



**Monitorização Estrutural com recurso à análise de padrões de
Speckle em Sensores Óticos Distribuídos**

Filipe Miguel Marques dos Reis

Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientadores: Professor Paulo Sérgio de Brito André
Dr. Paulo Fernando da Costa Antunes

Júri

Presidente: Professor José Eduardo Charters Ribeiro da Cunha Sanguino

Orientador: Professor Paulo Sérgio de Brito André

Vogal: Professor Manuel Joaquim Marques

Novembro de 2016

Agradecimentos

É com grande satisfação que termino mais uma etapa da minha vida e queria deixar nestas palavras a minha enorme gratidão a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para que este desfecho fosse possível.

Primariamente gostaria de agradecer à Academia da Força Aérea, instituição onde tive a possibilidade de usufruir de um ensino de excelência e que me ajudou a crescer tanto a nível profissional, como a nível pessoal.

Gostaria de agradecer também ao Instituto Superior Técnico pela sua contribuição no meu percurso académico e ao Instituto de Telecomunicações que me acolheu nestes últimos 6 meses aquando da realização desta dissertação, garantindo o acesso a todas as condições necessárias para cumprir os meus objetivos.

Queria deixar também um agradecimento especial ao Sr. Professor Nuno Maia e Sr. Professor André Carvalho, do Departamento de Engenharia Mecânica, e ao Sr. Major Aurélio Santos, Sr. Capitão Luís Félix e Sr. Capitão Bruno Serrano, da Força Aérea Portuguesa, pelo seu apoio, sabedoria, conselhos e total disponibilidade na realização dos diferentes testes realizados.

Finalmente, gostaria de agradecer à minha família e amigos, e em especial à minha namorada Cátia Barros, que me apoiaram incondicionalmente ao longo destes anos e que estiveram presentes em todos os momentos importantes da minha vida.

A todos, o meu Obrigado.

Resumo

A operação segura de uma aeronave é o principal objetivo de qualquer operador, uma vez que qualquer falha estrutural pode dar origem a desastres aéreos o que salienta a importância da monitorização de qualquer tipo de dano. A monitorização de saúde estrutural pode ser definida como o processo de diagnóstico e prognóstico da habilidade de uma estrutura funcionar corretamente e manter a sua integridade estrutural ao longo da sua vida.

A saúde estrutural pode ser monitorizada através de tecnologias baseadas em redes de sensores utilizando fibras óticas, uma vez que para além de possibilitarem uma monitorização contínua, têm custos reduzidos, não necessitam de grandes manutenções, melhoram o desempenho e segurança da aeronave e estendem o tempo de vida das estruturas garantindo aeronaves mais eficientes e mais atrativas economicamente.

Na presente dissertação propôs-se e demonstrou-se a aplicação de um sensor ótico baseado em fibras óticas poliméricas, que permite a deteção de perturbações em estruturas recorrendo à análise de padrões *speckle* obtidos através da fibra. Desta forma, foram realizados diferentes testes para verificar a capacidade do sensor na identificação de perturbações diretamente na fibra ou numa estrutura metálica, onde foi colocado. De modo a processar os sinais obtidos, calculou-se a correlação entre padrões *speckle* consecutivos e a intensidade média de cada um desses padrões, de onde se concluiu que este sensor é sensível a qualquer perturbação que ocorra na fibra ou em áreas circundantes, sendo possível estabelecer relações entre os valores de correlação/intensidade e as frequências e/ou amplitudes das perturbações.

Palavras-chave:

Monitorização de Saúde Estrutural em Aeronaves, Fibras Óticas Poliméricas, Padrões *Speckle*, Processamento de Imagens

Abstract

A safe operation is the main goal of any aircraft operator, since any structural failure may cause disasters. This fact shows the importance of monitoring any damage. The structural health monitoring can be defined as the process of diagnostic and prognostic of a structure capability to work properly and maintain its structural integrity throughout its life.

The structural health can be monitored by sensor networks technologies using optical fibers. These technologies make possible a continuous monitoring and also have low cost, don't require extensive maintenance, improve the aircraft performance and safety and extend the structures life time, what ensures a more efficient and economically attractive aircraft.

In the present work, the application of an optical sensor based on polymer optical fibers is proposed and demonstrated. This sensor detects any structural disturbance using speckle patterns. Thus, different tests were performed to analyze the sensor capability to identify fiber or structural perturbations. In order to process the obtained signals, the correlation between consecutive speckle patterns and the average intensity of each of these patterns was calculated. So it is possible to conclude that this sensor is sensitive to any disruption that occurs in the fiber or in fiber's surrounding areas. It is also possible to establish relations between the correlation / intensity values and the disturbances frequencies amplitudes.

Keywords:

Structural Health Monitoring in Aircrafts, Polymer Optical Fibers, Speckle Pattern, Images Processing

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO	1
1.2. ESTADO DA TÉCNICA	3
1.2.1. MONITORIZAÇÃO DE SAÚDE ESTRUTURAL	3
1.2.2. A FADIGA NAS AERONAVES	3
1.2.3. DEFINIÇÃO DE SHM	5
1.2.4. TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS	7
1.2.5. MONITORIZAÇÃO DE SAÚDE ESTRUTURAL INTELIGENTE	13
1.3. OBJETIVOS E METODOLOGIA DO TRABALHO	14
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	15
1.5. CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1. SENSORES DE FIBRAS ÓTICAS	17
2.1.1. FIBRAS ÓTICAS POLIMÉRICAS	18
2.1.1.1. PROPAGAÇÃO	19
2.2. PADRÕES <i>SPECKLE</i>	22
2.2.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA DO <i>SPECKLE</i>	24
2.2.2. QUANTIDADE DE PONTOS NUM PADRÃO <i>SPECKLE</i>	25
2.2.3. TAMANHO DO <i>SPECKLE</i>	26
2.2.4. MÉTODOS DE MEDIÇÃO <i>SPECKLE</i>	27
2.2.5. PADRÃO <i>SPECKLE</i> NUMA POF	27
2.3. ANÁLISE DA POF SOB CURVATURA	29
2.3.1. EFEITOS NA ABERTURA NUMÉRICA	29
2.3.2. EFEITOS NA QUANTIDADE DE PONTOS DO PADRÃO <i>SPECKLE</i>	30
2.3.3. EFEITOS NA DISTRIBUIÇÃO DE INTENSIDADE DE LUZ INTERIOR	30
3. IMPLEMENTAÇÃO DO SENSOR ÓTICO	31
3.1. DESCRIÇÃO	31
3.2. PROCESSAMENTO DE IMAGEM	37
3.3. DADOS PRELIMINARES	40
3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
4. TESTES COM VIBRAÇÃO	51
4.1. DESCRIÇÃO	51
4.2. RESULTADOS	56
4.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
5. TESTES DE TRAÇÃO	69
5.1. DESCRIÇÃO	69
5.2. RESULTADOS	70
5.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
6. CONCLUSÕES	77
6.1. CONCLUSÕES GERAIS	77
6.2. TRABALHO FUTURO	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

Índice de Figuras

Figura 1 – Dados estatísticos sobre o dano em estruturas metálicas e compósitos obtidos de um estudo da MONITOR [adaptado de [4]]	4
Figura 2 – Tipos de danos estruturais depois do MAFT para a aeronave “Tornado”[adaptado de [4]].....	5
Figura 3 - Endoscópio [11].....	8
Figura 4 – 1) secção do material com uma fenda na superfície que não é visível a olho nu, 2) aplicação do líquido penetrante na superfície, 3) o excesso é removido, 4) aplicação do revelador que torna a fenda visível [adaptado de [6]]	9
Figura 5 – Inspeção com correntes de Foucault [adaptado de [6]]	10
Figura 6 – Inspeção radiográfica [adaptado de [6]]	12
Figura 7 – Os sistemas SHM estão interligados de forma semelhante ao sistema nervoso humano. Os sensores estão concentrados em zonas onde o <i>stress</i> mecânico das estruturas é maior [6].....	14
Figura 8 - Representação de uma fibra ótica [adaptado de [12]]	20
Figura 9 – Ilustração da abertura numérica [adaptado de [14]]	21
Figura 10 - Padrão <i>Speckle</i>	22
Figura 11 - Formação de <i>speckles</i> objetivos em espaço livre [adaptado de [16]].....	23
Figura 12 - Formação de <i>speckles</i> subjetivos [adaptado de [16]]	23
Figura 13 - Distribuição da intensidade em cada ponto do plano de observação causado pela interferência das diferentes ondas dispersas [adaptado de [15]]	26
Figura 14 - Redução da abertura numérica de uma fibra dobrada [adaptado de [14]].....	29
Figura 15 - Distribuição de energia na extremidade de uma fibra dobrada [adaptado de [19]]	30
Figura 16 - Configuração sensor ótico	31
Figura 17 - Configuração do sensor ótico em laboratório.....	32
Figura 18 - Estruturas para acoplar as extremidades da POF à a) <i>Raspicam</i> e ao b) Laser	32
Figura 19 - <i>Raspberry Pi</i> 1 Modelo B [adaptado de [21]]	33
Figura 20 – <i>Raspberry Pi Camera</i> [22].....	34
Figura 21 - Laser semiconductor LDM650/3LJ [24].....	34
Figura 22 - Padrão <i>Speckle</i> a) Nítido b) Saturado c) Inexistente	36
Figura 23 - Fluxograma do algoritmo a) Correlação de <i>frames</i> consecutivos b) Correlação <i>frame</i> atual com inicial c) Intensidade Média de <i>frame</i>	38
Figura 24 - Resposta em magnitude do filtro FIR passa-baixo.....	39
Figura 25 - Região de interesse de um <i>frame</i>	39
Figura 26 - Perturbação de 6,25 cm a) positiva e b) negativa.....	40
Figura 27 - Valor da correlação de <i>frames</i> consecutivos e sua derivada para uma perturbação positiva de 6,25 cm a) sem filtragem e b) com filtragem, em função do tempo	41
Figura 28 - Valor da correlação de <i>frames</i> consecutivos e sua derivada para uma perturbação negativa de 3,75 cm, em função do tempo	42
Figura 29 - Valor da intensidade média de cada <i>frame</i> e sua derivada para uma perturbação negativa de 3,75 cm, em função do tempo	43

Figura 30 - Valor da correlação do <i>frame</i> atual com o inicial e sua derivada para uma perturbação negativa de 3,75 cm, em função do tempo	44
Figura 31 - Valor da correlação de <i>frames</i> consecutivos e sua derivada para uma perturbação negativa de 6,25 cm, em função do tempo	44
Figura 32 - Valor da intensidade média de cada <i>frame</i> e sua derivada para uma perturbação negativa de 6,25 cm, em função do tempo	45
Figura 33 - Quociente do valor médio da correlação de <i>frames</i> consecutivos no pico e antes da perturbação, em função da amplitude (as linhas são guias visuais)	46
Figura 34 - Quociente do valor médio da intensidade de <i>frames</i> no pico e antes da perturbação, em função da amplitude (as linhas são guias visuais)	46
Figura 35 - Valor da a) correlação de <i>frames</i> consecutivos e da b) intensidade média de cada <i>frame</i> e suas derivadas para uma perturbação com batimentos, em função do tempo.....	48
Figura 36 – Placa de teste com segmento de POF	51
Figura 37 – Placa de teste suspensa	52
Figura 38 - Excitador de vibrações utilizado nos testes	53
Figura 39 – Deformação da placa de teste em função do modo de vibração	54
Figura 40 - Resposta da vibração em amplitude e fase para a placa de alumínio.....	55
Figura 41 - Valor da correlação de <i>frames</i> consecutivos e sua derivada para uma perturbação de a) 16 Hz e b) 28 Hz, em função do tempo	57
Figura 42 - Valor da intensidade média de cada <i>frame</i> e sua derivada para uma perturbação de a) 16 Hz e b) 28 Hz, em função do tempo.....	58
Figura 43 – Representação de Δc e Δi	59
Figura 44 – Quociente do valor médio da correlação de <i>frames</i> consecutivos após e antes da perturbação, em função da frequência (as linhas são guias visuais)	59
Figura 45 – Quociente do valor médio da intensidade de cada um dos <i>frames</i> após e antes da perturbação, em função da frequência (as linhas são guias visuais)	60
Figura 46 – Amplitude de oscilação.....	61
Figura 47 – Amplitude de oscilação após a perturbação, utilizando a correlação de <i>frames</i> consecutivos, em função da frequência (as linhas são guias visuais)	61
Figura 48 - Amplitude de oscilação após a perturbação, utilizando a intensidade média, em função da frequência (as linhas são guias visuais).....	62
Figura 49 - Valor da correlação de <i>frames</i> consecutivos e sua derivada, produzido por um sinal sinusoidal de 16 Hz e a) 2 Vrms e b) 4 Vrms, em função do tempo.....	63
Figura 50 - Valor da intensidade média de cada <i>frame</i> e sua derivada, produzido por um sinal sinusoidal de 16 Hz e a) 2 Vrms e b) 4 Vrms, em função do tempo.....	64
Figura 51 – Quociente do valor médio da correlação de <i>frames</i> consecutivos antes e após a perturbação, em função da amplitude (as linhas são guias visuais).....	65
Figura 52 – Quociente do valor médio da intensidade de cada um dos <i>frames</i> antes e após a perturbação, em função da amplitude (as linhas são guias visuais)	65
Figura 53 - Valor da a) correlação de <i>frames</i> consecutivos e da b) intensidade média de cada <i>frame</i> e suas derivadas para uma perturbação de 16 Hz com paragem, em função do tempo .	67
Figura 54 - MTS 810 com placa de teste	70
Figura 55 - Esforço de a) Tração e b) Compressão [adaptado de [30]]	71
Figura 56 – Evolução temporal da força aplicada nos ensaios de tração realizados.....	71

Figura 57 – Evolução temporal da força de comando (a azul) e força efetuada pelo MTS 810 (a vermelho) no ensaio um com $f=6$ Hz	72
Figura 58 - Valor da a) correlação de <i>frames</i> consecutivos e da b) intensidade média de cada um dos <i>frames</i> durante o ensaio um com frequência de 6 Hz, em função do tempo	74
Figura 59 - Valor da a) correlação de <i>frames</i> consecutivos e da b) intensidade média de cada um dos <i>frames</i> durante o ensaio três com frequência de 1 Hz, em função do tempo	75

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Comparação entre POF e GOF [adaptado de [13]]	19
--	----

Lista de abreviaturas

AFA	Academia da Força Aérea
AWB	<i>Automatic White Balance</i>
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CW	<i>Continuous Wave</i>
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
FAP	Força Aérea Portuguesa
GOF	<i>Glass Optical Fiber</i>
ISO	<i>International Organization of Standardization</i>
IST	Instituto Superior Técnico
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MAFT	<i>Major Airframe Fatigue Test</i>
MM	<i>Multimode</i>
MTS	<i>Material Test System</i>
NDT	<i>Non-Destructive Testing</i>
POF	<i>Polymer Optical Fiber</i>
RAF	<i>Royal Air Force</i>
RGB	<i>Red-Green-Blue</i>
ROI	<i>Region of Interest</i>

RPI	<i>Raspberry Pi</i>
SD	<i>Secure Digital</i>
SDRAM	<i>Synchronous dynamic random access memory</i>
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i>
SM	<i>Single Mode</i>
SSD	<i>Solid-state drive</i>
USAF	<i>United States Air Force</i>

1. Introdução

1.1. Motivação

A monitorização da saúde estrutural, ou SHM do inglês *Structural Health Monitoring*, de infraestruturas (aeronaves, edifícios, condutas, pontes, reatores nucleares, barragens, etc.) é um fator essencial para garantir a segurança na sua operação. Esta segurança significa proteção contra danos causados por má utilização dos instrumentos, excesso de carga, eventos inesperados fora do controlo humano, defeitos materiais, desenhos impróprios, alteração das propriedades dos materiais devido a fadiga ou corrosão ou até falhas humanas [1].

Relativamente a estruturas aeronáuticas, sabe-se que a degradação estrutural causada pelo envelhecimento dos materiais, pelo ambiente (fadiga, corrosão, etc.) ou até por eventos externos imprevisíveis (impactos, *birdstrikes*) é inevitável, sendo que se deve ter especial atenção em aeronaves que operam perto ou para além do seu fim do ciclo de vida originalmente definido, visto que nesta fase sofrem um aumento significativo de defeitos estruturais [2], [3]. Por exemplo, em 1993 aproximadamente 51% das aeronaves da Força Aérea dos Estados Unidos da América (USAF) tinham mais de 15 anos e 44% tinham mais de 20 anos. Em 2000 mais de 75% das aeronaves da USAF tinham mais de 25 anos [4].

Desta forma para garantir uma operação segura é essencial realizar inspeções periódicas e, se necessário, substituir componentes danificados por falhas imprevisíveis (que não podem ser totalmente eliminadas). No caso de um sistema de SHM, as inspeções realizadas utilizam técnicas não destrutivas (inspeção visual, radiografia, ultrassons, uso de penetrantes, etc.) para fornecer informação sobre o estado da estrutura, de modo que possam ser realizadas avaliações sobre a sua integridade e se necessário realizar reparações atempadamente [3]. Esta necessidade de inspeções contribui para grandes custos de manutenção e um aumento significativo das despesas de operação e do tempo de inatividade da aeronave (*down-time*) [1], [2].

É importante referir que é investido mais de 70 milhões de horas por ano que equivalem a 10.5 mil milhões US\$ em manutenção de aeronaves civis. Por exemplo, uma Força Aérea ou Marinha necessita de cerca de 6000 horas/ano de manutenção numa única aeronave sendo que

cerca de 50% desse tempo corresponde apenas a inspeções. Assim o custo geral destas inspeções num único ramo de Forças Armadas (como a USAF ou a Royal Air Force) chega facilmente a vários milhares de milhões de dólares. Para além disto, à medida que uma aeronave vai envelhecendo, é necessário cada vez mais mão-de-obra, como por exemplo no caso da aeronave EF-111 da USAF onde se verificou um aumento do número de horas inspeções e reparações de 2200 em 1985 para 8000 em 1996 [4].

A tendência será acompanhar ou substituir as inspeções por uma monitorização contínua de saúde estrutural recorrendo a sistemas *on-board* (implementados no interior da aeronave) que para além de possibilitarem uma maior segurança e confiança nos sistemas, também permitem diminuir os ciclos das inspeções periódicas, eliminar os custos das manutenções imprevistas em novas aeronaves e garantir uma maior longevidade dos componentes [1], [2].

Um estudo recente sobre os requisitos de uma inspeção de um caça (tendo em conta as estruturas metálicas e compósitos) revelam que se poderia poupar mais de 40% do tempo de inspeção se fosse utilizado sistemas de monitorização *on-board* inteligentes (conjunto de sensores, atuadores e processadores de sinal que são capazes responder e adaptar a mudanças no seu ambiente) [4].

Para além disto, salienta-se que alguns investigadores desta aérea assumem que se pode poupar mais de 20% do custo de uma manutenção/inspeção de uma aeronave de transporte (civil ou militar) quando se utiliza sistemas integrados de monitorização de dano [4].

Como os danos causados por fadiga são muito característicos na operação de aeronaves [5], nesta dissertação irá ser estudada a utilização de um sistema de SHM integrado, recorrendo a sensores óticos distribuídos com o intuito de identificar qualquer tipo de perturbação que ocorra numa estrutura aeronáutica de modo a controlar a sua saúde estrutural e evitar eventuais danos.

1.2.Estado da Técnica

1.2.1. Monitorização de Saúde Estrutural

É muito difícil definir quando se começou a monitorizar a saúde de estruturas aeronáuticas, no entanto pode-se dizer que os grandes avanços nesta área foram causados por desastres aéreos. Infelizmente, estas evoluções tecnológicas na área da SHM estão relacionadas com o intuito de evitar no futuro os erros cometidos no passado.

Desta forma, pode-se afirmar que o mundo aeronáutico apercebeu-se que a monitorização de saúde estrutural era realmente necessária após o acidente do Voo 781 da *British Overseas Airways Corporation* com a aeronave *De Havilland Comet 1* em 1954 que sofreu uma descompressão explosiva a altas altitudes e caiu no mar Mediterrâneo matando todos os seus tripulantes. Este acidente foi causado por uma falha originada por fadiga [6], [7].

Outro acidente que também desencadeou novos avanços na monitorização de dano foi em Abril de 1988 com o voo 243 da *Aloha Airlines* que também sofreu uma descompressão explosiva causada pelos mesmos motivos. Aprendeu-se com este acidente que com o aumento da idade das estruturas da aeronave, esta terá maior probabilidade de apresentar fissuras (podendo surgir em múltiplos locais) [6], [7].

Como consequência, foi definido um regulamento pelas autoridades competentes que aeronaves envelhecidas (geralmente com mais de 15 anos de serviço) são obrigadas a aumentar as inspeções realizadas e são nestas inspeções que a SHM é realmente importante [6], [7].

1.2.2. A Fadiga nas Aeronaves

A operação segura de uma aeronave é o principal objetivo de qualquer operador, uma vez que qualquer falha estrutural pode dar origem a desastres aéreos o que salienta a importância da monitorização de qualquer tipo de dano. Assim, embora seja possível identificar facilmente impactos e cargas severas e imprevisíveis que causam deformações plásticas nos materiais, é mais difícil identificar falhas associadas à fadiga que é um processo mais “silencioso”. Por exemplo, um típico Boeing 747 é inspecionado em cada 12 ou 17 meses especificamente por

sinais de fadiga pois uma das tarefas mais difíceis na análise de fadiga é a identificação da primeira fissura [4].

Pode-se definir fadiga como o enfraquecimento de um material causado por cargas repetitivas. Desta forma, o dano estrutural é progressivo, localizado e ocorre quando o material é sujeito a essas cargas cíclicas (ciclos de carga e descarga). Consequentemente quando essas cargas excedem um determinado limite, começam a formar-se fissuras microscópicas nos locais que acumularam tanto *stress* mecânico. Eventualmente, a fissura irá atingir um tamanho crítico, irá propagar repentinamente e a estrutura quebrará. Salienta-se que os valores máximos de *stress* mecânico que causam tais danos podem ser muito menores que a resistência do material [6].

Na Figura 1 pode-se observar um sumário de um estudo relativamente as formas de dano mais comuns nas estruturas aeronáuticas, realizado através de um projeto de investigação designado MONITOR, fundado sobre a alçada do Programa IV da União Europeia [4].

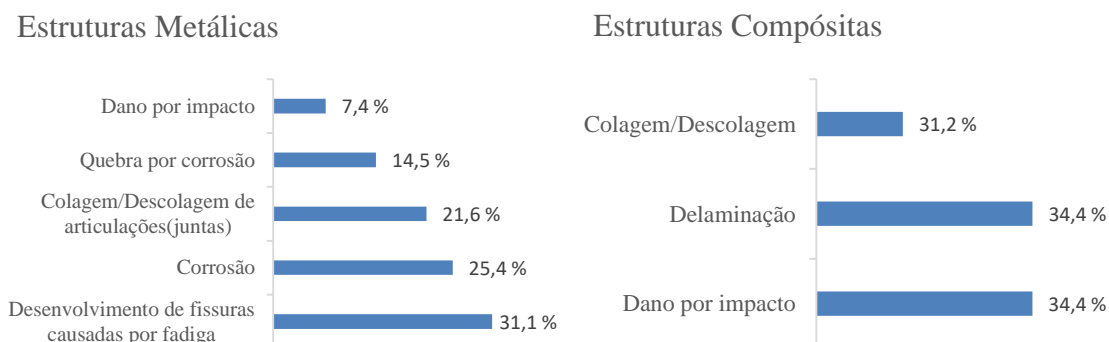


Figura 1 – Dados estatísticos sobre o dano em estruturas metálicas e compósitos obtidos de um estudo da MONITOR [adaptado de [4]]

Como podemos verificar, a fadiga de um material é um aspeto muito importante no que concerne a danos dos materiais metálicos, sendo as fissuras e a corrosão os mecanismos mais comuns de uma falha por fadiga estrutural no ramo da engenharia aeroespacial [4].

A forma da estrutura afeta significativamente a propagação de fadiga. Por exemplo, orifícios quadrados e cantos afiados contribuem para uma elevada concentração de *stress* mecânico onde fissuras causadas por fadiga podem iniciar. Por outro lado, orifícios redondos e transições suaves são mais resistentes à fadiga [6].

Para além disto, a fadiga também afeta de forma diferente materiais distintos. Por exemplo, todos os componentes metálicos exibem diferentes fases de dano conhecidas quando sujeitos a fadiga. No entanto, os materiais compósitos apresentam uma grande resistência à fadiga e corrosão, como se observa na Figura 1 [4], [8].

Uma fonte de informação muito importante na engenharia aeroespacial é o teste *Major Airframe Fatigue Test (MAFT)*, realizado sempre que um novo tipo de aeronave é criado. Na Figura 2 pode-se observar um exemplo de dados estáticos de danos obtidos com o MAFT num caça “Tornado” durante a fase de projeto [4].

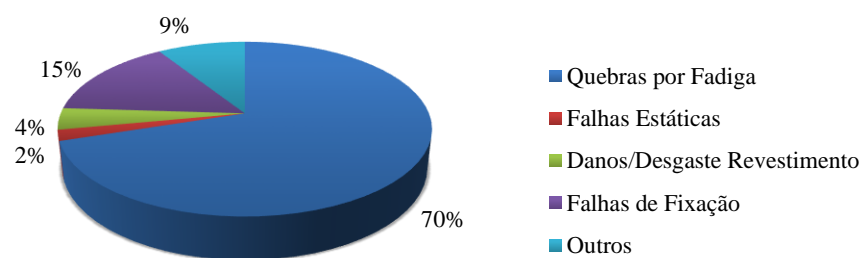


Figura 2 – Tipos de danos estruturais depois do MAFT para a aeronave “Tornado”[adaptado de [4]]

Mais uma vez, pode-se observar na figura anterior que o dano estrutural que ocorre na maioria dos testes é causado pela fadiga. Assim, salienta-se que devido à sua evolução de natureza progressiva da torna-se bastante importante realizar uma monitorização contínua de modo a prever, identificar e controlar este processo [9].

1.2.3. Definição de SHM

A saúde estrutural está diretamente relacionada com o desempenho dessa estrutura, sendo um dos parâmetros mais importantes para garantir uma operação segura. Assim, uma pequena alteração na saúde estrutural pode afetar o seu desempenho de tal modo que seja necessário realizar ações de manutenção [4].

Embora estas ações resolvam o problema, vão implicar custos: custos diretos causados pela reparação propriamente dita (peças, mão-de-obra, etc.) e custos indiretos causados pelo tempo de inatividade da aeronave durante a sua reparação (no caso da Força Aérea Portuguesa - FAP é essencial que as aeronaves estejam paradas o mínimo tempo possível uma vez que impossibilita a continuação da sua missão) [4].

De forma a reduzir o tempo de inatividade, os custos das reparações e manutenções e evitar reparações exaustivas (com custos mais altos), os danos devem ser detetados o mais cedo possível. Isto é possível através de uma monitorização de saúde estrutural que permite adaptar o uso operacional de uma aeronave com o objetivo de limitar ou parar o crescimento do dano. Embora existam muitas definições que podem ser propostas para saúde e monitorização de estruturas, intuitivamente pode-se definir saúde de uma estrutura como a habilidade de funcionar corretamente e manter a sua integridade estrutural ao longo da sua vida e monitorização como o processo de diagnóstico e prognóstico [4].

Salienta-se que aeronaves com diferentes tipos de missão apresentarão diferenças na deterioração dos seus componentes bem como no desenvolvimento de dano das suas estruturas. Para além disto, o tipo de estrutura/componente, tendo em conta se é metálico ou compósito, também vai apresentar diferenças na forma como a sua saúde estrutural evolui ao longo do tempo. Isto acontece porque os componentes metálicos deterioram-se gradualmente num processo previsto com alta probabilidade de ocorrência (através de fadiga, corrosão, etc.), enquanto que o desgaste num componente compósito causado por um excesso de carga é muito menos visível, embora possam sofrer traumas discretos causados por danos aleatórios e não previsíveis (um componente compósito não sofre de fadiga) [4].

A saúde estrutural pode ser avaliada de forma direta ou indireta. Na forma direta são realizadas inspeções vocacionadas para um determinado tipo de dano (ex.: fissuras, corrosão, etc.). Na forma indireta, o desempenho e/ou o comportamento da estrutura são medidos e posteriormente comparados com as características de uma estrutura que não está danificada [4].

Atualmente as técnicas de monitorização das aeronaves são baseadas em predições pessimistas e inspeções periódicas, recorrendo a técnicas não-destrutivas tradicionais, como inspeção visual, radiografia, ultrassons, entre outras. No entanto recentemente surgiram tecnologias diferentes baseadas em redes de sensores que permitem a deteção de dano em materiais metálicos e compósitos, utilizando, por exemplo, fibras óticas. Estas tecnologias têm um grande potencial uma vez que para além de possibilitarem uma monitorização contínua, têm custos reduzidos, não são necessárias grandes manutenções, melhoram o desempenho e segurança da aeronave e estendem o tempo de vida das estruturas garantindo que as aeronaves sejam mais eficientes e mais atrativas economicamente [4].

1.2.4. Técnicas Não Destrutivas

As inspeções convencionais de detecção de dano ou fadiga de uma aeronave baseiam-se em diferentes testes não-destrutivos (NDT). Estes NDT são um conjunto de métodos utilizados para encontrar defeitos em materiais de forma que esses materiais continuem intactos após o teste, e no caso de não ser detetado qualquer dano eles possam ser novamente montados na aeronave para uma operação normal [4], [6].

Os métodos NDT estão focados na detecção de microfissuras à superfície ou abaixo da superfície da estrutura e na detecção de defeitos em locais inacessíveis onde uma inspeção visual não pode ser realizada. Estes métodos podem ser aplicados na própria aeronave ou em elementos individuais da aeronave recorrendo a uma inspeção global ou local. As inspeções globais são inspeções de áreas relativamente grandes com o objetivo de localizar locais suspeitos de possível dano para que possam ser posteriormente analisadas com mais detalhe através de técnicas mais especializadas e localizadas (inspeções locais) que são aplicadas com intuito de descobrir ou controlar a evolução de um determinado tipo de dano [4], [6].

Os métodos NDT mais usados são os seguintes.

A **inspeção visual** é a forma mais natural de avaliar a integridade estrutural dos componentes de uma aeronave e é a técnica mais comum quando se tenta detetar dano na superfície ou perto da superfície de uma aeronave [4].

Esta inspeção é geralmente realizada a olho nu, sendo necessário que a superfície esteja limpa e suficientemente iluminada. No entanto, podem-se utilizar aparelhos óticos, líquidos penetrantes ou partículas magnéticas de forma a aumentar a sensibilidade desta inspeção. A utilização de aparelhos óticos pode ser considerada uma extensão do olho humano, sendo bastante utilizados em áreas de pouco acesso ou pouco iluminadas. Na Figura 3 pode-se observar um desses aparelhos óticos designado como endoscópio [4], [6], [10].



Figura 3 - Endoscópio [11]

Para danos que ocorrem abaixo da superfície, a inspeção visual a olho nu está limitada mas é possível obter informação detalhada relativamente a microfissuras ou à sua inicialização com recurso a um microscópio. No entanto, como esta análise apenas pode ser realizada em laboratório, os componentes têm de ser removidos da aeronave o que irá contribuir para que aeronave esteja inativa [4].

Salienta-se que a eficácia deste processo depende bastante da habilidade e experiência dos inspetores que têm de ser capazes de identificar facilmente os defeitos numa determinada estrutura e saber como analisá-los [6].

Este método tem a vantagem de não necessitar de equipamento sofisticado e de ser relativamente barato, no entanto consome muito tempo e tem uma precisão limitada [6].

A inspeção com **partículas magnéticas** é um método usado para detetar discontinuidades na superfície ou abaixo desta, em materiais ferromagnéticos. Neste teste induz-se um campo magnético na estrutura e aplica-se um pó ou uma suspensão líquida de óxido de ferro. Se existir alguma fissura na superfície, a resistência do campo magnético vai aumentar no local da mesma [6].

Este método tem uma serie de vantagens como a simplicidade de princípios de funcionamento, o baixo custo dos equipamentos (se não forem automáticos), a sua boa sensibilidade de deteção de defeitos (especialmente fissuras), a capacidade de se aplicar em estruturas com formas complexas e com diferentes espessuras (aconselhado com utilização simultânea de ultrassons ou radiografia) e é necessário pouca especialização para a interpretação dos resultados obtidos [6].

No entanto, este método também tem desvantagens, uma vez que existe grande dificuldade em detetar defeitos profundos, a interpretação dos resultados depende muito do estado da superfície da estrutura, não é possível identificar a geometria das fissuras e este método apenas é fidedigno para defeitos a poucos milímetros de profundidade, ou que estejam em contacto com a superfície [6].

O método que utiliza **líquidos penetrantes** é usado para revelar discontinuidades na superfície de materiais não porosos, dependendo da habilidade do líquido penetrar-se nessas discontinuidades. Este método é utilizado para detetar pequenas fendas na superfície que podem ser dificilmente identificadas com uma inspeção visual normal. A Figura 4 mostra como o líquido penetrante é utilizado para revelar as deficiências do material [6].

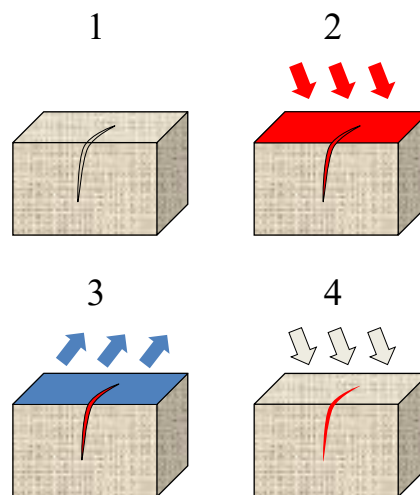


Figura 4 – 1) secção do material com uma fenda na superfície que não é visível a olho nu, 2) aplicação do líquido penetrante na superfície, 3) o excesso é removido, 4) aplicação do revelador que torna a fenda visível [adaptado de [6]]

Este método tem vantagens de ser barato, utilizar equipamentos portáteis, ser muito sensível, dar resultados instantâneos e não ser necessário grandes capacidades/conhecimentos para a executá-lo e interpretar os seus resultados. Por outro lado, tem as desvantagens de necessitar elevada pureza (as superfícies têm estar muito limpas), só pode detetar defeitos que estejam em contacto com a superfície e os resultados dos testes não ficam gravados permanentemente [6].

O método de **eddy current** ou **corrente de Foucault** é um dos métodos eletromagnéticos mais utilizados para inspecionar fissuras, corrosão e outros defeitos estruturais, visto que

permitem identificar fissuras através da condutividade elétrica dos materiais, ou seja, através da monitorização de variações eletromagnéticas no campo induzido na estrutura [4], [6], [10].

Salienta-se que apenas é possível detetar discontinuidades em componentes que são eletricamente condutores o que significa que é aconselhável usar esta técnica em componentes metálicos. As correntes de Foucault são correntes circulares que devido à variação de um fluxo magnético são induzidas no material condutor e têm a particularidade de apresentarem uma variação no campo magnético quando encontram um obstáculo, como uma fissura. Esta variação no campo permite que o inspetor identifique a fissura na superfície. Na Figura 5 observa-se o funcionamento deste método [6].

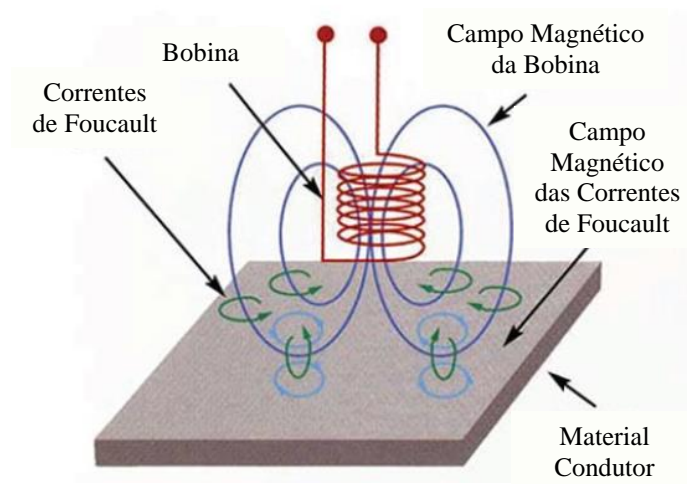


Figura 5 – Inspeção com correntes de Foucault [adaptado de [6]]

Como já foi referido este método é bastante utilizado, uma vez que é bastante simples, rápido de implementar e não necessita de equipamento dispendioso. Para além disto, é um processo que não exige contacto com a estrutura, permite a deteção de fissuras debaixo da camada de revestimento (ex.: tinta) evitando a sua remoção o que possibilita uma poupança de tempo e custo, permite também medir a espessura desse revestimento, identificar o tamanho e/ou profundidade da fissura e diferenças metalúrgicas. No entanto, tem a desvantagem de necessitar uma grande quantidade de energia, a informação que produz é muito difícil de interpretar o que torna a deteção de dano mais complicada, necessita de calibração dos equipamentos e tem pouca penetração (máximo 6mm) [4], [6].

A inspeção através de **ultrassons** é utilizada na maioria dos metais, plásticos e cerâmicas e permite identificar a existência de fissuras, as suas dimensões geométricas e permite a

caracterização das propriedades dos materiais através da utilização de ondas sonoras de alta frequência (tipicamente entre 1 e 50 MHz). Esta inspeção é muito sensível a pequenos danos e permite detetar fissuras a grandes profundidades [6], [10].

A deteção de descontinuidades na estrutura é possível através da análise dos fenómenos físicos que ocorrem durante a propagação das ondas ultrassónicas nas estruturas (ex.: reflexão, dispersão, difração, geração de harmónicas) [4].

A atenuação no ar das ondas ultrassónicas é um problema significativo, sendo que dificuldades no acoplamento e alguns requisitos no varrimento são o maior problema deste método, o que exige um operador experiente e com grandes conhecimentos relativos ao procedimento. O tamanho e o custo do equipamento ultrassónico é também um fator limitativo. Para além disto, para se realizar um teste mais completo deve-se fazer um *scan* em duas dimensões que é um procedimento demorado e que implica a desmontagem de alguns componentes, o que causa uma interrupção da operação da aeronave. No entanto, esta inspeção tem as vantagens de apresentar grandes sensibilidades na deteção de defeitos (também em defeitos profundos), de poder analisar estruturas com áreas e espessuras muito grandes e os equipamentos utilizados são fáceis de transportar e têm pouco risco de falha. Este tipo de inspeção pode também ser utilizado como um sistema de monitorização *on-board*, garantindo uma monitorização constante [4], [6], [10].

Para se obter melhores resultados é usual imergir-se os componentes em água, no entanto é necessário que essa estrutura seja retirada da aeronave. Por outro lado, pode-se utilizar um laser que gera ultrassons de modo a evitar esta técnica de imersão. As técnicas laser são muito sensíveis e permitem testar uma grande variedade de estruturas com curvaturas complexas, mas os sinais gerados por laser têm amplitudes baixas [10].

Relativamente à técnica que utiliza **emissões acústicas**, é importante salientar que todos os materiais sólidos têm um certo nível de elasticidade e plasticidade, que quando é excedido por forças externas resultam na quebra do material. Assim, as emissões acústicas são originadas quando se liberta rapidamente a energia elástica de um material. Esta energia pode ser libertada, por exemplo, devido a deformações microscópicas, fricção, propagação de uma fissura, entre outras [4].

A informação obtida pelos sensores acústicos é muito importante na detecção de danos (ex.: descontinuidades, falhas por fadiga, *stress* mecânico causado pela corrosão) mas é difícil de interpretar, o que requer a utilização de pessoal especializado, e não funciona corretamente se durante a inspeção a estrutura não for alvo de *stress* mecânico ou se existir poluição sonora no meio envolvente. Além disso, não é sensível a pequenos danos. Por outro lado, tem a vantagem de ser uma técnica bem estabelecida e compreendida pela comunidade científica, não é sensível à geometria, pode-se inspecionar grandes áreas e tal como os ultrassons pode ser utilizado como um sistema de monitorização *on-board* [4], [10].

As técnicas de **radiografia** utilizam várias formas de raios gama e raios-X para fazer um varrimento ao material. Assim, tendo em conta que a energia destes raios é absorvida pelo material, é possível criar um filme com os diferentes níveis de absorção ao longo da estrutura. Estes testes radiográficos mostram detalhes estruturais internos e externos de toda a área do material. Na Figura 6 pode-se observar o princípio de funcionamento desta técnica de radiografia [4], [6].

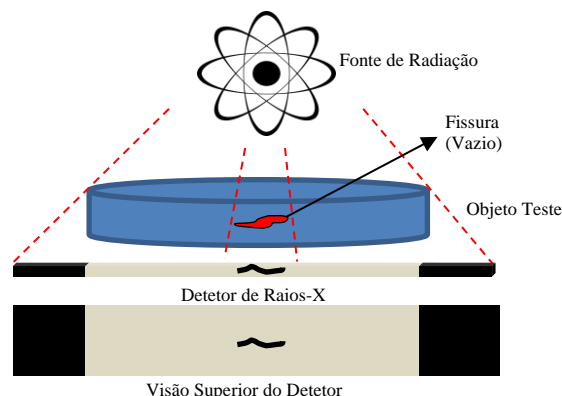


Figura 6 – Inspeção radiográfica [adaptado de [6]]

Este tipo de inspeção é limitada em compósitos de fibra de carbono/epóxi uma vez que são pouco absorventes destes raios. Alternativamente, existem técnicas, como o uso de líquidos penetrantes, que permitem aumentar a sensibilidade deste método nestes materiais [10].

Este método tem as vantagens de realizar inspeções rápidas com uma boa penetração, garantir uma boa visibilidade dos defeitos superficiais internos da estrutura e a facilidade de guardá-los num documento permanente (filme). Para além disto existe uma vantajosa separação entre a gravação e a interpretação dos resultados o que significa que não é necessário pessoal especializado durante a inspeção, visto que a interpretação dos resultados pode ser efetuada

mais tarde. No entanto, tem desvantagens de ter muita dificuldade em detetar pequenos defeitos transversais à direção de radiação, de não ser possível realizar inspeções a grandes estruturas, de ser necessário retirar todo o combustível do depósito da aeronave, de necessitar equipamentos muito dispendiosos e constantemente atualizados e de todo o *staff* (à exceção do operador de equipamento) dever estar fora de área considerada perigosa [4], [6].

A **termografia** utiliza a condutividade e emissividade térmica dos defeitos dos materiais para os identificar, uma vez que as estruturas emitem comprimentos de onda correspondentes à temperatura a que se encontram, ou seja, num material perfeitamente homogéneo o calor propaga-se uniformemente, enquanto que numa estrutura com defeitos, estes criam uma grande impedância térmica à passagem do calor. Assim, a radiação emitida pode ser transformada em imagens térmicas o que permitem a identificação da fissura [4], [10].

Salienta-se que a sensibilidade deste método é reduzida para defeitos pequenos e/ou muito profundos e que devem ser tomados cuidados para evitar que o material sofra danos térmicos. No entanto, permite monitorizações rápidas a todo o tipo de estruturas [4], [10].

A **Shearografia** é um método ótico que utiliza a interferência entre padrões *speckle* (*speckle-shearing interferometry*) para detetar pequenas deformações na superfície da estrutura devido a fissuras ligeiramente abaixo da superfície da mesma. As imagens shearográficas (conhecidas por padrão *speckle*) são criadas a partir da diferença entre superfícies com *stress* e sem *stress*. Esta inspeção é realizada sem haver contacto com a superfície [4], [10].

Este método tem a vantagem de inspecionar rapidamente superfícies relativamente grandes e as suas maiores desvantagens estão relacionadas com seu custo elevado e a sensibilidade de deteção de dano, para além do facto de ser uma técnica pouco desenvolvida [4].

1.2.5. Monitorização de Saúde Estrutural Inteligente

Desenvolvimentos recentes em tecnologias de sensores, processamento de sinal e eletrónica mostraram um grande potencial em novas técnicas de monitorização que podem ser usadas para detetar danos em aeronaves. Um dos elementos chave será a integração de sistemas de SHM em estruturas que podem ser denominadas de inteligentes que são compostas por redes de sensores integrados, atuadores e processadores de sinal. Desta forma, estas estruturas são capazes de responder e de se adaptar a mudanças do ambiente onde estão colocadas [4].

A SHM inteligente tem como objetivo atingir maiores sensibilidades relativamente a estragos/danos e aumentar a fiabilidade do desempenho dessas estruturas. Para além disto, a sua utilização tem a grande vantagem de ser possível de monitorizar localizações críticas onde a inspeção convencional se torna complicada devido a pouco acesso [4]. Na Figura 7 pode-se observar que estes sistemas de SHM se interligam dentro de uma aeronave de forma similar com o sistema nervoso humano [6].



Figura 7 – Os sistemas SHM estão interligados de forma semelhante ao sistema nervoso humano. Os sensores estão concentrados em zonas onde o *stress* mecânico das estruturas é maior [6]

No entanto, é importante referir que estes sistemas de monitorização automática baseados em tecnologias inteligentes não conseguem resolver todos os problemas exigidos pela comunidade aeronáutica [4].

1.3. Objetivos e Metodologia do Trabalho

Esta dissertação tem como objetivo principal desenvolver, implementar e testar um protótipo baseado num sensor ótico, construído em fibras óticas poliméricas, recorrendo aos padrões de *speckle* emitidos por essas fibras. Este protótipo tem o propósito de ser implementado como um sistema de monitorização de saúde estrutural inteligente de aeronaves devendo ser avaliado a fiabilidade da sua aplicação.

O objetivo secundário será o estudo de padrões de *speckle* e a otimização de ferramentas numéricas para a sua análise de modo a aferir os parâmetros físicos que atuam na fibra.

Assim, a metodologia desenvolvida segue as seguintes fases:

- Estudo de diferentes métodos de monitorização de saúde estrutural;
- Estudo das fibras óticas poliméricas;
- Estudo dos padrões *speckle* e suas propriedades;
- Criação e implementação de um sensor ótico baseado em fibras óticas poliméricas, recorrendo aos padrões *speckle* emitidos por essas fibras;
- Análise da capacidade do sensor implementado na identificação de perturbações na POF e posteriormente numa estrutura onde é acoplado;
- Análise da reação do sensor implementado, quando a estrutura onde está acoplado é sujeita a vibrações e esforços de tração.

1.4. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está estruturada em 6 capítulos e bibliografia.

Assim, depois da introdução realizada no presente capítulo, no Capítulo 2 realiza-se a fundamentação teórica associada ao tema desta dissertação e onde se apresentam temáticas como os sensores de fibras óticas, com especial atenção às fibras óticas poliméricas e como os padrões *speckle* e suas propriedades.

No Capítulo 3, é descrito o desenvolvimento e implementação de um sensor ótico construído em fibras óticas poliméricas, recorrendo aos padrões de *speckle* emitidos por essas fibras. Neste capítulo explica-se a configuração adotada, os equipamentos utilizados, a captura e processamento do sinal e são demonstrados alguns resultados obtidos.

No Capítulo 4, analisa-se a capacidade deste sensor em identificar vibrações (perturbações sinusoidais) quando acoplado a uma estrutura. Assim, são estudados e demonstrados resultados de testes realizados no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) do Instituto Superior Técnico (IST).

No Capítulo 5, na sequência do trabalho realizado no capítulo anterior, analisa-se a capacidade do sensor em identificar esforços de tração, sendo estudados um conjunto de testes realizados na Academia da Força Aérea (AFA) Portuguesa.

No Capítulo 6, é feito um resumo do trabalho através da apresentação de conclusões e são realizadas recomendações para trabalhos futuros.

1.5. Contribuições Originais

Como resultado desta dissertação foram produzidos os seguintes artigos:

- [1] F. Reis, P. Antunes, and P. S. André, “POF based distributed SHM sensor based on speckle pattern,” in *25th International Conference on Plastic Optical Fibres (POF 2016)*, 2016.
- [2] F. M. Reis, P. F. Antunes, N. M. Maia, B. A. Serrano, A. R. Carvalho and P. S. André, “Monitoring the structural health using the speckle pattern in optical fibers,” *IEEE Sensors*, to be published.

2. Fundamentação Teórica

De modo a atingir os objetivos inicialmente estabelecidos é importante estudar o estado da arte relativo a temas como a utilização de sensores de fibras óticas, nomeadamente as fibras óticas poliméricas, e, obviamente, os padrões *speckle*. Desta forma neste capítulo, irão ser definidos os conceitos anteriormente referidos bem como as suas respetivas propriedades.

2.1. Sensores de Fibras Óticas

Como já foi referido no capítulo anterior, a utilização de SHM permite analisar continuamente a evolução temporal da degradação de uma infraestrutura ao longo da sua vida útil, avaliando a sua fiabilidade, durabilidade e a segurança da sua utilização, antevendo futuras manutenções ou reparações e otimizando os custos associados [12], [13].

A implementação de uma estratégia de SHM requer a utilização de sensores que monitorizem diversos parâmetros e que possibilitem a deteção de possíveis danos estruturais. Para tal, é necessário desenvolver sensores leves, compactos e que apresentem um custo competitivo comparativamente às tecnologias convencionais bem estabelecidas no mercado, tornando viável a monitorização de diversas infraestruturas. Uma solução promissora é o desenvolvimento de sensores baseados em fibras óticas poliméricas (POF do inglês *Polymer Optical Fiber*) que apresentam inúmeras vantagens em relação aos sensores convencionais, como o seu potencial menor custo, a sua compactidade, leveza, robustez, durabilidade estabilidade e podem possibilitar a implementação de esquemas de multiplexagem sendo capazes de resolver dificuldades inerentes a uma medição onde os sensores convencionais não são aplicáveis [12], [13].

Visto que o princípio de funcionamento destes sensores se baseia na condução de um sinal ótico, apresentam ainda, a imunidade a interferências eletromagnéticas e não possuem risco de curto-circuito, podendo ser utilizados com segurança em ambientes inflamáveis, aquáticos (ou com alta humidade) ou corrosivos. Para além disto, embora as POFs apresentem a desvantagem de estar limitadas à transmissão de dados a curtas distâncias, estes sensores podem ser utilizados a uma distância razoável (dezenas de metros) do seu sistema de interrogação [12], [13].

Atualmente as fibras poliméricas começam também a ser utilizadas para desenvolver outros tipos de sensores para além dos sensores físicos (alongamento, aceleração ou pressão) utilizados em SHM como sensores químicos ou biossensores [12].

2.1.1. Fibras Óticas Poliméricas

As fibras óticas poliméricas surgiram, cronologicamente, na mesma altura que as tradicionais fibras óticas de vidro (GOF do inglês *Glass Optical fiber*), nomeadamente nos anos 60 do século passado. No entanto, as POFs não cativaram, desde logo, o interesse da comunidade científica, principalmente devido à sua elevada atenuação, quando comparada com a atenuação das GOFs [12], [13].

Os recentes desenvolvimentos da tecnologia polimérica, nomeadamente na melhoria da transparência dos materiais, permitiu a produção de POFs com boa qualidade, baixo coeficiente de atenuação e baixo custo o que contribuiu para serem consideradas como uma alternativa às tecnologias dominantes no mercado [12], [13].

As fibras poliméricas convencionais são guias de onda flexíveis geralmente produzidas num polímero termoplástico rígido e transparente (ao comprimento de onda de funcionamento) chamado PMMA (PoliMetil-MetAcrilato), também conhecido como “vidro acrílico”. Estas fibras oferecem as vantagens intrínsecas de qualquer fibra ótica mas apresentam algumas vantagens importantes sobre as GOF. Especificamente, a sua facilidade de manuseamento, o seu típico diâmetro de grandes dimensões (0,25 mm-1 mm) que facilita o acoplamento de luz com conectores de pouca precisão, o que reduz o custo total associado a um sistema em POF. Por outro lado, as POF também se destacam pela resistência a impactos e vibrações, menor densidade (1195 kg/m³), maiores limites de deformação elástica (10%) e maior tenacidade à fratura [12], [13].

Outra vantagem reside no facto da janela espectral de funcionamento destas fibras (região espectral onde ocorre um mínimo de atenuação) estar localizada no visível, o que resulta numa redução no custo dos componentes optoelectrónicos utilizados, nomeadamente nas fontes óticas e nos recetores [12].

Embora as POF apresentem muitas vantagens sobre as GOF também têm algumas desvantagens designadamente, maiores coeficientes de atenuação, produção limitada, investigação aplicada com pouca expressão, falta de normalização, existência de poucos

fornecedores e a incapacidade de funcionar a altas temperaturas (acima da temperatura limite de 80-100°C imposta pela sua constituição polimérica, a rigidez e a transparência dos materiais são postas em causa) [12], [13].

Na Tabela 1 pode-se observar resumidamente uma análise comparativa entre POF e GOF.

	<i>Polímero</i>	<i>Sílica</i>
<i>Custo Componente</i>	Polímero potencialmente mais baixo que Sílica	
<i>Atenuação</i>	125 dB/km (650 nm)	0,2 dB/km (1550 nm)
<i>Conexões</i>	Fácil de conectar; não requer pessoal especializado ou ferramentas específicas	Necessita de ferramentas específicas e pessoal especializado
<i>Manuseamento</i>	Fácil	Requer cuidados especiais
<i>Flexibilidade</i>	Flexível	Frágil e quebradiça
<i>Comprimento de onda de Funcionamento</i>	Região Espectral do Visível	Região Espectral do Visível e Infravermelho
<i>Abertura Numérica</i>	≈0,4	0,1-0,2

Tabela 1 – Comparação entre POF e GOF [adaptado de [13]]

Atualmente, as principais aplicações das fibras óticas poliméricas residem em sensores e em redes de comunicação de curta distância, como por exemplo em casas, carros e aeronaves [12].

2.1.1.1. Propagação

As POFs, tal como as fibras óticas de vidro, são compostas por duas regiões distintas e concêntricas, uma designada núcleo, onde o sinal ótico é guiado, envolta por uma região designada como bainha, também transparente e caracterizada por um índice de refração inferior ao núcleo que permite que a luz não se perca devido, por exemplo, a fenómenos de absorção. Na Figura 8 pode-se observar as diferentes camadas das fibras óticas [12], [13].

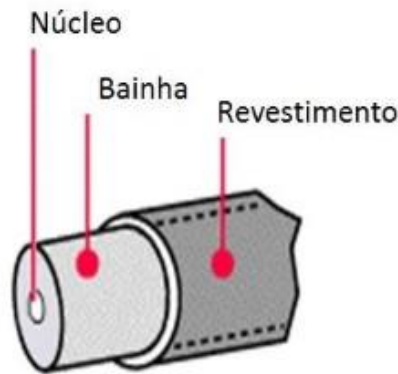


Figura 8 - Representação de uma fibra ótica [adaptado de [12]]

Nas fibras óticas, o sinal ótico é guiado por reflexão total interna. As fibras podem ser classificadas em duas categorias tendo em conta os modos de propagação do sinal ótico, nomeadamente, as fibras monomodo (SM do inglês *SingleMode*) e as fibras multimodo (MM). As fibras SM têm geralmente um núcleo de menor diâmetro, cerca de 10 μm , enquanto nas fibras multimodo o diâmetro pode ir até 2 mm [12].

A distinção entre estes dois modos é efetuado através do parâmetro estrutural V , que se designa como frequência normalizada. Este parâmetro depende do raio do núcleo a , do comprimento de onda λ e da abertura numérica NA através da expressão,

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA \quad (1)$$

Assim, para valores de V inferiores a 2,045 a fibra denomina-se como SM, uma vez que apenas é permitida a propagação de um modo e, para valores superiores a fibra denominar-se-á como MM. O número de modos suportados numa fibra ótica MM com índice em degrau (SI do inglês *Step Index*), de acordo com a teoria eletromagnética, pode ser aproximado a

$$N \approx \frac{V^2}{2} \quad (2)$$

O número de modos depende, ainda, do comprimento de onda. Por isso a fibra será SM a partir de um determinado comprimento de onda, designado como comprimento de onda de corte [13].

A abertura numérica NA quantifica a luz que pode ser acoplada por um sistema ótico, seja ele uma lente, uma objetiva microscópica ou uma fibra ótica.

Por definição a abertura numérica é definida pela expressão,

$$NA = \text{sen}(\theta_{max}) = \frac{\sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2}}{n_{ext}} \quad (3)$$

onde θ_{max} é o ângulo de aceitação máximo dos raios emitidos por uma fonte de luz colocada numa das extremidades da fibra ótica, ou seja, apenas os raios com ângulos inferiores ao ângulo de aceitação irão ser propagados para o interior da fibra. Nesta fórmula, n_{co} é o índice de refração do núcleo da fibra, n_{cl} é o índice de refração da bainha e n_{ext} é o índice de refração do meio externo [13].

Considerando que o meio exterior é o ar ($n_{ext} = 1$) temos que,

$$NA = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (4)$$

As POF têm maior NA e maior diâmetro do núcleo comparativamente com outros tipos de fibra ótica, o que garante que tecnologia para acoplamento de conectores seja mais económica quando comparada com a necessária para as GOF, sendo esta uma das maiores vantagens da utilização destas fibras. Na Figura 9 pode-se observar uma ilustração da abertura numérica de uma fibra ótica [13].

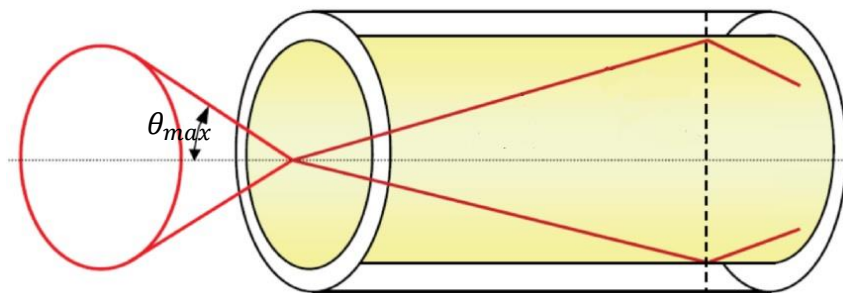


Figura 9 – Ilustração da abertura numérica [adaptado de [14]]

2.2. Padrões *Speckle*

Quando o feixe de um laser a emitir em modo contínuo (CW do inglês *Continuous Wave*) incide numa superfície rugosa (com rugosidade R_z maior que o comprimento de onda λ da radiação), as componentes da luz dispersa, por áreas independentes dessa superfície, obtêm diferentes fases relativamente à fase da onda incidente. Essas ondas com diferentes fases (ainda coerentes) interferem construtivamente ou destrutivamente no espaço, gerando uma distribuição estatística, o padrão granular de *speckle* [15], [16].

Assim, este padrão granular, observável numa zona distante (plano de observação), consiste numa conjunto de pontos brilhantes onde a interferência foi construtiva e pontos negros onde a interferência foi destrutiva [15], [16]. Na Figura 10 pode-se observar um padrão *speckle* típico, obtido experimentalmente na presente dissertação.



Figura 10 - Padrão *Speckle*

Tendo em conta as configurações experimentais, os *speckles* podem ser divididos em duas categorias: objetivos e subjetivos. Os *speckles* que existem em espaço livre são conhecidos como os *speckles* objetivos ou de campo distante, como se observa na Figura 11 [15].

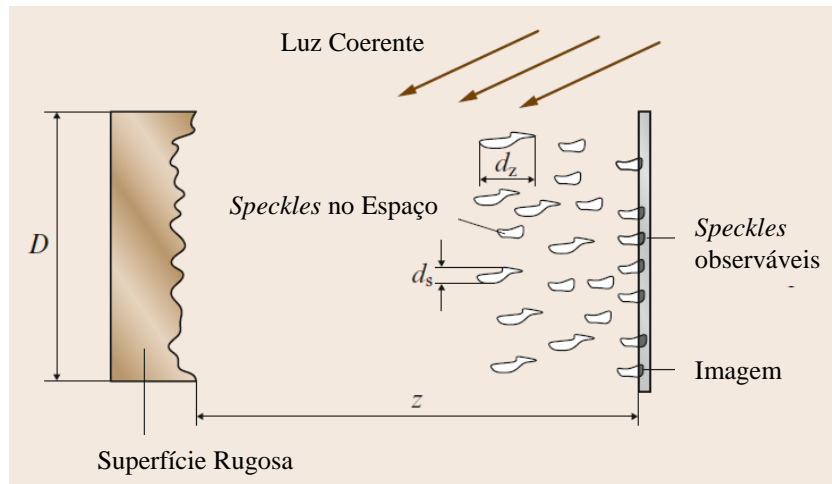


Figura 11 - Formação de *speckles* objetivos em espaço livre [adaptado de [16]]

Os *speckles* subjetivos ocorrem quando se utiliza sistemas de reflexão, difração ou projeção de imagens de forma a gravar a informação do *speckle*. Pode-se observar um exemplo deste tipo de *speckles* na Figura 12. Os *speckles* subjetivos são formados através da sobreposição das amplitudes complexas das ondas dispersas no plano de observação. Cada ponto da imagem consiste na sobreposição de uma infinidade de amplitudes complexas das funções de propagação, cada uma delas proveniente de um ponto de dispersão independente da superfície do objeto [15], [16].

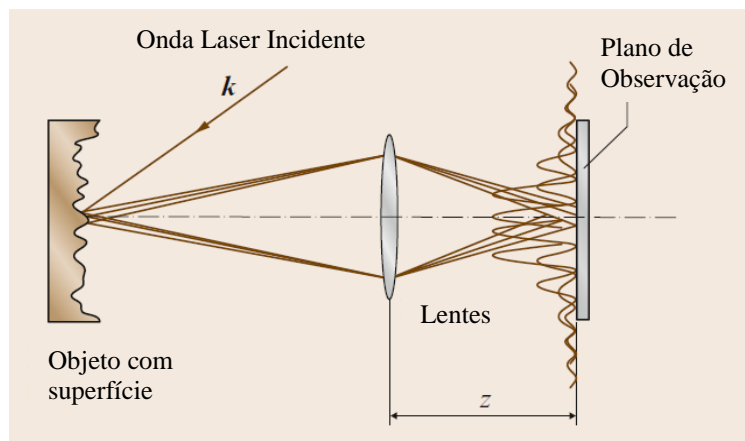


Figura 12 - Formação de *speckles* subjetivos [adaptado de [16]]

Geralmente o padrão *speckle* é observado e gravado por um sistema ótico semelhante ao mostrado na Figura 12 e como se trata da configuração mais utilizada, os *speckles* subjetivos são simplesmente chamados de *speckle* [15].

2.2.1. Análise Estatística do *Speckle*

Devido à falta de conhecimentos relativamente à estrutura microscópica da estrutura de onde a luz é refletida, é necessário determinar as propriedades dos padrões *speckles* em termos estatísticos e probabilísticos. Desta forma, pode-se dizer que estes padrões são estocásticos e distribuídos espacialmente [15], [16].

Para auxiliar e simplificar o desenvolvimento do modelo estatístico do *speckle*, colocouse a hipótese que o campo incidente no ponto $P(x, y, z)$ é perfeitamente polarizado e monocromático. Perante tais condições é possível representar este campo através de um sinal analítico de valor complexo na forma,

$$U(x, y, z, t) = A(x, y, z)e^{(i2\pi vt)} \quad (5)$$

onde ν é a frequência ótica e $A(x, y, z)$ é o fasor de amplitude complexa. Este último parâmetro pode ser considerado como o resultado da soma de contribuições de muitas áreas de dispersão na superfície rugosa e é descrito matematicamente pela expressão,

$$A(x, y, z) = \sum_{n=1}^N |a_n| e^{i\phi_n} \quad (6)$$

onde $|a_n|$ e ϕ_n representam a amplitude e a fase da n ésima onda dispersa, respetivamente, e N é o número total dessas ondas [15], [16].

Provavelmente a propriedade estatística mais importante do padrão *speckle* é a magnitude da intensidade observada diretamente no ponto $P(x, y, z)$ da superfície rugosa durante o tempo de exposição T e é dada por:

$$I(x, y, z) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T_f} \int_{-T/2}^{+T/2} |U(x, y, z; t)|^2 dt = |a(x, y, z)|^2 \quad (7)$$

Desde que o número das contribuições elementares seja grande e sabendo que as partes real e imaginária do campo complexo no ponto $P(x, y, z)$ são independentes, média zero e distribuídos identicamente através de variáveis aleatórias gaussianas, então as flutuações da

intensidade I obedecem estatisticamente a uma exponencial negativa, ou seja, a sua função de densidade de probabilidade é na forma

$$p(I) = \frac{1}{\langle I \rangle} \exp\left(-\frac{I}{\langle I \rangle}\right), I \geq 0 \quad (8)$$

onde $\langle I \rangle$ é o valor médio da intensidade do padrão *speckle* (ou intensidade esperada) [15], [16].

Uma característica muito importante da distribuição exponencial negativa é que o seu desvio padrão (σ) é igual à média, o que implica que o contraste de um padrão *speckle* seja sempre igual e definido por:

$$C = \frac{\sigma}{\langle I \rangle} \quad (9)$$

Para uma boa aproximação, todas as superfícies rugosas numa escala do comprimento de onda produzem estatisticamente a mesma forma de intensidade, independentemente de a superfície ser muito ou pouco rugosa [15], [16].

2.2.2. Quantidade de Pontos num Padrão *Speckle*

O número total de pontos negros e pontos brilhantes num determinado padrão *speckle* é definido por

$$N_{\text{pontos}} = \frac{NA^2 d_{Ap}^2}{\lambda} \quad (10)$$

onde NA é a abertura numérica, d_{Ap} é o diâmetro do núcleo da fibra e λ é o comprimento de onda da luz propagada [14].

Como já foi dito anteriormente, quando um raio laser incide sobre uma superfície rugosa, as frentes de onda dispersas a partir de pontos vizinhos numa superfície irão apresentar uma desfasagem devido à rugosidade dessa estrutura. Assim cada ponto do padrão *speckle* gerado no plano de observação resultante da interferência das frentes de ondas eletromagnéticas produz um campo de intensidade distribuído como na Figura 13, onde α é o ângulo entre o desvio da

luz dispersa e a direção normal e é definido como $\alpha = d_{Ap}/2$ e J_1 é a função de Bessel de primeira ordem [14]–[16].

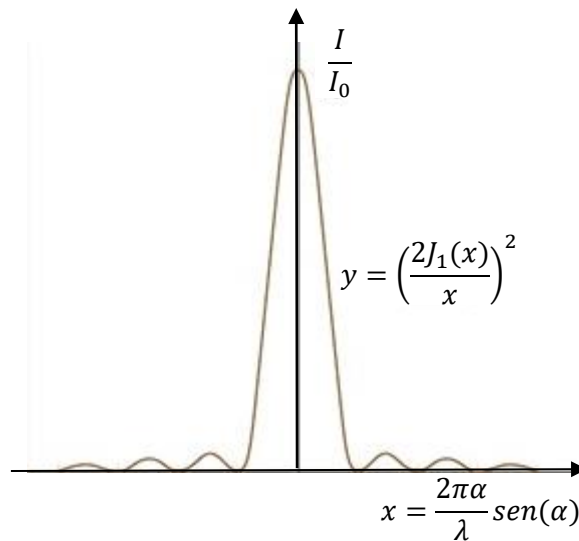


Figura 13 - Distribuição da intensidade em cada ponto do plano de observação causado pela interferência das diferentes ondas dispersas [adaptado de [15]]

2.2.3. Tamanho do *Speckle*

Na metrologia do *speckle* é bastante importante medir o tamanho do *speckle*. Assim, o tamanho estatístico médio do diâmetro do *speckle* formado a partir de uma fibra ótica cuja extremidade se encontra à distância R do plano de observação pode ser calculado como:

$$d_s \approx 2.44R \left(\frac{\lambda}{d_{Ap}} \right) = 2.44\lambda F \quad (11)$$

Esta equação demonstra a relação entre o tamanho do *speckle* e o diâmetro de abertura da fibra usada como sensor. Salienta-se que na maioria dos sistemas o parâmetro F ($F = R/d_{Ap}$) e o comprimento de onda do laser (λ) são conhecidos [15], [17].

Através desta expressão pode-se verificar que o aumento do diâmetro *speckle* é causado pelo aumento do parâmetro F e do λ . Esta característica é muito útil uma vez que o tamanho do *speckle* pode ser ajustado pela lente de abertura do laser para diferentes requisitos [15], [17].

2.2.4. Métodos de Medição *Speckle*

Um único padrão *speckle* pode conter informação relativa à superfície de uma estrutura, no entanto não é possível deduzir a informação relativa à fase a partir de um único padrão. Desta forma, pelo menos dois padrões *speckle* (originados na mesma estrutura) são necessários para comparar diferentes estados de deformação [15].

A comparação entre dois padrões *speckle* pode fornecer dois tipos de informação: as mudanças na geometria da superfície ou as mudanças da distribuição de intensidade na superfície [15].

Assim, as técnicas que estudam as mudanças da intensidade na superfície são denominadas técnicas de Interferometria *Speckle* e as que estudam as mudanças geométricas são denominadas técnicas de Correlação *Speckle* [15].

2.2.5. Padrão *Speckle* numa POF

Os padrões *speckle* podem também ser obtidos usando fibras óticas multimodo, nomeadamente as POFs MM. Isto acontece devido à interferência entre os diferentes modos coerentes propagantes no guia com diferentes velocidades de fase [18], [17].

Desta forma, se a fibra for perturbada devido a fatores externos, como temperatura, pressão ou vibração, a distribuição de intensidade na saída da fibra, que consiste no somatório de todas as contribuições de campos individuais de cada modo propagante, responde imediatamente a este efeito. Estes efeitos da interferência apenas podem ser observados na distribuição de intensidade através da extremidade do guia de ondas se o atraso das fases das contribuições variarem mais que π e se existir uma fonte coerente [17], [18].

É importante salientar que o número de pontos presentes no padrão *speckle* é aproximadamente igual ao número de modos de propagação da fibra [18].

A intensidade total do padrão *speckle* medido à saída da fibra ótica é aproximadamente constante e quando a fibra é sujeita a uma perturbação, a expressão da intensidade é

$$I_i = A_i \{1 + B_i [\cos \delta_i - F(t) \phi_i \sin \delta_i]\} \quad (12)$$

onde A_i é o resultado da auto interação dos modos, B_i tem em consideração o estado estacionário da interação entre modos, $F(t)$ é a perturbação externa e ϕ_i é a fase [18].

Quando o sistema é perturbado, o termo da interação modo-modo é modificado por ϕ_i . Os parâmetros A_i, B_i e δ_i são constantes para qualquer i -ésimo padrão *speckle*. O padrão *speckle* pode ser visto como uma matriz de interferência sobre a mesma perturbação para cada i . Assim, quando as condições da fibra variam, seja devido a temperatura, pressão ou deslocamento, o padrão *speckle* é também modificado. Desta forma, com a análise da imagem obtida e a sua evolução é possível obter a perturbação que afeta a fibra e as suas características. Portanto, a implementação deste método como sensor de vibração pode ser possível através da colocação de um pequeno comprimento de fibra multimodo no local desejado [18].

Quando uma fibra sofre *stress* mecânico, a deformação induzida modifica os comprimentos dos percursos óticos de cada modo de forma diferente e conseqüentemente os padrões *speckle* que são alterados em conformidade. Estas alterações podem ser detetadas pela comparação do padrão de referência com o padrão resultante após a deformação [18].

Assim, o parâmetro da correlação é obtido entre o padrão *speckle* de referência e as diferentes imagens *speckle* representantes das variações da perturbação. Uma boa comparação entre os padrões pode ser cumprida através de uma correlação espacial entre eles. As distribuições de intensidade dos padrões *speckle* antes e depois da perturbação, representadas por $I_1(x, y)$ e $I_2(x, y)$ respetivamente, são comparadas através da medição do coeficiente de correlação entre estes sinais

$$C = \frac{\langle I_1(x, y)I_2(x, y) \rangle - \langle I_1(x, y) \rangle \langle I_2(x, y) \rangle}{\sqrt{(\langle I_1^2(x, y) \rangle - \langle I_1(x, y) \rangle^2)^2 \times (\langle I_2^2(x, y) \rangle - \langle I_2(x, y) \rangle^2)^2}} \quad (13)$$

onde $\langle . \rangle$ representa a média sobre as coordenadas espaciais x e y . O coeficiente de correlação toma o valor 1 se a distribuição de intensidade do padrão *speckle* $I_2(x, y)$ é igual a $I_1(x, y)$ e começa a diminuir gradualmente com as mudanças do padrão *speckle* [18].

2.3. Análise da POF sob Curvatura

2.3.1. Efeitos na Abertura Numérica

A abertura numérica de uma fibra com comprimento, raio de curvatura e ângulo de curvatura constante, baixa perante curvatura. Na Figura 14 pode-se observar a redução da abertura numérica da fibra após curvatura, o que prova a existência de dependência entre a intensidade de luz no *output* da fibra e o ângulo de curvatura [14].

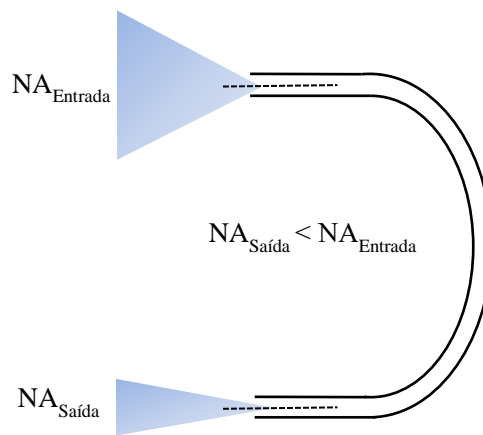


Figura 14 - Redução da abertura numérica de uma fibra dobrada [adaptado de [14]]

Desta forma, a abertura numérica em função do raio de curvatura (R_{curv}) e do raio do núcleo da fibra (a) é definido como:

$$NA_{curv} = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2 \left(1 + \frac{a}{R_{curv}}\right)} \quad (14)$$

A quantidade de intensidade de luz no *output* de uma fibra sob curvatura é maioritariamente influenciada pelo diâmetro do núcleo e pelos índices de refração do núcleo (n_{co}) e do revestimento (n_{cl}) [14].

2.3.2. Efeitos na quantidade de pontos do Padrão *Speckle*

A quantidade de pontos de um padrão *speckle* e a sua distribuição de intensidade depende fortemente da quantidade de curvatura, ou seja, com o aumento do ângulo de curvatura a quantidade de pontos e a sua intensidade diminuem devido à diminuição da abertura numérica [14].

Assim, a quantidade total de pontos brilhantes e pontos negros de um padrão *speckle* numa fibra sob curvatura pode ser definida como:

$$N_{pontos} = \frac{NA^2 d_{Ap}^2}{\lambda^2} \quad (15)$$

onde NA é a abertura numérica, d_{Ap} é o diâmetro do núcleo da fibra e λ é o comprimento de onda da luz [14].

2.3.3. Efeitos na Distribuição de Intensidade de Luz Interior

A distribuição da intensidade de luz numa fibra dobrada varia durante a propagação e concentra-se apenas numa das extremidades do núcleo da fibra, ou seja, numa fibra em linha reta o raio incidente atravessa toda a secção da POF enquanto que numa fibra dobrada atravessa apenas em metade da secção transversal como se verifica na Figura 15 [14], [19].

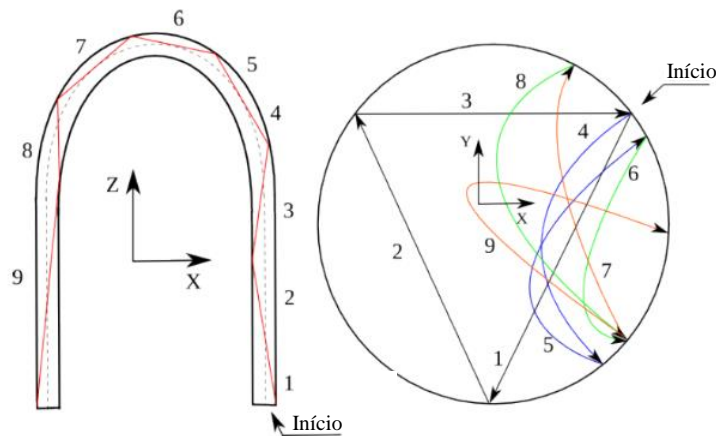


Figura 15 - Distribuição de energia na extremidade de uma fibra dobrada [adaptado de [19]]

3. Implementação do Sensor Ótico

Como já foi dito anteriormente, esta dissertação tem como objetivo principal desenvolver, implementar e testar um protótipo baseado num sensor ótico, construído em fibras óticas poliméricas, recorrendo aos padrões de *speckle* emitidos por essas fibras. Assim, neste capítulo irá ser explicada a configuração adotada, os equipamentos utilizados, a captura e processamento do sinal *speckle* e serão demonstrados alguns resultados obtidos com este sensor.

3.1. Descrição

O sensor ótico implementado deve ter a capacidade de capturar o padrão *speckle* emitido por uma das extremidades da POF. Para tal, nessa extremidade instalou-se uma câmara (*Raspicam*) conectada a um *Raspberry Pi* (RPI) 1 Modelo B responsável pelo processamento do sistema. No entanto, devido à sua baixa capacidade de processamento optou-se por realizar todo o processamento num computador com o recurso ao *software Matlab* (versão 2015a). Desta forma, o RPI comunica remotamente com o computador através do *Matlab* garantindo a recolha de informação de qualquer sensor que lhe esteja conectado (neste caso uma câmara). É importante salientar que é necessário adicionar um difusor (papel vegetal) entre a câmara e a saída da POF, que para além de funcionar como o plano de observação, garante uma maior redução da saturação das imagens obtidas

Na outra extremidade da POF encontra-se um laser semiconductor responsável pela injeção do sinal na fibra, ligado a uma fonte de alimentação. Pode-se observar na Figura 16 uma representação da configuração anteriormente descrita.

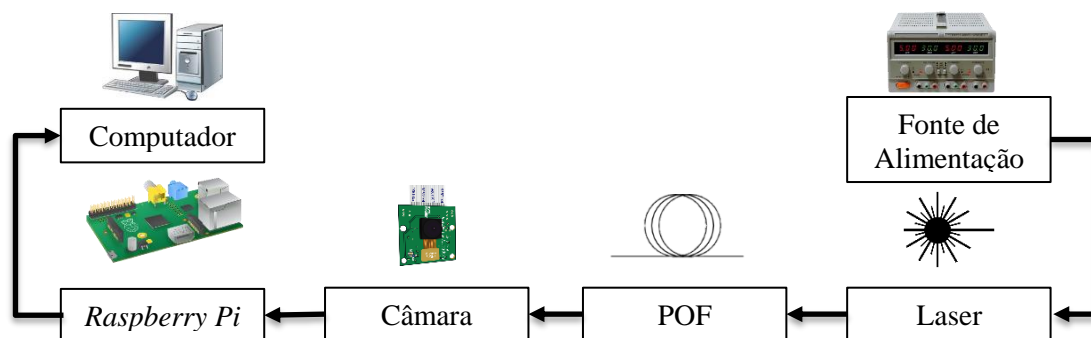


Figura 16 - Configuração sensor ótico

Na Figura 17 pode-se observar uma foto da configuração anterior onde são identificados todos os sistemas presentes. Nesta configuração pode-se observar uma estrutura negra que tem o objetivo de auxiliar a definição das amplitudes de perturbação. Na Figura 18 observam-se as estruturas de suporte fabricadas numa impressora 3D para acoplar as extremidades da POF à câmara e ao laser, respetivamente.

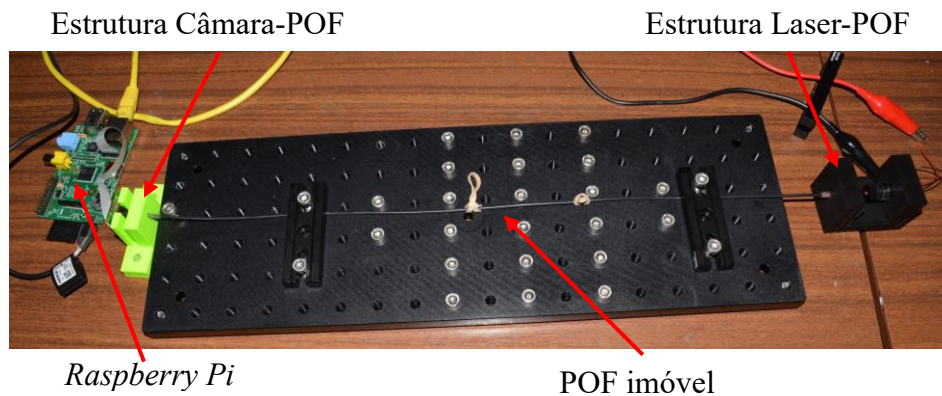


Figura 17 - Configuração do sensor ótico em laboratório

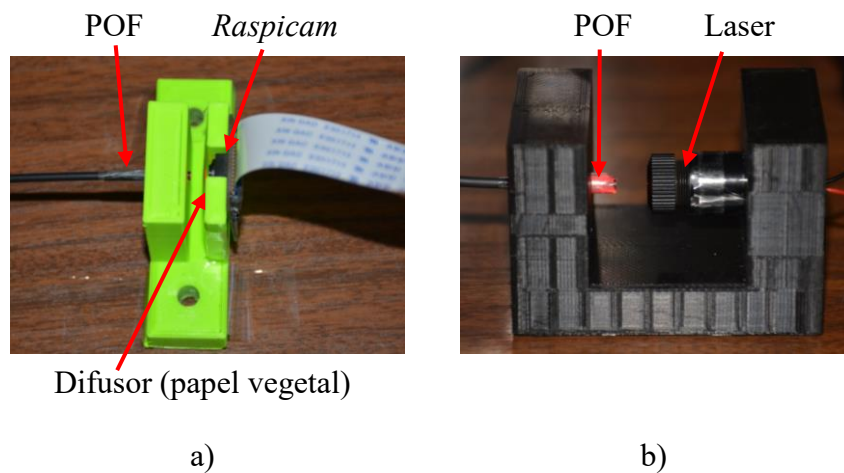


Figura 18 - Estruturas para acoplar as extremidades da POF à a) Raspicam e ao b) Laser

O *Raspberry Pi 1* Modelo B é um pequeno computador desenvolvido pela *Raspberry Pi Foundation* para fins educacionais. Este modelo baseia-se num chip *Broadcom BCM2835 SoC* funcionando com uma unidade central de processamento (CPU do inglês *Central Processing Unit*) de 700 MHz ARM1176JZFS e com uma memória de 512 MB SDRAM (do inglês *Synchronous dynamic random access memory*). O RPI não apresenta nenhum disco rígido interno ou unidade de estado sólido (SSD do inglês *solid-state drive*) garantindo a inicialização do sistema e armazenamento de longo prazo através de um cartão SD (do inglês *Secure Digital*).

Embora na atual dissertação o cartão SD contenha pacotes que permitem a comunicação entre o RPI e o computador, é possível utilizá-lo com o sistema operativo *Raspbian*, que se trata de uma versão do sistema operativo *Linux* [20], [21].

O RPI é alimentado por uma entrada micro USB +5.1V e necessita de 700 a 1000 mA para operar, dependendo dos periféricos utilizados. Na Figura 19 pode-se observar o *Raspberry Pi 1 Modelo B* [20], [21].

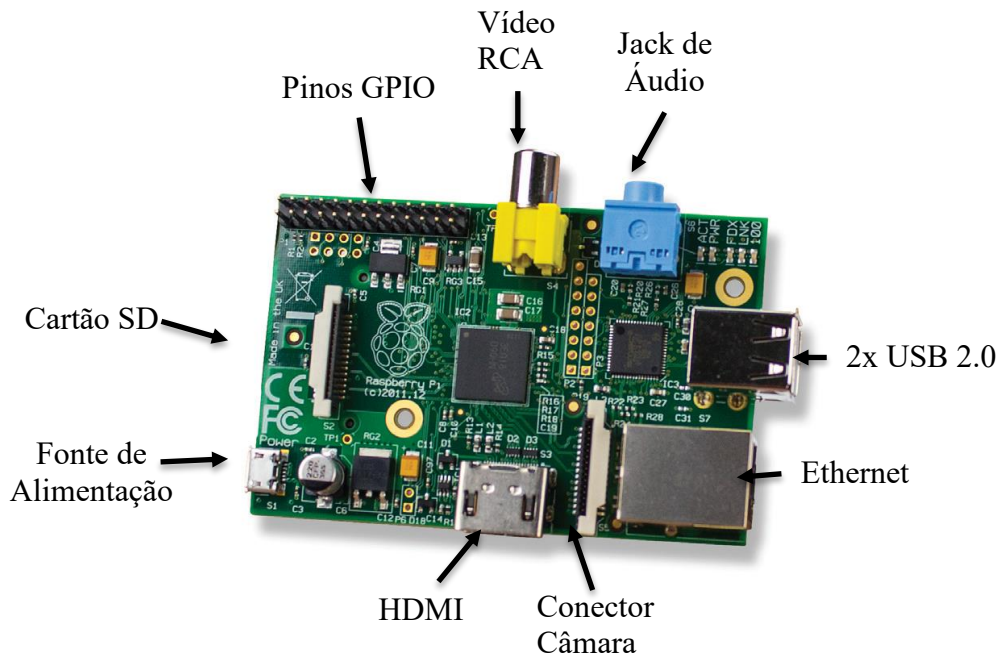


Figura 19 - *Raspberry Pi 1 Modelo B* [adaptado de [21]]

Este sistema foi escolhido devido às suas pequenas dimensões ($85.6 \times 53.98 \times 17 \text{ mm}^3$), baixos consumos a uma tensão de 5,1 V e fácil manuseamento. Para além disto, tem a vantagem de permitir acoplar uma câmara, facilitando o seu manuseamento e controlo [20].

O módulo *Raspberry Pi Camera* ou *Raspicam* é uma câmara de alta definição compatível com *Raspberry Pi* anteriormente referido, oferecendo alta sensibilidade, baixo *crosstalk* e captura de imagens com pouco ruído. Esta câmara tem pequenas dimensões ($20 \times 25 \times 10 \text{ mm}^3$), pesa 3 g, tem uma lente com o tamanho de $1/4''$ e é constituída por um sensor de imagem CMOS (do inglês *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) *Omnivision 5647* garantindo uma resolução de 5 megapixel e uma resolução de uma imagem estática de 2592×1944 pixéis. Relativamente à máxima taxa de transferência de imagens, a *Raspicam* garante 30 fps para imagens com 1080p (1920×1080 pixéis) ou 60 fps para imagens com 720p (1280×720 pixéis)

[20], [22]. Nesta dissertação a *Raspicam* foi configurada com uma resolução estática de 1280 x 720 pixels e uma taxa de transferência de imagens de 30 fps.

A *Raspicam* apresenta uma serie de características configuráveis como por exemplo o modo de exposição, o modo de medição, o modo Balanço Automático de Brancos (AWB do inglês *Automatic White Balance*) e os parâmetros de imagem (exemplo: brilho e contraste) [20]. Na Figura 20 pode-se observar a *Raspicam*.

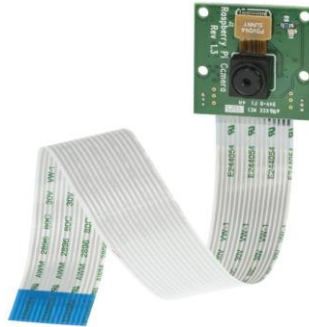


Figura 20 – Raspberry Pi Camera [22]

A configuração apresentada na Figura 16 também utiliza uma fibra ótica polimérica HFBR-RUS100Z contruída numa fibra SI revestida por uma bainha preta de polietileno e fabricada pela *Avago Technologies*. Esta POF padrão de baixo custo apresenta um diâmetro de 1 mm, uma abertura numérica de 0,47, um índice de refração do núcleo da fibra (n_{co}) de 1,492, um índice de refração da bainha (n_{cl}) de 1,147 e uma atenuação típica de 0,22 dB/m [23]. Nos testes realizados neste capítulo a fibra ótica apresenta 50 cm de comprimento.

O laser utilizado é um laser semiconductor LDM650/3LJ fabricado pela *Roithner*, com uma potência ótica de 3mW e atinge um pico máximo aos 650 nm. Este laser pode ser observado na Figura 21 [24].



Figura 21 - Laser semiconductor LDM650/3LJ [24]

É importante referir que a configuração do sensor ótico adotada, apresentada na Figura 16, não é suficiente para obter um padrão *speckle* perceptível. As definições de imagem, como o brilho, o contraste e a saturação e outros parâmetros como a velocidade do obturador e a sensibilidade ISO (do inglês *International Organization of Standardization*), têm também um papel bastante importante para obter padrões *speckle* mais nítidos [14].

O parâmetro contraste é utilizado para ajustar a quantidade de contornos de um padrão *speckle*. Assim, quanto maior for o contraste de uma imagem, maior será a quantidade de contornos e mais perceptível será o *speckle*. Da mesma forma, o aumento do parâmetro brilho permite obter um padrão mais nítido, uma vez que gera um aumento do seu diâmetro e da quantidade de manchas (*speckles*). O aumento do parâmetro nitidez (*sharpness*) também permite obter melhores padrões *speckle* [14].

Desta forma, a câmara foi configurada com o valor '100' para os parâmetros contraste e nitidez e com o valor '50' para o parâmetro brilho.

O parâmetro da saturação afeta fortemente a luz vermelha de uma imagem, transformando-a em luz branca (ofuscamento) e contribui para uma diminuição da quantidade de contornos com o aumento do seu ganho [14]. Para contrariar este efeito, configurou-se a saturação da câmara com o valor de '-70' e reduziu-se ao máximo a voltagem fornecida ao laser estabelecendo-se uma voltagem de 2,5 V DC e uma corrente de 30 mA, uma vez que abaixo destes valores o laser funciona como LED (do inglês *Light Emitting Diode*) deixando de existir qualquer *speckle*.

Para além disto, foi também necessário adicionar uma folha de papel vegetal entre a câmara e a saída da POF, que funciona como um difusor e garante uma maior redução da saturação das imagens obtidas. A fibra deve estar próxima da câmara pois permite obter padrões *speckle* maiores, mais brilhantes e com mais contornos.

A velocidade do obturador, responsável pelo tempo de exposição deve também ser definida cuidadosamente de modo a evitar a saturação das imagens. Uma maior velocidade do obturador e sensibilidade ISO, para além de diminuir a saturação, permite também aumentar a deteção de contornos e a sensibilidade a vibrações mecânicas [14].

De modo, a aumentar a velocidade do obturador configurou-se o modo de exposição da câmara como “*night*” (noite) uma vez que é este o modo que garante menor tempo de exposição de entre os demais.

Salienta-se que todos os efeitos automáticos devem estar desligados durante a operação da câmara de modo a garantir resultados mais estáveis. O parâmetro AWB tem um efeito bastante forte na quantidade de contornos, uma vez que o ajuste da luminosidade da imagem pode suprimir a deteção de mudanças na variação de intensidade de *speckles* [14]. No entanto, em vez de se desligar o modo AWB configurou-se como ‘sun’ (sol), pois é o modo que garante um padrão *speckle* mais perceptível.

Após se adotar a configuração do sensor ótico descrita inicialmente e definir todos estes os parâmetros, é possível obter, através da *Raspicam*, um padrão *speckle* perceptível e com contornos mais nítidos, tal como se observa na Figura 22 a). Em jeito de comparação, observa-se na Figura 22 b) um padrão *speckle* saturado onde os contornos são menos evidentes e na Figura 22 c) uma imagem do sinal à saída da fibra onde o padrão *speckle* é inexistente.

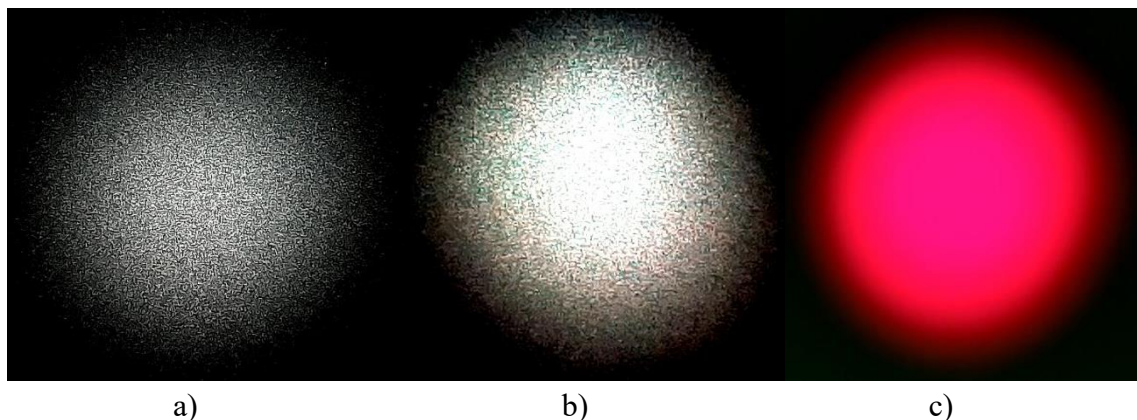


Figura 22 - Padrão *Speckle* a) Nítido b) Saturado c) Inexistente

3.2. Processamento de Imagem

Para garantir uma monitorização contínua de saúde estrutural é necessário gravar continuamente os padrões *speckle* obtidos através da *Raspicam*. Esses vídeos serão analisados posteriormente num computador com recurso ao *software Matlab* versão R2015a, tal como já tinha sido referido.

Desta forma, foram criados três algoritmos diferentes de modo a processar os vídeos obtidos. Em cada um desses algoritmos o vídeo após ser capturado é separado *frame a frame* de forma a analisar a sua evolução e identificar as perturbações ocorridas na POF.

Tal como foi referido no capítulo 2, as perturbações podem ser detetadas pela comparação do padrão de referência com o padrão resultante após a deformação, sendo que uma boa comparação entre os padrões pode ser cumprida através de uma correlação espacial entre eles. Assim, no primeiro algoritmo realiza-se a correlação de *frames* consecutivos e no segundo algoritmo realiza-se correlação do *frame* atual com um *frame* de referência (neste caso o *frame* inicial).

No terceiro algoritmo calcula-se a intensidade média de cada um dos *frames*, visto que, tal como também já foi dito no capítulo 2, a intensidade total de um padrão *speckle* medido à saída da fibra ótica é aproximadamente constante e quando a fibra é sujeita a uma perturbação a intensidade total varia, sendo possível através da análise da sua evolução obter essa perturbação.

Para melhor entender o funcionamento destes algoritmos, pode observar-se na Figura 23, os fluxogramas os mesmos.

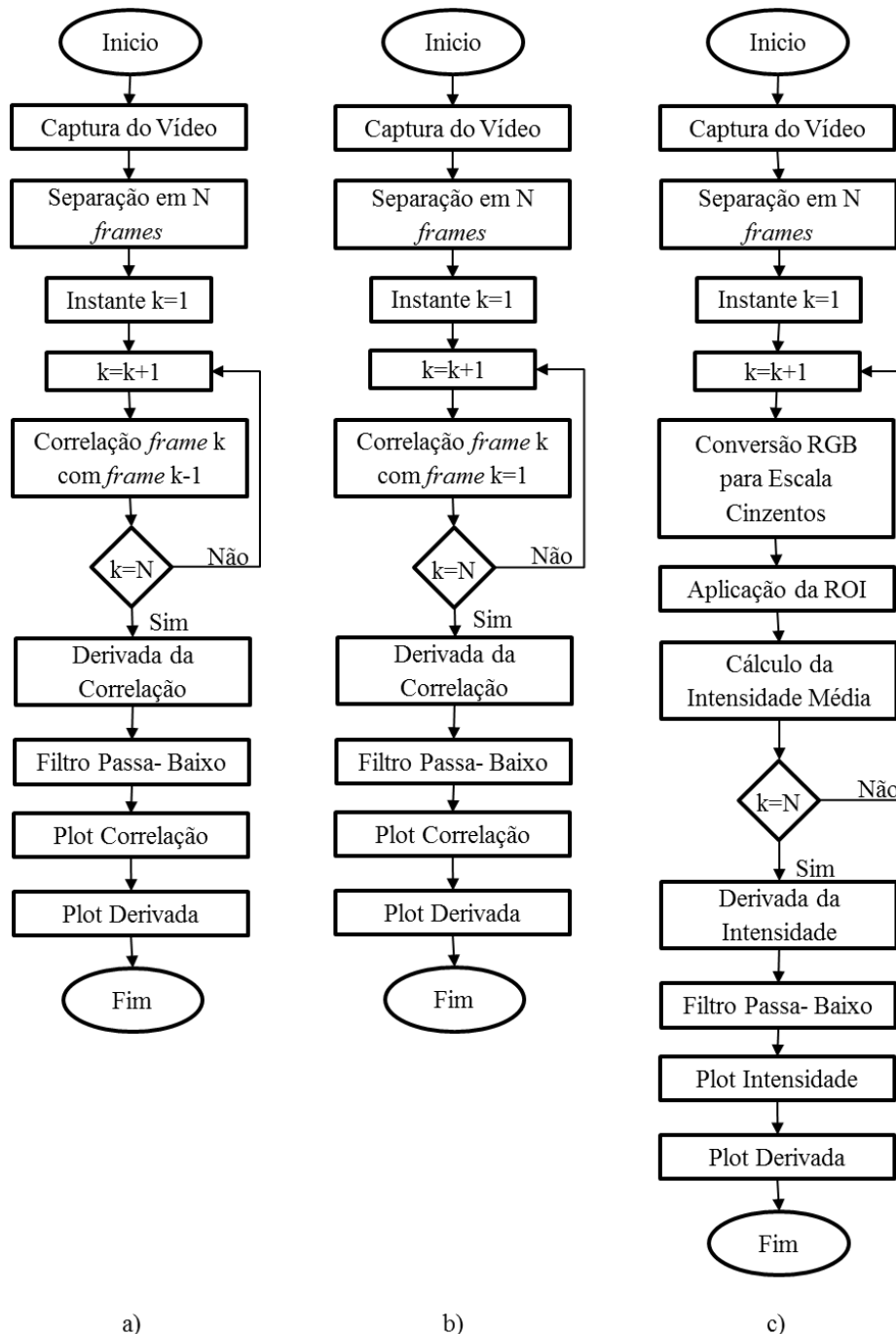


Figura 23 - Fluxograma do algoritmo a) Correlação de *frames* consecutivos b) Correlação *frame* atual com inicial c) Intensidade Média de *frame*

Como se pode observar na Figura 23 os algoritmos são muito semelhantes e todos eles têm um filtro passa-baixo de modo a diminuir o ruído e interferências do sinal. Este filtro digital FIR projetado através do método *equiripple*, apresenta uma frequência de passa-banda de 100 Hz, uma frequência de rejeita-banda de 150 Hz, uma taxa de amostragem de 1×10^3 , permite a passagem de uma banda de oscilação de 1 dB e rejeita uma banda de oscilação abaixo de - 65 dB. Pode-se observar a resposta em magnitude deste filtro na Figura 24.

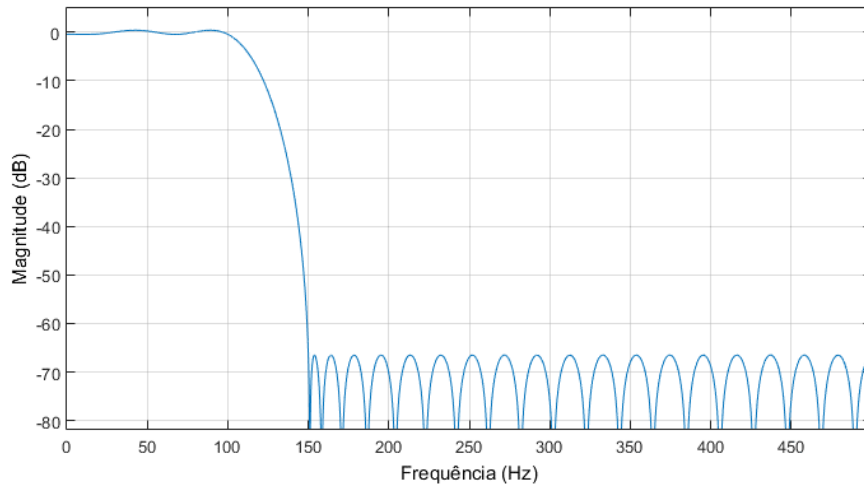


Figura 24 - Resposta em magnitude do filtro FIR passa-baixo

O algoritmo da intensidade média de *frame* apresenta alguns procedimentos diferentes dos restantes algoritmos, nomeadamente a conversão dos *frames* RGB (do inglês *Red-Green-Blue*) para uma escala de cinzentos, essencial para o cálculo da intensidade média, e a aplicação de uma Região de Interesse (ROI do inglês *Region of Interest*) no *frame*, de modo a tornar este método mais rápido e eficaz.

Esta ROI é essencialmente uma pequena área localizada aproximadamente no centro do *frame* original que foi reduzido para uma imagem de 200 x 200 pixels. O processo executado pela aplicação desta ROI é exemplificado na Figura 25.

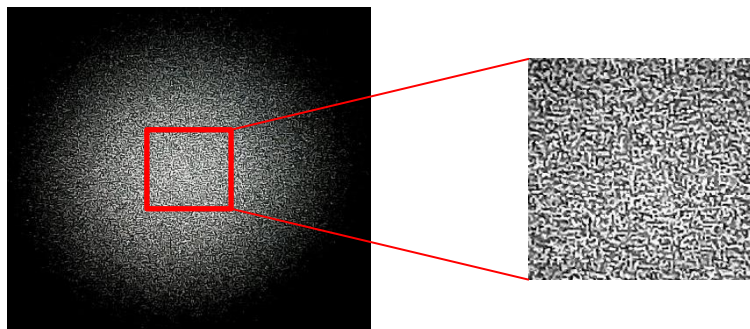


Figura 25 - Região de interesse de um *frame*

3.3.Dados Preliminares

Nesta secção serão apresentados alguns testes realizados em laboratório de modo a avaliar a capacidade do sensor ótico implementado em identificar perturbações. Salienta-se que todos os testes foram realizados manualmente em ambientes não-controlados.

Embora seja necessário gravar continuamente os padrões *speckle* à saída da POF para garantir uma monitorização contínua de saúde estrutural, para efeitos experimentais foram gravados pequenos vídeos que garantem que o processamento de sinal seja mais rápido. A maioria destes vídeos tem 20 segundos, ou seja, 547 *frames* mas apenas serão analisados os *frames* 26 a 547, uma vez que, como a câmara demora algum tempo a ligar-se, os primeiros 25 *frames* encontram-se bastante saturados.

É importante salientar que a POF encontra-se estática no início de todos os testes, como se observa na Figura 17. No primeiro teste realizou-se um movimento positivo de 6,25 cm aproximadamente no instante 6 segundos. Neste teste manteve-se a curvatura da perturbação até ao final do vídeo como se pode observar na Figura 26 a).

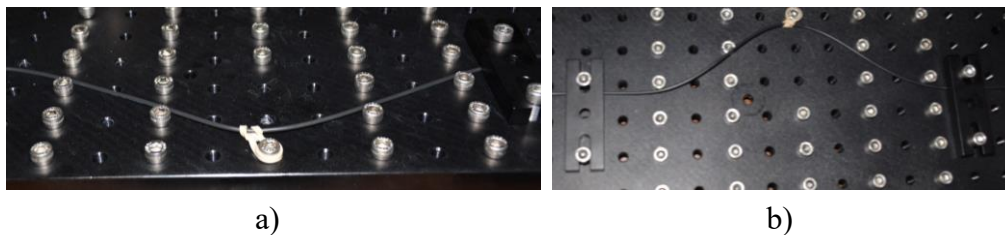
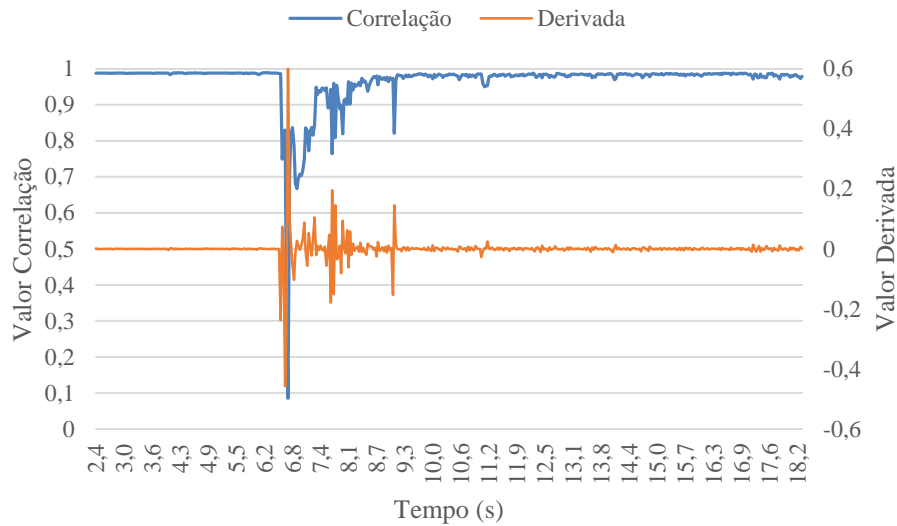


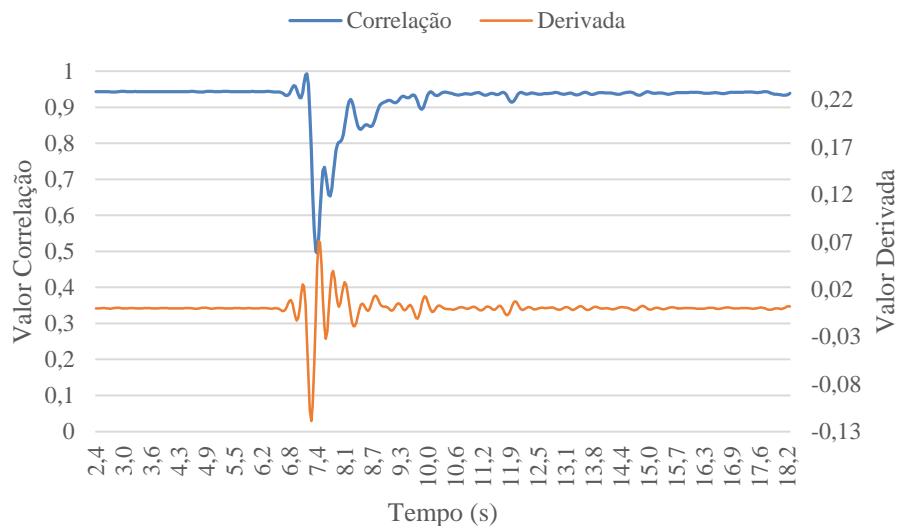
Figura 26 - Perturbação de 6,25 cm a) positiva e b) negativa

Uma perturbação positiva, representada na Figura 26 a), e uma perturbação negativa, representada na Figura 26 b), geram resultados semelhantes desde que a amplitude e o instante da perturbação sejam idênticos.

Na Figura 27 pode-se observar os resultados desta perturbação recorrendo ao algoritmo da correlação de *frames* consecutivos. Nesta figura verifica-se que quando a POF se encontra imóvel, a correlação é constante (quase 1 quando os *frames* estão mais correlacionados) até ao instante em que ocorreu a perturbação, aproximadamente no instante 6-7 segundos. Seguidamente a correlação vai estabilizar até voltar a ser constante próximo de 1. No gráfico da derivada pode-se observar o mesmo raciocínio, no entanto quando a POF está imóvel, os valores tendem para 0.



a)



b)

Figura 27 - Valor da correlação de *frames* consecutivos e sua derivada para uma perturbação positiva de 6,25 cm a) sem filtragem e b) com filtragem, em função do tempo

Pode-se também observar, através da Figura 27, que a filtragem melhora bastante os resultados obtidos por este algoritmo, uma vez que minimiza o ruído existente. No entanto, para casos onde existe muito ruído, é difícil (se não impossível) identificar em que instante ocorreu a perturbação, especialmente se existir mais do que uma perturbação em instantes diferentes.

De qualquer forma, visto que na maioria dos ensaios o filtro passa-baixo melhora bastante os resultados obtidos, em testes posteriores apenas serão apresentados os resultados que sofreram filtragem.

No segundo teste foi realizada uma perturbação negativa de 3,75 cm aproximadamente no instante 6 segundos. No entanto, contrariamente ao que aconteceu no teste anterior, em vez de se manter a curvatura após a perturbação, esta ficou solta originando pequenos movimentos ao regressar ao seu estado original como se pode observar nos resultados da Figura 28, recorrendo ao mesmo algoritmo.

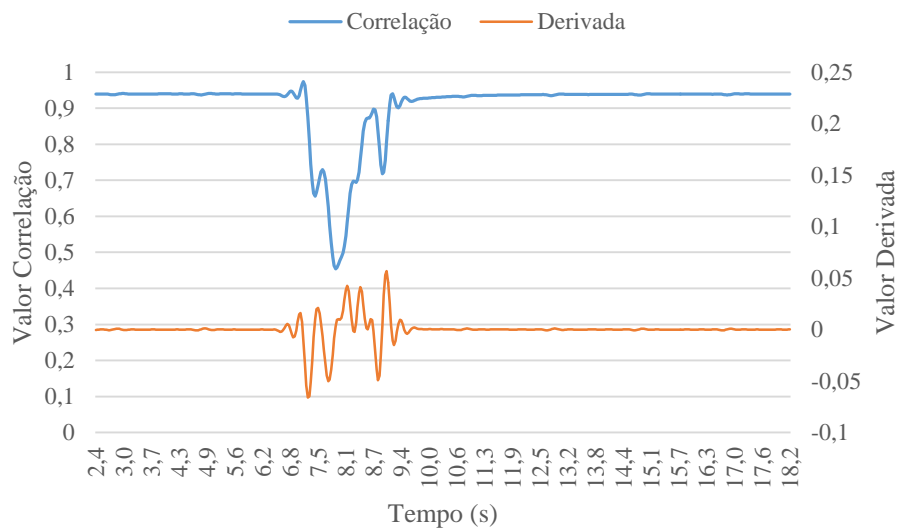


Figura 28 - Valor da correlação de *frames* consecutivos e sua derivada para uma perturbação negativa de 3,75 cm, em função do tempo

Através do algoritmo que calcula a intensidade média de cada *frame* é também possível identificar facilmente o instante de perturbação, representado pelo pico aproximadamente aos 7 segundos, como se pode averiguar na Figura 29.

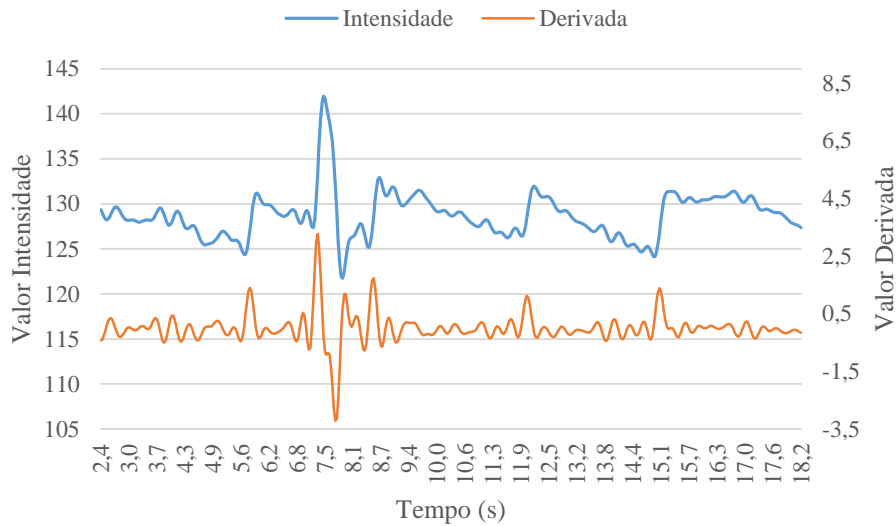


Figura 29 - Valor da intensidade média de cada *frame* e sua derivada para uma perturbação negativa de 3,75 cm, em função do tempo

Recorrendo ao algoritmo que correlaciona o *frame* atual com um *frame* inicial obtêm-se igualmente excelentes resultados. No entanto, estes resultados, são dificilmente interpretáveis uma vez que seria de esperar que, quando a POF está imóvel, o valor de correlação tendesse para 1 (quando os *frames* estão mais correlacionados). Esta dificuldade de interpretação apenas é ultrapassável através da observação da sua derivada, como se pode verificar na Figura 30.

Assim, e considerando que se obtêm melhores resultados utilizando o algoritmo que correlaciona *frames* consecutivos e o algoritmo que calcula a intensidade média de *frames*, este algoritmo não voltará a ser utilizado posteriormente.

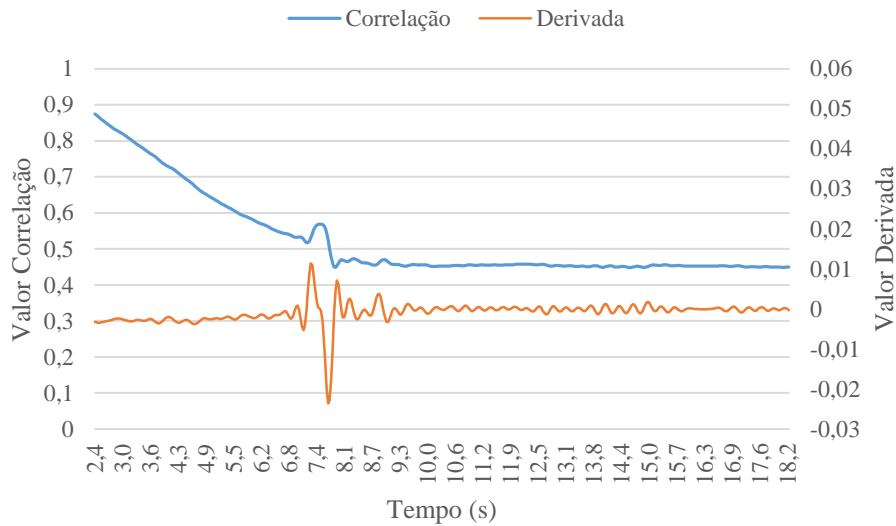


Figura 30 - Valor da correlação do *frame* atual com o inicial e sua derivada para uma perturbação negativa de 3,75 cm, em função do tempo

O terceiro teste é igual ao teste anterior, no entanto realizou-se uma perturbação com 6,25 cm. Tal como já foi mostrado anteriormente, todos os algoritmos permitem facilmente identificar os instantes das perturbações e o mesmo se pode observar nas Figuras 31 e 32 onde estão representados os valores de correlação e intensidade em função do tempo.

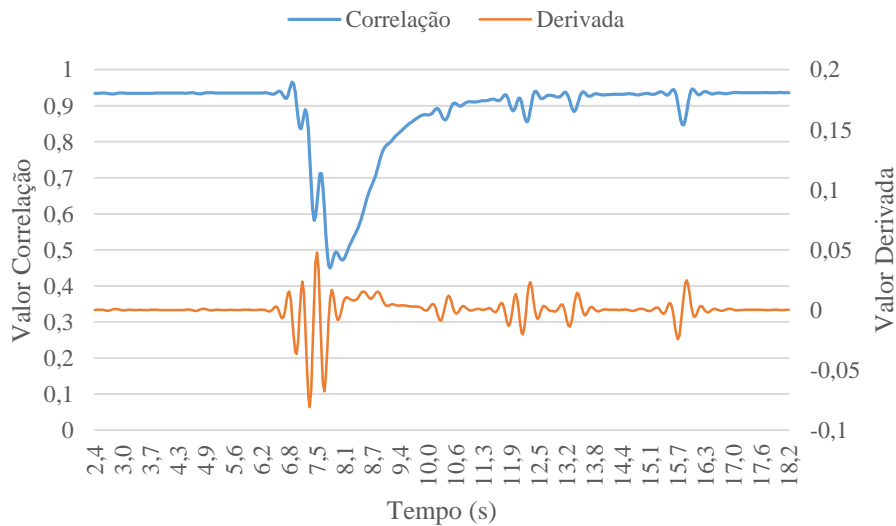


Figura 31 - Valor da correlação de *frames* consecutivos e sua derivada para uma perturbação negativa de 6,25 cm, em função do tempo

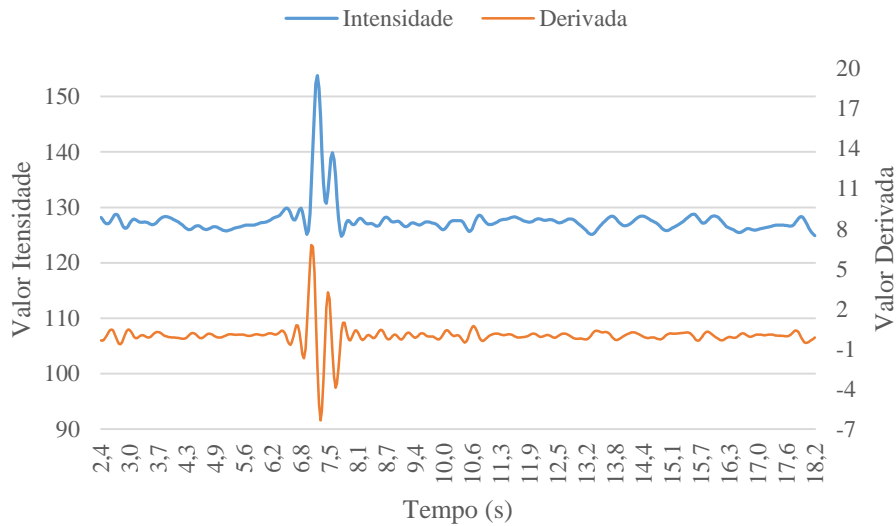


Figura 32 - Valor da intensidade média de cada *frame* e sua derivada para uma perturbação negativa de 6,25 cm, em função do tempo

Tal como se pode verificar nas figuras anteriores, especialmente através da Figura 29 e 32 onde se utiliza o algoritmo que calcula a intensidade média de cada um dos *frames*, é possível estabelecer uma relação entre a amplitude da perturbação e os valores médios de pico. Esta relação, embora menos evidente, também se verifica utilizando o algoritmo de correlação.

Para se observar mais facilmente tal relação, calculou-se o quociente entre valores médios na perturbação (janela de valores que apenas engloba os picos causados por essa perturbação) e os valores médios antes da perturbação. Salienta-se que as janelas utilizadas abrangem os valores de 60 *frames*. Assim, na Figura 33 e 34 observam-se estes resultados utilizando, respetivamente, a correlação de *frames* consecutivos e a intensidade média de *frames*, em função das amplitudes de perturbação aplicadas.

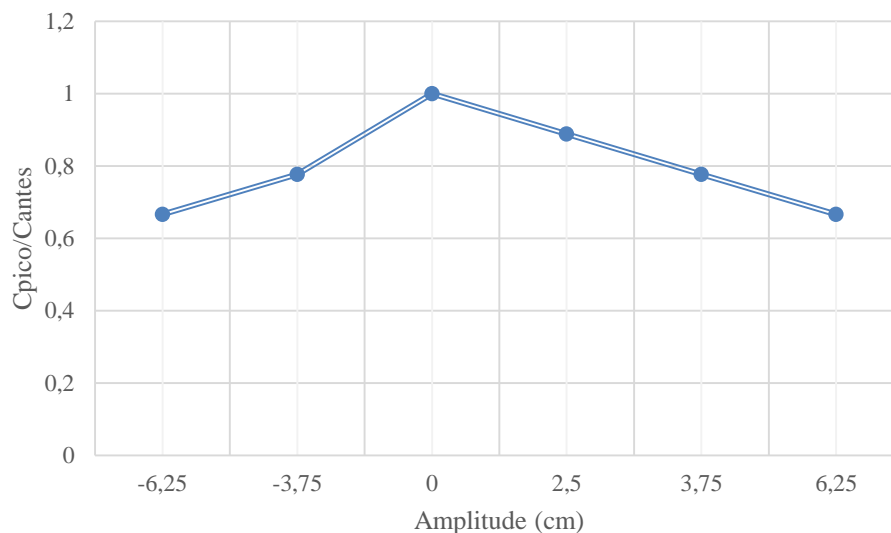


Figura 33 - Quociente do valor médio da correlação de *frames* consecutivos no pico e antes da perturbação, em função da amplitude (as linhas são guias visuais)

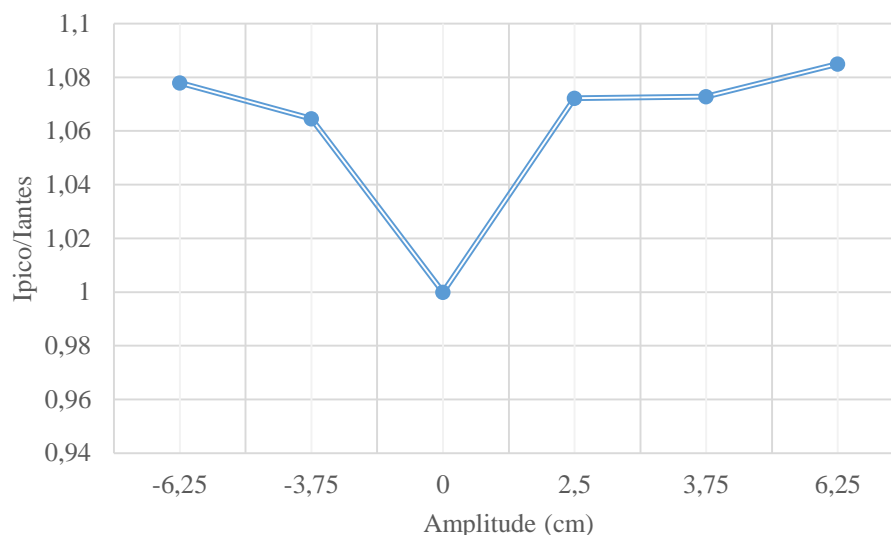
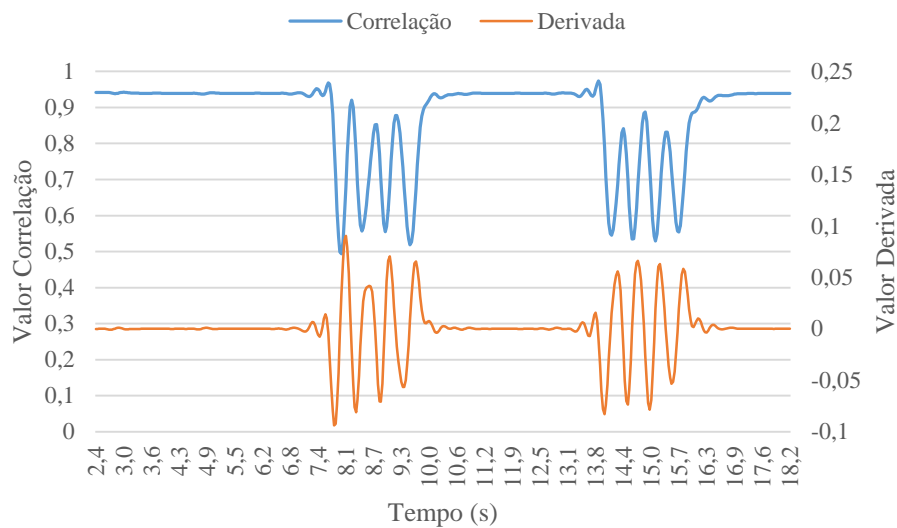


Figura 34 - Quociente do valor médio da intensidade de *frames* no pico e antes da perturbação, em função da amplitude (as linhas são guias visuais)

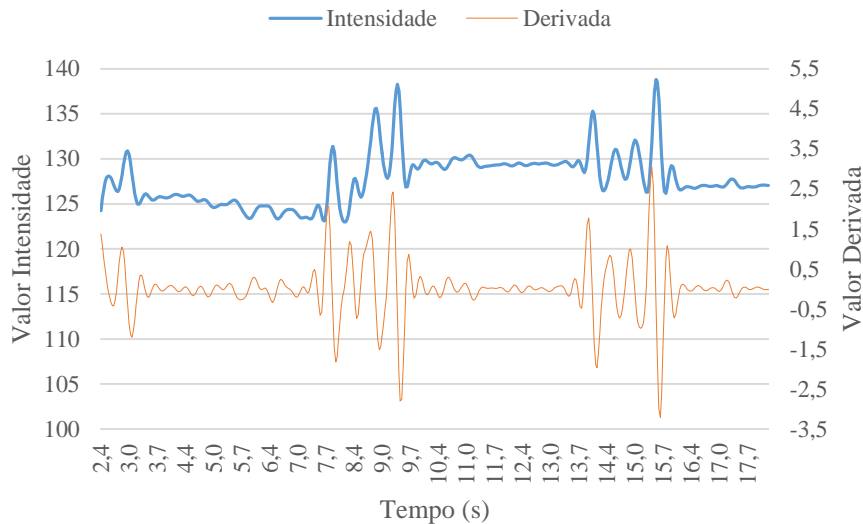
Através da observação da Figura 33, pode-se concluir que à medida que se aumenta a amplitude de perturbação, o rácio entre os valores médios de pico e os valores médios antes da perturbação diminuem. De forma semelhante, através da observação da Figura 34 pode-se concluir que aumentando a amplitude, o rácio anteriormente referido também aumenta. Tal como se verifica nas duas figuras anteriores, na amplitude 0 a POF está imóvel e portanto o quociente é 1.

Como já se verificou através da análise dos gráficos anteriores, este sensor ótico deteta com grande facilidade movimentos que ocorram na fibra, especialmente se forem perturbações isoladas. No entanto, também é possível detetar impactos tal como se verifica através dos resultados obtidos pelo quarto teste, onde se efetuaram batimentos na mesa de trabalho, sob a qual se encontrava o sensor ótico.

Neste teste foram efetuados 4 batimentos que se iniciaram aproximadamente no instante 7 segundos e que se voltaram a repetir aproximadamente no instante 13 segundos. Pode-se observar os resultados recorrendo ao algoritmo de correlação de *frames* consecutivos e ao algoritmo que calcula a intensidade média dos *frames*, na Figura 35 a) e 35 b), respetivamente.



a)



b)

Figura 35 - Valor da a) correlação de *frames* consecutivos e da b) intensidade média de cada *frame* e suas derivadas para uma perturbação com batimentos, em função do tempo

Através da figura anterior é possível observar que cada um dos picos representa um batimento, sendo muito facilmente identificável os dois conjuntos de 4 batimentos.

3.4.Considerações Finais

Através dos resultados enunciados na secção anterior, pode-se afirmar que o sensor ótico implementado nesta dissertação é viável de ser aplicado como um sistema de SHM, uma vez que tem grande facilidade de identificar perturbações causadas por movimentos da fibra ou por impactos em zonas adjacentes.

É também importante referir que o sensor permite estabelecer relações entre a amplitude de perturbação e o quociente entre os valores médios de pico e os valores médios antes da perturbação. Assim, tal como já foi referido, nestes testes um aumento da amplitude causa uma diminuição do quociente de correlação e um aumento do quociente de intensidade.

Estima-se que o melhor algoritmo para identificação destas perturbações é o algoritmo que calcula a intensidade média dos *frames*, uma vez que para além de permitir identifica-las facilmente, permite também associar com maior facilidade o quociente anteriormente referido a uma amplitude de perturbação. Este algoritmo também tem a vantagem de apresentar uma maior velocidade de processamento de imagens relativamente aos restantes. No entanto, é

importante referir que o algoritmo que calcula a correlação de *frames* consecutivos é também um excelente algoritmo para a deteção de perturbações.

4. Testes com Vibração

No capítulo anterior descreveu-se a implementação de um sensor ótico e verificou-se que este apresenta uma boa aplicabilidade, devido à sua grande facilidade em identificar perturbações causadas por movimentos da fibra ou por impactos em zonas adjacentes. De modo atingir os objetivos inicialmente definidos, o sensor criado no capítulo anterior será acoplado numa estrutura de forma a estudar a sua capacidade de identificar perturbações causadas nessa mesma estrutura. Desta forma, neste capítulo irá ser explicada a configuração adotada e serão reportados resultados de testes com vibração realizados no Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico.

4.1. Descrição

A estrutura metálica utilizada neste capítulo é constituída por uma placa de alumínio com as dimensões $55,5 \times 67,5 \times 0,1 \text{ cm}^3$ onde foi fixo, na sua diagonal principal, um segmento de uma POF de 86 cm recorrendo a uma cola epóxi. Salienta-se que este segmento de POF pertence ao sensor ótico apresentado no capítulo anterior e tem um comprimento total de 4 m. A placa de teste e o segmento da fibra ótica podem ser observados na Figura 36.



Figura 36 – Placa de teste com segmento de POF

É importante salientar que o sensor ótico apresenta todas as configurações definidas no capítulo anterior. Assim, tal como já foi referido, numa extremidade da POF encontra-se uma

Raspicam, conectada a um RPI que comunica remotamente com o computador através do *Matlab* e na outra extremidade encontra-se um laser semiconductor, ligado a uma fonte de alimentação. De modo a identificar as perturbações recorrendo aos padrões *speckle* obtidos pela câmara, serão utilizados os algoritmos de correlação de *frames* consecutivos e cálculo da intensidade média de cada um dos *frames*. Desta forma, qualquer perturbação que ocorra na estrutura deverá ser prontamente identificada pelo sensor ótico implementado.

Nestes testes, para simular uma perturbação em espaço-livre, a placa de teste foi suspensa e perturbada recorrendo a um excitador de vibrações 4809 da Brüel & Kjær. Este instrumento, é bastante utilizado em testes de vibração e atinge forças máximas de 45 N (pico) e uma frequência máxima de 20 kHz. Para além disto, apresenta baixo movimento transversal e baixa distorção, garantido excelentes desempenhos [25]. Na Figura 37 pode-se observar a placa de teste suspensa no laboratório de vibrações e na Figura 38 o excitador de vibrações utilizado.

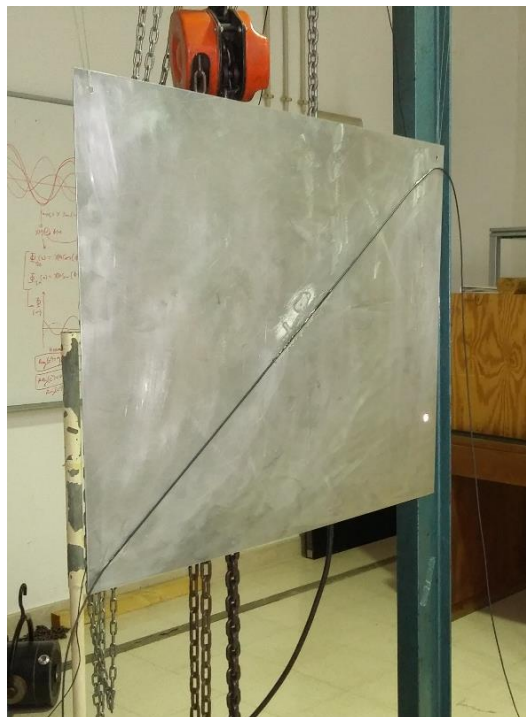


Figura 37 – Placa de teste suspensa



Figura 38 - Excitador de vibrações utilizado nos testes

Para obter melhores resultados, o excitador foi colocado num dos cantos da estrutura metálica com o intuito de excitar o maior número de modos de vibração possível.

Para além disto, e tendo em conta que a força aplicada pelo excitador era constante, foi necessário calcular as frequências de ressonância da placa utilizada, ou seja, as frequências para as quais a estrutura vibra com maior amplitude à mínima força aplicada. Assim, atingindo maiores vibrações, garantem-se erros experimentais menores e, conseqüentemente conseguem-se melhores resultados com este sensor.

A ressonância mecânica, ou simplesmente ressonância, entende-se pela tendência do sistema físico para oscilar à sua máxima amplitude. Neste fenómeno observa-se a transferência de energia de um sistema oscilante para uma estrutura, devido à aproximação da frequência de excitação às frequências naturais da estrutura [26], [27].

As frequências naturais de um material são frequências com as quais, após um distúrbio inicial, o material oscila sem a presença de forças externas. Operando a estas frequências, mesmo pequenas amplitudes de excitação podem produzir elevadas amplitudes de vibração do sistema e, eventualmente, conduzir ao seu colapso [26], [27].

Contrariamente à ressonância, existe também o fenómeno da antirressonância que é exatamente o seu oposto, ou seja, onde a vibração é sempre pequena.

Salienta-se que cada frequência de ressonância corresponde a um modo de vibração único, assim, noutras frequências (entre as ressonâncias), a forma com que a placa vibra é uma combinação dos dois modos correspondentes (ponderados pelas distâncias às frequências de ressonância).

As frequências de ressonância correspondentes aos 6 primeiros modos de vibração desta placa de teste foram calculadas numericamente recorrendo ao *software* ANSYS. Assim obtiveram-se as frequências de 1,8999 Hz, 5,2532 Hz, 11,551 Hz, 18,42 Hz, 20,109 Hz e 32,801 Hz. Na Figura 39 pode-se observar a deformação da placa de teste em função dos diferentes modos de vibração, onde a deformação máxima e mínima são representadas a vermelho e a azul, respectivamente.

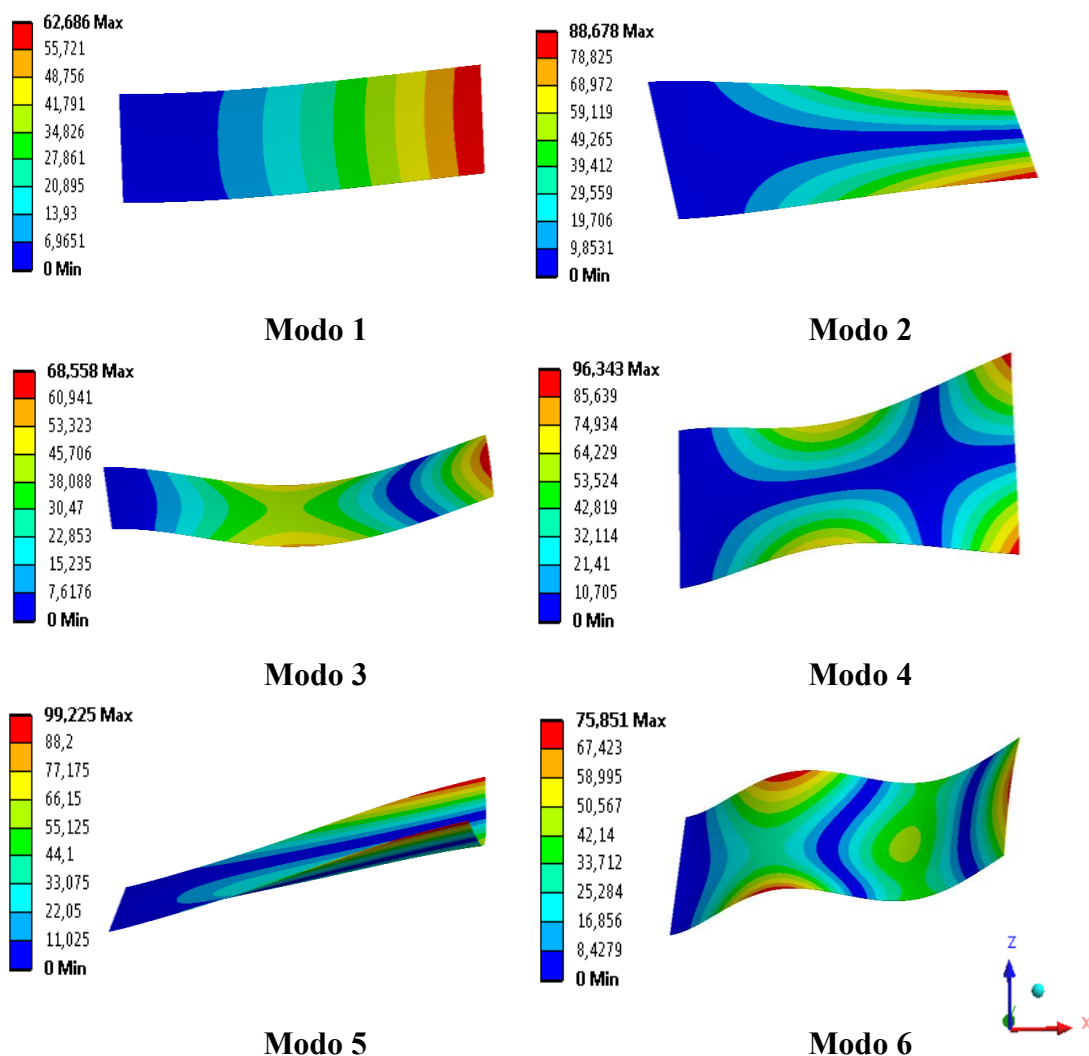


Figura 39 – Deformação da placa de teste em função do modo de vibração

As frequências de ressonância obtidas anteriormente podem ter algumas discrepâncias das frequências de ressonância do sistema real, uma vez que existe a dificuldade de reproduzir (em simulação) com exatidão as dimensões e a massa da placa de teste. Assim, com o auxílio dos professores Nuno Maia e André Carvalho do DEM foi possível identificar, através de um diagrama de Bode obtido a partir de dados experimentais, as frequências de ressonância desta placa de alumínio no intervalo [0, 100] Hz. O algoritmo utilizado analisa os dados obtidos para a força e para a velocidade da vibração e, através de uma transformada de Fourier é possível obter-se as amplitudes e as fases da vibração aplicada na placa de alumínio. Na Figura 40 pode-se observar essas amplitudes e fases em função da frequência dessa vibração.

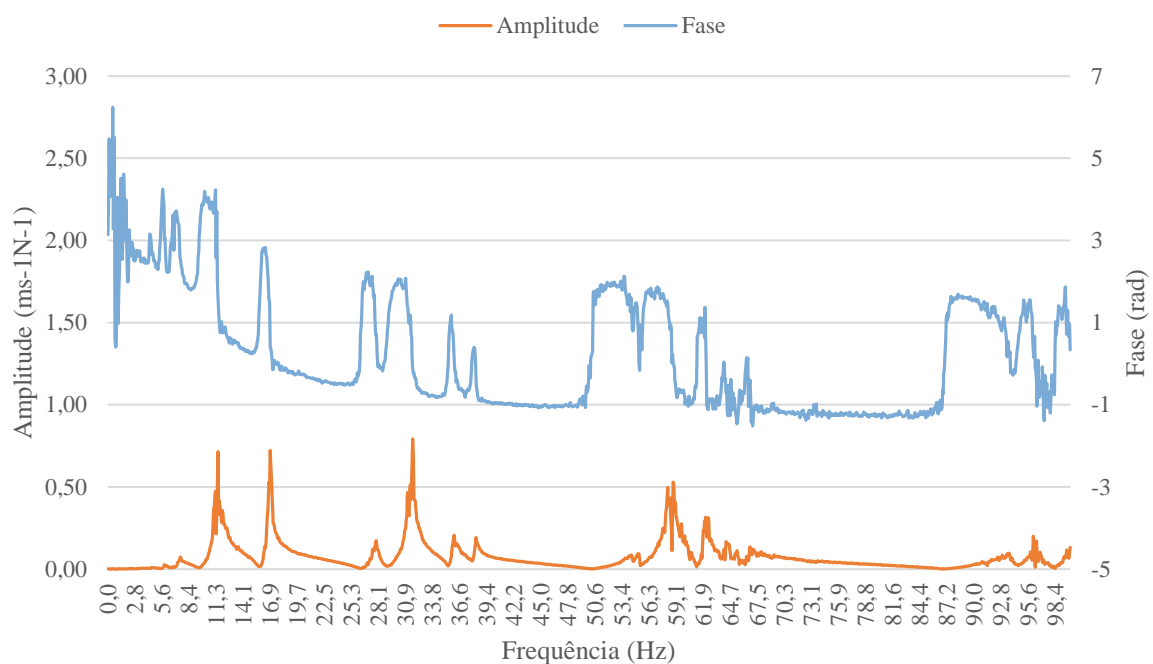


Figura 40 - Resposta da vibração em amplitude e fase para a placa de alumínio

Visto que uma ressonância é uma frequência onde a amplitude é máxima sob o efeito de uma força reduzida, as frequências de ressonância podem ser identificadas por um pico na amplitude e por uma mudança rápida da fase.

De entre todas as frequências de ressonância observadas na Figura 40, para efeitos experimentais escolheram-se apenas as frequências de ressonância reais de 7,6 Hz, 11,4 Hz, 16,9 Hz, 27,9 Hz e 36,0 Hz, que tal como seria de esperar são ligeiramente diferentes das calculadas através do ANSYS.

No entanto, durante a realização dos testes não foi possível identificar com exatidão as frequências de ressonância referidas anteriormente. Desta forma, os testes foram realizados com as frequências de 7,5 Hz, 11 Hz, 16 Hz, 28 Hz e 36 Hz. Para além disto, foram também utilizadas as frequências de 2 Hz, 50 Hz e 60 Hz para verificar o comportamento do sensor ótico fora da ressonância.

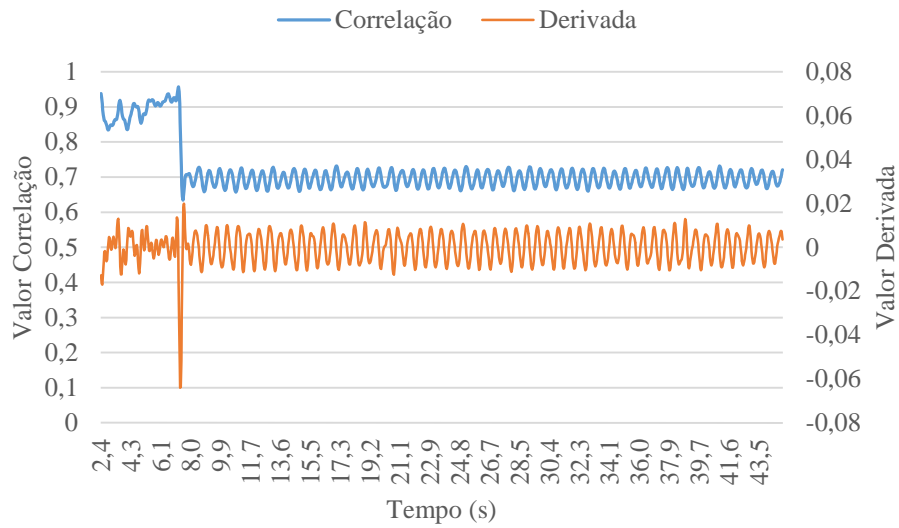
Embora tenham sido escolhidas estas frequências, é importante salientar que a *Raspicam* opera com uma taxa de transferência de imagens de 30 fps, ou seja, através do teorema de amostragem de Nyquist, é possível concluir que este sensor ótico está limitado a uma frequência máxima de 15 Hz. Assim, para frequências maiores não será possível reproduzir o sinal original.

4.2. Resultados

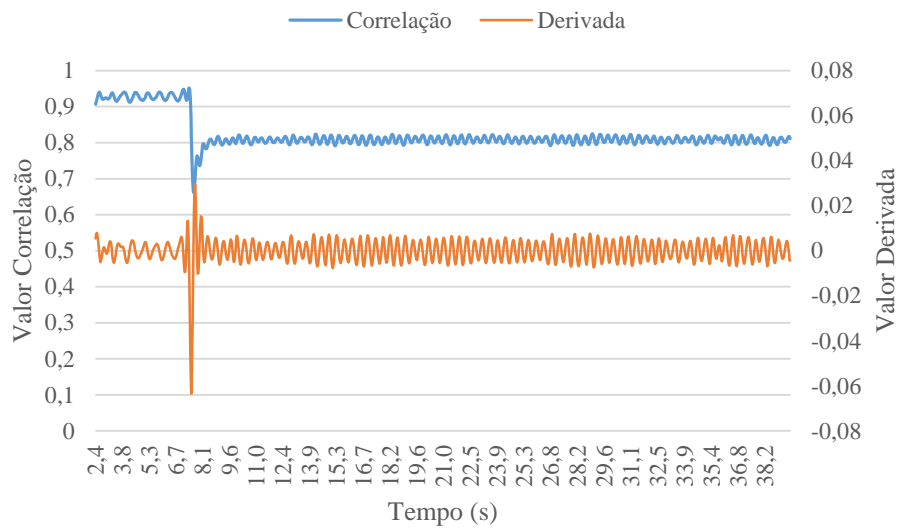
Para avaliar a resposta a variações de frequência, a placa foi sujeita a uma perturbação sinusoidal com as frequências previamente definidas e com amplitude constante excitada com um sinal elétrico de 1 Vrms. Posteriormente, foram feitas duas baterias de testes onde se aplicou uma perturbação sinusoidal com uma frequência constante (7,5 Hz e 16 Hz) mas com uma variação na sua amplitude (excitada com um sinal elétrico de 1 Vrms a 6 Vrms). É importante salientar que em todos os testes, a perturbação inicia aproximadamente no instante 7 segundos, quando o excitador é ligado.

Para além disto, foi também realizado um teste onde se verificou como o sistema se comportava quando a perturbação termina. Desta forma, tal como acontece nos testes anteriores, a perturbação inicia aproximadamente no instante 7 segundos, mas neste caso termina aproximadamente no instante 36 segundos. A perturbação utilizada é uma função sinusoidal com 16 Hz de frequência e amplitude constante excitada com 1 Vrms.

Relativamente ao teste da variação da frequência a amplitude constante, pode-se observar na Figura 41 dois exemplos de perturbações (16 Hz e 28 Hz) analisadas com o recurso ao algoritmo que correlaciona *frames* consecutivos. Na Figura 42 observam-se as mesmas perturbações mas recorrendo ao algoritmo que calcula a intensidade média de cada *frame*.

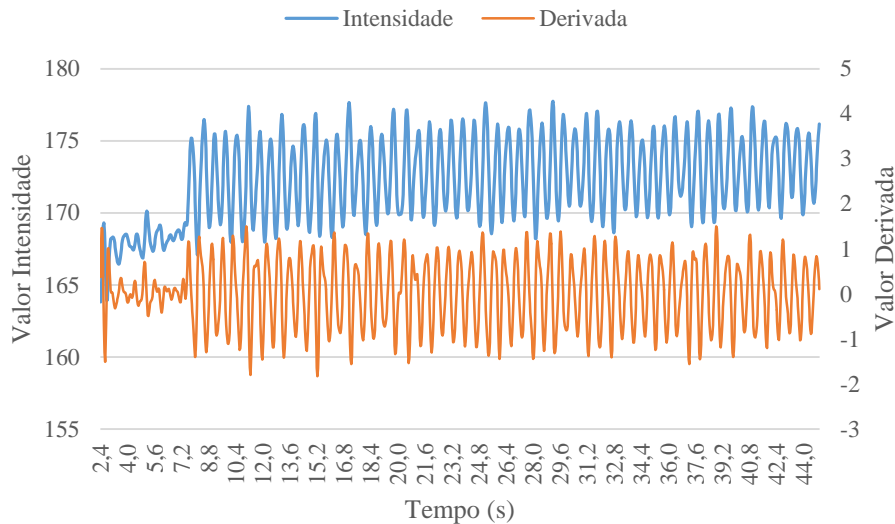


a)

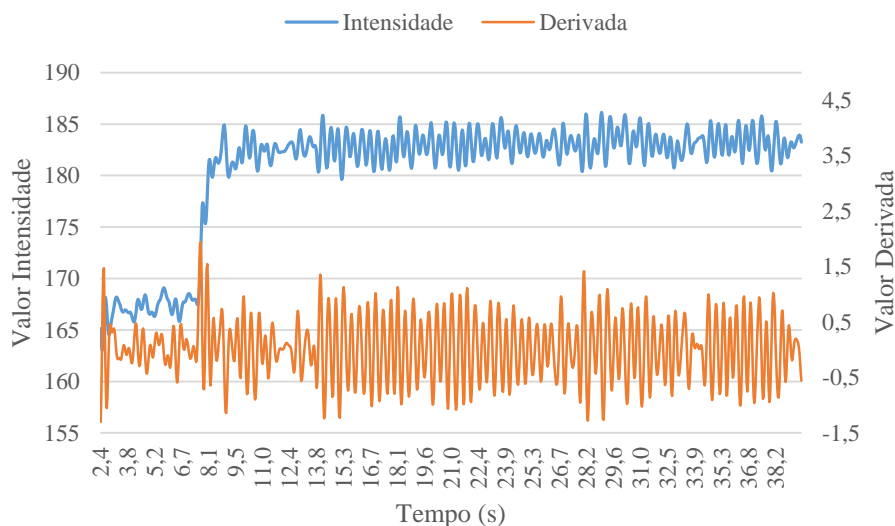


b)

Figura 41 - Valor da correlação de frames consecutivos e sua derivada para uma perturbação de a) 16 Hz e b) 28 Hz, em função do tempo



a)



b)

Figura 42 - Valor da intensidade média de cada *frame* e sua derivada para uma perturbação de a) 16 Hz e b) 28 Hz, em função do tempo

Através de uma análise prévia de todos os resultados obtidos neste teste, pode-se afirmar que independentemente da frequência e dos algoritmos utilizados, é possível identificar o instante em que a perturbação ocorre. Esta conclusão pode ser confirmada através das figuras apresentadas anteriormente.

É possível obter diversas conclusões através da visualização dos resultados obtidos, podendo verificar-se que a diferença entre os valores da correlação e intensidade antes e após a perturbação dependem da frequência do sinal de excitação. Assim, de modo a analisar estas variações, calcularam-se os quocientes entre os valores médios após e antes da perturbação

utilizando o algoritmo da correlação (Δc) e da intensidade (Δi). De modo a entender o significado destes rácios, pode-se observar na Figura 43 a sua demonstração.

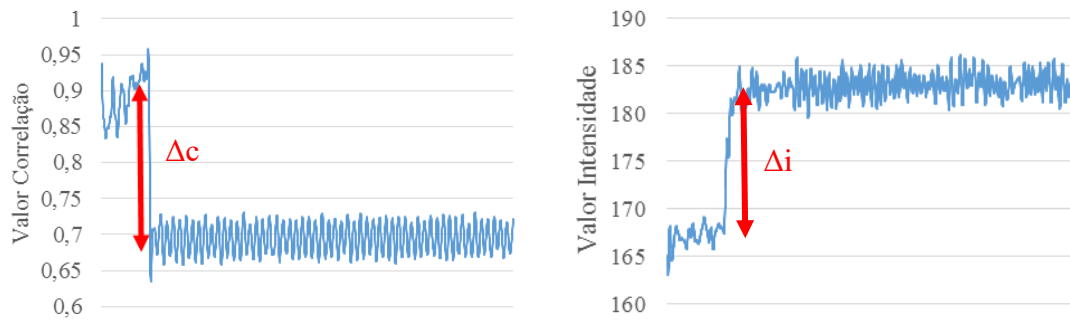


Figura 43 – Representação de Δc e Δi

Na Figura 44 e 45 pode-se observar Δc e Δi , respetivamente, em função da frequência de perturbação.

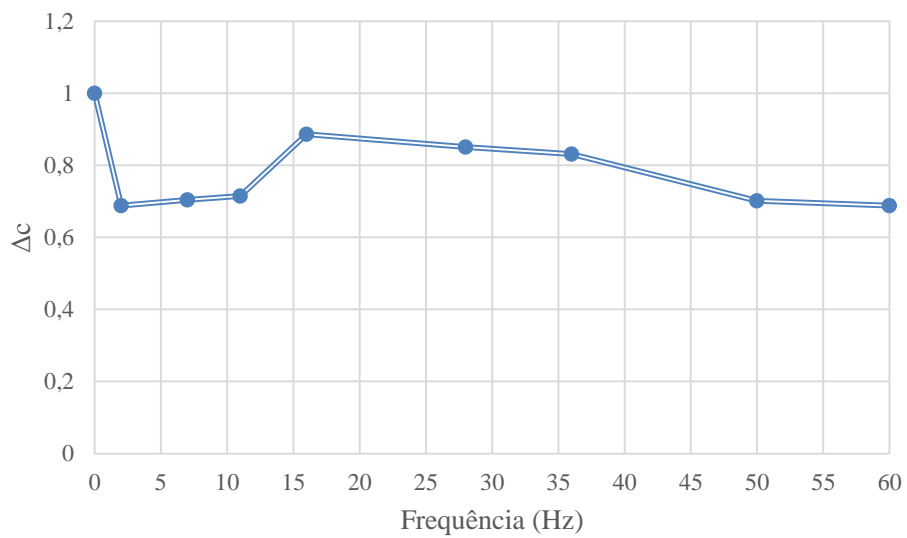


Figura 44 – Quociente do valor médio da correlação de *frames* consecutivos após e antes da perturbação, em função da frequência (as linhas são guias visuais)

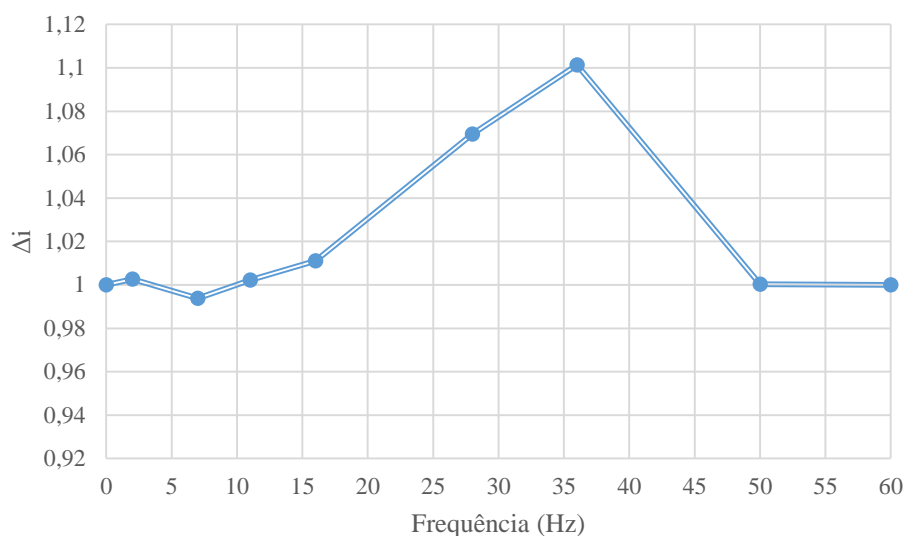


Figura 45 – Quociente do valor médio da intensidade de cada um dos *frames* após e antes da perturbação, em função da frequência (as linhas são guias visuais)

Através da observação das figuras anteriores, pode-se identificar logo à partida que o algoritmo que calcula a intensidade média de cada *frame* é aquele que apresenta uma maior variação nos valores do quociente referido. Salienta-se que neste algoritmo o valor de referência é 1, quando a estrutura se encontra em repouso, representado pela frequência 0 Hz.

Para além disto, em qualquer um dos algoritmos, verifica-se que os rácios apresentam maiores variações entre a frequência de 16 Hz e a frequência de 36 Hz, sendo este o intervalo onde as ressonâncias da placa de alumínio são mais intensas.

No entanto, salienta-se que qualquer perturbação que ocorra com uma frequência dentro do intervalo [16, 36] Hz, mas que não seja uma frequência de ressonância, tem possibilidades de não ser identificada. De qualquer forma, se esta situação se verificar, não será problemática uma vez que como seria de esperar, as frequências que não são de ressonância apresentam valores muito semelhantes aos de referência (quando a estrutura está em repouso), devido às reduzidas vibrações causadas. Perturbações com tais frequências não serão problemáticas para a saúde estrutural.

Visto que as maiores variações são observáveis nas frequências de ressonância, pode-se concluir através da observação da Figura 44 que, de forma geral, à medida que se aumenta a frequência (entre ressonâncias), o rácio entre os valores médios após e antes da perturbação, Δc , vai diminuir. De forma semelhante, pode-se concluir através da observação da Figura 45

que o aumento a frequência de ressonância resulta também num aumento do rácio entre os valores médios após e antes da perturbação Δi .

Para além disto, a visualização dos resultados obtidos também permite estabelecer uma relação entre a frequência utilizada e a amplitude de oscilação (Δr) do valor da correlação/intensidade após a perturbação, tal como se observa na Figura 41 e 42. Na Figura 46 demonstra-se a amplitude de oscilação Δr .

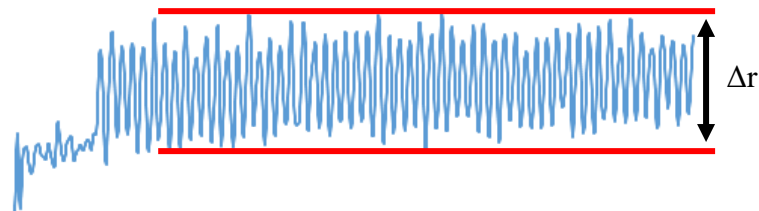


Figura 46 – Amplitude de oscilação

A relação entre Δr e a frequência de perturbação pode ser observada na Figura 47 e 48 tendo em conta os diferentes algoritmos de análise.

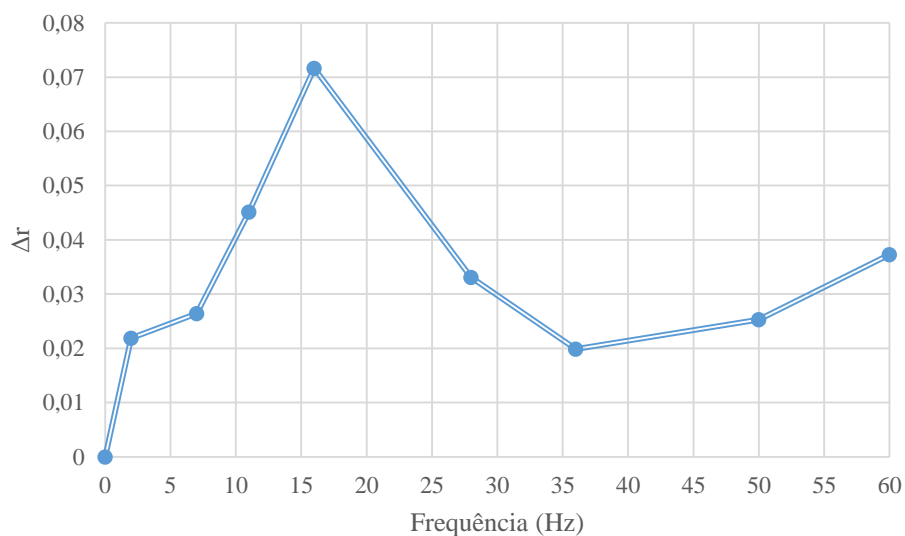


Figura 47 – Amplitude de oscilação após a perturbação, utilizando a correlação de *frames* consecutivos, em função da frequência (as linhas são guias visuais)

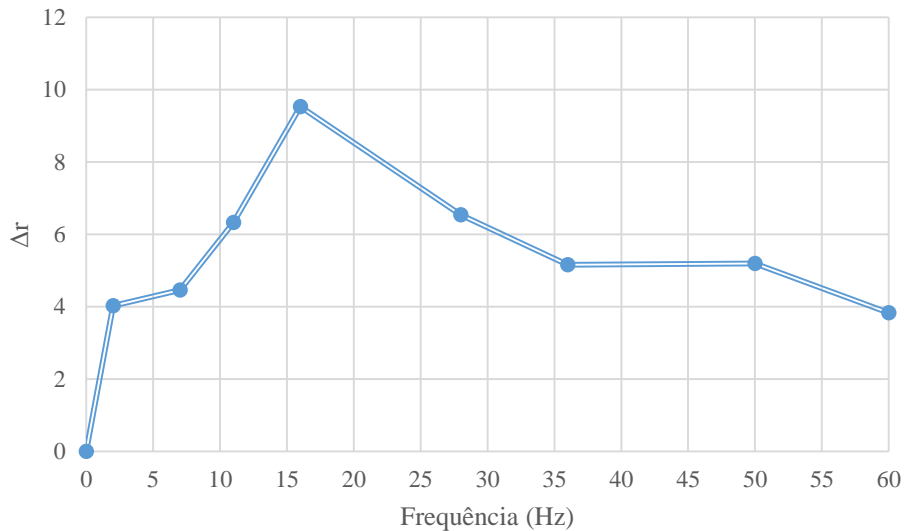
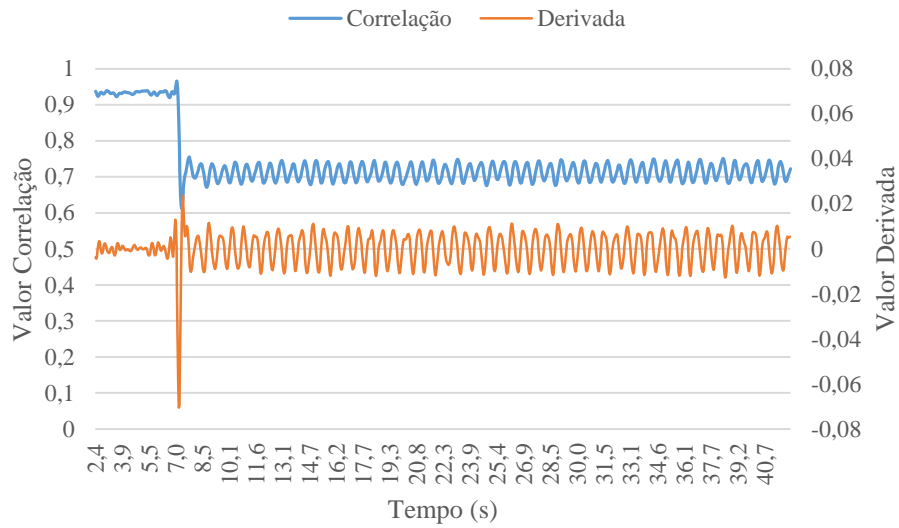


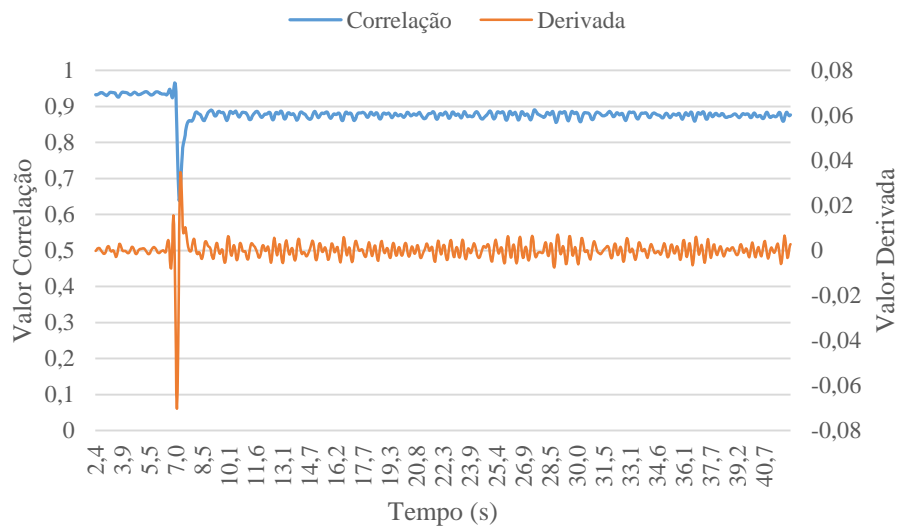
Figura 48 - Amplitude de oscilação após a perturbação, utilizando a intensidade média, em função da frequência (as linhas são guias visuais)

Através da observação dos resultados anteriores, pode-se concluir que um aumento da frequência de perturbação vai causar um aumento da amplitude de oscilação (Δr) detetada pelo sistema após a perturbação. Este aumento apenas se verifica até à frequência de 16 Hz uma vez que, tal como já foi dito anteriormente, a *Raspicam* opera com uma taxa de transferência de imagens de 30 fps, limitando este sensor ótico a uma frequência máxima amostragem de aproximadamente 15 Hz. Assim, para frequências inferiores a 16Hz é possível obter exatamente a amplitude e perturbação do sinal original. No entanto, para valores superiores é possível identificar a existência da perturbação embora amplitude obtida seja resultado de subamostragens. Devido a estas subamostragens o novo aumento da amplitude na Figura 47 não deverá ser valorizado.

Relativamente ao teste da variação da amplitude a frequência constante (7,5 Hz e 16 Hz), pode-se observar na Figura 49 e 50 apenas dois exemplos do universo de testes realizados. Estas figuras apresentam perturbações com uma frequência de 16 Hz e uma amplitude de 2 e 4 Vrms. No entanto, salienta-se que na Figura 49 utiliza-se o algoritmo que correlaciona *frames* consecutivos, enquanto que na Figura 50 é utilizado o algoritmo que calcula a intensidade média de cada um dos *frames*.

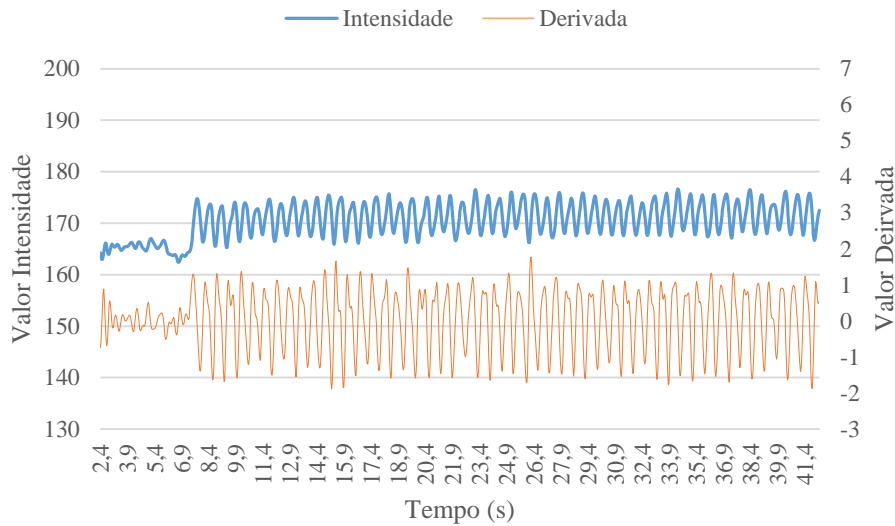


a)

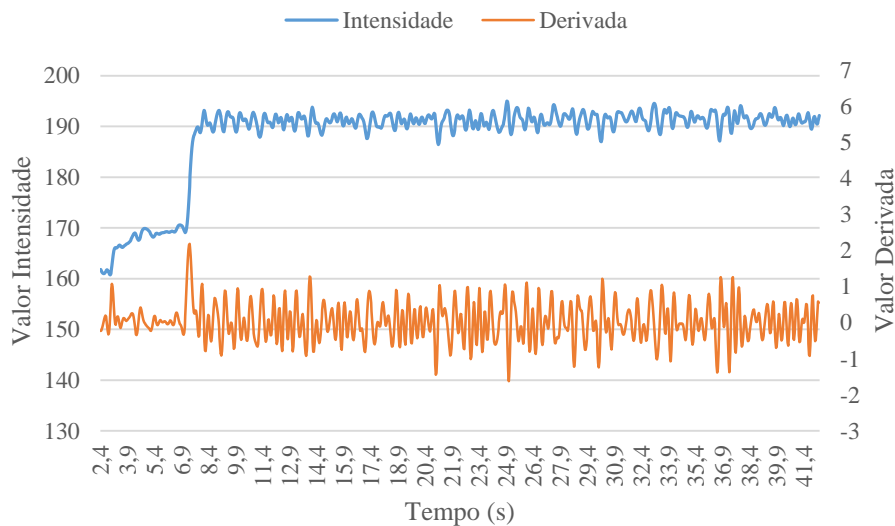


b)

Figura 49 - Valor da correlação de frames consecutivos e sua derivada, produzido por um sinal sinusoidal de 16 Hz e a) 2 Vrms e b) 4 Vrms, em função do tempo



a)



b)

Figura 50 - Valor da intensidade média de cada *frame* e sua derivada, produzido por um sinal sinusoidal de 16 Hz e a) 2 Vrms e b) 4 Vrms, em função do tempo

Embora não sejam apresentados mais resultados, é também importante salientar que, salvo pequenas exceções, as perturbações são sempre identificadas independentemente da amplitude e quer usando uma frequência de 7,5 Hz ou 16 Hz.

Tal como aconteceu anteriormente, pode-se afirmar que o melhor algoritmo para analisar os resultados obtidos neste teste é o cálculo dos quocientes entre os valores médios após e antes da perturbação através da correlação (Δc) e da intensidade (Δi). Desta forma, observa-se na Figura 51 e 52 os rácios obtidos pelos dois algoritmos em função da amplitude de perturbação.

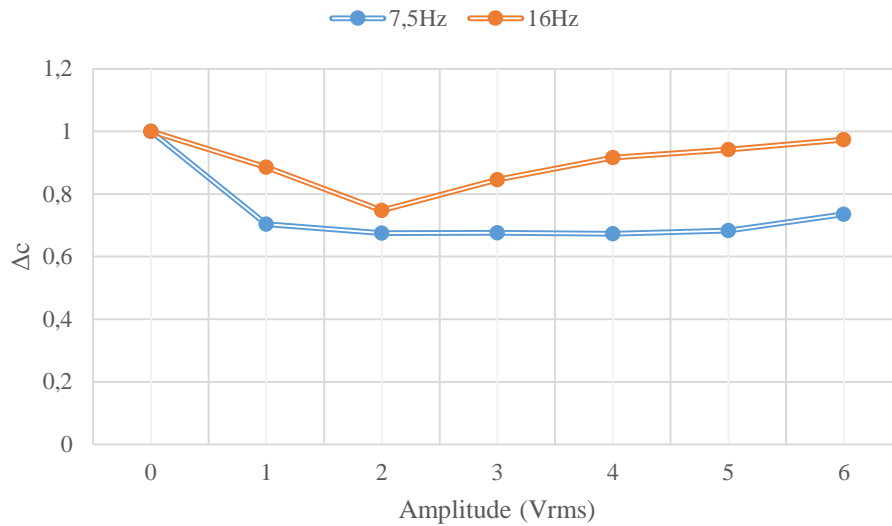


Figura 51 – Quociente do valor médio da correlação de *frames* consecutivos antes e após a perturbação, em função da amplitude (as linhas são guias visuais)

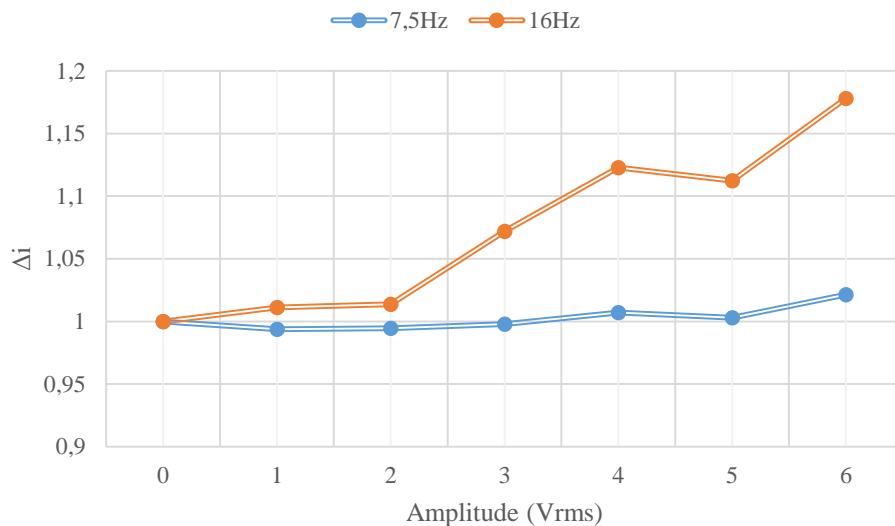


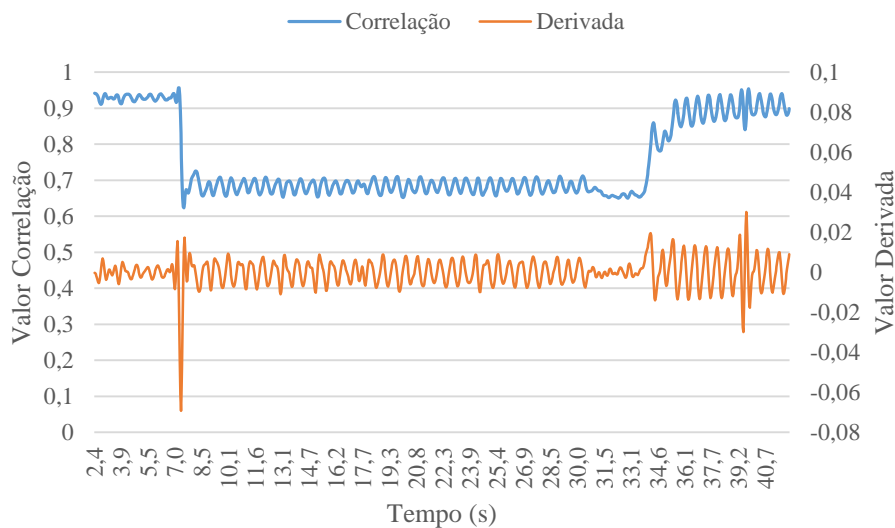
Figura 52 – Quociente do valor médio da intensidade de cada um dos *frames* antes e após a perturbação, em função da amplitude (as linhas são guias visuais)

Tal como acontece nos testes de variação da frequência a amplitude constante, onde são capturadas perturbações mais intensas nas frequências de ressonância do intervalo [16, 36] Hz, o mesmo se pode verificar neste teste, nas Figuras 51 e 52, onde as variações nos valores de Δc e Δi são sempre maiores para 16 Hz do que para 7,5 Hz. Para a frequência de ressonância de 7,5 Hz os resultados são praticamente constantes independentemente da amplitude.

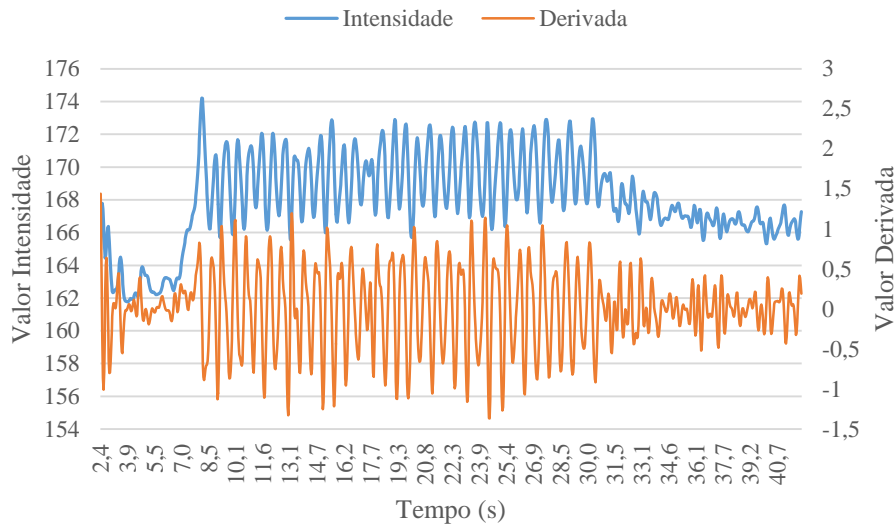
Pode-se também verificar mais uma vez que o algoritmo que calcula a intensidade média de cada *frame* é aquele que apresenta maiores variações, apresentando assim uma maior sensibilidade na detecção de perturbações. Relativamente ao algoritmo de correlação, pode-se afirmar que as variações não são tão evidentes, mas permitem de igual forma tirar a mesma conclusão.

Assim, através da análise das Figuras 51 e 52, pode-se concluir que os quocientes do valor médio da correlação e intensidade após e antes da perturbação (Δc e Δi , respetivamente) aumentam com o aumento da amplitude de perturbação. Nestes testes, qualquer algoritmo apresenta bons resultados desde que as frequências de ressonância se encontrem no intervalo [16, 36] Hz.

Finalmente, relativamente ao teste da paragem, pode-se afirmar que ambos os algoritmos permitem identificar o início e o fim da perturbação, embora o fim da perturbação seja identificável mais facilmente recorrendo ao algoritmo de correlação. Volta-se a salientar que perturbação inicia e termina aproximadamente nos instantes 7 e 36 segundos, respetivamente. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 53.



a)



b)

Figura 53 - Valor da a) correlação de *frames* consecutivos e da b) intensidade média de cada *frame* e suas derivadas para uma perturbação de 16 Hz com paragem, em função do tempo

4.3. Considerações Finais

Através da análise dos resultados enunciados anteriormente, pode-se afirmar que qualquer perturbação (vibração) é identificada independentemente da sua frequência, amplitude e algoritmo utilizado. No entanto, devido às características do sistema, as frequências de ressonância existentes no intervalo [16, 36] Hz são aquelas que garantem um melhor desempenho do mesmo.

Analisando os quocientes entre os valores médios da correlação e intensidade após e antes da perturbação (Δc e Δi , respetivamente), pode-se concluir que o quociente da correlação Δc diminui com o aumento da frequência ou diminuição da amplitude de perturbação, enquanto que o quociente da intensidade Δi aumenta quer com o aumento da frequência, quer com o aumento da amplitude. Para além disto, é também possível observar um aumento da amplitude de oscilação (Δr) dos resultados obtidos após a perturbação, causada pelo aumento da frequência.

Assim, é importante salientar que nestes testes, o algoritmo que correlaciona *frames* consecutivos é aquele que permite identificar mais facilmente a ocorrência de perturbação, bem como o instante em que inicia e termina, mas o algoritmo que calcula a intensidade média de cada *frame* é aquele que permite identificar com maior facilidade as variações de amplitude e frequência.

Embora não tenha sido dito anteriormente, é importante explicar que perturbações com frequências que não são de ressonância também são identificadas recorrendo exclusivamente ao algoritmo de correlação. No entanto, como apenas foram estudadas três perturbações com estas frequências, não se pode garantir que em todos os casos estas perturbações são identificadas.

Salienta-se que não foi possível obter o sinal original a partir dos vídeos adquiridos, mesmo para frequências que não ultrapassam o limite de 15 Hz imposto pela *raspicam*.

Finalmente, salienta-se também que os testes foram realizados consecutivamente. Portanto o sensor ótico, que se encontrava suspenso, oscilava após o final de uma perturbação. Essas oscilações, por muito insignificantes que fossem, foram capturadas podendo ter afetado os resultados.

5. Testes de Tração

Na sequência do trabalho realizado no capítulo anterior, neste capítulo serão demonstrados resultados de esforços de tração, realizados na Academia da Força Aérea Portuguesa recorrendo à placa de teste implementada anteriormente.

5.1. Descrição

De modo a realizar estes testes, a placa de teste foi colocada num equipamento designado *Material Test System* (MTS) 810, tal como se pode observar na Figura 54. O MTS 810 permite realizar diferentes tipos de testes estáticos e dinâmicos (exemplo: tração, fadiga, fratura mecânica e durabilidade de componentes) com alta precisão, flexibilidade e desempenho. Este equipamento apresenta a capacidade de realizar testes com diversas configurações, permitindo aplicar perturbações com várias curvas, frequências e forças até 500 kN. Além disso, como apresenta uma grande área de teste (regulável) permite acomodar amostras de diferentes dimensões [28].

Tal como já aconteceu no capítulo anterior, é importante salientar que todos os testes realizados, apresentam a configuração adotada no capítulo 3, ou seja, os padrões *speckle* obtidos por uma extremidade da POF são capturados através de uma *Raspicam* conectada a um RPI que comunica remotamente com o computador através do *Matlab*. Na outra extremidade da POF deveria encontrar-se um laser semiconductor ligado a uma fonte de alimentação. No entanto, devido a problemas técnicos, o laser semiconductor teve de ser substituído por um laser CW Targus AMP02EU com potência ótica de 3,5 mW e um pico máximo entre os 645 nm e 655 nm, de modo a concluírem-se os testes. Este laser é alimentado por duas pilhas AAA (3 Volt DC) [29]

Visto que o laser Targus tem uma potência ótica superior àquele utilizado anteriormente, alguns parâmetros da câmara tiveram de se alterados de modo a evitar a saturação dos padrões *speckle*. Assim, o parâmetro saturação foi alterado para ‘-90’ e o parâmetro brilho para ‘40’.



Figura 54 - MTS 810 com placa de teste

Tal como ocorreu no capítulo 4, de modo a identificar as perturbações que ocorrem na estrutura utilizou-se o algoritmo que correlaciona *frames* consecutivos e o algoritmo que calcula a intensidade média de cada um dos *frames*.

5.2. Resultados

Para averiguar o comportamento do sensor ótico quando sujeito a perturbações mecânicas, foram realizados três ensaios de tração. Salienta-se que nestes testes apenas se realizaram esforços de tração e nunca de compressão. Pode-se observar na Figura 55 a diferença entre estes dois tipos de esforços.

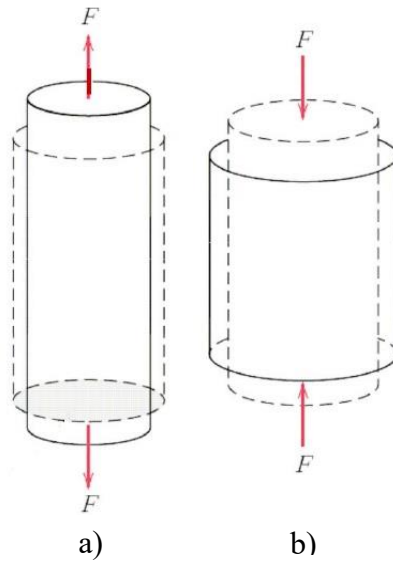


Figura 55 - Esforço de a) Tração e b) Compressão [adaptado de [30]]

No primeiro ensaio aplicou-se uma força com valor médio de 1,5 kN e uma amplitude de variação de $\pm 1,5$ kN, no segundo ensaio uma força com valor médio de 10 kN e uma amplitude de variação de ± 3 kN e no terceiro ensaio uma força com um valor médio de 10 kN e uma amplitude de variação de ± 5 kN. Em cada ensaio, a força média foi aplicada sobre uma variação sinusoidal com uma frequência de 1 Hz, 3 Hz e 6 Hz. Na Figura 56 pode-se observar a evolução temporal da força aplicada nos três ensaios.

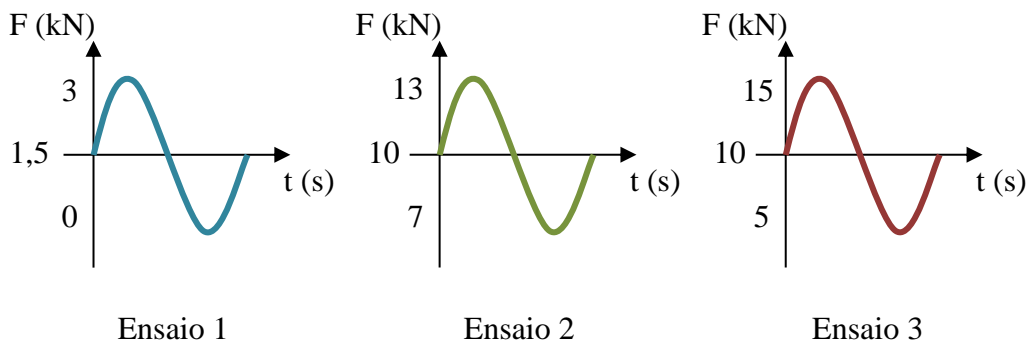


Figura 56 – Evolução temporal da força aplicada nos ensaios de tração realizados

É importante salientar que se escolheram frequências baixas (e afastadas das frequências de ressonância), uma vez que estes testes de tração podem facilmente danificar a placa de teste. Assim, no terceiro ensaio não foi realizado o teste com a frequência de 6 Hz de modo a evitar potenciais deformações.

No entanto, pode-se afirmar que nos restantes testes, e perante estas condições, a estrutura nunca correu o risco de deformar, uma vez que a tensão de cedência do alumínio ($\sigma_c = 300$ MPa) nunca é atingida. A tensão σ é obtida através da fórmula

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (16)$$

onde F é a força aplicada numa determinada secção e A a área dessa secção [31]. Assim, tendo em conta que $A = (1 \times 10^{-3}) \times (555 \times 10^{-3}) m^2$ e que as forças máximas aplicadas em cada um dos ensaios são $F_{1,max}=3$ kN, $F_{2,max}=13$ kN e $F_{3,max}=15$ kN obtêm-se tensões de 5,4 MPa, 23,4 MPa e 27 MPa, que são bastante inferiores à tensão de cedência.

De modo a perceber o tipo de perturbação efetuado pelo MTS 810, pode-se observar na Figura 57, o exemplo de uma perturbação sinusoidal com uma força média de 1,5 kN, uma amplitude de variação de $\pm 1,5$ kN e uma frequência de 6 Hz. Nos restantes testes, as perturbações são semelhantes.

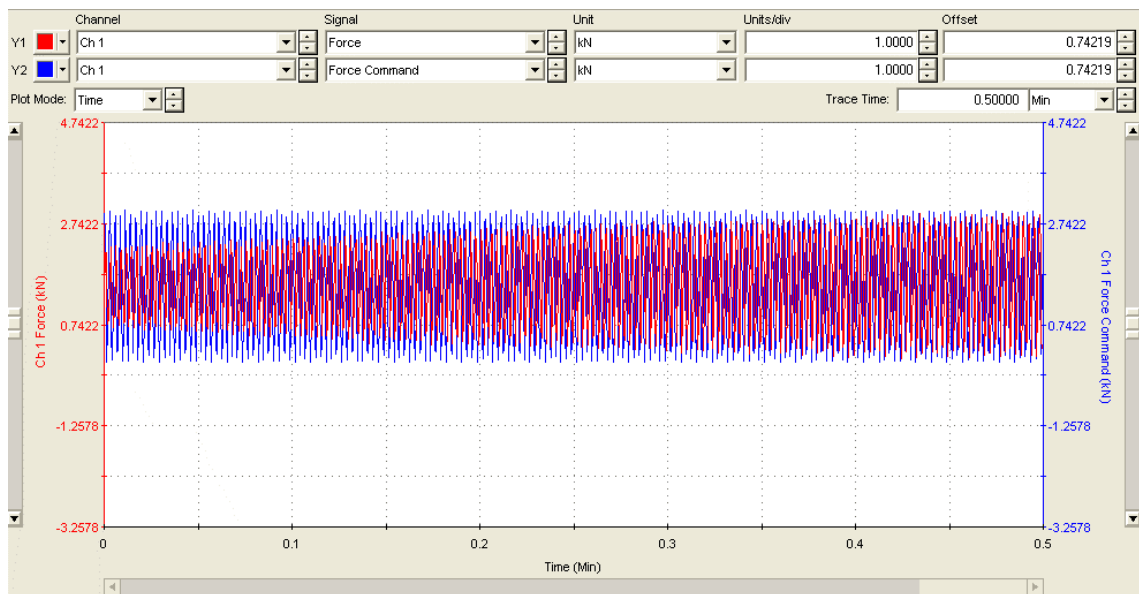
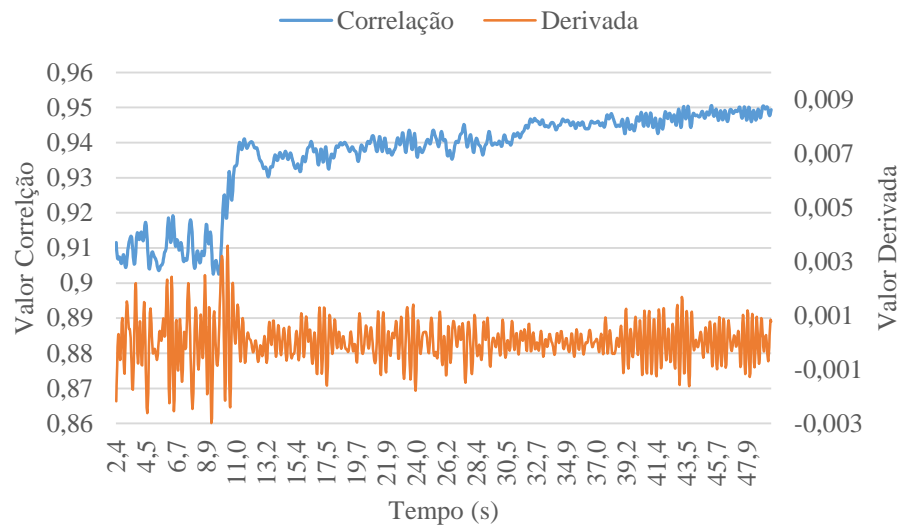


Figura 57 – Evolução temporal da força de comando (a azul) e força efetuada pelo MTS 810 (a vermelho) no ensaio um com $f=6$ Hz

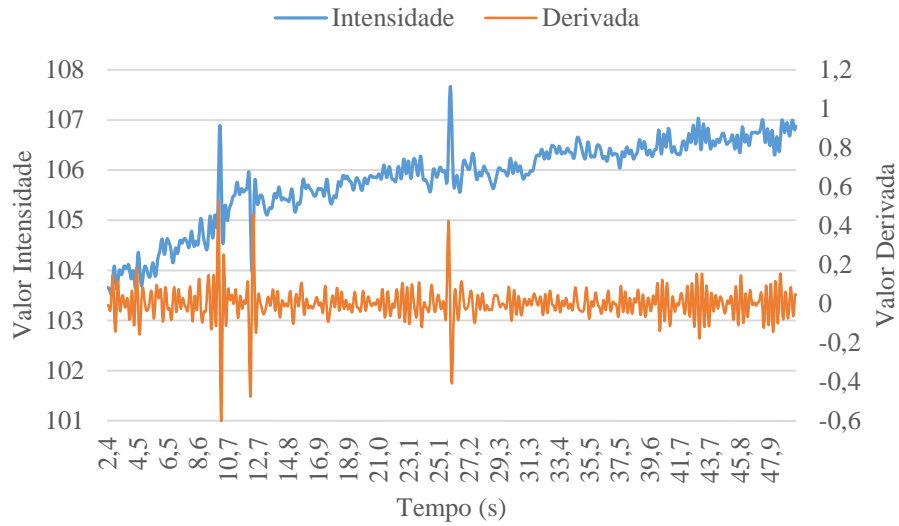
Tal como se pode observar na Figura 57, o equipamento MTS não é capaz de aplicar instantaneamente a força previamente definida, em vez disso, a força aumenta gradualmente até cumprir as especificações desejadas.

Através da análise dos resultados obtidos pelos testes de tração anteriormente referidos, pode-se concluir que é possível, em qualquer um desses testes, identificar a ocorrência de perturbações. No entanto, essa identificação é mais evidente quando se utiliza o algoritmo que correlaciona os *frames* consecutivos. Utilizando o algoritmo que calcula a intensidade média de cada um dos *frames*, embora seja possível identificar as perturbações, em alguns casos é completamente impossível. Salienta-se que as perturbações são iniciadas no instante 6 segundos.

Tais conclusões podem ser confirmadas através da observação das Figuras 58 e 59, onde se apresentam resultados exemplificativos dos ensaios realizados.

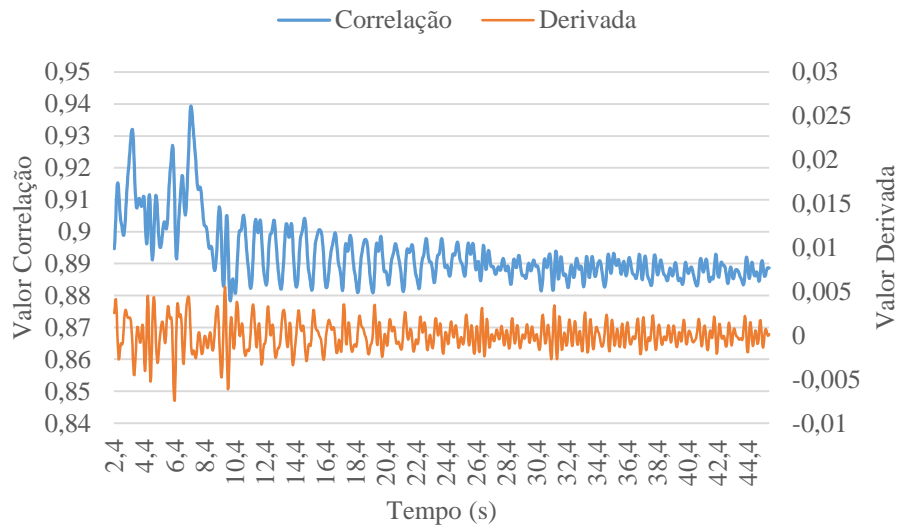


a)

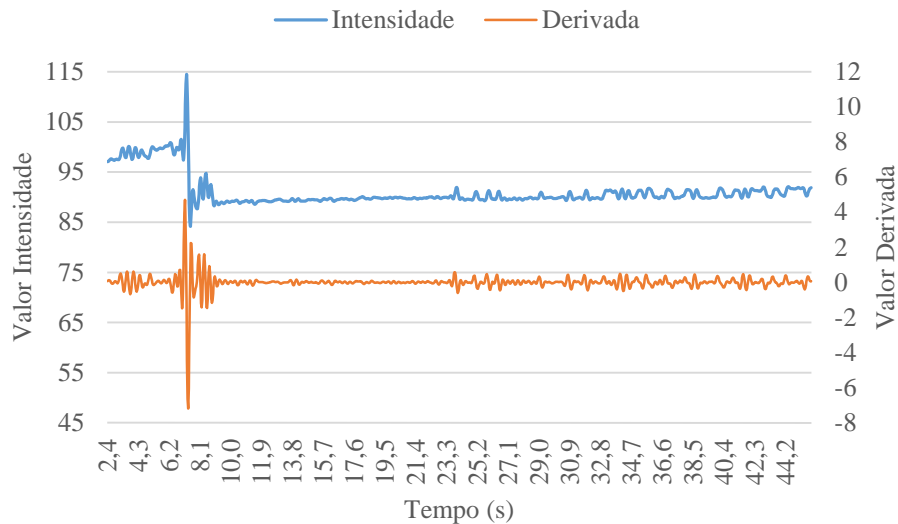


b)

Figura 58 - Valor da a) correlação de *frames* consecutivos e da b) intensidade média de cada um dos *frames* durante o ensaio um com frequência de 6 Hz, em função do tempo



a)



b)

Figura 59 - Valor da a) correlação de *frames* consecutivos e da b) intensidade média de cada um dos *frames* durante o ensaio três com frequência de 1 Hz, em função do tempo

5.3.Considerações Finais

Através dos resultados enunciados anteriormente pode-se afirmar que o sensor ótico implementado na presente dissertação é capaz de identificar, com relativa facilidade, a ocorrência de esforços de tração. Nestes testes, o algoritmo que correlaciona o *frame* atual com o anterior é aquele que apresenta melhores resultados.

No entanto, contrariamente ao que se verificou no capítulo anterior, não foi possível estabelecer qualquer tipo de relação entre os quocientes de correlação/intensidade e o aumento da frequência e/ou força. Para além disto, embora não exista qualquer tipo de limitação nas frequências utilizadas (limite máximo de 15 Hz imposto pela *Raspicam*), não foi possível reproduzir o sinal original, nem identificar a frequência de perturbação através dos resultados obtidos.

É importante salientar que as vibrações causadas pelo funcionamento do MTS 810 afetam os resultados, uma vez que se observam variações nos padrões *speckles* emitidos pela POF antes de ocorrerem as perturbações.

6. Conclusões

6.1. Conclusões Gerais

Nesta dissertação de mestrado desenvolveu-se, implementou-se e testou-se o protótipo de um sensor de saúde estrutural baseado em fibras óticas poliméricas e em padrões de *speckle*. Para além disto também se estudaram os padrões *speckle* e otimizaram-se ferramentas numéricas para a sua análise. Desta forma, considera-se que todos os objetivos inicialmente estabelecidos foram cumpridos.

Relativamente ao sensor ótico, é importante salientar a sua viabilidade de implementação como um sistema de monitorização de saúde estrutural de aeronaves, uma vez que tem grande facilidade de identificar perturbações isoladas (como impactos) ou contínuas (vibrações e esforços de tração) podendo estar associadas a processos de fadiga. No entanto, este sensor não identifica perturbações em locais específicos da estrutura, pois apenas permite identificar se existiu alguma perturbação (em toda a estrutura monitorizada). É importante referir que o sensor apresenta um melhor desempenho em perturbações isoladas e vibrações, especialmente se existir pouco ruído associado.

A identificação das perturbações é realizada através da correlação de padrões *speckles* consecutivos (onde se observa uma diminuição dos valores de correlação após a perturbação) e do cálculo da intensidade média de cada um dos padrões *speckle* emitidos (onde se observa um aumento dos valores de intensidade após a perturbação).

As perturbações isoladas são identificadas mais facilmente com o algoritmo da intensidade média de cada um dos padrões *speckle*, enquanto que a correlação de padrões *speckles* consecutivos permite identificar mais facilmente os esforços de tração e vibrações. Para além disto, o algoritmo da intensidade média permite identificar com maior facilidade, variações na frequência ou amplitude de vibrações. Assim, é importante mencionar que a combinação destes dois algoritmos permite a identificação de qualquer tipo de perturbação, sendo essa informação ainda complementada com a utilização da derivada destes algoritmos.

Embora não se possa afirmar que um algoritmo é melhor que o outro, destaca-se a rapidez de processamento de imagens do algoritmo da intensidade média.

O sensor ótico implementado permite ainda identificar perturbações independentemente da frequência, amplitude e força de oscilação. No entanto, devido às características do sistema, o sensor apresenta um melhor desempenho nas frequências de ressonância da estrutura onde está acoplado, uma vez que são aquelas que permitem a estrutura vibrar com maior amplitude. As frequências que não são de ressonância também podem ser identificadas, mas estas perturbações não têm interesse de ser alvo de estudo uma vez que não serão problemáticas para a saúde estrutural. Tal como esperado, este sensor apresentou melhores resultados na identificação das perturbações nas frequências de ressonância [16, 36] Hz, pois para essas frequências ocorrem maiores amplitudes de vibração.

Torna-se também fundamental referir que para os testes com vibrações e com perturbações isoladas, o sensor implementado permite estabelecer relações entre a frequência de perturbação e o quociente entre valores médios após e antes da perturbação. Assim, para os testes onde se realizaram perturbações isoladas observa-se uma diminuição deste quociente utilizando o algoritmo da correlação, e um aumento utilizando o algoritmo da intensidade, quando a amplitude de perturbação aumenta. Para os testes com vibração e utilizando o algoritmo da correlação observa-se uma diminuição deste quociente, quando se aumenta a frequência ou se diminui a amplitude de perturbação. Utilizando o algoritmo da intensidade pode-se observar um aumento do quociente à medida que se aumenta a amplitude ou a frequência.

Para além disto, através da análise de testes com vibração pode-se concluir que um aumento da frequência causa um aumento da amplitude de oscilação observada nos resultados obtidos após a perturbação. No entanto, esta relação apenas se verifica para frequências inferiores a 16 Hz devido à frequência máxima de amostragem imposta pela *raspicam*.

Através de tudo o que foi apresentado anteriormente, reafirma-se que é possível criar um sistema de monitorização de saúde estrutural de aeronaves recorrendo a fibras óticas poliméricas com custos reduzidos e que possibilita uma monitorização continua com baixa interferência eletromagnética garantindo aeronaves mais seguras, eficientes e atrativas economicamente.

6.2. Trabalho Futuro

Futuramente seria importante realizar testes com diferentes materiais, especialmente com maior dureza, de modo a verificar se o sistema se comporta de forma semelhante ao observado na presente dissertação. Para além disto, de forma a obter resultados mais consistentes deve-se efetuar testes com câmaras com uma taxa de amostragem maior, em ambientes mais controlados e realizar perturbações com uma maior variedade de frequências e amplitudes.

Visto que o sensor ótico criado nesta dissertação tem como objetivo de ser implementado numa aeronave como um sistema de SHM, é importante estudar de que forma o ruído de outros sistemas afetam a sua performance e de que forma o sensor se comporta quando efetua uma análise contínua.

Finalmente, salienta-se como proposta de trabalho futuro a possibilidade de correlacionar o padrão de Speckle com o sinal da perturbação (ou frequência e amplitude de oscilação), sendo importante estudar a relação dos dados obtidos por este sensor com a fadiga a que uma estrutura está sujeita, de modo a prever, identificar e controlar este processo.

Referências Bibliográficas

- [1] N. Meyendorf, B. Frankenstein, and L. Schubert, “Structural health monitoring for aircraft, ground transportation vehicles, wind turbines and pipes-prognosis,” in *18th World Conference on Nondestructive Testing*, 2012, no. April, pp. 15–22.
- [2] C. E. Katsikeros and G. N. Labeas, “Development and validation of a strain-based Structural Health Monitoring system,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 23, no. 2, pp. 372–383, 2009.
- [3] J. D. Achenbach, “Structural health monitoring - What is the prescription?,” *Mech. Res. Commun.*, vol. 36, no. 2, pp. 137–142, 2009.
- [4] W. J. Staszewski, C. Boller, and G. R. Tomlinson, *Health Monitoring of Aerospace Structures*. Sheffield, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [5] M. Růžička, V. Kulíšek, P. Henzl, P. P. Krimbalis, M. Dvořák, and J. Běhal, “Health Monitoring of Composite Repairs of Aircraft Structures,” *NDE Saf. Eur. NDT Days Prague 2007*, vol. 1, pp. 209–218, 2007.
- [6] Ž. Marušić, D. Bartulović, and B. Maković, “Methods to detect and prevent fatigue in ageing aircraft structures,” *Tech. Gaz.*, vol. 22, pp. 793–803, 2015.
- [7] C. Boller, “State-of-the-art in structural health monitoring for aeronautics,” in *International Symposium on NDT in Aerospace*, 2008, pp. 1–8.
- [8] W. J. Staszewski, S. Mahzan, and R. Traynor, “Health monitoring of aerospace composite structures - Active and passive approach,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 69, no. 11–12, pp. 1678–1685, 2009.
- [9] E. O’Brien, “Aircraft Structural Health Monitoring,” in *Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure*, Z. Wu and M. Abe, Eds. Lisse, Netherlands: A.A. BALKEMA, 2003, pp. 1353–1355.
- [10] K. Diamanti and C. Soutis, “Structural health monitoring techniques for aircraft composite structures,” *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 46, no. 8, pp. 342–352, 2010.
- [11] EspiãoMix, “Endoscópio Portátil com Câmera e Monitor LCD de 2.4 polegadas e Luzes LED.” [Online]. Available: <http://www.espiaomix.com/endoscopio-portatil-com-camera-e-monitor-lcd-de-2-4-polegadas-e-luzes-led-p493>. [Accessed: 29-Jun-2016].
- [12] J. M. S. Dias, “Sensores baseados em fibras ópticas poliméricas,” Unidade Curricular Projeto, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2013.
- [13] L. M. B. Bilro, “Metrologia óptica com fibra polimérica,” Dissertação de Dotouramento em Física, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2011.
- [14] J. C. Haegele, “Polymer Optical Fiber Curvature Measuring Technique based on Speckle Pattern Image Processing,” Master’s Thesis in Electrical Engineering, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, Brazil, 2015.
- [15] Y. Gan and W. Steinchen, “Speckle Methods,” in *Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics*, 2008, pp. 655–674.
- [16] J. W. Goodman, “Some fundamental properties of speckle,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 66, no. 11, pp. 1145–1150, 1976.
- [17] V. Varyshchuk, Y. Bobitski, and H. Poisel, “Multimode Polymer Optical Fiber Strain Gauge Based on Speckle Correlation,” *Int. J. Microelectron. Comput. Sci.*, vol. 5, pp. 5–9, 2014.
- [18] L. Rodriguez-Cobo, M. Lomer, C. Galindez, and J. M. Lopez-Higuera, “POF vibration sensor based on speckle pattern changes,” *Proc. SPIE*, vol. 8421, pp. 1–4, 2012.
- [19] H. Clemens, “Polymeric Optical Fiber Curvature Measuring Technique Based,” in *XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)*, 2014, pp. 947–952.
- [20] Raspberry Pi Foundation, “Raspberry Pi.” [Online]. Available:

- <https://www.raspberrypi.org/>. [Accessed: 20-Jul-2016].
- [21] Rs-Components, “Raspberry Pi Model B,” *Prod. Data*, 2013.
 - [22] Raspberry Pi Foundation, “Camera Module,” *Prod. Data*, 2016.
 - [23] Avago Technologies, “Plastic Optical Fiber and HCS ® Fiber Cable and Connectors for Versatile Link Technical Data,” *Data Sheet*, 2009.
 - [24] Roithner Lasertechnik, “Laserdiodemodules type LJ,” *Tech. Data*.
 - [25] Brue l& Kjaer, “Vibration Exciter - Type 4809,” *Prod. Data*, 2008.
 - [26] A. Bruno and F. Greco, “Vibrações e Construções,” Tópicos de Ensino de Física I, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2008.
 - [27] M. D. S. P. SILVA, “Determinação da Freqüência Natural de Eixos Utilizando o Software Excel,” Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, Brasil, 2012.
 - [28] MTS Systems Corporation, “MTS 810 & 858 Material Testing Systems,” *Data Sheet*, pp. 4–9, 2006.
 - [29] Targus Corp, “Targus Wireless Remote Presenter,” *User’s Guid.*, 2003.
 - [30] V. Franco, “Propriedades dos materiais e Ensaios mecânicos,” Material de apoio à unidade curricular “Tecnologia Mecânica”, Escola Superior Náutica Infante D. Henrique, Paço d’ Arcos, Portugal, 2012.
 - [31] M. Reis and A. Moreira, “Propriedades dos Materiais,” Material de apoio à unidade curricular “Materiais e Construção I”, Escola Superior de Tecnologia de Tomar, Instituto Politécnico de Tomar, Tomar, Portugal, 2008.