



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Faculdade de Engenharia

# **Aplicação de fibras óticas para avaliar as alterações de temperatura em compósitos laminados**

**Jorge Daniel dos Santos Rato**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletromecânica**  
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Abílio Manuel Pereira da Silva

**Covilhã, Outubro de 2015**



# Agradecimentos

Ao longo da realização desta dissertação foram recebidos vários apoios que auxiliaram e contribuíram para a sua elaboração. Desejo expressar os meus agradecimentos a todas as pessoas e instituições que possibilitaram a realização deste trabalho, nomeadamente:

- Ao orientador, Professor Abílio Silva, por toda a colaboração, disponibilidade, dedicação e pela constante preocupação, atenção e apoio que dedicou ao longo de toda a execução desta dissertação;

- Ao Departamento de Eletromecânica e ao C-MAST pela cedência das instalações, equipamentos laboratoriais e facilidades concedidas para a realização deste trabalho;

- Aos meus pais, irmã e restante família pela compreensão e apoio em todos os momentos do meu percurso académico;

-Ao professor Paulo Fiadeiro pelo seu apoio e disponibilidade e também pela cedência do filtro polarizador e das fibras óticas necessárias para a realização da parte experimental do trabalho.

-Aos professores Paulo Reis, Piotr Miluski, Marcin Kochanowicz, Jacek Zmojda e Dominik Dorosz por todo o auxílio e dedicação prestados;

-Aos amigos Tomasz Ragin, João Barbosa, Bruno Catarino, Ricardo Henriques, Kamil Iwanowicz, Karol Czajkowski, Marcin Pietrzycki, Piotr Chilkiewicz, Patryk Romańczuk, Przemysław Pruszyński, Julian Chomiczewski, Paweł Jan Sienkiewicz, Anna Szewczyk e Marek pela ajuda na integração e pela amizade que fica;

-A todos os meus amigos, colegas e professores que de alguma forma contribuíram no meu percurso académico;

-Um agradecimento especial para os meus amigos mais próximos João Rodrigues, Bruno Santos, Artur Cruz, Freddy Silva, Miguel Clemente, Jorge Gaspar, Emanuel Bastos, Serafim Pinto, Miguel Duarte, Pedro Martins, Rodrigo Campos e Miguel Barros que deram o seu contributo valioso ao longo destes anos para a conclusão desta etapa;

-Por último, agradeço à Soraia Amorim pelo seu apoio incondicional em todos os momentos desta etapa que chega agora ao fim.



# Resumo

Hoje em dia os materiais compósitos são usados nas mais diversas áreas devido às suas propriedades únicas como a sua elevada resistência mecânica, elevada rigidez específica, resistência à corrosão, baixa densidade e bom desempenho à fadiga. Por outro lado os sensores de fibra ótica possuem um conjunto de vantagens como o seu tamanho e peso reduzidos, imunidade a interferências eletromagnéticas e à corrosão e também a possibilidade de serem facilmente introduzidas no interior das estruturas compósitas que se pretende monitorizar. Estas características únicas permitem que os sistemas sensoriais de fibra ótica sejam incorporados em estruturas complexas e, principalmente sujeitas a solicitações dinâmicas como pontes, turbinas eólicas, infraestruturas ferroviárias, aeronaves, etc.

No presente trabalho foram testados vários tipos de fibras óticas comerciais para perceber a influência da temperatura no sinal ótico que as percorre. As fibras óticas mais sensíveis à temperatura foram incorporadas em dois tipos de materiais compósitos diferentes (compósito carbono/*epoxy* e compósito vidro/poliéster). Desta forma, analisou-se a influência do processo de fabrico nas propriedades óticas. Para este fim foi implementado um circuito ótico que permitiu, em tempo real, realizar as leituras do sinal proveniente de uma fonte luminosa (laser) que atravessa a fibra ótica (*output*) e compará-lo com um sinal de referência originário da mesma fonte. Através desta comparação o erro e as perdas são conhecidas e a confiança nos resultados obtidos foi garantida.

Comparando o sinal obtido antes e depois da incorporação no compósito verifica-se que, ao serem incorporadas no material compósito, as fibras óticas sofrem alterações provocadas pelo processo de fabrico, nomeadamente na intensidade do sinal que as atravessa.

Verificou-se que, para uma gama de temperaturas (25-55° C), uma fibra ótica comercial tem uma alteração de intensidade no sinal suficiente para atuar como um sensor, quando incorporada num material compósito. Essa alteração pode chegar a ser de 54% em compósitos de fibra de carbono (usando fibra ótica do tipo F-MLD) e 46% em compósitos de fibra de vidro (usando fibra ótica do tipo F-SPF).

## Palavras-chave

Sensores de fibra ótica; Materiais compósitos; Monitorização de saúde estrutural; Sensor de temperatura.



# Abstract

Nowadays, composite materials are used in several areas due to its unique properties such as its high mechanical strength, high specific stiffness, corrosion resistance, low density and good fatigue performance. Moreover, fiber optic sensors have a number of advantages such as its reduced size and weight, immunity to electromagnetic interference and corrosion and the possibility of being easily introduced within the composite structure that is intended to monitor. These unique features enable the incorporation of fiber optic sensing systems into complex structures mainly subject to dynamic loads such as bridges, wind turbines, railway infrastructures, aircrafts, etc.

In this study, several types of commercial optical fibers were tested to study the influence of temperature on the optical signal that travels through it. Optical fibers more sensitive to temperature were incorporated into two different types of composites (carbon/epoxy and glass/polyester). Therefore, the influence of the manufacturing process in the optical properties was analyzed. To this end, an optical circuit was implemented which performs real time readings in the signal from a light source (laser), which passes through the optical fiber (output), and compares it with a reference signal originating from the same source. Through this comparison the error and losses are known and the results are trustworthy.

Comparing the signal obtained before and after the incorporation in the composite is found that, when incorporated in the composite material, optical fibers experience changes caused by the manufacturing process, namely in the strength of the signal that passes through them.

It was found that, for a range of temperatures (25-55<sup>o</sup> C), commercial optical fibers have a sufficient intensity change in the signal to act as a sensor when incorporated into a composite material. This changes can reach 54% in carbon fiber composites (using F-MLD type optical fiber) and 46 % for glass fiber composites (using F-SPF type optical fiber).

## Keywords

Fiber Optic Sensors; Composite materials; Structural health monitoring; Temperature sensor.



# Índice

Capítulo 1 - Motivação e objetivos .....	1
1.1 - Motivação .....	1
1.2 - Objetivos .....	2
Capítulo 2 - Introdução .....	3
2.1 - Materiais Compósitos.....	4
2.1.1 - Classificação de materiais compósitos .....	7
2.1.2 - Tipos de Matrizes em Materiais Compósitos.....	8
2.1.3 - Tipos de Reforço em Materiais Compósitos .....	9
2.2 - Fibras óticas .....	12
2.2.1 - Funcionamento das fibras óticas .....	13
2.2.2 - Sensores de fibra ótica (SFO) .....	16
2.3 - Monitorização de saúde estrutural (MSH) .....	21
Capítulo 3 - Procedimento experimental.....	25
Capítulo 4 - Análise e discussão de resultados .....	33
4.1 - Fibra ótica F-MLD .....	35
4.1.1 - Fibra ótica F-MLD a 26,9 <sup>o</sup> C .....	35
4.1.2 - Fibra ótica F-MLD a 51,9 <sup>o</sup> C .....	35
4.1.3 - Fibra ótica F-MLD a 73,5 <sup>o</sup> C .....	36
4.2 - Fibra ótica F-SPF.....	38
4.2.1 - Fibra ótica F-SPF a 26,7 <sup>o</sup> C.....	38
4.2.2 - Fibra ótica F-SPF a 52 <sup>o</sup> C .....	39
4.2.3 - Fibra ótica F-SPF a 73,1 <sup>o</sup> C.....	40
4.3 - Fibra ótica F-SF .....	42
4.3.1 - Fibra ótica F-SF a 27 <sup>o</sup> C .....	42
4.3.2 - Fibra ótica F-SF a 50,4 <sup>o</sup> C.....	43
4.3.3 - Fibra ótica F-SF a 71,8 <sup>o</sup> C.....	44
4.4 - Provetes de fibra de carbono com fibra ótica F-MLD incorporada.....	46
4.4.1 - Fibra ótica F-MLD incorporada no provete de carbono a 26,2 <sup>o</sup> C.....	47
4.4.2 - Fibra ótica F-MLD incorporada no provete de carbono a 50,9 <sup>o</sup> C.....	48
4.4.3 - Fibra ótica F-MLD incorporada no provete de carbono a 73,5 <sup>o</sup> C.....	49
4.5 - Provetes de fibra de carbono com fibra ótica F-SPF incorporada.....	51
4.5.1 - Fibra ótica F-SPF incorporada no provete de carbono a 27 <sup>o</sup> C.....	51
4.5.2 - Fibra ótica F-SPF incorporada no provete de carbono a 53,4 <sup>o</sup> C .....	52

4.5.3 - Fibra ótica F-SPF incorporada no provete de carbono a 73,5° C .....	53
4.6 - Provetes de fibra de vidro com fibra ótica F-MLD incorporada .....	55
4.6.1 - Fibra ótica F-MLD incorporada no provete de vidro a 26,9° C .....	55
4.6.2 - Fibra ótica F-MLD incorporada no provete de vidro a 51,6° C .....	56
4.6.3 - Fibra ótica F-MLD incorporada no provete de fibra de vidro a 71,4° C..	57
4.7 - Provetes de fibra de vidro com fibra ótica F-SPF incorporada .....	59
4.7.1 - Fibra ótica F-SPF incorporada no provete de fibra de vidro a 26,4° C ..	59
4.7.2 - Fibra ótica F-SPF incorporada no provete de fibra de vidro a 51,1° C ..	60
4.7.3 - Fibra ótica F-SPF incorporada no provete de fibra de vidro a 74° C.....	61
Capítulo 5 - Conclusões e recomendações para trabalhos futuros.....	65
5.1 - Conclusões .....	65
5.2 - Recomendações para trabalhos futuros .....	67
Bibliografia.....	69

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Esquema de um material compósito genérico [62] .....	5
Figura 2.2 - Classificação dos Materiais Compósitos [21] .....	7
Figura 2.3 - Um feixe ( <i>tow</i> ) de fibra de carbono composto por milhares de filamentos [26] ..	10
Figura 2.4 - Formas de arquiteturas de rede comuns: a) plain; b) twill; c) satin [27] .....	10
Figura 2.5 - Tecido de fibra de carbono unidirecional [26] .....	11
Figura 2.6 - Feixes de luz ao entrar numa fibra ótica [63] .....	13
Figura 2.7 - Fibra ótica com ilustração do detalhe das diferentes camadas de revestimento [32] .....	14
Figura 2.8 - Espectro eletromagnético [35] .....	15
Figura 2.9 - SFO intrínsecos e extrínsecos [64] .....	16
Figura 2.10 - Distribuição de artigos de SFO de acordo com as grandezas medidas [43] .....	18
Figura 2.11 - Distribuição de artigos de SFO de acordo com as tecnologias utilizadas [43] ....	20
Figura 2.12 - Ilustração do conceito de um sistema geral MSH [41] .....	21
Figura 2.13 - Níveis de MSH. Quanto maior o nível, mais elevada a complexidade [41] .....	22
Figura 3.1 - Circuito de ensaio utilizado.....	25
Figura 3.2 - Coupler F-CPL-M12851 850nm da Newport.....	26
Figura 3.3 - <i>Switch 1x2 Multimode</i> da Newport e circuito de controlo .....	26
Figura 3.4 - Espectrómetro C10083CAH de sensor CCD da Hamamatsu [65] .....	27
Figura 3.5 - Filtro polarizador duplo .....	27
Figura 3.6 - Adaptadores macho e conectores fêmea usados no circuito.....	28
Figura 3.7 - Provetes de fibra de carbono e de fibra de vidro com fibra ótica incorporada ...	29
Figura 3.8 - Câmara térmica de ensaio. a) imagem 3D; b) imagem real anterior a um dos ensaios .....	30
Figura 3.9 - Controlo do aquecimento no interior da câmara térmica de ensaio .....	31
Figura 3.10 - Representação em 3D da câmara térmica com os provetes de carbono e fibra de vidro.....	31
Figura 4.1 - Exemplo de um sinal genérico.....	33
Figura 4.2 - Evolução do sinal ótico da fibra F-MLD, com intensidade de 90% para a temperatura de 26,9° C.....	34
Figura 4.3 - Evolução do sinal ótico da fibra F-MLD, com intensidade de 10% para a temperatura de 26,9° C.....	34
Figura 4.4 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-MLD para a temperatura de 26,9° C.....	35

Figura 4.1.1 - Evolução do sinal ótico da fibra F-MLD, com intensidade de 90% para a temperatura de 51,9° C.....	35
Figura 4.1.2 - Evolução do sinal ótico da fibra F-MLD, com intensidade de 10% para a temperatura de 51,9° C.....	36
Figura 4.1.3 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-MLD para a temperatura de 51,9° C.....	36
Figura 4.1.4 - Evolução do sinal ótico da fibra F-MLD, com intensidade de 90% para a temperatura de 73,5° C.....	36
Figura 4.1.5 - Evolução do sinal ótico da fibra F-MLD, com intensidade de 90% para a temperatura de 51,9° C.....	37
Figura 4.1.6 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-MLD para a temperatura de 51,9° C.....	37
Figura 4.1.7 - Evolução da razão (90%/10%) do sinal ótico em função da temperatura para a fibra F-MLD.....	37
Figura 4.2.1 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SPF, com intensidade de 90% para a temperatura de 26,7° C.....	38
Figura 4.2.2 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SPF, com intensidade de 10% para a temperatura de 26,7° C.....	38
Figura 4.2.3 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-SPF para a temperatura de 26,7 ° C.....	39
Figura 4.2.4 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SPF, com intensidade de 90% para a temperatura de 52 ° C .....	39
Figura 4.2.5 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SPF, com intensidade de 10% para a temperatura de 52 ° C .....	39
Figura 4.2.6 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-SPF para a temperatura de 52 ° C .....	40
Figura 4.2.7 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SPF, com intensidade de 90% para a temperatura de 73,1 ° C.....	40
Figura 4.2.8 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SPF, com intensidade de 10% para a temperatura de 73,1 ° C.....	40
Figura 4.2.9 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-SPF para a temperatura de 73,1 ° C.....	41
Figura 4.2.10 - Evolução da razão (90%/10%) do sinal ótico em função da temperatura para a fibra F-SPF .....	41
Figura 4.3.1 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SF, com intensidade de 90% para a temperatura de 27 ° C .....	42
Figura 4.3.2 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SF, com intensidade de 10% para a temperatura de 27 ° C .....	42

Figura 4.3.3 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-SF para a temperatura de 27 ° C.....	43
Figura 4.3.4 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SF, com intensidade de 90% para a temperatura de 50,4 ° C.....	43
Figura 4.3.5 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SF, com intensidade de 10% para a temperatura de 50,4 ° C.....	43
Figura 4.3.6 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-SF para a temperatura de 50,4 ° C .....	44
Figura 4.3.7 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SF, com intensidade de 90% para a temperatura de 71,8 ° C.....	44
Figura 4.3.8 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SF, com intensidade de 10% para a temperatura de 71,8 ° C.....	44
Figura 4.3.9 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-SF para a temperatura de 71,8 ° C .....	45
Figura 4.3.10 - Evolução da razão (90%/10%) do sinal ótico em função da temperatura para a fibra F-SF.....	45
Figura 4.4.1 - Evolução do sinal ótico da fibra F-MLD, incorporada no provete de carbono, com intensidade de 90% para a temperatura de 26,2 ° C.....	47
Figura 4.4.2 - Evolução do sinal ótico da fibra F-MLD, incorporada no provete de carbono, com intensidade de 10% para a temperatura de 26,2 ° C.....	47
Figura 4.4.3 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-MLD, incorporada no provete de carbono, para a temperatura de 26,2 ° C .....	47
Figura 4.4.4 - Evolução do sinal ótico da fibra F-MLD, incorporada no provete de carbono, com intensidade de 90% para a temperatura de 50,9 ° C.....	48
Figura 4.4.5 - Evolução do sinal ótico da fibra F-MLD, incorporada no provete de carbono, com intensidade de 10% para a temperatura de 50,9 ° C.....	48
Figura 4.4.6 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-MLD, incorporada no provete de carbono, para a temperatura de 50,9 ° C .....	48
Figura 4.4.7 - Evolução do sinal ótico da fibra F-MLD, incorporada no provete de carbono, com intensidade de 90% para a temperatura de 73,5 ° C.....	49
Figura 4.4.8 - Evolução do sinal ótico da fibra F-MLD, incorporada no provete de carbono, com intensidade de 10% para a temperatura de 73,5 ° C.....	49
Figura 4.4.9 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-MLD, incorporada no provete de carbono, para a temperatura de 73,5 ° C .....	49
Figura 4.4.10 - Comparação da razão (90%/10%) do sinal ótico, em função da temperatura, para a fibra F-MLD testada individualmente e incorporada no compósito de carbono.....	50
Figura 4.5.1 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SPF, incorporada no provete de carbono, com intensidade de 90% para a temperatura de 27 ° C .....	51

Figura 4.5.2 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SPF, incorporada no provete de carbono, com intensidade de 10% para a temperatura de 27 ° C .....	51
Figura 4.5.3 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-SPF, incorporada no provete de carbono, para a temperatura de 27 ° C .....	51
Figura 4.5.4 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SPF, incorporada no provete de carbono, com intensidade de 90% para a temperatura de 53,4 ° C .....	52
Figura 4.5.5 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SPF, incorporada no provete de carbono, com intensidade de 10% para a temperatura de 53,4 ° C .....	52
Figura 4.5.6 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-SPF, incorporada no provete de carbono, para a temperatura de 53,4 ° C .....	52
Figura 4.5.7 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SPF, incorporada no provete de carbono, com intensidade de 90% para a temperatura de 73,5 ° C .....	53
Figura 4.5.8 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SPF, incorporada no provete de carbono, com intensidade de 10% para a temperatura de 73,5 ° C .....	53
Figura 4.5.9 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-SPF, incorporada no provete de carbono, para a temperatura de 73,4 ° C .....	53
Figura 4.5.10 - Comparação da razão (90%/10%) do sinal ótico, em função da temperatura, para a fibra F-SPF testada individualmente e incorporada no compósito de carbono .....	54

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades de fibras e materiais na sua forma maciça, adaptada de [16] e [17]	5
Tabela 2.2 - Materiais usados em <i>jackets</i> [33] .....	14
Tabela 2.3 - Comparação entre SFO intrínsecos e extrínsecos, adaptada de [36] .....	17
Tabela 2.4 - Diferentes classificações de SFO, adaptada de [41, 42] .....	19
Tabela 2.5 - Classificação por características de sistemas de MSH em turbinas eólicas [50] ..	22
Tabela 3.1 - Propriedades das fibras óticas utilizadas .....	28
Tabela 4.1 - Valor máximo das médias de 90% e 10% e a sua razão para a fibra F-MLD .....	37
Tabela 4.2 - Valor máximo das médias de 90% e 10% e a sua razão para a fibra F-SPF .....	41
Tabela 4.3 - Valor máximo das médias de 90% e 10% e a sua razão para a fibra F-SF.....	45
Tabela 4.4 - Valor máximo das médias de 90% e 10% e a sua razão para a fibra F-MLD inserida no compósito de carbono.....	50
Tabela 4.5 - Valor máximo das médias de 90% e 10% e a sua razão para a fibra F-SPF inserida no compósito de carbono.....	54
Tabela 4.6 - Valor máximo das médias de 90% e 10% e a sua razão para a fibra F-MLD inserida no compósito de fibra de vidro.....	58
Tabela 4.7 - Valor máximo das médias de 90% e 10% e a sua razão para a fibra F-SPF inserida no compósito de fibra de vidro.....	62



# Lista de Acrónimos

3D	3 Dimensões
ADN	Ácido desoxirribonucleico
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CCD	Dispositivo de carga acoplada
CFRC	Cerâmico reforçado com fibras cerâmicas
CFRP	Polímero (ou plástico) reforçado com fibra de carbono
CMC	Compósitos de matriz cerâmica
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>
FO	Fibra ótica
FOG	Giroscópio de fibra ótica
GFRP	Polímero (ou plástico) reforçado com fibra de vidro
HS	Elevada resistência à tração ( $\sigma_u$ elevado)
IV	Infravermelho
LDR	Fotoresistência
LSFH	<i>Low-Smoke Free-Halogen</i>
MMC	Compósitos de matriz metálica
MSH	Monitorização de saúde estrutural
PA	Poliamida
PAN	Poliacrilonitrila
PBT	Polibutileno de teraftalato
PE	Poliétileno
pH	Potencial de hidrogénio
PMC	Compósitos de matriz polimérica
PP	Polipropileno
PTFE	Politetrafluoretileno
PUR	Poliuretano
PVC	Policloreto de vinilo
REM	Matriz de resina epoxy
SFO	Sensores de fibra ótica
UV	Ultravioleta



# Capítulo 1 - Motivação e objetivos

## 1.1 - Motivação

Nos dias de hoje os materiais compósitos são usados nas mais variadas áreas, como por exemplo nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, automóvel, e também na construção civil e naval. Estes materiais são usado em tantas indústrias porque possuem algumas propriedades que os distinguem de outros tipos de materiais. As propriedades mais importantes são a sua elevada resistência mecânica, elevada rigidez específica, resistência à corrosão, baixa densidade e bom desempenho à fadiga. É importante vigiar de forma constante o estado da estrutura ou sistema para que, na ocorrência de uma falha, se possa intervir a tempo de evitar danos catastróficos [1].

Nos últimos anos, em especial nas últimas duas décadas, um número significativo de sistemas sensoriais inovadores que usam sensores de fibra ótica têm sido desenvolvidos e explorados por diversas áreas de engenharia. Isto acontece porque as fibras óticas possuem um conjunto de vantagens como o seu tamanho e peso reduzidos, imunidade a interferências eletromagnéticas e à corrosão e também a possibilidade de serem introduzidas no interior das estruturas que se pretende monitorizar. Estas características únicas permitem que os sistemas sensoriais de fibra ótica sejam incorporados em várias estruturas como pontes, edifícios, túneis, condutas, turbinas eólicas, infraestruturas ferroviárias, etc. [1].

Uma estrutura que se monitorize de forma autónoma e que não necessite de inspeção periódica é um objetivo ambicioso mas eventualmente será possível num prazo curto. Como se sabe, o uso de materiais compósitos tem vindo a crescer ao logo dos anos. Torna-se então cada vez mais importante desenvolver métodos que permitam a monitorização de estruturas. É também importante que a tecnologia desenvolvida não seja demasiado complexa nem acarrete custos demasiado elevados pois pode limitar a sua utilização e também impedir um maior número de utilizadores com menos formação de a utilizem no seu dia-a-dia sem grandes dificuldades.

Um dos principais mecanismos de dano nos materiais compósitos são as delaminações que muitas vezes não são visíveis do exterior e que requerem o uso de sensores embebidos.

## 1.2 - Objetivos

É importante, qualquer que seja a área da engenharia, aumentar a eficiência: -maximizando o tempo útil de serviço, e minimizando os custos, sem comprometer a qualidade. O que não implica necessariamente uma diminuição de qualidade. Na área da manutenção é importante a detecção de falhas antes destas ocorrerem ou, quando não é possível esta hipótese, promover a substituição da peça ou componente já depois do dano ter ocorrido.

Quando um equipamento está num local remoto, o responsável pela sua manutenção tem que se deslocar até ao local e efetivamente inspecionar o equipamento. Em muitos casos é suficiente que o próprio equipamento, associado a um sistema de monitorização envie sistematicamente indicações sobre a sua condição atual. Desta forma pode-se, à distância, tomar decisões sobre se é necessário algum tipo de intervenção promovendo-se poupanças de tempo e dinheiro.

Outro caso é quando um equipamento faz parte de uma linha de produção e interessa sobretudo não interromper a sua função. A colocação de um sistema sensível que o monitorize sem ter de interromper o seu funcionamento é também importante.

Também é relevante que o sistema de monitorização implementado não seja demasiado complexo nem tenha demasiada tecnologia incorporada. Assim sendo o responsável da manutenção com um mínimo de formação é capaz de usar o sistema.

Ao inserir a fibra ótica na estrutura de qualquer componente produz-se um defeito. Defeito esse que mais tarde pode influenciar os resultados menos positivos do sistema onde está inserido-

Associado aos principais mecanismos de falha mecânica (por exemplo a deformação plástica, propagação de fenda ou fadiga) está o aumento da temperatura, embora muitas vezes em áreas limitadas da estrutura.

Com este trabalho pretende-se:

- 1) Estudar o comportamento de diversas fibras óticas enquanto sensor de temperatura;
- 2) Analisar o comportamento do sinal espectral em função de uma fonte de sinal luminoso;
- 3) Analisar o comportamento em função da incorporação dos sensores óticos em materiais compósitos de matriz polimérica.

# Capítulo 2 - Introdução

Atualmente, quer na área dos materiais compósitos quer na área das estruturas, temos assistido a uma preocupação geral em desenvolver e estudar tecnologias que avisem quando um problema ocorre, sendo este problema detetado quando ocorre ou quando é expectável que aconteça. Este tipo de materiais ou estruturas são conhecidos como materiais inteligentes.

Materiais inteligentes (ou *smart materials*) são, por definição, materiais capazes de "sentir" alterações ocorridas no seu interior, de as interpretar e de reagir a elas com recurso a atuadores. Quando estes materiais são usados na conceção de navios, pontes, aeronaves, veículos e outros tipos de sistemas é possível perceber o estado geral de degradação da estrutura, antes e durante o seu uso [2, 3].

Os danos ocorridos nas estruturas têm origem em acidentes, desastres naturais, falhas de projeto, etc. De um modo geral, a maioria das estruturas contam com programas de manutenção, desde a inspeção visual e alguns sensores convencionais com a finalidade monitorizar os eventuais danos ocorridos. Estes danos normalmente não estão visíveis a olho nu quando a observação é feita sem ajuda de outros equipamentos. A manutenção, reparação destas estruturas e a sensibilidade dos outros sensores para as condições ambientais leva a que este processo tenha um custo elevado [4, 5, 6].

Os materiais compósitos apresentam melhores propriedades em comparação com os materiais convencionais nomeadamente a sua elevada resistência e rigidez específica. Um dos interesses nos materiais compósitos reside na capacidade de conceber um material mais adaptado para a função pretendida, a escolha do método de fabricação, a arquitetura de materiais e componentes mais adequados à função pretendida [2, 7].

A integração de sistemas sensoriais de fibra ótica envolve a combinação de lasers óticos, fibra ótica, optoelectrónica, inteligência artificial, ciência de materiais compósitos e engenharia de estruturas. Os sensores de fibra ótica têm um número de vantagens sobre os seus homólogos elétricos e são os principais candidatos para integrarem os sistemas de deteção complexos. Essas vantagens são o seu peso mínimo, tamanho reduzido, elevada largura de banda, alta sensibilidade, imunidade a interferências eletromagnéticas, possibilidade de operar em ambientes perigosos e na presença de correntes elétricas [6, 8, 9].

A fibra ótica é também capaz de transmitir dados e sinais de voz e vídeo no mesmo canal de uma forma economicamente eficaz, fiável e de modo eficiente. Devido ao seu peso e dimensões reduzidas as fibras óticas são adequadas para serem incorporadas ou ligadas a uma estrutura. Não são necessários fios ou cabos para ligar os sensores ao sistema de controlo porque as fibras, por si

só, atuam como elementos detetores ou sensoriais e também como meio de propagação de sinal [10].

No entanto é necessário ter cautela quando se insere a fibra ótica na estrutura que vai ser monitorizada. A região adjacente à fibra ótica sofre sempre uma perturbação. Em camadas laminadas unidirecionais, quando a fibra está colocada perpendicularmente em relação à direção das fibras de carbono do compósito adjacentes, existe uma região lenticular, rica em resina, e onde não há fibras de reforço. Esta região comporta-se como uma descontinuidade que pode ser uma potencial fonte de dano tanto na presença de cargas estáticas como dinâmicas [11].

## 2.1 - Materiais Compósitos

Um material compósito é, por definição, uma mistura de dois ou mais materiais que estão macroscopicamente distinguíveis e que possuem propriedades complementares (melhores propriedades que os materiais individualmente). Esta definição realça o possível melhoramento de propriedades quando os compósitos são fabricados [12]. Uma outra forma de definir um compósito é dizer que este é a combinação de dois ou mais materiais cuja combinação tem melhores propriedades do que cada material que o compõe apresenta individualmente.

Muitos materiais compósitos são compostos por apenas duas fases; uma das fases é a matriz, que é contínua e envolve a outra fase, chamada frequentemente de fase dispersa ou reforço. As propriedades dos compósitos são uma função das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria do reforço [13].

A incorporação de fibras para melhorar as propriedades dos materiais começou nos primórdios da história da humanidade. Um dos primeiros exemplos, referido no *Antigo Testamento*, são os tijolos de argila reforçados com fibras vegetais (juta). Hoje em dia, o conjunto de materiais que se adjetivam de compósitos é muito vasto, e vão desde o betão armado até aos compósitos de alto desempenho, à base de resinas de epóxido reforçadas com fibras contínuas de carbono [14].

O reforço (ou fase estrutural) em geral possui um módulo de elasticidade elevado, tem uma elevada resistência mecânica e é representado por um material fibroso. A matriz possui um módulo de elasticidade mais reduzido e, em geral é capaz de grande alongamento sendo tipicamente constituída de um material com capacidade de deformação plástica, não quebradiço [15].

A matriz confere estrutura, forma e continuidade ao material compósito, preenchendo os espaços vazios que ficam entre os materiais de reforços e mantendo-os nas suas posições relativas. O reforço é responsável por realçar as propriedades mecânicas, eletromagnéticas ou químicas do material compósito como um todo. Na Figura 2.1 está representado um esquema genérico de um material compósito.

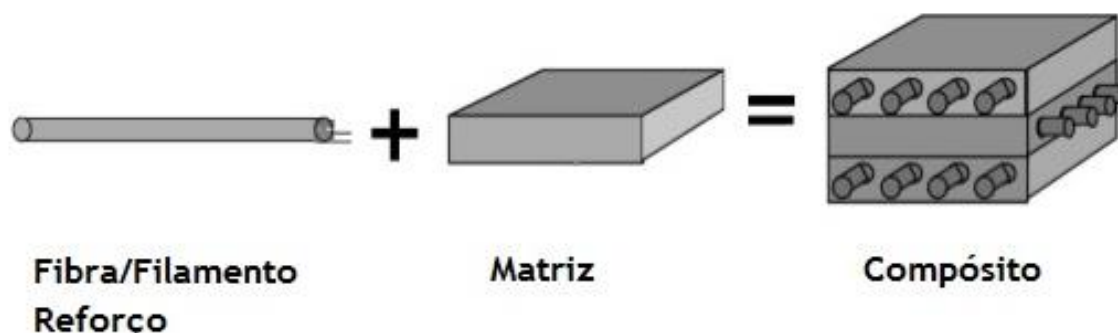


Figura 2.1 - Esquema de um material compósito genérico [62]

Uma das razões principais para as excelentes propriedades dos compósitos resulta do facto de as fibras apresentarem propriedades mecânicas muito superiores às dos materiais idênticos na forma maciça [14].

Tabela 2.1 - Propriedades de fibras e materiais na sua forma maciça, adaptada de [16] e [17]

Material	Módulo de elasticidade, E (GPa)	Resistência à tração, $\sigma_u$ (GPa)	Densidade, $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> )	Módulo específico, E/ $\rho$	Resistência específica, $\sigma_u/\rho$
<b>Fibras:</b>					
Vidro E	72	3,5	2,54	28,5	1,38
Vidro S	87	4,3	2,49	35	1,7
Carbono ( <i>Pitch</i> )	690	2,2	2,15	321	1
Carbono (PAN)	345	2,3	1,85	186	1,24
Boro	393	3,1	2,7	146	1,15
Sílica	72,4	5,8	2,19	33	2,65
Tungsténio	414	4,2	19,3	21	0,22
Berílio	240	1,3	1,83	131	0,71
Kevlar® 49	131	3,6	1,45	90	2,48
<b>Materiais convencionais:</b>					
Aço	210	0,34 - 2,1	7,8	26,9	0,043 - 0,27
Ligas de Alumínio	70	0,14 - 0,62	2,7	25,9	0,052 - 0,23
Vidro	70	0,7 - 2,1	2,5	28	0,28 - 0,84
Tungsténio	350	1,1 - 4,1	19,3	18,1	0,057 - 0,21
Berílio	300	0,7	1,83	164	0,38

Com se pode observar na Tabela 2.1, os materiais compósitos apresentam excelentes características físicas e mecânicas por unidade de massa, com vantagens claras em relação aos materiais convencionais, nomeadamente a resistência, a rigidez, resistência à fadiga, ao impacto e à corrosão. Para comparação com os metais são usados dois parâmetros para medir as vantagens

mecânicas relativas dos materiais compósitos: a resistência específica, traduzida pela relação entre a resistência e a massa específica; e a rigidez específica, traduzida pela relação entre o módulo de elasticidade e a massa específica. Estas duas propriedades são, normalmente, elevadas nos materiais compósitos. Por exemplo, a tensão de ruptura de um compósito unidirecional de carbono/epóxy é da mesma ordem de grandeza do aço, mas a sua resistência específica é três vezes superior. Assim, os materiais compósitos permitem ainda construir estruturas mais leves com igual, ou melhor desempenho [18].

Em relação à massa, os compósitos revelam propriedades mecânicas que podem exceder consideravelmente as propriedades dos metais. A combinação de excelentes propriedades mecânicas e leveza estrutural torna os compósitos interessantes materiais de aplicação em engenharia [15].

Outras vantagens apresentadas pelos materiais compósitos são a possível resistência a altas temperaturas e ao desgaste. Avanços tecnológicos permitem diminuir o custo de matérias-primas de processamento, o que vai possibilitar uma substituição dos materiais tradicionais por compósitos. Estes materiais além de continuarem a ter uma aplicação privilegiada em mercados avançados (militar, espacial e aeronáutica), prevê-se que substituam de forma crescente os materiais em aplicações de engenharia como na construção civil (como por exemplo na construção de pontes) e nos transportes (automóveis maioritariamente constituídos por materiais compósitos). Espera-se também uma contribuição em problemas específicos nos vários ramos do mercado, nomeadamente na medicina (próteses através do mimetismo, por exemplo a substituição do tecido ósseo requer um material com elevada resistência à corrosão, inerte, de reduzido módulo de elasticidade (15-20 GPa) e boa resistência mecânica (200 MPa) difícil de obter simultaneamente com uma liga metálico tradicional) [19].

Os materiais compósitos fornecem também flexibilidade de design porque podem ser moldados em formas complexas numa única peça, o que representa uma grande vantagem quando se produz algo como uma prancha de surf ou um casco de barco, por exemplo.

A desvantagem dos compósitos é geralmente o custo. Embora os processos de fabrico sejam muitas vezes mais eficientes quando são utilizados materiais compósitos, as matérias-primas são caras. Talvez os compósitos nunca substituam totalmente os materiais tradicionais como o aço, mas em muitos casos eles são exatamente o que é preciso. E, sem dúvida novos usos serão encontrados com a evolução tecnológica. Hoje em dia ainda não se tem uma certeza de tudo o que os compósitos podem fazer [20].

## 2.1.1 - Classificação de materiais compósitos

Tipicamente, os compósitos são classificados pelo material que forma a matriz. As propriedades dos compósitos dependem de propriedades físicas e de fatores inerentes às fases constituintes, como as suas quantidades relativas e a geometria do reforço. O reforço existe em diversas formas sendo a classificação mais geral feita em três categorias: compósitos particulados, compósitos de fibras descontínuas (*whiskers*) e compósitos de fibras contínuas. No geral, os constituintes do reforço dos compósitos proporcionam elevada resistência e elevada rigidez específica, mas também aumentam a resistência ao calor, corrosão e condutividade. Para o reforço representar uma vantagem para o compósito este deve ser mais forte e rígido que a matriz [14, 21].

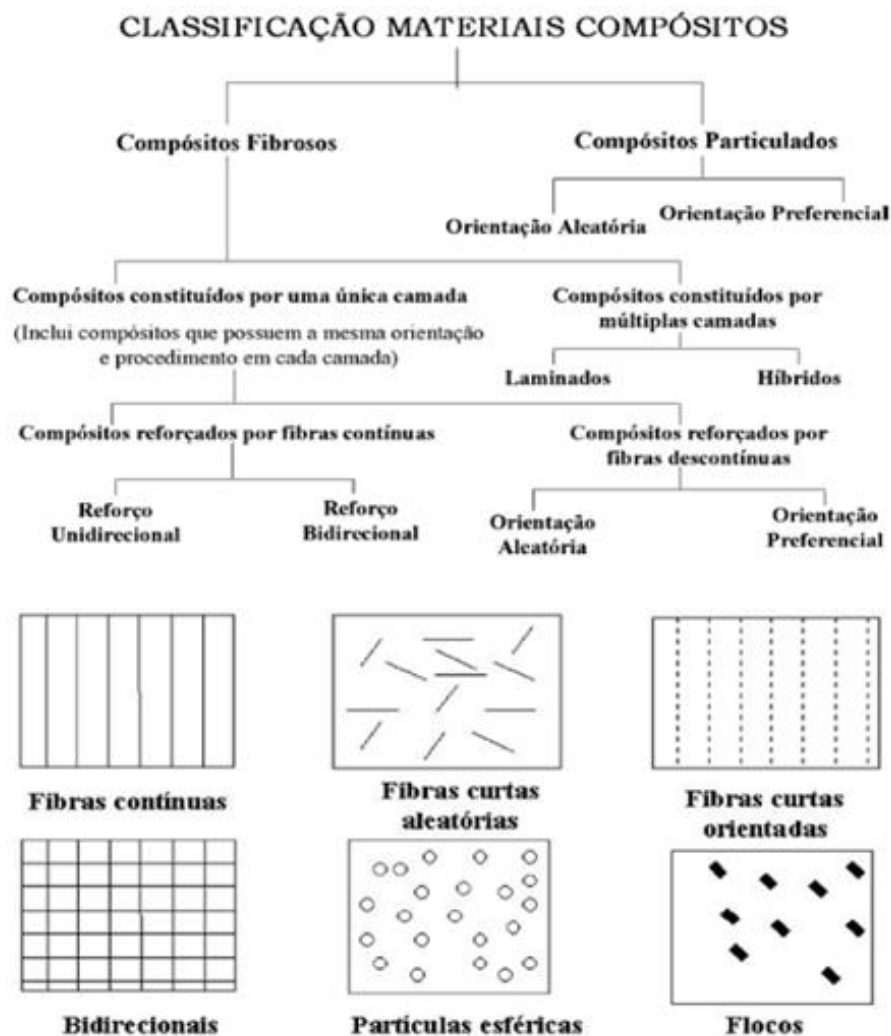


Figura 2.2 - Classificação dos Materiais Compósitos [21]

Como se pode ver na Figura 2.2, os materiais compósitos podem ser classificados como compósitos fibrosos e particulados, que por sua vez são classificados de acordo com a orientação das partículas. Os materiais compósitos fibrosos podem ser de camada única ou constituídos por mais do que uma camada (laminados ou híbridos). Os compósitos fibrosos de camada única podem ser reforçados com fibras contínuas e descontínuas e são classificados de acordo com a orientação das suas fibras.

## 2.1.2 - Tipos de Matrizes em Materiais Compósitos

Como foi referido anteriormente, as funções primárias das matrizes são estabilizar a forma do componente e distribuir as forças entre as fibras. Acresce ainda que, ao manter separadas uma fibra da outra, a matriz promove a resistência à fadiga do material, pois impede que fibras adjacentes propaguem uma falha. Isto é particularmente importante para as matrizes de tipo polimérico.

Existem três tipos principais de matrizes em materiais compósitos:

Matriz Cerâmica - Compósitos de matriz cerâmica (CMC) são um subgrupo de materiais compósitos. Consistem em fibras metálicas, cerâmicas ou até poliméricas embebidas numa matriz cerâmica, formando assim um material cerâmico reforçado com fibras cerâmicas (CFRC). Materiais CMC são usualmente projetados para superar grandes desvantagens tais como a baixa resistência à tração, baixa resistência à propagação de fenda (fratura), excessiva fragilidade devido à reduzida deformação (elevado módulo de elasticidade), e limitada resistência ao choque térmico (coeficientes de expansão térmica dos constituintes podem ser diferentes), que por norma estão presentes em materiais cerâmicos técnicos tradicionais.

Matriz Metálica - Compósitos de matriz metálica (MMC) são materiais compósitos que contêm uma matriz metálica e outro material de reforço de um material diferente. A matriz metálica é reforçada com outro material para melhorar a resistência e minimizar o desgaste. Quando três ou mais partes constituintes estão presentes dá-se o nome de compósito híbrido. Em aplicações estruturais, a matriz é geralmente composta por um metal mais leve como o magnésio, titânio ou alumínio. Em aplicações onde a temperatura é maior é mais comum serem usadas ligas metálicas de cobalto e cobalto-níquel. O reforço é comum ser de fibras/partículas cerâmicas (matriz de alumínio reforçado por partículas de  $Al_2O_3$  para aumentar a temperatura de serviço, por exemplo usadas em blocos de motores) ou fibras/partículas metálicas para aumentar a tensão limite de elasticidade, por exemplo matriz de alumínio com reforço de aço martensítico.

Matriz polimérica - Compósitos de matriz polimérica (PMC) podem ser divididos em três subtipos, a saber, termoendurecíveis, termoplásticos e elastómeros (ou borrachas). Um polímero é uma grande molécula composta por unidades estruturais (monómeros) que se repetem unidas por ligações químicas predominantemente covalentes. Os PMC são a junção de numa matriz polimérica e de uma fase dispersa com fibras contínuas. São mais baratos e com métodos de fabrico mais simples com temperatura de processamento mais reduzida. São também menos densos que os metais ou cerâmicas e resistem melhor quando sujeitos a corrosão atmosférica ou de outro tipo. Apresentam também uma resistência superior à condução de corrente elétrica (comparando com a generalidade dos metais) [22].

Os materiais termoplásticos atualmente dominam, como matrizes usadas em bio fibras inovadoras; os termoplásticos mais frequentemente utilizados para este fim são de polipropileno (PP), polietileno e policloreto de vinilo (PVC). Por outro lado, as resinas fenólicas, epóxicas e de poliéster são os tipos de matrizes termoendurecíveis mais vulgarmente utilizados. [23]. As borrachas (neopreno, butadieno) são reforçadas com partículas de carbonetos e nitretos para serem usadas em aplicações que exijam elevada resistência ao desgaste como são os pneumáticos.

### 2.1.3 - Tipos de Reforço em Materiais Compósitos

As fibras que formam o reforço são uma parte muito importante nos compósitos de fibra reforçados com poliéster. Um elevado número de trabalhos de pesquisa e desenvolvimento foi feito com as fibras sobre a influência nos tipos, fração de volume, arquitetura e orientações das mesmas. A fibra ocupa geralmente 30 % - 70 % do volume da matriz nos compósitos. Podem ser picadas (*chopped*), formar tecidos (*woven*), costuradas (*stitched*), e trançado (*braided*). São geralmente tratadas com dimensionamento, tais como o amido, gelatina, óleo, cera e polímeros baseados no silano para melhorar a ligação matriz-reforço, bem como ligantes para melhorar o manuseamento. A fibra de vidro é a menos dispendiosa e a fibra de carbono a mais cara. O custo das fibras de aramida é aproximadamente o mesmo que as fibras de carbono de menor qualidade. Existem outras fibras de alta resistência e de elevado módulo, como as de boro mas o seu custo é neste momento proibitivo sendo apenas usadas em aplicações muito específicas [24].

As fibras que formam o reforço podem ser de diversos tipos, no entanto as mais comuns são as fibras de carbono, as fibras aramidadas (ou Kevlar® - que é o nome comercial das fibras aramidadas produzidas pela DuPont) e as fibras de vidro.

Existem ainda os “tecidos híbridos”, em geral feitos a partir das fibras acima referidas, onde se usam tipos diversos de fibras em direções diversas. No entanto, não se trata propriamente de um “outro tipo de fibra”, mas simplesmente de uma combinação de fibras diversas na fabricação de tecidos. Há também fibras de carbeto de silício, fibras de polietileno, de nylon, de boro, etc.

Por terem em geral um diâmetro extremamente pequeno (de ordem micrométrica), a densidade de ligações atômicas na direção longitudinal num feixe de fibras é muito maior que em qualquer outra direção, aproximando as características de um feixe de fibras às características ideais de uma macromolécula individual com propriedades anisotrópicas. Em outros termos, é como se toda a resistência somada de todas as ligações atômicas do material se concentrasse na direção longitudinal do feixe, conferindo a este uma extrema anisotropia. Anisotropia é o contrário de isotropia. Esta última significa que o material tem as mesmas propriedades (resistência, elasticidade, etc.) em todas as direções possíveis. Logo, a anisotropia significa que as propriedades dependem da direção em que a solicitação é aplicada ao material.

Os processos de produção das fibras desde as suas matérias-primas variam de acordo com o tipo de fibra. Em alguns casos são complexos e envolvem segredos industriais quanto aos detalhes específicos. O produto elementar são filamentos contínuos, reunidos em feixes que somam milhares desses filamentos (especifica-se como 1k, 3k, 6k, 12k, etc. um feixe de mil, três mil, seis mil, 12 mil, etc. filamentos). Nestes feixes, conhecidos em inglês como *tows* (Figura 2.3), os filamentos podem estar ou não perfeitamente alinhados em paralelo; podem ou não estar torcidos (girando em torno de um eixo como as roscas de um parafuso), e podem ou não terem sido pré-tratados quimicamente - em geral para protegê-los das adversidades do ambiente e melhorar a compatibilidade entre as fibras e as matrizes [3, 25, 26, 27].



Figura 2.3 - Um feixe (*tow*) de fibra de carbono composto por milhares de filamentos [26]

Estes feixes são enrolados em bobinas e posteriormente, através de tecnologias têxteis tradicionais, usar esse material como matéria-prima para a produção de tecidos. Estes tecidos, por sua vez, podem ser feitos segundo diversos padrões e formas de rede (trama) diferentes. A mais simples é bidirecional, também conhecida como sarja (*plain*), onde os feixes se cruzam em xadrez em ângulos de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . Variações desta incluem a rede tafetá (*twill*) e *satin*, em que o padrão “xadrez” é substituído por outros, embora se mantenha o alinhamento de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . Como se pode ver, na Figura 2.4 estão exemplos de formas de trama [25, 26].

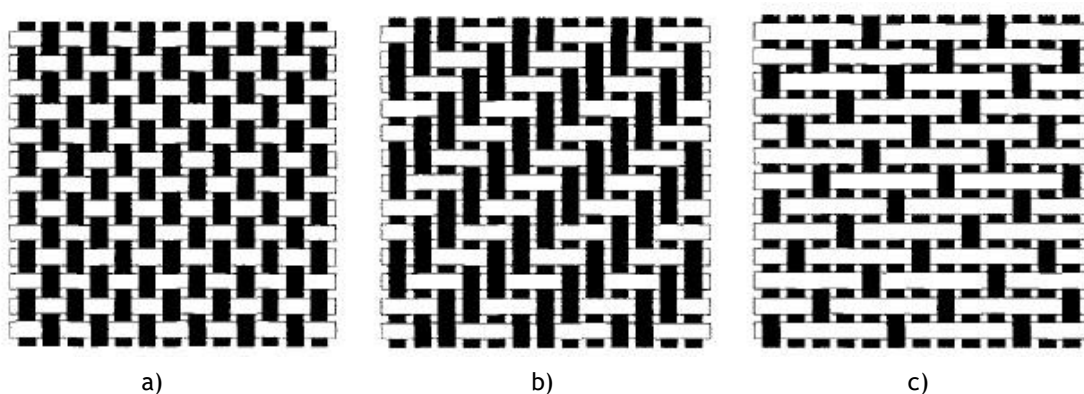


Figura 2.4 - Formas de arquiteturas de rede comuns: a) *plain*; b) *twill*; c) *satin* [27]

Podem ser também feitos tecidos unidirecionais, em que todos os filamentos são alinhados paralelamente uns aos outros, enquanto um filamento transversal é disposto em intervalos regulares de forma a manter as fibras unidirecionais na devida posição. Formas mais complexas envolvem direções diferentes de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , ou a inclusão em uma rede *plain* de feixes que se cruzam tipicamente a  $45^\circ$ ,  $30^\circ$  ou  $60^\circ$ . Recentemente, foram desenvolvidas inclusive alguns tecidos tridimensionais [25, 26].



Figura 2.5 - Tecido de fibra de carbono unidirecional [26]

O tipo de rede é limitado apenas pela tecnologia têxtil e pela criatividade e demanda das respectivas indústrias. No entanto, o tipo de tecido a ser escolhido para a produção de um determinado componente ou a escolha de produzi-lo a partir dos *tows* é extremamente dependente da aplicação e das solicitações mecânicas a que o componente estará sujeito, além da eficiência econômica que pode proporcionar [25, 26].

Uma forma mais precisa de indicar os constituintes do compósito é no formato “reforço/matriz”. Assim, “carbono/*epoxy*” significa que estamos a referir-nos a um compósito reforçado com fibras de carbono numa matriz polimérica de resina *epoxy*. Outras siglas normalmente usadas para o caso de matrizes poliméricas são GFRP e CFRP, respetivamente para *Glass Fiber Reinforced Polymers* (ou *Plastics*) e *Carbon Fiber Reinforced Polymers* (ou *Plastics*) [26].

## 2.2 - Fibras óticas

Habitualmente, a informação viaja de diferentes maneiras. Por exemplo, quando se usa um telefone fixo para comunicar, um cabo transporta os sons (sinal) da nossa voz para uma “tomada” na parede, onde um outro cabo leva esta informação para a central telefónica local. Os telemóveis funcionam de forma diferente: estes enviam e recebem informações através de ondas de rádio - aqui a informação viaja sem cabos e de forma invisível. A transmissão de dados numa fibra ótica funciona de forma diferente destas duas. A informação codificada é enviada num feixe de luz para o interior um tubo de vidro ou de plástico. No início, a fibra ótica foi originalmente desenvolvida para aplicação em endoscópios na década de 1950 para ajudar os médicos a ver o interior do corpo humano sem ter que operar o paciente. Na década de 1960, desenvolveu-se uma maneira de usar a mesma tecnologia para transmitir ligações telefónicas à velocidade da luz (aproximadamente 300.000 km por segundo) [28].

Uma fibra ótica é tipicamente um guia de onda (*waveguide*) com um diâmetro na ordem dos 0,1 mm que permite transmitir luz sobre distâncias elevadas. Uma grande variedade de fibras óticas, chamadas de mono modo (*singlemode*) ou multimodo (*multimode*), têm sido desenvolvidas em vidro ou plástico, com núcleos sólidos ou ocos, envolvidos de diversas formas para transmitir sinais em espectro visível ou em algumas gamas do espectro não visível.

As fibras óticas têm sido usadas como canais de comunicação onde as ondas de luz se propagam ao longo de trajetos de longas distâncias. Nesta situação as fibras são isoladas das perturbações exteriores com recurso a meios de cablagem técnica. No entanto, ao destacar ou reforçar a influência que o meio que rodeia a fibra tem sobre as propriedades da luz que viaja no seu interior, as fibras podem ser usadas para detetar, monitorizar, e até medir perturbações externas.

Por vezes é difícil detetar a ocorrência de dano em peças ou materiais que possuem tamanhos ou formas de estrutura tais que se torna difícil ver o próprio dano. Nestes casos pode usar-se fibras óticas colocadas na própria estrutura que fornecem dados em tempo real do que está a acontecer. O ideal seria a previsão da ocorrência de uma falha, o seu diagnóstico e, se possível, o sistema atuar autonomamente em resposta ao que aconteceu (ou está para acontecer) [29, 30].

## 2.2.1 - Funcionamento das fibras óticas

Um feixe luminoso percorre o núcleo (*core*) no interior de um cabo de fibra ótica limitado pelo *cladding*. Cada fóton (partícula de luz) ressalta e continua a sua viagem pelo interior da fibra da mesma maneira que um *bobsleigh* percorre a sua pista durante uma corrida no gelo. Seria de esperar que um feixe de luz, a viajar num tubo de vidro transparente, saísse simplesmente pelas suas bordas. No entanto, se a luz atingir o vidro fazendo um ângulo relativamente pequeno (menos de  $42^\circ$ ), chamado de ângulo de aceitação (*acceptance angle*), é refletida outra vez - como se o vidro fosse mesmo um espelho. Este fenómeno é chamado de reflexão interna total (*total internal reflection*). Este fenómeno é uma das razões que leva a que a luz se mantenha no interior do cabo. Na Figura 2.6 ilustra-se um esquema de um feixe de luz e seu comportamento no interior de uma fibra ótica [28].

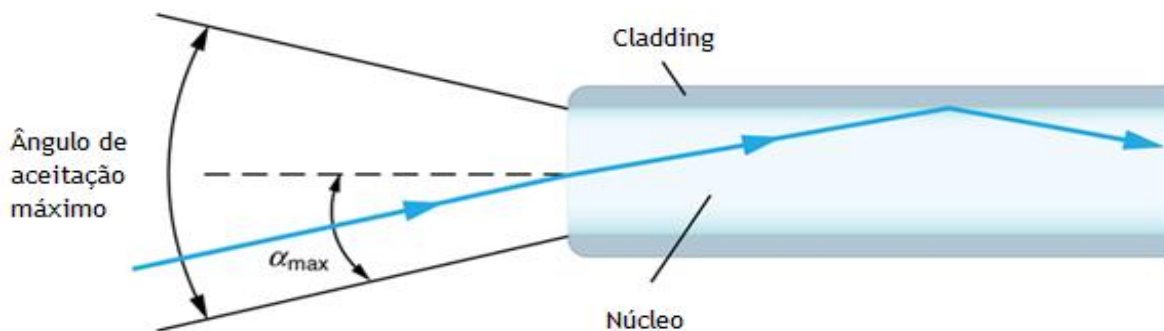


Figura 2.6 - Feixes de luz ao entrar numa fibra ótica [63]

Outra das razões que mantém a luz no interior do cabo é a própria estrutura deste, que é composta por duas partes distintas. A parte principal da fibra ótica, localizada no meio, é o núcleo e, é no seu interior que a luz viaja. O núcleo é envolvido em todo o seu exterior por outra camada de vidro que é o revestimento (ou *cladding*). A função do *cladding* é manter a luz no interior do núcleo. Isto só é possível porque o *cladding* é feito de um tipo de vidro diferente do vidro que constitui o núcleo. Mais tecnicamente, o *cladding* tem um índice de refração (*refractive index*) com valor mais baixo do que o núcleo. Assim, o vidro do *cladding* provoca uma reflexão interna total que impede a luz de escapar do interior do núcleo. A luz viaja de ressalto em ressalto pelo interior do núcleo ate sair na outra extremidade do cabo [28].

Os cabos de fibra ótica possuem também uma ou mais camadas exteriores além do já referido *cladding*. Estas camadas exteriores (*buffer*) servem para encapsular uma ou mais fibras óticas com o propósito de isolar mecanicamente, proteger contra danos físicos e identificar a fibra ótica sobre a qual foram colocadas, como está representado na Figura 2.7.

O *buffer* pode ser aplicado na fibra por vários processos como pulverização, imersão, extrusão e métodos electrostáticos. Os materiais mais usados na fabricação de *buffers* são os polímeros baseados em fluor (*fluoropolymers*) como fluoreto de polivinilideno (*polyvinylidene fluoride* ou Kynar®), politetrafluoretileno (PTFE ou Teflon®), ou poliuretano [31].

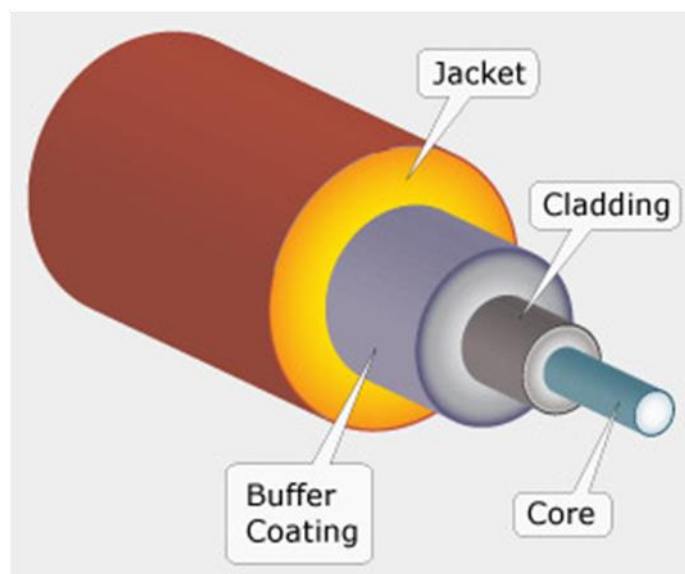


Figura 2.7 - Fibra óptica com ilustração do detalhe das diferentes camadas de revestimento [32]

A camada de invólucro final, conhecida como *jacket* pode ou não ser aplicada de acordo com a aplicação específica onde a fibra óptica vai ser usada. O material determina a robustez mecânica, resistência ao envelhecimento devido à radiação UV, etc. Hoje em dia, o PVC está a ser substituído por materiais alternativos sem elementos halogéneos (fluor, cloro, etc.) na sua composição, principalmente devido a normas ambientais mais rigorosas [33].

Tabela 2.2 - Materiais usados em *jackets* [33]

Material	Sem Halogéneo ( <i>halogen-free</i> )	Resistência a radiação UV	Notas
Polímero LSFH	Sim	Boa	Boa para aplicações no interior ( <i>indoor</i> )
Policloreto de vinilo (PVC)	Não	Boa	Atualmente a ser substituída por polímero LSFH
Poliétileno (PE)	Sim	Fraca	Boa para aplicações no exterior ( <i>outdoor</i> )
Poliuretano (PUR)	Sim	-	Cabos altamente flexíveis
Polibutileno de teraftalato (PBT)	Sim	Razoável?	Boa para aplicações no interior ( <i>indoor</i> )
Poliamida (PA)	Sim	Pobre-Bom	Aplicações interiores e exteriores ( <i>indoor e outdoor</i> )

Existe uma região na qual os sistemas de fibra óptica podem operar. Região essa que está compreendida entre 200 e 20.000 nm. O espectro visível (400-700 nm) e parte das regiões adjacentes do espectro infravermelho (700-1.000.000 nm) e ultravioleta (1-400 nm) estão também incluídas nesta região. O comprimento de onda usado em sistemas de fibra óptica é correspondente à característica de transmissão da fibra em particular. A maioria das fibras óticas usa vidro de sílica, que é mais transparente perto da região infravermelha (700-1600 nm). Fibras óticas de plástico operam melhor em

comprimentos de onda na região do espectro visível, fibras de vidro sem sílica operam em comprimentos de onda da região infravermelha e fibras com tipos especiais de sílica podem ser usadas na região próxima do ultravioleta [34].

As ondas eletromagnéticas podem ser definidas pelos mesmos conceitos que se aplicam a outras ondas, nomeadamente conceitos como frequência, comprimento de onda, amplitude e velocidade.

Tal como se podem produzir muitas frequências de ondas mecânicas diferentes (um piano, por exemplo, produz um som cuja frequência vai dos 30 aos 4000 ciclos por segundo ou hertz - Hz), também existe uma amplitude para as frequências eletromagnéticas. Esta vai desde as ondas rádio, com frequências de 1000 Hz, aos raios gama, com frequências que excedem um bilhão de bilhões de Hz. Cada frequência tem um comprimento de onda correspondente, obedecendo sempre ambos à relação frequência x comprimento de onda = velocidade da luz.

A gama de frequências e os comprimentos de onda correspondentes são representados sob a forma de um espectro eletromagnético (Figura 2.8). As ondas rádio, num extremo, têm comprimentos de onda de mais de 1 km, enquanto os raios gama, no outro extremo, têm comprimentos de onda que podem atingir os  $10^{-16}$  m [35].

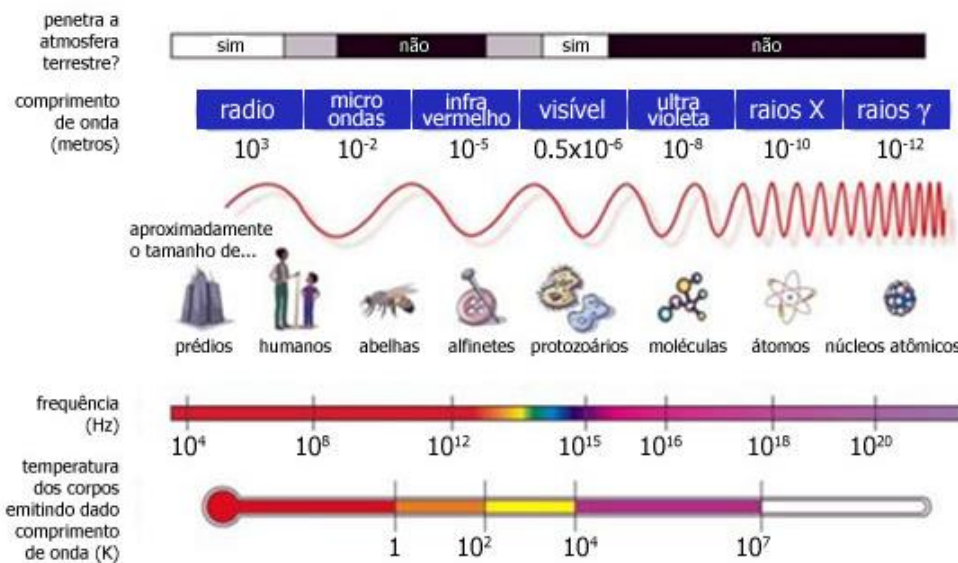


Figura 2.8 - Espectro eletromagnético [35]

O conjunto das radiações são: as ondas rádio (as menos energéticas), as radiações de micro-ondas, as radiações infravermelhas (IV), as radiações ultravioletas (UV), os raios X e os raios  $\gamma$  (as mais energéticas). A energia transportada por uma onda eletromagnética está diretamente relacionada com a sua frequência. Quanto mais alta for a frequência, maior a energia. Os raios X, por exemplo, têm energia suficiente para passarem através dos tecidos moles do corpo humano e podem, portanto, ser utilizados na obtenção de imagens em medicina. A radiação UV invisível tem menos energia do que os raios X, mas ainda a suficiente para matar microrganismos (o que a torna útil como agente esterilizador) e causar danos às células humanas. Quando é utilizada em laboratório, deve usar-se um visor para proteger a retina de quaisquer danos [35].

## 2.2.2 - Sensores de fibra ótica (SFO)

Um sensor é um dispositivo que mede uma grandeza física e converte-a num sinal que pode ser lido por um instrumento ou por um observador. Já um atuador é um dispositivo que recebe e responde a um sinal. A sensibilidade de um sensor indica a gama de alteração da saída quando o parâmetro que se está a medir sofre uma mudança. Sensores que medem alterações muito pequenas devem ter valores de sensibilidade muito altos.

Um sensor de fibra ótica é um sensor que mede uma grandeza física com base na sua modulação da intensidade, espectro, fase ou a polarização de luz que se desloca através de uma fibra ótica. Um sensor ótico é um dispositivo que converte os raios de luz em sinais eletrónicos. De uma forma semelhante a uma fotoresistência (ou LDR), mede a quantidade física de luz e converte-a num sinal lido posteriormente por um instrumento [36].

Quando os transdutores (equipamento que converte uma forma de energia associada a um parâmetro físico numa forma de energia diferente) são externos à fibra e a fibra apenas regista e transmite a quantidade detetada, os sensores são denominados sensores extrínsecos. Quando os sensores são incorporados ou fazem parte das fibras (em alguns casos existe uma modificação da própria fibra) os sensores são denominados sensores internos ou intrínsecos [36].

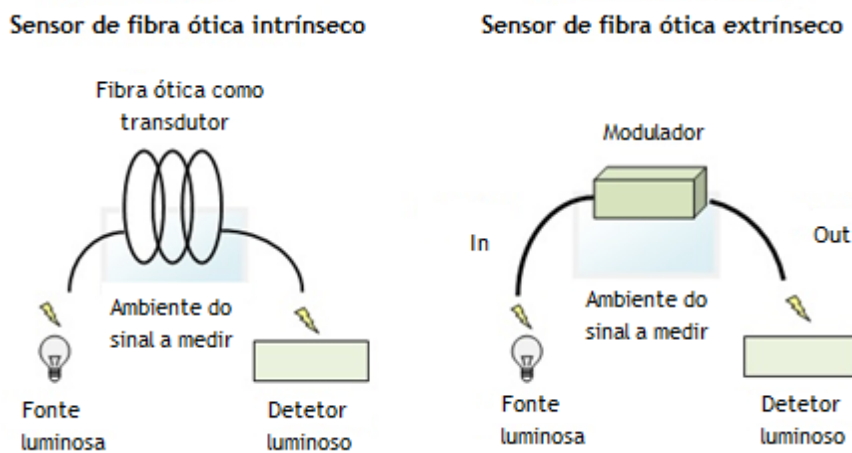


Figura 2.9 - SFO intrínsecos e extrínsecos [64]

Num sensor intrínseco, a própria fibra é o elemento sensor (a fibra é diretamente afetada pelo mensurado). O efeito do mensurado sobre a luz a ser transmitida tem lugar na própria fibra (atua como transdutor). O feixe de luz não chega a sair da fibra ótica mas é alterado enquanto está ainda contido dentro dela. Num sensor extrínseco, a fibra simplesmente transporta a luz para, ou a partir do elemento de deteção. No caso da imagem anterior, a fibra transporta a luz a partir da fonte e também para o detetor, mas a modulação ocorre fora da fibra [36].

Na Tabela 2.3 faz-se uma comparação entre os sensores intrínsecos e extrínsecos bem como as principais aplicações onde estes dois tipos de configuração de SFO são usados.

Tabela 2.3 - Comparação entre SFO intrínsecos e extrínsecos, adaptada de [36]

SFO Intrínsecos	SFO Extrínsecos
Aplicações - rotação, aceleração, deformação, pressão acústica e vibração	Aplicações - temperatura, pressão, medição de nível de líquido e fluxo
Mais sensíveis	Menos sensíveis
Mais difíceis de multiplexar	Mais fáceis de multiplexar
Reduz os problemas de conexão	Problemas de ligações de entrada/saída
Desmodulação de sinal mais elaborada	Mais fáceis de usar
Mais dispendiosos	Mais baratos

Os sensores de fibra ótica têm várias vantagens sobre sensores elétricos convencionais como o seu tamanho e peso reduzidos (na maior parte das aplicações estruturais os sensores não devem ser visíveis), imunidade a interferências eletromagnéticas, podem operar numa variedade de ambientes aquosos ou químicos, resistência à corrosão (exceto quando é escolhido um *cladding* metálico) capacidade de serem incorporados em estruturas, resistência a altas temperaturas, etc. Além disso têm poucas perdas de sinal em longas distâncias e possuem suficiente flexibilidade, resistência mecânica e resistência térmica para suportarem os processos de fabrico e serem introduzidos com relativa facilidade em compósitos laminados.

Permitem ainda fazer medições em longas distâncias (na ordem de quilómetros (*kilometer range*)) aproveitando o seu baixo coeficiente de atenuação. Além disso, vários sensores podem ser multiplexados numa única fibra. As aplicações onde podem ser usados vão desde a deteção de matéria para exploração de petróleo até ao controlo de produção do mesmo, por exemplo.

Ao serem colocados nas estruturas, monitorizam em tempo real áreas que de outra forma seriam inacessíveis. [1, 6, 8, 29, 37, 38, 39, 40].

Apesar do uso de sensores de fibra ótica ser aparentemente dispendioso para serem aplicados de forma mais usual na monitorização de estruturas, são, no entanto, uma forma melhor de abordagem para aplicações onde a confiabilidade em ambientes desafiadores é essencial. Quando a confiabilidade é um problema-chave, o preço, na maioria dos casos, não é um fator ao qual seja dada demasiada importância [41].

Hoje em dia é reconhecido que a tecnologia de SFO é atraente nos casos em que oferece um desempenho superior em comparação com a oferta de sensores convencionais mais usados. Além disso apresentam outras vantagens como por exemplo:

- Qualidade nas medições melhorada;
- Melhor fiabilidade;
- Possibilidade de substituir as leituras de avaliação manuais, por parte do operador, por medições automáticas;
- Fácil instalação e manutenção e custo de vida mais baixo [41].

As principais desvantagens associadas aos sensores de fibra ótica são as seguintes:

- Os sistemas de deteção podem ser complexos;
- Dispendiosos;
- Dificuldades de utilização para o utilizador final;
- Exigência de procedimentos de instalação precisos;
- Pouca estabilidade a longo prazo;
- Desenvolvimento de sistemas de medição é complexo.

Os SFO podem ser usados para medir diversos parâmetros como por exemplo temperatura, fluxo, posição linear e angular, viscosidade, deslocamento, nível de pH, rotação, vibração, humidade, aceleração, espécies químicas, velocidade, radiação, pressão, campos magnéticos, força, campos elétricos, nível de líquido, campos acústicos [36, 42].

Uma distribuição dos assuntos tratados, em função dos parâmetros medidos, pode ser encontrada na Figura 2.10. Os artigos que não estão diretamente relacionados com as grandezas medidas como nos casos onde se discutem interrogadores de sensores de *fiber grating*, multiplexagem, fontes luminosas, etc., não foram incluídos na estatística a partir da qual se contruiu o gráfico. Se um artigo aborda mais do que uma grandeza medida, esse artigo é dividido de forma igual pelas grandezas presentes. Artigos especiais que abordam giroscópios de fibra ótica não foram incluídos na estatística [43].

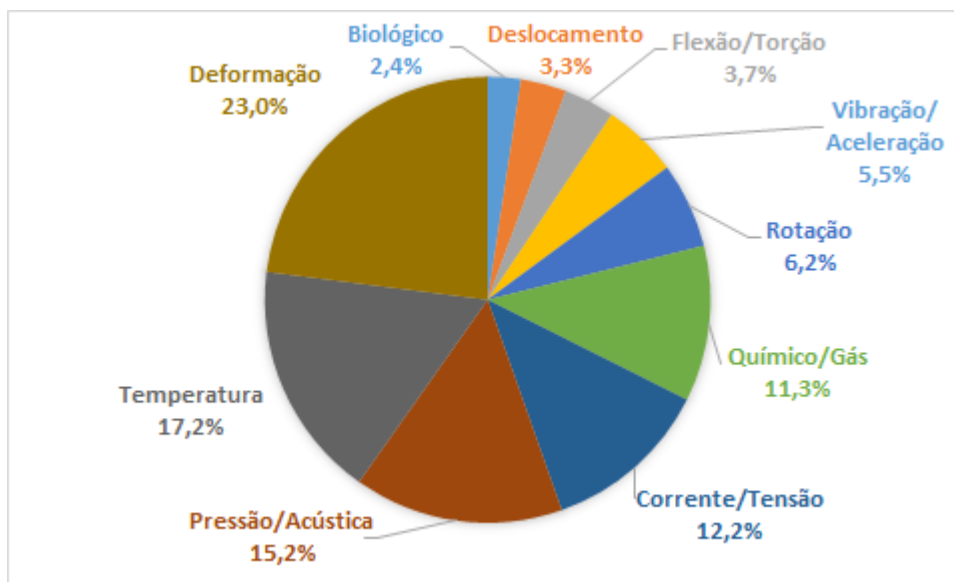


Figura 2.10 - Distribuição de artigos de SFO de acordo com as grandezas medidas [43]

Observa-se que as grandezas mais medidas são a deformação e a temperatura. No entanto, os SFO também são muito utilizados em medições de grandezas como a pressão/acústica, corrente/tensão e elementos químicos/gasosos.

Dependendo da propriedade da luz que é modificada, os SFO podem ser classificados em quatro categorias principais:

- Sensores de intensidade modulada (*intensity-modulated*);
- Sensores de fase modulada (*phase-modulated*);
- Sensores de polarização modulada (*polarization-modulated*);
- Sensores de comprimento de onda modulada (*wavelength-modulated*).

Podem ainda ser classificados baseados no seu posicionamento e também com base nas suas capacidades de medição [42].

Um sumário das diferentes classificações de SFO é apresentado na Tabela 2.4. Como se pode ver nessa tabela, os sensores de fibra podem ser classificados de acordo com a distribuição espacial do mensurado.

Tabela 2.4 - Diferentes classificações de SFO, adaptada de [41, 42]

Classificação baseada no princípio de funcionamento	Classificação baseada no posicionamento espacial	Classificação baseada nos parâmetros medidos
Sensores de intensidade modulada: Detecção através da potência da luz	Sensores pontuais: Pontos discretos, diferentes canais para cada sensor/mensurado	Sensor físico ( <i>physical</i> ): Temperatura, deformação, pressão, etc.
Sensores de fase modulada ( <i>interferometric</i> ): Detetam através fase do raio de luz	Sensores distribuídos: Mensurados determinados ao longo de um trajeto, superfície ou volume	Sensor químico ( <i>chemical</i> ): nível de pH, sensores de gás, estudo espectroscópico, etc.
Sensores de polarização modulada ( <i>polarimetric</i> ): Detecção de mudanças na polarização da luz	Sensores quase-distribuídos: Variáveis medidas em pontos discretos ao longo da ligação ótica	Bio-sensores: ADN, fluxo sanguíneo, sensores de glucose, etc.
Sensores de comprimento de onda modulada ( <i>spectometric</i> ): Detecção alterações nos comprimentos de onda da luz	Sensores integrados: Variável medida é integrada ao longo da ligação ótica dando um único valor na saída	

Por exemplo, um sensor pontual pode ser usado para “sentir” mensurados oriundos de pontos dispersos, e com capacidade de multiplexar espacialmente (*spatial multiplexing capability*), medições oriundas de múltiplos canais são possíveis para este tipo de sensores. Por outro lado, sensores de fibra distribuídos fornecem informação espacial e temporal do parâmetro medido em qualquer ponto ao longo da fibra com uma certa resolução. No caso de sensores quase-distribuídos, as medições podem ser efetuadas em vários pontos de uma única fibra, enquanto que os sensores integrados fornecem uma medição média da perturbação ao longo do comprimento sensível da fibra [42].

SFO distribuídos ou quase-distribuídos foram identificados como tendo alto impacto sobre as quatro aplicações de mercados chave emergentes: poços, segurança, estruturas inteligentes e deteção sísmica (indústria petrolífera) [41].

A distribuição de artigos de SFO de acordo com as tecnologias usadas pode ser visto na Figura 2.11. Se um artigo lida com mais do que uma grandeza medida, esse artigo é dividido de forma igual pelas grandezas presentes. Artigos especiais que abordam giroscópios de fibra ótica (FOGs) não foram incluídos na estatística [43].

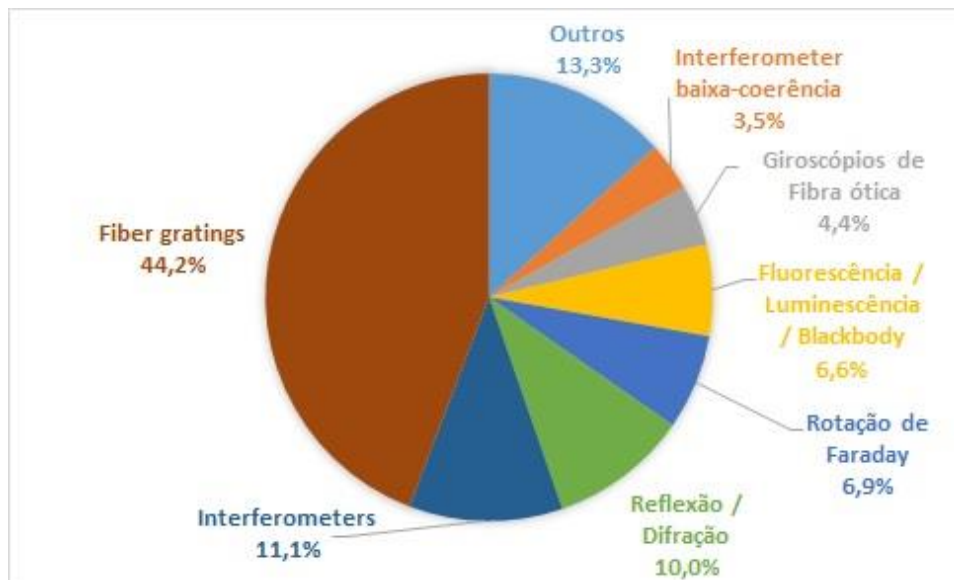


Figura 2.11 - Distribuição de artigos de SFO de acordo com as tecnologias utilizadas [43]

Da observação da Figura 2.11 conclui-se que a tecnologia mais usada é, de longe, a dos sensores de "grade" (por exemplo os sensores *Fiber Bragg gratings* ou FBG).

## 2.3 - Monitorização de saúde estrutural (MSH)

Os custos elevados da manutenção são sobretudo devidos ao facto dos métodos de monitorização usados atualmente detetarem a degradação da estrutura quando é demasiado tarde, ou seja, quando o dano já ocorreu. Esta monitorização é, na sua maioria, baseada em inspeções periódicas (na maioria dos casos inspeções periódicas baseadas na visualização) que tentam detetar fissuras (cracks) ou outras formas de degradação na estrutura. No entanto, na maioria dos casos este tipo de monitorização não é suficiente, pois implicam trabalhos de reparação dispendiosos. Deste modo, a ideia de monitorizar (o interior) da própria estrutura tem-se revelado como uma técnica muito mais útil para a deteção precoce de degradações estruturais.

São necessários sensores que sejam capazes de operar em ambientes mais severos ao longo do tempo de utilização da estrutura. Além disso, o sensor deve ter o menor tamanho possível para alterar o ponto de medição o mínimo possível e não influenciar com a sua presença a resposta da estrutura [44, 45, 46].

Quando falamos em estruturas usadas em missões aeroespaciais ou de perfuração no fundo do oceano, por exemplo, a estrutura está a ser comandada a partir da Terra e está a realizar a sua tarefa no espaço (ou localização remota). É importante confirmar que a sua saúde estrutural e deformação estão de acordo com os valores aceitáveis definidos em tempo real de forma a completar a sua missão sem problemas de maior. Neste caso, os sensores de fibra ótica são adequados para monitorizar estes parâmetros em tempo real [39].

MSH pode ser entendido como um sistema que inclui a deteção, interpretação e possivelmente também atuadores que permite que a carga e as condições causadoras de danos de uma estrutura sejam gravadas, analisadas, localizadas, e previstas de tal forma que o teste não destrutivo se torne uma parte integrante da estrutura [41].

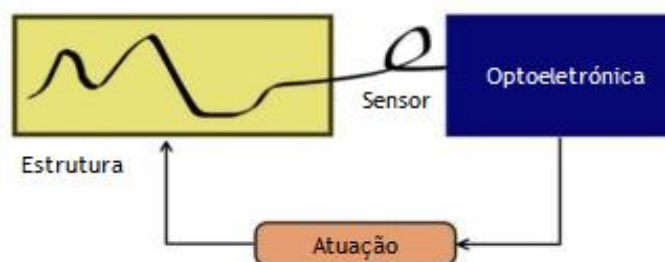


Figura 2.12 - Ilustração do conceito de um sistema geral de MSH [41]

Em geral, um sistema típico de MSH é composto por 3 componentes principais: um conjunto de sensores, um sistema de processamento de dados (que inclui a aquisição de dados, transmissão e armazenamento), e um sistema de avaliação de saúde (que inclui algoritmos de diagnóstico e gestão da informação) [41].

De acordo com a funcionalidade e grau de complexidade, os sistemas de MSH podem ser classificados em cinco níveis que variam desde a detecção de falhas simples até ao diagnóstico automático, prognóstico e, até mesmo intervenção tendo em vista a recuperação da condição de funcionalidade (autorreparação), a cura. Como se pode ver na figura seguinte, quanto maior o nível de MSH, mais elevada será a complexidade e respetivas funcionalidades [41].

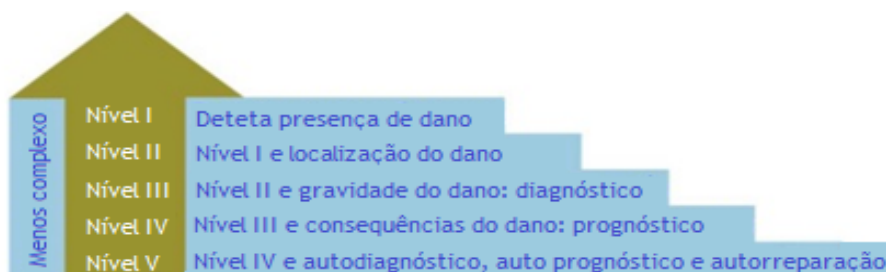


Figura 2.13 - Níveis de MSH. Quanto maior o nível, mais elevada a complexidade [41]

O potencial de aplicação para SFO na monitorização estrutural é enorme, incluindo a monitorização de estruturas civis e industriais (testes em vigas de cimento, longarinas de pontes, minas, recipientes para resíduos nucleares, túneis e barragens hidrelétricas), materiais compósitos (veículos espaciais, aviões, pás do rotor de aerogeradores e helicópteros, cascos de submarinos e navios, monitorização do processo de cura em materiais compósitos, etc.), monitorização acústica (agregados de hidrofones rebocado e sensores no interior de poços de petróleo); distribuição de serviços públicos de energia elétrica, gasodutos e, em geral, controle industrial, monitorização e processos [41, 47, 48, 49].

Na Tabela 2.5 está presente a classificação por características de sistemas de MSH em turbinas eólicas, sendo possível generalizar também para sistemas de MSH usados noutra tipo de infraestruturas ou instalações.

Tabela 2.5 - Classificação por características de sistemas de MSH em turbinas eólicas [50]

Função	Vantagens	Benefícios
Aviso precoce	Evitar colapso	Evitar custos de reparação
	Melhor planeamento da manutenção	Minimizar tempo de inatividade
Identificação do problema	Intervenção correta no tempo certo	Prolongar vida útil
	Minimizar substituições desnecessárias de peças	Reduzir custos de manutenção
	Problemas resolvidos antes do tempo da garantia acabar	Operações de controlo de qualidade durante a vigência da garantia
Monitorização contínua	Informação constante do estado de funcionamento	Segurança; menos stress

As estruturas podem também ser monitorizadas ainda no processo de fabrico. Geralmente, durante o processo de cura em compósitos laminados, é gerado um grande esforço residual térmico devido a diferenças nos coeficientes de dilatação térmica das respetivas camadas. O stresse térmico residual que ocorre durante a fabricação diminui muito a vida de fadiga e precisão dimensional das estruturas compósitas. A fim de resolver este problema, a tensão residual térmica deve ser reduzida ou eliminada através do ajuste do ciclo de cura. Assim, um sensor pode ser utilizado para monitorizar o processo, detetar o momento em que a viscosidade da matriz de resina é menor e também o momento em que o processo de cura chegou ao fim [51, 52, 53].

Existem até casos onde foram desenvolvidos mecanismos de cura autónomos. Por exemplo, incorporando um agente reparador microencapsulado e um catalisador químico no interior da própria resina. Quando uma fratura rompe as microcápsulas embebidas na estrutura, o agente restaurador é libertado. A polimerização ocorre quando o agente reparador entra em contacto com o catalisador, o que leva a que as faces da fratura se unirem-se [54, 55, 56, 57].

Como principais desafios para os sistemas de MSH, são identificados dois desafios técnicos fundamentais que são:

1- Desenvolvimento de técnicas que detetem com confiança e elevado nível de sensibilidade avarias estruturais antes destas ocorrerem ou comportamento estrutural invulgar;

2- Desenvolvimento de mecanismos de seleção de dados, modelos de armazenamento e processamento, e algoritmos robustos para detetar anomalias estruturais.

Além disso, são necessárias interfaces amigáveis feitas de forma simples com a infraestrutura [41].

É possível prever a vida de fadiga de longo prazo para laminados de CFRP sob condições de temperatura e absorção de água arbitrárias utilizando as curvas de funcionamento obtidas experimentalmente. Além disso, é evidente que a taxa de degradação da resistência à fadiga destes laminados de CFRP é determinado apenas pelo aumento de tempo, temperatura e absorção de água e é independente das constituições de fibras que são o tipo, a fração de volume e tipo de tecido [58].



# Capítulo 3 - Procedimento experimental

O objetivo deste trabalho é perceber se é possível detetar variações de temperatura em materiais compósitos com recurso a fibras óticas. Desta forma, a variação do sinal que passa através da fibra ótica em intervalos de temperatura conhecidos vai ser obtido e analisado. Outro objetivo é também perceber o efeito da resina e do próprio processo de fabrico sobre a fibra ótica e seu desempenho. Assim, foram idealizadas duas fases distintas de ensaios. A primeira fase seria testar apenas a fibra ótica e seu comportamento, quando sujeita a variações de temperatura. A segunda fase seria colocar a própria fibra, fazendo parte de um provete de material compósito, de forma a avaliar se esta é ou não afetada pelo processo de fabrico.

O circuito utilizado nos ensaios encontra-se na Figura 3.1. De uma forma minimalista estão representadas as ligações e os diferentes componentes que o compõem. De referir que nos pontos 1, 2 e 3 são usados conectores, todos iguais entre si, compatíveis com os dois componentes que são assim unidos através deles.

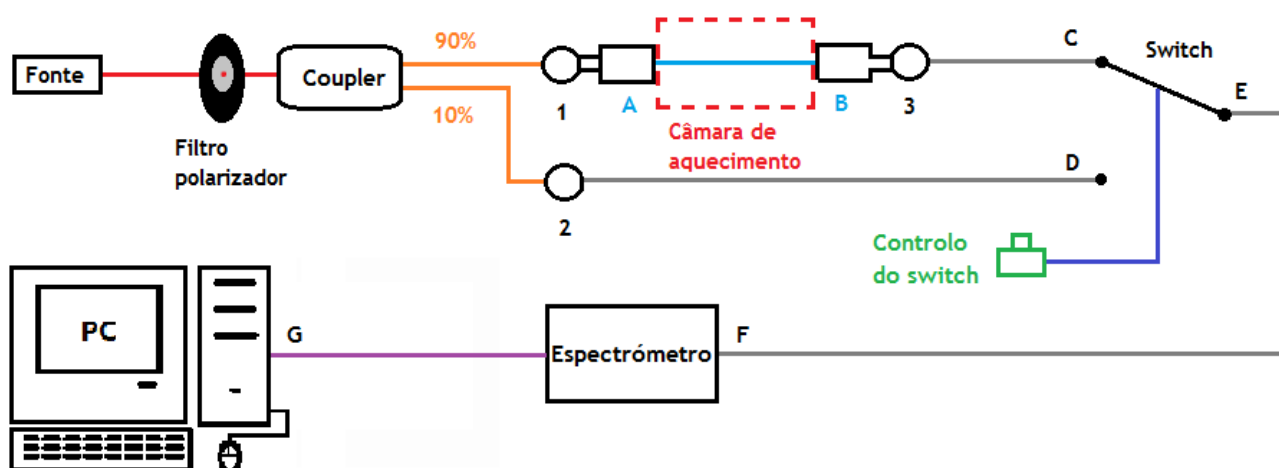


Figura 3.1 - Circuito de ensaio utilizado

Entre os pontos A e B será colocado o corpo de prova, que será a fibra ótica sozinha na fase 1 e a fibra ótica inserida no provete compósito de fibra de carbono, ou fibra de vidro, na fase 2. Todos os outros pontos e componentes serão explicados mais adiante.

De forma a garantir que o sinal medido não variava ao longo do tempo foi medido de forma simultânea um sinal, proveniente da mesma fonte (laser He-Ne, 632,8 nm, 10mW, Newport), mas que não passava pelo circuito principal. O circuito principal é o usado para medir o sinal após a passagem do mesmo pela fibra ótica de ensaio (ponto C). O circuito secundário seria apenas uma referência do sinal original (ponto D). Em teoria, o sinal que passava pelo circuito principal seria 90% do sinal original. Por sua vez o sinal de referência do circuito secundário seria 10% do sinal original. Estes valores de

percentagem estavam pré-definidos no equipamento disponível em laboratório responsável por esta distribuição, o acoplador (*coupler*) F-CPL-M12851 850nm da Newport, presente na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Coupler F-CPL-M12851 850nm da Newport

Este modelo garante que a distribuição de sinal é de 90% numa das saídas e 10% na outra para comprimentos de onda superiores a 800 nm. A incorporação deste equipamento no circuito permite a divisão e comparação do sinal original mesmo que ocorram oscilações de potência no laser, a relação entre o sinal que passa pela fibra ótica e o sinal de referência é constante. Para efetuar a comutação entre circuitos (90% para 10%) foi usado um comutador (*switch*) 1x2 Multimode da Newport e um circuito elétrico auxiliar simples, alimentado através de uma porta USB. A saída do *switch* (ponto E) está ligada ao espectrómetro (ponto F) que posteriormente permite a aquisição de dados pelo PC, em G do circuito da Figura 3.1. O *switch* usado e o seu circuito de controlo podem ser observados na Figura 3.3.

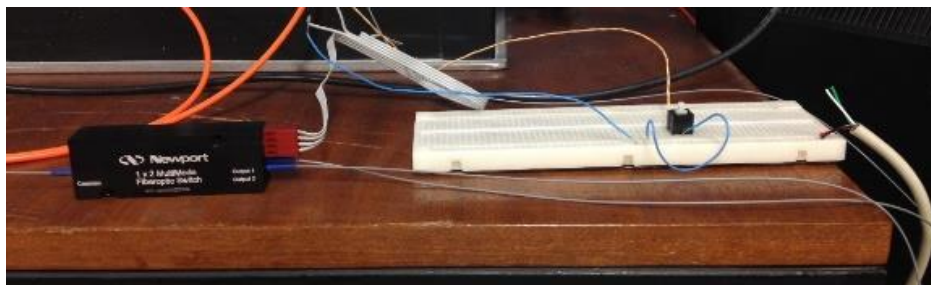


Figura 3.3 - Switch 1x2 Multimode da Newport e circuito de controlo

Escolheu-se esta forma de distribuição (90% para o sinal que passa através da fibra ótica e 10% para a referência) porque o sinal final após passar pela fibra ótica pode ser bastante atenuado em alguns casos. Quer se queira ou não, quando um sinal passa por um circuito com um ou mais elementos tem sempre perdas associadas. Isto torna-se ainda mais evidente quando a potência do sinal de entrada é relativamente reduzida, como é o caso do sinal usado neste trabalho que provém de um laser com 10mW de potência máxima com comprimento de onda de 632,8 nm (laser de cor vermelha).

Como referido anteriormente, o modelo do *coupler* disponível não garante uma divisão perfeita de 10% numa saída e 90% na outra para este comprimento de onda. No entanto, este facto não é relevante uma vez que não é necessário ter estes valores exatos para fazer a comparação de sinais e respetiva relação.

Mesmo sendo um laser de potência relativamente pequena, foi usado um filtro polarizador de forma a não danificar o equipamento responsável pela aquisição do sinal, o espectrômetro C10083CAH de sensor CCD da Hamamatsu (Figura 3.4) que permite leituras de valores de comprimentos de onda entre 320 e 1000 nm com resolução de 1 nm. Um dispositivo de carga acoplada (CCD) é um circuito integrado sensível à luz que armazena e exibe os dados para uma imagem de tal modo que cada pixel (elementos da figura) na imagem é convertido numa carga elétrica com um valor de intensidade que está relacionada com uma cor no espectro de cores [59].



Figura 3.4 - Espectrômetro C10083CAH de sensor CCD da Hamamatsu [65]

O filtro polarizador (Figura 3.5) é composto por duas lentes polarizadoras sequenciais. Permite orientar o sinal proveniente do laser, o que por sua vez permite controlar a potência que atinge o resto do circuito.

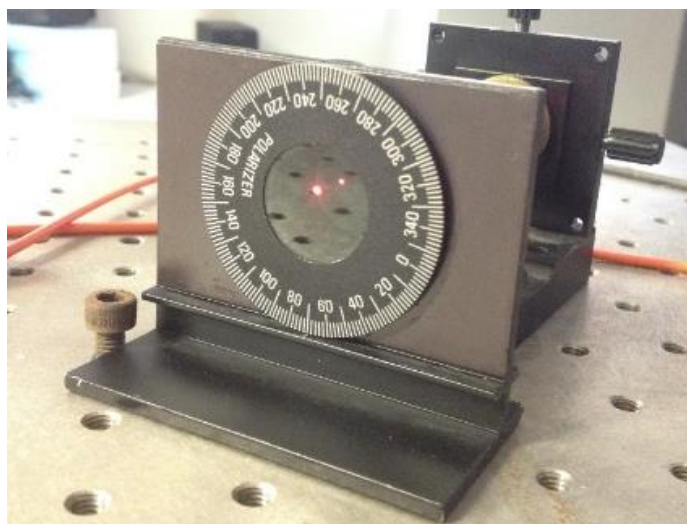


Figura 3.5 - Filtro polarizador duplo

A primeira lente do filtro, que recebe o sinal do laser em primeiro lugar, foi ajustada para que o circuito nunca saturasse, ou seja, o valor de potência que chegava ao espectrômetro não podia superar os 65000 A/D Count no software SpecEvaluation, fornecido juntamente com o espectrômetro,

usado para ler os resultados e gravar os mesmos em suporte digital. A segunda lente manteve sempre o seu valor em todos os ensaios, 0°.

Este software do espectrômetro permite controlar a leitura, gravar os dados da mesma e também acompanhar em tempo real os valores lidos através da apresentação do seu gráfico respetivo. Foi definido que o software deveria adquirir 100 leituras assim que o utilizador iniciasse o processo. Assim, de forma automática, este software faz a leitura de 100 amostras do espectro total e o valor médio para cada ponto lido no espectro e apresenta o seu gráfico em tempo real. O laser necessita de algum tempo para estabilizar a intensidade do sinal que debita. Por esta razão, antes de cada aquisição foi definido um tempo de espera de 1 minuto para estabilização. Este tempo foi estimado observando o comportamento do sinal e da medição do tempo após o qual o sinal deixava de sofrer alterações significativas de pico máximo. Após este tempo de estabilização foram feitas as leituras no modo *Measure* do programa com as condições referidas anteriormente.

Três tipos de fibras diferentes foram usados na primeira fase para perceber qual era a fibra que era mais afetada pela variação da temperatura. Devido a limitações de adaptadores disponíveis, as fibras a testar foram escolhidas para que pudessem ser usadas nesses mesmos adaptadores. Desta forma o seu *cladding* não poderia ser superior a 140 µm. As fibras sujeitas a ensaio foram a F-MLD, F-SPF e F-SF. Na Tabela 3.1 estão presentes as características das fibras óticas utilizadas.

Tabela 3.1 - Propriedades das fibras óticas utilizadas

Tipo de FO	Comprimento de onda de operação [nm]	Comprimento de onda de corte [nm]	Diâmetro do <i>cladding</i> [µm]	Diâmetro do <i>coating</i> [µm]	Diâmetro do <i>core</i> [µm]
F-MLD	850/1300	-	140±3	250±15	100±4
F-SF	830	660-800	125±1	245±12	3,25
F-SPF	830	600-800	125±1	245±12	5

Os adaptadores (A e B da Figura 3.1) usados para conseguir ler o sinal que passa pela fibra ótica são compatíveis com os conectores (1, 2 e 3 da Figura 3.1). Estes conectores e adaptadores estão presentes na Figura 3.6.



Figura 3.6 - Adaptadores macho e conectores fêmea usados no circuito

Para inserir as fibras nos adaptadores (A e B) é necessário remover todas as camadas de revestimento exterior da fibra, exceto o *cladding* e o *core*, nas extremidades da fibra ótica de ensaio. É por esta razão que o *cladding* não pode ter um diâmetro superior a 140  $\mu\text{m}$ . Para a fibra entrar nos adaptadores e chegar ao ponto onde já se consegue medir a intensidade de sinal que a atravessa é necessário remover na ponta de cada fibra comprimentos de pelo menos 15 mm de revestimento. Desta forma o *cladding* e o *core* ficam expostos. Não convém que o comprimento de fibra sem revestimento seja muito grande porque, com *cladding* e o *core* expostos, a fibra fica muito frágil e quebra com facilidade.

O comprimento da fibra ótica a ensaiar precisa de ter pelo menos 33 cm para que tivesse dimensões suficientes para atravessar a câmara de ensaio. Depois deste processo de preparação e posteriores ensaios da primeira fase (fibras óticas expostas a variações de temperatura), a fibra ótica que mais fosse afetada pela variação de temperatura foi incorporada em provetes de material compósito, um compósito com fibra de carbono e um compósito com fibra de vidro, fabricados segundo a norma ASTM D790, presentes na Figura 3.7.

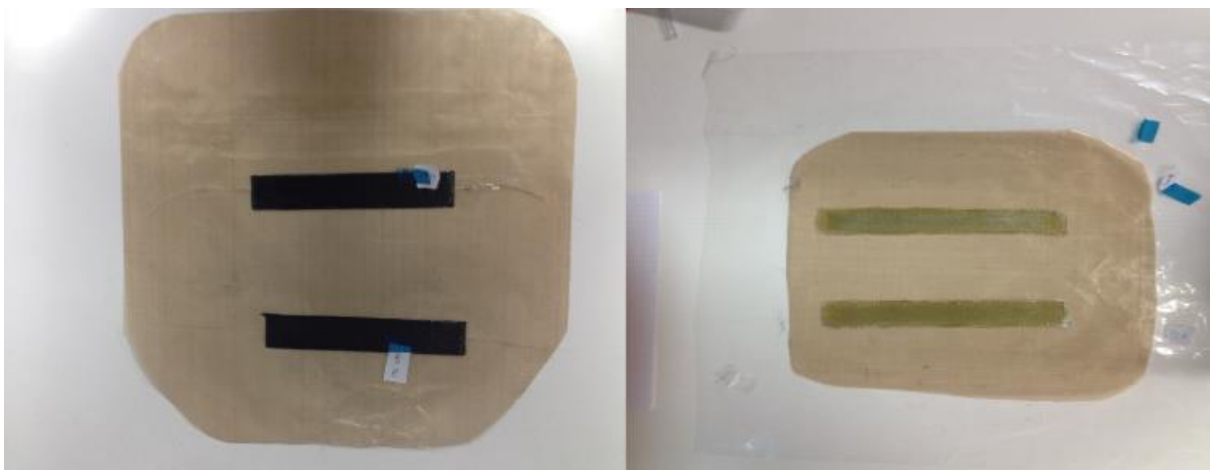


Figura 3.7 - Provetes de fibra de carbono e de fibra de vidro com fibra ótica incorporada

O compósito com fibra de carbono, como dito anteriormente, foi fabricado segundo a norma ASTM D790, embora não fosse fabricado para ser testado mecanicamente. Com dimensões 150mm x 25 mm. Usou-se uma espessura de 10 camadas de carbono pré-impregnado (Texipreg® HS 160 REM (Seal), com 150 g/m<sup>2</sup> e 36 % resina) sobrepostas. Estas 10 camadas foram empilhadas aos pares onde as duas camadas possuem a mesma orientação de material de reforço, que seria 0° ou 90°. Os pares foram empilhados de forma a terem orientação diferente do par anterior. A configuração final foi 0°<sub>2</sub> 90°<sub>2</sub> 0°<sub>2</sub> 90°<sub>2</sub> 0°<sub>2</sub>. Desta forma também se garante a simetria do próprio compósito.

Em seguida, o provete foi colocado no autoclave para que o processo de cura fosse finalizado. De forma a minimizar o impacto do processo de fabrico, a fibra ótica seria colocada na superfície do provete, por baixo do primeiro par de fibras de carbono. Desta forma, quando o provete fosse sujeito ao processo de cura no autoclave (aumento de pressão e temperatura de forma controlada), a fibra ótica fosse afetada o menos possível. O processo de fabrico, segundo as normas do fabricante, tem

várias etapas: fazer o saco hermético (com nylon de alta temperatura, película antiaderente de teflon e tecido de absorção ultrawave) e aplicar uma pressão de vácuo de 0,1 MPa; aquecer até 125° C a uma taxa de 3-5 °C/minuto; aplicar uma pressão isostática de 0,5 MPa quando a temperatura de 125 °C é atingida; manter a pressão e temperatura por 60 minutos; arrefecimento até à temperatura ambiente mantendo a pressão e finalmente retirar o provete do saco de vácuo. A resina em excesso resultante do processo de fabrico pode envolver a FO que não está em contacto com o provete.

O compósito com fibra de vidro foi também fabricado segundo a mesma norma ASTM D790 (com as mesmas dimensões), embora, tal como o de carbono, não fosse fabricado para ser testado mecanicamente. O tecido de fibra de vidro é do tipo E com 195g/m<sup>2</sup> (tafetá) e as camadas (10) são colocadas uma a uma e unidas por uma resina poliéster ortoftálica pré-acelerada (MR, Dinis dos Santos), que tem um tempo de cura típico de 7 dias. Esta resina é obtida através da adição de 1% de catalisador à própria resina e a janela temporal para fabricar o provete é de aproximadamente 20 minutos. Por esta razão os provetes foram fabricados em menos de 20 minutos, à temperatura ambiente em molde aberto, sem pressão exercida. Neste processo de fabrico a fibra ótica não sofre tantas agressões como no processo de autoclave, embora também ocorra um aquecimento uma vez que a temperatura da superfície durante o processo de cura é de aproximadamente 55° C. Todavia a fibra ótica foi também colocada na superfície do provete, por baixo da primeira porção de tecido de fibra de vidro.

Para obter um ambiente minimamente controlado, que não fosse afetado pela deslocação do ar circundante e que permitisse manter de forma estável a temperatura no seu interior foi concebida uma câmara cúbica de ensaio, em acrílico, com os orifícios mínimos necessários (6, 2 para passagem da FO e 4 para o suporte do provete) para a realização da parte experimental do trabalho. A base da câmara foi colocada sobre uma placa elétrica de aquecimento controlada através de um controlador Eurotherm PID referência 815. Teria de aresta de 220 mm e as paredes tinham a espessura de 10mm. Apresenta-se na Figura 3.8 uma imagem 3D e também uma imagem real da câmara térmica de ensaio concebida. O aquecimento foi conseguido usando uma placa quente (Termolab), (ver Figura 3.8).

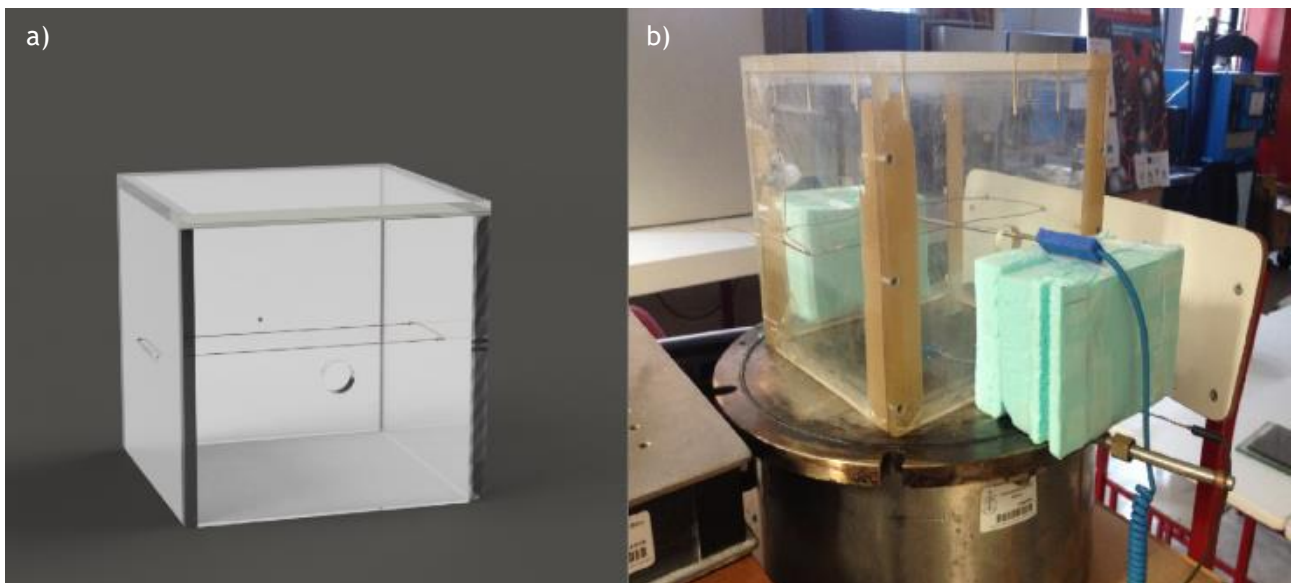


Figura 3.8 - Câmara térmica de ensaio. a) imagem 3D; b) imagem real anterior a um dos ensaios

A placa de aquecimento tem um software de controlo (Figura 3.9) que permite definir a temperatura desejada na base da base da placa, lida por um termopar de forma contínua.



Figura 3.9 - Controlo do aquecimento no interior da câmara térmica de ensaio

Nas faces laterais da câmara térmica foram feitos os 2 furos necessários para a passagem da fibra ótica sujeita a ensaio. Num dos lados (lado onde se encontra o ponto B da Figura 3.1), o furo é de dimensão superior para permitir a inserção de um termopar adicional, ligado a um termómetro Fluke 54 II, que tem como função monitorizar a temperatura na zona de ensaio, perto dos provetes e da fibra ótica sujeitos ao mesmo (ver Figura 3.9). Posicionados perpendicularmente aos furos para a passagem da fibra ótica, foram feitos 4 furos adicionais para a inserção de um suporte para os provetes de ensaio. Na Figura 3.10 apresentam-se as representações em 3D da câmara de aquecimento com os provetes de fibra de carbono e fibra de vidro e que contam com a fibra ótica inserida.



Figura 3.10 - Representação em 3D da câmara térmica com os provetes de carbono e fibra de vidro

Foram escolhidas 3 temperaturas distintas para serem realizados os ensaios. A temperatura ambiente (aproximadamente 25° C), 73,5° C e um ponto intermédio de 52° C. Estes valores correspondem aos valores de temperatura na zona de ensaio dos provetes a partir das quais se tentaria ajustar a temperatura da placa quente. Esta temperatura foi limitada para não ultrapassar os 125° C de modo a não causar danos no material usado. Neste valor máximo, a temperatura na zona dos provetes era de aproximadamente 73,5° C. Entre os pontos extremos de 25° C e 73,5° C foi escolhido o ponto de 52° C de maneira a ter três pontos nos gráficos posteriores. Os gráficos posteriores foram sempre obtidos com valores muito próximos das referências acima mencionadas. A temperatura ambiente no exterior da câmara térmica foi também medida em todos os ensaios.

# Capítulo 4 - Análise e discussão de resultados

Na primeira fase dos ensaios laboratoriais foi medido o sinal que atravessava cada fibra ótica em 3 pontos com valores de temperatura distintos. Para a realização destes ensaios o valor do ângulo da primeira lente do filtro polarizador foi de 50° porque, com este valor, não havia saturação.

O primeiro ponto a considerar seria a temperatura ambiente no interior da câmara térmica, uma vez que, esta é a temperatura mínima que se consegue atingir, com a temperatura da placa quente a refletir o valor da temperatura no interior da câmara térmica. Aquando dos ensaios da primeira fase, esta temperatura foi de 27° C para a fibra F-SPF 50 e para a fibra F-SF. Para a fibra F-MLD a temperatura foi de 26,9° C.

Para obter o segundo ponto a temperatura da placa quente foi definida para 80° C. Para este valor as temperaturas do ar interior da câmara térmica foram 51,9° C para a fibra F-MLD, 52° C para a fibra F-SPF 50 e de 50,4° C para a fibra F-SF.

Para atingir a última temperatura de ensaio foi definida uma temperatura da placa quente de 120° C. Para este valor, as temperaturas do ar interior da câmara térmica foram 73,5° C para a fibra F-MLD, 73,1° C para a fibra F-SPF 50 e de 71,8° C para a fibra F-SF.

Em cada ensaio eram retirados 3 sinais do espectro (obtido através da média de 100 leituras) com o auxílio do software SpecEvaluation. O primeiro gráfico era do sinal lido pelo espectrómetro sem a incidência do laser (sinal residual medido pelo espectrómetro em vazio), chamada de referência. O segundo gráfico era do sinal de 90% à saída da fibra ótica (circuito principal). O terceiro gráfico era do sinal de 10% que não passava pela fibra ótica (ou provete) e que servia para garantir que, mesmo que houvesse alguma variação de sinal fornecido pelo laser entre os ensaios, essa variação também se refletia no sinal de 90% e assim há confiança na medição (circuito secundário).

No tratamento dos dados foi retirada a referência ao segundo e terceiro gráfico de forma a eliminar a influência do sinal residual sempre presente e o gráfico obtido era do espectro de 320 a 1000 nm (valores assegurados pelo escala do software do fabricante). Os valores médios, máximos e mínimos foram também representados. Na Figura 4.1 está um exemplo, neste caso trata-se do sinal de 90%-ref a 26,9° C da fibra F-MLD.

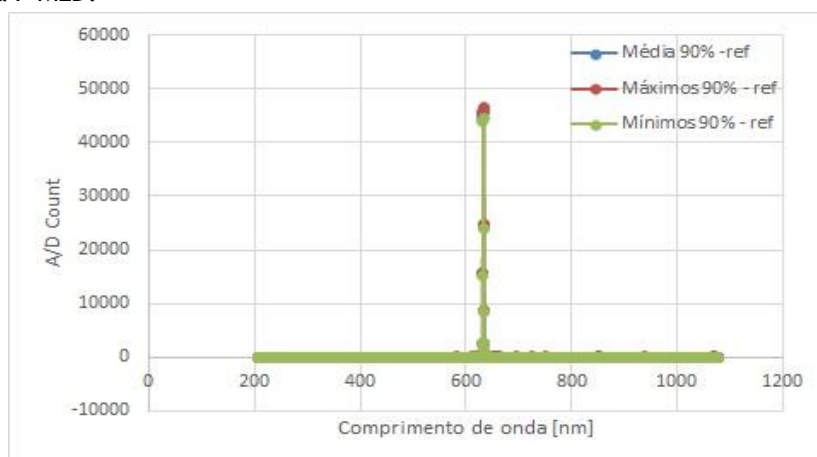


Figura 4.1 - Exemplo de um sinal genérico

Como se pode observar, existe um pico na zona do comprimento de onda da cor vermelha (632,8 nm). Em todos os gráficos o eixo das abcissas representa o comprimento de onda e o eixo das ordenadas representa o valor de intensidade do sinal em número de contagens ou eventos medidos (*A/D Count*) do software. Como o gráfico tem valores fora da gama de interesse a sua área foi formatada para que não fossem representados os valores negativos no eixo das ordenadas e o eixo das abcissas também foi limitado à região de interesse, ou seja, entre 631 e 635 nm. Desta forma, o gráfico da Figura 4.2 representa o sinal médio (azul), com o valor máximo (vermelho) e mínimo (verde).

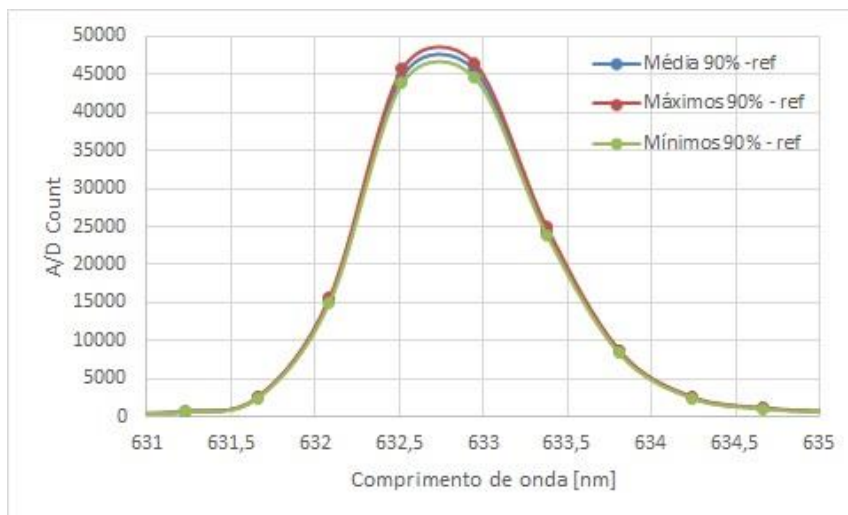


Figura 4.2 - Evolução do sinal óptico da fibra F-MLD, com intensidade de 90% para a temperatura de 26,9° C

Assim, na Figura 4.2 representa-se o mesmo gráfico mas para comprimentos de onda entre 631 e 635 nm. Desta forma amplia-se o sinal na zona de interesse para o sinal óptico.

Da mesma forma, o gráfico do circuito secundário foi corrigido e está representado na Figura 4.3

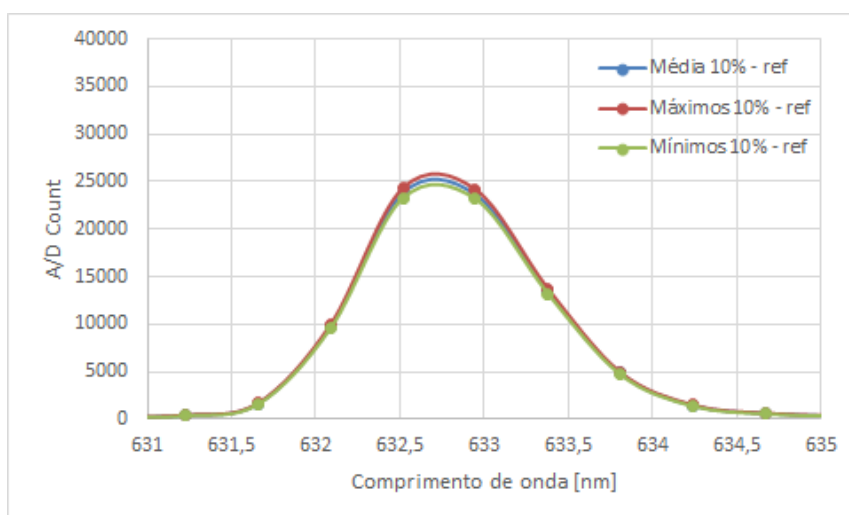


Figura 4.3 - Evolução do sinal óptico da fibra F-MLD, com intensidade de 10% para a temperatura de 26,9° C

Por fim, foi feita a relação entre o sinal médio de 90% e o sinal médio de 10%. É desejável que o valor da relação seja muito próximo em cada uma das temperaturas de forma a garantir que os resultados obtidos eram confiáveis. A evolução da relação é representada na Figura 4.4 e situa-se entre 1,52 e 1,93.

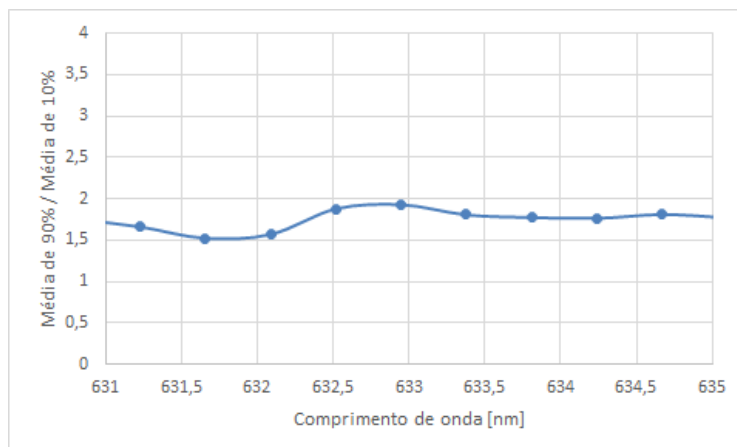


Figura 4.4 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-MLD para a temperatura de 26.9° C

## 4.1 - Fibra ótica F-MLD

### 4.1.1 - Fibra ótica F-MLD a 26,9° C

Os gráficos apresentados anteriormente, nomeadamente as Figuras 4.1 a 4.4 dizem respeito à fibra F-MLD com os ensaios realizados à temperatura ambiente, ou seja, 26,9°. Por esta razão não são apresentados nesta secção.

### 4.1.2 - Fibra ótica F-MLD a 51,9° C

Os gráficos para a fibra ótica F-MLD a 51,9° C foram obtidos seguindo o mesmo método usado para a fibra F-MLD a 26,9° C. Como a informação não é relevante optou-se por não representar o sinal numa escala com comprimento de onda 0-1200 nm, mas sim numa escala 631-635 nm. Desta forma, pode observar-se em detalhe as variações do sinal ótico em função das variações de temperatura. Nas figuras seguintes, 4.1.1 a 4.1.3, estão representados os sinais óticos dos ensaios realizados a 51,9° C referentes a este tipo de fibra.

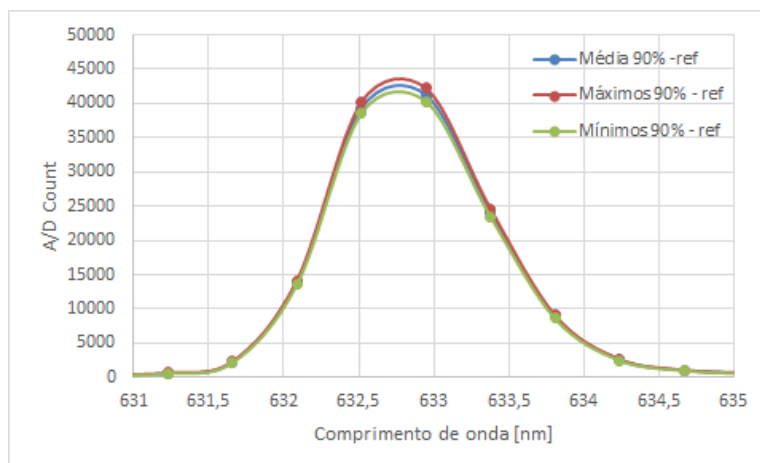


Figura 4.1.1 - Evolução do sinal ótico da fibra F-MLD, com intensidade de 90% para a temperatura de 51,9° C

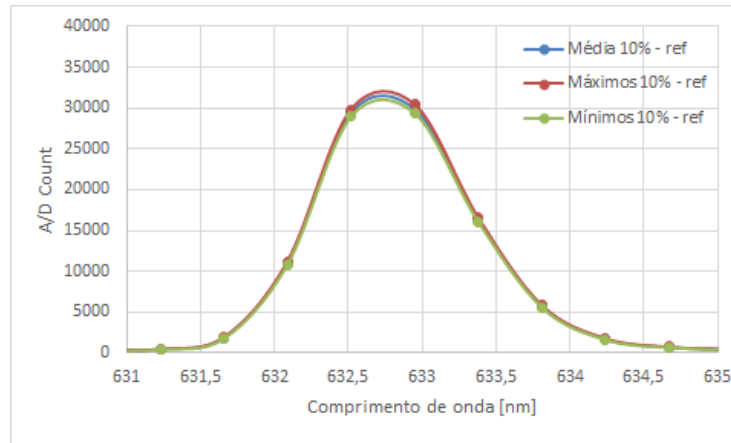


Figura 4.1.2 - Evolução do sinal óptico da fibra F-MLD, com intensidade de 10% para a temperatura de 51,9° C

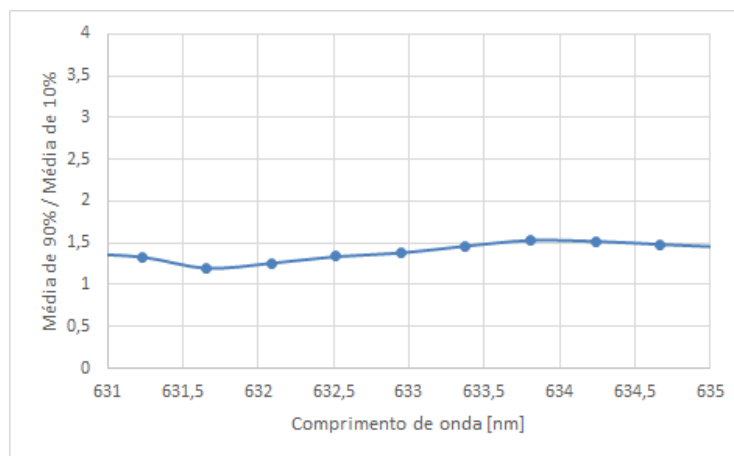


Figura 4.1.3 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-MLD para a temperatura de 51,9° C

### 4.1.3 - Fibra ótica F-MLD a 73,5° C

Os sinais óticos que dizem respeito aos ensaios com fibra F-MLD a 73,5° C estão representados nas figuras seguintes. Na Figura 4.1.4 está representada a média do sinal ótico de 90%, na Figura 4.1.5 está representada a média do sinal ótico de 10% e na Figura 4.1.6 está representada a relação entre estas duas médias.

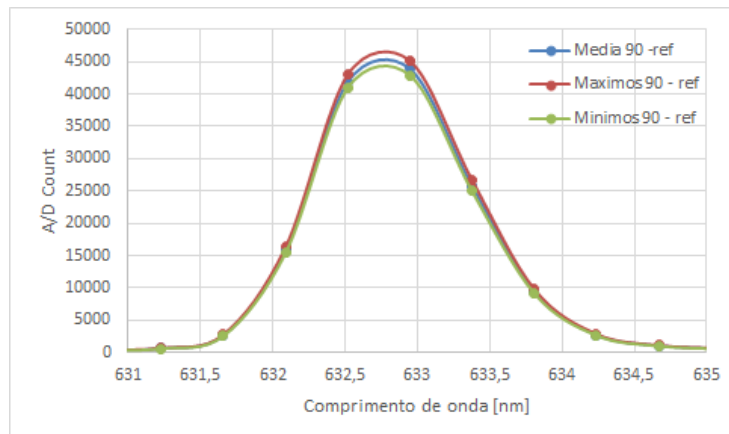


Figura 4.1.4 - Evolução do sinal óptico da fibra F-MLD, com intensidade de 90% para a temperatura de 73,5° C

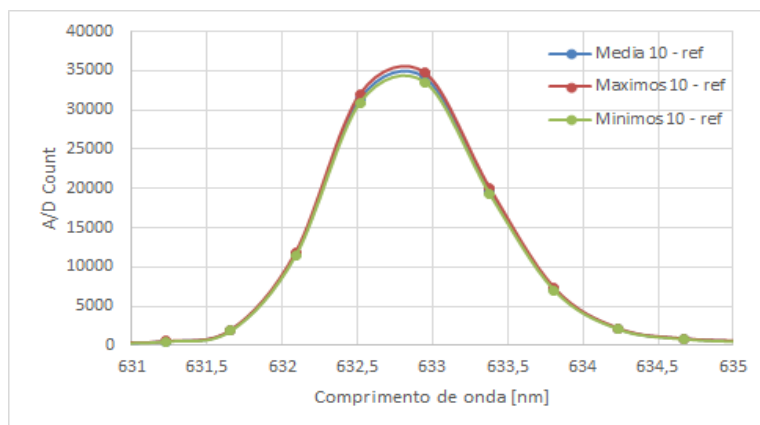


Figura 4.1.5 - Evolução do sinal óptico da fibra F-MLD, com intensidade de 90% para a temperatura de 51,9° C

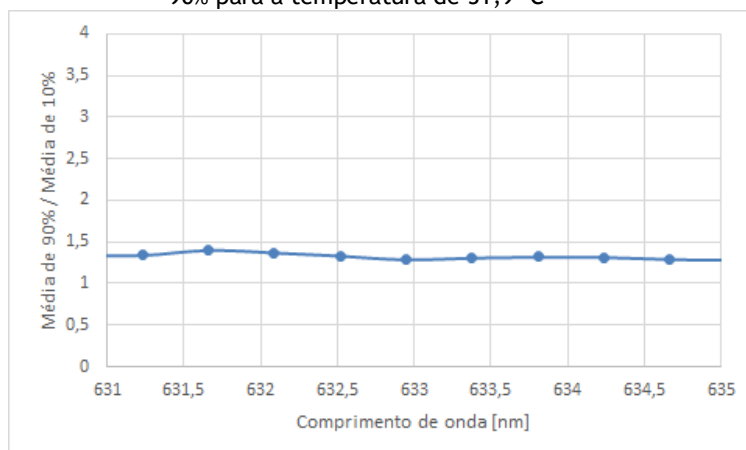


Figura 4.1.6 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-MLD para a temperatura de 51,9° C

Como os valores da relação entre as médias de 90% e 10% são praticamente constantes no intervalo de valores que interessa, os resultados são confiáveis. Na tabela seguinte estão representados os valores máximos para o sinal de 90% e 10% e a divisão entre eles à qual foi dado o nome de razão.

Tabela 4.1 - Valor máximo das médias de 90% e 10% e a sua razão para a fibra F-MLD

Temperatura [°C]	Valor máximo da média de 90% (a)	Valor máximo da média de 10% (b)	Razão (a/b)
26,9	46249,87	25108,68	1,842
51,9	41901,47	30774,15	1,362
73,5	44530,30	34819,92	1,279

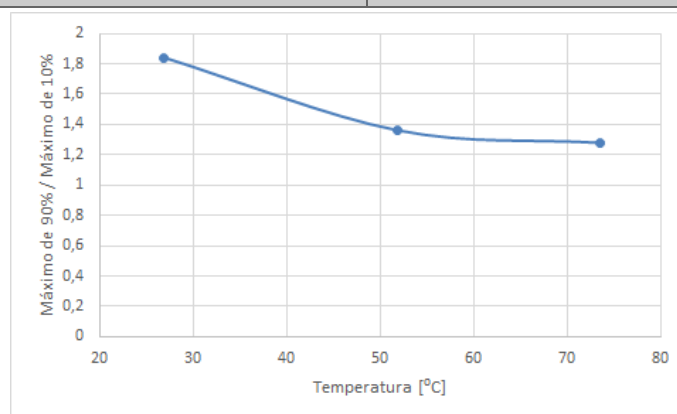


Figura 4.1.7 - Evolução da razão (90%/10%) do sinal óptico em função da temperatura para a fibra F-MLD

Na Figura 4.1.7 está representada graficamente a variação da razão entre os valores máximos das médias de 90% e 10%. O valor da razão entre o primeiro ponto, 26,9° C, e o segundo ponto, 51,9 ° C tem uma quebra de 26,1%, observa-se que o sinal que percorre a fibra ótica foi afetado com alguma intensidade. Do segundo ponto, 51,9 ° C, para o ponto final, 73,5° C, a razão teve uma quebra de 6,1%, o que significa que o sinal que percorre a fibra ótica também foi afetado, embora não com tanta intensidade como entre a primeira e segunda temperaturas.

## 4.2 - Fibra ótica F-SPF

### 4.2.1 - Fibra ótica F-SPF a 26,7° C

Os ensaios para a fibra ótica F-SPF foram realizados seguindo a mesma metodologia usada na fibra ótica F-MLD apresentada anteriormente, em todas as temperaturas. A intensidade do sinal nesta fibra foi consideravelmente mais reduzida do que na fibra ótica F-MLD. De seguida apresentam-se os resultados obtidos.

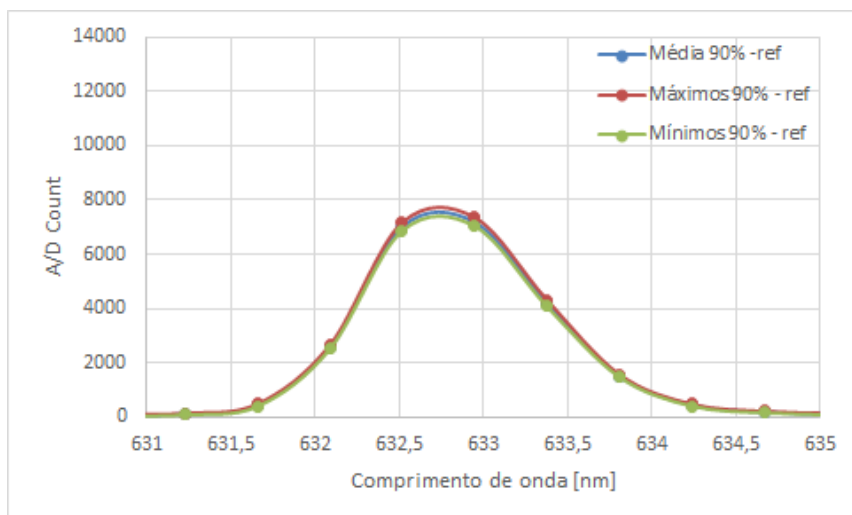


Figura 4.2.1 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SPF, com intensidade de 90% para a temperatura de 26,7° C

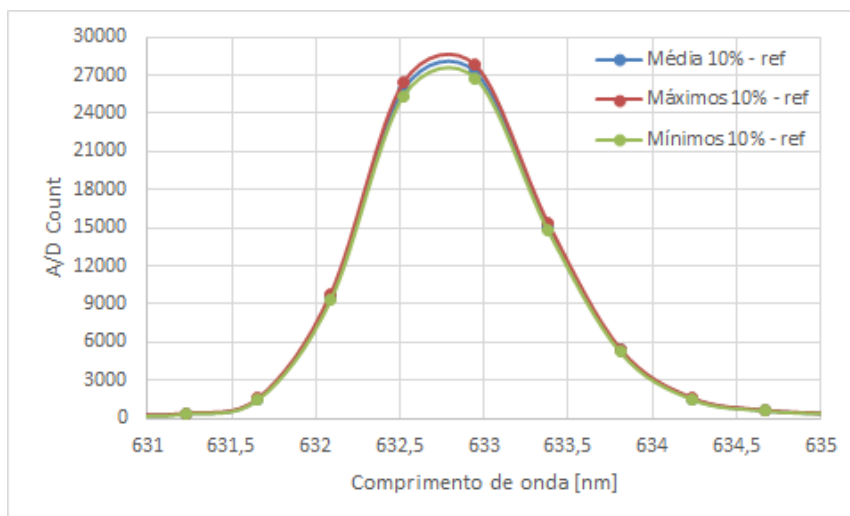


Figura 4.2.2 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SPF, com intensidade de 10% para a temperatura de 26,7° C

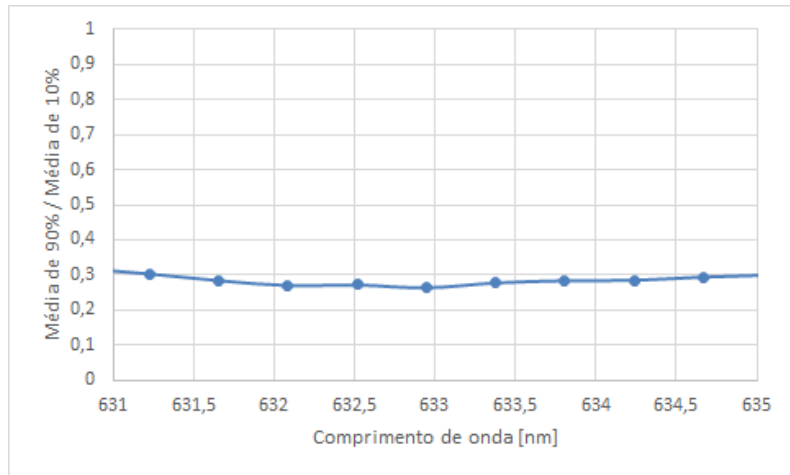


Figura 4.2.3 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-SPF para a temperatura de 26.7 ° C

#### 4.2.2 - Fibra ótica F-SPF a 52° C

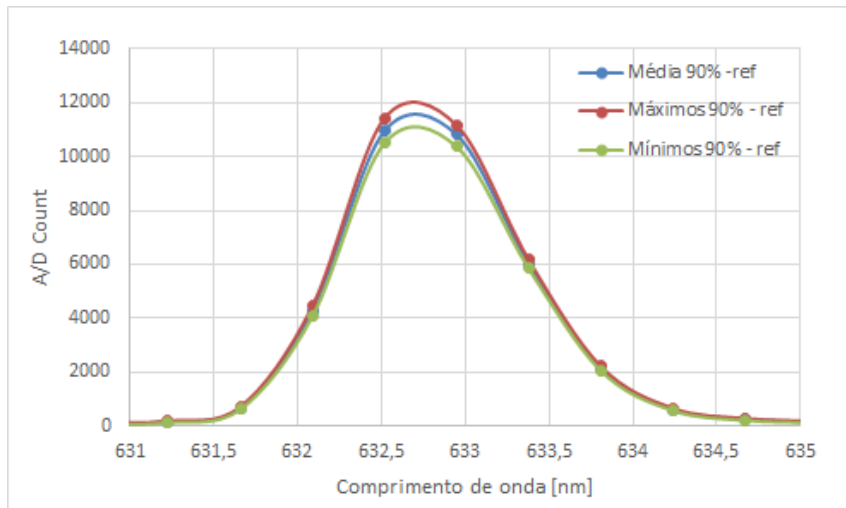


Figura 4.2.4 - Evolução do sinal óptico da fibra F-SPF, com intensidade de 90% para a temperatura de 52 ° C

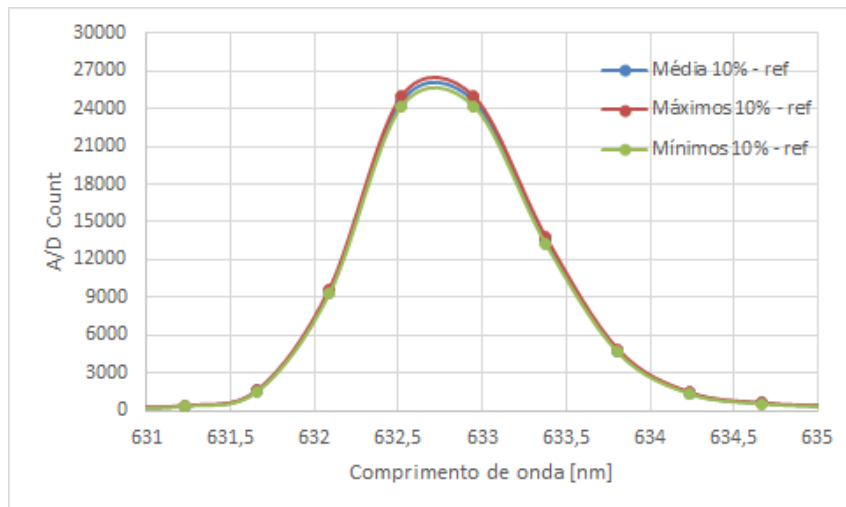


Figura 4.2.5 - Evolução do sinal óptico da fibra F-SPF, com intensidade de 10% para a temperatura de 52 ° C

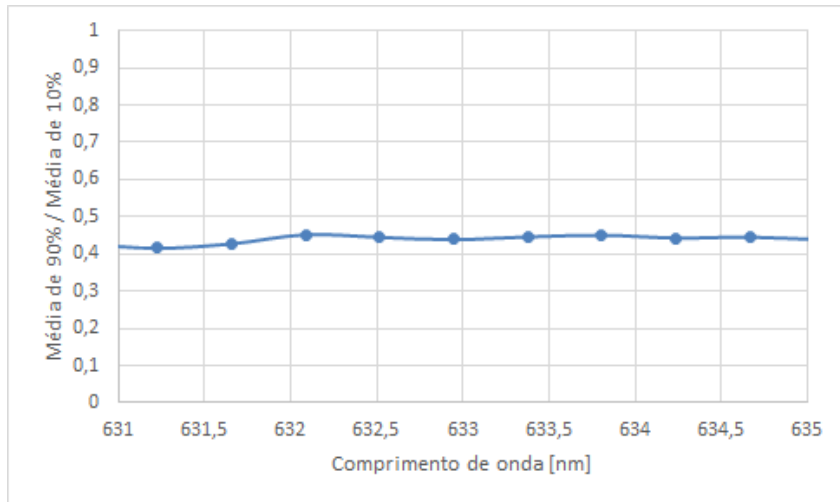


Figura 4.2.6 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-SPF para a temperatura de 52 ° C

#### 4.2.3 - Fibra ótica F-SPF a 73,1° C

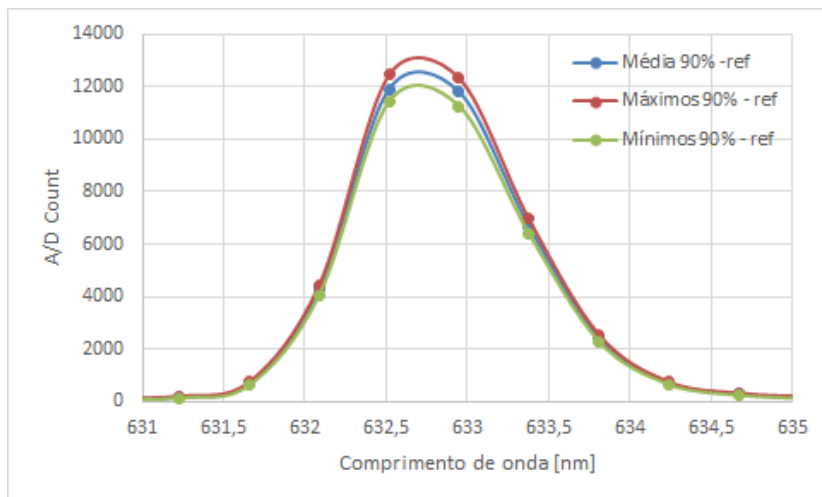


Figura 4.2.7 - Evolução do sinal óptico da fibra F-SPF, com intensidade de 90% para a temperatura de 73,1 ° C

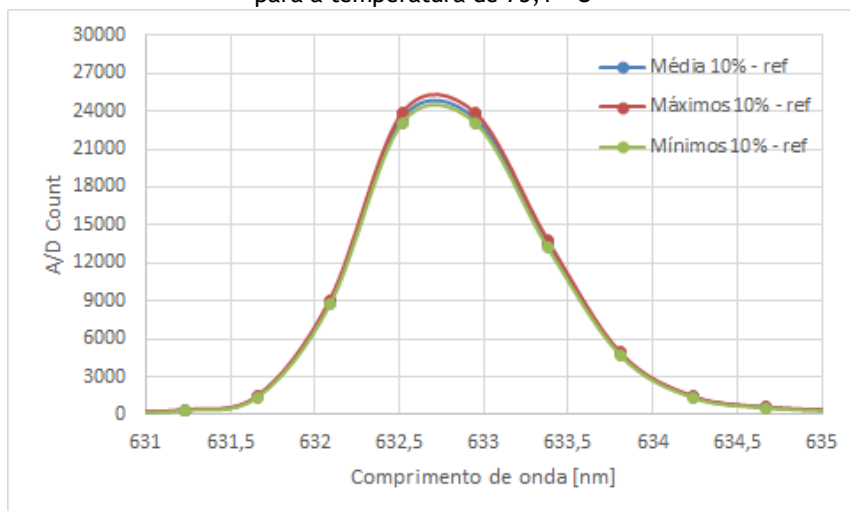


Figura 4.2.8 - Evolução do sinal óptico da fibra F-SPF, com intensidade de 10% para a temperatura de 73,1 ° C

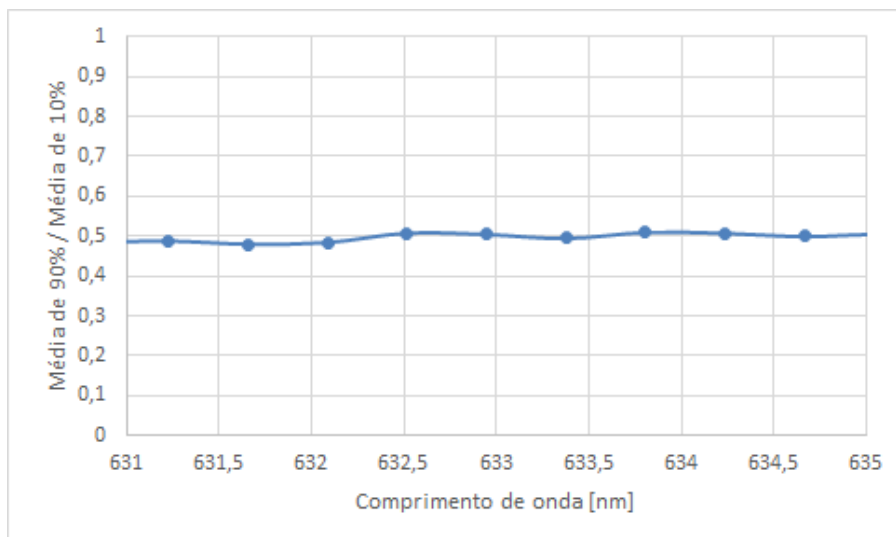


Figura 4.2.9 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-SPF para a temperatura de 73,1 °C

Mais uma vez, como os valores da relação entre as médias de 90% e 10% são praticamente constantes (mínimo de 0,263 e máximo de 0,509) no intervalo de valores no comprimento de onda do sinal, e portanto os resultados são confiáveis. Na tabela seguinte estão representados os valores máximos para o sinal de 90% e 10% e a divisão entre eles, tal como no caso da fibra ótica F-MLD apresentada anteriormente.

Tabela 4.2 - Valor máximo das médias de 90% e 10% e a sua razão para a fibra F-SPF

Temperatura [° C]	Valor máximo da média de 90% (a)	Valor máximo da média de 10% (b)	Razão (a/b)
26,7	7944,71	27811,23	0,286
52	12287,69	25952,08	0,473
73,1	13302,84	24856,27	0,535

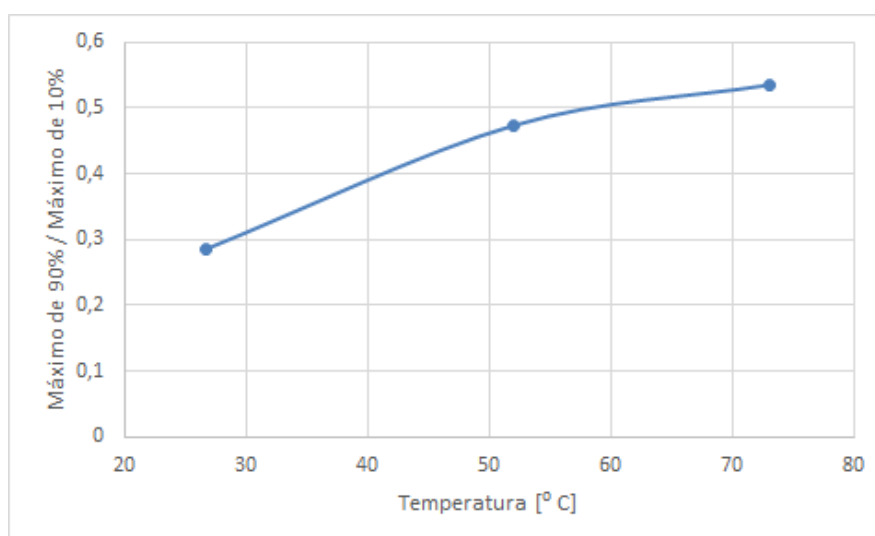


Figura 4.2.10 - Evolução da razão (90%/10%) do sinal ótico em função da temperatura para a fibra F-SPF

Na Figura 4.2.10 está representada graficamente a variação da razão entre os valores máximos das médias de 90% e 10%. O valor da razão entre o primeiro ponto, 26,7° C, e o segundo ponto, 52 ° C tem um incremento de 65,7%, observa-se que a fibra ótica sofreu uma alteração significativa. Do segundo ponto, 52° C, para o ponto final, 73,1° C, a razão teve um incremento de 13%, o que significa que também o sinal conduzido pela fibra sofreu uma alteração, embora não com tanta intensidade como entre a primeira e segunda temperatura. Ainda assim, 13% é um valor considerável se compararmos com o valor da primeira fibra testada (-6,1%). Significa então que esta fibra tem mais sensibilidade que a F-MLD nos dois aumentos de temperatura.

## 4.3 - Fibra ótica F-SF

### 4.3.1 - Fibra ótica F-SF a 27° C

Os ensaios para a fibra ótica F-SF foram realizados de acordo com o método usado na fibra ótica F-MLD e na fibra ótica F-SPF, apresentadas anteriormente, em todas as temperaturas. A intensidade de sinal nesta fibra é, mais uma vez, consideravelmente mais reduzida do que na fibra ótica comercial F-MLD, embora apresente valores próximos daqueles que foram conseguidos com a fibra ótica F-SPF. Os resultados são apresentados de seguida.

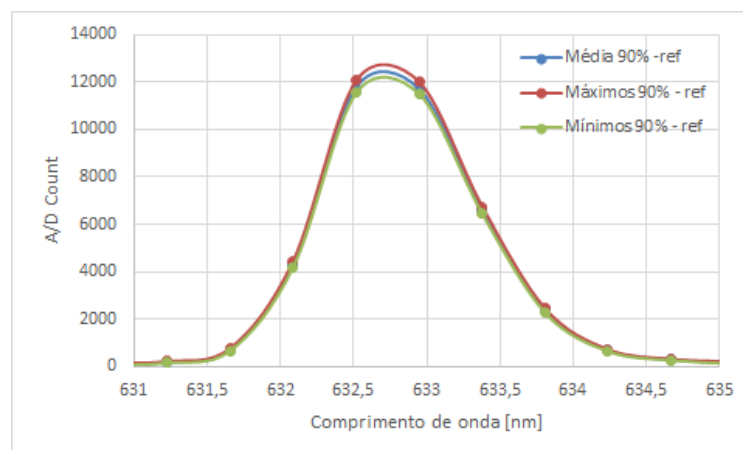


Figura 4.3.1 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SF, com intensidade de 90% para a temperatura de 27 ° C

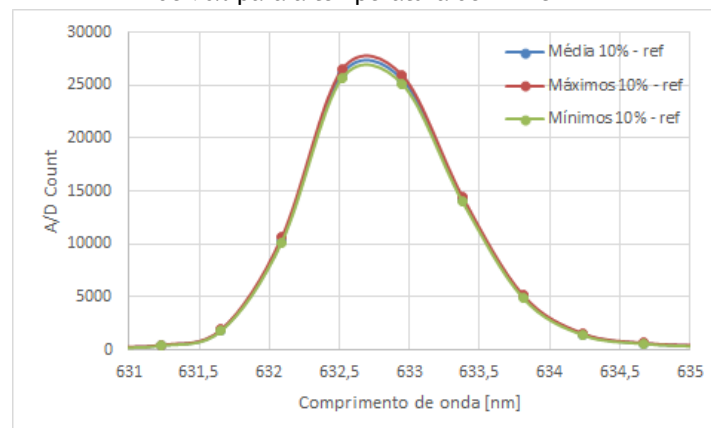


Figura 4.3.2 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SF, com intensidade de 10% para a temperatura de 27 ° C

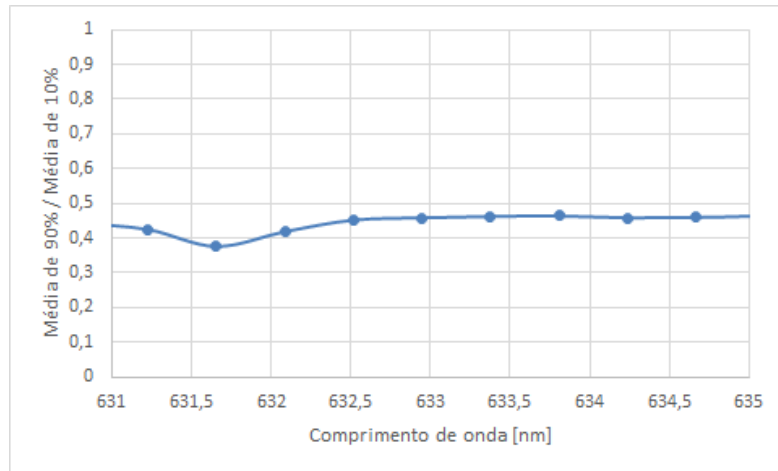


Figura 4.3.3 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-SF para a temperatura de 27 ° C

### 4.3.2 - Fibra ótica F-SF a 50,4° C

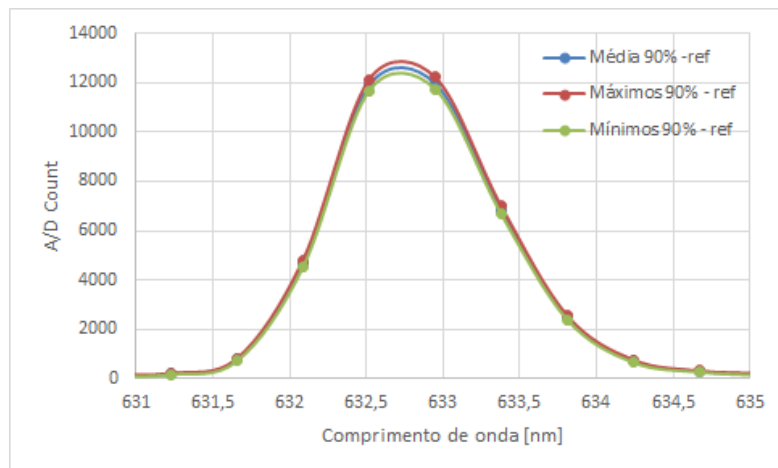


Figura 4.3.4 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SF, com intensidade de 90% para a temperatura de 50,4 ° C

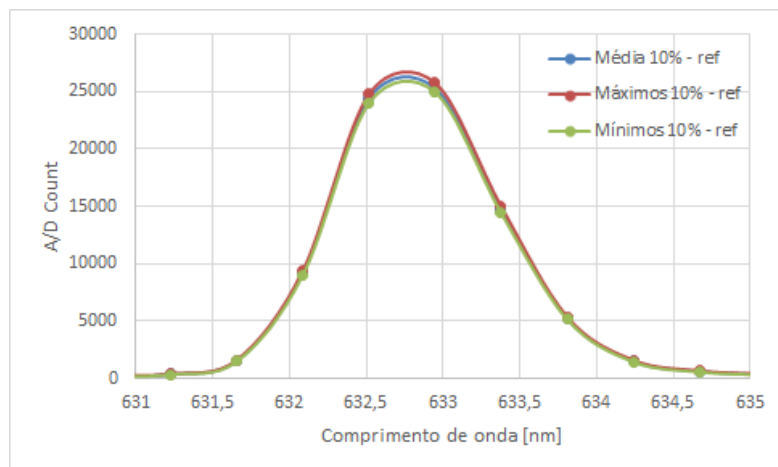


Figura 4.3.5 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SF, com intensidade de 10% para a temperatura de 50,4 ° C

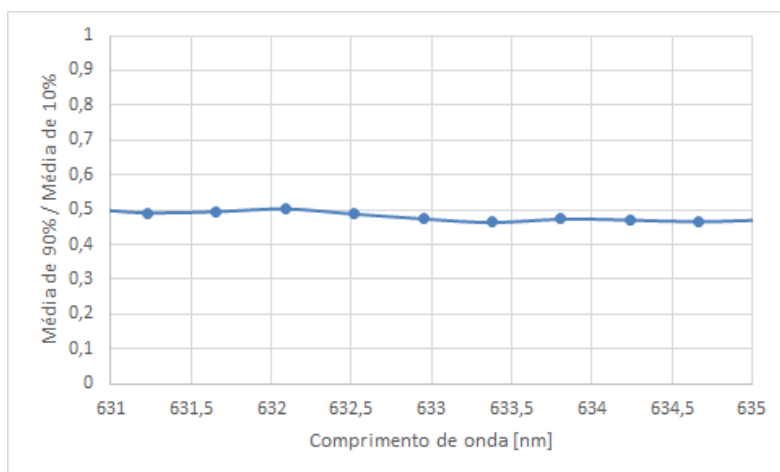


Figura 4.3.6 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-SF para a temperatura de 50,4 ° C

### 4.3.3 - Fibra ótica F-SF a 71,8° C

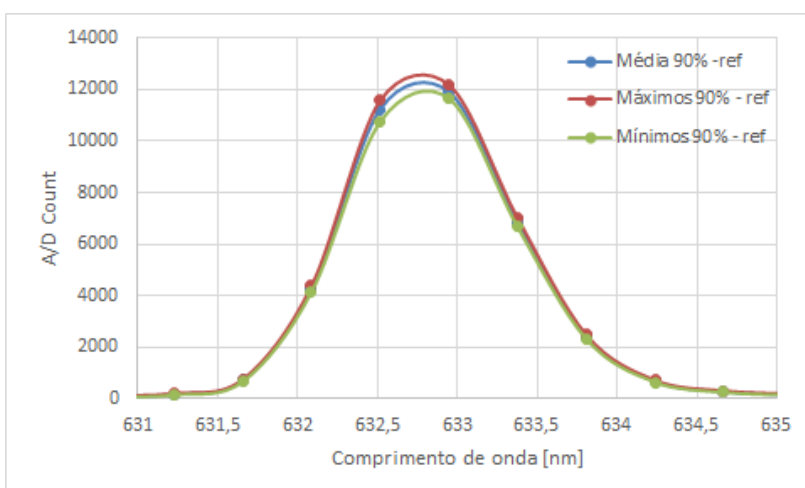


Figura 4.3.7 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SF, com intensidade de 90% para a temperatura de 71,8 ° C

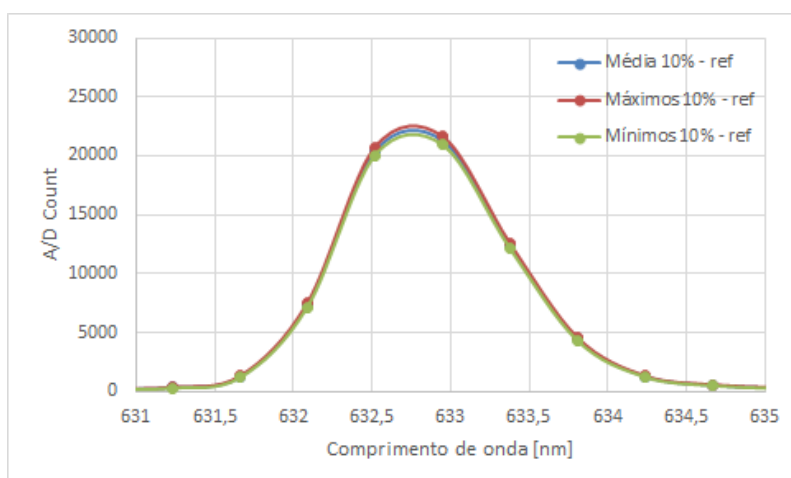


Figura 4.3.8 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SF, com intensidade de 10% para a temperatura de 71,8 ° C

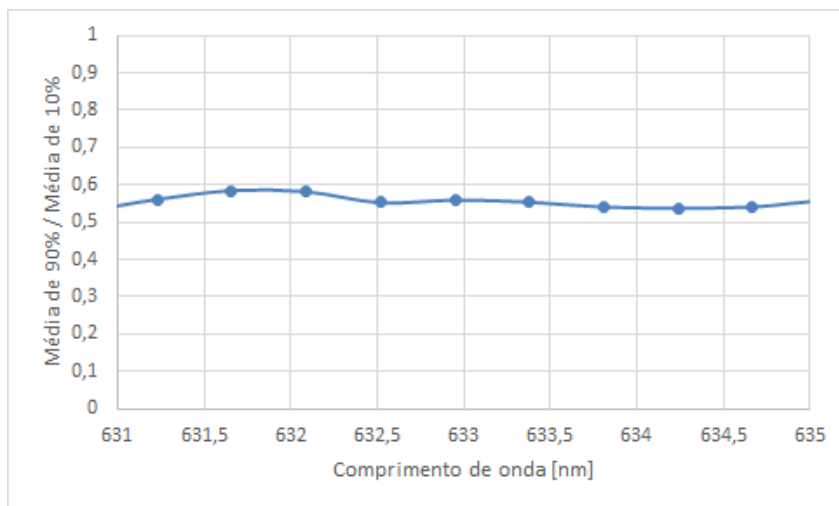


Figura 4.3.9 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-SF para a temperatura de 71,8 ° C

Como aconteceu nos resultados anteriores, os valores da relação entre as médias de 90% e 10% são praticamente constantes (mínimo de 0,376 e máximo de 0,585) no intervalo de valores correspondentes ao comprimento de onda do sinal, logo os resultados são confiáveis. Na tabela seguinte estão representados os valores máximos para o sinal de 90% e 10% e a divisão entre eles, tal como foi feito para os outros dois tipos de fibras óticas.

Tabela 4.3 - Valor máximo das médias de 90% e 10% e a sua razão para a fibra F-SF

Temperatura [° C]	Valor máximo da média de 90% (a)	Valor máximo da média de 10% (b)	Razão (a/b)
27	13056,25	27331,22	0,477
50,4	13264,96	25946,93	0,511
71,8	12565,72	21960,06	0,572

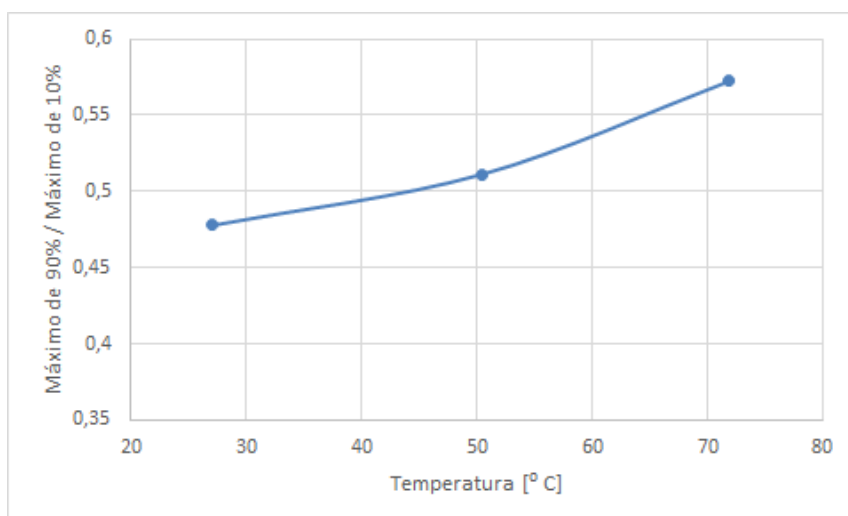


Figura 4.3.10 - Evolução da razão (90%/10%) do sinal ótico em função da temperatura para a fibra F-SF

Na Figura 4.3.10 está representada graficamente a variação da razão entre os valores máximos das médias de 90% e 10%. O valor da razão entre o primeiro ponto, 27° C, e o segundo ponto, 50,4° C tem um incremento de 7%. Do segundo ponto, 50,4° C, para o ponto final, 71,8° C, a razão teve um incremento de 11,9% o que significa que, neste segundo salto de temperaturas, a fibra é mais sensível. No entanto, esta fibra revela ser a que pior traduz as mudanças de temperatura. Segundo estes resultados esta fibra, F-SF, não seria de todo a melhor se queremos usá-la para detetar aumentos de temperatura.

Na próxima fase dos ensaios serão incorporadas as duas primeiras fibras óticas testadas, a fibra ótica F-MLD e a fibra ótica F-SPF uma vez que estas demonstram ser mais sensíveis às variações de temperatura.

#### **4.4 - Provetes de fibra de carbono com fibra ótica F-MLD incorporada**

Todo o processo de fabrico foi descrito no capítulo 4 no entanto, é importante relembrar alguns aspetos mais importantes. Os provetes de carbono têm dimensões de 150mm x 25 mm e são compostos por 10 camadas de Prepreg sobrepostas, agrupadas aos pares de orientação de fibras de reforço iguais, intercaladas. A configuração final seria  $0^{\circ} 90^{\circ} 0^{\circ} 90^{\circ} 0^{\circ}$ . Desta forma garante-se também a simetria do próprio laminado. A fibra ótica foi colocada na base e o compósito foi construído em cima desta para que fosse minimizado o manuseamento e o efeito da pressão e temperatura durante o processo de fabrico em autoclave.

Nos ensaios com os provetes de fibra de carbono e fibra de vidro, houve a necessidade de ajustar o valor do ângulo da primeira lente do filtro polarizador de 50° para 40° porque a intensidade do sinal que passava através das fibras óticas era muito reduzida. Isto deve-se, muito provavelmente, ao facto das fibras óticas terem sofrido alterações durante o processo de fabrico. Quanto menor o ângulo da lente do polarizador, maior é a intensidade de sinal da fonte luminosa (laser) que passa pelo circuito (principal e secundário). Assim sendo, nestes ensaios do provete de fibra de carbono, o valor do sinal de 10% era superior. Durante este procedimento houve o cuidado de não permitir a saturação do software de medição.

A temperatura da placa quente usada para o aquecimento foi incrementada no valor de 5° C nas duas temperaturas de ensaio superiores à temperatura ambiente. Este incremento foi necessário porque a região da fibra ótica não alcançava o valor de temperatura pretendido (embora o valor da diferença fosse reduzido). O provete foi colocado nos apoios com a face onde se encontrava a fibra ótica voltada para a placa quente (para baixo).

Nos provetes de fibra de carbono foram inseridas as mesmas fibras óticas testadas na primeira fase e que, por serem as mais sensíveis, foram escolhidas para serem testadas nesta segunda fase. As

fibras óticas testadas foram a F-MLD e a F-SPF. Em seguida são apresentados os resultados obtidos para estes dois tipos de fibras óticas.

#### 4.4.1 - Fibra ótica F-MLD incorporada no provete de carbono a 26,2° C

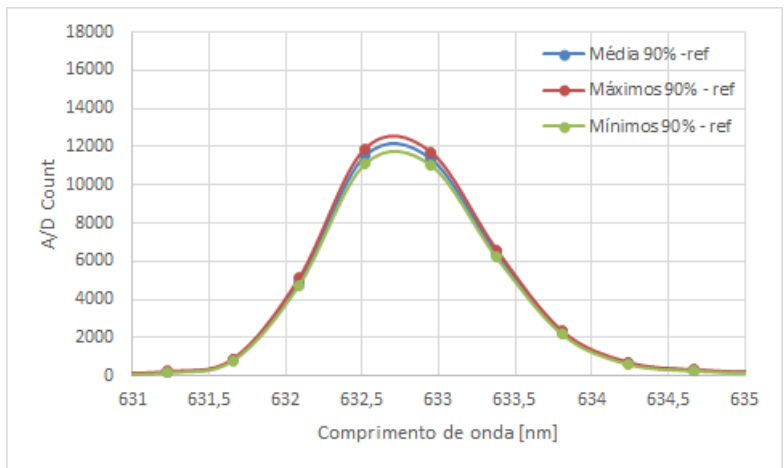


Figura 4.4.1 - Evolução do sinal ótico da fibra F-MLD, incorporada no provete de carbono, com intensidade de 90% para a temperatura de 26,2 ° C

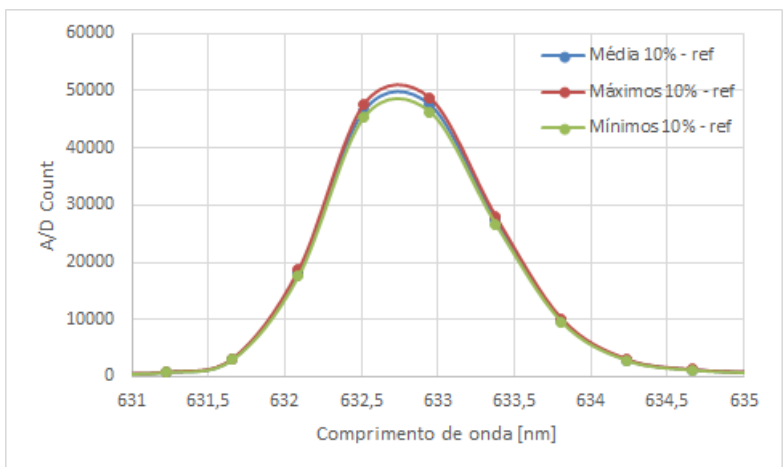


Figura 4.4.2 - Evolução do sinal ótico da fibra F-MLD, incorporada no provete de carbono, com intensidade de 10% para a temperatura de 26,2 ° C

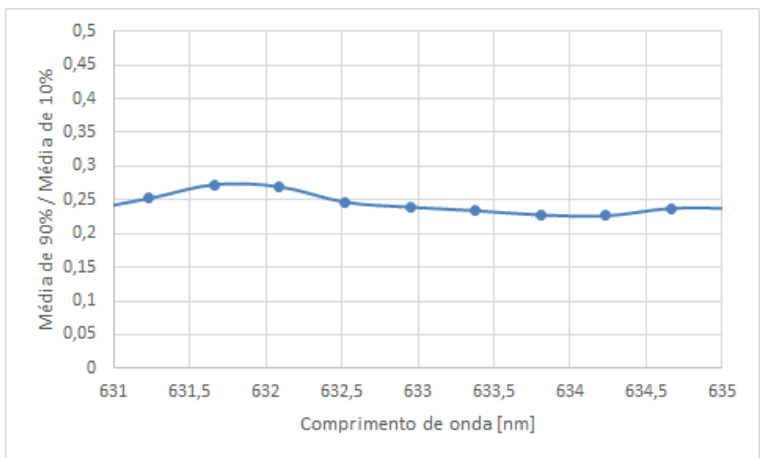


Figura 4.4.3 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-MLD, incorporada no provete de carbono, para a temperatura de 26,2 ° C

#### 4.4.2 - Fibra ótica F-MLD incorporada no provete de carbono a 50,9° C

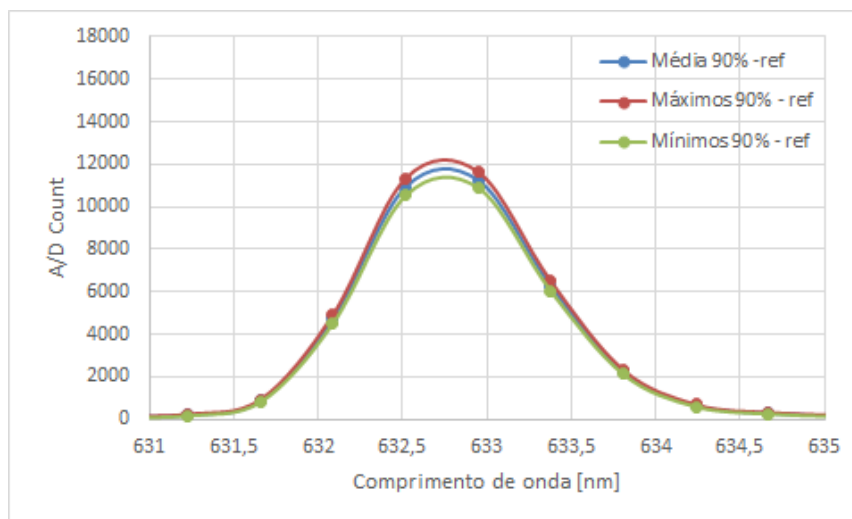


Figura 4.4.4 - Evolução do sinal ótico da fibra F-MLD, incorporada no provete de carbono, com intensidade de 90% para a temperatura de 50,9° C

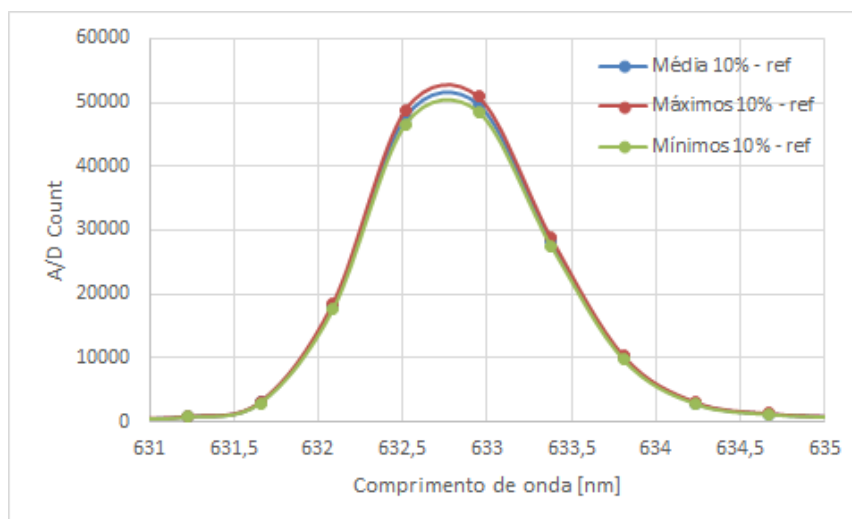


Figura 4.4.5 - Evolução do sinal ótico da fibra F-MLD, incorporada no provete de carbono, com intensidade de 10% para a temperatura de 50,9° C

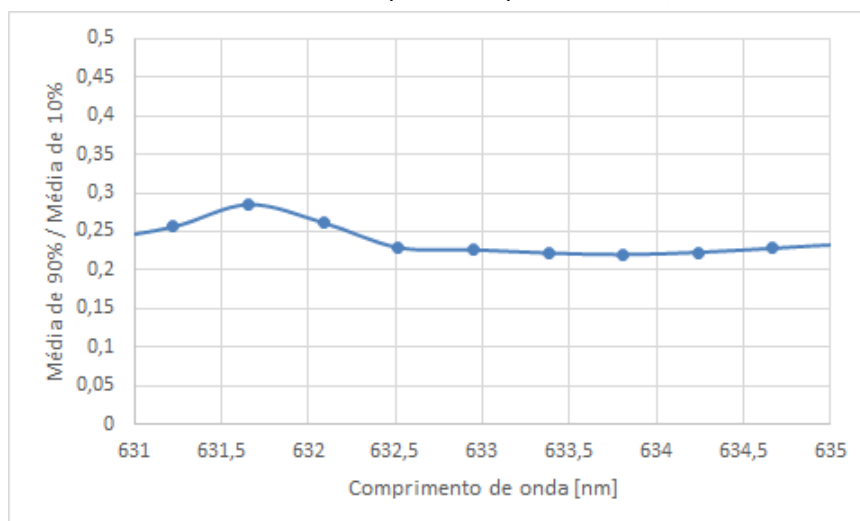


Figura 4.4.6 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-MLD, incorporada no provete de carbono, para a temperatura de 50,9° C

#### 4.4.3 - Fibra ótica F-MLD incorporada no provete de carbono a 73,5° C

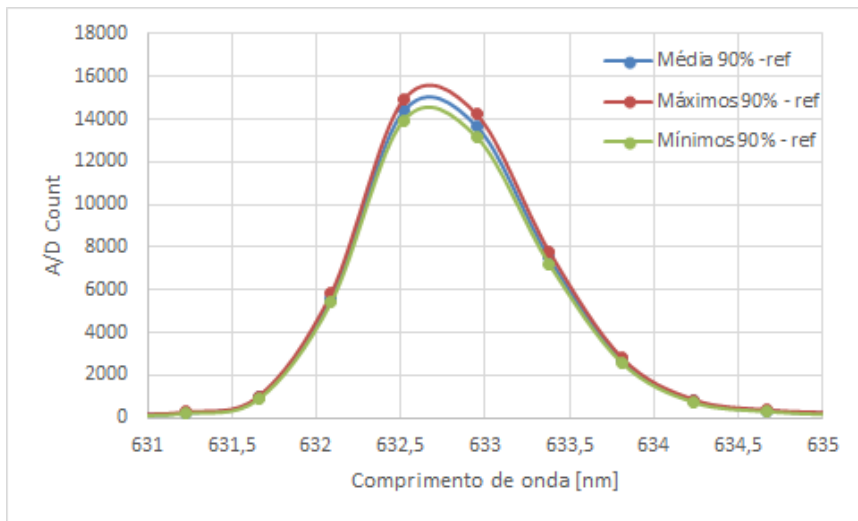


Figura 4.4.7 - Evolução do sinal ótico da fibra F-MLD, incorporada no provete de carbono, com intensidade de 90% para a temperatura de 73,5° C

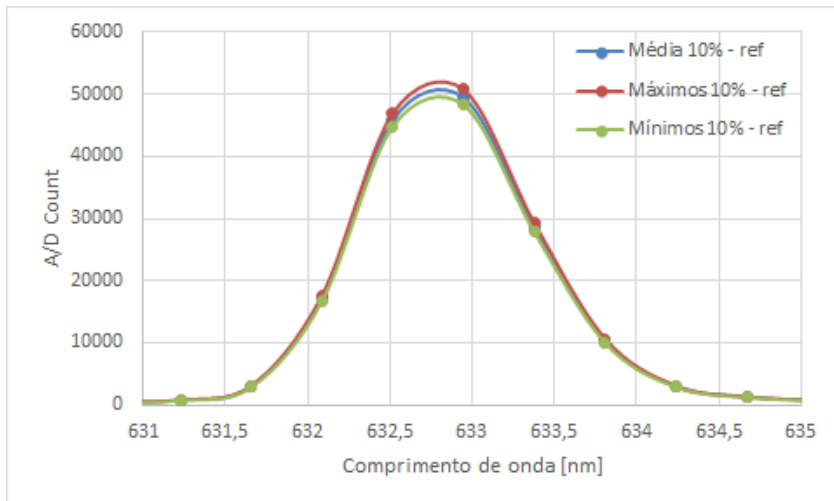


Figura 4.4.8 - Evolução do sinal ótico da fibra F-MLD, incorporada no provete de carbono, com intensidade de 10% para a temperatura de 73,5° C

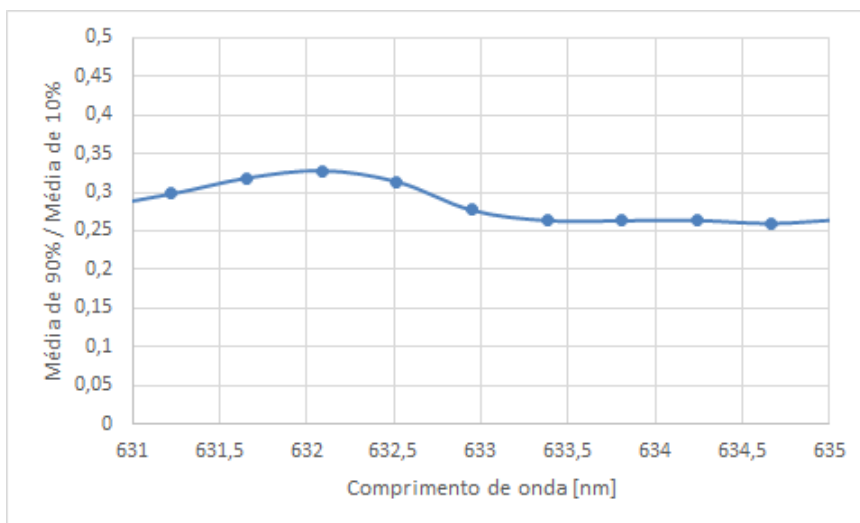


Figura 4.4.9 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-MLD, incorporada no provete de carbono, para a temperatura de 73,5° C

Os valores da relação entre as médias de 90% e 10% são praticamente constantes na janela de intervalo que é mais relevante (631 a 635 nm) por isso os resultados são de confiança. Na tabela seguinte estão representados os valores máximos para o sinal de 90% e 10% e a divisão entre eles, como foi feito nos ensaios das fibras óticas inalteradas pelo processo de fabrico e que ainda não estavam inseridas no compósito.

Tabela 4.4 - Valor máximo das médias de 90% e 10% e a sua razão para a fibra F-MLD inserida no compósito de carbono

Temperatura [° C]	Valor máximo da média de 90% (a)	Valor máximo da média de 10% (b)	Razão (a/b)
26,2	12729,67	48181,73	0,264
50,9	12238,83	50344,18	0,243
73,5	15699,14	50087,03	0,313

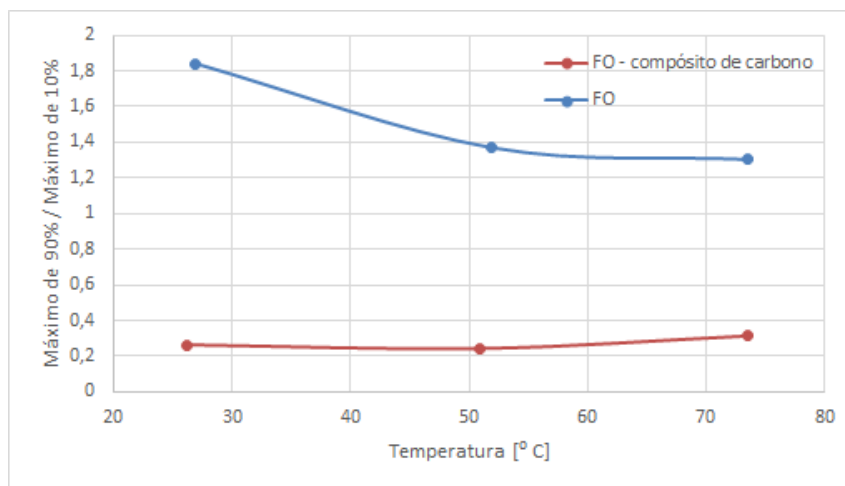


Figura 4.4.10 - Comparação da razão (90%/10%) do sinal ótico, em função da temperatura, para a fibra F-MLD testada individualmente e incorporada no compósito de carbono

Na Figura 4.4.10 está representada graficamente a variação da razão entre os valores máximos das médias de 90% e 10%. O valor da razão entre o primeiro ponto, 26,2° C, e o segundo ponto, 50,9° C teve uma redução de 8%. Este valor é diferente do obtido quando a fibra ótica foi testada sozinha, na altura obteve-se uma redução de 26,1%.

Do segundo ponto, 50,4° C, para o ponto final, 73,5° C, a razão teve um incremento de 28,9%. Trata-se de um valor não esperado, uma vez que, no ensaio realizado apenas sobre a fibra, a razão teve um novo decréscimo (-6,1%) e não um incremento com se verificou aqui.

## 4.5 - Provetes de fibra de carbono com fibra ótica F-SPF incorporada

Nas figuras seguintes apresenta-se a evolução do sinal ótico em função do comprimento de onda para as temperaturas de 27° C, 53,4° C e 73,5° C.

### 4.5.1 - Fibra ótica F-SPF incorporada no provete de carbono a 27° C

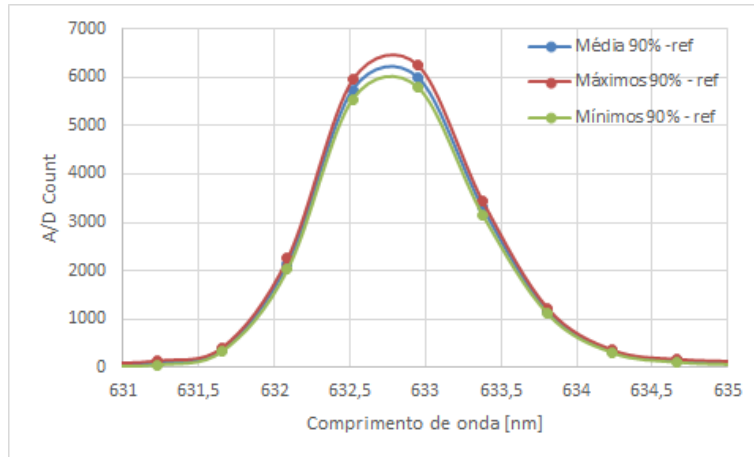


Figura 4.5.1 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SPF, incorporada no provete de carbono, com intensidade de 90% para a temperatura de 27 ° C

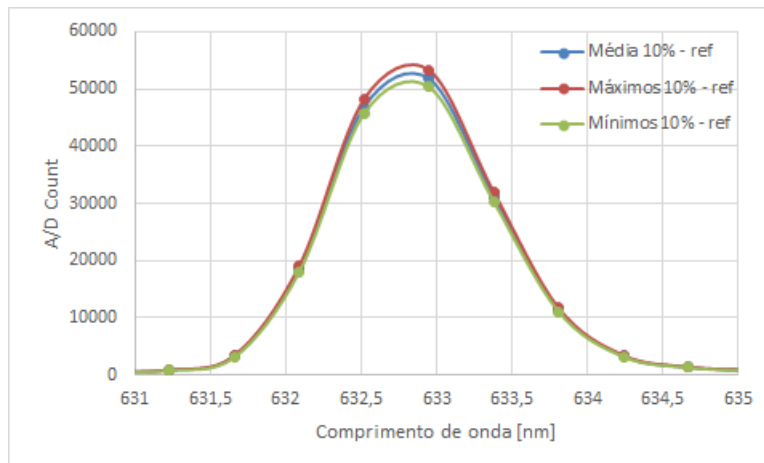


Figura 4.5.2 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SPF, incorporada no provete de carbono, com intensidade de 10% para a temperatura de 27 ° C

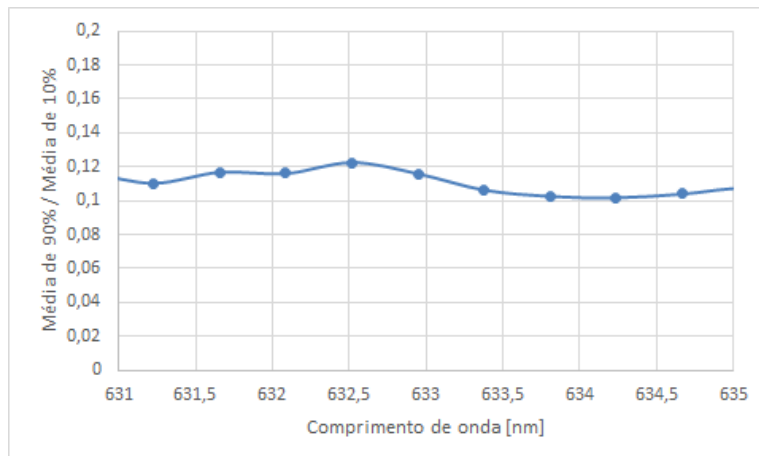


Figura 4.5.3 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-SPF, incorporada no provete de carbono, para a temperatura de 27 ° C

#### 4.5.2 - Fibra ótica F-SPF incorporada no provete de carbono a 53,4° C

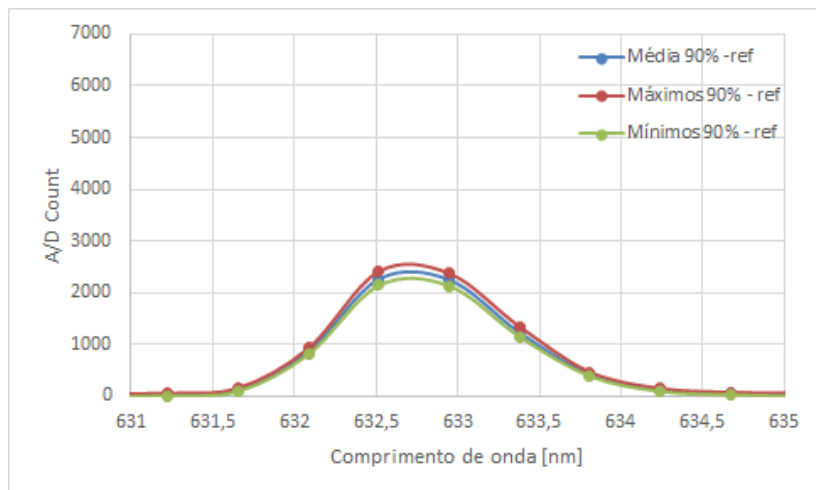


Figura 4.5.4 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SPF, incorporada no provete de carbono, com intensidade de 90% para a temperatura de 53,4 ° C

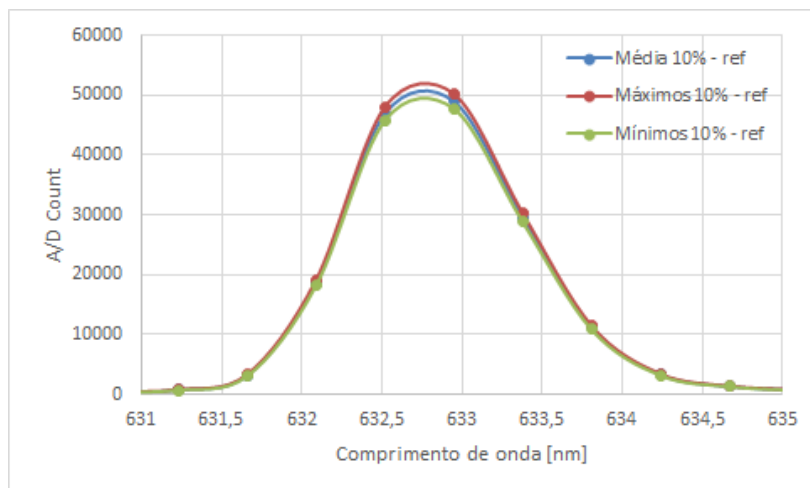


Figura 4.5.5 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SPF, incorporada no provete de carbono, com intensidade de 10% para a temperatura de 53,4 ° C.

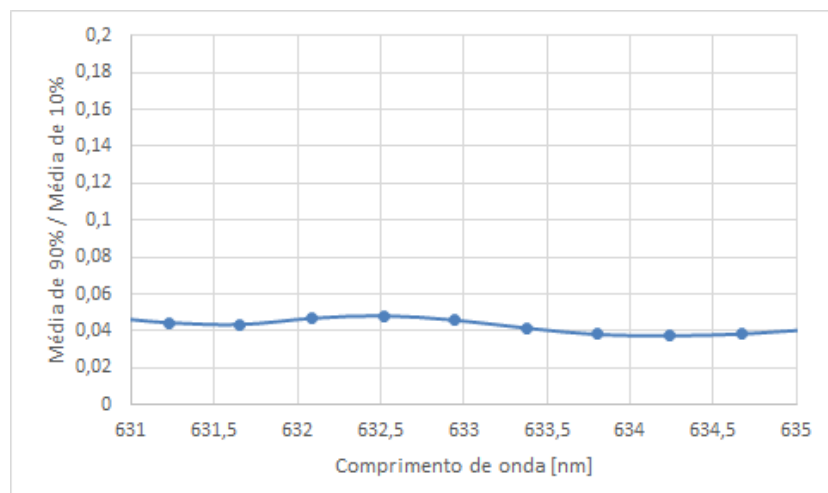


Figura 4.5.6 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-SPF, incorporada no provete de carbono, para a temperatura de 53,4 ° C

### 4.5.3 - Fibra ótica F-SPF incorporada no proвете de carbono a 73,5° C

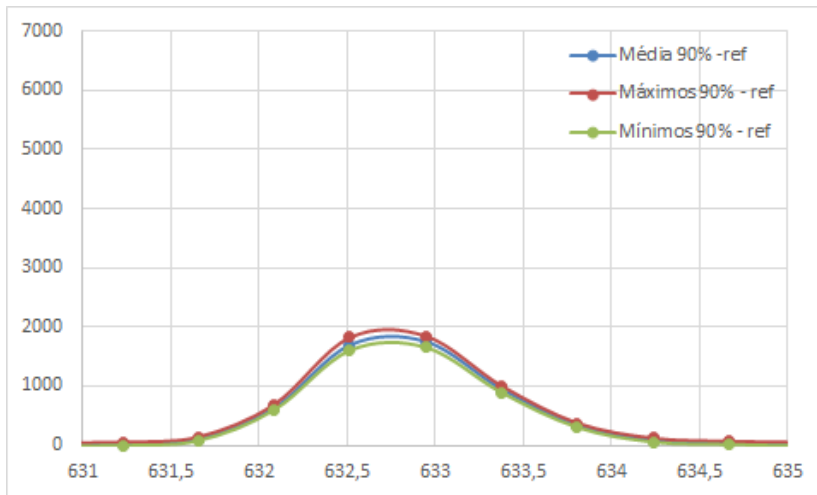


Figura 4.5.7 - - Evolução do sinal ótico da fibra F-SPF, incorporada no proвете de carbono, com intensidade de 90% para a temperatura de 73,5 ° C

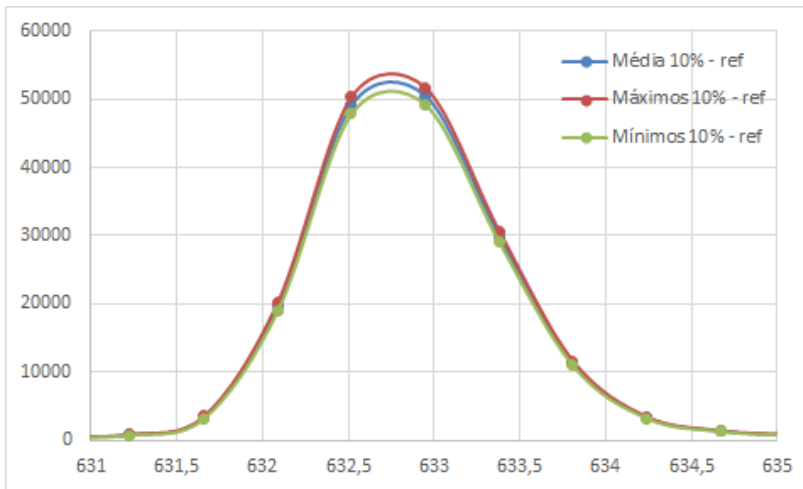


Figura 4.5.8 - - Evolução do sinal ótico da fibra F-SPF, incorporada no proвете de carbono, com intensidade de 10% para a temperatura de 73,5 ° C

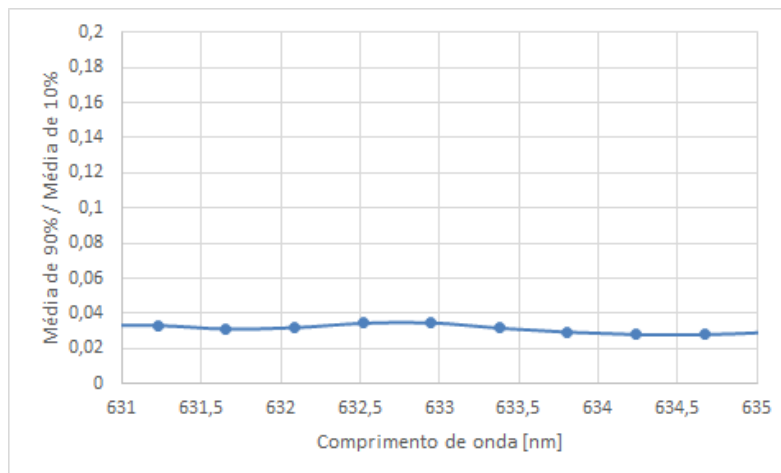


Figura 4.5.9 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-SPF, incorporada no proвете de carbono, para a temperatura de 73,4 ° C

Os valores da relação entre as médias de 90% e 10% são praticamente constantes na janela de intervalo que é mais relevante (631 a 635 nm), com exceção do primeiro valor. Tem-se alguma confiança em todos os resultados especialmente nas duas temperaturas mais elevadas. Na tabela seguinte estão representados os valores máximos para o sinal de 90% e 10% e a divisão entre eles, como foi feito anteriormente.

Tabela 4.5 - Valor máximo das médias de 90% e 10% e a sua razão para a fibra F-SPF inserida no compósito de carbono

Temperatura [°C]	Valor máximo da média de 90% (a)	Valor máximo da média de 10% (b)	Razão (a/b)
27	7062,13	52450,79	0,135
53,4	3602,6	49630,67	0,073
73,5	3022,5	51171,38	0,059

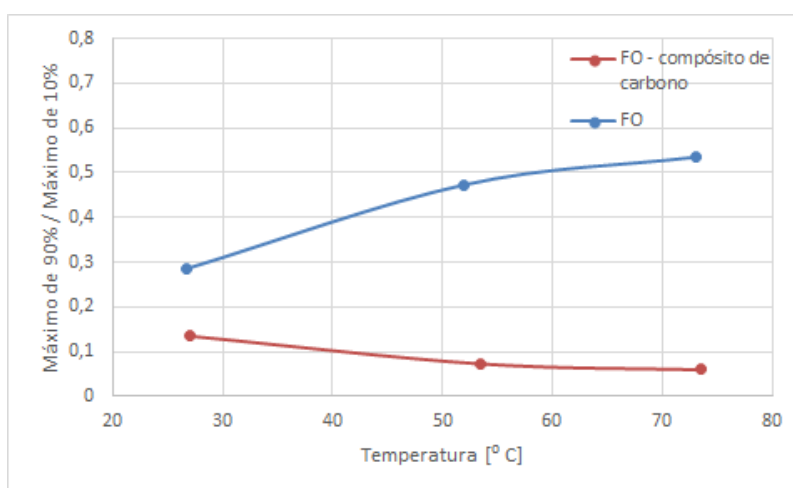


Figura 4.5.10 - Comparação da razão (90%/10%) do sinal óptico, em função da temperatura, para a fibra F-SPF testada individualmente e incorporada no compósito de carbono

Na Figura 4.5.10 está representada graficamente a variação da razão entre os valores máximos das médias de 90% e 10%. O valor da razão entre o primeiro ponto, 27° C, e o segundo ponto, 53,4° C teve uma redução de 46,1%. Este valor é bastante diferente do obtido quando a fibra ótica foi testada sozinha, na altura obteve-se um aumento de 65,7% entre estes dois pontos. Do segundo ponto, 53,4° C, para o ponto final, 73,5° C, a razão teve uma nova redução de 18,6%. Este valor contraria o que se passou na fibra ótica testada sozinha porque esta teve um aumento de 13% entre estes dois pontos.

## 4.6 - Provetes de fibra de vidro com fibra ótica F-MLD incorporada

Todo o processo de fabrico foi descrito no capítulo 4 no entanto, é importante relembrar alguns aspetos mais importantes. Os provetes fibra de vidro têm dimensões de 150x25 mm e são compostos por 10 camadas de tecido de fibra de vidro tipo E de 195 g/cm<sup>2</sup>. A fibra ótica foi colocada e as camadas de fibra de vidro foram empilhadas manualmente, uma de cada vez, por cima desta. Entre camadas foi colocada resina sempre que necessário.

O valor do ângulo da primeira lente do filtro polarizador foi mantido em 40° quer para o provete de fibra de vidro com a fibra ótica F-SPF incorporada quer para o provete de fibra de vidro com fibra ótica F-MLD incorporada.

Mais uma vez, como nos ensaios dos provetes de carbono, a temperatura da panela usada para o aquecimento foi incrementada no valor de 5° C nas duas temperaturas de ensaio superiores à temperatura ambiente pelo mesmo motivo apresentado anteriormente.

Nos provetes de fibra de vidro foram inserida fibras óticas com a mesma referência mas, neste caso, já não seriam as mesmas que foram testadas na primeira fase porque estas estavam agora incorporadas nos provetes de fibra de carbono. Em seguida são apresentados os resultados obtidos para estes dois tipos de fibras óticas.

### 4.6.1 - Fibra ótica F-MLD incorporada no provete de vidro a 26,9° C

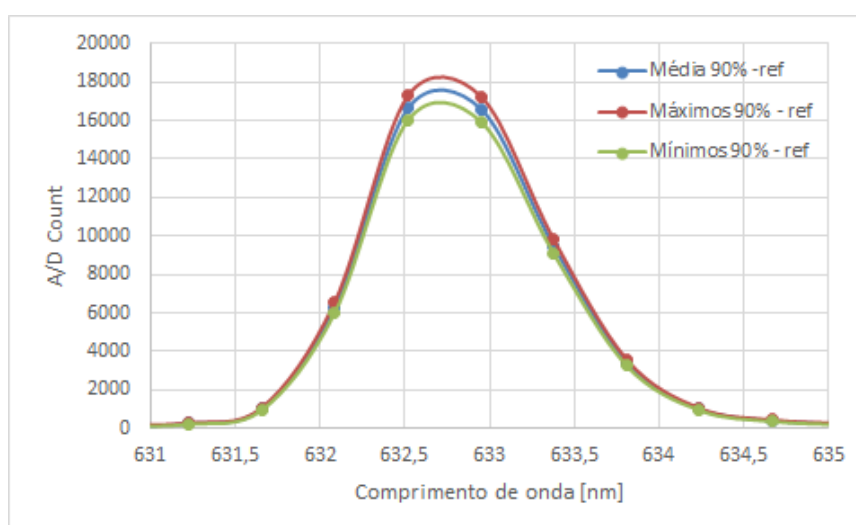


Figura 4.6.1 - Evolução do sinal ótico da fibra F-MLD, incorporada no provete de fibra de vidro, com intensidade de 90% para a temperatura de 26,9° C

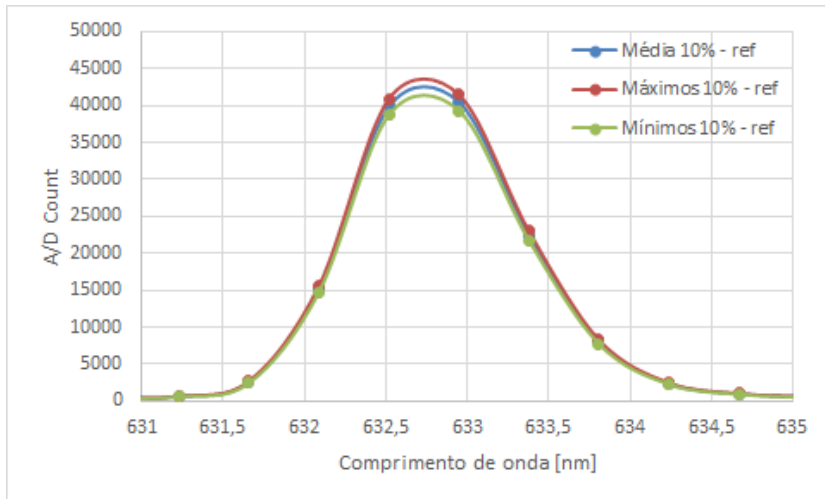


Figura 4.6.2 - Evolução do sinal óptico da fibra F-MLD, incorporada no provete de fibra de vidro, com intensidade de 10% para a temperatura de 26,9 ° C

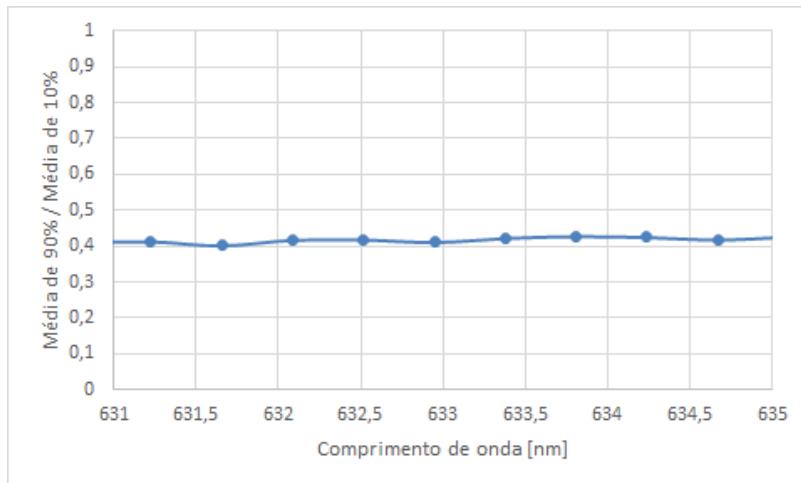


Figura 4.6.3 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-MLD, incorporada no provete de fibra de vidro, para a temperatura de 26,9 ° C

#### 4.6.2 - Fibra ótica F-MLD incorporada no provete de vidro a 51,6° C

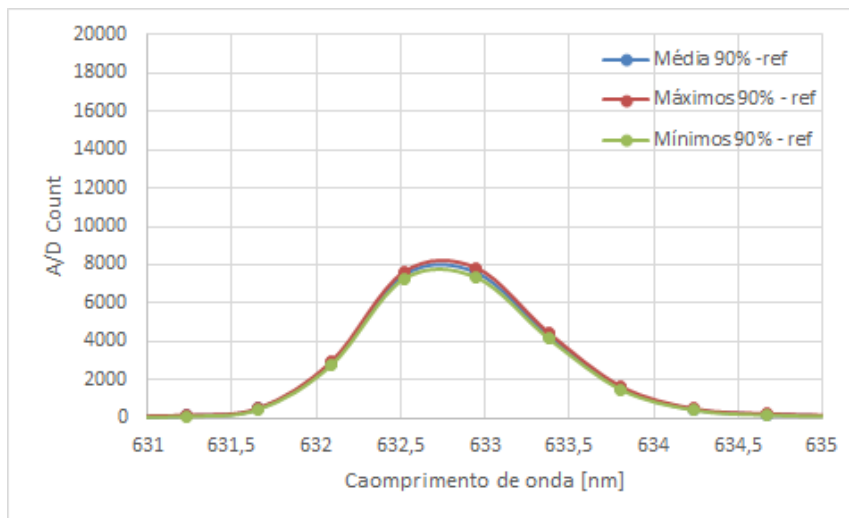


Figura 4.6.4 - Evolução do sinal óptico da fibra F-MLD, incorporada no provete de fibra de vidro, com intensidade de 90% para a temperatura de 51,6 ° C

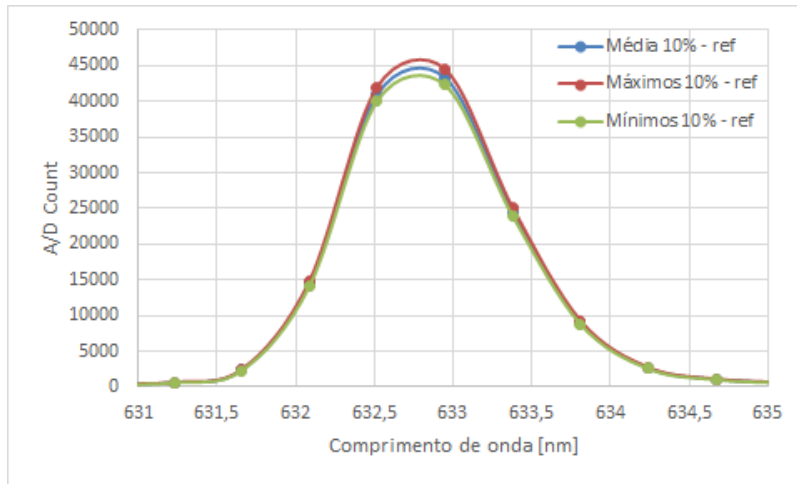


Figura 4.6.5 - Evolução do sinal óptico da fibra F-MLD, incorporada no provete de fibra de vidro, com intensidade de 10% para a temperatura de 51,6 ° C

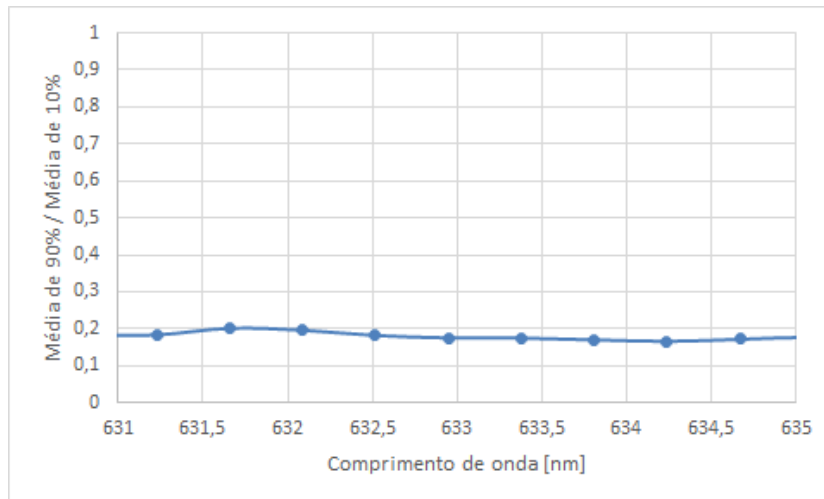


Figura 4.6.6 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-MLD, incorporada no provete de fibra de vidro, para a temperatura de 51,6 ° C

### 4.6.3 - Fibra óptica F-MLD incorporada no provete de fibra de vidro a 71,4° C

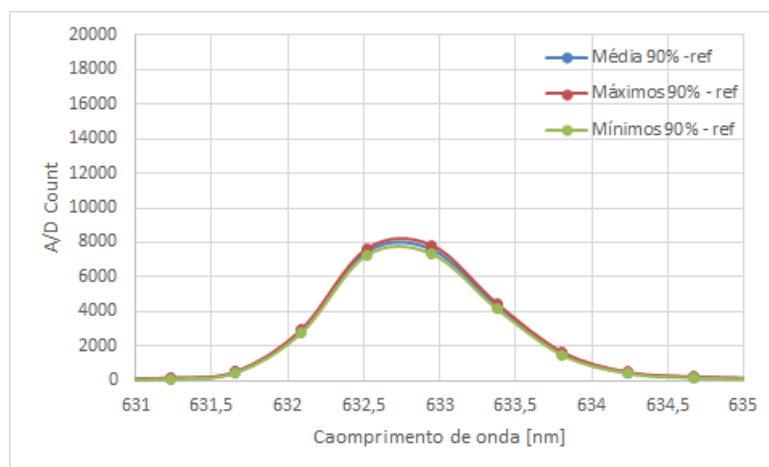


Figura 4.6.7 - Evolução do sinal óptico da fibra F-MLD, incorporada no provete de fibra de vidro, com intensidade de 90% para a temperatura de 71,4 ° C

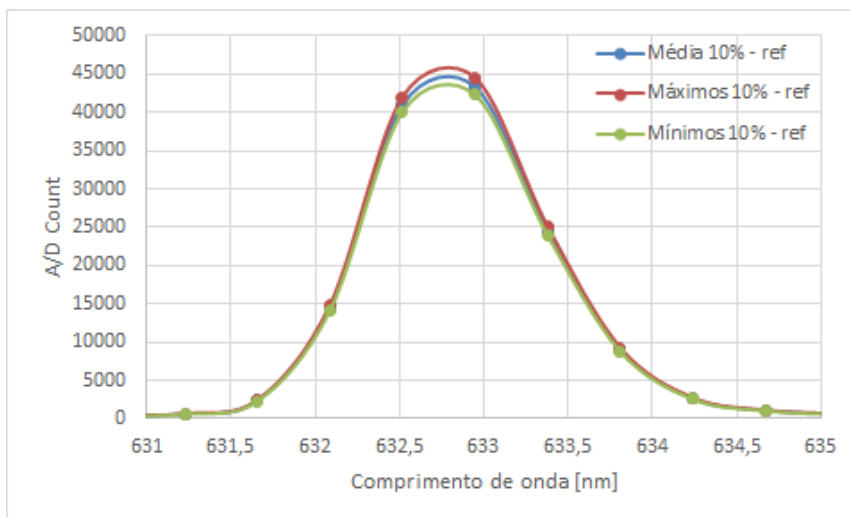


Figura 4.6.8 - Evolução do sinal óptico da fibra F-MLD, incorporada no provete de fibra de vidro, com intensidade de 10% para a temperatura de 71,4 ° C

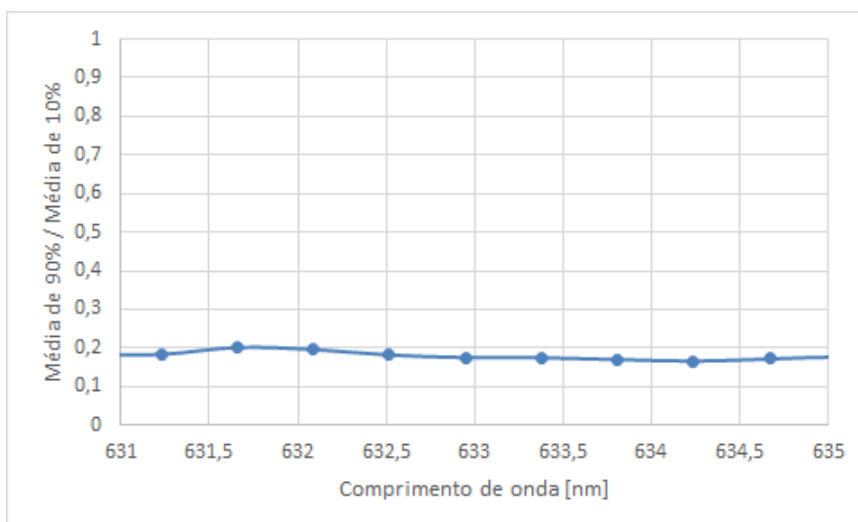


Figura 4.6.9 - Evolução da relação entre a média do sinal de 90% e a média do sinal de 10% da fibra F-MLD, incorporada no provete de fibra de vidro, para a temperatura de 71,4 ° C

Os valores da relação entre as médias de 90% e 10% são praticamente constantes na janela de intervalo que é mais relevante (631 a 635 nm) por isso os resultados são de confiança. Na tabela seguinte estão representados os valores máximos para o sinal de 90% e 10% e a divisão entre eles, como foi feito nos ensaios das fibras óticas inalteradas pelo processo de fabrico, que ainda não estavam inseridas no compósito e também no caso das fibras óticas inseridas nos provetes de carbono.

Tabela 4.6 - Valor máximo das médias de 90% e 10% e a sua razão para a fibra F-MLD inserida no compósito de fibra de vidro

Temperatura [°C]	Valor máximo da média de 90% (a)	Valor máximo da média de 10% (b)	Razão (a/b)
26,9	17576,96	41006,04	0,429
51,6	8627,47	43912,05	0,196
71,4	7112,19	37236,75	0,191

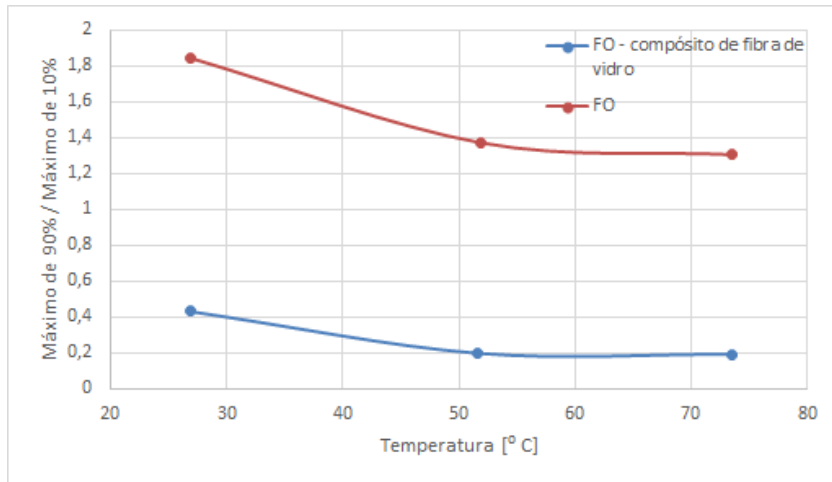


Figura 4.6.10 - Comparação da razão (90%/10%) do sinal ótico, em função da temperatura, para a fibra F-MLD testada individualmente e incorporada no compósito de fibra de vidro

Na Figura 4.6.10 está representada graficamente a variação da razão entre os valores máximos das médias de 90 e 10%. O valor da razão entre o primeiro ponto, 26,9° C, e o segundo ponto, 51,6° C teve uma redução de 54,2%. Este valor segue em linha com o esperado, embora com menor valor, porque quando a fibra ótica foi testada sozinha obteve-se uma redução de 26,1%.

Do segundo ponto, 51,6° C, para o ponto final, 71,4° C, a razão teve uma nova redução de 2,79%. Trata-se de um valor em linha com o esperado, uma vez que, no ensaio realizado apenas sobre a fibra, a razão teve também um novo decréscimo de 6,1%.

## 4.7 - Provetes de fibra de vidro com fibra ótica F-SPF incorporada

### 4.7.1 - Fibra ótica F-SPF incorporada no provete de fibra de vidro a 26,4° C

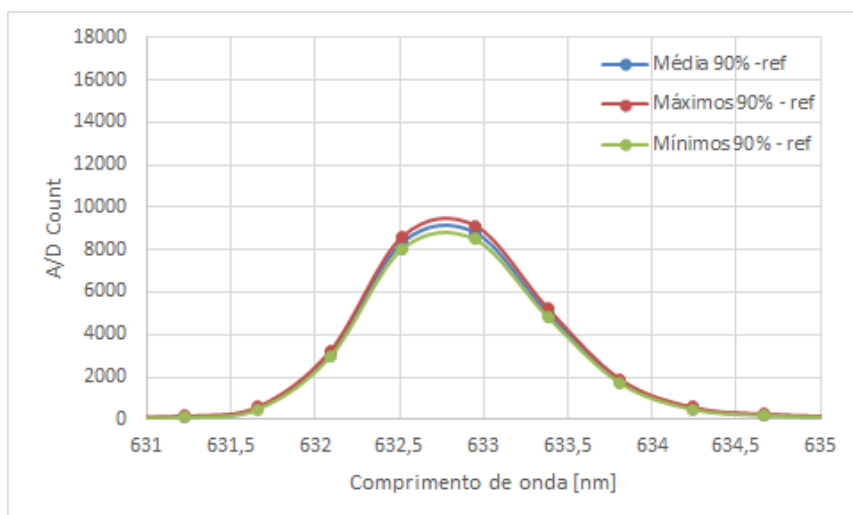


Figura 4.7.1 - Evolução do sinal ótico da fibra F-SPF, incorporada no provete de fibra de vidro, com intensidade de 90% para a temperatura de 26,7° C

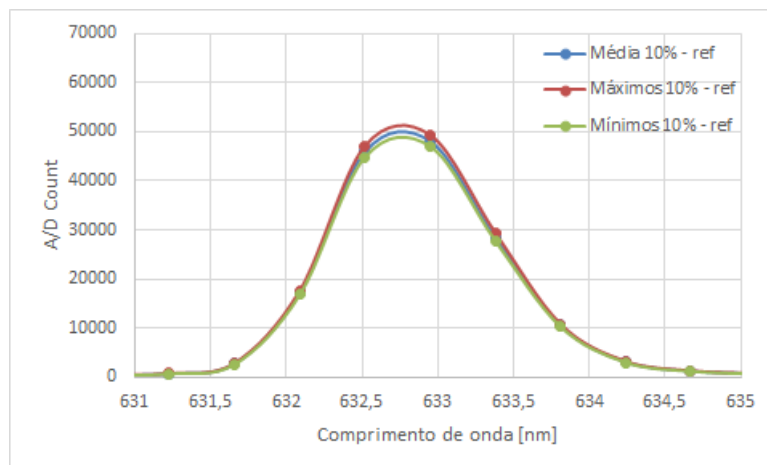


Figura 4.7.2 - Evolução do sinal óptico da fibra F-SPF, incorporada no provete de fibra de vidro, com intensidade de 90% para a temperatura de 26,7 ° C

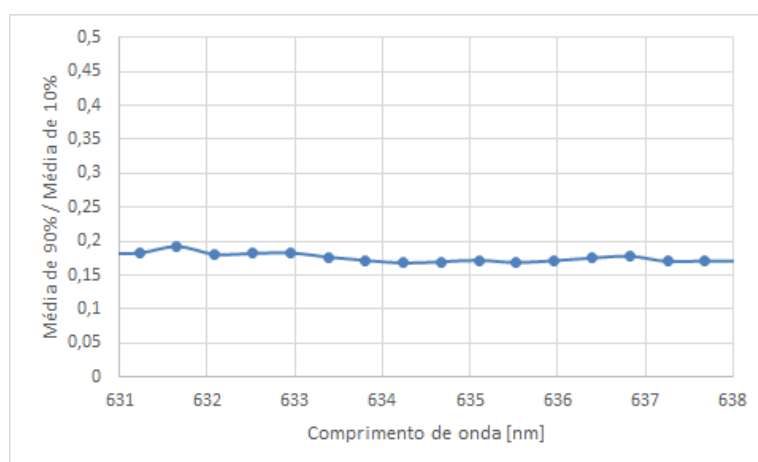


Figura 4.7.3 - Relação entre a média de 90% e a média de 10% a 26,7° na fibra F-SPF incorporada no provete de fibra de vidro

#### 4.7.2 - Fibra ótica F-SPF incorporada no provete de fibra de vidro a 51,1° C

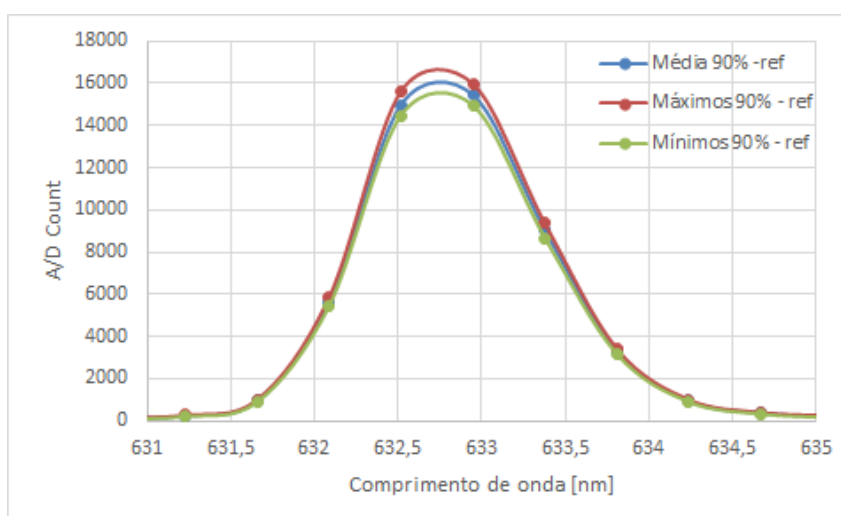


Figura 4.7.4 - Evolução do sinal óptico da fibra F-SPF, incorporada no provete de fibra de vidro, com intensidade de 90% para a temperatura de 51,1 ° C

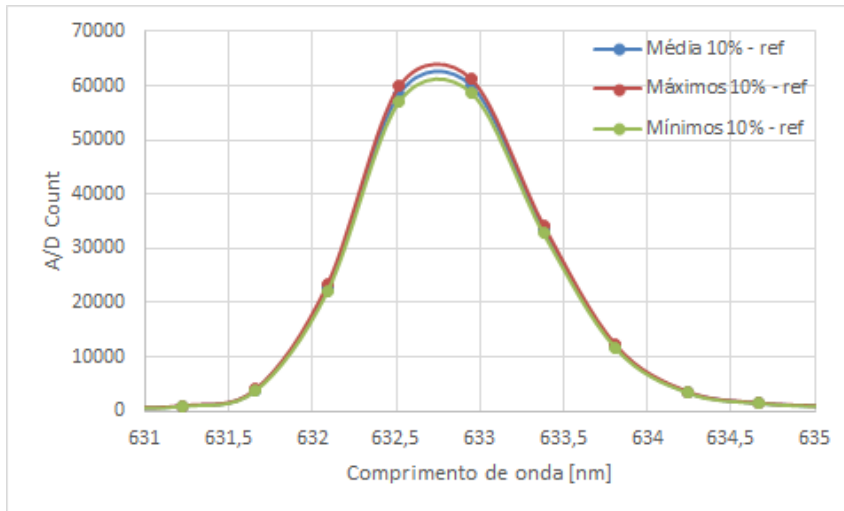


Figura 4.7.5 - Evolução do sinal óptico da fibra F-SPF, incorporada no provete de fibra de vidro, com intensidade de 90% para a temperatura de 51,1 ° C

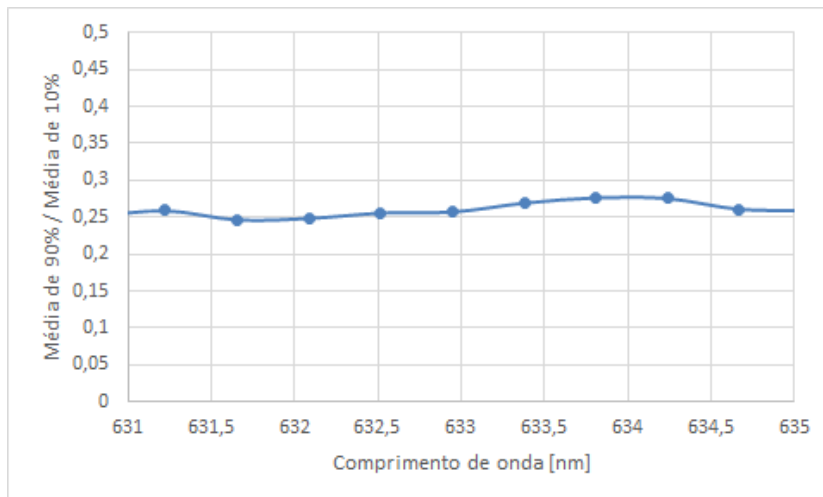


Figura 4.7.6 - Relação entre a média de 90% e a média de 10% a 51,1° na fibra F-SPF incorporada no provete de fibra de vidro

### 4.7.3 - Fibra ótica F-SPF incorporada no provete de fibra de vidro a 74° C

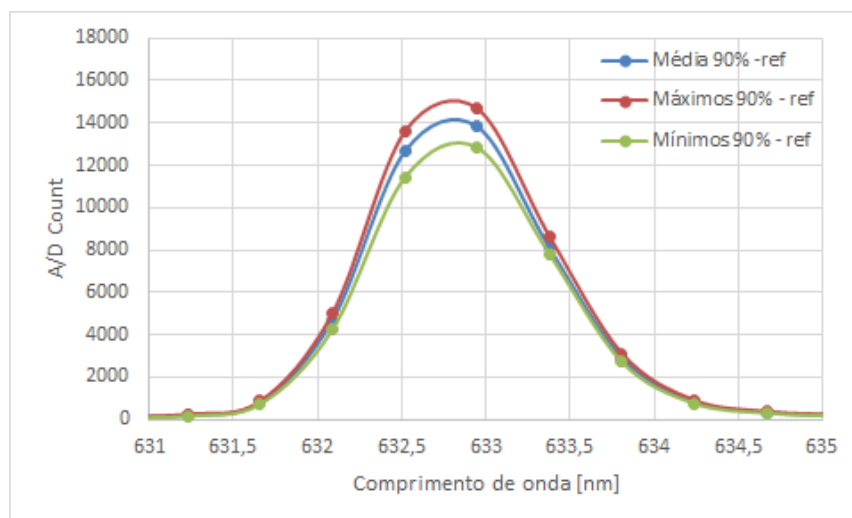


Figura 4.7.7 - Evolução do sinal óptico da fibra F-SPF, incorporada no provete de fibra de vidro, com intensidade de 90% para a temperatura de 74 ° C

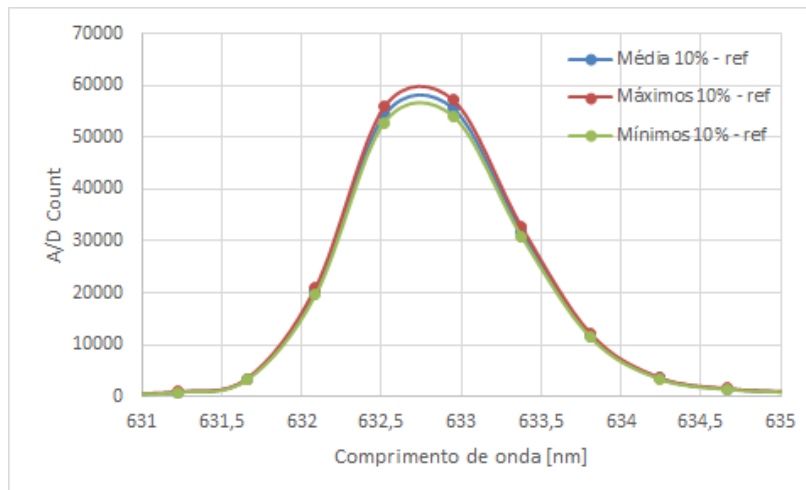


Figura 4.7.8 - Evolução do sinal óptico da fibra F-SPF, incorporada no provete de fibra de vidro, com intensidade de 10% para a temperatura de 74 ° C

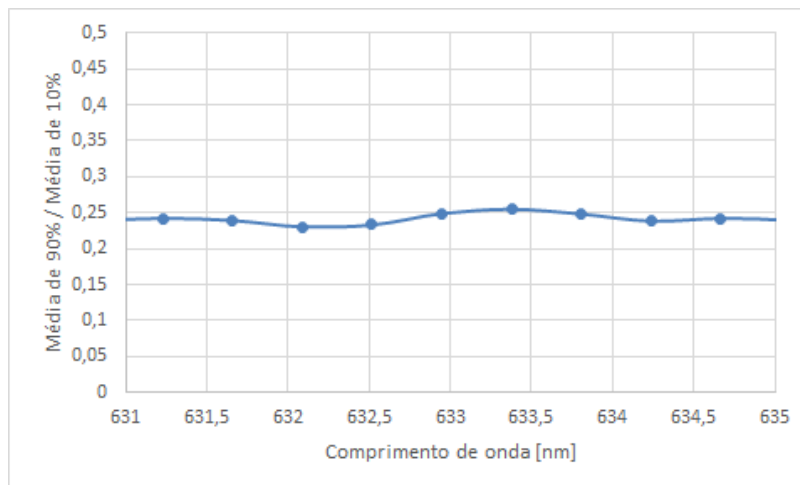


Figura 4.7.9 - Relação entre a média de 90% e a média de 10% a 74° na fibra F-SPF incorporada no provete de fibra de vidro

Os valores da relação entre as médias de 90% e 10% são praticamente constantes na janela de intervalo que é mais relevante (631 a 635 nm), desta forma observa-se que os resultados são de confiança. Na tabela seguinte estão representados os valores máximos para o sinal de 90% e 10% e a divisão entre eles, como foi feito anteriormente.

Tabela 4.7 - Valor máximo das médias de 90% e 10% e a sua razão para a fibra F-SPF inserida no compósito de fibra de vidro

Temperatura [°C]	Valor máximo da média de 90% (a)	Valor máximo da média de 10% (b)	Razão (a/b)
26,4	9634,52	48710,17	0,198
51,1	16313,78	60690,28	0,269
74	14463,4	56191,58	0,257

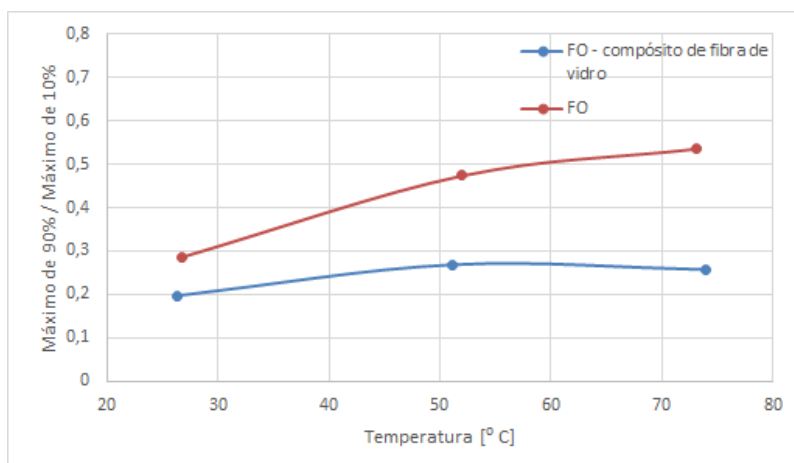


Figura 4.7.10 - Comparação da razão (90%/10%) do sinal óptico, em função da temperatura, para a fibra F-SPF testada individualmente e incorporada no compósito de fibra de vidro

Na Figura 4.7.10 está representada graficamente a variação da razão entre os valores máximos das médias de 90% e 10%. O valor da razão entre o primeiro ponto, 26,4° C, e o segundo ponto, 51,1° C teve uma redução de 35,9%. Este valor segue em linha com o esperado, embora com menor valor, porque quando a fibra óptica foi testada sozinha obteve-se um aumento de 65,7% entre estes dois pontos. Do segundo ponto, 51,1° C, para o ponto final, 74° C, a razão teve uma redução de 4,2%. Este valor contraria o que se passou na fibra óptica testada sozinha porque esta teve um aumento de 13% entre estes dois pontos.



# Capítulo 5 - Conclusões e recomendações para trabalhos futuros

## 5.1 - Conclusões

Ao longo deste trabalho testou-se a sensibilidade de diversos tipos de fibras óticas comerciais à variação de temperatura. As fibras foram testadas sozinhas e incorporadas na superfície de CFRP e GFRP. A fiabilidade das leituras foi garantida através da construção de um circuito ótico que permite detetar as variações na fonte de sinal e a sua relação com o sinal de saída (razão).

Conclui-se que a fibra mais sensível às alterações de temperatura é a fibra ótica do tipo F-SPF, quando é testada sem ser incorporada em nenhum dos provetes (sozinha) e sem ter sido sujeita ao processo de fabrico do compósito (*hand lay-up* ou autoclave). Neste tipo de fibra, a razão teve um incremento de 65,7% da primeira temperatura para a segunda (26,7° C para 52° C). Da segunda temperatura para a temperatura final (73,1° C) a razão teve um incremento de 13%.

A fibra mais sensível às alterações de temperatura, quando incorporada no compósito de fibra de carbono, também é a fibra ótica do tipo F-SPF. Da primeira temperatura (27° C) para a segunda (53,4° C) a razão (intensidade do sinal a dividir pela intensidade de sinal da fonte) teve uma redução de 46,1%. Da segunda temperatura para a temperatura final (73,5° C) a razão teve um novo decréscimo de 18,6%.

No caso das fibras óticas incorporadas nos provetes de fibra de vidro, a fibra ótica mais afetada pelo aumento de temperatura é a do tipo F-MLD. Entre as duas primeiras temperaturas (26,9° C e 51,6° C) a razão experimentou um decréscimo de 54,2%. Já entre a segunda temperatura e a temperatura final (71,4° C) a razão teve uma nova redução de 2,8%.

A fibra ótica do tipo F-SPF apresentou dificuldades, a nível da obtenção de sinal, nos casos onde foi testada sem ser incorporada em nenhum compósito e quando foi incorporada no compósito de fibra de carbono. Esta dificuldade pode estar relacionada com o facto desta fibra ter um diâmetro de *core* muito reduzido quando comparado com o diâmetro do *core* da fibra F-MLD (5 µm e 100 µm). É também possível que esta dificuldade esteja relacionada com o comprimento de onda de corte para este tipo de fibra (600-800 nm), uma vez que, os ensaios foram realizados com uma fonte luminosa (laser de cor vermelha) com um comprimento de onda de operação de 632,8 nm, que se encontra dentro da região de corte para este tipo de fibra ótica. A fibra ótica do tipo F-MLD apresentou mais dificuldades na obtenção de sinal quando incorporada no compósito de fibra de vidro. É possível que o revestimento da fibra tenha sido mais afetado pela resina utilizada no fabrico do compósito.

Quando sujeitas ao processo de fabrico todas as fibras foram afetadas. No entanto houve uma fibra ótica em particular que experimentou alterações mais extremas no que toca à intensidade de sinal que a atravessa. Essa fibra foi a F-MLD que, quando testada sem ser inserida em nenhum compósito, tinha valores de *A/D Count* superiores a 40000 e depois dos processos de fabrico dos compósitos apresentou valores entre 12000 e 16000 para o laminado reforçado com fibra de carbono e entre 7000 e 18000 para o laminado reforçado com fibra de vidro (valor mais elevado, a saber 17577, à temperatura ambiente, 8624 na temperatura intermédia e 7112 à temperatura mais elevada).

Tendo em consideração as gamas de valores que os sinais óticos tiveram com a variação de temperatura, a fibra ótica F-MLD pode ser usada como sensor em GFRP, pelo menos em temperaturas mais reduzidas (até  $\sim 55^{\circ}\text{C}$ ), uma vez que apresenta uma sensibilidade maior nesta gama. A influência do aumento de temperatura não é tão perceptível em temperaturas mais elevadas. Em CFRP este tipo de fibra ótica é bastante afetada pelo processo de fabrico e, por isso, não é recomendável o seu uso (pelo menos na forma comercial) neste tipo de laminados.

A fibra ótica do tipo F-SPF apresenta uma sensibilidade ao aumento de temperatura bastante aceitável (redução de sinal de 46,1%), pelo menos para temperaturas mais reduzidas (25 -  $55^{\circ}\text{C}$ ). Em CFRP esta fibra apresenta maior sensibilidade em temperaturas mais reduzidas. Em temperaturas mais elevadas a sensibilidade é menor mas ainda é bastante aceitável. No caso de GFRP a fibra ótica tem alguma sensibilidade em temperaturas mais reduzidas. Em temperaturas mais elevadas as alterações não são muito significativas. De referir que a intensidade do sinal obtido com este tipo de fibra é bastante reduzido para esta fonte luminosa.

## 5.2 - Recomendações para trabalhos futuros

Por vezes é difícil detetar a ocorrência de dano em peças ou materiais que possuem tamanhos ou formas de estrutura tais que se torna difícil ver o próprio dano. Nestes casos pode usar-se fibras óticas incorporadas na própria estrutura que fornecem dados em tempo real da integridade estrutural. O ideal seria a previsão da ocorrência de uma falha, o seu diagnóstico e, se possível, o sistema atuar autonomamente em resposta ao que aconteceu (ou está para acontecer). É de extrema importância o desenvolvimento de sensores que possam ser incorporados na própria estrutura que se pretende monitorizar. Assim sendo, é crucial o desenvolvimento de sensores de pequenas dimensões com possibilidade de serem embebidos em estruturas, pouco influenciados por interferências eletromagnéticas, mas sensíveis às variáveis que envolvam a integridade, como são o caso de sensores de fibras óticas.

Para trabalhos futuros é recomendável que se estude a possível alteração das propriedades químicas/físicas dos revestimentos das fibras óticas pelo processo de fabrico de materiais compósitos, em especial a influência do tipo de matriz usada.

Pode ser também feito um estudo com a variação de temperatura a ocorrer de forma descendente (da temperatura mais elevada para a mais reduzida, neste caso a temperatura ambiente) ou em ciclos de temperatura alternados, para estudar o possível impacto de oscilações não lineares de temperatura.

Outra sugestão é usar diversas fontes luminosas (laser) com vários comprimentos de onda de operação distintos, por exemplo um laser de cor diferente. Ao usar uma fonte que tenha o seu comprimento de onda fora (ou mais longe) da zona de corte das fibras óticas usadas, os resultados podem ser diferentes.

Existem também outros tipos de fibras óticas mais preparadas para detetar alterações no meio. Tratam-se de fibras óticas não comerciais alteradas de forma a apresentarem uma região mais sensível a alterações (*silver coating*, *yellow coating*, etc). Estes tipos de fibras foram usadas por *Miluski, P. et al* (2015) [60] e também por *Rithesh Raj, D. et al* (2015) [61], por exemplo.

Recomenda-se também a implementação de sensores em compósitos sujeitos a esforços/cargas que promovam o aquecimento (vibrações, fadiga, fluência, desgaste) por forma a detetar possíveis defeitos no material antes da sua ocorrência e implementar mecanismos de aviso.



# Bibliografia

- [1] X. W. Ye, Y. H. Su and J. P. Han, "Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Using Optical Fiber Sensing Technology: A Comprehensive Review," *The Scientific World Journal*, 2014.
- [2] R. de Oliveira, O. Frazão, J. L. Santos and A. T. Marques, "Optic fibre sensor for real-time damage detection in smart composite," *Computers & Structures*, vol. 82, pp. 1315-1321, 2004.
- [3] W. D. Callister, *Materials Science and Engineering, an Introduction*, 7<sup>a</sup> ed., Nova Iorque, EUA: John Wiley & Sons Inc, 2007.
- [4] J.-M. Park, D.-J. Kwon, Z.-J. Wang and K. L. DeVries, "Review of self-sensing of damage and interfacial evaluation using electrical resistance measurements in nano/ micro carbon materials-reinforced," *Advanced Composite Materials*, pp. 1-23, 2014.
- [5] C. -Y. Huang, R. S. Trask and I. P. Bond, "Characterization and analysis of carbon fibre-reinforced polymer composite laminates with embedded circular vasculature," *Journal of The Royal Society*, vol. 7, pp. 1229-1241, 2010.
- [6] M. Mousumi, T. K. Gangopadhyay, A. K. Chakraborty, K. Dasgupta and D. K. Bhattacharya, "Fibre Bragg gratings in structural health monitoring - Present status and applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 147, pp. 150-164, 2008.
- [7] B. Benchechou and R. G. White, "Stresses around fasteners in composite structures in flexure and effects of fatigue damage initiation part 2: countersunk bolts," *Composites Structures*, vol. 33, no. 2, pp. 109-119, 1995.
- [8] P. Lesiak, M. Szelag, D. Budaszewski, R. Plaga, K. Milenko, G. Rajan, Y. Semenova, G. Farrell, A. Boczkowska, A. Domanski and T. Wolinski, "Influence of lamination process on optical fiber sensors embedded in composite material," *Measurement*, vol. 45, no. 9, pp. 2275-2280, 2012.
- [9] R. S. Mahendran, L. Wang, V. R. Machavaram, S. D. Pandita, R. Chen, S. N. Kukureka and G. F. Fernando, "Fiber-optic sensor design for chemical process and environmental monitoring," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 47, no. 10, pp. 1069-1076, 2009.
- [10] R. P. Pappu, *Acoustic emission detection using optical fiber sensors for aerospace applications*, Aston University, 2011.
- [11] J. M. A. Silva, T. C. Devezas, A. P. Silva and J. A. M. Ferreira, "Mechanical Characterization of Composites with Embedded Optical Fibers," *Composite Materials*, vol. 39, pp. 1261-1281, 2005.
- [12] A. B. Strong, *Fundamentals of Composite Manufacturing - Materials, Methods, and Applications*, Michigan, EUA: Society of Manufacturing Engineers, 2008.
- [13] W. D. Callister, Jr., *Ciência e Engenharia de Materiais*, Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 2002.
- [14] M. F. S. F. d. Moura, A. B. d. Moraes and A. G. d. Magalhães, *Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*, Porto, Portugal: Publindústria, 2011.

- [15] E. B. Mano, *Polímeros como materiais de engenharia*, Edgard Blucher, 1991.
- [16] B. D. Agarwal and L. J. Broutman, *Analysis and performance of fiber composites*, John Wiley & Sons, Inc., 1990.
- [17] S. L. Donaldson and D. B. Miracle, *ASM Handbook Composites Volume 21*, ASM International, 2001.
- [18] A. K. Kaw, *Mechanics of Composite Materials*, Nova Iorque, EUA: CRC Press LLC., 1997.
- [19] V. Q. C. P. d. Silva, *Avaliação experimental dos deslocamentos e das cargas críticas de "bending-buckling" em placas compósitas*, Coimbra, Portugal, 2012.
- [20] "Australian Academy of Science," [Online]. Available: <http://www.sciencearchive.org.au/nova/059/059key.html>. [Accessed 11 Dezembro 2014].
- [21] A. M. F. M. Ventura, "Os Compósitos e a sua Aplicação na Reabilitação de Estruturas Metálicas," *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, vol. 21, pp. 10-19, 2009.
- [22] [Online]. Available: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9814>. [Accessed 12 Janeiro 2015].
- [23] H. Ku, H. Wang, N. Pattarachaiyakoop and M. Trada, "A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 42, pp. 856-873, 2011.
- [24] S. Bagherpour, "Polyester," in *Fibre Reinforced Polyester Composites*, Najafabad-Branch, Iran, Islamic Azad University, Department of Materials Science and Engineering, 2012.
- [25] M. Ashby, H. Shercliff and D. Cebon, *Materials: Engineering, Science, Processing and Design*, 1<sup>a</sup> ed., Londres, Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2007.
- [26] R. Zanatta. [Online]. Available: <http://www.aviacao.org/article/materiais-compositos/3/>. [Accessed 26 Fevereiro 2015].
- [27] A. Baker, S. Dutton and D. Kelly, *Composite Materials for Aircraft Structures*, Blacksburg, Virginia: AIAA Education, 2004.
- [28] C. Woodford, "Explainthatstuff!," 19 Janeiro 2015. [Online]. Available: <http://www.explainthatstuff.com/fiberoptics.html>. [Accessed 30 Março 2015].
- [29] J.-M. Henault, G. Moreau, S. Blairon, J. Salin, J.-R. Courivaud, F. Taillade, E. Merliot, J.-P. Dubois, J. Bertrand, S. Buschaert, S. Mayer and S. Delepine-Lesoille, "Truly Distributed Optical Fiber Sensors for Structural Health Monitoring: From the Telecommunication Optical Fiber Drawing Tower to Water Leakage Detection in Dikes and Concrete Structure Strain Monitoring," *Advances in Civil Engineering*, 2010.
- [30] C. a. Galindez-Jamioy and J. M. López-Higuera, "Brillouin Distributed Fiber Sensors: An Overview and Applications," *Journal of Sensors*, 2012 .
- [31] M. H. Weik, *Fiber optics standard dictionary*, Berlin: Birkhäuser, 1997.

- [32] "Cable Wholesale," [Online]. Available: [https://www.cablewholesale.com/support/technical\\_articles/fiber\\_optics.php](https://www.cablewholesale.com/support/technical_articles/fiber_optics.php). [Accessed 30 Março 2015].
- [33] K. Roebuck, *Wavelength-Division Multiplexing (WDM) : High-impact Technology - What You Need to Know: Definitions, Adoptions, Impact, Benefits, Maturity, Vendors*, Emereo Publishing, 2012.
- [34] D. Bailey and E. Wright, *Practical Fiber Optics*, Oxford, Reino Unido: Elsevier, 2003.
- [35] A. P. Roldão. [Online]. Available: <http://www.mundos-fantasticos.com/ondas-electromagneticas/>. [Accessed 17 Setembro 2015].
- [36] S. Thakral and P. Manhas, "Fiber Optic Sensors Technology & their applications," *International Journal of Electronics & Communication Technology*, vol. 2, no. 126-128, p. 2, 2011.
- [37] X. W. Ye, Y. Q. Ni and J. H. Yin, "Safety Monitoring of Railway Tunnel Construction Using FBG Sensing Technology," *Advances in Structural Engineering*, vol. 16, no. 8, pp. 1401-1410, 2013.
- [38] S. Minakuchi and N. Takeda, "Recent advancement in optical fiber sensing for aerospace composite structures," *Photonic Sensors*, vol. 3, no. 4, pp. 345-354, 2013.
- [39] S.-G. Kang, D.-H. Kang and C.-G. Kim, "Real-time monitoring of transverse thermal strain of carbon fiber reinforced composites under long-term space environment using fiber optic sensors," *NDT & E International*, vol. 42, no. 5, pp. 361-368, 2009.
- [40] C. A. Ramos, R. de Oliveira and A. T. Marques, "Design of an optical fibre sensor patch for longitudinal strain measurement in structures," *Materials & Design*, vol. 30, no. 7, pp. 2323-2331, 2009.
- [41] J. M. López-Higuera, L. R. Cobo, A. Q. Incera and A. Cobo, "Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, no. 4, pp. 587-608, 2011.
- [42] G. Rajan, *Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications*, CRC Press, 2015.
- [43] B. Lee, "Review of the present status of optical fiber sensors," *Optical Fiber Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 57-79, 2003.
- [44] J. M. López-Higuera, J. Misas, A. Q. Incera and J. E. Cuenca, "Fiber optic civil structure monitoring system," *Optical Engineering*, vol. 44, no. 4, pp. 1-10, 2005.
- [45] D. M. Frangopol and M. Liu, "Maintenance and management of civil infrastructure based on condition, safety, optimization, and life-cycle cost\*," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 29-41, 2007.
- [46] X.-d. Wang and O. S. Wolfbeis, "Fiber-optic chemical sensors and biosensors," *Analytical chemistry*, vol. 85, pp. 487-508, 2012.
- [47] H.-N. Li, D.-S. Li and G.-B. Song, "Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering," *Engineering Structures*, vol. 26, no. 11, pp. 1647-1657, 2004.
- [48] H. Guo, G. Xiao, N. Mrad and J. Yao, "Fiber optic sensors for structural health monitoring of air platforms," *Sensors*, vol. 11, no. 4, pp. 3687-3705, 2011.

- [49] C. K. Y. Leung, K. T. Wan, D. Inaudi, X. Bao, W. Habel, Z. Zhou, J. Ou, M. Ghandehari, H. C. Wu and M. Imai, "Review: optical fiber sensors for civil engineering applications," *Materials and Structures*, vol. 48, pp. 871-906, 2013.
- [50] C. C. Ciang, J.-R. Lee and H.-J. Bang, "Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods," *Measurement Science and Technology*, vol. 19, no. 12, p. 122001, 2008.
- [51] H.-S. Kim, S.-H. Yoo and 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: Engineering*, vol. 44, no. 1, pp. 446-452, 2013.
- [52] C. Li, M. Cao, R. Wang, Z. Wang, Y. Qiao, L. Wan, Q. Tian, H. Liu, D. Zhang, T. Liang and C. Tang, "Fiber-optic composite cure sensor: monitoring the curing process of composite material based on intensity modulation," *Composites Science and Technology*, vol. 63, no. 12, pp. 1749-1758, 2003.
- [53] S. S. Kim, H. Murayama, K. Kageyama, K. Uzawa and M. Kanai, "Study on the curing process for carbon/epoxy composites to reduce thermal residual stress," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 43, no. 8, pp. 1197-1202, 2012.
- [54] S. R. White, N. R. Sottos, P. H. Geubelle, J. S. Moore, M. R. Kessler, S. R. Sriram, E. N. Brown and S. Viswanathan, "Autonomic healing of polymer composites," *Nature*, vol. 409, pp. 794-797, 2001.
- [55] M. R. Kessler, N. R. Sottos and S. R. White, "Self-healing structural composite materials," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 34, no. 8, pp. 743-753, 2003.
- [56] T. S. Coope, D. F. Wass, R. S. Trask and I. P. Bond, "Metal triflates as catalytic curing agents in self-healing fibre reinforced polymer composite materials," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 299, no. 2, pp. 208-218, 2014.
- [57] T. S. Coope, U. F. J. Mayer, D. F. Wass, R. S. Trask and I. P. Bond, "Self-healing of an epoxy resin using scandium(III) triflate as a catalytic curing agent," *Advanced Functional Materials*, vol. 21, no. 24, pp. 4624-4631, 2011.
- [58] M. Nakada and Y. Miyano, "Accelerated testing for long-term fatigue strength of various FRP laminates for marine use," *Accelerated testing for long-term fatigue strength of various FRP laminates for marine use*, vol. 69, no. 6, pp. 805-813, 2009.
- [59] M. Rouse, "TechTarget SearchStorage," Março 2010. [Online]. Available: <http://searchstorage.techtarget.com/definition/charge-coupled-device>. [Accessed 25 Agosto 2015].
- [60] P. Miluski, D. Dorosz, M. Kochanowicz and J. Dorosz, "Luminescent Polymer Optical Fibre Sensor for Temperature Measurement," *Acta Physica Polonica A*, vol. 127, no. 3, pp. 730-733, 2015.
- [61] D. Rithesh Raj, S. Prasanth, T. V. Vineeskumar and C. Sudarsanakumar, "Ammonia sensing properties of tapered plastic optical fiber coated with silver nanoparticles/PVP/PVA hybrid," *Optics Communications*, vol. 340, pp. 86-92, 2015.

- [62] [Online]. Available: <http://image.slidesharecdn.com/compositepolymersbyoan-140828054747-phpapp02/95/industrial-applications-of-composite-polymers-by-oan-4-638.jpg?cb=1409223229>. [Accessed 1 Dezembro 2014].
- [63] [Online]. Available: <http://philschatz.com/physics-book/contents/m42491.html>. [Accessed 22 Março 2015].
- [64] [Online]. Available: [http://code.ua.pt/projects/bookco1011/wiki/67\\_-\\_Fiber\\_Optic\\_Sensor\\_Types](http://code.ua.pt/projects/bookco1011/wiki/67_-_Fiber_Optic_Sensor_Types). [Accessed 24 Março 2015].
- [65] "Hamamatsu," [Online]. Available: <http://www.hamamatsu.com/us/en/product/category/5001/4016/C10083CAH/index.html>. [Accessed 26 Agosto 2015].