



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Monitorização da integridade de laminados de carbono/epoxy com sensores ópticos embebidos

Bruno Marques

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia de Gestão Industrial
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Tessaleno Campos Devezas
Co-orientador: Prof. Doutor Abílio Manuel Pereira da Silva

Covilhã, Outubro de 2013

Aos meus pais

Aos meus avós

À minha irmã

Agradecimentos

Este trabalho que aqui apresento não seria sido possível sem o acto solidário de algumas pessoas a quem desejo agradecer.

Agradeço ao Professor Doutor Tessaleno Devezas e ao Professor Doutor Abílio Silva, orientador e co-orientador, respectivamente, pela ideia de trabalho proposta, como também pela disponibilidade e apoio que sempre demonstraram para comigo.

Agradeço ao Professor Doutor António Espírito Santo por ter disponibilizado o sistema de aquisição de dados na realização deste trabalho assim como a ajuda na programação adaptando-o às necessidades pretendidas.

Agradeço ao Sr. Paulo Guerra pela disponibilidade e conhecimentos que me foram transmitidos na prática da fabricação dos laminados compósitos, como também à minha colega Liliana Freitas pela ajuda na construção dos provetes.

Agradeço à minha família por todo o apoio e motivação que me deram ao longo da realização deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos Tiago Maximino, Radu Godina, Diogo Macedo e João Madeira pelo apoio e amizade que sempre me demonstraram.

Resumo

Nesta dissertação é apresentado um trabalho de investigação inovador sobre a monitorização, em tempo real, de materiais compósitos com sensores ópticos embebidos sujeitos a ciclos de carga e descarga em regime elástico.

Os materiais compósitos possuem propriedades vantajosas sobre os metais e os materiais cerâmicos, nomeadamente a sua relação tensão/peso e a possibilidade de embebimento de sensores.

Neste trabalho foram utilizadas fibras ópticas na monitorização, em tempo real, de laminados de fibra de carbono com dois diferentes empilhamentos.

Foram fabricados laminados de fibra de carbono com três diferentes números de camadas (18,22,26), diferentes configurações de empilhamento, com e sem fibra ópticas (sensor) incorporadas, de modo a estudar as diferenças nas propriedades dos materiais compósitos com a incorporação da fibra óptica e na resposta do sinal óptico em função do posicionamento da fibra, do número de camadas e da sequência de empilhamento.

Os laminados foram testados à flexão com três pontos com um sinal luminoso constante nas fibras ópticas alimentado por um laser e recebido por um sensor de luminosidade. Os resultados foram obtidos através de um sistema de aquisição de dados que permitiu a obtenção sincronizada dos resultados da variação da potência do sinal óptico, dos dados da deformação e força aplicada.

Desta forma obteve-se a resposta com maior sensibilidade na detecção de deformações, na região elástica, para uma efectiva monitorização da estrutura, em tempo real, e possível aplicação na futura manutenção de sistemas.

Palavras-chave

Materiais compósitos, fibras ópticas, monitorização em tempo real, manutenção.

Abstract

This dissertation contains an innovative research work concerning the monitoring of composites, in real-time, subjected to cycles of loading and unloading in the elastic region, with embedded optical sensors.

Composite materials have advantageous properties over metal and ceramic materials, such as their tension/weight relation and the possibility of embedment of sensors.

In this work, optical fiber was utilized for monitoring in real-time the carbon fiber laminates with two different stacks.

The laminates of carbon fiber were manufactured with three different number of layers (18,22,26), different configurations of stacking, with and without optical fibers (sensor) incorporated, in order to study the differences in the properties of composite materials with incorporated optical fibers and the signal response according to the positioning of the optical fiber, number of layers and the stacking sequence.

The laminates were tested by bending with three points with a constant light signal in the optical fibers, fed by a laser and received by a light sensor. The results were obtained through a data acquirement system that allowed the synchronized attainment of results of the variation of the optical signal potency, data of the deformation and applied force.

Thus it was obtained the response with greater sensitivity for the deformation detection, in the elastic region, for an effective monitoring of the structure, in real time, and possible applications in future systems maintenance.

Keywords

Composites materials, optical fibers, monitoring in real-time, maintenance.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objectivos	4
2	Materiais Compósitos	5
2.1	Definição e constituição de material compósito	5
2.1.1	Matrizes e fibras de reforço	6
2.2	Tipos de materiais compósitos	9
2.3	Isodeformação e isotensão nos materiais compósitos	11
2.3	Vantagens, desvantagens e aplicações	13
3	Materiais sensoriais	15
3.1	Sensores	15
3.1.1	Fibra óptica	16
3.1.2	Redes de Bragg	17
3.3	Materiais piezoeléctricos	18
3.4	Fluidos electro-reológicos	18
4	Procedimento experimental	20
4.1	Materiais e métodos	20
4.2	Metodologia experimental de fabrico e ensaio	21
4.3	Problemas e dificuldades	27
5	Resultados e discussão	29
5.1	Laminados sem fibra óptica	29
5.2	Laminados com fibra óptica	33
6	Conclusão	46
6.1	Conclusões	46
6.2	Trabalhos futuros	47

Lista de Figuras

Figura 1 - Diferentes tipos de fibras de reforço de um material compósito [8]	6
Figura 2 - Alguns dos tipos de entrelaçados dos tecidos [10]	8
Figura 3 - Representação gráfica da importância dos materiais da matriz e de reforço para as diferentes propriedades de um material compósito [11]	9
Figura 4 - Classificação dos tipos de materiais compósitos [12]	10
Figura 5 - Modos de carregamentos nos materiais compósitos (a) longitudinal (b) transversal [14]	13
Figura 6 - Composição simples e modo de propagação do sinal luminoso nas fibras ópticas [19]	16
Figura 7 - Resposta de redes de Bragg a deformações uniformes (a) e não uniformes (b) [21]	17
Figura 8 - Efeito piezoelétrico numa molécula de quartz sujeita a tensão e compressão [23]	18
Figura 9 - Propriedades básicas de um material pré-impregnado [27]	21
Figura 10 - Constituição e sequência de um laminado [10]	22
Figura 11 - Esquema ilustrativo com dimensões e orientações das fibras cortadas (a) e exemplo de folhas de fibra de carbono cortadas (a)	22
Figura 12 - Provetes pré - fabricado com fibras ópticas embebidas e protecção superficial ...	23
Figura 13 - “Saco de vácuo” incompleto com visualização do material absorvente (a) e detalhe para a protecção das FO na parte posterior do material desmoldante (b)	24
Figura 14 - Saco de vácuo produzido completamente (a) e ligação ao autoclave pela válvula (b)	24
Figura 15 - Condições de cura no autoclave [27]	25
Figura 16 - Laser utilizado para produção do sinal luminoso (a) e máquinas de ensaios Instron (b)	26
Figura 17 - Linhas de comando do programa de aquisição de dados	26
Figura 18 - Provetes sujeito a flexão com demonstração do sinal luminoso na extremidade da fibra óptica	27
Figura 19 - Comparação da resposta mecânica dos laminados (A e B) de 18 camadas	30
Figura 20 - Comparação da resposta mecânica dos laminados (A e B) de 22 camadas	30
Figura 21 - Comparação da resposta mecânica dos laminados (A e B) de 26 camadas	31
Figura 22 - Evolução comparativa do comportamento mecânico dos provetes tipo A	32
Figura 23 - Evolução comparativa do comportamento mecânico dos provetes tipo B	32
Figura 24 - Evolução do comportamento mecânico dos provetes de 18 camadas tipo A e B...	34
Figura 25 - Evolução do comportamento mecânico dos provetes de 22 camadas tipo A e B...	34
Figura 26 - Evolução do comportamento mecânico dos provetes de 26 camadas tipo A e B...	35

Figura 27 - Evolução da resposta do sensor nos laminados de 18 camadas tipo A.	36
Figura 28 - Evolução da resposta do sensor nos laminados de 18 camadas tipo B	37
Figura 29 - Evolução da resposta do sensor nos laminados de 22 camadas tipo A	37
Figura 30 - Evolução da resposta do sensor nos laminados de 22 camadas tipo B	38
Figura 31 - Evolução da resposta do sensor nos laminados de 26 camadas tipo A	39
Figura 32 - Evolução da resposta do sensor nos laminados de 26 camadas tipo B	39
Figura 33 - Esquema da deformação de um laminado [28]	40
Figura 34 - Evolução do sinal óptico com a força aplicada à FO de cima dos laminados com 26 camadas tipo A.....	41
Figura 35 - Evolução do sinal óptico com a deformação à FO de cima dos laminados com 26 camadas tipo A.....	42
Figura 36 - Evolução do sinal óptico com a força aplicada à FO de baixo dos laminados com 26 camadas tipo B.....	42
Figura 37 - Evolução do sinal óptico com a deformação à FO de baixo dos laminados com 26 camadas tipo B.....	43
Figura 38 - Sequência da deformação de um laminado quando sujeito a testes de flexão [21]	44
Figura 39 - Ensaio de quebra de um provete de 22 camadas tipo A com variação de sinal óptico na fibra de cima	44

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características de algumas resinas termoendurecíveis [6]	7
Tabela 2 - Características de algumas fibras de reforço [6]	8
Tabela 3 - Provetes fabricados e respectiva caracterização e denominação	23
Tabela 4 - Valores da média de espessura dos laminados.....	29
Tabela 5 - Valores de força e tensão para as deformações de 1mm e máxima dos diferentes laminados	33
Tabela 6 - Valores de deformação e força relativos aos laminados com e sem FO.....	36
Tabela 7 - Resultados obtidos do raio de curvatura para os diferentes laminados e cargas ...	41

Lista de Acrónimos

EGI	Engenharia de Gestão Industrial
UBI	Universidade da Beira Interior
FO	Fibra(s) óptica(s)
T _g	Temperatura de transição vítrea
RTM	Resin transfer molding
VARTM	Vacuum assisted resin transfer molding
ρ_c	Densidade do material compósito
ρ_m	Densidade da matriz
ρ_f	Densidade da fibra de reforço
V_m	Volume fraccionário da matriz
V_f	Volume fraccionário da fibra de reforço
σ_c	Tensão do material compósito
σ_m	Tensão da matriz
σ_f	Tensão da fibra de reforço
E_c	Módulo elástico do material compósito
E_m	Módulo elástico da matriz
E_f	Módulo elástico da fibra de reforço
ε_c	Módulo de Young do material compósito
ε_m	Módulo de Young da matriz
ε_f	Módulo de Young da fibra de reforço
L_c	Alongamento total do material compósito
ΔL_c	Alongamento transversal do material compósito
ΔL_m	Alongamento transversal da matriz
ΔL_f	Alongamento transversal da fibra de reforço

Capítulo 1

1 Introdução

Neste capítulo introduz-se o trabalho referindo aspectos relativos a materiais compósitos, fibras ópticas e sistemas inteligentes assim como a importância que apresentam na manutenção de sistemas como também em outras diversas áreas. Também são apresentados os objectivos deste trabalho.

1.1 Enquadramento

O crescimento e sucesso de uma empresa dependem da ideia de negócio que comercializam e da inovação que transmitem mas principalmente da gestão aplicada nos diferentes sectores, tais como exemplo, a produção e a manutenção. Em geral, as empresas têm como principal objectivo obter o maior lucro possível com as suas vendas e para isso implementam estratégias de gestão que originam a diminuição de desperdícios e um aumento na produção aplicando métodos de produção e manutenção mais eficazes. No entanto, devido à competitividade existente provocada pela globalização, torna-se difícil para as empresas manterem-se no mercado sem que reduzam custos de produção e manutenção. Aspectos como a manutibilidade, fiabilidade e durabilidade têm grande relevância quando se trata na redução de despesas de uma linha de produção. A aplicação dum manutenção com uma tipologia inovadora nos mecanismos de uma empresa tem um enorme peso no sucesso da gestão aplicada. Directamente pode originar um aumento nas despesas, indirectamente impulsiona uma quebra na produção, tornando mais difícil o equilíbrio da balança receitas/despesas, daí que a utilização de materiais com mecanismos de controlo da durabilidade, fiabilidade e manutibilidade seja mais proveitosa para o sucesso da empresa.

No desenrolar dos tempos, verifica-se uma evolução nos materiais utilizados pelo Homem desde a madeira e pedra até aos metais e plásticos, materializando a ideia de que resistência não está relacionada com o peso do material. Actualmente os materiais compósitos são cada vez mais utilizados nas diversas áreas da industrialização, como exemplo, no ramo automóvel, aeronáutico, construções marítimas e civis. O sucesso deve-se às vantagens que têm sobre outros tipos de materiais sobretudo por apresentarem uma baixa densidade, elevada resistência mecânica e grande versatilidade de fabrico, tornando possível estruturas serem simultaneamente resistentes e leves.

Os compósitos de fibra de carbono são utilizados no fabrico dos mais diversos objectos e estruturas, com aplicação na área aeroespacial onde é exposto a condições extremas de pressão e temperatura e se sujeita a esforços mecânicos elevados, como também na constituição de objectos simples como é o exemplo de canas de pesca que têm de ser simultaneamente resistentes, flexíveis e leves.

As fibras de carbono possuem características muito vantajosas e actualmente já são muito utilizadas, estas que têm sofrido uma tremenda evolução no processo de fabrico, que juntamente com o aperfeiçoamento de resinas, e com a sua adição em proporções adequadas, obtêm-se materiais compósitos com melhores propriedades.

As fibras de carbono vieram revolucionar a área dos materiais passando assim a ser possível a construção de projectos anteriormente impensáveis, no entanto, ainda o que faz este material despertar mais interesse e que se destaque de outros, reside no facto de ser possível produzir um material ajustado às aplicações desejadas, variando a arquitectura do empilhamento, a natureza das resinas e das fibras, e/ou o processo de fabricação, o material então obtido, ajustar-se-á melhor ao tipo de solicitações a que vai estar sujeito [1].

As fibras ópticas possibilitaram a reflexão da luz dando origem a um método de transmissão de dados que revolucionou o mundo da óptica e das telecomunicações, tornando possível o envio de dados a velocidades enormes e com mínimas perdas de sinal. Porém com a descoberta do fenómeno da fotossensibilidade presente nas fibras ópticas, estas começaram a ser utilizadas como sensores pois apresentam propriedades mais vantajosas que sensores eléctricos. Imunidade a interferências electromagnéticas, pequenas dimensões, leves e a possibilidade de funcionarem em altas temperaturas, as fibras ópticas tornaram possível a obtenção de dados nos mais diversos ambientes que com a utilização de sensores eléctricos seria impossível.

A possibilidade de embebimento de fibras ópticas em materiais compósitos tornou possível a monitorização, em tempo real, do estado de integridade do material desde o fabrico até ao fim do seu ciclo de vida, o que leva a um controlo pormenorizado das condições de integridade dos materiais, o que possibilita a aplicação nas estruturas de uma tipologia de manutenção condicionada (preditiva).

Com esta possibilidade de embebimento ou “fusão” entre a fibra óptica e o “corpo” dos materiais compósitos, cria-se um novo campo para as estruturas inteligentes. Uma técnica de processamento adequada aos materiais compósitos permite o bom embebimento de sensores de fibra óptica no interior do material compósito. Estas estruturas podem ser parte de sistemas capazes de sentir alterações, de as interpretar e de reagir às mesmas, através do uso de actuadores [2].

A existência destes materiais inteligentes possibilitaram a construção de sistemas inteligentes, denominados assim pelo facto de conseguirem antecipar falhas, de se auto-

reparar e ainda por se adaptarem ao ambiente em que são utilizados [3]. Estes possuem um material estrutural, um material compósito, que dá integridade ao sistema que tem a capacidade de monitorização do seu estado através de sensores, por exemplo fibra óptica, responsável por transmitir informação aos actuadores. Estes caso seja necessário, podem reagir e até reparar a estrutura evitando maiores danos e consequências, caso de materiais piezoeléctricos ou de fluidos electro-reológicos.

Os sistemas inteligentes emparelhados com indústria podem resolver inúmeros problemas na produção e manutenção devido às capacidades sensoriais instantâneas que nos avisam das condições dos mecanismos de dano dos materiais. Também as capacidades de auto-reparação em tempo real aumentam a durabilidade, tornando a manutenção mais eficiente e conseqüentemente uma maior produção.

Os sistemas inteligentes também trazem vantagens para uma sociedade habituada ao conforto, por exemplo, a possibilidade de ajustar a reflectividade das vidraças das janelas do quarto para controlar a temperatura ambiente, o nível de luz, ou até fecharem automaticamente quando chove. Em Biomedicina, encontram-se outros exemplos, como o fabrico de pâncreas monitorizados, com respostas em tempo real, que libertam insulina consoante os níveis de açúcar no sangue. Na aeronáutica a utilização em asas de aviões e rotores de helicópteros permitiu avanços consideráveis ou em aplicações marítimas com melhores eficiências, menores vibrações e ruídos e maior vida útil reduzindo vibrações que podem causar fadiga estrutural [4].

Ao citar uma frase de Craig A. Rogers, considerado o pai dos materiais inteligentes, “There may be no application more important or more valuable than their utility in releasing the fundamental secrets of science that have alluded us thus far”; apercebemo-nos que os sistemas inteligentes podem ser utilizados em inúmeras áreas da ciência, na produção de novos instrumentos/mecanismos ou na concretização de ideias inovadoras.

1.2 Objectivos

Neste trabalho pretende-se aperfeiçoar o fabrico de provetes de fibra de carbono com fibras orientadas em diferentes formas (0° e 90°), com fibras ópticas embebidas em diferentes posições.

Pretende-se elaborar a análise da presença das fibras ópticas e a sua resposta com a influência do número de camadas, sequência de empilhamento e posição da fibra óptica.

Capítulo 2

2 Materiais Compósitos

Neste capítulo é apresentada uma descrição dos materiais compósitos onde é formada uma descrição da sua composição e classificação. Também são nomeados métodos de fabrico dos materiais compósitos e a importância que têm nas suas propriedades. São descritas as condições de isodeformação e isotensão nos materiais compósitos como também se revelam as suas vantagens, desvantagens e aplicações.

2.1 Definição e constituição de material compósito

Um material compósito é constituído pelo conjunto de dois ou mais materiais, de naturezas diferentes, que se completam e que permitem obter um material com performances superiores àquelas que os materiais que o constituem tinham separadamente. Num compósito distinguem-se, de um modo geral, uma ou várias fases descontínuas e uma fase contínua, separadas por uma interfase [5].

Os materiais compósitos são constituídos por uma matriz, cujo objectivo é aglomerar as fibras e proporcionar uma distribuição uniforme dos esforços a que o compósito está sujeito, como também proteger as fibras do ambiente envolvente; e por fibras de reforço que são as principais contribuintes para as propriedades mecânicas do conjunto [6].

A matriz mais comum de um material compósito é um polímero, mas pode também ser um metal ou uma cerâmica. As fibras de reforço podem ser longas ou curtas, unidireccionais ou multidireccionais, em modo de tecido ou não tecido, contínuas ou descontínuas (whiskers) [1,7], como se visualiza na figura 1.

Na figura 1 nota-se que as fibras de reforço melhor distribuídas num material compósito são as fibras contínuas e multidireccionais, no entanto, as fibras de reforço de partículas são as que apresentam uma distribuição mais aleatória sem apresentarem qualquer tipo de continuidade.

A conjugação entre a matriz e as fibras de reforço é o facto mais importante para a produção de um óptimo material compósito, a união entre a fase contínua e a descontínua por vezes origina uma fase adicional, interfase, originada pela interacção das duas fases que apesar de ter pequenas dimensões tem uma grande importância nas propriedades do

material, principalmente na propagação do dano e no tipo de ruptura quando este é sujeito a esforços.

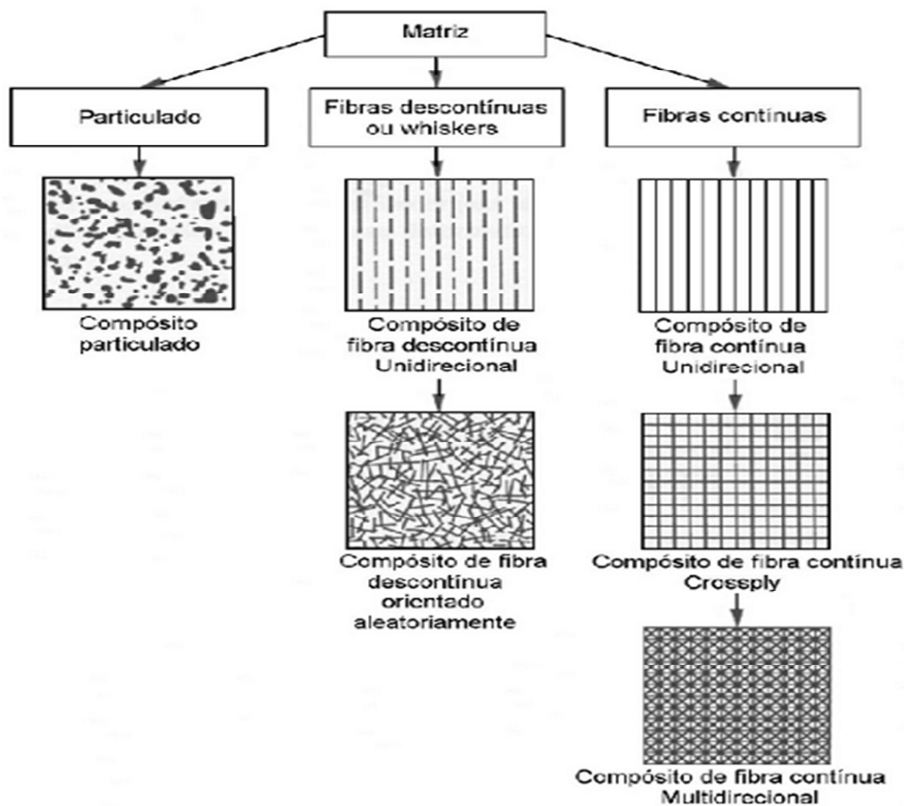


Figura 1 - Diferentes tipos de fibras de reforço de um material compósito [8]

2.1.1 Matrizes e fibras de reforço

As propriedades de um material compósito são resultado da conjugação entre o desempenho da matriz e do material de reforço, de modo a que se obtenha um material com as características pretendidas. Em geral, a matriz é um polímero, uma resina, que tem como função juntar e proteger as fibras de reforço, nas diversas condições a que podem estar sujeitas, daí que se torne importante a selecção da resina para a obtenção de um bom material compósito.

As resinas dividem-se em dois grandes grupos, as resinas termoendurecíveis e as termoplásticas. As resinas termoendurecíveis fundem em certas condições de pressão e temperatura passando por um processo de cura (polimerização) até obter o seu estado final, de uma outra forma as resinas termoplásticas fundem a altas temperaturas (T_g), e solidificam-se após o arrefecimento, sendo este um processo reversível, não necessitando de processo de cura. São exemplos de resinas termoendurecíveis epóxidos, fenólicos e

poliuretanos, assim como polietileno e polipropileno são resinas termoplásticas, diferenciando-se pelas características que cada uma apresenta. As resinas epoxídicas são muito comuns pois apesar de estarem dependentes da temperatura e do programa de cura, apresentam excelentes propriedades mecânicas, baixa absorção de água, boa resistência química, estabilidade dimensional, são auto-extinguíveis tendo uma boa resistência a abrasão e excelentes propriedades de adesão [9]. As resinas epoxídicas apresentam uma resistência à flexão maior que as resinas fenólicas, porém é a resina poliimida tipo PMR-15 que apresenta uma maior resistência à flexão porém também é uma das resinas com maior densidade, ver tabela 1.

Tabela 1 - Características de algumas resinas termoendurecíveis [6]

Resina	Densidade [ton/m ³]	T _g [°C]	Resistência à flexão [MPa]	Módulo elástico em flexão [GPa]	Alongamento na ruptura [%]
Epoxídica					
DGEBA	1,11 - 1,40	150	114	2,9	5 - 8
TGMDA	---	262	138	3,9	1 - 2
Fenólica	1,25 - 1,30	127	80 - 100	5 - 7	1 - 1,15
Poliimida					
PMR-15	1,43	340	176	4,0	1,1
Bismaleimida	---	>300	76	4,6	1,7
Poliéster insaturado	1,10	---	60 - 160	2,0 - 4,4	2,0

Responsáveis pelas propriedades mecânicas de um material compósito, existem várias fibras de reforço tais como, fibras de kevlar, fibras de vidro e fibras de carbono, estas são alguns dos tipos de fibras mais utilizadas nos materiais compósitos possuindo boas propriedades mecânicas e apresentando uma curva Tensão x Deformação superior à do aço, ainda que possuam uma densidade inferior.

Em geral, a fibra de reforço de carbono e de vidro quando são sujeitas às mesmas tensões, a fibra de reforço de vidro tem um módulo elástico à tracção e uma resistência à compressão menor que a fibra de reforço de carbono, ver tabela 2.

Na tabela 2, visualizamos a diferença entre os dois tipos de fibra de reforço kevlar 29 e kevlar 49. A fibra kevlar 29 apresenta um alongamento á ruptura maior que a fibra kevlar 49, no entanto, a fibra de reforço kevlar 49 apresenta um maior módulo elástico em tracção.

Os dois tipos de fibras de reforço de carbono apresentam diferentes características, ver tabela 2, no entanto, ambos os tipos de fibra de carbono apresentam um módulo elástico em tracção e uma resistência á compressão maior que a fibra de reforço de vidro e kevlar, e ainda possuem um alongamento à ruptura menor que as outras fibras de reforço.

As fibras de reforço podem ter diferentes comprimentos, isto é serem curtas ou longas, conforme os objectivos do material compósito a formar, contudo como estas são constituídas por uma grande quantidade de pequenos filamentos, é mais usual apresentarem-se na forma de tecidos e sob formas multidireccionais, em tecidos complexos e também com preformação [10].

Tabela 2 - Características de algumas fibras de reforço [6]

Fibra	Densidade [Kg/m ³]	Resistência à tracção [GPa]	Módulo elástico em tracção [GPa]	Alongamento na ruptura [%]	Resistência à compressão [GPa]
Vidro E	2580	3,45	72,5	4,9	>0,8
Vidro S	2490	4,6	85	5,7	>1,1
Carbono PAN	1700 - 1900	2,3 - 7,1	250 - 830	1,5 - 2,4	2,88
Carbono Piche	1600 - 2200	0,8 - 2,3	38 - 820	0,25 - 0,50	1,15
Kevlar 29	1440	2,9	62	4,0	0,4
Kevlar 49	1440	2,9	114	2,8	0,4

Nestes tecidos as fibras surgem entrelaçadas e com superfícies diferentes, devido às diferentes densidades das fibras e às diferentes maneiras de entrelaçado. Os tecidos mais usuais de encontrar são o tecido Tafetá, Twill e Unidireccional, ver figura 2.

Na figura 2 observa-se a composição do tecido Twill 2/2 no entanto existem outros tipos de tecido Twill dependendo do número de fibras longitudinais que se entrelaçam por um número de fibras transversais, e vice-versa.



Figura 2 - Alguns dos tipos de entrelaçados dos tecidos [10]

As fibras de reforço surgem também sob a forma de materiais pré - impregnados, que possuem um melhor manuseamento e melhores qualidades mecânicas, no entanto têm a desvantagem de serem conservadas a temperaturas negativas.

A boa ligação entre uma resina e as fibras de reforço faz com que seja possível o fabrico de um material compósito com excelentes propriedades mecânicas, contudo as condições e formas de fabrico são factores de diferença para que se obtenha um material com as características desejadas.

As propriedades de um material compósito derivam da matriz e das fibras de reforço que o constituem e as suas propriedades resultam em percentagem das características dos materiais que fazem parte da sua constituição, ver figura 3. Tal como foi referido anteriormente, as características, resistência e rigidez, de um material compósito são, em grande parte, da responsabilidade das fibras de reforço, enquanto características como resistência química e resistência térmica são, da mesma forma, responsabilidade da matriz, o que é observado na figura 3.

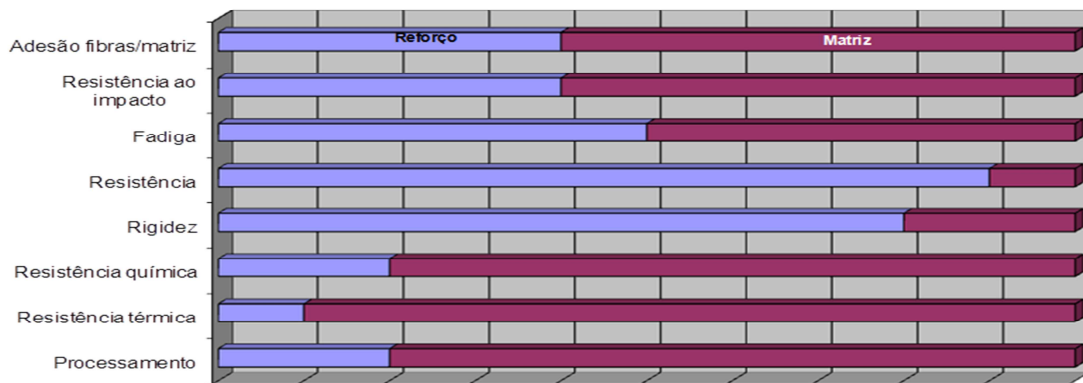


Figura 3 - Representação gráfica da importância dos materiais da matriz e de reforço para as diferentes propriedades de um material compósito [11]

2.2 Tipos de materiais compósitos e métodos de produção

Existe uma grande variedade de tipos de materiais compósitos diferenciando - se pelo tipo de materiais utilizados como reforço e pela diferente orientação e sequência do material de reforço, ver figura 4.

Na figura 4 está representada uma classificação dos materiais compósitos que são diferenciados pelo tipo de reforço, pela sua orientação e número de tipos de fibras de reforço no mesmo material compósito, caso dos materiais compósitos híbridos.

As diferentes constituições dos materiais compósitos fazem com que propriedades como a durabilidade, rigidez e resistência mecânica, entre outras, variem entre os materiais compósitos.

Os diferentes métodos de produção também têm efeitos nas propriedades dos materiais compósitos, sendo utilizados conforme o material que se quer obter e a aplicação que vai desempenhar.

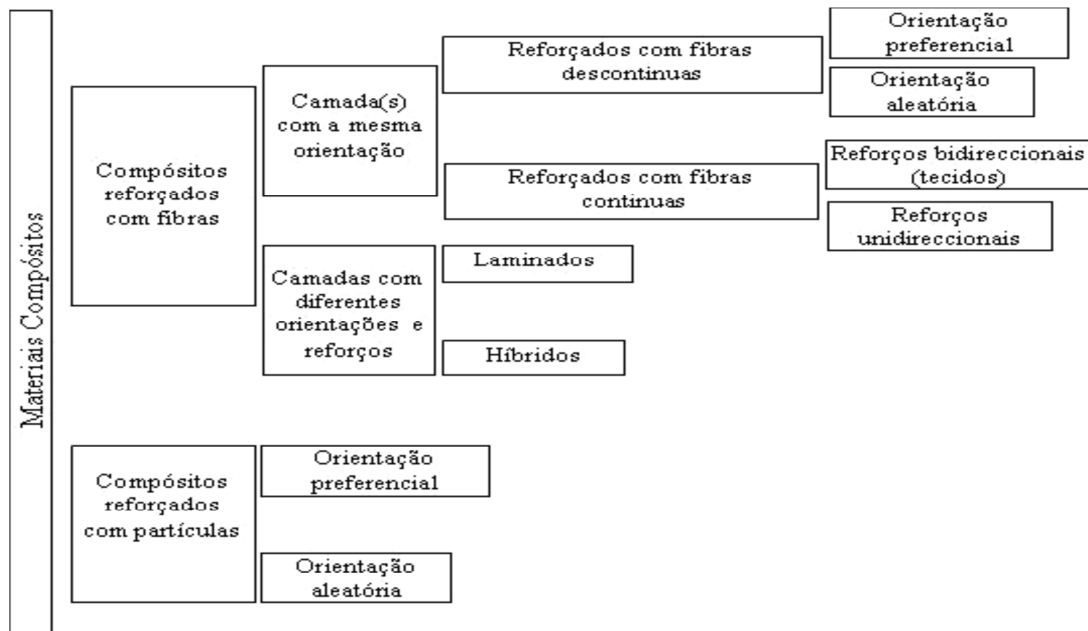


Figura 4 - Classificação dos tipos de materiais compósitos [12]

Existem diferentes métodos de produção de materiais compósitos que são identificados a seguir:

- Deposição manual
- Deposição por projecção
- Moldação a vácuo
- RTM e VARTM
- Autoclave (Pré - impregnados)
- Infusão
- Pultrusão
- Prensagem

Todos os métodos referenciados possuem vantagens e desvantagens e são de extrema importância para as propriedades dos materiais compósitos.

No método de autoclave as peças fabricadas são limitadas às dimensões do autoclave porém apresentam excelentes propriedades mecânicas e com espessuras muito reduzidas além de que é um dos métodos que provoca menor poluição no ambiente trabalho, no entanto requer um investimento elevado. O método de injeção RTM e VARTM possui as mesmas vantagens que o método de autoclave, porém necessita de um investimento ainda maior pois as peças são fabricadas em sistemas de moldes de elevado custo económico.

Dos processos anteriormente referidos os métodos de deposição manual e deposição por projecção são os mais simples e os que requerem um menor investimento no entanto as peças fabricadas apresentam baixa resistência mecânica além de que requerem uma grande mão-de-obra e o ambiente de trabalho fica poluído por gases tóxicos provenientes da resina utilizada.

Os métodos pultrusão e prensagem são os mais económicos pois apresentam uma grande reprodutibilidade e podem ser totalmente automatizados, no entanto requerem de um alto investimento.

Os métodos de moldação a vácuo e infusão requerem um baixo investimento e como as peças são feitas em moldes, não poluem significativamente o ambiente de trabalho mas necessitam de um longo tempo de trabalho sendo necessário uma formação específica [11].

2.3 Isodeformação e isotensão nos materiais compósitos

Os materiais compósitos são formados por uma matriz e por uma ou mais fibra de reforço que possuem diferentes valores de densidade, daí que a densidade de um material compósito dependa dos seus materiais constituintes.

Considerando a densidade da matriz, ρ_m , e a densidade da fibra de reforço, ρ_f , o volume fraccionário que cada material ocupa no material compósito por, V_m e V_f , então a densidade do material compósito é calculada da seguinte forma [13],

$$\rho_c = V_m \cdot \rho_m + V_f \cdot \rho_f \quad (1)$$

Quando um material compósito é sujeito a uma deformação longitudinal, em condições de isodeformação, ver figura 5(a), a deformação na matriz e nas fibras de reforço é exactamente igual, em que a tensão a que o material compósito é submetido é igual à soma das tensões exercidas na matriz e nas fibras de reforço,

$$\sigma_c = \sigma_m \cdot V_m + \sigma_f \cdot V_f \quad (2)$$

Pela lei de Hooke sabe-se que,

$$\sigma_1 = E_1 \cdot \varepsilon_1 \quad (2.1)$$

Logo, substituindo na equação (2) temos,

$$E_c \cdot \varepsilon_c = E_m \cdot \varepsilon_m \cdot V_m + E_f \cdot \varepsilon_f \cdot V_f \quad (2.2)$$

Simplificando a equação (2.2), obtemos a equação do módulo elástico em tracção para um compósito [13],

$$E_c = E_m \cdot V_m + E_f \cdot V_f \quad (2.3)$$

Em condições de isotensão, quando um material compósito é sujeito a uma deformação transversal, ver figura 5(b), a matriz e a fibra de reforço suportam a força, em que o alongamento transversal do compósito é igual à soma dos alongamentos da matriz e da fibra de reforço,

$$\Delta L_c = \Delta L_m + \Delta L_f \quad (3)$$

Ao dividir pelo alongamento total obtemos,

$$\frac{\Delta L_c}{L_c} = \frac{\Delta L_m}{L_c} + \frac{\Delta L_f}{L_c} \quad (3.1)$$

Ao substituir $\Delta L_c/L_c = \varepsilon$ na equação (3.1) e ao multiplicar pela fracção de volume obtemos,

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m \cdot V_m + \varepsilon_f \cdot V_f \quad (3.2)$$

Ao aplicar a lei de Hooke na equação (3.2) e ao substituir temos [13],

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \quad (3.3)$$

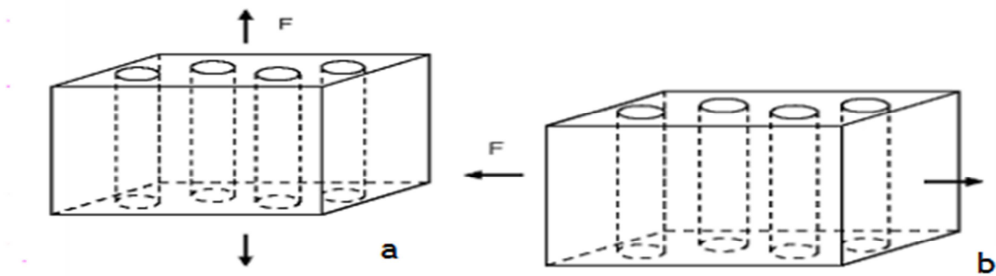


Figura 5 - Modos de carregamentos nos materiais compostos (a) longitudinal (b) transversal [14]

2.4 Vantagens, desvantagens e aplicações

Os materiais compostos actualmente são utilizados nas mais diversas áreas pelas consideráveis vantagens que apresentam. Possuem elevada rigidez e resistência específica, alta elasticidade e baixo coeficiente de dilatação térmica.

Começaram a ser utilizados em estruturas aeroespaciais e aeronáuticas, mas actualmente também se encontram em estruturas de máquinas como veios de transmissão, eixos LCD e em estruturas robóticas [15].

O uso destes materiais também já é relativamente comum na construção civil, com aplicações, nos revestimentos exteriores dos edifícios, na realização de painéis de fachada e reforços para betão [1,16]. Por outro lado, existem aplicações mais convencionais, como sejam, em piscinas, portas e mobiliário, nomeadamente o sanitário [1].

Devido às propriedades mecânicas destes materiais, deu-se o uso dos mesmos como materiais estruturais de pontes tanto pedonais como também para a passagem de viaturas ligeiras, são usados como reforço nas colunas de pontes em regiões sismicamente activas como na Califórnia e Japão [1].

Estes materiais são constituintes em grande parte de estruturas eólicas, nomeadamente as pás e torres pois por têm baixa densidade mássica, o que facilita o transporte e instalação.

Surgem também como materiais comuns nos transportes terrestres, aéreos e marítimos, devido a situações de segurança por apresentarem bons coeficientes de elasticidade e por absorverem bastante energia. Além de que, por serem leves, reduzem o peso destes veículos contribuindo para melhores consumos energéticos.

Muitos componentes usados em desportos já são fabricados em materiais compósitos, tais como tacos de golfe, raquetes de ténis, bicicletas e canas de pesca entre outros, aproveitando na maior parte as características de resistência mecânica e flexibilidade que estes apresentam.

Por serem biocompatíveis com o Ser-Humano, estes também são utilizados na construção de próteses pois conseguem apresentar características, tais como a densidade e módulo de elasticidade, bastante próximas do osso Humano assim como também apresentam uma elevada durabilidade.

Estas características fazem com que os materiais compósitos sejam aplicáveis em situações com solicitações extremas em que nenhum outro material consegue actuar, com propriedades similares, tornando a sua utilização mais comum a cada dia que passa. A resistência à corrosão e à fadiga são ainda uma mais-valia para estes materiais assim como a diversidade de características que se pode obter por variar um constituinte, por exemplo da matriz, ou a taxa de fibras, fazendo com que seja possível a “construção” de um material adequado a cada situação.

Porém estes ainda são materiais com elevado custo económico na aquisição assim como no seu fabrico fazendo por vezes não serem a primeira escolha para diferentes projectos. Outra desvantagem surge quando estes materiais são expostos a vibrações que lhes causam problemas por terem espessuras finas podendo criar fissuras nestes e reduzindo-lhes a resistência mecânica.

A nível ambiental, em alguns dos métodos de fabrico de materiais compósitos é necessário a libertação de gases na atmosfera e ainda não são recicláveis.

Capítulo 3

3 Materiais sensoriais

Neste capítulo é elaborada uma introdução aos sensores, focando as vantagens e aplicações que estes têm para as empresas, nomeadamente nos sectores da produção e da manutenção. São descritos sensores ópticos, tais como a fibra óptica e redes de Bragg, assim como materiais que apresentam características sensoriais, exemplo de materiais piezoeléctricos e fluidos electro-reológicos.

3.1 Sensores

Os sensores permitem que o utilizador seja informado sobre dados que a sua própria natureza não lhe consegue transmitir sob formas qualitativas e quantitativas, ajudando-o no controlo das mais diversas tecnologias existentes.

Na actualidade existem sensores eléctricos, mecânicos, ópticos, entre outros tipos, que informam e avisam, o seu utilizador, de vários factores, evitando acidentes ou até catástrofes, como será o caso de detectores de fumo alertando de incêndios, e sensores de vibrações avisando de colapsos estruturais. A presença de sensores de temperatura, de movimento, de pressão, entre outros, possibilita a transmissão de informações importantes na relação Máquina/Homem fazendo com que seja importante a presença de sensores também nos sectores de produção e de manutenção da Indústria.

A redução do tempo da manutenção é uma das principais vantagens da utilização de sensores devido à informação que transmitem sobre a condição do sistema. Os sensores informam quando e em que sistema se necessita de aplicar a manutenção correctiva, possibilitando uma produção máxima, sem a perda de tempo e conseqüentemente de dinheiro na aplicação de operações de manutenção desnecessárias.

Apesar da diversificação existente de sensores, actualmente, cada vez mais é propício a utilização de sensores ópticos, fibra óptica e redes de Bragg, devido à exactidão que apresentam e nos meios em que conseguem operar as suas funções podendo serem utilizados na detecção de temperaturas, vibrações, deformações, entre outros aspectos.

Existem também materiais sensores/actuadores que actuam consoante as informações que recebem, no entanto, ao contrário dos sensores ópticos, não são usualmente embebidos em materiais compósitos devido ao prejuízo estrutural (defeitos) causados pela sua presença.

3.1.1 Fibra óptica

A fibra óptica é utilizada largamente nas telecomunicações pela quantidade de informação que consegue transmitir a velocidades elevadas, no entanto, a descoberta da fotossensibilidade das fibras ópticas abriu uma nova gama de sensores.

A fibra óptica é constituída por um núcleo de fibra de vidro e por um revestimento de plástico, que dá resistência ao frágil núcleo condutor de luz, ver figura 6. A transmissão do sinal luminoso deve-se ao facto do índice de refração do material do núcleo ser maior que o do material de revestimento. Dependendo dos diferentes modos de propagação podem ser classificadas em monomodo ou multimodo.

As fibras monomodo e multimodo têm espessuras diferentes (2 a 12 μm e 25 a 75 μm , respectivamente) e têm utilidades diferentes. As fibras monomodo apenas permitem um sinal luminoso por fibra, têm uma maior banda passante e menor dispersão que as fibras multimodo.

As fibras multimodo requerem pouca precisão nos conectores, são fáceis de implementar e permitem o uso de fontes luminosas de baixa frequência. As fibras multimodo ainda podem ser divididas em fibras multimodo de índice degrau ou gradual dependendo dos materiais constituintes do núcleo [17].

Comparativamente com outro tipo de sensores, as fibras ópticas apresentam algumas vantagens que as tornam adequadas à utilização como componente sensorial em estruturas inteligentes. Entre as vantagens estão o seu baixo peso, as pequenas dimensões, e a sua imunidade à interferência electromagnética, a reduzida atenuação de sinal, a excelente resistência à corrosão, a facilidade de incorporação em materiais compósitos e a possibilidade de multiplexagem e de criar redes de sensores [1,18].

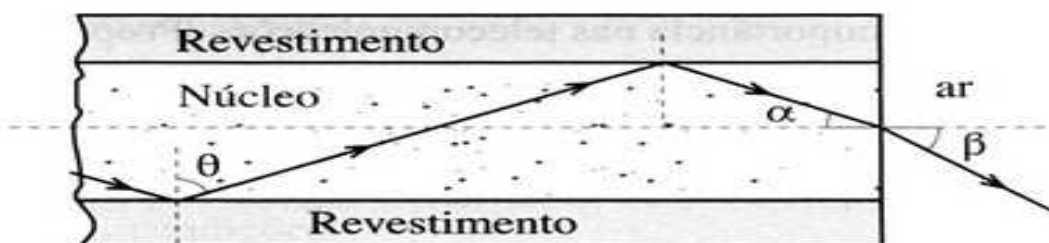


Figura 6 - Composição simples e modo de propagação do sinal luminoso nas fibras ópticas [19]

A fibra óptica possibilita a existência de aspectos sensoriais em estados e condições que nenhum outro tipo sensor consegue ter, exemplos de meios aquosos ou de elevada

temperatura como também em campos magnéticos, tornando-se assim bastante útil para desempenhar funções sensoriais.

3.1.2 Redes de Bragg

As redes de Bragg consistem na modulação periódica do índice de refração do núcleo da fibra óptica numa determinada zona da fibra escolhida.

Associadas às propriedades das fibras ópticas como a transmissão com baixas perdas, imunidade a campos electromagnéticos, isolamento eléctrico, as redes de Bragg embebidas numa fibra óptica conferem uma maior flexibilidade e versatilidade e são consideradas o futuro dos sensores em fibras ópticas, tal como são inovadoras na área das telecomunicações [1].

As redes de Bragg consistem na fabricação directa de microestruturas no núcleo das fibras ópticas por exposição transversal a padrões periódicos de radiação ultravioleta. Cada elemento individual da microestrutura é formado por irradiação pontual do núcleo da fibra, que provoca uma alteração localizada do índice de refração em relação às posições adjacentes não iluminadas [16].

Estes sensores têm uma série de grelhas paralelas impressas no núcleo de uma fibra óptica, com comprimentos de onda de luz específicos, que é reflectida a partir dos sensores quando uma luz de banda larga é acesa. Como o pico do comprimento de onda do sinal reflectido é proporcional ao período de grating, deformações axiais, temperaturas e ondas de ultra-som acústico podem ser medidas através do deslocamento do pico [20,21], entre outras dimensões, ver figura 7.

Na figura 7 observamos a resposta de uma rede de bragg a deformações uniformes e não uniformes, como também é observado, ilustrativamente, o método de funcionamento das redes de bragg.

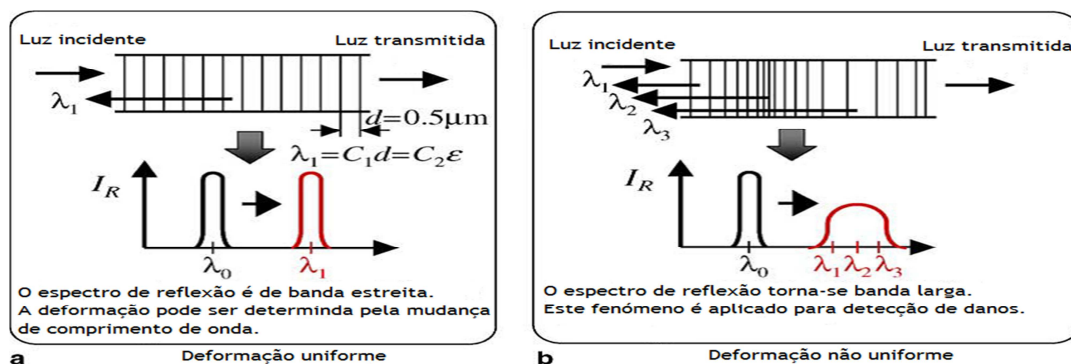


Figura 7 - Resposta de redes de Bragg a deformações uniformes (a) e não uniformes (b) [21]

As redes de Bragg são mais sensíveis que as simples fibras ópticas possuindo as mesmas características, porém têm um custo económico muito elevado o que faz com que não se usem muito em sistemas simples e sejam direccionadas a projectos da alta gama aeroespacial e aeronáutica nos quais é necessário uma enorme capacidade sensorial.

3.2 Materiais Piezoeléctricos

Os materiais piezoeléctricos são apresentados em estado sólido e reagem sobre duas formas inversas. Quando sofrem deformação geram campos eléctricos, efeito piezoeléctrico directo, ver figura 8; em contacto com um campo eléctrico deformam-se, efeito piezoeléctrico inverso, a partir destas características, os materiais piezoeléctricos são utilizados como actuadores ou sensores dependendo do efeito piezoeléctrico a que estão sujeitos.

De entre vários materiais, estes são principalmente constituídos por Títânio-Zirconato de Chumbo que lhes permite as características da piezoelectricidade. As aplicações da piezoelectricidade foram expandidas com a introdução de piezo-cerâmicos e piezo-polímeros. A melhoria notável em instrumentação envolve a combinação de sensores/actuadores piezoeléctricos com microprocessadores para a obtenção de estruturas inteligentes [22].

Na figura 8 observamos, ilustrativamente, o efeito piezoeléctrico quando uma molécula de quartz é submetida a deformações por tensão ou compressão.

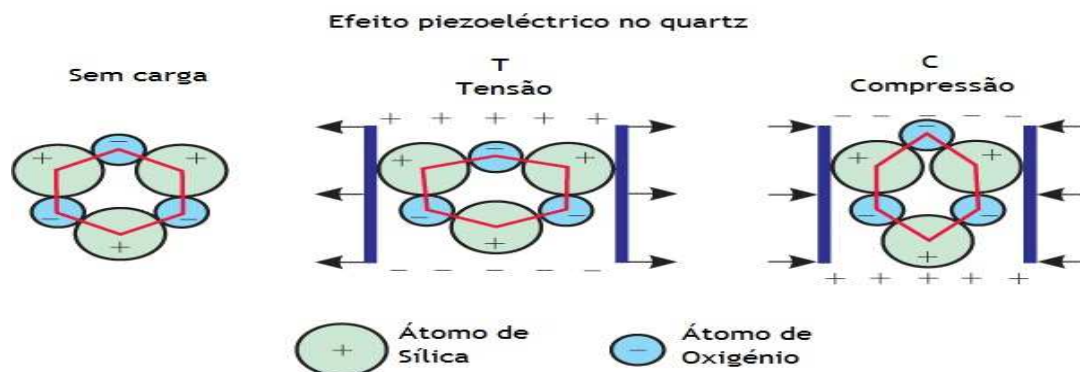


Figura 8 - Efeito piezoeléctrico numa molécula de quartz sujeita a tensão e compressão [23]

3.3 Fluidos electro-reológicos

Os fluidos electro-reológicos pertencem à classe geral de materiais inteligentes, cujas propriedades reológicas podem ser modificadas pela aplicação de um campo eléctrico [24],

tal como os materiais piezoelétricos. A aplicação de uma carga num fluido electro-reológico faz com que este altere o seu estado, passando de líquido para sólido num intervalo de tempo bastante curto.

Estes fluidos conseguem passar do estado líquido para o sólido pois conseguem aumentar a sua viscosidade em diversas ordens de magnitude quando presentes de um campo eléctrico [25].

São usados como sensores mas principalmente como actuadores para o controlo de vibrações em construções civis, tais como pontes e edifícios.

Capítulo 4

4 Procedimento Experimental

Neste capítulo descrevem-se e caracterizam-se todos os materiais, aparelhos e processos que foram utilizados na obtenção de resultados deste trabalho, desde os materiais utilizados na preparação dos laminados de fibra de carbono até à realização de testes à flexão dos mesmos.

4.1 Materiais e métodos

Neste trabalho foi realizada uma produção em autoclave, pois está direccionada ao uso de materiais pré-impregnados que têm condições de cura (polimerização) apenas alcançáveis no autoclave. Os materiais pré-impregnados são constituídos com quantidades de resina e de teor de fibras impostas pelo fabricante que apresentam diversos ciclos de cura.

Neste processo após a construção dos laminados com os empilhamentos desejados, estes são levados num “saco de vácuo” ao autoclave ligando-se a uma bomba de vácuo para que retire o ar existente neste.

No autoclave a temperatura e pressão são controladas e costumam variar consoante a resina do material pré-impregnado. Com este tipo de produção obtêm-se excelentes propriedades mecânicas devido à boa distribuição de resina pelas fibras de reforço e pela fracção mínima de resina. Normalmente os materiais pré-impregnados estão sujeitos a pressões entre os 5 e 7 bar e temperaturas entre os 120 °C a 170°C em vácuo permitindo a remoção de quaisquer zonas de ar dentro das peças a serem fabricadas.

Apesar de ser o trabalho mais limpo na produção de compósitos laminados e de se obterem excelentes resultados, este processo é indicado para produções limitadas e em estruturas com um alto grau de complexidade [26].

É um processo de elevado custo devido aos tempos de cura, materiais utilizados na produção do saco de vácuo e com a desvantagem de que é limitado às dimensões do autoclave, sendo assim utilizado para fabrico de peças específicas para aeronáutica, para a classe alta automóvel e artigos de desporto de elite.

Neste trabalho foram produzidos vários laminados com e sem fibra óptica (FO) embebida, de diferentes sequências de empilhamentos e espessuras. Todos os laminados que têm FO apresentam três FO incorporadas em três posições diferentes: zona de compressão, zona neutra e zona de tracção, de modo a verificar a fotossensibilidade das FO e quais as condições para obter o melhor sensor.

No fabrico dos laminados foi utilizado o material pré-impregnado de carbono com resina Epoxy, com orientação unidireccional fornecido pela empresa italiana Seal em rolos com comprimento de 100 m e com 60 cm de largura, Texipreg HS 160 REM. A duração de vida dos materiais pré-impregnados varia dependendo da temperatura a que são mantidos, ver figura 9.

<i>Typical Prepreg Properties:</i>	<i>Unit</i>	<i>Typical values</i>
Outlife @ 23°C	days	30
Storage life @ -18°C	months	12
Cured resin density	g/cc	1.2
Tg fully cured	°C	130
Gel time @125°C	min	12'00"±3'00"

Figura 9 - Propriedades básicas de um material pré-impregnado [27]

A fibra óptica utilizada é fabricada pela Newport, modelo F-MLD, é uma fibra óptica multimodo que opera em comprimentos de onda situados entre os 850-1300 nm, sendo o diâmetro do núcleo e de revestimento de $100\pm 4 \mu\text{m}$ e $250\pm 15 \mu\text{m}$, respectivamente, esta que é fornecida em rolos de 100 metros.

Todos os laminados foram fabricados em autoclave, com uma repetibilidade de 3 amostras e com a mesma área superficial apresentando as dimensões de $150 \times 25 \text{ [mm}^2\text{]}$ constituídos por camadas orientadas a 0° e 90° e com diferentes espessuras dependendo do número de camadas empilhadas em cada provete, de acordo com a norma ASTM D790.

4.2 Metodologia experimental de fabrico e ensaio

Na produção dos laminados começou-se pelo corte de folhas de material pré-impregnado de fibra de carbono com as dimensões anteriormente referidas segundo as orientações acima divulgadas.

Na figura 10 observa-se um exemplo da sequência de um compósito laminado composto por camadas com várias orientações. Note que as orientações das camadas na

literatura nem sempre são iguais, de referenciar os exemplos das camadas com orientações de 0° e 90° que na figura 10, segundo o eixo referencial, a orientação segundo o eixo das abcissas representa a orientação de 0° e a orientação segundo o eixo das ordenadas representa a orientação de 90° , porém se o eixo referencial adoptado apresentar eixos com orientações diferentes consequentemente que as camadas terão uma orientação diferente.

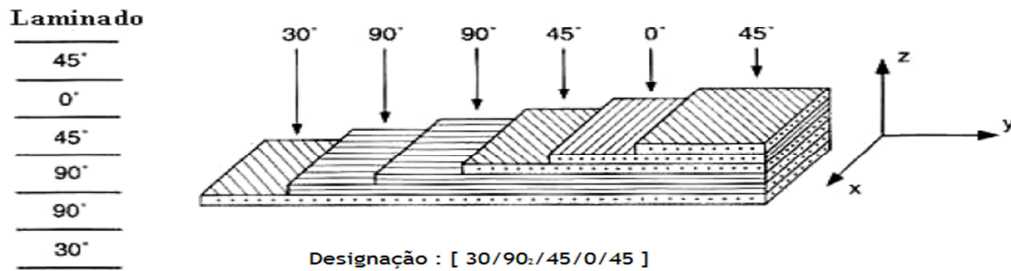


Figura 10 - Constituição e seqüência de um laminado [10]

A metodologia adaptada para o corte das folhas segundo orientações de 0° e 90° é diferente à metodologia ilustrada na figura 10. A metodologia utilizada é identificada na figura 11 e foi aplicada de igual forma na construção de todos os laminados.

Todas as folhas são cortadas com um x-acto e com o auxílio de uma régua e esquadro de forma a obter as medidas padrão em todos os laminados.

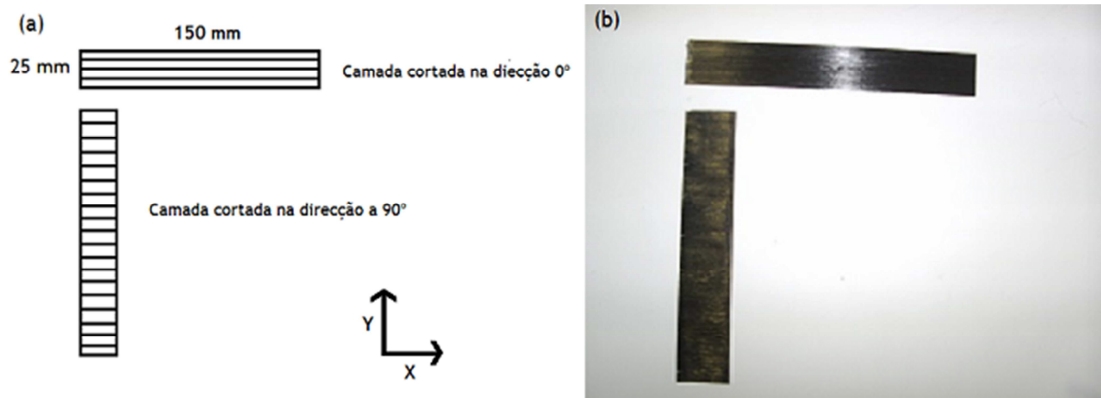


Figura 11 - Esquema ilustrativo com dimensões e orientações das fibras cortadas (a) e exemplo de folhas de fibra de carbono cortadas (b)

As tiras cortadas são empilhadas conforme a seqüência pretendida e no caso dos laminados com FO, esta é aplicada entre as respectivas camadas de acordo com a seqüência apresentada na tabela 3.

Na tabela 3 observamos as diferentes seqüências e correspondentes denominações associadas a cada laminado onde se diferem no tipo de empilhamento, no número de camadas e na posse de fibra óptica embebida. Na seqüência dos laminados, " 0_n " indica o número de

camadas cortadas na direcção de 0°, enquanto “90_n” indica o número de camadas cortadas na direcção de 90° (n=1,2), FO indica entre que camadas são inseridas as fibras ópticas.

Tabela 3 - Provetes fabricados e respectiva caracterização e denominação

Tipo	Camadas	Fibra óptica	Sequência	Denominação
A	18	Não	0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂	AN18
	18	Sim	0 ₂ 90 ₁ FO90 ₁ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₁ FO0 ₁ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₁ FO90 ₁ 0 ₂	AS18
	22	Não	0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂	AN22
	22	Sim	0 ₂ 90 ₁ FO90 ₁ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₁ FO90 ₁ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₁ FO90 ₁ 0 ₂	AS22
	26	Não	0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂	AN26
	26	Sim	0 ₂ 90 ₁ FO90 ₁ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₁ FO0 ₁ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₁ FO90 ₁ 0 ₂	AS26
B	18	Não	90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂	BN18
	18	Sim	90 ₂ 0 ₁ FO0 ₁ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₁ FO90 ₁ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₁ FO0 ₁ 90 ₂	BS18
	22	Não	90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂	BN22
	22	Sim	90 ₂ 0 ₁ FO0 ₁ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₁ FO0 ₁ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₁ FO0 ₁ 90 ₂	BS22
	26	Não	90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂	BN26
	26	Sim	90 ₂ 0 ₁ FO0 ₁ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₁ FO90 ₁ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₂ 90 ₂ 0 ₁ FO0 ₁ 90 ₂	BS26

Após a construção dos laminados com FO, ver figura 12, estes possuem uma protecção superficial para que não sejam envolvidas impurezas nas fibras que leve à criação de zonas de interfase.

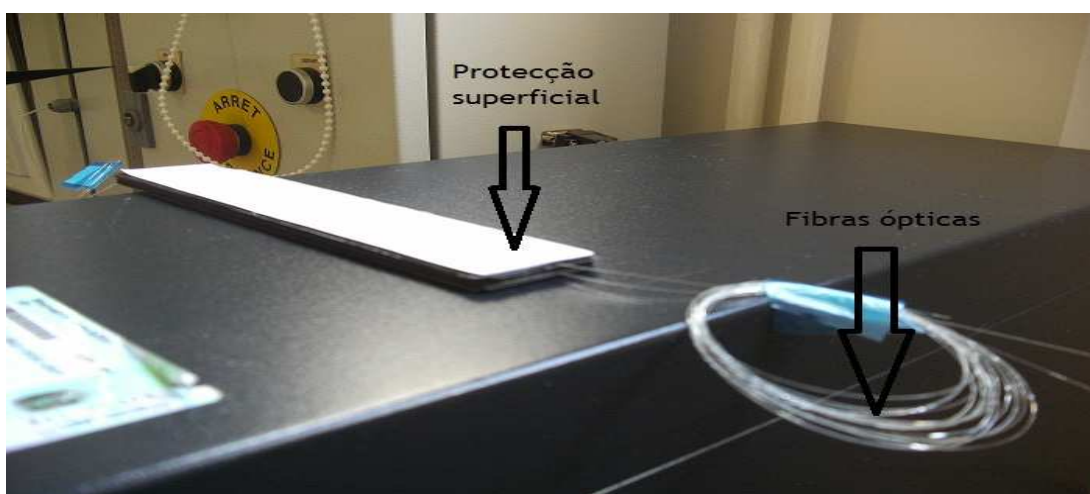


Figura 12 - Laminado pré - fabricado com fibras ópticas embebidas e protecção superficial

Os laminados são “curados” em autoclave, num “saco de vácuo”, onde os laminados são envolvidos por um material desmoldante (teflon, Release 234 TFP) e contornados por um material absorvente (nylon, Ultraweave), ver figura 13, para extrair o máximo de resina possível do material compósito. Para fixar o material absorvente ao material desmoldante é usada fita adesiva (poliéster, Flashbreaker) resistente ao calor de modo que esta não se danifique durante o tempo de cura no autoclave. O saco é constituído por um tipo de plástico resistente ao calor denominado por filme de vácuo (nylon para alta temperatura, Stretchlon

700) e no final é fechado através de uma máquina de selagem por termofusão, ficando apenas uma ligação entre a parte interior do saco e a parte exterior através de uma válvula na qual é ligada a uma bomba de ar para fazer vácuo no saco.

Na figura 13 visualiza-se algumas das fases do processo de fabrico do “saco de vácuo” e também se observa a protecção das FO que permanecem entre o material desmoldante e o filme de vácuo.

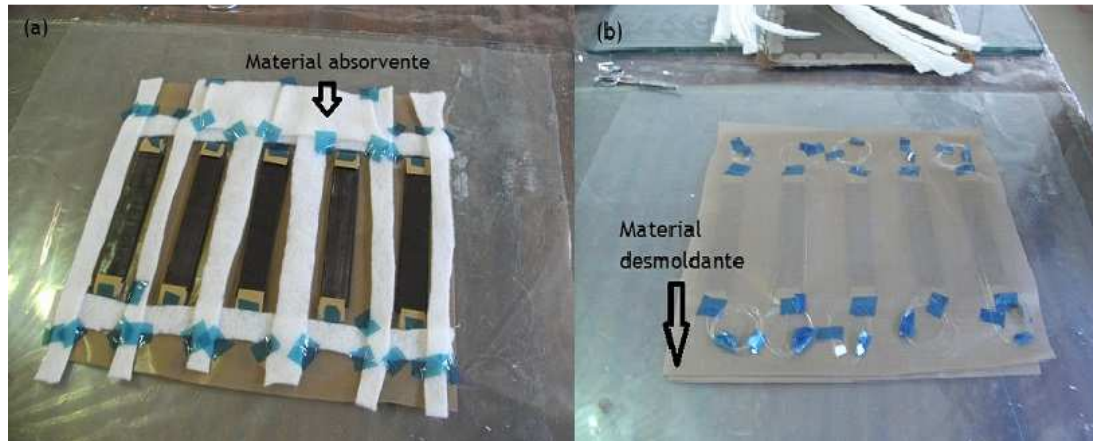


Figura 13 - “Saco de vácuo” incompleto com visualização do material absorvente (a) e detalhe para a protecção das FO na parte posterior do material desmoldante (b)

Na figura 14 observa-se um “saco de vácuo” totalmente produzido já com a introdução de uma válvula que faz a ligação com o autoclave e que permite a remoção do ar de dentro do “saco de vácuo” através de uma bomba de ar.

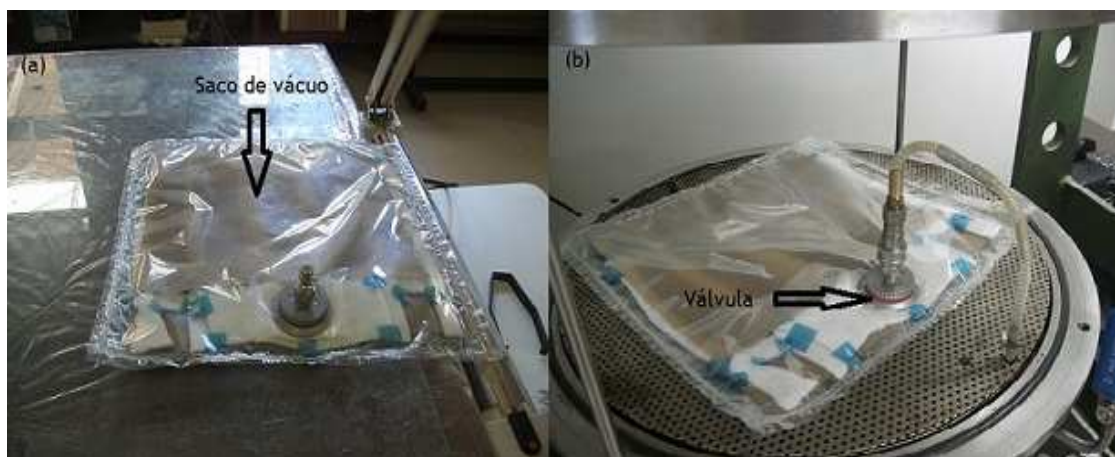


Figura 14 - Saco de vácuo produzido completamente (a) e ligação ao autoclave pela válvula (b)

No processo de cura em autoclave a temperatura no interior no saco de vácuo varia entre os 125°C e os 130°C para uma pressão na autoclave entre os 5,5 bar e 6,5 bar

mantendo-se nestas condições durante cerca de uma hora. As condições de cura variam conforme as características da matriz.

Na figura 15 observam-se as condições que o fabricante recomenda para o processo de cura no autoclave do material pré-impregnado.

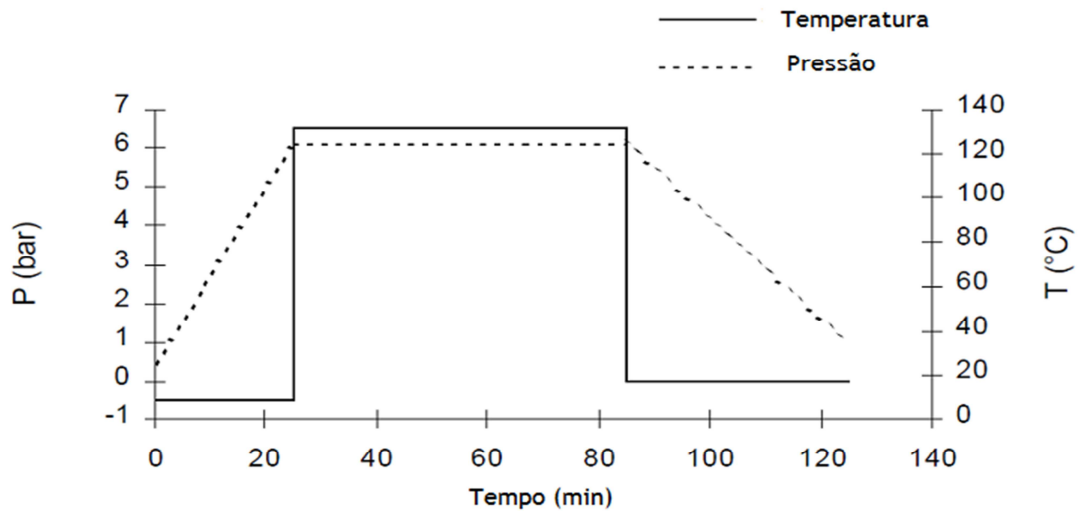


Figura 15 - Condições de cura no autoclave [27]

No fim do processo de cura no autoclave, os laminados são removidos do saco sem que as fibras ópticas incorporadas se danifiquem ou partam.

As fibras ópticas são tratadas para que se obtenham melhores resultados: é retirado o revestimento nas extremidades das fibras ópticas com a utilização de um x-acto e com a sua dissolução em acetona. As extremidades das fibras ópticas são clivadas (cortadas a 90°) para que se dê a passagem do sinal luminoso máximo.

Os laminados são ensaiados à flexão em 3 pontos, onde uma extremidade da fibra óptica recebe o sinal de um laser, da marca Melles Griot, ver figura 16(a), possuindo uma potência máxima de 10mW, enquanto a outra extremidade é inserida num sensor de luminosidade (referência NewPort-818-FAZ M), e leitor de potência óptica, da NewPort, modelo 835, que indica a potência instantânea do sinal luminoso.

Os ensaios são executados numa Instron 1341, ver figura 16(b), controlada pelo software, Instron Fast Track 8800, que faz a aquisição de resultados relativos à força aplicada e à consequente deformação presente nos laminados.

Na figura 16(a) também se observa o suporte de FO no qual é inserida a FO que é atingida pelo sinal luminoso proveniente do laser. O sinal luminoso é ampliado e focado com uma ocular que está acoplada ao suporte.

No output do aparelho controlador da máquina de ensaios é ligado um sistema de aquisição de dados, desenvolvido pelo Professor António Espírito Santo, que permite a aquisição dos valores do sensor de luminosidade através do Matlab.



Figura 16 - Laser utilizado para produção do sinal luminoso (a) e máquinas de ensaios Instron (b)

O software de aquisição de dados é activado por um sinal (degrau) enviado pelo output do sistema de controlo da máquina de ensaios Instron, precisamente quando se inicia o teste à flexão, ver figura 17, desta forma obtém-se resultados síncronos, de força, deformação e potência do sinal luminoso.

Na figura 17 observamos as várias linhas de comando de arranque do software de aquisição de dados, ou seja, na inicialização o programa compara o nível do sinal enviado pela máquina de ensaios Instron com o nível do sinal degrau e posteriormente caso se verifique o mesmo nível este dá ordem para que seja iniciado a transmissão de dados para o MatLab. O programa termina a transmissão de dados quando é pressionada qualquer tecla e após isso dá-se a saída do programa.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%   Visualização do nível do sensor   %
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc
clear

global nivel;

%inicializa o gráfico
nivel = [];

% Faz a inicialização das comunicações
str = input('Porta COM do sensor = ', 's');
s = serial(str);
set(s, 'BaudRate', 9600);

s.BytesAvailableFcn = @LevelPlot;
s.InputBufferSize = 7;
s.BytesAvailableFcnCount = 7;
s.BytesAvailableFcnMode = 'byte';
s.BytesAvailableFcn = @LevelPlot;

fopen(s);

%Executa o program que termina carregando numa tecla
pause

%saída do programa
fclose(s)
delete(s)
clear s
close all

```

Figura 17 - Linhas de comando do programa de aquisição de dados

Os ensaios realizados são feitos com um espaçamento entre apoios de 40 mm e com uma velocidade de 0,5 mm/min. Durante os ensaios apenas se testa uma fibra óptica de cada vez pelo que se tem de repetir o processo para as fibras ópticas posicionadas nas diferentes posições.

Durante os testes o sinal luminoso produzido pelo laser atravessa o laminado através da fibra óptica.

Na figura 18 visualiza-se o sensor de luminosidade e um sinal luminoso transmitido por uma FO, durante a ocorrência de um ensaio num provete (laminado).

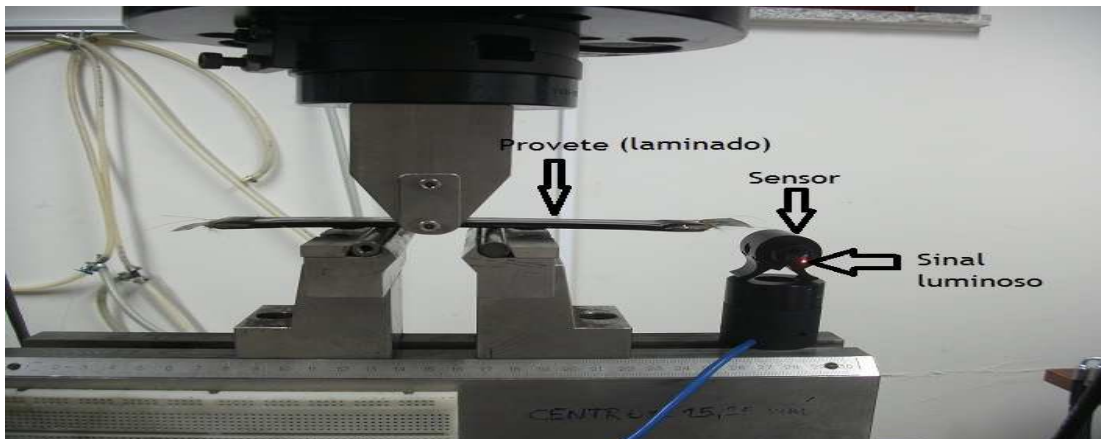


Figura 18 - Laminado sujeito a flexão com demonstração do sinal luminoso na extremidade da fibra óptica

4.3- Problemas e dificuldades

Durante o procedimento laboratorial surgiram alguns contratemplos que resultaram no prolongamento do trabalho experimental, porém também originaram um aperfeiçoamento tanto no processo de fabrico como nos ensaios dos laminados e consequentemente uma experiência ganha relativamente ao manuseamento dos materiais e das metodologias de fabrico.

Todos os laminados que apresentaram anomalias ou resultados distantes da normalização eram ignorados e procedeu-se à construção de novos laminados.

Encontraram-se problemas na protecção das FO durante a fabricação e cura dos laminados levando a que estes ficassem com resíduos de resina, o que afecta o manuseamento das FO, tornando-as menos flexíveis e mais frágeis.

A remoção dos laminados do “saco de vácuo” aquando as FO estão envolvidas por resina deve ser um processo muito cauteloso, pois o risco das FO se partirem é muito elevado.

Devido à fragilidade das FO surgiram alguns problemas, mesmo lmiandos aparentemente em condições para testar, na fase de ensaios verificou-se por vezes uma

quebra parcial, não - visível, das FO nas extremidades dos provetes apenas identificada com a visualização de sinal nas zonas referidas conseguindo na extremidade das FO existir sinal, porém estes provetes não foram tomados em conta.

Em outros casos as FO estavam totalmente partidas perdendo-se totalmente o sinal impossibilitando o prosseguimento do ensaio.

A introdução de um sinal constante e relativamente elevado nas FO foi também um aspecto em que existiu dificuldades devido a que são sistemas sensíveis que se podem alterar devido a ruídos.

Capítulo 5

5 Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios à flexão dos laminados. São discutidos valores de resistência mecânica, flexibilidade e variações da potência do sinal óptico dos diferentes laminados, com o intuito de tirar conclusões acerca da influência da sequência de empilhamento, posição da FO (sensor) e espessura do laminado.

5.1 Laminados sem fibra óptica

Os laminados sem FO foram fabricados com o intuito de caracterizar o comportamento mecânico (resistência e deformação) dos diferentes empilhamentos dos laminados e espessuras. Desta forma é possível fazer a comparação entre os laminados sem e com FO.

De modo similar, os laminados sem FO foram utilizados para determinar a região elástica dos provetes usando como valor máximo 80% da força máxima. Desta forma, pode-se executar os ensaios dos laminados com FO sem o risco de quebra dos laminados e consequente quebra das FO.

Na tabela 4 é apresentado o valor médio de espessura dos laminados de 18,22 e 26 camadas, obtido de seis diferentes laminados com o mesmo número de camadas.

Tabela 4 - Valores da média de espessura dos laminados

Laminado	Valor Médio de Espessura (mm)
18 camadas	2,7
22 camadas	3,3
26 camadas	4,0

Os primeiros resultados foram relativos aos ensaios dos laminados de 18 camadas, tipo A e B, nos quais se visualiza as diferenças no comportamento mecânico, ver figura 19.

Na figura 19 verifica-se que os laminados com empilhamento tipo A necessitam de uma força de aproximadamente 3 kN para originar uma deformação de 2 mm, enquanto os provetes tipo B apresentam uma maior deformabilidade pois com uma carga de 2 kN deformam-se aproximadamente 2 mm.

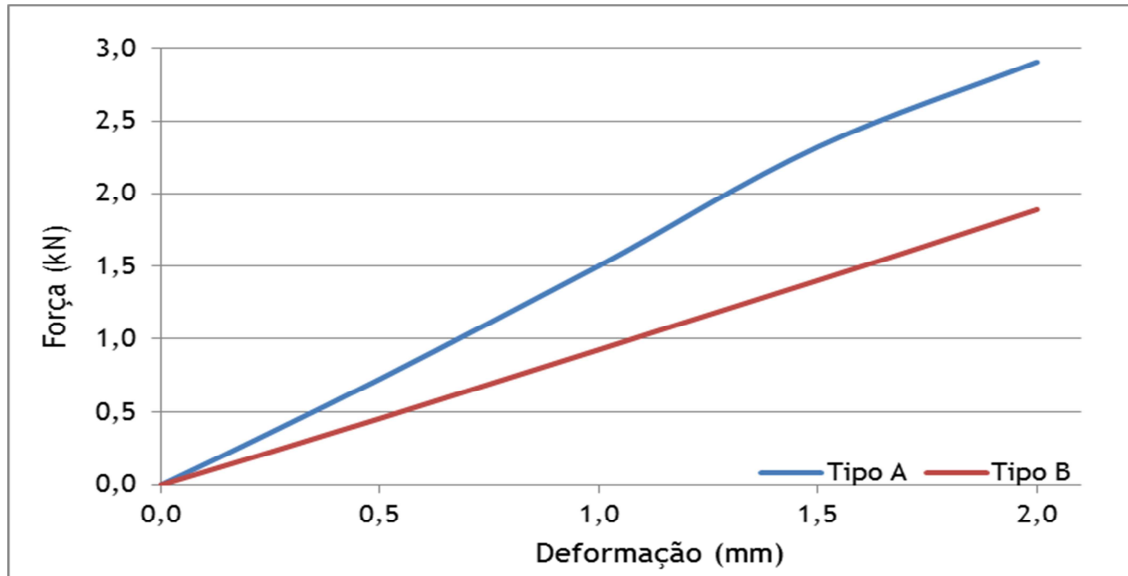


Figura 19 - Comparação da resposta mecânica dos laminados (A e B) de 18 camadas

O comportamento mecânico dos laminados de 18 camadas foi confirmado com o acréscimo da espessura, sendo a resposta semelhante para os provetes de 22 e 26 camadas, onde o empilhamento A apresenta maior resistência mecânica e o empilhamento B apresenta maior ductilidade, ver figuras 20 e 21.

Na figura 20 observa-se que os laminados de 22 camadas com empilhamento A necessitam de uma força de cerca 3,7 kN para que se deformem aproximadamente 1,5 mm.

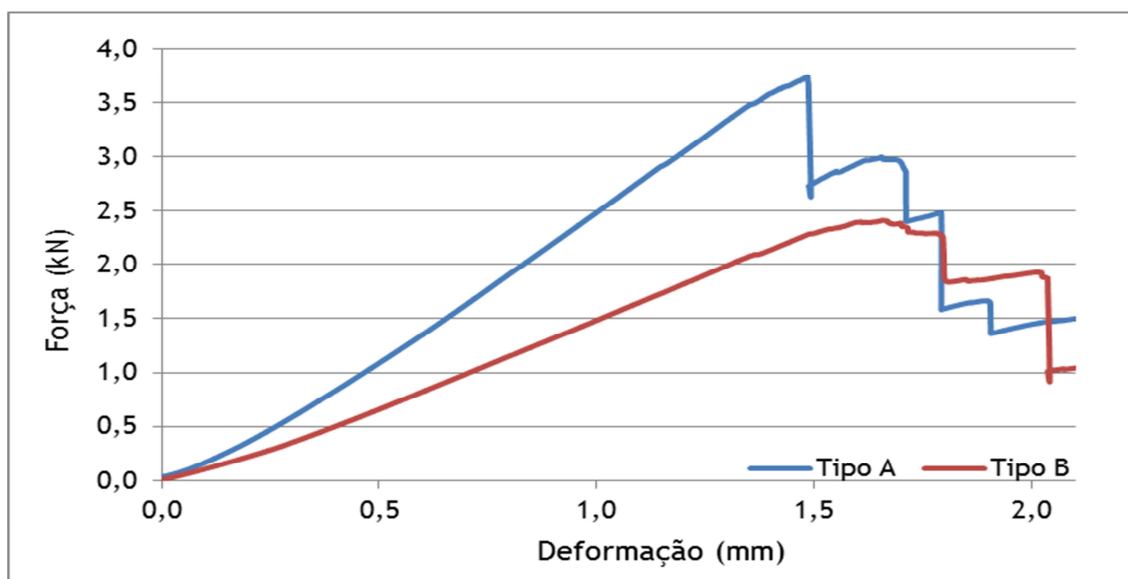


Figura 20 - Comparação da resposta mecânica dos laminados (A e B) de 22 camadas

Na figura 21 nota-se que os laminados de 26 camadas empilhamento B necessitam de uma força de aproximadamente 4 kN para que se deformem cerca de 1,5 mm.

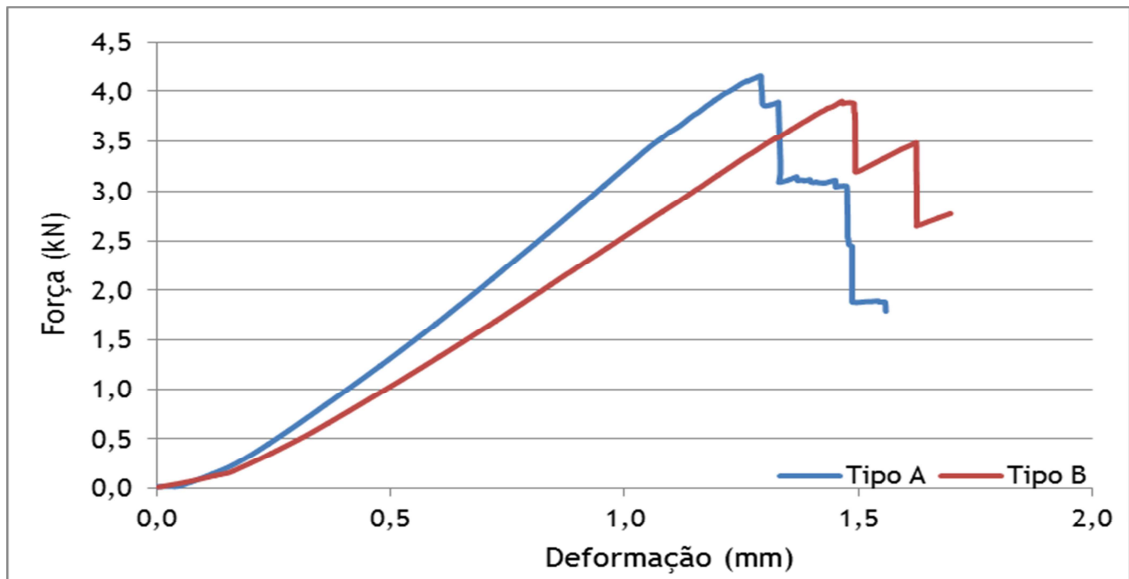


Figura 21 - Comparação da resposta mecânica dos laminados (A e B) de 26 camadas

Na observação dos resultados obtidos para os laminados de 22 e 26 camadas verifica-se a tendência em os laminados de tipo A serem mais resistentes e visualiza-se uma maior flexibilidade relativa aos laminados tipo B.

Estas observações mantêm-se para as diferentes espessuras mas é de se notar que os laminados de 18 camadas do tipo A possuem uma resistência maior, cerca de 33%, que os laminados de 18 camadas do tipo B no entanto os laminados de 26 camadas do tipo A apresentam apenas uma resistência superior em cerca de 8% relativamente aos laminados de 26 camadas tipo B. A diferença entre valores da resistência dos laminados do tipo A e B diminui com o aumento da espessura.

Não só a diferença entre os valores da resistência dos laminados diminui com o aumento da espessura, como também a flexibilidade diminui. Nos laminados do tipo A verifica-se uma queda de cerca de 35% no valor da flexibilidade quando se comparam os resultados dos laminados de 18 e 26 camadas, porém nos laminados do tipo B apenas existe uma queda de aproximadamente 25%.

A resistência mecânica nos laminados do tipo A aumenta de 3 kN (valor relativo aos laminados de 18 camadas) para um valor de 4,2 kN (valor relativo aos laminados de 26 camadas) o que indica um aumento de cerca 33%, porém nos laminados do tipo B existe um aumento de cerca 100% quando é comparado o valor da resistência dos laminados de 18 camadas (2 kN) e 26 camadas (3,9 kN).

De uma forma geral, podemos visualizar, para os diferentes tipos de laminados, a variação no comportamento mecânico relativo às diferentes espessuras, ver figuras 22 e 23.

Na figura 22 observa-se que os laminados de 18 camadas com empilhamento A apresentam uma deformação de 2mm, na existência de uma tensão de cerca de 1 GPa.

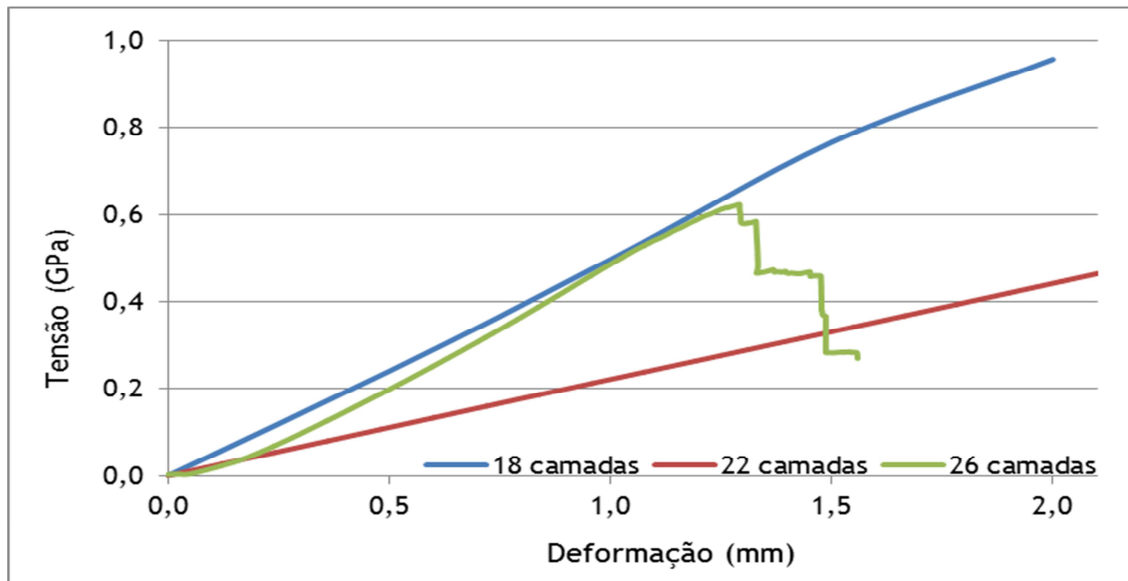


Figura 22 - Evolução comparativa do comportamento mecânico dos provetes tipo A

Na figura 23 nota-se que os laminados de 18 camadas com empilhamento B necessitam cerca de 0,6 GPa para se deformarem 2mm. Os laminados de 26 camadas quebram quando sujeitos a uma tensão de 0,6 GPa.

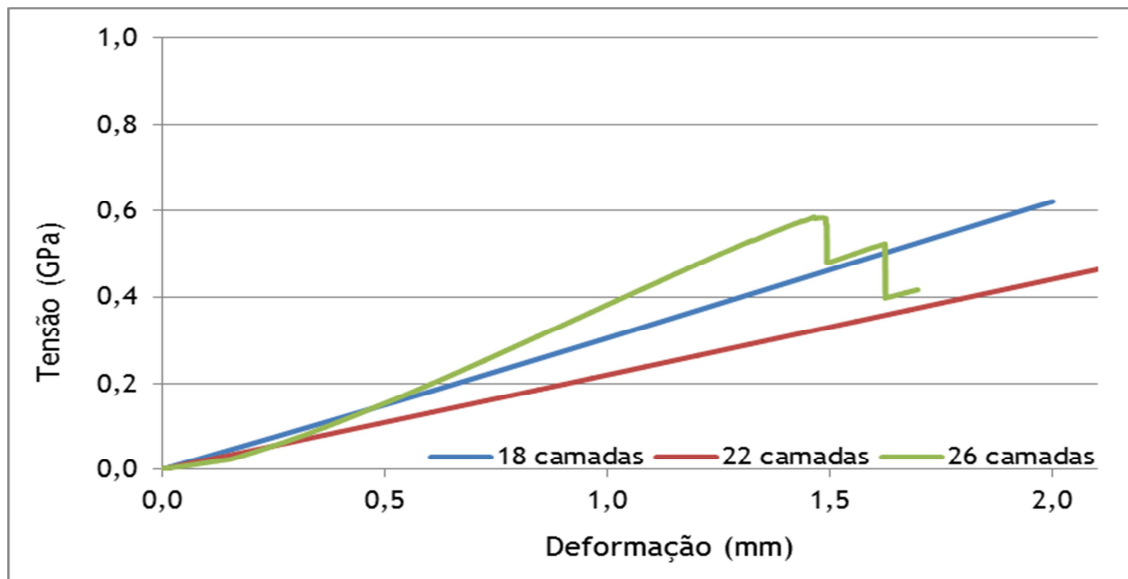


Figura 23 - Evolução comparativa do comportamento mecânico dos provetes tipo B

Na observação dos gráficos anteriores verifica-se a tendência dos resultados para as diferentes espessuras e sequências de empilhamento, porém associada ao aumento de

espessura nos laminados nota-se uma diminuição na flexibilidade. A resistência mecânica é directamente proporcional com aumento da espessura.

Na tabela 5 estão apresentados valores de força e tensão para a deformação mínima (1mm) e máxima, que varia com o aumento da espessura. Observa-se que os laminados de 18 camadas com empilhamento A e B são os laminados que apresentam maior valor de tensão (0,96 GPa e 0,62 GPa) respectivamente, quando comparados com os laminados com a mesma sequência de empilhamento e de maior espessura.

Tabela 5 - Valores de força e tensão para as deformações de 1mm e máxima dos diferentes laminados

Laminados	Deformação (mm)	Força (kN)	Tensão (GPa)
AN18	1	1,50	0,50
	2	2,90	0,96
AN22	1	2,49	0,22
	1,49	3,66	0,33
AN26	1	3,43	0,51
	1,29	4,02	0,60
BN18	1	0,93	0,30
	2	1,89	0,62
BN22	1	1,49	0,22
	1,66	2,41	0,37
BN26	1	2,54	0,38
	1,49	3,89	0,58

5.2 Laminados com fibra óptica

De forma a tirar conclusões sobre qual o impacto no comportamento mecânico com o embebimento de FO nos laminados, foram apresentadas curvas de deformação em função da força, para que seja possível fazer a comparação com os resultados obtidos nos laminados sem FO.

Nos gráficos seguintes apresenta-se a evolução da deformação em função da força observando-se as diferenças no comportamento mecânico dos laminados com FO, ver figuras 24, 25, 26.

Na figura 24 confirma-se a tendência dos laminados do tipo A serem mais resistentes que os de tipo B, mesmo com FO incorporadas, pois os laminados do tipo A para que exista uma deformação de 1 mm é necessário uma força de 1,25 kN enquanto os laminados do tipo B apenas necessitam de 1 kN para que se deformem cerca de 0,85 mm.

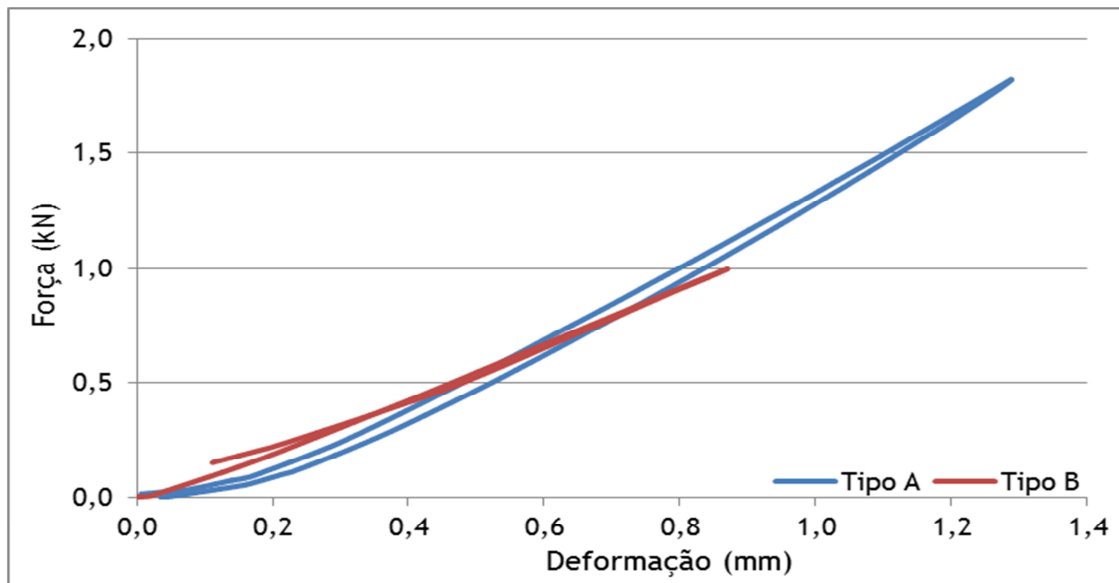


Figura 24 - Evolução do comportamento mecânico dos provetes de 18 camadas tipo A e B

Na figura 25 verifica-se, uma vez mais, que os laminados do tipo A são mais resistentes que os laminados do tipo B.

Nos laminados de 22 camadas do tipo A, comparativamente com os laminados sem FO, quando é aplicada uma força de 2 kN, estes deformam-se cerca de 0,8 mm, ou seja, não existe uma diferença significativa com a presença das FO. Nos laminados de 22 camadas do tipo B para que se deformem 0,8 mm necessitam de aproximadamente uma força de 1,4 kN, ou seja, existe uma diferença significativa com a presença da FO.

Verifica-se a tendência dos laminados do tipo B apresentarem uma maior ductilidade que os laminados do tipo A.

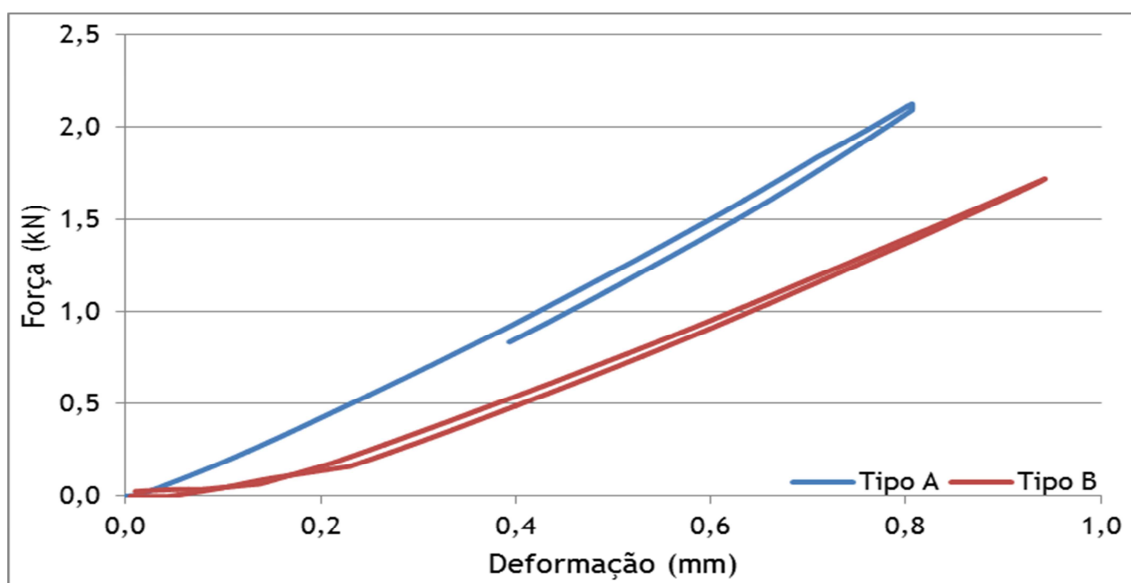


Figura 25 - Evolução do comportamento mecânico dos provetes de 22 camadas tipo A e B

Na figura 26 visualiza-se, outra vez, a tendência dos laminados tipo A serem mais resistentes que os laminados do tipo B, independentemente da posse de FO incorporadas e do aumento da espessura.

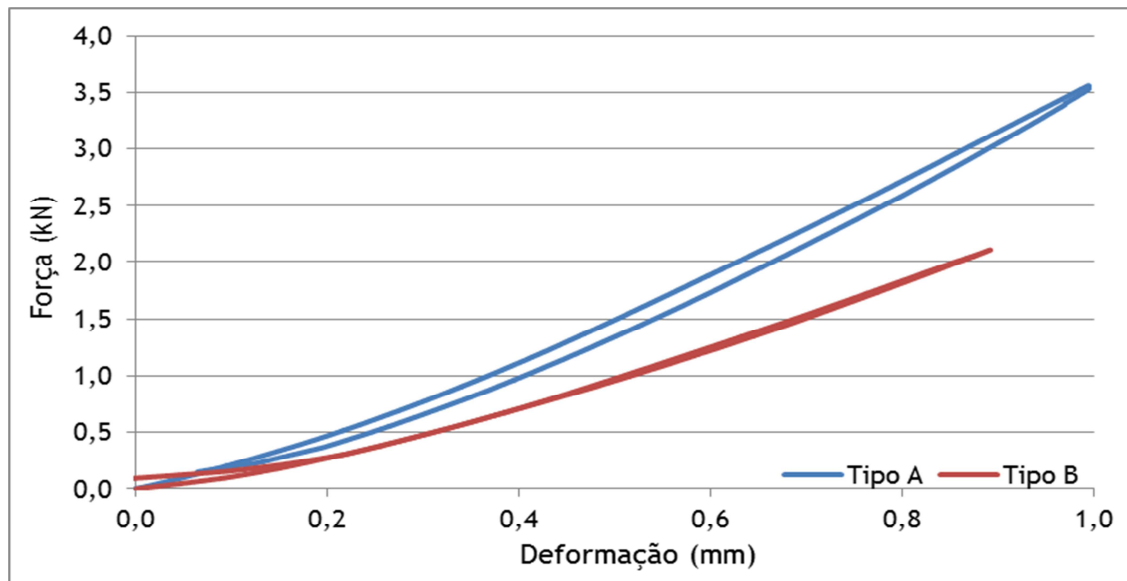


Figura 26 - Evolução do comportamento mecânico dos provetes de 26 camadas tipo A e B

Na tabela 6 são apresentados valores de deformação e respectiva força relativos aos resultados dos laminados com e sem FO. Nos laminados de 18 camadas do tipo A existe uma diferença significativa com a diminuição da resistência mecânica em cerca de 10% com a incorporação das FO, porém nos laminados de 18 camadas com sequência de empilhamento B existe um aumento da resistência mecânica em cerca de 20%. Nos laminados de 22 camadas tipo A existe um aumento da resistência mecânica não significativo com a inserção das FO, nos laminados de 22 camadas tipo B também se nota um aumento na resistência mecânica de aproximadamente 10% com o embebimento das FO. Nos laminados de 26 camadas com as sequências de empilhamento A e B não se verificam alterações significativas na resistência mecânica com a presença da FO.

Da mesma forma que nos laminados sem FO, os laminados do tipo A apresentam maior resistência mecânica e os laminados do tipo B apresentam maior flexibilidade.

Nos ensaios realizados aos provetes com FO, além da obtenção do gráfico relativo à deformação mecânica com a aplicação da força também se obteve resultados relativos à perda de sinal luminoso (óptico), em potência, durante o ensaio de flexão para as três diferentes posições da FO.

Estes resultados foram obtidos em simultâneo com os resultados relativos à perda de intensidade luminosa. Todos estes ensaios foram executados na região elástica dos provetes de modo a permitir o ensaio experimental na fase de carregamento e descarregamento, observando-se a deformação do laminado e posterior recuperação elástica. Os gráficos

seguintes permitem obter a resposta do “sensor” através da variação da potência do sinal óptico na forma de valores percentuais em função do tempo de ensaio.

Tabela 6 - Valores de deformação e força relativos aos laminados com e sem FO

Laminados	Deformação (mm)	Força (kN)	Deformação (mm)	Força (kN)
AN18	0,66	1	1,00	1,50
AS18	0,87	1	1,13	1,50
AN22	0,46	1	0,83	2,00
AS22	0,43	1	0,78	2,00
AN26	0,41	1	1,02	3,50
AS26	0,41	1	1,00	3,50
BN18	1,08	1	1,60	1,50
BS18	0,86	1	-	-
BN22	0,70	1	1,00	1,50
BS22	0,64	1	0,85	1,50
BN26	0,49	1	0,83	2,00
BS26	0,52	1	0,86	2,00

Os gráficos apresentam os resultados obtidos, para as três FO correspondentes às 3 diferentes posições, designadas como fibra de cima (posição na 3ª camada), fibra do meio (posição na linha neutra) e fibra de baixo (posição na 15ª, 19ª, 23ª camada) embora os resultados sejam resultantes de três ensaios experimentais.

Na figura 27 observa-se, relativamente aos laminados de 18 camadas tipo A, a variação de potência do sinal óptico na FO de cima, no entanto, nas restantes FO não existem variações de potência significativas.

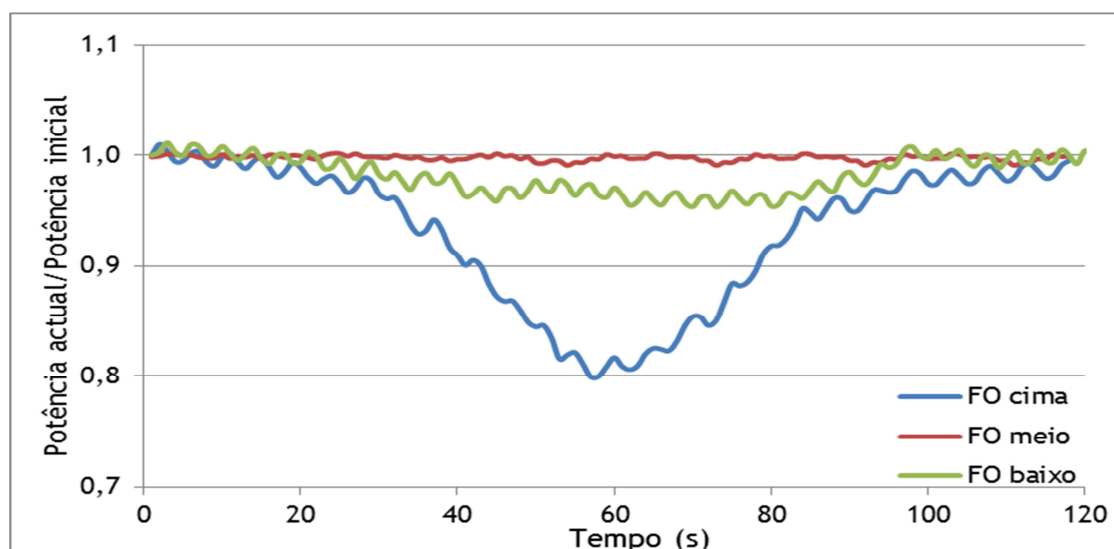


Figura 27 - Evolução da resposta do sensor nos laminados de 18 camadas tipo A

Na figura 28, existe uma pequena variação na potência do sinal óptico visualizada na FO de baixo, porém na FO de cima e na FO do meio não se visualiza nenhuma variação significativa.

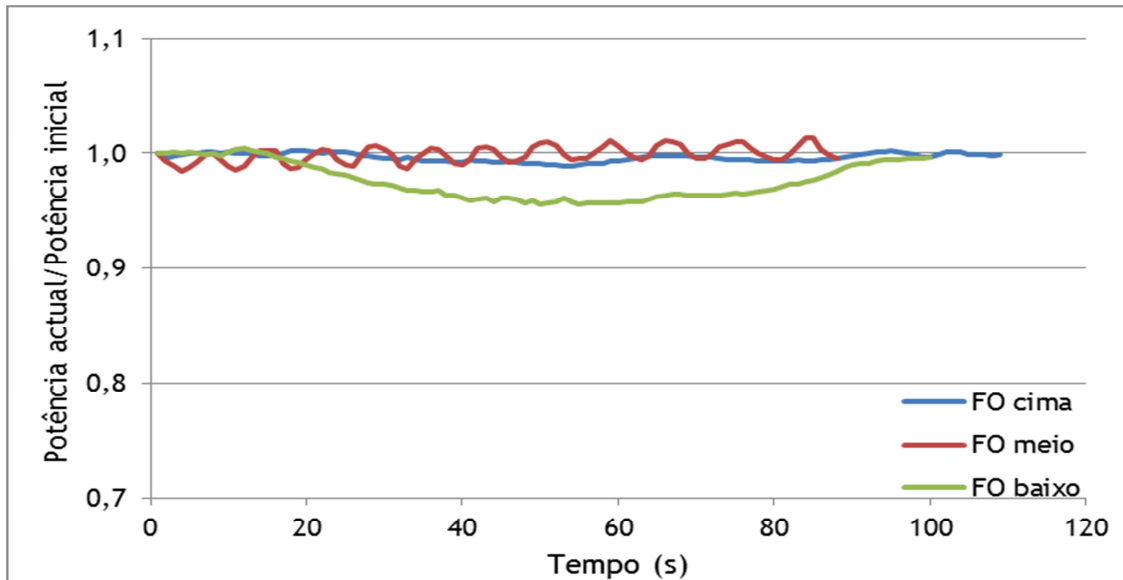


Figura 28 - Evolução da resposta do sensor nos laminados de 18 camadas tipo B

Observa-se que o comportamento (resposta do sensor) da potência luminosa é dependente do tipo de empilhamento.

Na configuração tipo B a posição da FO em baixo é mais sensível observando-se uma redução de 4% em relação à potência inicial. Na configuração tipo A a FO posicionada em cima é mais sensível com uma redução de 20% da potência em relação ao valor inicial. A FO posicionada no meio não é praticamente sensível à deformação.

Na figura 29 verifica-se a ocorrência de a FO posicionada em cima ser mais sensível nos laminados do tipo A, na qual existe uma variação da potência do sinal óptico de cerca 65%. Também se verifica uma variação de aproximadamente 30% na FO de baixo, na FO do meio não existem variações significativas.

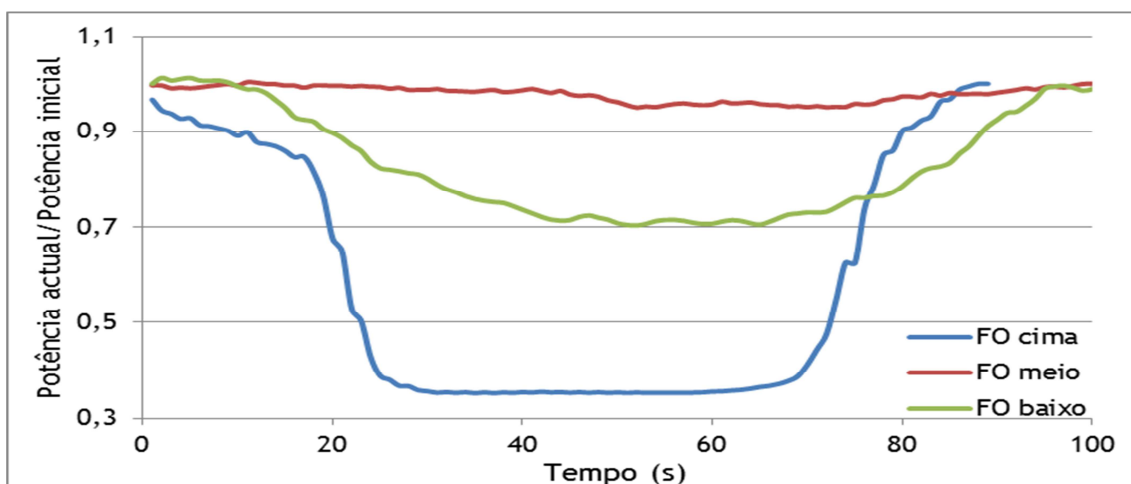


Figura 29 - Evolução da resposta do sensor nos laminados de 22 camadas tipo A

Na figura 30 observa-se a variação da potência do sinal óptico na FO de baixo, na FO de cima visualiza-se uma variação não acentuada. Na FO do meio não se visualiza quaisquer variações.

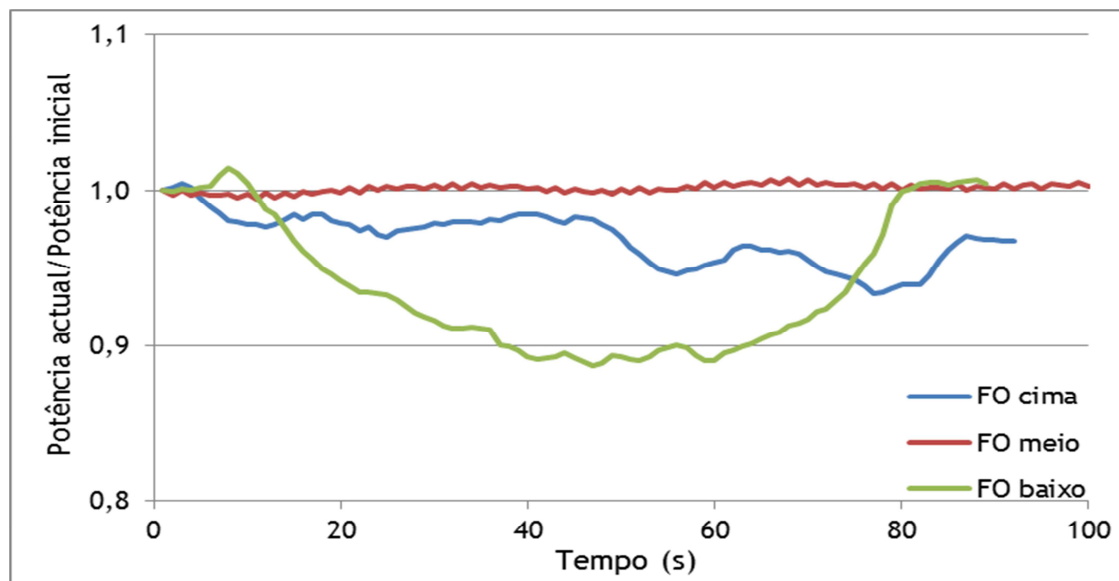


Figura 30 - Evolução da resposta do sensor nos laminados de 22 camadas tipo B

Com os resultados obtidos nos laminados de 22 camadas, verifica-se que o aumento da espessura, promove o aumento da sensibilidade do sensor.

Nos laminados tipo A, a FO posicionada em cima passou a ter uma redução de potência de 65%. Nos laminados tipo B a FO posicionada em baixo apresenta uma redução de aproximadamente 12%. Também se observa uma clara dependência entre a deformação (proporcional à força) e a redução do sinal óptico que atravessa o laminado.

Na figura 31 visualiza-se os resultados obtidos relativos aos laminados de 26 camadas tipo A. Observa-se a variação de cerca de 92% do sinal óptico presente na FO de cima, marcando a tendência da FO de cima ser mais sensível nos laminados com sequência de empilhamento A. Existe também uma variação do sinal óptico de cerca 52% presente na FO de baixo, no entanto, na FO do meio nenhuma variação significativa se verifica.

Na figura 32 observa-se a variação do sinal óptico relativo aos laminados de 26 camadas do tipo B das 3 FO. Visualiza-se uma variação de potência do sinal óptico de cerca 15% presente na FO de baixo. Na FO de cima observa-se apenas uma variação de aproximadamente 4%, porém na FO do meio nenhuma variação é visualizada. Também é confirmada a tendência da FO de baixo ser mais sensível nos laminados com sequência de empilhamento B.

Nos laminados tipo A volta a aumentar a sensibilidade do sensor com uma redução de potência de cerca 92% na FO posicionada em cima. Nos provetes tipo B, também aumenta a sensibilidade do sensor com uma redução de 15% na FO posicionada em baixo.

Na fibra de cima dos laminados com 26 camadas do tipo A nota-se a maior variação no sinal óptico de todos os laminados e FO, cerca de 92%.

Na fibra de baixo dos laminados de 26 camadas tipo B também se verifica a maior variação no sinal de todos os laminados tipo B, cerca de 15%.

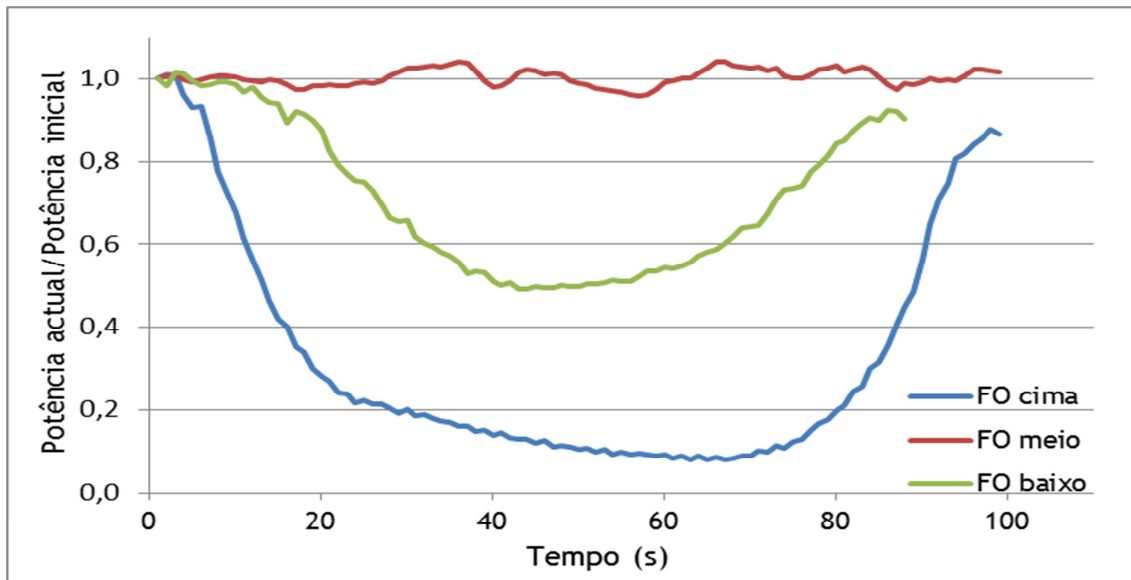


Figura 31 - Evolução da resposta do sensor nos laminados de 26 camadas tipo A

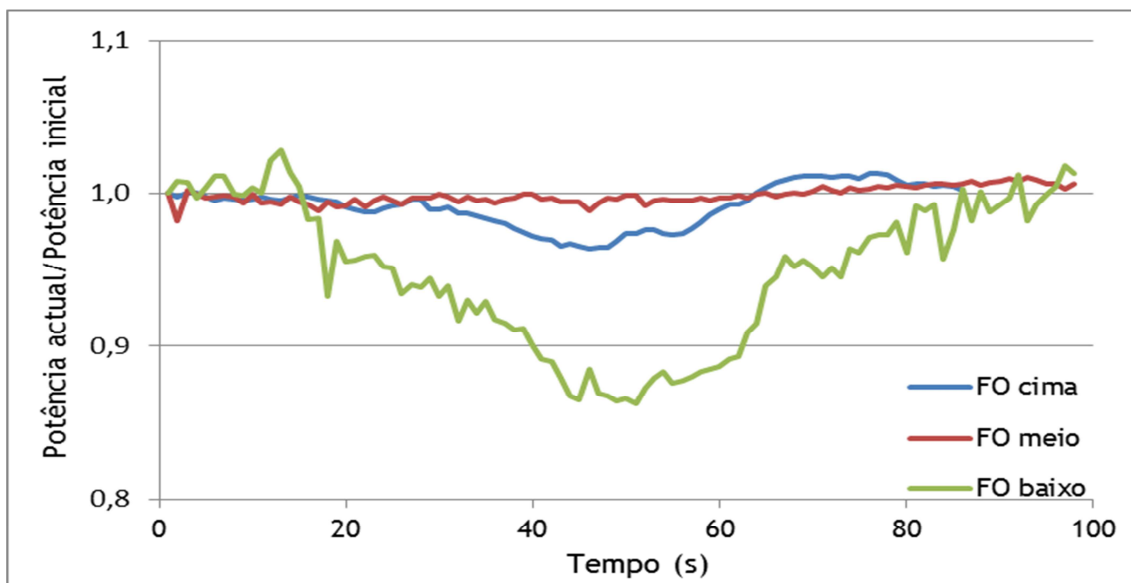


Figura 32 - Evolução da resposta do sensor nos laminados de 26 camadas tipo B

A redução da potência do sinal óptico é maior à medida que os laminados aumentam de espessura o que está relacionado com o crescente raio de curvatura dos laminados.

Na figura 33 observa-se a ilustração da deformação de um laminado quando sujeito a

flexão em 3 pontos, onde se identifica o raio de curvatura, a distância entre os apoios e a deformação.

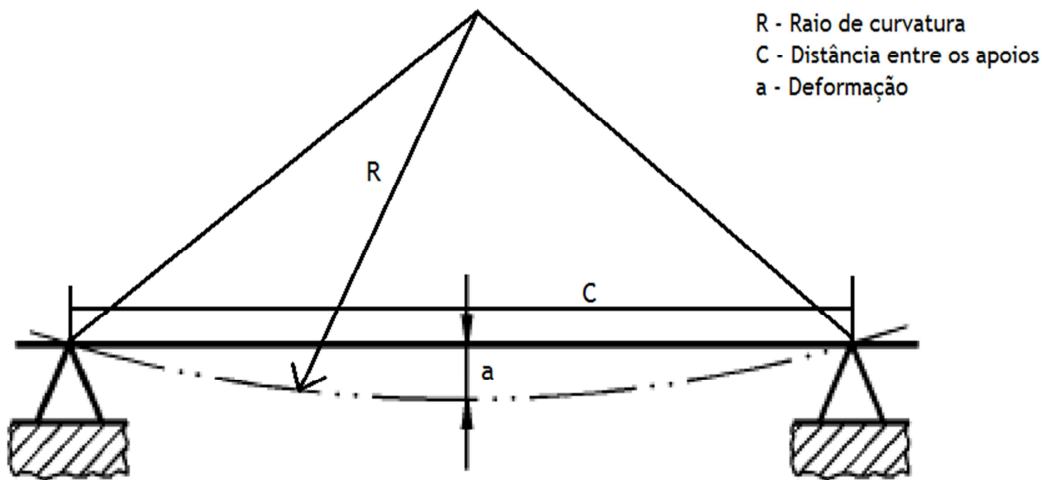


Figura 33 - Esquema da deformação de um laminado [28]

O raio de curvatura está relacionado com a deformação a que o laminado é sujeito e com a distância entre os apoios durante a execução do ensaio experimental. Como todos os ensaios foram executados nas mesmas condições, a distância entre os apoios surge como uma constante (40 mm), sendo a deformação a única variável.

Na equação seguinte apresenta-se a expressão para o cálculo do raio de curvatura [29]:

$$R = \frac{a^2 + \frac{C^2}{4}}{2} \quad (4)$$

Os laminados com maior espessura tendem a apresentar uma menor deformação, assim o raio de curvatura diminui com o aumento da espessura. A variação do sinal óptico aumenta com a espessura dos laminados devido a que estes possuem um raio de curvatura menor à medida que a sua espessura aumenta.

Contudo a diminuição do raio de curvatura não é linear com o aumento da espessura dos laminados.

Na tabela 7 apresentam-se valores do raio de curvatura quando sujeitos a uma força mínima de 1 kN e a uma força máxima, o que leva a diferentes valores de deformação e consequentes diferentes valores do raio de curvatura.

Também é notado que a variação da potência do sinal óptico é diferente dependendo da posição da FO e sequência de empilhamento.

Tabela 7 - Resultados obtidos do raio de curvatura para os diferentes laminados e cargas

Laminados	Força (kN)	a (mm)	C (mm)	Raio de curvatura (mm)
AS18	1,0	0,87	40	200,76
	1,5	1,13		201,28
AS22	1,0	0,43	40	200,18
	2,0	0,78		200,61
AS26	1,0	0,41	40	200,17
	3,5	1,00		201,00
BS18	1,0	0,86	40	200,74
	-	-		-
BS22	1,0	0,64	40	200,41
	1,5	0,85		200,72
BS26	1,0	0,52	40	200,27
	2,0	0,86		200,74

A variação do sinal relaciona-se com a força aplicada e com a deformação existente no laminado daí que para uma melhor análise do sistema laminado/FO torna-se necessário sincronizar as variáveis.

São apresentados nas figuras 35 e 36, 37 e 38, a evolução da deformação e a força aplicada para o sinal óptico das fibras ópticas dos laminados tipo A e B.

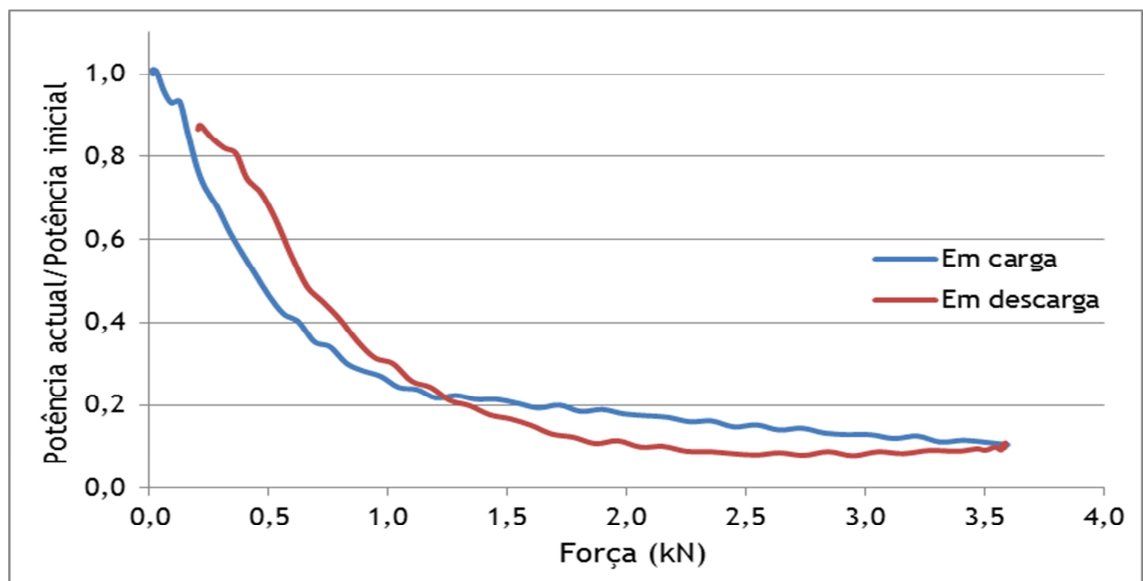


Figura 34 - Evolução do sinal óptico com a força aplicada à FO de cima dos laminados com 26 camadas tipo A

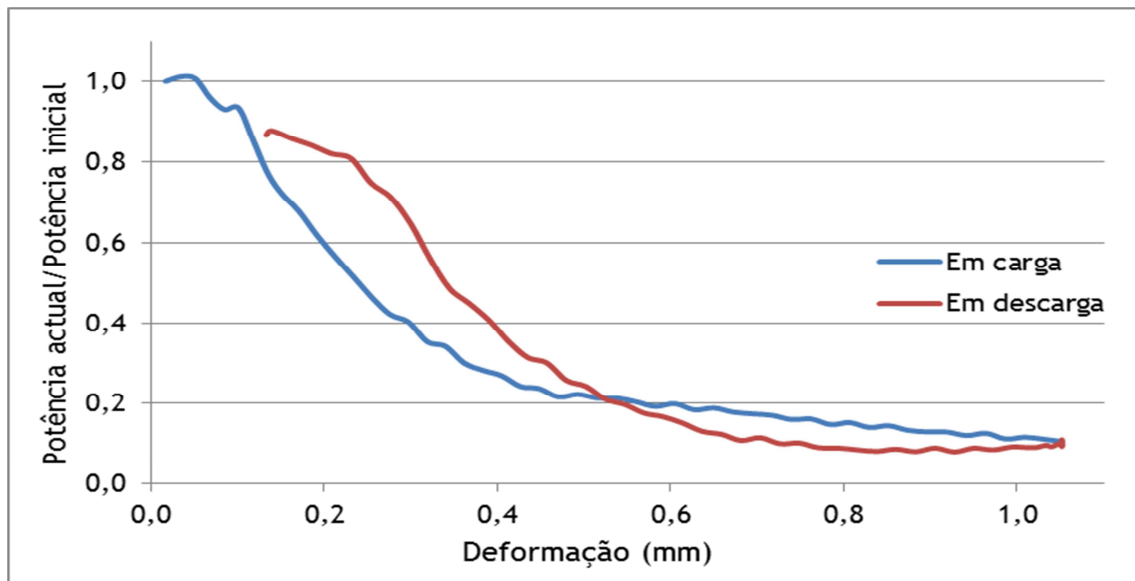


Figura 35 - Evolução do sinal óptico com a deformação à FO de cima dos laminados com 26 camadas tipo A

Nas figuras 34 e 35 observamos a sensibilidade da fibra óptica pois nota-se o início da variação da potência do sinal óptico quando o laminado é exposto a cerca de 0,5 kN ou quando este apresenta cerca de 0,2 mm de deformação.

Nas figuras 36 e 37 o início da variação da potência do sinal óptico dá-se quando o laminado é sujeito a 1 kN sofrendo uma deformação de 0,6 mm, isto nos laminados de 26 camadas tipo B.

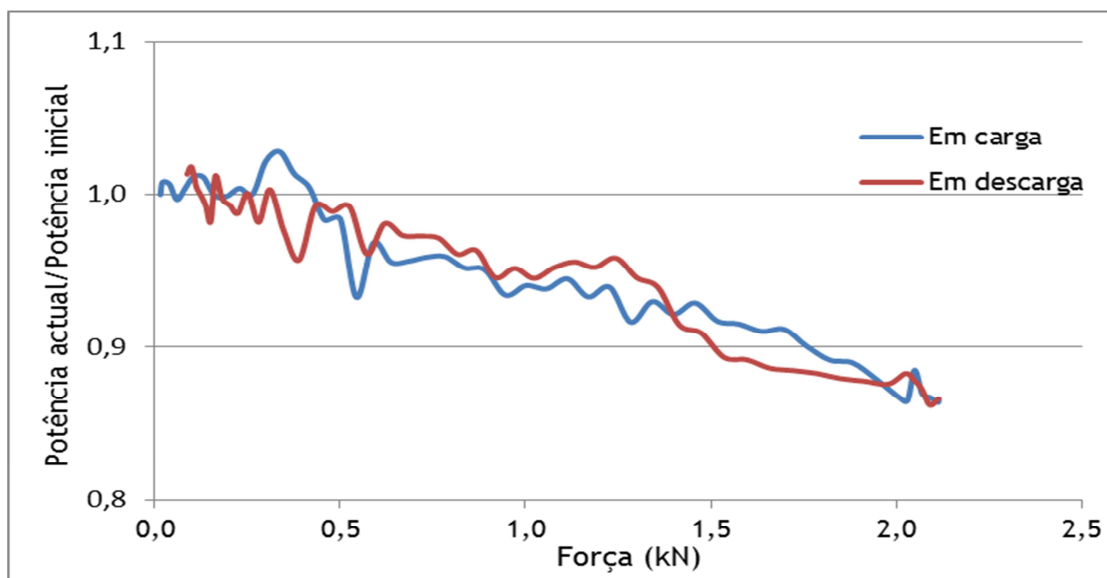


Figura 36 - Evolução do sinal óptico com a força aplicada à FO de baixo dos laminados com 26 camadas tipo B

Verifica-se que os ensaios são executados na região elástica pois verifica-se que o valor inicial de potência do sinal óptico é recuperado após a força ser retirada.

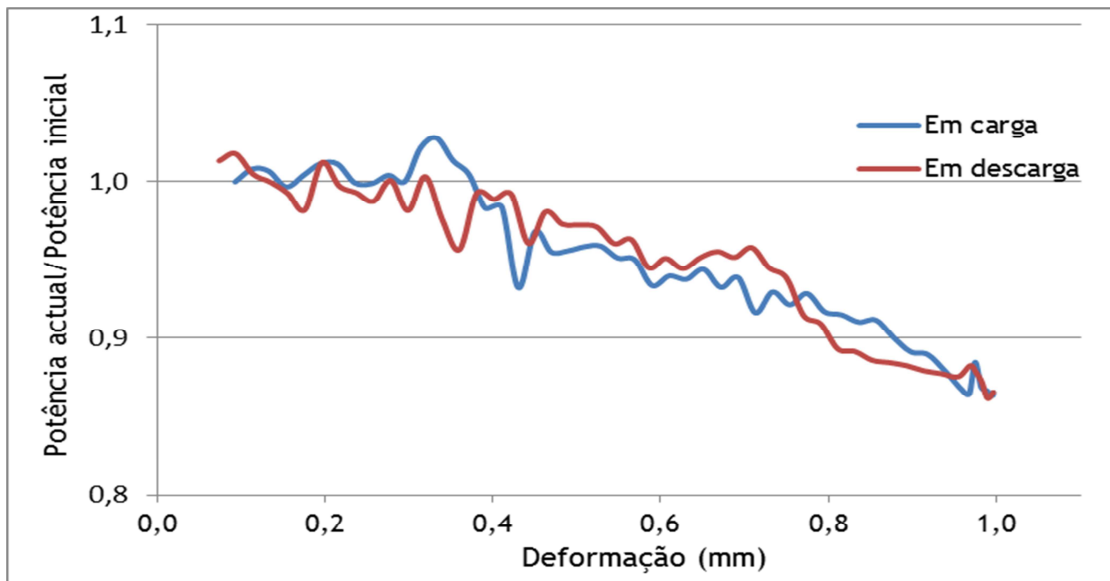


Figura 37 - Evolução do sinal óptico com a deformação à FO de baixo dos laminados com 26 camadas tipo B

Nestes ensaios observa-se que o sinal óptico apresenta variações menos lineares nos provetes tipo B apresentando valores de potência do sinal óptico mais instáveis, proporcionando uma maior incoerência.

Nos ensaios executados observa-se que os laminados estão sujeitos a dois diferentes esforços mecânicos, compressão e tracção, na parte superior do laminado as fibras estão em compressão e na parte inferior estas encontram-se em tracção.

Ao observar todos os resultados verifica-se a tendência da FO de cima, posicionada em compressão, apresenta uma maior redução da potência do sinal óptico nos laminados do tipo A. Nos laminados do tipo B é a FO de baixo, posicionada em tracção, que possui uma maior redução da potência do sinal óptico. No entanto, esta redução da potência do sinal óptico nos laminados tipo B é inferior à observada nos laminados do tipo A na FO de cima, o que nos leva a uma análise da deformação mais detalhada.

Na figura 38 visualiza-se cinco diferentes fases da deformação de um laminado, observa-se que FO está posicionada sobre a zona neutra. Na primeira fase ou fase (a), nota-se a ruptura das fibras e o começo de delaminação na parte inferior do laminado, na zona de tracção. Nas fases (b) e (c) já se nota o deslocamento do eixo neutro para a parte superior do laminado e o progresso da delaminação na ruptura das fibras, até que na fase (d) existe deformação do laminado na parte superior, zona de compressão, e dá-se a quebra das fibras do laminado até que na fase (e) já se observa a quebra total do laminado na parte inferior e o dano feito pela compressão, onde o eixo neutro está muito próximo da parte superior do laminado. Também se nota que a FO posicionada na zona neutra inicialmente não sofre quaisquer danos com o decorrer do teste de flexão.

Notamos que a FO de cima dos laminados no decorrer dos ensaios fica à compressão e que a FO de baixo fica à tracção, naturalmente que a fibra do meio é posicionada na zona neutra e não sofre nenhum esforço mecânico.

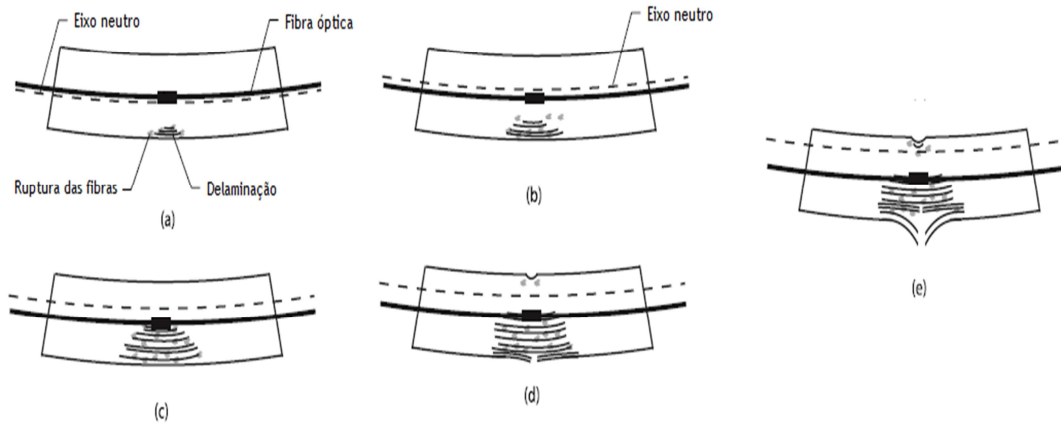


Figura 38 - Sequência da deformação de um laminado quando sujeito a testes de flexão [21]

O facto de que nos laminados tipo A a FO com maior variação da potência do sinal óptico é a FO de cima e que nos laminados do tipo B é a FO de baixo relaciona-se com os diferentes embebimentos presentes nos dois tipos de laminados, ou seja, nos laminados tipo A as FO de cima e de baixo encontram-se entre camadas orientadas a 90° enquanto nos laminados do tipo B as FO estão embebidas entre camadas orientadas a 0° . Esta observação permite-nos concluir que as FO embebidas entre camadas orientadas a 0° são mais sensíveis aos esforços de tracção do que as FO embebidas entre camadas orientadas a 90° , que são mais sensíveis à compressão.

Também foi realizado um ensaio de ruptura num laminado constituído por 22 camadas tipo A, quando era testada a FO de cima. O objectivo foi observar a quebra da FO e consequente variação de sinal. O resultado é apresentado na figura 39 observando-se a variação da potência do sinal óptico com a deformação.

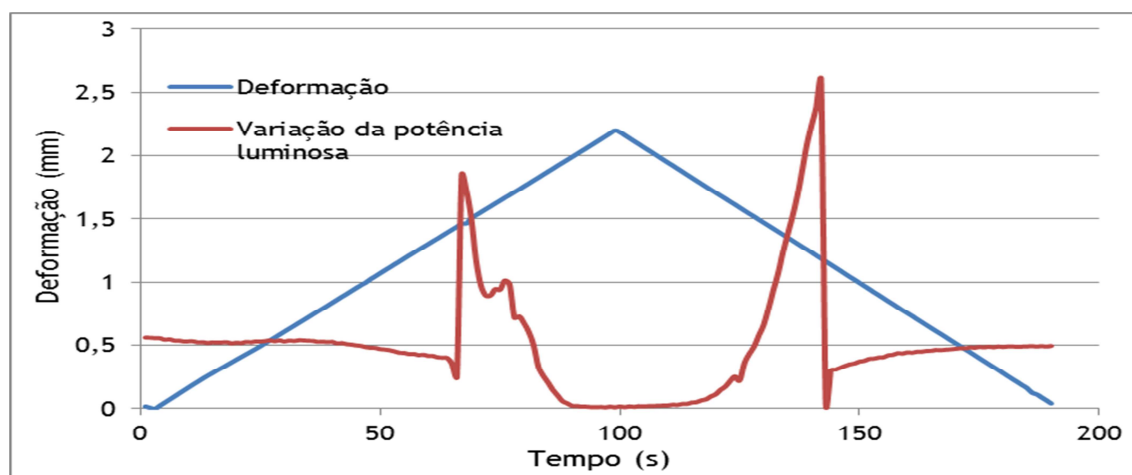


Figura 39 - Ensaio de quebra de um provete de 22 camadas tipo A com variação de sinal óptico na fibra de cima

Observa-se a ruptura do laminado e perda de sinal óptico (sensor) aos 80 segundos, no entanto quando a carga é retirada o laminado retorna a sua posição inicial e há recuperação de sinal óptico. Tal deve-se à FO estar novamente conectada nas extremidades da quebra regressando à posição inicial, com a mesma potência de sinal.

Capítulo 6

6 Conclusão

Nesta secção apresentam-se as conclusões do trabalho e deixam-se sugestões para a continuidade do estudo, aprofundando a investigação relacionada com a resposta do sensor em tempo real.

6.1 Conclusões

Os objectivos deste trabalho relacionam-se com a utilização de sensores incorporados em materiais compósitos para que seja possível praticar uma manutenção mais económica e precisa de modo a reduzir despesas fixas e evitar paragens desnecessárias na produção.

Como material compósito usou-se estruturas laminadas de carbono-epoxy com diferentes sequências de empilhamentos de modo a avaliar a influência do número de camadas (espessura), da direcção das fibras na camada de embebimento e da posição da fibra (tracção ou compressão). A fibra óptica (FO) foi embebida de duas formas: - de modo a minimizar o defeito, evitando a formação do “olho” de resina, isto é com a mesma direcção das fibras de carbono; a fibra óptica (FO) também foi embebida perpendicularmente às fibras de carbono.

Devido à elevada fotossensibilidade das FO e à facilidade de embebimento no interior dos laminados compósitos, o sistema laminado/fibras ópticas permite uma monitorização da integridade da estrutura (material) desde a sua fabricação até ao fim do seu ciclo de vida.

Com o método de fabrico utilizado (empilhamento manual e cura em autoclave) conseguiu-se obter um bom embebimento das FO nos materiais compósitos minimizando o efeito da sua presença, em alguns laminados aumentou a resistência mecânica, aproximadamente 20% nos laminados de 18 camadas tipo B e cerca de 10% nos laminados de 22 camadas tipo B. Verificou-se uma diferença não significativa na resistência mecânica dos laminados de 22 camadas com empilhamento A. O embebimento de FO não modificou a resistência mecânica dos laminados de 26 camadas com empilhamento A e B. Os laminados de 18 camadas com sequência de empilhamento A sofreram uma diminuição da resistência mecânica de cerca 10%. O processo de fabrico permitiu um bom embebimento das FO nos

laminados de fibra de carbono observando-se modificações não significativas e até em alguns casos o aumento da resistência dos laminados quando sujeitos a ensaios de flexão.

Há diferenças nas propriedades mecânicas dos dois tipos de empilhamento. Os laminados do tipo A apresentam uma maior resistência do que os laminados do tipo B pelo facto de serem constituídos por um número superior de camadas orientadas a 0°.

Com a observação dos dois tipos de esforços mecânicos presentes nos laminados, compressão e tracção, foi notado a existência de diferenças quando testados os dois tipos de empilhamentos, nomeadamente o facto de que no empilhamento A existe uma maior sensibilidade na FO de cima (variação de cerca 92% da potência do sinal óptico) que está exposta à compressão enquanto nos laminados do tipo B apenas a fibra de baixo detecta deformações (variação da potência do sinal óptico de cerca 15%), na que está à tracção.

Notou-se que a posição da FO nos laminados tem influência na resposta do sensor devido aos laminados estarem sujeitos a esforços mecânicos diferentes, compressão e tracção, sinalizados pela FO de cima e FO de baixo, respectivamente.

Uma das principais conclusões foi tomada pelo facto da redução da potência do sinal óptico ser maior à medida que o raio da curvatura diminui. As FO presentes nos laminados do tipo A apresentam também uma maior redução da potência do sinal óptico que os laminados do tipo B. As FO são mais sensíveis à deformação quando são embebidas entre camadas orientadas a 90° (perpendicularmente) pois quando as FO estão entre camadas orientadas a 0° apenas as FO de baixo transmitem uma alteração de potência do sinal óptico significativa.

6.2 Trabalhos futuros

Na sequência das conclusões é importante compreender a resposta dos laminados com a incorporação dos sensores (FO) noutros ensaios mecânicos.

Por exemplo, a redução do sinal transmitido pelo sensor óptico deve-se à deformação longitudinal (alongamento) da fibra óptica (na região de tração) e ao esmagamento da fibra óptica na região de compressão por acção das fibras de carbono (reforço) na sua vizinhança ou, haverá influência da acção externa do punção que executa a força. Através de ensaios de compressão axial pode-se compreender se a resposta do sensor óptico é ou não dependente do actuador da força (punção).

As estruturas compósitas são usadas em aplicações onde o comportamento ao impacto de baixa velocidade e a fadiga mecânica (através da solicitação em carregamento cíclico repetitivo) são importantes. Desta forma, pode-se desenvolver um sistema que relacione a resposta da intervenção de manutenção em função da avaliação do estado de saúde da estrutura compósita ao longo do seu tempo de vida (durabilidade).

Em trabalhos futuros será importante verificar o efeito da presença de sensores (FO) na degradação nas propriedades do material, por exemplo a acção da presença de elementos contaminantes (alcalinos ou ácidos) que degradam as propriedades do compósito e são detectados pela sensibilidade dos sensores.

Se a fibra óptica simples tem a vantagem da maior simplicidade do método de fabrico e do custo é importante comparar o seu desempenho com outros sensores comerciais, isto é comparar a sua capacidade de resposta com outros sensores já com provas dadas (redes de Bragg ou Fabry-Pérot).

Bibliografia

1. C.X.Ramos, “*Materiais compósitos inteligentes*”, Tese de Doutorado em Ciências da Engenharia, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.
2. R. de Oliveira, C.A.Ramos, O.Frazão, A. Torres Marques, “*Aplicação de sensores em fibra óptica embebidos para a monitorização da saúde de estruturas compósitas*”, *Mecânica Experimental*, Volume 14, pp.89-97, 2007.
3. C.A.Rogers, “*Intelligent Materials*”, *Scientific American*, September, pp.122-125, 2005.
4. C.A.Rogers, “*Intelligent Material Systems - The Dawn of a New Materials Age*”, Center for Intelligent Materials Systems and Structures, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, VA, 1993.
5. Soares, A., Nota Positiva, obtido em 26 de 6 de 2013, de http://www.notapositiva.com/pt/trbestbs/quimica/12_cermet.htm.
6. H.J.D.Correia, “*Materiais compósitos de matriz polimérica*”, Provas de aptidão Pedagógica e capacidade científica, Universidade da Beira Interior, 2000.
7. D.D.L.Chung, “*Carbon Fiber Composites*”, Butterworth-Heinemann, 1994.
8. I.M. Daniel, O. Ishai, “*Engineering Mechanics of Composite Materials*”, Oxford University Press, 1994.
9. Ebah (s.d.), obtido de <http://www.ebah.com.br/content/ABAAfLUwAl/resinas-epoxi>, 8 de Outubro de 2013.
10. Jean-Marie Berthelot, “*Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analysis*”, Mechanical Engineering Series, Springer, 1998.
11. Produtos Rebelco (s.d.), obtido de www.rebelco.pt, apresentação de 2012.
12. F.L. Matthews, R.D. Rawlings, “*Composite Materials: Engineering and Science*”, Chapman & Hall, London, pp.1-28, 1994.
13. W.F.Smith, J.Hashemi, “*Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais*”, McGraw Hill, 5ª edição, 2012.
14. Disciplinas.stoa.usp.br, obtido de http://disciplinas.stoa.usp.br/pluginfile.php/72717/mod_resource/content/2/gabari-to-exercicios20da20aula20de20compositos20-2013.pdf, 18 de Setembro de 2013.
15. H.S.Kim, S.H.Yoo, S.H.Chang, “*In situ monitoring of the strain evolution and curing reaction of composite laminates to reduce the thermal residual stress using FBG sensor and dielectrometry*”, *Composites: Part B*, pp 446-452, 2013.
16. O.Frazão, F.M.Araújo, I.Dias, L.A.Ferreira, J.L.Santos, “*Sensores de Bragg em Fibra Óptica*”, Departamento de Física, FCUP, 2005.
17. Bertozzi. (s.d.). Obtido de <http://www.bertozzi.com/fibrotc.html>, 14 Abril de 2013.

18. H.J.D.Correia, “*Comportamento em flexão do material compósito inteligente*”, Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica, Universidade da Beira Interior, 2000.
19. mc2h20 (s.d.). obtido de <http://mc2h2o.blogspot.pt/2010/03/fibra-optica-tecnologia-de-um-dos.html>, 19 de Setembro de 2013.
20. N.Takeda, Y.Okabe, J.Kuwahara,S.Kojima,T.Ogisu, “*Development of smart composite structures with small-diameter fiber Bragg grating sensors for damage detection: Quantitative evaluation of delamination length in CFRP laminates using Lamb wave sensing*”, Composites Science and Technology, 65, pp. 2575-2587, 2005.
21. A.Propst, K.Peters, M.A.Zikry, S.Schultz, W.Kunzler, Z.Zhu, M.Wirthlin, R.Selfridge, “*Assessment of damage in composite laminates through dynamic, full-spectral interrogation of fiber Bragg grating sensors, Smart materials and structures*”, Novembro, 2009.
22. R.Luck, E.I.Agba, “*On the design of piezoelectric sensors and actuators*”, ISA Transactions, 37, pp. 65-72, 1998.
23. Creationscience (s.d.) obtido de <http://www.creationscience.com/onlinebook/Radioactivity3.html>, 18 de Setembro de 2013.
24. A.K.El Wahed, J.L.Sproston, G.K.Schleyer, “*Electrorheological and magnetorheological fluids in blast resistant design applications*”, Materials and Design, 23, pp.391-404, 2002.
25. Y.Tian, C.Li, M.Zhang, Y.Meng, S.Wen, “*Transient response of an electrorheological fluid under square-wave electric field excitation*”, Journal of Colloid and Interface Science, 288, pp.290-297, 2005.
26. A.T.Marques, “*Introdução aos Materiais Compósitos*”, DEMEGI/INEGI, 2001.
27. Seal (s.d.), obtido de www.seal.it, data sheet of advanced prepeg TEXIPREG REM, 15 Abril de 2013.
28. Ebah (s.d.), Obtido de <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfLqEAL/4-ensaio-flexao>, 8 de Outubro de 2013.
29. A.Correia dos Reis, M.B.Farinha, J.P.Brazão Farinha, “*Tabelas técnicas*”, Edições técnicas E.T.L., 2006.