 14, 15 e 16, apresentam-se os cálculos dos valores de E para cada área definida no VIC-2D (A1, A2 e A3), para os provetes não instrumentados e instrumentados com sensores embebidos. Com o intuito de conhecer as diferenças entre valores de E das áreas A2 e A3, comparativamente com a área global A1, calcularam-se as diferenças percentuais (DP) definidas como sendo a razão entre o valor resultante da diferença entre o valor de E de uma das áreas e o valor de E da área A1, e o valor de E da área A1.

Tabela 14: Análise das áreas dos provetes sem sensores dos lotes TD e TE.

Área	TD1		TD2		TD3		TE1	
	E (MPa)	DP (%)	E (MPa)	DP (%)	E (MPa)	DP (%)	E (MPa)	DP (%)
A1	816,3	-	677,6	-	1034,3	-	1160,9	-
A2	796,1	3	672,5	1	1012,5	2	1143,8	2
A3	735,8	10	706,3	4	1085,3	5	1158,8	0

Tabela 15: Análise das áreas dos provetes com sensores embebidos TD/SG1/E e TE/SG1/E.

TE/SG1/E	1º Ensaio		2º Ensaio		3º Ensaio	
	E (MPa)	DP (%)	E (MPa)	DP (%)	E (MPa)	DP (%)
A1	840,8	-	854,1	-	846,1	-
A2	890,7	6	912,0	7	892,5	6
A3	891,9	6	911,1	7	879,7	4
TG/SG1/E	1º Ensaio		2º Ensaio		3º Ensaio	
	E (MPa)	DP (%)	E (MPa)	DP (%)	E (MPa)	DP (%)
A1	884,3	-	864,9	-	849,8	-
A2	944,4	7	915,5	6	892,8	5
A3	924,0	5	887,9	3	859,6	1

Tabela 16: Análise das áreas do provete TD/FBG1/E.

TD/FBG1/E	1º Ensaio		2º Ensaio	
	E (MPa)	DP (%)	E (MPa)	DP (%)
A1	1088,3	-	1121,6	-
A2	1179,1	8	1226,4	9
A3	994,6	9	1026,6	9

Analisando as tabelas 14,15 e 16, constata-se que ocorreu um aumento das DP entre as áreas com a incorporação dos sensores. Observa-se igualmente que há maioritariamente um aumento da rigidez na região do sensor (A2), comparativamente com a região global (A1) e a região acima do sensor (A3). Esta diferença no comportamento entre os provetes instrumentados e não instrumentados, demonstrada pelo VIC, permitiu mostrar que o material é afetado de algum modo, ainda que talvez pouco significativo, pela presença do sensor. Além disso, é possível concluir que o VIC, apesar de ler as extensões à superfície, é sensível à presença de sensores embebidos e que, como tal, poderá ser utilizado como uma ferramenta útil no estudo de sensores embebidos em materiais.

De notar que o desvio de 10% do valor de E da área A3 do provete TD1 (tabela 14), por comparação com os restantes, possivelmente estará associado aos erros do VIC referidos no ponto 4.1.1.

A tabela 16 mostra que o provete com o sensor de Bragg (TD/FBG1/E) possui diferenças percentuais superiores às registadas pelos extensómetros, o que significa que a incorporação deste sensor poderá afetar as propriedades de rigidez do material à tração de forma mais significativa. Este resultado vai de encontro ao esperado, uma vez que o sensor de Bragg possui maior rigidez do que o extensómetro [110].

4.2 Ensaios de Flexão

Apresentam-se, seguidamente, os resultados dos ensaios dos provetes testados à flexão: obtenção da carga máxima, posição da linha neutra e do módulo de Young à flexão e análise da influência do sensor na resistência do material. No apêndice A, na secção A.2, apresenta-se a tabela 29, com os valores de largura, comprimento e espessura medidos para cada provete de flexão, bem como outras tabelas com as condições de teste em cada ensaio.

4.2.1 Determinação da carga máxima

Os primeiros ensaios de flexão efetuados foram em provetes sem sensores, com o objetivo de identificar a zona do regime elástico, de modo a permitir efetuar ensaios de repetibilidade nos provetes com sensores, como referido em 3.9.6.1.

A figura 33 mostra as curvas que traduzem a relação entre a carga aplicada e a flecha, para os provetes dos lotes FA e FB. As linhas contínuas correspondem aos valores de flecha obtidos através do deslocamento do travessão da máquina de ensaios e as linhas a tracejado aos valores medidos

pelo sistema VIC, utilizado como método de validação. Consta-se que todas as curvas seguem um comportamento típico, constituído por uma primeira região, crescente e aproximadamente linear, e uma segunda região, não linear, que inclui o ponto máximo da curva.

A primeira região corresponde ao regime de deformação elástica do provete, no qual este deflete de modo aproximadamente linear com o aumento da carga. Nesta região, se a carga for retirada, o provete recupera novamente o seu estado inicial. A segunda região corresponde ao regime de deformação plástica, em que o provete não recupera totalmente após a aplicação da carga, ficando com deformações residuais permanentes. A carga máxima ou resistência máxima suportada pelo provete é atingida na segunda região e corresponde à carga na qual o provete atingiu uma situação de início de falha de algum dos seus componentes.

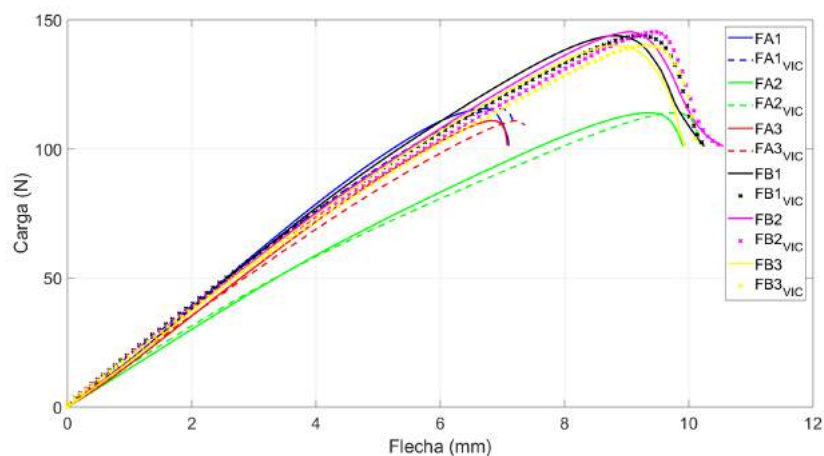


Figura 36: Curvas da carga em função da flecha dos lotes FA e FB.

Relativamente ao modo de falha observado, verificou-se a ocorrência de instabilidade local na face sujeita à compressão, nos dois pontos de aplicação da força, que se encontra assinalada com retângulos a vermelho na figura 34.

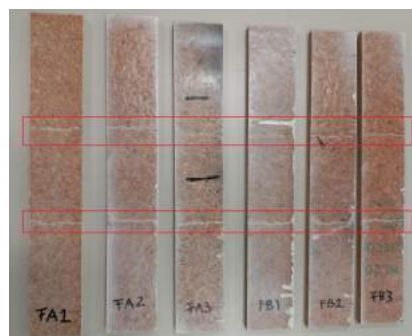


Figura 37: Provetes dos lotes FA e FB, após os ensaios de flexão destrutivos.

Para efetuar os ensaios de repetibilidade dos provetes instrumentados, considerou-se 40% [105] do menor valor de carga de máximo registado, correspondente ao provete FA3, com o intuito de garantir que estes se mantinham na zona de regime elástico.

4.2.2 Determinação da posição da linha neutra e do módulo de Young à flexão

Na tabela 17, apresentam-se os valores referentes à posição da linha neutra para cada ensaio de repetibilidade ($\sqrt{\lambda_1}, \sqrt{\lambda_2}, \sqrt{\lambda_3}$) dos provetes instrumentados com sensor à superfície, seguindo o procedimento descrito em 3.9.6.2 e a média ($\sqrt{\lambda}$).

Tabela 17: Valores de $\sqrt{\lambda}$ dos três ensaios de repetibilidade dos provetes dos lotes FB e FC.

Lote	Provete	$\sqrt{\lambda_1}$	$\sqrt{\lambda_2}$	$\sqrt{\lambda_3}$	$\sqrt{\lambda}$
Lote FB	FSB1	1,0	1,0	1,0	1,0
	FSB2	0,99	0,99	0,99	0,99
Lote FC	FSC1	0,97	0,98	0,98	0,97
	FSC2	0,95	0,95	0,95	0,95
	FSC3	1,0	1,0	1,0	1,0
					0,98

O valor final da média obtido sugere que a linha neutra do material em estudo, apesar de bastante próxima do centro, resulta em média numa maior secção do provete à tração do que à compressão ($h_C = 0.98h_T$). Tendo este valor, calcularam-se os valores de h_C necessários para o cálculo de E_F dos sensores embebidos.

Tabela 18: Valores de E_F , média ($\overline{E_F}$) e desvio padrão (SD).

Lote	Provete	E_{F_1} (MPa)	E_{F_2} (MPa)	E_{F_3} (MPa)	$\overline{E_F}$	SD
Lote FB	FB/SG1/S	1710,7	1717,0	1713,1	1713,6	2,6
	FB/SG2/S	1639,5	1638,2	1638,0	1638,6	1,0
Lote FC	FC/SG1/S	1921,5	1923,9	1920,5	1922,0	1,4
	FC/SG2/S	2223,5	2214,2	2221,9	2219,9	4,1
	FC/SG3/S	1908,7	1908,0	1908,5	1908,4	0,3
	FC/SG1/E	1859,5	1856,5	1886,0	1867,3	13,3
	FC/SG2/E	1996,2	1978,1	2002,9	1992,4	10,5
	FC/SG3/E	2189,9	2197,6	2199,5	2195,7	4,1
Lote FD	FD/FBG1/E	2659,3	2655,7	2653,4	2656,1	2,4
	FD/SG1/E	2746,5	2764,9	2772,2	2761,2	10,8

Na tabela 18, apresentam-se os valores de E_F calculados através das expressões deduzidas por Mujika *et al.* [104], para os três ensaios de repetibilidade dos provetes instrumentados dos lotes FB, FC e FD, a média ($\overline{E_F}$) e o desvio padrão (SD). Na tabela 19, apresentam-se as diferenças percentuais (DP) entre os valores de $\overline{E_F}$ de dois provetes do mesmo lote, calculadas como sendo a razão entre o valor resultante da diferença entre $\overline{E_F}$ do provete 1 e $\overline{E_F}$ do provete 2, sobre o maior valor de ambos.

Na figura 35, apresentam-se as curvas da tensão em função da extensão referentes ao primeiro ensaio de repetibilidade dos provetes instrumentados do lote FC.

Observando os valores de \overline{E}_F e as diferenças percentuais, presentes nas tabela 18 e 19, respetivamente, constata-se que existe variabilidade entre os valores obtidos para provetes do mesmo lote e provetes de lotes diferentes. A possível causa destas variabilidades encontra-se descrita em 4.1.1.

Tabela 19: Diferenças percentuais entre os valores de \overline{E}_F dos provetes 1 e 2.

Lote	Provete 1	Provete 2	DP (%)
Lote FB	FB/SG1/S	FB/SG2/S	4
Lote FC	FC/SG1/S	FC/SG2/S	13
	FC/SG1/S	FC/SG3/S	1
	FC/SG2/S	FC/SG3/S	14
	FC/SG1/E	FC/SG2/E	6
	FC/SG1/E	FC/SG3/E	15
	FC/SG2/E	FC/SG3/E	9
	FC/SG1/S	FC/SG1/E	3
	FC/SG2/S	FC/SG2/E	10
	FC/SG3/S	FC/SG3/E	13
Lote FD	FD/FBG1/E	FD/SG1/E	4

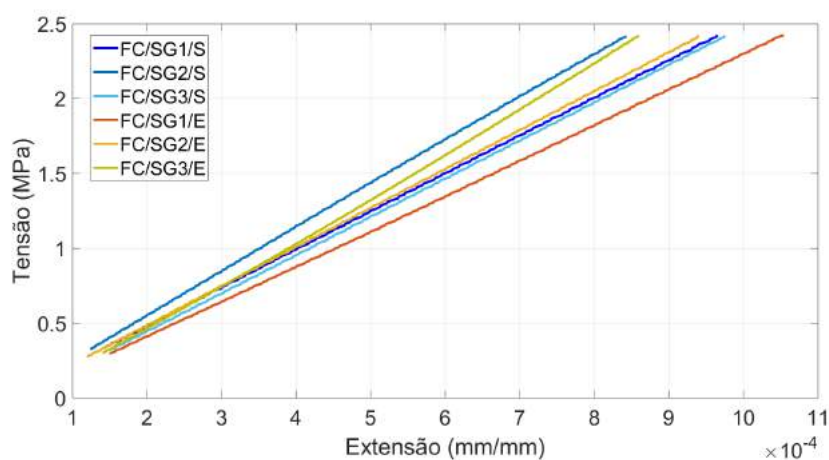


Figura 38: Curvas de tensão em função da extensão referentes ao primeiro ensaio de repetibilidade de cada provete dos lote FC.

Relativamente ao lote FC, nos provetes com sensores à superfície, é possível observar que o provete FC/SG2/S possui uma diferença percentual elevada, em relação aos provetes FC/SG1/S e FC/SG3/S. Esta diferença poderá estar associada ao facto de, por ser uma configuração em meia ponte, o sensor colocado transversalmente não ter ficado exatamente perpendicular ao sensor longitudinal, afetando a medição das extensões.

Nos provetes com sensores embecidos do lote FC, o provete FC/SG3/E possui uma diferença percentual de E_F elevada, em relação aos provetes FC/SG1/E e FC/SG2/E, possivelmente associado ou a um desvio no alinhamento dos quatro sensores ou ao facto de a sua incorporação ter influenciado de

forma mais significativa as propriedades de flexão do material, levando a um aumento da sua rigidez.

No que diz respeito aos erros calculados entre provetes do lote FC com o sensor à superfície e embecido, ambos com a mesma configuração de ponte, constata-se que existe uma maior diferença nas configurações em meia ponte (FC/SG2/S e FC/SG2/E) e ponte completa (FC/SG3/S e FC/SG3/E). Nas configurações em quarto de ponte (FC/SG1/S e FC/SG1/E), a diferença percentual é mais baixa, o que indica que a incorporação do extensómetro embecido nesse provete teve sensivelmente a mesma influência na rigidez do que a colagem do extensómetro à superfície.

No lote FD, constata-se que a DP entre os valores de $\overline{E_F}$ do provete com extensómetro embecido e do provete com sensor de Bragg embecido é pequena. Nesta amostra de dois provetes, a incorporação dos dois sensores teve a mesma influência na rigidez do material. A tabela 38 do Apêndice A mostra que as variações de temperatura durante os ensaios foram muito baixas, o que significa que as medições de extensão realizadas pelo sensor de Bragg (sem *dummy*) não foram afetadas por essas variações.

Todos os provetes com sensores embecidos não sofreram danos durante o ensaio, lendo sempre valores de extensão, o que significa que o método escolhido para a sua incorporação revelou-se eficiente. No caso do sensor de Bragg, não se verificou uma leitura desfasada do valor de extensão como ocorreu no caso à tração.

Para analisar a repetibilidade dos sensores, seguiu-se o mesmo procedimento descrito no ensaio de tração (tabela 13) para todos os provetes instrumentados. Constataram-se que todos os valores das diferenças percentuais obtidas eram inferiores a 1%, o que permitiu verificar novamente que os sensores embecidos, juntamente com os sensores à superfície, possuíam boa repetibilidade.

Como não foi possível utilizar um instrumento de validação da leitura dos sensores nos ensaios de flexão, comparam-se os valores de $\overline{E_F}$ obtidos com os valores presentes na norma ASTM D6272-00 [107]. A tabela 40 do apêndice A apresenta esta análise. Os erros relativos entre os valores foram maioritariamente elevados, como previsto, uma vez que esta norma não é específica para o material compósito em estudo e, por ser um valor teórico calculado, não entra em conta com a presença dos sensores. No entanto, apesar de não servir como um instrumento de validação, permite mostrar que os valores de $\overline{E_F}$ apresentados possuem a mesma ordem de grandeza dos valores da norma. Em futuros ensaios, deveria ser efetuada uma simulação numérica para validar os valores obtidos pelos sensores.

4.2.3 Análise da influência do sensor na resistência do material

Na Tabela 20, apresentam-se os valores de carga máxima (F_{max}) obtidos nos ensaios destrutivos dos provetes do lote FC e os valores de tensão correspondentes (σ_{max}). Nesta análise, agruparam-se os diferentes provetes em três grupos - sem sensores, com sensores à superfície e com sensores embecidos - e obteve-se a média ($\overline{\sigma_{max}}$) e o desvio padrão (SD) dos valores de tensão para cada um deles.

Analisando a tabela 20, verifica-se que a resistência máxima suportada pelos provetes sem sensores foi próxima dos provetes com sensores à superfície, o que indica que, para esta amostra, a colagem dos sensores à superfície não afetou este parâmetro. Nos provetes com sensores embecidos, constata-

se que ocorreu uma diminuição da sua resistência, comparativamente com os provetes sem sensores e com sensores à superfície. Registou-se também uma diminuição da tensão máxima com o aumento do número de sensores embebidos.

Tabela 20: Valores de carga máxima (F_{max}), tensão máxima (σ_{max}), média ($\overline{\sigma_{max}}$) e desvio padrão (SD) dos provetes do lote FC.

Lote	Provete	Config. Sensor	F_{max} (N)	σ_{max} (MPa)	$\overline{\sigma_{max}}$ (MPa)	SD
FC	FC1	Sem sensor	114,5	7,5	7,9	0,4
	FC2	Sem sensor	124,6	8,3		
	FC/SG1/S	Superfície	124,8	8,0	8,0	0,4
	FC/SG2/S	Superfície	122,0	7,7		
	FC/SG3/S	Superfície	134,1	8,2		
	FC/SG1/E	Embebido	108,6	6,2	5,5	0,6
	FC/SG2/E	Embebido	99,2	5,3		
	FC/SG3/E	Embebido	81,81	4,8		

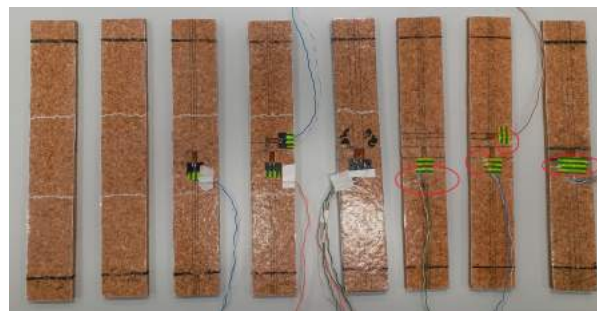


Figura 39: Provetes dos lotes FC, após os ensaios de flexão destrutivos.

No caso dos provetes com extensómetros embebidos, a falha ocorreu sempre nas regiões junto à solda dos sensores, como se pode observar na figura 36, assinalado a vermelho, em vez da zona por baixo dos roletes. A incorporação do sensor, da solda e dos fios poderá ter introduzido defeitos na adesão entre o núcleo e a face, fragilizando-a, alterando assim as propriedades de resistência do material compósito. Nos restantes provetes, sem sensores e com sensores à superfície, o modo de falha registado foi a instabilidade local na face à compressão, nos dois pontos de aplicação da força.

4.3 Ensaios de Fluência

Apresentam-se, seguidamente, os resultados dos ensaios dos provetes testados à fluência, cujos parâmetros obtidos se encontram descritos no subcapítulo 3.10.5. No apêndice A, na secção A.3, apresenta-se a tabela 41 com os valores de largura, comprimento e espessura medidos para cada provete de fluência e a tabela 42 com as condições de teste.

Optou-se por efetuar todas as medições com o sensor na face à tração, uma vez que a determinação do valor representativo da posição da linha neutra nos ensaios de flexão permitiu perceber que existe

uma maior secção do provete que se encontra à tração, o que significa que esta corresponde à face que lê maiores valores de extensão. Na tabela 21, são apresentados os valores de ΔL_{final} medidos após os ensaios de fluência.

Tabela 21: Valores de ΔL_{final} medidos após cada ensaio de fluência.

Lote	Provetes	Nº Ensaio	Temperatura (°C)	ΔL_{final} (mm)
Lote C1	C1/FBG1	1º Ensaio	70	3
		2º Ensaio	70	0
	C1/SG1	1º Ensaio	70	3
		3º Ensaio	23	1
Lote C2	C2/SG1	1º Ensaio	23	0
		2º Ensaio	70	28
	C2/SG2	1º Ensaio	70	6
Lote C3	C3/SG1	1º Ensaio	23	1
		2º Ensaio	70	2

Tal como nos ensaios de tração e flexão, os sensores embebidos nos provetes de fluência permitiram ler valores de extensão, o que mais uma vez reforça a eficácia do método de incorporação utilizado.

Por observação dos resultados apresentados na tabela 21, verifica-se que nos ensaios à temperatura ambiente (23°C), o ΔL_{final} registado foi mais baixo ou nulo, comparativamente com os ensaios a 70°C, que apresentaram um maior valor de ΔL_{final} . Apesar de a exiguidade da amostra não permitir tirar conclusões, verificou-se que o material em teste foi sensível à temperatura mais elevada.

Os provetes do lote C1, com sensor de Bragg embebido (C1/FBG1) e com extensómetro embebido (C1/SG1), registaram o mesmo valor de ΔL_{final} após o 1º ensaio a 70°C, o que significa que, para esta amostra, a influência da incorporação dos dois tipos de sensores foi semelhante na deformabilidade do material.

No caso do provete com o sensor de Bragg embebido (C1/FBG1), só foi possível realizar um primeiro ensaio. A tentativa de realização de um segundo ensaio com este mesmo sensor falhou, por falta de sinal do sensor. Embora os sensores de Bragg utilizados possuam uma temperatura de operação máxima de 80°C e neste ensaio ter sido utilizada a temperatura de 70°C, o provete foi submetido a uma carga distribuída durante 5 horas que pode ter estado na origem de algum dano no sensor.

Os extensómetros embebidos funcionaram em todos os ensaios, mostrando robustez à temperatura de 70°C.

Os dois provetes do lote C2 (C2/SG1 e C2/SG2) deformaram de forma mais acentuada do que os restantes, após os ensaios a 70°C, como se pode observar nos valores de ΔL_{final} da tabela 21 e na figura 37. Esta deformação poderá estar associada a alguma alteração durante o método de produção do próprio aglomerado ou durante o processo manual de *hand lay-up* desse lote.



Figura 40: Provetes C2/SG1 e C2/SG2, após o último ensaio de fluência a 70°C.

Na figura 38, encontram-se representadas as curvas de fluência de todos os ensaios. O ponto inicial do gráfico corresponde ao momento após a colocação das cargas distribuídas.

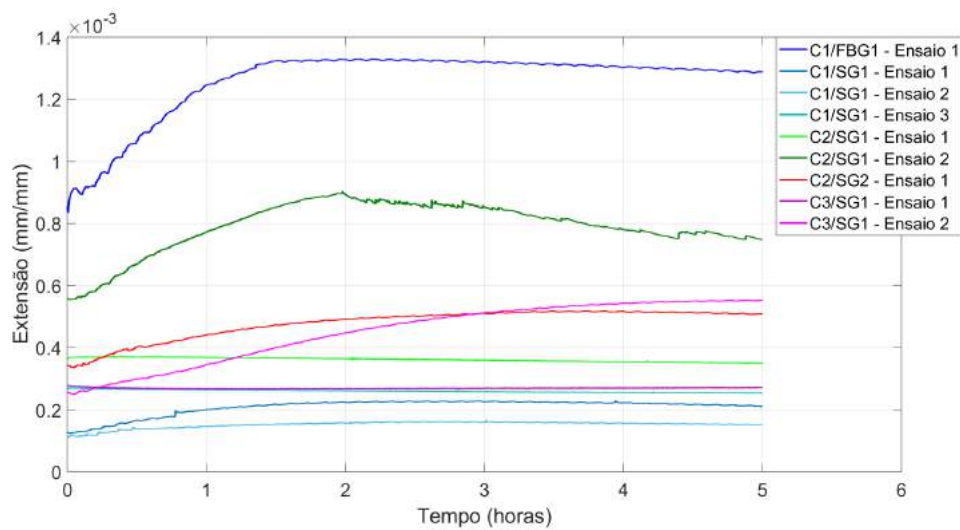


Figura 41: Curvas de fluência.

Analisando as curvas de fluência, verificou-se que o provete com sensor de Bragg (C1/FBG1) apresentou valores mais elevados de extensão lidos durante o ensaio. Tendo sido este o único provete no qual não foi associado um *dummy* para a compensação térmica, é de aceitar que as variações de temperatura ocorridas expliquem os valores das extensões finais registadas (ver subcapítulo 2.8.2.1).

Todos os provetes testados a 70°C apresentaram uma subida mais acentuada de extensão no início do ensaio, após a colocação das cargas, que depois estabilizou. Para os provetes testados a 23°C, essa subida inicial foi muito reduzida, o que significa que a extensão se manteve aproximadamente constante em todas as etapas do ensaio. Concluiu-se que a temperatura elevada, associada à adaptação do sistema à carga colocada, foi a causa desse aumento inicial de extensão.

Em relação aos dois provetes do lote C2 que sofreram uma deformação elevada, no caso do provete C2/SG1 - Ensaio 2, a 70°C, verificou-se no gráfico uma curva anómala com redução da extensão entre a segunda e a quinta horas, que correspondeu a uma leitura errónea do sensor. No caso do provete C2/SG2 - Ensaio 1, a deformação não se traduziu em qualquer anomalia do gráfico, possivelmente associado ao facto de ΔL_{final} ter sido bastante inferior, o que significa que o sensor não teve uma leitura adequada do estado do provete.

Capítulo 5

Conclusões

Neste capítulo, apresentam-se as conclusões deste estudo e propostas para trabalhos futuros.

5.1 Sumário das contribuições

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou uma análise exploratória da influência de sensores embebidos nas propriedades mecânicas à tração, flexão e fluência de um compósito sanduíche com núcleo de aglomerado de cortiça e *skins* de fibra de vidro e resina.

Relativamente à eficácia do método de *hand lay-up* utilizado, verificou-se que existiu alguma variabilidade durante a produção de provetes do mesmo lote e de lotes diferentes, devido às seguintes variáveis: variação da distribuição manual da resina; menor ação da pressão e da temperatura em provetes posicionados na zona mais periférica da prensa, causando variações de espessura; possível ocorrência de flutuações significativas na temperatura e na pressão, que ocorrem em diferentes tempos de fabrico. Para além dos problemas acima apontados, destaca-se a heterogeneidade do aglomerado de cortiça, associado ao seu processo de fabrico, que não é uma variável controlável.

No que concerne à incorporação de sensores em provetes produzidos por *hand lay-up*, testou-se inicialmente três abordagens diferentes, por não haver na literatura informação objetiva sobre qual a melhor metodologia. Optou-se pela terceira abordagem (extensómetro colado ao núcleo de aglomerado de cortiça e a solda e os fios que vão ser conectados ao sistema de aquisição ficam na interface, com a fibra por cima), uma vez que esta revelou ser a de mais fácil execução em laboratório e a que marcava menos o provete, em comparação com as restantes.

No caso dos sensores de Bragg embebidos, notou-se maior simplicidade na sua incorporação, uma vez que já tinham neles integrados os fios de ligação que conectavam com o sistema de aquisição, não sendo necessário efetuar a soldadura.

Todos os provetes com extensómetros embebidos permitiram ler os valores das extensões, tendo-se constatado que a terceira abordagem escolhida não danificou estes sensores. Relativamente aos sensores de Bragg, apesar de terem sido mais simples de embeber durante a produção, apenas um funcionou corretamente sem a ocorrência de dano, no provete de flexão. Um estudo com uma maior

amostragem, com a incorporação deste tipo de sensor, poderá ser testado no futuro, para uma análise mais aprofundada da sua eficiência.

Constata-se que o processo manual e simples de *hand lay-up*, utilizado para o fabrico dos provetes com sensores embebidos, é válido em contexto experimental académico, sendo no entanto importante minimizar os problemas, procurando controlar as variáveis que mais contribuem para a variabilidade dos resultados.

Nos ensaios de tração, o VIC-2D revelou ser um instrumento útil para a obtenção de um valor representativo do coeficiente de Poisson do material em estudo e para a comparação com os valores fornecidos pelos extensómetros embebidos. Nos provetes testados, verificou-se que os valores de extensão à superfície (lidos pelo VIC-2D) foram próximos dos valores de extensão na interface (lidos pelos extensómetros embebidos), o que significa que a incorporação do extensómetro na interface não interferiu na adesão entre a fibra e o aglomerado de cortiça. Isto sugere que a incorporação do sensor foi bem executada.

Nos dois lotes com provetes instrumentados, constatou-se que o valor do módulo de Young dos provetes sem sensores e com extensómetros embebidos foi inferior ao valor obtido pelos provetes com extensómetros à superfície. Esta diferença poderá ter sido devida à colagem à superfície do sensor, que introduziu um aumento da rigidez local. Relativamente à comparação entre os provetes sem sensores e os provetes com sensores embebidos, a discrepância entre os resultados dos dois lotes não permitiu tecer considerações sobre se as propriedades de rigidez desses provetes se alteraram significativamente com a integração dos extensómetros. Apenas num dos lotes, a rigidez não foi alterada com o embebimento dos sensores.

A análise das áreas permitiu constatar que ocorreu um aumento das DP relativos entre os valores de rigidez das três áreas com a presença dos sensores embebidos, comparativamente com os provetes sem sensores. Este resultado sugere que, para esta amostra, o material foi afetado de algum modo pela presença do sensor. Foi o sistema VIC que detetou essa diferença, o que significa que este sistema mostrou ser sensível à presença destes sensores e que, como tal, poderá ser utilizado no futuro como uma ferramenta útil no estudo de sensores embebidos. A incorporação do sensor de Bragg afetou as propriedades de rigidez do material à tração de forma mais significativa, como esperado, devido ao facto de ser um sensor mais rígido do que o extensómetro.

Nos ensaios de flexão, o cálculo da média da posição da linha neutra permitiu verificar que, apesar de bastante próxima do centro, resulta numa maior secção do provete à tração do que à compressão. No lote com extensómetros à superfície e embebidos, a DP entre os valores de E_F obtidos para os provetes com sensor embebido e sensor à superfície, em configuração de quarto de ponte, foi baixo, o que indica que a incorporação do extensómetro embebido teve sensivelmente a mesma influência na rigidez do que a colagem do extensómetro à superfície. Relativamente aos provetes com extensómetro e sensor de Bragg do mesmo lote, os valores de E_F determinados foram próximos, o que sugere que a incorporação dos dois sensores teve a mesma influência na rigidez do material.

Na análise da influência do sensor na resistência do material, verificou-se uma diminuição da resistência nos provetes com sensores embebidos, sendo que o modo de falha se situou na região junto

à solda dos sensores. Esta análise mostra que, apesar de o método de incorporação utilizado permitir uma boa leitura dos extensômetros, o modo como estes foram incorporados afetou a resistência do material e o modo de falha à flexão. Esta análise observacional sugere a necessidade de num estudo posterior, com uma amostra mais significativa, compreender melhor a influência do parâmetro da resistência na integração de sensores embebidos.

Nos ensaios de fluência, verificou-se que os provetes testados a 70°C apresentavam um maior valor de ΔL_{final} e uma maior variação inicial da extensão nas curvas de fluência, contrariamente aos provetes testados a 23°C. Isto permitiu constatar que a amostra do material em teste foi sensível à temperatura mais elevada, sendo que todas as leituras feitas através dos sensores embebidos traduziram essa diferença.

No geral, o número de provetes testado revelou-se reduzido para permitir extrapolar os resultados encontrados. Ainda assim, o estudo foi de encontro aos objetivos traçados, tendo permitido desenvolver conhecimento relativamente a este tema.

5.2 Trabalhos Futuros

Na sequência do estudo efetuado e face aos problemas encontrados, propõem-se alguns tópicos para trabalhos futuros:

- Validar os ensaios de tração, de modo a obter a carga máxima suportada pelo material, experimentando o método de colagem das peças metálicas com o adesivo 3M Scotch-WeldTM Epóxi DP490;
- Testar um maior número de provetes, com extensómetro e sensores de Bragg, de modo a ter uma amostra significativa que permita extrapolar resultados;
- Realizar ensaios de fluência com maior duração, que permitam aumentar a acuidade do estudo experimental sobre o comportamento à fluência do material;
- Realizar ensaios de envelhecimento acelerado como fadiga, vibração e efeitos da humidade de modo a caracterizar a longo termo os efeitos da incorporação dos sensores embebidos no comportamento do material;
- Efetuar uma simulação numérica para comparar com os resultados obtidos.

Bibliografia

- [1] Z.-M. Huang and Y.-X. Zhou. *Strength of fibrous composites*. Advanced Topics in Science and Technology in China. Zhejiang University Press AND Springer, Hangzhou, RPC and Berlin/Heidelberg, Germany, January 2012. ISBN: 978-3642229572/ 978-7308082686 doi: 10.1007/978-3642229589.
- [2] N. Takeda, N. S. Minakuchi, and Y. Okabe. Smart composite sandwich structures for future aerospace application-damage detection and suppression-: A review. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 1(1):3–17, January 2007. doi: 10.1299/jmmp.1.3.
- [3] Z. Li and M. J. Crocker. A review of vibration damping in sandwich composite structures. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 10(4):159–169, December 2005. doi: 10.20855/ijav.2005.10.4184.
- [4] E. S. Kocaman, C. Yilmaz, A. Deniz, and M. Yildiz. The performance of embedded fiber bragg grating sensors for monitoring failure modes of foam cored sandwich structures under flexural loads. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 20(20):553–577, September 2016. doi: 10.1177/1099636216664777.
- [5] C. Soutis. Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction. *Materials Science and Engineering: A*, 412(1):171–176, December 2005. doi: 10.1016/j.msea.2005.08.064.
- [6] Ilcewicz, L. B., Smith, P. J., Hanson, C. T., T. H. Walker, S. L. Metschan, G. E. Mabson, K. S. Wilden, B. W. Flynn, D. B. Scholz, D. R. Polland, H. G. Fredrikson, J. T. Olson, and B. F. Backman. Advanced technology composite fuselage: Program overview. technical report NASA contractor Report 4734, NASA, Langley Research Center, Hampton, Virginia, April 1997.
- [7] T. S. Gates, X. Su, F. Abdi, G. M. Odegard, and H. M. Herring. Facesheet delamination of composite sandwich materials at cryogenic temperatures. *Composites Science and Technology*, 66(14): 2423–2435, November 2006. doi 10.1016/j.compscitech.2006.01.028.
- [8] O. Castro, J. M. Silva, T. Devezas, A. Silva, and L. Gil. Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures. *Materials & Design*, 31(1):1425–432, January 2010. doi: 10.1016/j.matdes.2009.05.039.

- [9] S. Silva, M. Sabino, E. Fernandes, V. Correlo, L. Boesel, and R. Reis. Cork: properties, capabilities and applications. *International Materials Reviews*, 50(6):345–365, March 2005. doi: 10.1179/174328005x41168.
- [10] A. C. composites. Reinventing thermal protection, Janeiro 2008. https://amorimcorkcomposites.com/media/1095/brochure-aerospace_digital.pdf [Acedido em: 22 Setembro 2018].
- [11] Embraer. Projeto life é vencedor da crystal cabin award. Informação à imprensa, Marco 2012. http://life.inegi.up.pt/PressRelease-Life-Vencedor_do_Crystal_Cabin_Award.pdf [Acedido em: 22 Setembro 2018].
- [12] J. E. C. Economia. Consórcio português desenvolve eco-avião, Abril 2009. <https://expresso.pt/economia/consorcio-portugues-desenvolve-eco-aviao=f508734> [Acedido em: 22 Setembro 2018].
- [13] W. Broughton, L. Crocker, and M. Gower. Design requirements for bonded and bolted composite structures. Technical Report NPL Report MATC(A)65, National Physical Laboratory, Teddington, UK, January 2002. ISSN: 1473 – 2734.
- [14] G. C. Kahandawa, J. Epaarachchi, H. Wang, and K. Lau. Use of FBG sensors for SHM in aerospace structures. *Photonic Sensors*, 2(3):203–214, September 2012. doi: 10.1007/s13320-012-0065-4.
- [15] I. Garcia, J. Zubia, G. Durana, G. Aldabaldetrekua, M. A. Illarramendi, and J. Villatoro. Optical fiber sensors for aircraft structural health monitoring. *Sensors*, 15(7):15494 – 15519, June 2015. doi: 10.3390/s150715494.
- [16] G. Sala, M. Olivier, P. Bettini, and D. Sciacovelli. Embedded piezoelectric sensors and actuators for control of active composite structures. Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, Politecnico di Milano, Mechanical and Thermal Engineering Department, Carlo Gavazzi Space ESTEC, European Space Agency, 2004.
- [17] K.-S. Kim, M. Breslauer, and G. S. Springer. The effect of embedded sensors on the strength of composite laminates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 11(8):949–958, August 1992. doi: 10.1177/073168449201100806.
- [18] R. F. Gibson. *Principles of composite material mechanics*. Mechanical Engineering. CRC press, Florida, USA, 4 edition, February 2016. ISBN: 9781498720694.
- [19] J. N. Reddy. *Mechanics of laminated composite plates and shells: Theory and Analysis*. CRC press, Florida, USA, 2 edition, 2004. ISBN: 9780849315923.
- [20] J. W. D. Callister. *Materials science and engineering: an introduction*. John Wiley & Sons. Inc., New York, USA, 7 edition, 2007. ISBN: 978-0471736967.

- [21] I. M. Daniel and J. L. Abot. Fabrication, testing and analysis of composite sandwich beams. *Composites Science and Technology*, 60(12):2455–2463, September 2000. doi: 10.1016/S0266-3538(00)00039-7.
- [22] F. C. Campbell, Jr. *Manufacturing processes for advanced composites*. Elsevier, Oxford, UK, 1 edition, 2004. ISBN: 1856174158.
- [23] A. Petras. *Design of sandwich structures*. PhD thesis, Robinson College, University of Cambridge, Cambridge, UK, December 1998. doi: 10.17863/CAM.13989.
- [24] F. Correia. Desenvolvimento de um método de ensaios para o estudo da influência da fadiga e temperatura nas características mecânicas de materiais compósitos utilizados em revestimentos á base de cortiça. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, Novembro 2016.
- [25] E. Composites. *HexWeb tm honeycomb sandwich design technology*. Excel Composites, AGU 075b edition edition, Dezembro 2000.
- [26] M. Garcia. Characterisation of adhesive systems used to produce multi-layered composites made of natural materials. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, Novembro 2017.
- [27] W. Cantwell and P. Davies. A test technique for assessing core-skin adhesion in composite sandwich structures. *Journal of Materials Science Letters*, 13(3):203–205, January 1994. doi:10.1007/bf00278162.
- [28] S. K. Mazumdar. *Composites manufacturing: materials, product and process engineering*. CRC press, Florida, USA, 2002. ISBN: 0849305853.
- [29] P. Carvalho. Análise do comportamento mecânico e identificação do tipo de falha em estruturas sandwich com núcleos de cortiça. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, Novembro 2008.
- [30] L. Gil. *A cortiça como material de construção—Manual Técnico*. Associação Portuguesa de Cortiça, Santa Maria de Lamas, Portugal, APCOR edition, 2007. https://www.academia.edu/9138885/A_cortica_como_material_de_construcao [Acedido em 14 de Outubro de 2018].
- [31] Amorim. A cortiça – características. <https://www.amorim.com/a-cortica/caracteristicas/> [Acedio em: 14 de Outubro de 2018].
- [32] M. A. Fortes, M. E. Rosa, and H. Pereira. *IST Press*. 2006, Lisboa, 2 edition. ISBN:78-9728469337.
- [33] G. N. Greaves, A. Greer, R. Lakes, and T. Rouxel. Poisson's ratio and modern materials. *Nature materials*, 10(11):823 – 837, October 2011. doi:10.1038/nmat3134.
- [34] R. Jardim, F. Fernandes, A. Pereira, and R. A. de Sousa. Static and dynamic mechanical response of different cork agglomerates. *Materials and Design*, 68:121–126, March 2015. doi: 10.1016/j.matdes.2014.12.016.

- [35] A. Mestre and L. Gil. Cork for sustainable product design. *Ciencia & Tecnologia dos Materiais*, 23 (3-4):52 – 63, 2011.
- [36] L. Gil. Cork composites: a review. *Materials*, 2(3):776–789, July 2009. doi: 10.3390/ma2030776.
- [37] A. P. Duarte and J. C. Bordado. Cork—a renewable raw material: forecast of industrial potential and development priorities. *Frontiers in Materials*, 2(2):1–8, February 2015. doi: 10.3389/fmats.2015.00002.
- [38] M. Natali, J. M. Kenny, and L. Torre. Science and technology of polymeric ablative materials for thermal protection systems and propulsion devices: A review. *Progress in Materials Science*, 84: 192–275, September 2016. doi: 10.1016/j.pmatsci.2016.08.003.
- [39] S. S. Sáez, E. Barbero, and J. Cirne. Experimental study of agglomerated-cork-cored structures subjected to ballistic impacts. *Materials Letters*, 65(14):2152–2154, July 2011. doi: 10.1016/j.matlet.2011.04.083.
- [40] L. A. V. Carneiro and A. Teixeira. Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na engenharia de construção. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, 3: 54–66, 2008.
- [41] S. V. Hoa. *Principles of the manufacturing of composite materials*. DEStech Publications, Inc, Pennsylvania, USA, 2009. ISBN: 9781932078268.
- [42] P. Brøndsted, H. Lilholt, and A. Lystrup. Composite materials for wind power turbine blades. *Annual Review of Materials Research*, 35(1):505–538, August 2005. doi: 10.1146/annurev.matsci.35.100303.110641.
- [43] R. B. Deo, J. H. Starnes, and R. C. Holzwarth. Low-cost composite materials and structures for aircraft applications. In *NATO RTO Applied Vehicle Technology Panel (AVT) Specialists meeting, Loen, Norway, 2001*, Low cost composite structures - Session 1: Applications, Neuilly-Sur-Seine, France, 2003. RTO NATO.
- [44] P. M. B. Jorge. Optimização das condições de moldação de materiais compósitos para construção de ferramenta de reparação de defeito em radome de aeronave. Masters thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Setembro 2014.
- [45] J. Ribeiro. Avaliação do comportamento mecânico de estruturas compósitas tipo sanduíche de baixo peso específico utilizando materiais naturais. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, Novembro 2016.
- [46] D. G. T. S. Dias. Comportamento ao impacto a baixa velocidade de laminados de epóxido/fibra de vidro, com camadas de cortiça. Master's Thesis, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Janeiro 2009.

- [47] M. L. Costa, M. C. Rezende, and L. Pardini. Métodos de estudo da cinética de cura de resinas epóxi. *Polimeros: Ciência e Tecnologia*, 9(2):37–44, Abr/Jun 1999. doi: 10.1590/s0104-14281999000200011.
- [48] A. C. Loos and G. S. Springer. Curing of epoxy matrix composites. *Journal of composite materials*, 17(2):135–169, Março 1983. doi: 10.1177/002199838301700204.
- [49] B. Ellis. *Chemistry and technology of epoxy resins*. Springer-Science + Business Media, B.V, 1 edition, 1993. ISBN: 978-9401053020.
- [50] D. Miracle and S. L. D. V. chairs). *Composites*, volume 21 of *ASM handbook series*, chapter Epoxi Resins. ASM International, Ohio , U.S.A., 2001. ISBN: 978-0-87170-703-1.
- [51] B. T. Astrom. *Manufacturing of polymer composites*. CRC, Press, UK, 1 edition, September 1997. ISBN: 978-0748770762.
- [52] C. Henriques. Sensores embebidos em materiais compósitos. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, Outubro 2014.
- [53] M. A. Sutton, J.-J. Orteu, and H. Schreier. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic concepts, theory and applications*. Springer Science & Business Media, LLC, New York, USA, August 2009. ISBN: 978-0387787466.
- [54] Y. Zhou, C. Sun, Y. Song, and J. Chen. Image pre-filtering for measurement error reduction in digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, 65:46–56, February 2015. doi: 10.1016/j.optlaseng.2014.04.018.
- [55] M. Sutton, W. Wolters, W. Peters, W. Ranson, and S. McNeill. Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and vision computing*, 1(3):133–139, Agosto 1983. doi:10.1016/0262-8856(83)90064-1.
- [56] C. Solutions. *Vic-2d v6 testing guide*. Correlated Solutions, Columbia, South Caroline, USA. <http://www.correlatedsolutions.com/supportcontent/Vic-2D-v6-Testing-Guide.pdf> [Acedido em: 29 de Novembro de 2018].
- [57] C. Solutions. *Vic 2d reference manual*. Correlated Solutions, Columbia, South Caroline, USA, 2009. <http://www.correlatedsolutions.com/installs/Vic-2D-2009-Manual.pdf> [Acedido em: 29 de Novembro de 2018].
- [58] C. Solutions. *Vic-3d 2010 reference manual*. Correlated Solutions, Columbia, South Caroline, USA, 2010. <http://www.correlatedsolutions.com/installs/Vic-3D-2010-manual.pdf> [Acedido em: 29 de Novembro de 2018].
- [59] A. Garcia. Análise do campo de deslocamentos de vigas sandwich á flexão de 3 e 4 pontos. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, Outubro 2014.

- [60] E. Kottkamp, H. Wilhelm, and D. Kohl. Strain gauge measurements on aircraft. Technical report AGARD-AG-160-VOL. 7, AGARD Advisory Group for Aerospace Research and Development, North Atlantic Treaty Organization, 1976.
- [61] K. Hoffmann. *An introduction to measurements using strain gages*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, December 1989. http://www.gbv.de/dms/weimar/toc/590047132_toc.pdf [Acedido em: 27 de Abril 2018].
- [62] K. Hoffmann. *Applying the wheatstone bridge circuit*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, Darmstadt, Germany, January 1986. <http://eln.teilam.gr/sites/default/files/wheatstone%20bridge.pdf> [Acedido em: 27 de Abril 2018].
- [63] *Strain Gage Measurement - A Tutorial*. National Instruments Corporation, application note 078 edition, August 1998. http://elektron.pol.lublin.pl/elekp/ap_notes/NI_AN078_Strain_Gauge_Meas.pdf [Acedido em: 15 de Junho 2018].
- [64] L. M. P. Marques. *Optimização de processos de produção de sensores de Bragg em fibra ótica*. PhD Thesis, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2008.
- [65] A. B. L. Ribeiro. *Esquemas de multiplexagem de sensores de fibra ótica*. Phd thesis, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Outubro 1996.
- [66] A. Panopoulou, T. Loutas, D. Roulias, S. Fransen, and V. Kostopoulos. Dynamic fiber Bragg gratings based health monitoring system of composite aerospace structures. *Acta Astronautica*, 69(7-8):445–457, September 2011. doi:10.1016/j.actaastro.2011.05.027.
- [67] L. Ferreira, F. Araújo, A. Maia, P. Alves, and J. Santos. Redes de Bragg em fibra ótica contribuições para o desenvolvimento de uma tecnologia revolucionária em monitorização estrutural. Encontro Nacional Betão Estrutural, 2004. https://pedroantaoalves.files.wordpress.com/2013/02/redesbraggfo_enbe_2004.pdf [Acedido em 3 de Junho de 2018].
- [68] Y.-J. Rao. In-fibre Bragg grating sensors. *Measurement science and technology*, 8(4):355–375, April 1997. doi:10.1088/0957-0233/8/4/002.
- [69] T. Kleckers. Fibre Bragg sensors compared with electrical strain gauges for use in force measurement-prospects and potentials. In *XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology*, volume 1 of *TC3 – FORCE MEASUREMENT DEVICES*, page 420, Lisboa, Portugal, Setembro 2009. International Measurement Confederation, IMEKO. http://www.imeko2009.it.pt/Papers/FP_144.pdf [Acedido em 10 de Setembro de 2018].
- [70] G. Zhou and L. Sim. Damage detection and assessment in fibre-reinforced composite structures with embedded fibre optic sensors-review. *Smart Materials and Structures*, 11(6):925–939, October 2002. doi: 10.1088/0964-1726/11/6/314.

- [71] D. Hackney and K. Peters. Damage identification after impact in sandwich composites through embedded fiber Bragg sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 22(12): 1305–1316, October 2011. doi: 10.1177/1045389X11414220.
- [72] R. Ramly, W. Kuntjoro, and M. K. A. Rahman. Using embedded fiber Bragg grating (FBG) sensors in smart aircraft structure materials. *Procedia Engineering*, 41:600–606, December 2012. doi:10.1016/j.proeng.2012.07.218.
- [73] R. Ruzek, P. Kudrna, M. Kadlec, V. Karachalios, and K. Tserpes. Strain and damage monitoring in CFRP fuselage panels using fiber Bragg grating sensors. Part II: Mechanical testing and validation. *Composite Structures*, 107:737–744, January 2014. doi: 10.1016/j.compstruct.2013.09.056.
- [74] I. D. Madukauwa-David and M. Drissi-Habti. Numerical simulation of the mechanical behavior of a large smart composite platform under static loads. *Composites Part B: Engineering*, 88:19–25, March 2016. doi: 10.1016/j.compositesb.2015.10.041.
- [75] H. Zeng, R. Yan, L. Xu, and S. Gui. Application study on fiber Bragg grating sensors in damage monitoring of sandwich composite joints. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 0(0):1–22, July 2018. doi: 10.1177
- [76] S. Gururajan, K. Mitchell, M. Dreyer, and J. Glowacki. Design and flight tests of fixed wing UAS with embedded sensors, and custom DAQ hardware for long term monitoring of structural health. In *2018 Flight Testing Conference*, number AIAA 2018-4278 in FT-07: FLIGHT TESTING UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS, page 195, Atlanta, Georgia, June 2018. AIAA AVIATION Forum, American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi: 10.2514/6.2018-4278.
- [77] *NL20 Material Data Sheet*. Amorim Cork composites, core cork/ acc.764 edition, Setembro 2017. <https://amorimcorkcomposites.com/media/4203/mds-nl20.pdf> [Acedido em: 2 de Maio de 2018].
- [78] C. Composites. *UTE 205 P Technical Data Sheet*. Resinas Castro S. L., Pontevedra, Spain.
- [79] H. Silva. *Comportamento mecânico de compósitos de fibra de vidro/epoxy nano-reforçados*. Phd thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Julho 2014.
- [80] C. C. R. A. T. Resins. *RESOLTECH 1050: Hardeners 1053S to 1059S Technical Datasheet*. Resinas Castro S. L., Pontevedra, Spain, structural lamination epoxy system edition, March 2015.
- [81] M. Ramos. *Produção e caracterização de materiais compósitos á base de aglomerado de cortiça*. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, Novembro 2018.
- [82] G. Gomes. *Characterization and optimization of the production process of sandwich composite structures*. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, Novembro 2016.
- [83] *Strain Gauges First choice for strain measurements*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, Germany, hbm test and measurement edition. <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/S01265.pdf> [Acedido em: 5 de Setembro de 2018].

- [84] *Medição com strain gauges: Como prevenir efeitos indesejáveis de temperatura em seu resultado de medição*. HBM, in serviços e suporte edition. <https://www.hbm.com/pt/6725/artigo-compensacao-de-temperatura-de-strain-gauges/> [Acedido em: 5 de Setembro de 2018].
- [85] M.-M. VPG. *Strain Gage Selection: Criteria, Procedures, Recommendations*. Vishay Precision Group, Strain Gages and Instruments/ Tech Note TN-505-6 edition, May 2018. <http://www.vishaypg.com/docs/11055/tn505.pdf> [Acedido em: 5 de Setembro de 2018].
- [86] *M Series Encapsulated Foil - Strain Gauges Glass Fiber Reinforced Phenolic Carrier*. OMEGA HBM. <https://br.omega.com/omegaFiles/pressure/pdf/HBM-M-SERIES.pdf> [Acedido em: 5 de Setembro de 2018].
- [87] *FS62 Miniature Polyimide Strain Sensor: Instalation Guide*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, Germany, hbm test and measurement edition, May 2005.
- [88] *FS62 Composite Strain Sensor: Instalation Guide*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, Germany, HBM Test and Measurement edition, May 2005.
- [89] *FS62 Athermal Strain Sensor: Instalation Guide*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, Germany, HBM Test and Measurement edition, May 2005.
- [90] J. Azinheira. Sensores e actuadores. Departamento de Engenharia Mecânica, IST, Março 2002.
- [91] *NI 9237 datasheet*. National Instruments Corporation, Novembro 2015.
- [92] *Optical Sensing Interrogator sm125*. Micron Optics, Inc, Atlanta, USA, 2009.
- [93] *Sensing Analysis Software ENLIGHT*. Micron Optics, Inc., Atlanta, USA, 2012.
- [94] *ASTM D3039 D3039M - 00 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2000. doi: 10.1520/D3039-D3039M-00.
- [95] J. Pinheiro. Determinação experimental da rigidez complexa de um aglomerado de cortiça. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, Julho 2014.
- [96] *ASTM E132 - 04 Standard Test Method for Poissons Ratio at Room Temperature*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2004. doi: 10.1520/E0132-04.
- [97] *ASTM E111 - 97 Standard Test Method for Youngs Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 1997. doi: 10.1520/E0111-97.
- [98] *ASTM D882 - 02 Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2002. doi: 10.1520/D0882-02.
- [99] A. Braga and C. Braga. Instrumentação industrial. notas de aula. Universidade Federal de Minas Gerais e Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. http://www.cpdee.ufmg.br/~palhares/Instrumentacao_NotasAula.pdf [Acedido em: 10 de Setembro de 2018].

- [100] L. Dinis. Deformações. Universidade Federal de Minas Gerais e Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. <https://web.fe.up.pt/~ldinis/capitulo2.pdf> [Acedido em: 15 de Abril de 2019].
- [101] *ASTM C393-00, Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2000. doi: 10.1520/C0393-00.
- [102] *ASTM C393/C393M-11, Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2011. doi: 10.1520/C0393-C0393M-11.
- [103] R. Sequeira. Produção e caracterização experimental de uma nova estrutura compósita tipo sanduíche com baixo impacte ambiental. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, Novembro 2016.
- [104] F. Mujika, N. Carbajal, A. Arrese, and I. Mondragon. Determination of tensile and compressive moduli by flexural tests. *Polymer testing*, 25(6):766–771, September 2006. doi:10.1016/j.polymertesting.2006.05.003.
- [105] J. L. Banha. Análise comparativa de métodos de instrumentação para caracterização e monitorização de materiais compósitos. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, Outubro 2015.
- [106] F. P. Beer and E. R. Johnston Jr and J.T. DeWolf and D. F. Mazurek. *Mecânica dos Materiais*. AMGH Editora, Porto Alegre: Brasil, 7 edition, 2015. ISBN: 978-8580554991.
- [107] *ASTM D6272-00, Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2000. doi: 10.1520/D6272-00.
- [108] *ASTM D2990-01, Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep- Rupture of Plastics*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2001. doi: 10.1520/D2990-01.
- [109] N. Soares. Mechanical behavior characterization of planar and non-planar sandwich composite panels with agglomerated cork core. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, Março 2017.
- [110] M. Kreuzer. *Strain Measurement with Fiber Bragg Grating Sensors*. HBM GmbH, Darmstadt, Germany. http://micronoptics.ru/uploads/library/documents/FBGS_StrainMeasurement_mo.pdf [Acedido em: 4 de Dezembro de 2018].
- [111] N. I. Corporation. Connecting strain gages and shunt resistors to the ni-9237, Fevereiro 2009. <https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z000000PA73SAG&l=fr-LU> [Acedido em: 30 de Maio de 2019].

Apêndice A

Tabelas complementares aos resultados

A.1 Ensaio de Tração

A tabela 22 apresenta os valores de largura, comprimento e espessura dos provetes de tração fabricados e testados.

Tabela 22: Valores de largura, comprimento e espessura para os provetes de tração.

Lote	Identificador	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)
LOTE TA	TA1	19,9	200,0	8,4
	TA2	19,9	200,0	8,3
LOTE TB	TB1	20,0	200,0	8,0
	TB2	19,8	200,0	8,3
LOTE TC	TC1	19,8	200,0	7,5
	TC2	19,7	200,0	8,2
	TC3	20,0	200,0	7,3
	TC4	20,0	200,0	7,9
	TC5	20,0	200,0	8,2
	TC6	20,0	200,0	8,1
	TC7	50,0	200,0	8,1
LOTE TD	TD1	20,0	201,0	7,5
	TD2	20,0	201,0	7,6
	TD3	20,0	201,0	6,9
	TD/SG1/S	21,0	201,0	7,4
	TD/SG2/E	21,0	201,0	7,5
	TD/FBG1/E	20,0	201,0	7,6
LOTE TG	TE1	20,0	201,0	7,5
	TE2	21,0	201,0	7,8
	TE3	20,0	201,0	7,5
	TE/SG1/S	21,0	201,0	7,8
	TE/SG2/E	20,0	201,0	7,8

Importa referir que cada valor apresentado resulta da média de 6 medições (2 nas extremidades opostas e 1 no centro, para cada face do provete).

Seguidamente, são apresentadas as condições de teste de todos os provetes, onde se incluem o dia

e as horas (incluem o tempo do ensaio e o tempo de repouso do provete) em que foram concretizados e os valores das temperatura e humidade medidas antes e após cada ensaio.

Tabela 23: Condições de teste do provete TD/SG1/S.

N° ensaio	Dia	Hora de início	Hora de término	T_i (°C)	T_f (°C)	H_i (%)	H_f (%)
1° Ensaio	9/01/2019	9h50	10h20	20,4	20,5	53,0	52,6

Tabela 24: Condições de teste do provete TD/SG1/E.

N° ensaio	Dia	Hora de início	Hora de término	T_i (°C)	T_f (°C)	H_i (%)	H_f (%)
1° Ensaio	9/02/2019	12h15	12h35	20,9	21,1	51,3	50,8
2° Ensaio	9/02/2019	12h38	13h05	21,1	21,2	50,8	50,6
3° Ensaio	9/02/2019	13h10	13h43	21,2	21,3	50,6	50,4

Tabela 25: Condições de teste do provete TD/DBG1/E.

N° ensaio	Dia	Hora de início	Hora de término	T_i (°C)	T_f (°C)	H_i (%)	H_f (%)
1° Ensaio	13/02/2019	12h38	13h10	21,1	21,1	45,6	46,0
2° Ensaio	13/02/2019	13h15	13h51	21,1	20,8	46,9,3	47,0

Tabela 26: Condições de teste do provete TE/SG1/S.

N° ensaio	Dia	Hora de início	Hora de término	T_i (°C)	T_f (°C)	H_i (%)	H_f (%)
1° Ensaio	12/02/2019	14h30	14h55	21,1	21,0	47,0	47,7
2° Ensaio	12/02/2019	15h03	15h26	21,1	21,3	48,0	46,5
3° Ensaio	12/02/2019	15h30	15h55	21,3	21,2	46,6	47,0

Tabela 27: Condições de teste do provete TE/SG1/E.

N° ensaio	Dia	Hora de início	Hora de término	T_i (°C)	T_f (°C)	H_i (%)	H_f (%)
1° Ensaio	12/02/2019	12h25	12h50	21,3	21,3	45,3	45,0
2° Ensaio	12/02/2019	12h52	13h20	21,3	21,3	45,0	45,0
3° Ensaio	12/02/2019	14h15	14h35	21,3	21,1	46,8	47,0

Na tabela 28 são apresentados os coeficientes de Pearson (R^2) calculados para todos os declives obtidos através do modelo de regressão linear simples, para os provetes de tração dos lotes TD e TE.

Tabela 28: Valores do coeficiente de Pearson (R^2).

LOTE TD		LOTE TE	
Provetes sem sensores		Provetes sem sensores	
TF1	0,9343	TG1	0,9864
TF2	0,9029	TG2	0,9585
TF3	0,9387		
Provete com sensor à superfície		Provete com sensor à superfície	
TD/SG1/S		TE/SG1/S	
1ºEnsaio - Extensômetro	0,9995	1ºEnsaio - Extensômetro	0,9996
1ºEnsaio - Clip Gage	1	1ºEnsaio - Clip Gage	0,9999
		2ºEnsaio - Extensômetro	0,9999
		2ºEnsaio - Clip Gage	0,9999
		3ºEnsaio - Extensômetro	0,9999
		3ºEnsaio - Clip Gage	0,9999
Provete com sensor embebido		Provete com sensor embebido	
TD/SG1/E		TE/SG1/E	
1ºEnsaio - Extensômetro	0,9998	1ºEnsaio - Bragg	0,9997
1ºEnsaio - VIC	0,9929	1ºEnsaio - VIC	0,9139
2ºEnsaio - Extensômetro	0,9999	2ºEnsaio - Bragg	0,9997
2ºEnsaio - VIC	0,9689	2ºEnsaio - VIC	0,9514
3ºEnsaio - Extensômetro	0,9998		
3ºEnsaio - VIC	0,9879		

A.2 Ensaio de Flexão

A tabela 29 apresenta os valores de largura, comprimento e espessura dos provetes de flexão fabricados e testados.

Tabela 29: Valores de largura, comprimento e espessura para os provetes de flexão.

Lote	Identificador	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)
LOTE FA	FA1	50,3	320,0	8,8
	FA2	50,4	320,0	8,4
	FA3	50,5	320,0	9,1
LOTE FB	FB1	50,5	320,0	9,6
	FB2	50,3	320,0	9,4
	FB3	50,3	320,0	9,2
	FB/SG1/S	50,8	320,0	9,7
	FB/SG2/S	50,9	320,0	9,1
LOTE FC	FC1	50,0	321,0	9,1
	FC2	50,0	321,5	9,0
	FC/SG1/S	50,8	320,0	9,1
	FC/SG2/S	50,8	320,0	9,2
	FC/SG3/S	50,9	320,0	9,3
	FC/SG1/E	50,9	320,0	9,6
	FC/SG2/E	50,9	320,0	9,9
	FC/SG3/E	50,9	320,0	9,5
LOTE FD	FD/FBG1/E	50,0	322,0	7,5
	FD/SG1/E	50,0	321,5	7,8

Tabela 30: Condições de teste do provete FB/SG1/S.

N° ensaio	Dia	Hora de início	Hora de término	T_i (°C)	T_f (°C)	H_i (%)	H_f (%)
1° Ensaio Compressão	29/01/2019	14h12	14h32	21,4	21,4	54,3	54,2
2° Ensaio Compressão	29/01/2019	14h34	14h56	21,4	21,4	54,2	54,3
3° Ensaio Compressão	29/01/2019	14h57	15h19	21,5	21,4	54,0	54,0
1° Ensaio Tração	29/01/2019	15h20	15h52	21,4	21,8	53,3	53,2
2° Ensaio Tração	29/01/2019	15h57	16h24	21,9	21,5	53,0	53,8
3° Ensaio Tração	29/01/2019	16h25	16h56	21,5	21,7	53,8	53,8

Tabela 31: Condições de teste do provete FB/SG2/S.

N° ensaio	Dia	Hora de início	Hora de término	T_i (°C)	T_f (°C)	H_i (%)	H_f (%)
1° Ensaio Compressão	30/01/2019	11h23	11h50	20,9	21,2	57,3	56,5
2° Ensaio Compressão	30/01/2019	12h26	12h55	21,4	21,1	57,1	58,3
3° Ensaio Compressão	30/01/2019	12h57	13h25	21,2	21,2	58,1	58,0
1° Ensaio Tração	30/01/2019	15h20	15h52	21,4	21,8	53,3	53,2
2° Ensaio Tração	30/01/2019	15h57	16h24	21,9	21,5	53,0	53,8
3° Ensaio Tração	30/01/2019	16h25	16h55	21,5	21,7	53,8	53,8

Tabela 32: Condições de teste do provete FC/SG1/S.

N° ensaio	Dia	Hora de início	Hora de término	T_i (°C)	T_f (°C)	H_i (%)	H_f (%)
1° Ensaio Compressão	9/01/2019	17h54	18h20	21,0	20,8	43,7	42,3
2° Ensaio Compressão	9/01/2019	18h24	18h44	20,8	20,8	42,3	43,1
3° Ensaio Compressão	9/01/2019	18h46	19h15	20,8	20,8	43,1	44,0
1° Ensaio Tração	9/01/2019	19h17	19h35	20,8	20,9	44,0	44,0
2° Ensaio Tração	9/01/2019	19h35	19h50	20,9	21,2	44,0	42,9
3° Ensaio Tração	9/01/2019	19h51	20h05	21,2	21,0	41,9	43,5

Tabela 33: Condições de teste do provete FC/SG2/S.

N° ensaio	Dia	Hora de início	Hora de término	T_i (°C)	T_f (°C)	H_i (%)	H_f (%)
1° Ensaio Compressão	9/01/2019	11h36	11h57	20,3	20,3	38,8	38,7
2° Ensaio Compressão	9/01/2019	14h	14h31	20,3	20,1	39,1	39,6
3° Ensaio Compressão	9/01/2019	14h32	14h55	20,1	20,3	39,7	39,8
1° Ensaio Tração	9/01/2019	14h57	15h25	20,3	20,4	40,0	40,1
2° Ensaio Tração	9/01/2019	15h30	15h58	20,4	20,4	44,0	42,9
3° Ensaio Tração	9/01/2019	16h	16h20	20,4	20,5	40,6	40,3

Tabela 34: Condições de teste do provete FC/SG3/S.

N° ensaio	Dia	Hora de início	Hora de término	T_i (°C)	T_f (°C)	H_i (%)	H_f (%)
1° Ensaio Tração	9/01/2019	11h41	12h04	20,7	20,8	39,8	39,6
2° Ensaio Tração	9/01/2019	12h05	12h30	20,6	20,7	39,3	40,2
3° Ensaio Tração	9/01/2019	12h34	13h57	20,7	20,7	40,3	40,6
1° Ensaio Compressão	9/01/2019	14h	14h25	20,7	20,8	40,6	41,0
2° Ensaio Compressão	9/01/2019	14h26	14h48	20,8	21,5	40,9	40,5
3° Ensaio Compressão	9/01/2019	14h49	15h21	21,5	21,3	40,6	41,0

Tabela 35: Condições de teste do provete FC/SG1/E.

N° ensaio	Dia	Hora de início	Hora de término	T_i (°C)	T_f (°C)	H_i (%)	H_f (%)
1° Ensaio Compressão	3/01/2019	12h22	13h47	20,5	20,4	44,8	45,0
2° Ensaio Compressão	3/01/2019	13h48	14h15	20,4	20,4	44,9	44,6
3° Ensaio Compressão	3/01/2019	14h43	15h30	20,4	20,4	44,7	44,6
1° Ensaio Tração	3/01/2019	15h32	16h09	20,4	20,5	44,3	45,0
2° Ensaio Tração	3/01/2019	16h10	17h40	20,6	20,6	45,0	47,3
3° Ensaio Tração	3/01/2019	17h42	18h10	20,6	20,8	47,3	46,6

Tabela 36: Condições de teste do provete FC/SG2/E.

N° ensaio	Dia	Hora de início	Hora de término	T_i (°C)	T_f (°C)	H_i (%)	H_f (%)
1° Ensaio Compressão	10/01/2019	15h48	16h15	21,3	21,3	42,2	42,1
2° Ensaio Compressão	10/01/2019	16h16	16h45	21,3	21,4	42,0	42,2
3° Ensaio Compressão	10/01/2019	16h46	17h15	21,4	21,3	42,2	42,0
1° Ensaio Tração	10/01/2019	17h17	17h46	21,3	21,4	42,0	42,2
2° Ensaio Tração	10/01/2019	17h50	18h20	21,4	21,2	42,2	43,3
3° Ensaio Tração	10/01/2019	18h21	18h45	21,3	21,2	43,1	42,9

Tabela 37: Condições de teste do provete FC/SG3/E.

N° ensaio	Dia	Hora de início	Hora de término	T_i (°C)	T_f (°C)	H_i (%)	H_f (%)
1° Ensaio Tração	7/01/2019	13h45	14h16	20,3	20,3	36,0	36,1
2° Ensaio Tração	7/01/2019	14h17	14h48	20,3	20,3	36,1	35,6
3° Ensaio Tração	7/01/2019	14h50	15h18	20,4	20,6	35,5	34,7
1° Ensaio Compressão	7/01/2019	15h20	15h50	20,6	20,3	34,7	36,5
2° Ensaio Compressão	7/01/2019	15h52	16h30	20,3	20,8	36,3	37,0
3° Ensaio Compressão	7/01/2019	16h32	17h	20,8	20,7	36,6	37,3

Tabela 38: Condições de teste do provete FD/DBG1/E.

N° ensaio	Dia	Hora de início	Hora de término	T_i (°C)	T_f (°C)	H_i (%)	H_f (%)
1° Ensaio Compressão	20/12/2018	11h45	12h30	21,8	21,9	54,0	53,7
2° Ensaio Compressão	20/12/2018	13h03	14h20	21,8	22,2	53,7	52,0
3° Ensaio Compressão	20/12/2018	14h22	15h	22,2	22,2	53,0	53,6
1° Ensaio Tração	20/12/2018	15h34	16h55	22,2	22,8	53,6	52,0
2° Ensaio Tração	20/12/2018	16h55	17h30	22,8	22,9	52,7	52,9
3° Ensaio Tração	20/12/2018	17h31	17h55	22,9	23,1	52,8	53,2

Tabela 39: Condições de teste do provete FD/SG1/E.

N° ensaio	Dia	Hora de início	Hora de término	T_i (°C)	T_f (°C)	H_i (%)	H_f (%)
1° Ensaio Compressão	2/01/2019	14h18	15h05	20,7	20,9	49,0	49,3
2° Ensaio Compressão	2/01/2019	15h07	15h45	20,9	20,9	49,3	49,9
3° Ensaio Compressão	2/01/2019	15h47	16h27	21,0	21,0	50,8	49,9
1° Ensaio Tração	2/01/2019	16h28	17h	21,0	21,1	49,9	49,7
2° Ensaio Tração	2/01/2019	17h03	17h40	21,1	21,2	49,8	49,9
3° Ensaio Tração	2/01/2019	17h42	18h15	21,2	21,2	49,9	50,3

Na tabela 40, apresentam-se as médias e o desvios padrão (SD) dos módulos de elasticidade à flexão calculados através da equação 3.12. Para cada provete, apresentam-se as médias dos módulos com o sensor na face à compressão, $\overline{E_{BC}}$, e os módulos com o sensor na face à tração, $\overline{E_{BT}}$. Para comparar com os valores de $\overline{E_F}$, presentes na tabela 18, calcularam-se os erros relativos, definidos como sendo a razão entre o valor resultante da diferença entre $\overline{E_B}$ e $\overline{E_F}$, sobre o valor de $\overline{E_B}$.

Tabela 40: Erros relativos entre os valores de $\overline{E_F}$ e os valores de $\overline{E_{BT}}$ e $\overline{E_{BC}}$.

Lote	Provete	$\overline{E_{NC}}$	SD	$\overline{E_{NT}}$	SD	$\frac{Erro}{\overline{E_F/E_{BC}}}$ (%)	$\frac{Erro}{\overline{E_F/E_{BT}}}$ (%)
FB	FB/SG1/S	1992.9	4.46	1954.4	0.79	16.3	14.1
	FB/SG2/S	1681.6	4.08	1653.3	1.22	2.6	0.90
FC	FC/SG1/S	2061.9	1.43	2051.4	3.39	7.28	6.73
	FC/SG2/S	1817.8	1.76	1808.3	3.96	18.1	18.5
	FC/SG3/S	1958.3	2.81	1975.1	1.45	2.61	3.50
FD	FC/SG1/E	1452.9	1.23	1610.9	5.88	22.3	13.7
	FC/SG2/E	1499.5	0.98	1683.1	0.47	24.7	15.5
	FC/SG3/E	1518.8	7.49	1308.5	0.66	30.8	40.4
FD	FD/DBG1/E	2410.5	5.89	2217.3	1.71	12.5	19.5
	FD/SG1/E	2475.7	1.12	2348.9	7.02	6.78	11.6

A.3 Ensaios de Fluência

A tabela 41 apresenta os valores de largura, comprimento e espessura dos provetes de fluência fabricados e testados.

Tabela 41: Valores médios das medições da largura, comprimento e espessura para os provetes de fluência.

Nome Lote	Provete	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)
LOTE CA	CA/SG1	50,0	320,5	8,6
	CA/DBG1	49,8	320,3	8,5
LOTE CB	CB/SG1	50,7	320,0	7,2
	CB/SG2	50,5	320,0	7,7
LOTE CC	CC/SG1	50,8	320,0	8,4

Tabela 42: Condições de teste dos provetes de fluência.

Provete	Nº ensaio	Dia	Hora de início
C1/SG1	1º Ensaio 70°C	25/01/2019	10h17
	2º Ensaio 70°C	31/01/2019	9h22
	3º Ensaio 23°C	5/02/2019	10h20
C1/DBG1	1º Ensaio 70°C	30/01/2019	9h43
C2/SG1	1º Ensaio 23°C	6/02/2019	9h38
	2º Ensaio 70°C	21/02/2019	9h58
C2/SG2	1º Ensaio 70°C	26/01/201	10h20
C3/SG1	1º Ensaio 23°C	25/02/2019	10h20
	2º Ensaio 70°C	26/02/2019	10h37

Apêndice B

Imagens de suporte à extensometria

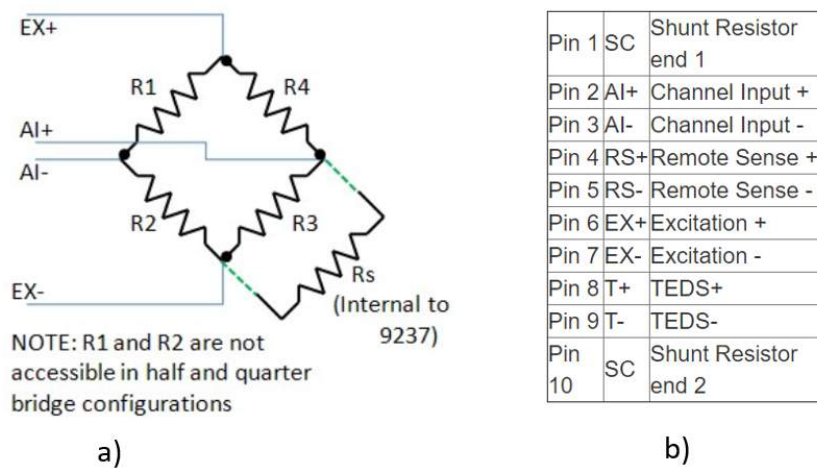


Figura 42: Placa de aquisição NI 9237: a) esquema de ligações e b) descrição dos pinos de ligação [111].

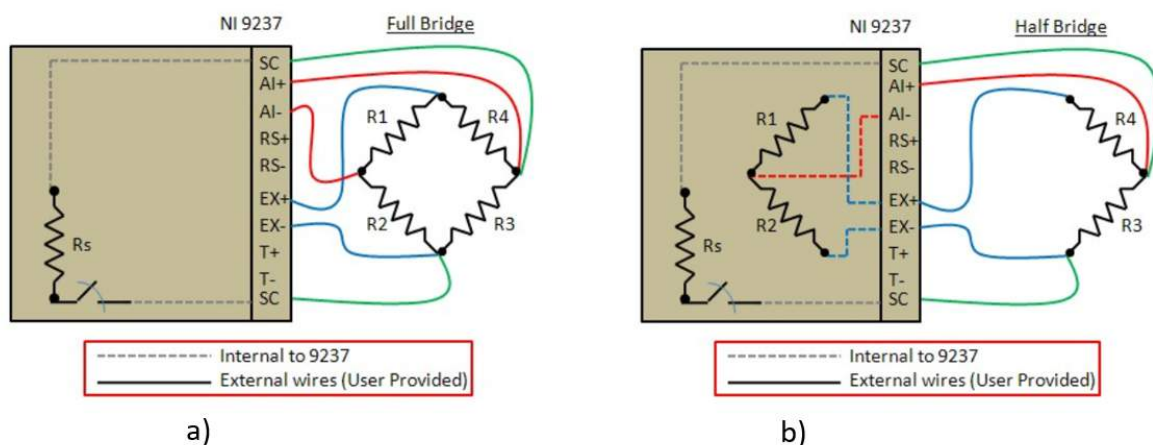


Figura 43: Esquema de ligações na placa de aquisição NI 9237: a) meia ponte e b) ponte completa [111].

