



**João Miguel Serras
Dias**

Monitorização remota com sensores de fibra ótica



**João Miguel Serras
Dias**

Monitorização remota com sensores de fibra ótica

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica do Doutor Paulo Fernando da Costa Antunes, Investigador de Pós-Doutoramento do Instituto de Telecomunicações, I3N e do Departamento de Física da Universidade de Aveiro, e do Doutor Paulo Sérgio de Brito André, Professor Associado com Agregação do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa e Investigador do Instituto de Telecomunicações.

Aos meus pais que sempre me ajudaram.

o júri

presidente

Doutora Teresa Maria Fernandes Rodrigues Cabral Monteiro
Professora Associada Com agregação, Departamento de Física, Universidade
de Aveiro

Doutor Manuel Joaquim Bastos Marques
Professor Auxiliar do Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de
Ciências da Universidade do Porto

Doutor Paulo Fernando da Costa Antunes
Investigador de Pós-Doutoramento, Departamento de Física, Universidade de
Aveiro

agradecimentos

O trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação contou com o apoio de várias pessoas e entidades, aos quais gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus orientadores, nomeadamente Doutor Paulo Fernando da Costa Antunes e Professor Doutor Paulo Sérgio de Brito André, por me orientarem cientificamente, pela sua permanente disponibilidade, atitude, confiança, empenho e por todos os conhecimentos transmitidos.

Ao Sr. Ivo Mateus e ao Sr. Miguel Rocha da oficina metalomecânica do Departamento de Física da Universidade de Aveiro por todo o apoio técnico e disponibilidade.

À colega Sílvia Coelho pela ajuda e companhia na redação deste documento.

Gostaria ainda de agradecer ao Departamento de Física da Universidade de Aveiro, ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e ao Instituto de Telecomunicações - Pólo de Aveiro, pelas condições proporcionadas para a realização deste trabalho.

A todos, o meu muito obrigado!

palavras-chave

Sensor ótico, monitorização remota, redes de Bragg em fibra ótica, sensor de nível, acelerómetro, fibra ótica.

resumo

Esta dissertação tem como objetivo a implementação de um sistema de monitorização remota com sensores óticos, nomeadamente sensores em redes de Bragg em fibra ótica.

Foi desenvolvido um sistema de monitorização remota, baseado num acelerómetro ótico, que foi implementado no reservatório de água da Universidade de Aveiro, com sensibilidades 87,848 pm/G e 92,351 pm/G nas direções transversal e longitudinal, respetivamente.

A estrutura a monitorizar é descrita fisicamente e matematicamente, através de modelos numéricos, com o objetivo de estimar a sua frequência natural segundo a direção longitudinal e transversal. É implementado e descrito um sistema de monitorização remota que consiste na ligação por fibra ótica da estrutura ao sistema central, instalado no Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro, o qual é acessível de qualquer local com acesso à internet.

Foi também desenvolvido um sensor de nível para futura implementação na mesma estrutura. Estão também descritas e caracterizadas, térmica e mecanicamente, três versões do sensor de nível, que foi sendo otimizado neste trabalho. A última versão apresenta uma sensibilidade de $72,4 \pm 0,100$ pm/m, entre 0 e 1 m, e uma resolução de 6,9 cm utilizando um interrogador com 5 pm de resolução.

Por fim, a estrutura em estudo foi monitorizada por um período de tempo, observando-se as suas frequências naturais. Verifica-se que não existem alterações significativas do valor das frequências naturais, concluindo-se que a estrutura se encontra em bom estado, mantendo as suas propriedades físicas, nomeadamente a sua rigidez.

Este trabalho demonstrou a exequibilidade de utilizar sensores óticos interligados com redes de comunicação por fibras óticas em aplicações de monitorização remota.

keywords

Optical sensor, remote monitoring, bragg gratings in optical fibre, liquid level sensor, acelerometer, optical fibre.

abstract

This dissertation aims the implementation of a remote monitoring system based on optical sensors, namely fibre Bragg grating based sensors.

A remote monitoring system, based on an optical accelerometer, was developed and implemented, at the Aveiro University water reservoir, with a sensibility of 87,848 pm/G and 92,351 pm/G for the transversal and longitudinal directions, respectively.

The structure to monitor is physically and mathematically described, through numeric models, with the purpose of estimate its natural frequency on the longitudinal and transversal directions. It is implemented and described a remote monitoring system consisting of an optical fibre connection of the structure to the central system, installed at the Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro, which can be accessed from any place with an internet connection.

A liquid level sensor for future implementation on the same structure was developed. It is also described and characterized, thermal and mechanically, three versions of the liquid level sensor, which has been optimized during this work. The last version has a sensibility of $72,4 \pm 0,100$ pm/m, between 0 e 1 m, and a resolution of 6,9 cm using an interrogator with a 5 pm resolution.

At last, the structure natural frequencies were monitored over a time period. It is verified that there are no significant changes on the value of the natural frequencies, concluding that the structure is at a healthy state, maintaining its physical properties, namely its rigidity.

This work demonstrated the successful use of optical sensors interconnected with optical fibre communication networks for remote monitoring applications.

Índice

1. Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Estado da técnica.....	2
1.2.1 Monitorização remota.....	3
1.2.2 Sensores baseados em redes de Bragg aplicados à monitorização de estruturas.....	6
1.2.3 Outros sensores relevantes baseados em redes de Bragg.....	9
2. Redes de Bragg gravadas em fibra ótica.....	11
2.1 Sensibilidade a perturbações externas.....	12
2.2 Sistema de gravação de redes de Bragg.....	15
3. Sensores implementados.....	17
3.1 Acelerómetro	17
3.2 Sensor de nível	20
4. Monitorização remota do reservatório de água da Universidade de Aveiro.....	35
4.1 Estrutura monitorizada e modelo numérico	35
4.2 Monitorização remota da estrutura.....	38
4.3 Resultados.....	40
5. Conclusões e trabalho futuro	45
5.1 Conclusões	45
5.2 Trabalho futuro	46
6. Referências.....	47

Índice de figuras

Figura 1.1 – a) Ligação por cabo elétrico. b) Ligação sem fios. c) Ligação híbrida.	3
Figura 1.2 – Esquema de uma rede de sensores FBG ligados ao sistema central através de fibra ótica.	4
Figura 1.3 – Sistema de monitorização remota utilizando um computador.	5
Figura 1.4 – Sistema de monitorização remota utilizando uma DAQ.	6
Figura 1.5 – Esquema do sensor apresentado por Huang et al.: a) Vista em corte. b) Vista de topo. Adaptado de [23].	9
Figura 1.6 – a) Esquema do sensor de nível. b) Sensor de nível implementado num reservatório.	10
Figura 1.7 – Esquema do sensor de nível implementado por Vengal et al.. Adaptado de [25].	10
Figura 2.1 – Esquemática de uma fibra com uma rede de Bragg gravada. Ilustração dos espetros típicos resultantes e variação do índice de refração. Adaptado de [31].	13
Figura 2.2 – Esquema utilizado para a gravação das redes de Bragg utilizadas. E1 e E2 são espelhos para direcionar o laser.	15
Figura 3.1 – a) Esquema do acelerómetro ótico biaxial utilizado. Adaptado de [36]. b) Fotografia do sensor.	18
Figura 3.2 – Massa inercial e FBGs nela instaladas. Adaptado de [36].	18
Figura 3.3 – Espectro de reflexão das quatro FBGs que constituem o acelerómetro.	19
Figura 3.4 – a) Acelerómetro aplicado na sua estrutura protetora [36]. b) Fotografia do sensor aplicado na estrutura [31].	20
Figura 3.5 - Protótipo da primeira versão do sensor de nível. a) Fotografia. b) Esquema em corte.	20
Figura 3.6 – Simulação da variação do comprimento de onda de Bragg em função da altura de água. Os pontos representam os dados obtidos e a reta o respetivo ajuste linear.	22
Figura 3.7 – Fotografia do sensor imerso na coluna de água.	22
Figura 3.8 – a) Fotografia do sensor. b) Esquema em corte da versão 2 do sensor de nível.	23
Figura 3.9 – Comprimento de onda de Bragg da FBG1 em função da altura de água simulada. Os pontos a azul e a preto representam, respetivamente, os dados obtidos ao longo da subida e descida do nível de água. As linhas representam os respetivos ajustes lineares.	24
Figura 3.10 – Variação do comprimento de onda de Bragg da FBG1 e FBG2 ao longo do tempo, a) e b), respetivamente. Variação do comprimento de onda de Bragg em função da variação da temperatura da FBG1 e FBG2, c) e d), respetivamente. As linhas representam os respetivos ajustes lineares.	25
Figura 3.11 – Ilustração dos testes efetuados com o sensor de nível na coluna de água.	26
Figura 3.12 – Comprimento de onda da FBG1 da segunda versão do sensor de nível, em função do nível de água na coluna.	27
Figura 3.13 – Versão 3 do sensor de nível. a) Preenchido com resina. b) Preenchido com silicone de alta temperatura.	28
Figura 3.14 – Esquema do sensor de nível, versão 3. a) Vista em perspetiva. b) Vista em corte.	29

Figura 3.15 – Variação do comprimento de onda de Bragg, devida à variação de temperatura, das FBGs constituintes dos dois sensores de nível ao longo de 80 horas. a) FBG1 do sensor preenchido com resina. b) FBG2 do sensor preenchido com resina. c) FBG1 do sensor preenchido com silicone. d) FBG2 do sensor preenchido com silicone.....	30
Figura 3.16 – Variação do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura para os dois sensores de nível. a) FBG1 do sensor preenchido com resina. b) FBG2 do sensor preenchido com resina. c) FBG1 do sensor preenchido com silicone. d) FBG2 do sensor preenchido com silicone. Os pontos a preto e a verde representam, respetivamente, as medidas obtidas durante a subida e descida da temperatura. As retas representam os ajustes lineares.	31
Figura 3.17 – Variação do comprimento de onda antes e depois da compensação térmica, linha a preto e a vermelho, respetivamente. Sensor preenchido com resina, à esquerda. Sensor preenchido com silicone de alta temperatura, à direita.....	32
Figura 3.18 – Variação de comprimento de onda em função da altura de água. a) Sensor preenchido com resina. b) Sensor preenchido com silicone.	33
Figura 4.1 – Depósito de água da Universidade de Aveiro.....	36
Figura 4.2 – a) Modelo numérico tridimensional do reservatório de água da Universidade de Aveiro. Modos de vibração estimados para a direção longitudinal (b) e direção transversal (c) [38].	36
Figura 4.3 – Frequência natural da estrutura em função do nível de água no reservatório. Os pontos a azul e a preto correspondem às direções transversal e longitudinal, respetivamente. As linhas representam os respetivos ajustes. ...	37
Figura 4.4 – Esquema da ligação em fibra ótica entre o reservatório de água da Universidade de Aveiro e o Instituto de Telecomunicações.....	39
Figura 4.5 – Esquema do topo do depósito, identificação das direções e localização do sensor.....	40
Figura 4.6 – Aceleração medida com o sensor ótico, nas direções longitudinal e transversal do reservatório, para uma velocidade do vento de 8 m/s.....	40
Figura 4.7 – Esquema da orientação do depósito de água da Universidade de Aveiro.	41
Figura 4.8 – Aceleração medida pelo acelerómetro ótico. a) Direção longitudinal. b) Aproximação ao gráfico a). c) Direção transversal. d) Aproximação ao gráfico c).	42
Figura 4.9 – Espectro de frequências dos dados relativos à aceleração representados nos gráficos da Figura 4.8. a) Direção longitudinal. b) Direção transversal.	43
Figura 4.10 – Frequência natural do depósito de água da Universidade de Aveiro, direção transversal e longitudinal, ao longo do tempo. As linhas correspondem aos limites definidos pelo nível de água, máximo e mínimo, no interior do reservatório para cada direção. A linha a tracejado representa a média das frequências medidas.	44

Lista de símbolos e constantes

A	Área
A_1, T_1, Y_0	Coefficientes do ajuste exponencial
α_Λ	Coefficiente de expansão térmica
α_n	Coefficiente termo-ótico
β	Direção do vento em graus
C	Constante de ajuste linear
Δl	Deformação mecânica
$\Delta \lambda_B$	Varição no comprimento de onda de Bragg
Δn	Amplitude de modulação do índice de refração
δn_{eff}	Varição do valor médio da modulação do índice de refração
ΔT	Varição de temperatura
ε_z	Elongação relativa
F	Força aplicada
f	Frequência natural
$\phi(z)$	Varição do período ao longo da rede
f_l	Frequência natural segundo a direção longitudinal
f_t	Frequência natural segundo a direção transversal
g	Aceleração da gravidade
h	Altura do nível do líquido
k	Rigidez estrutural
k_l	Rigidez estrutural segundo a direção longitudinal
k_t	Rigidez estrutural segundo a direção transversal
Λ	Período de modulação do índice de refração
λ	Comprimento de onda
l	Comprimento
λ_B	Comprimento de onda de Bragg
m	Massa

n	Índice de refração
n_{eff}	Índice de refração efetivo
P	Pressão
p_e	Constante fotoelástica
P_S	Pressão à superfície do líquido
ρ	Densidade
$S_{\Delta l}$	Sensibilidade à deformação
S_T	Sensibilidade térmica
T	Temperatura
ν	Coefficiente de Poisson
v	Velocidade do vento
v_l	Velocidade do vento segundo a direção longitudinal
v_t	Velocidade do vento segundo a direção transversal
ξ	Visibilidade das franjas

Glossário de Acrónimos

CCD	Charge-Coupled Device	Dispositivo de carga acoplada
DAQ	Data Acquisition	Aquisição de dados
E	Mirror	Espelho
FBG	Fibre Bragg Grating	Rede de Bragg em fibra ótica
FFT	Fast Fourier Transform	Transformada rápida de Fourier
G	Magnetic claw	Garra Magnética
GPRS	General Packet Radio Service	Serviço de rádio de pacote geral
LC	Cylindrical lens	Lente cilíndrica
LED	Ligth Emitting Diode	Díodo emissor de luz
LVDT	Linear Variable Differential Transformer	Sensor de medição de deslocamento linear diferencial
MF	Phase Mask	Máscara de Fase
OTDR	Optical Time-Domain Reflectometer	Refletómetro ótico no domínio do tempo
PLA	Polylactic Acid	Ácido polilático
PM	Moving platform	Plataforma Móvel
PO	Optical power	Potência Ótica
PTFE	Polytetrafluoroethylene	Politetrafluoretileno
SHM	Structural Health Monitoring	Monitorização da saúde estrutural
SHRM	Structural Health Remote Monitoring	Monitorização remota da saúde estrutural
UV	UltraViolet	Ultravioleta

Capítulo 1

Introdução

As tecnologias fotônicas têm adquirido uma importância vital no desenvolvimento de soluções para a monitorização estrutural. Nas últimas décadas assistiu-se a um crescente interesse de investigação na área da monitorização, traduzindo-se no desenvolvimento de novas técnicas, instrumentos e sensores, não só eletrónicos como também de fibra ótica. Este tema incide, sobre o desenvolvimento de novos sensores e técnicas de acesso remoto de parâmetros importantes para a monitorização da saúde estrutural. Devido ao tamanho reduzido, imunidade a campos eletromagnéticos, potencialidade de aplicação em larga escala graças à sua capacidade de multiplexagem, isolamento elétrico e baixas perdas de transmissão os sensores baseados em redes de Bragg (*Fiber Bragg Grating* ou FBG) evoluíram para além da curiosidade laboratorial, sendo cada vez mais uma tecnologia já com aplicação real em diversas áreas [1].

Uma das áreas onde a implementação destes sensores é cada vez mais notória é a monitorização da saúde estrutural (*Structural Health Monitoring* ou SHM). A SHM consiste em implementar uma estratégia de deteção de danos em estruturas de engenharia civil, mecânica ou aeroespacial. Concretamente, é necessário observar as estruturas ou sistemas mecânicos ao longo do tempo utilizando medidas de resposta dinâmica ou estática periodicamente, obtendo características sensíveis ao dano estrutural e analisando-as estatisticamente de forma a determinar o estado de saúde atual da estrutura. A análise de informação obtida por sensores ao longo do envelhecimento e degradação devido ao ambiente operacional da estrutura permite verificar a sua capacidade para desempenhar as funções para a qual foi construída. Em

condições extremas como terremotos, furacões ou explosões, a SHM pode ser utilizada para uma averiguação rápida das condições de uma eventual estrutura afetada, fornecendo informações em tempo real sobre o seu desempenho e subsequente integridade [2].

1.1 Motivação

A monitorização remota da saúde estrutural (*Structural Health Remote Monitoring* ou SHRM) de infraestruturas é uma prática indispensável em todas as estruturas, de engenharia civil, aeronáuticas ou de instalações industriais. Torres, pontes, barragens, aviões, navios e satélites são algumas destas estruturas. A utilização de técnicas de monitorização remota permite analisar a evolução temporal da degradação da infraestrutura ao longo da sua vida útil, bem como obter informação útil sobre o seu estado de funcionamento. Deste modo, é possível antever futuras atividades de manutenção ou de reparação, melhorando dessa forma, o tempo de vida útil e otimizando os custos de manutenção. Nas últimas décadas, os sensores de fibra ótica revelaram-se uma tecnologia promissora em vários campos de aplicação. Por serem duráveis, estáveis, insensíveis a interferências eletromagnéticas, e, geralmente, com mínima invasão estética, são particularmente interessantes para a vigilância da saúde estrutural a longo prazo. Na aplicação pretendida, a sua robustez, o facto de não ser necessária alimentação elétrica no local de medida, a capacidade de multiplexação (permite colocar dezenas de sensores no mesmo cabo de fibra ótica) e a baixa atenuação da fibra ótica poderão ser vantagens adicionais na monitorização remota de estruturas, permitindo a calibração de modelos numéricos com base em dados obtidos em tempo real e até mesmo a implementação de sistemas de alerta em caso de perigo.

O objetivo geral centra-se no desenvolvimento de sensores de fibra ótica e na implementação de uma plataforma de monitorização remota, a longo prazo, de parâmetros que possam influenciar a saúde estrutural, nomeadamente a vibração.

1.2 Estado da técnica

A tecnologia relevante para esta dissertação consiste em sistemas de monitorização remota e sensores baseados em redes de Bragg para monitorização de estruturas. Os sensores óticos são utilizados para a monitorização de diversas estruturas tais como edifícios, pontes, túneis, oleodutos e gasodutos, turbinas eólicas e estruturas ferroviárias, geotécnicas, entre outras [3]. Devido às dimensões e dificuldades de acesso a este tipo de estruturas, a instalação de sistemas de monitorização remota constitui uma grande vantagem na avaliação da sua saúde estrutural. Adicionalmente, a redução de custos face a outras tecnologias, o acionamento de alarmes automáticos e a possibilidade

de monitorização de diferentes estruturas simultaneamente pelo mesmo sistema central, justificam a aposta no desenvolvimento de sistemas de monitorização remota da saúde estrutural [4].

1.2.1 Monitorização remota

Existem atualmente alguns sistemas de monitorização remota utilizando sensores eletrónicos [5]–[8]. Estes sensores podem ser instalados de três formas diferentes, relativamente à maneira como é realizada a ligação entre os sensores e o sistema central. A ligação pode ser efetuada por cabo elétrico, comunicação sem fios entre cada sensor e o sistema central ou comunicação por cabo elétrico entre um grupo de sensores e um módulo local, por sua vez comunicando sem fios com o sistema central [2]. Na Figura 1.1 estão representados esquemas para as três diferentes configurações.

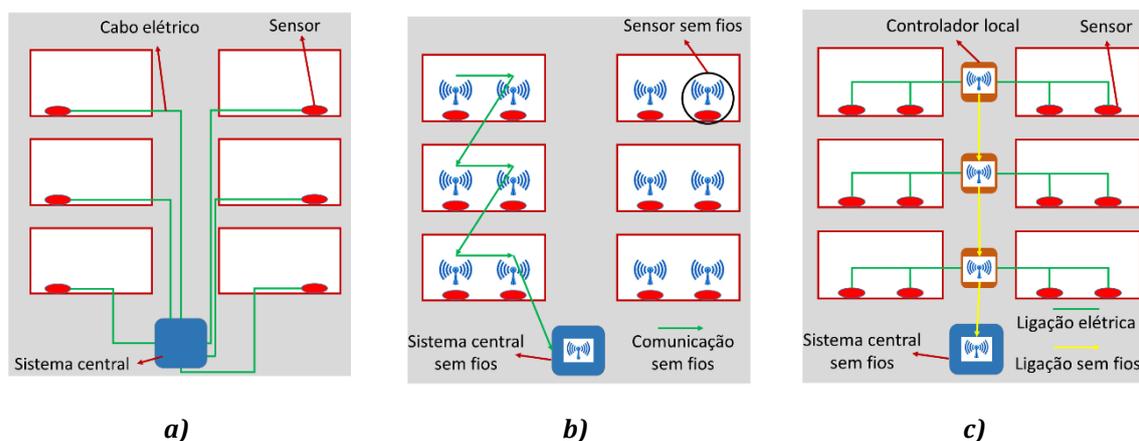


Figura 1.1 – a) Ligação por cabo elétrico. b) Ligação sem fios. c) Ligação híbrida.

A ligação por cabo elétrico é a configuração mais comum na monitorização remota de estruturas. A vantagem desta configuração é a grande variedade de dispositivos padrão, comercialmente disponíveis, que podem ser utilizados. Também, aos dados são adquiridos por múltiplos canais, facilitando a sua sincronização. Por outro lado, os dispositivos utilizam, normalmente, fontes de energia, que nem sempre estão disponíveis nas estruturas a monitorizar. No caso de estruturas de grande dimensão, a instalação de toda a cablagem representa 75 % do tempo de instalação de todo o sistema e a sua manutenção pode ser bastante dispendiosa, devido à degradação natural provocada por perturbações ambientais e outros agentes externos [2]. A configuração sem fios, esquematizada na Figura 1.1 b), pode resolver o problema económico dos cabos elétricos. Em estruturas de grande dimensão, a comunicação tem de ser efetuada através da interligação entre os sensores até ao sistema central, pois os sensores mais afastados estarão fora do seu alcance. Com o aumento do número de sensores instalados pode

ocorrer o fenômeno de colisão de dados, resultante da recepção de pedidos simultâneos de aquisição ou transmissão de dados nos dispositivos próximos do sistema central, pois servem de ponte para um número elevado de sensores. Apesar de existirem formas de compensar este fenômeno, como apresentou Araujo *et al.* [9], estes mecanismos têm um custo muito elevado podendo a sincronização de todos os sensores ser extremamente difícil e economicamente insustentável [2]. A configuração híbrida permite conjugar as vantagens das duas configurações descritas anteriormente. Nesta configuração, vários sensores são ligados e controlados por um dispositivo com capacidade para a multiplexação dos sinais e transmissão dos dados através da comunicação sem fios com o sistema central. Este processo pode ser repetido permitindo a instalação de vários conjuntos sensores/dispositivo de controlo. Os vários dispositivos de controlo comunicam com o sistema central, constituído por placas de aquisição de dados, computador e comunicador sem fios (GPRS (*General Packet Radio Service* ou Serviço de rádio de pacote geral), 3G ou 4G). O sistema central irá realizar todo o tratamento de dados necessário e comunicar os resultados pretendidos ao utilizador [2].

Devido à sua capacidade de multiplexação, comunicação à velocidade da luz, possibilidade de independência com variações de temperatura e diminuição do número de dispositivos necessários para o seu controlo, os sensores baseados em redes de Bragg gravadas em fibra ótica permitem implementar sistemas de monitorização remota mais simples, com menor custo de manutenção e mais resistentes a ambientes hostis. As redes de monitorização utilizando sensores FBG podem ser configuradas de várias maneiras. Uma possibilidade é a colocação do sistema central num local seguro, com ligação à internet e rede elétrica. Como está representado no esquema da Figura 1.2, é implementada uma ligação de fibra ótica entre as estruturas monitorizadas e o sistema central [4]. Esta configuração é vantajosa pois apenas utiliza a fibra ótica, acopladores, o interrogador e um computador com ligação à internet.

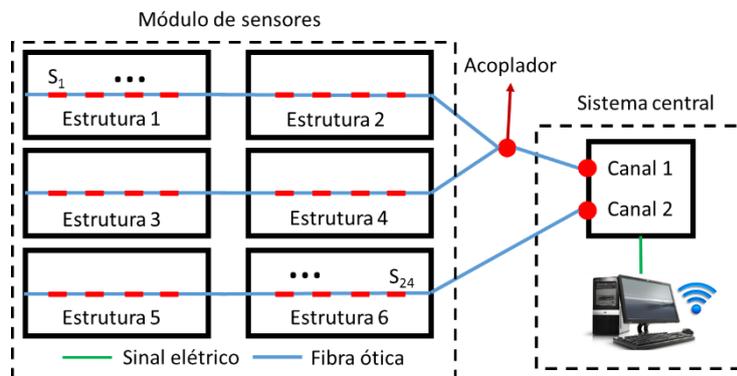


Figura 1.2 - Esquema de uma rede de sensores FBG ligados ao sistema central através de fibra ótica.

Na impossibilidade de efetuar a ligação entre a estrutura monitorizada e um local com rede elétrica e ligação à internet através de fibra ótica, é necessária a comunicação sem fios entre o sistema central e o utilizador. A Figura 1.3 representa um esquema de uma possível configuração nestas circunstâncias. Nesta configuração, é instalado no local o interrogador ótico, um computador para tratamento de dados, um servidor para a comunicação sem fios (GPRS, 3G ou 4G) e um sistema de alimentação energética, caso não exista rede elétrica. Nesta situação, o utilizador recebe apenas a informação final sendo os cálculos realizados automaticamente pelo computador instalado no local.

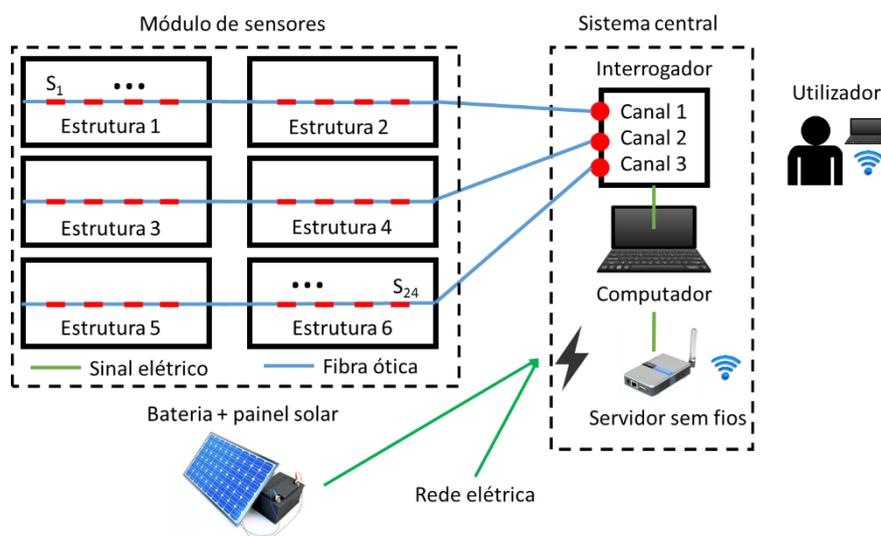


Figura 1.3 – Sistema de monitorização remota utilizando um computador.

Antunes *et al.* implementaram um sistema de monitorização remota semelhante ao da Figura 1.3, constituído por sensores de fibra ótica, interrogador ótico, computador, unidade de comunicação, painel solar e bateria [4]. Os sensores implementados são sensores baseados em redes de Bragg para monitorização do deslocamento, deformação e temperatura. O interrogador ótico utilizado é baseado num CCD (*Charge-Coupled Device* ou dispositivo de carga acoplada) com 512 pixéis. A fonte ótica é um LED (*Laser Emitting Diode* ou díodo emissor de luz) de banda larga superluminescente. O sistema de interrogação é ativado automaticamente, adquirindo a informação dos sensores, em intervalos de 60 min. Os dados são gravados na memória e transmitidos, uma vez por dia, para o servidor remoto através de uma ligação GPRS. É ainda possível programar diferentes alarmes, relativos a cada sensor ou a cada parâmetro medido [4]. Este tipo de configuração está sujeita a atos de vandalismo, principalmente relativamente ao computador, pois é um equipamento facilmente vendido no mercado ilegal. De modo a diminuir o risco de danos ou furtos ao equipamento o sistema pode ser implementado segundo a configuração esquematizada na Figura 1.4. Neste caso o sinal adquirido pelo

interrogador óptico é enviado para uma DAQ (*Data Acquisition system* ou sistema de aquisição de dados) com capacidade de armazenamento de dados. Através de qualquer computador com ligação à internet e com aplicações para tratamento de dados instaladas, o utilizador pode aceder à DAQ e descarregar os dados. É também possível programar um computador para a comunicação com a DAQ periodicamente através de um servidor sem fios (GPRS, 3G ou 4G), descarregando os dados armazenados e eliminando-os da DAQ. O período de descarregamento dos dados deve ser definido em função da quantidade de informação recolhida pelos sensores e da memória da DAQ. No caso do tipo de ligação, este deve ser definido pela quantidade de dados adquiridos pelos sensores. Para quantidades de dados pequenas pode ser utilizada a ligação GPRS, por outro lado, para grandes quantidades de dados pode utilizar-se a ligação 4G.

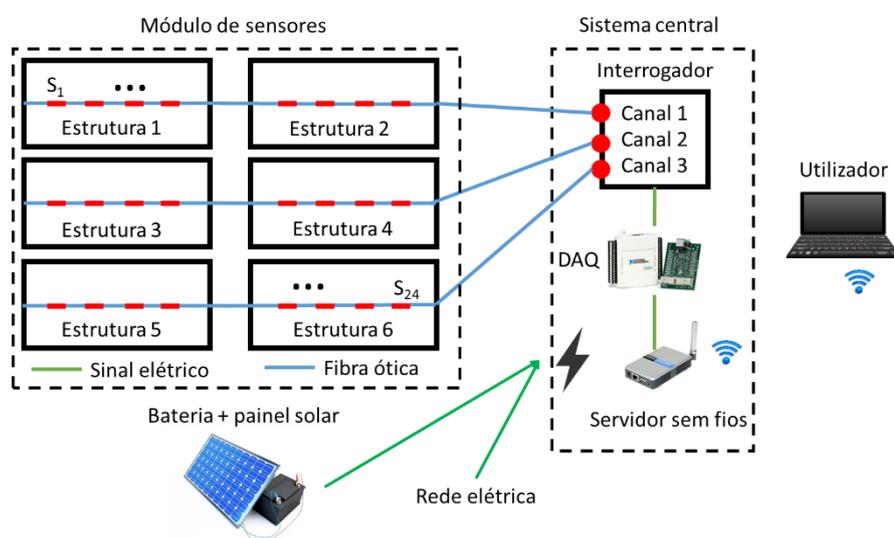


Figura 1.4 – Sistema de monitorização remota utilizando uma DAQ.

1.2.2 Sensores baseados em redes de Bragg aplicados à monitorização de estruturas

O conjunto de parâmetros normalmente utilizados para a monitorização de uma estrutura incluem a caracterização ou medição de tensões mecânicas, deslocamento relativo, acelerações, cargas, presença de fissuras e variação da sua abertura, nível de pH, humidade e temperatura [10]. Devido à sua suscetibilidade a cargas ambientais e operacionais, ventos fortes, terremotos e circulação de tráfego, as pontes são a estrutura de engenharia civil na qual a monitorização da saúde estrutural é mais aplicada. No entanto, esta tecnologia está atualmente a ser aplicada também em edifícios, túneis, gasodutos e oleodutos, turbinas eólicas, infraestruturas ferroviárias e estruturas

geotécnicas [3]. Os sensores baseados em redes de Bragg são cada vez mais utilizados para monitorizar estas estruturas.

Relativamente a monitorização da saúde estrutural de pontes utilizando sensores FBG, existem algumas aplicações recentes nas quais esta tecnologia foi implementada com sucesso. Em 2010, Rodrigues *et al.* implementaram um sistema de monitorização estrutural na Ponte da Lezíria, Portugal, utilizando uma rede de sensores FBG [11]. O sistema implementado era composto por 30 sensores de deformação, 11 de deflexão e 10 de temperatura. Os sensores de deformação foram incorporados no betão das lajes superior e inferior de secções cruciais da ponte, medindo a deformação das mesmas. Os sensores de deflexão permitiram medir o deslocamento vertical das oito arcadas da ponte. Os sensores de temperatura foram utilizados não só para compensação térmica dos restantes sensores mas também para caracterizar termicamente a estrutura. Em 2012, Rodrigues *et al.* monitorizaram a deformação da ponte Eiffel durante as suas obras de reabilitação [12]. Foram implementados 80 sensores ao longo de 4 fases do projeto, 19 no início da reabilitação, 15 durante o reforço e substituição dos cabos de sustentação da ponte, 32 na monitorização de teste de carga e 14 durante as reparações do pavimento. Mais recentemente, Li *et al.* desenvolveram um sistema de monitorização da tensão exercida nos cabos de uma ponte suspensa [13]. O sensor desenvolvido contempla um sistema de fácil substituição das FBG para que o tempo de vida útil do sensor não esteja limitado pelo tempo de vida das FBG.

Aplicações de monitorização estrutural a edifícios utilizando sensores FBG não são tão comuns como em pontes mas em 2012, Li *et al.* monitorizaram um edifício de 18 andares durante a sua construção [14]. A monitorização consistiu no registo, durante 5 meses, da temperatura durante o processo de hidratação do betão, a deformação da coluna principal no rés-do-chão devido à construção dos restantes 18 andares e o deslocamento relativo entre dois blocos da fundação durante o seu afundamento no solo.

Quanto à monitorização de estruturas como gasodutos, Ren *et al.* desenvolveram um sensor FBG que permite monitorizar a deformação radial de uma conduta de gás [15]. O sensor implementado possibilita também a monitorização da pressão dentro da conduta, apresentando um comportamento semelhante ao de um sensor de pressão convencional. Em 2013, Loupos *et al.* apresentaram um sistema de monitorização estrutural de túneis combinado com algoritmos avançados, permitindo monitorizar as deformações da estrutura, sob cargas operacionais e sísmicas, e avaliar a sua segurança [16]. Foram implementados, de duas formas diferentes, sensores FBG para a medição da compressão e expansão do betão. Numa das configurações, os sensores FBG foram colados às barras de aço que reforçam a estrutura de betão e revestidos para evitar que aderissem ao betão, uma vez que estes sensores iriam situar-se no interior da estrutura. Na segunda configuração, anterior à aplicação do betão foram soldadas âncoras às barras

de aço e posteriormente, os sensores FBG foram fixados às âncoras. Os sensores FBG foram comparados com outros sensores óticos (tecnologia de Brillouin), apresentando maior precisão e menor ruído.

Uma das estruturas onde a aplicação dos sensores FBG é também bastante interessante são as turbinas eólicas. Em 2012, Choi *et al.* efetuaram testes com o objetivo de medir a deflexão de uma pá de turbina eólica [17]. Para tal, foram implementados vários sensores FBG de deformação, temperatura e deformação com compensação de temperatura. Os sensores foram embebidos em resina epóxi para aumentar a sua resistência. As deformações medidas pelos sensores FBG foram usadas para calcular a deflexão da pá de turbina através do método das diferenças finitas aplicado à teoria de dobramento de uma barra arbitrária. A deflexão da pá foi também medida utilizando sensores eletrónicos denominados de LVDTs (*Linear Variation Displacement Transducers*) e comparada com a deflexão calculada utilizando a deformação medida pelos sensores FBG, verificando-se uma boa correlação. Posteriormente, em 2013, Kim *et al.* apresentaram um estudo semelhante no qual também utilizam sensores FBG para medir a deformação numa pá de turbina [18]. Arsenault *et al.* monitorizaram, em 2013, uma turbina eólica utilizando sensores FBG para medir a deformação nas suas 3 pás [19]. Foram efetuadas medidas dinâmicas e utilizados os dados obtidos pelos sensores FBG para determinar as frequências naturais da turbina. Para simular uma pá danificada foram aplicadas massas numa pá. Verificou-se que o espectro de frequências da turbina é alterado pela adição de massas numa das pás, devido ao desequilíbrio provocado pelo aumento de massa.

Outra das aplicações para a qual os sensores FBG se têm revelado interessantes é a indústria ferroviária. Em 2012, Filograno *et al.* utilizaram 20 sensores FBG para a monitorização de uma secção da linha ferroviária de alta velocidade que Barcelona-Madrid [20]. Os sensores FBG foram instalados nos carris de modo a medir a sua deformação, em várias direções, durante a passagem de comboios de alta velocidade. Este método permite avaliar a segurança e integridade da secção da linha ferroviária que foi monitorizada. A análise do espectro de deformação dos carris é também correlacionável com a passagem das rodas pelo que, é possível detetar rodas danificadas.

Por fim, na literatura podem ser encontradas aplicações de sensores FBG na área da geotecnia. Em 2012, Xu *et al.* desenvolveram um sistema que permite medir as deformações do solo durante um teste efetuado numa mesa vibratória [21]. Posteriormente, em 2013, Pei *et al.* utilizaram medidas de deformação obtidas utilizando sensores FBG para desenvolver um sensor de inclinação para aplicar a estruturas geotécnicas [22].

1.2.3 Outros sensores relevantes baseados em redes de Bragg

Recentemente têm sido apresentados alguns sensores de pressão baseados em redes de Bragg gravadas em fibra ótica, com o objetivo de disponibilizar alternativas aos sensores elétricos. Em 2012, Huang *et al.* produziram um sensor de pressão, com uma sensibilidade de 1,57 pm/kPa entre 0 e 1 MPa, utilizando FBGs instaladas num diafragma [23]. O sensor apresentado consiste em duas FBGs fixas num diafragma ao longo da direção radial, como é visível na Figura 1.5.

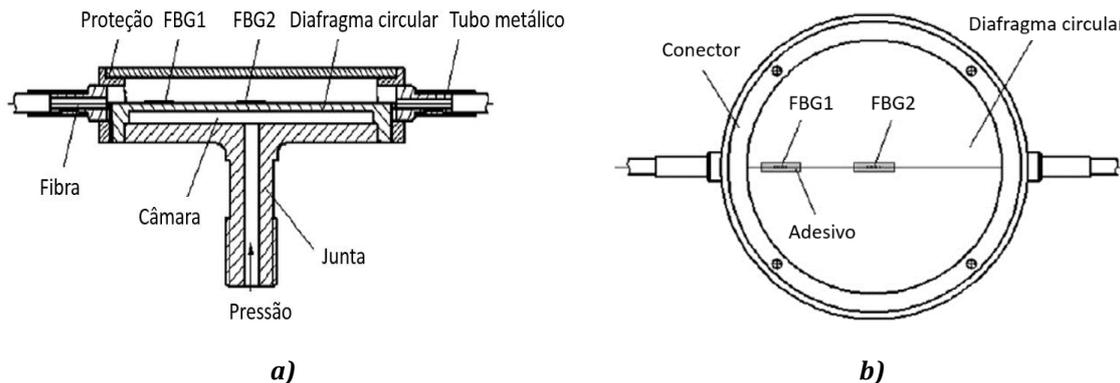


Figura 1.5 – Esquema do sensor apresentado por Huang *et al.*: a) Vista em corte. b) Vista de topo. Adaptado de [23].

Quando a pressão à face inferior do diafragma aumenta a FBG1 é comprimida, enquanto a FBG2 é distendida. Deste modo, é possível relacionar a variação do comprimento de onda de Bragg das duas FBGs com a pressão a que o diafragma está sujeito. Uma vez que a pressão pode ser relacionada com a diferença das variações de comprimento de onda de Bragg entre a FBG1 e FBG2, a dependência do sensor relativamente a variações de temperatura é eliminada, como foi mostrado pelos autores [23]. Lai *et al.* desenvolveram, em 2012, um sensor de nível baseado em redes de Bragg. Como mostra a Figura 1.6, o sensor é composto por uma estrutura de 3 mm de espessura na qual é instalada uma fibra ótica com uma rede de Bragg. É aplicada uma viga flutuante a esta estrutura de forma a variar a força nela aplicada, devido à variação do nível de água no reservatório, o que faz variar o valor do comprimento de onda de Bragg da rede. Para um reservatório com água no seu interior, a sensibilidade apresentada por este sensor de nível é de 14,91 pm/cm [24].

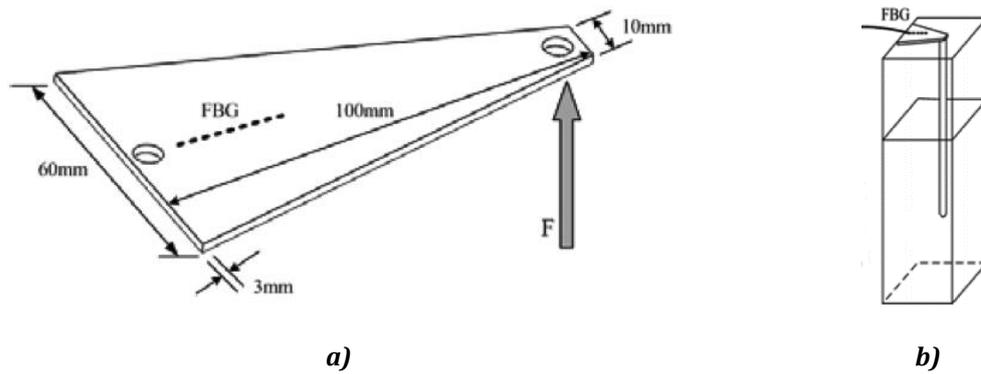


Figura 1.6 - a) Esquema do sensor de nível. b) Sensor de nível implementado num reservatório.

Em 2014, Vengal *et al.* desenvolveram um sensor de pressão utilizando uma rede de Bragg no interior de um bloco de silicone [25]. O sensor utiliza a transferência de pressão radial em distensão ao longo do eixo da fibra ótica, como mostra a Figura 1.7. Este sensor apresenta uma sensibilidade de $2,579 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$, sendo testado até aos 0,1 MPa.

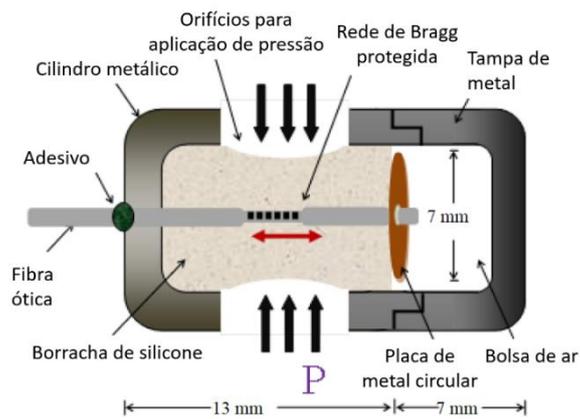


Figura 1.7 - Esquema do sensor de nível implementado por Vengal *et al.* Adaptado de [25].

Capítulo 2

Redes de Bragg gravadas em fibra ótica

As primeiras redes de Bragg permanentes inscritas em fibra ótica foram gravadas por Hill et al., no Canadian Communications Research Centre (CRC), em 1978 [26], [27]. O registo foi efetuado iluminando uma fibra ótica dopada com germânio com radiação emitida por uma laser de árgon (480 nm). Após algum tempo, foi observado um aumento da intensidade da radiação refletida até atingir praticamente a reflexão total [28]. O aumento da radiação refletida ocorre devido a um fenómeno não linear, a fotossensibilidade. Posteriormente, foi demonstrado que a magnitude do distúrbio fotoinduzido no índice de refração do núcleo da fibra ótica depende do quadrado da potência ótica do laser, sugerindo que a fotossensibilidade seria um processo resultante da absorção de dois fotões, originado pela presença de centros de germânio deficitários em oxigénio na matriz de sílica [29]. Meltz *et al.* demonstraram um processo mais eficiente de registo de redes de Bragg em fibras óticas, iluminando transversalmente o núcleo da fibra com radiação ultra violeta coerente, com um comprimento de onda de 244 nm, coincidente com a banda de absorção causada pelo defeito dos centros de germânio deficitários de oxigénio [30]. Estes centros são formados no processo de fabrico de fibras óticas, aquando da dopagem do núcleo da fibra com GeO_2 , que tem como objetivo aumentar o índice de refração na região do núcleo da fibra [31]. Apesar de existirem vários tipos de redes de Bragg [32], nesta dissertação apenas serão

mencionadas as redes de Bragg uniformes tipo I pois são as utilizadas no desenvolvimento dos sensores apresentados.

2.1 Sensibilidade a perturbações externas

Uma rede de Bragg gravada em fibra ótica consiste numa perturbação periódica longitudinal do índice de refração do núcleo de uma fibra ótica. As redes de Bragg são caracterizadas pelos seguintes parâmetros controláveis: comprimento físico da modulação, amplitude e periodicidade de modulação do índice de refração e formato de apodização da amplitude de modulação do índice de refração. A manipulação destes parâmetros permite obter refletividade e comprimento de onda de reflexão adequados à aplicação pretendida. Uma rede de Bragg pode ter desde alguns milímetros a alguns centímetros de comprimento. O valor típico da amplitude de modulação do índice de refração de uma rede de Bragg, Δn , é da ordem de 10^{-4} , sendo no máximo 10^{-2} . A periodicidade de modulação normalmente utilizada, da qual resultam comprimentos de onda refletidos na janela dos 1500 nm, usual nas comunicações óticas, é $\Lambda \approx 0,5 \mu\text{m}$ [32]. Na Figura 2.1 representa-se uma esquematização de uma fibra ótica com uma rede de Bragg uniforme inscrita, os espectros óticos típicos resultantes e a variação do índice de refração. Ao injetar um campo ótico numa fibra com uma rede de Bragg gravada, como a representada na Figura 2.1, o comprimento de onda que verificar a condição de Bragg de primeira ordem, equação (2.1), denomina-se comprimento de onda de Bragg, λ_B . Este comprimento de onda é refletido pela estrutura e é dado por [32]:

$$\lambda_B = 2\Lambda n_{eff} \quad (2.1)$$

onde Λ é o período de modulação do índice de refração no núcleo da fibra ótica e n_{eff} o índice de refração efetivo da fibra ótica. Os restantes comprimentos de onda não serão refletidos pois as suas componentes dispersas pelos seguintes planos da rede de Bragg são progressivamente desfasadas, acabando por se anular.

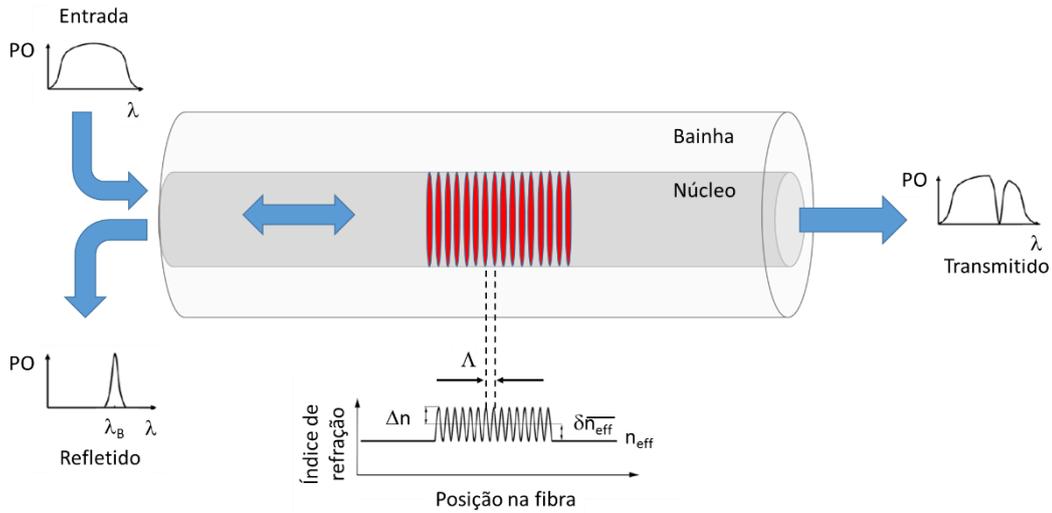


Figura 2.1 - Esquematização de uma fibra com uma rede de Bragg gravada. Ilustração dos espectros típicos resultantes e variação do índice de refração. Adaptado de [31].

A equação (2.2) representa a perturbação periódica aplicada ao índice de refração do núcleo da fibra óptica ao longo do eixo de propagação z [33].

$$\delta n_{eff}(z) = \overline{\delta n_{eff}}(z) \left\{ 1 + \xi(z) \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\} \quad (2.2)$$

A variação do valor médio da modulação é representada por $\overline{\delta n_{eff}}$, a amplitude de modulação, que varia entre 0 e 1, por ξ e a variação do período ao longo da rede por $\phi(z)$. As redes de Bragg utilizadas nesta dissertação são redes uniformes, nas quais o período ao longo da rede não se altera, logo $\phi(z)$ assume o valor 0.

A variação do comprimento de onda de Bragg, $\Delta\lambda_B$, provocada por perturbações externas aplicadas à rede, é o parâmetro diretamente medido em todos os sensores baseados neste tipo de tecnologia. Pela equação (2.1) verifica-se que λ_B depende da variação do índice de refração efetivo do núcleo da fibra óptica e do período da rede. Uma vez que ambos são sensíveis a perturbações mecânicas e variações de temperatura, é necessário conhecer o seu comportamento quando a rede é sujeita a estas perturbações. A equação (2.3) descreve a variação do comprimento de onda de Bragg devido à deformação mecânica, Δl , e à variação da temperatura, ΔT [34].

$$\Delta\lambda_B = 2 \left[\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right] \Delta l + 2 \left[\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right] \Delta T \quad (2.3)$$

Considerando a temperatura constante ($\Delta T=0$) a variação do comprimento de onda de Bragg devido a perturbações mecânicas pode ser escrita como [34]:

$$\Delta\lambda_B = S_{\Delta I} \varepsilon_z \quad (2.4)$$

onde $S_{\Delta I}$ é a sensibilidade relativa a deformações ao longo do eixo longitudinal da fibra z , e $\varepsilon_z = \frac{\Delta l}{l}$ a elongação relativa. Pode ainda escrever-se:

$$S_{\Delta I} = \lambda_B (1 - p_e) \quad (2.5)$$

sendo que, a constante fotoelástica p_e , descrita por

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (2.6)$$

onde p_{11} e p_{12} são as componentes do tensor fotoelástico e ν o coeficiente de Poisson. Para uma fibra típica de sílica dopada com germânio a variação típica do comprimento de onda de Bragg devido a deformações mecânicas é de 1,2 pm/ $\mu\epsilon$ [34].

A variação da temperatura de uma fibra ótica com uma rede de Bragg gravada resulta na alteração do índice de refração e, devido à expansão térmica, do período da rede. Para uma variação de temperatura ΔT , considerando como nula qualquer deformação mecânica, a variação do comprimento de onda de Bragg obedece à seguinte equação:

$$\Delta\lambda_B = S_T \Delta T \quad (2.7)$$

onde, S_T , representa a sensibilidade térmica da rede de Bragg. A sensibilidade térmica é dada por:

$$S_T = \lambda_B (\alpha_\Lambda + \alpha_n), \quad (2.8)$$

sendo α_Λ o coeficiente de expansão térmica, definido por

$$\alpha_\Lambda = \left(\frac{1}{\Lambda} \right) \left(\frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right), \quad (2.9)$$

e α_n o coeficiente termo-ótico, definido por

$$\alpha_n = \left(\frac{1}{n} \right) \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right). \quad (2.10)$$

Os valores típicos para o coeficiente de expansão térmica e o coeficiente termo-ótico de uma fibra de sílica dopada com germânio são, respetivamente, $\approx 0,55 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ e

$\approx 8,6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Na região espectral de 1550 nm a sensibilidade esperada é aproximadamente 14 pm/°C [34].

2.2 Sistema de gravação de redes de Bragg

Existem vários métodos para a gravação de uma rede de Bragg numa fibra ótica, no entanto, os métodos mais usuais são a gravação por máscara de fase e gravação por interferómetro com máscara de fase [32]. Será apenas descrito o método utilizado para a gravação das redes de Bragg utilizadas para construir os sensores implementados, gravação por máscara de fase. O método consiste em fazer incidir radiação ultravioleta (UV) numa máscara de fase com o objetivo de criar um padrão de interferência a uma determinada distância da máscara. O padrão de interferência é criado através da sobreposição de duas ordens de difração do sinal incidente na máscara. Uma máscara de fase ótima, para esta aplicação específica, é aquela que minimiza a ordem de difração zero e maximiza as ordens -1 e +1, responsáveis pela formação do padrão de interferência [31].

Antes de ser efetuada a gravação é necessário aumentar a fotossensibilidade na região UV da fibra ótica a utilizar, o que pode ser feito através de diversos processos, sendo a dopagem e a hidrogenação da fibra as técnicas mais utilizadas. Para proceder à gravação a fibra é colocada na zona de formação do padrão de interferência da máscara de fase. A sobreposição dos sinais das ordens -1 e +1 originam franjas de interferência no plano da fibra, dando origem a uma FBG com período $\Lambda = \Lambda_{MF}/2$, sendo Λ_{MF} o período da máscara de fase. A Figura 2.2 representa o esquema para a gravação de redes de Bragg, através do método de máscara de fase, montado no Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro (IT), no qual foram gravadas as FBGs utilizadas ao longo desta dissertação[31].

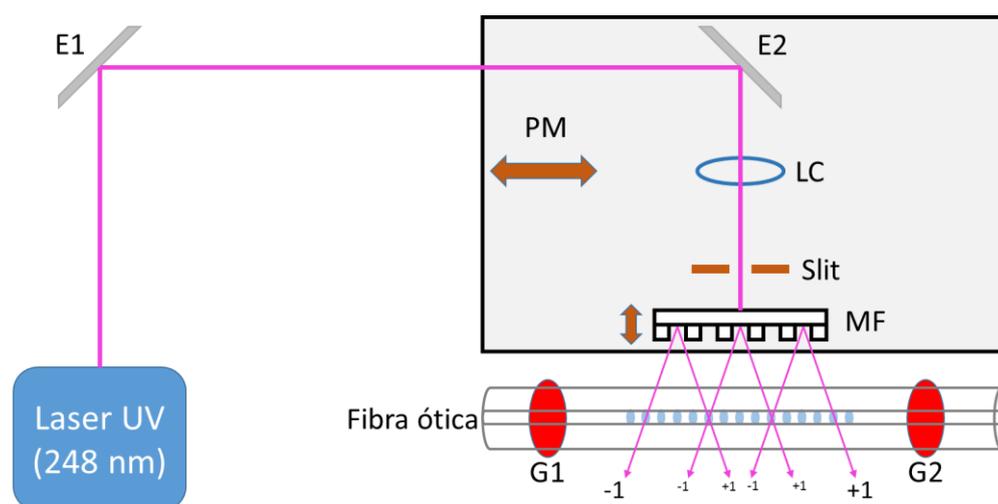


Figura 2.2 – Esquema utilizado para a gravação das redes de Bragg utilizadas. E1 e E2 são espelhos para direcionar o laser.

É utilizado um laser de excímeros (KrF), pulsado (modelo BraggStar Industrial da Coherent), com emissão no comprimento de onda de 248 nm. O sinal emitido pelo laser é direcionado através de espelhos para uma lente de focagem cilíndrica (LC). De seguida o feixe passa por uma abertura (*slit*), variável de 0 a 4 mm com uma resolução de 1.5 μm (que permite controlar sobre o comprimento final da FBG), atingindo finalmente a máscara de fase (MF), que pode ser ajustada garantindo a otimização da gravação em fibras óticas com diferentes diâmetros. Através de uma plataforma móvel (PM) é possível movimentar todo o sistema na direção paralela à fibra ótica, permitindo a gravação de redes com diferentes períodos e comprimentos. As garras magnéticas (G1 e G2) permitem fixar a fibra e são sustentadas por postes metálicos aplicados numa plataforma de translação, possibilitando pré-tencionar a fibra ótica [31], [35].

Capítulo 3

Sensores implementados

Neste capítulo serão descritos os sensores utilizados e implementados e a estrutura alvo de monitorização. A estrutura a monitorizar é o depósito de água da Universidade de Aveiro, desenhado por Álvaro Siza Vieira, em 1991. Para a sua monitorização é utilizado um acelerómetro biaxial, e está prevista a instalação de um sensor de nível, ambos baseados em FBGs. O acelerómetro instalado na estrutura encontra-se ligado por fibra ótica ao edifício II do Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro.

A frequência natural de uma estrutura está diretamente relacionada com a rigidez da estrutura e com a sua massa. Desde que não sejam efetuadas alterações estruturais e a massa da estrutura não seja alterada, a monitorização da evolução temporal do valor da frequência natural é um indicador da integridade estrutural global, indicando perda de rigidez, no caso de um decréscimo do seu valor.

Em 2011 foi instalado o sensor de aceleração baseado em FBGs, descrito na secção 3.1. No entanto, para que a monitorização seja precisa, é necessário o controlo do nível de água no reservatório, dada a sua influência no valor da frequência natural. Com esse objetivo, foi desenvolvido um sensor de nível, que posteriormente será instalado, multiplexado com o sensor de aceleração existente, na estrutura.

3.1 Acelerómetro

Dada a necessidade de obter as frequências naturais da estrutura monitorizada em duas direções, foi utilizado um acelerómetro ótico biaxial desenvolvido em trabalhos

anteriores [36]. Na Figura 3.1 está ilustrado o acelerómetro utilizado para monitorizar a estrutura do reservatório remotamente.

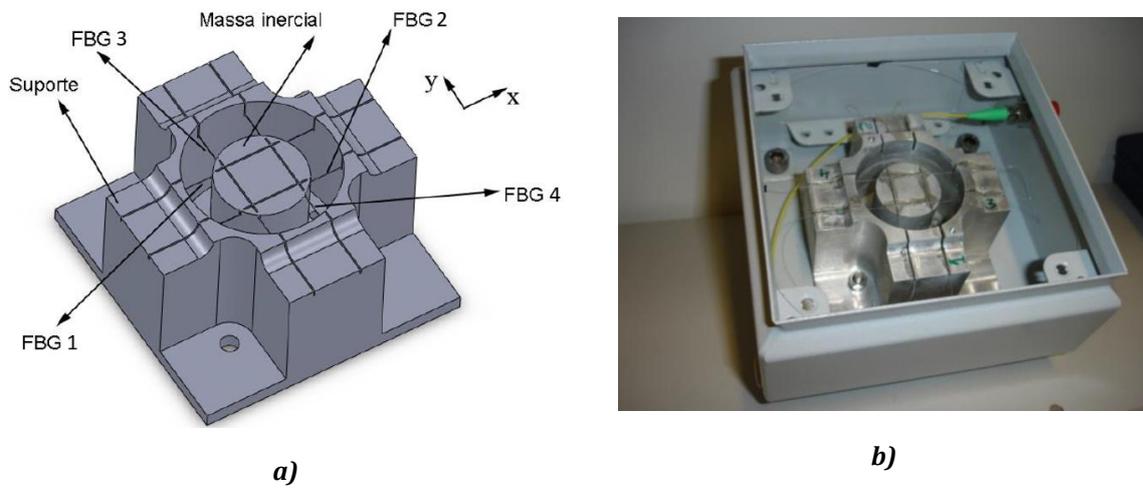


Figura 3.1 - a) Esquema do acelerómetro óptico biaxial utilizado. Adaptado de [36]. b) Fotografia do sensor.

O sensor supracitado é formado por duas peças de alumínio independentes, o suporte e a massa inercial, e quatro redes de Bragg. A massa inercial, representada na Figura 3.2, é fixada no suporte através de quatro parafusos. Para fixar as fibras óticas com as redes de Bragg entre o suporte e a massa inercial, foi aplicada um pré tensão às fibras que foram posteriormente fixadas com cola de cianoacrilato. A massa inercial tem um diâmetro de 4 mm na sua secção mais estreita e de 50 mm na zona cilíndrica na qual as fibras óticas são fixadas. Deste modo a massa é livre de se mover segundo as direções x e y.

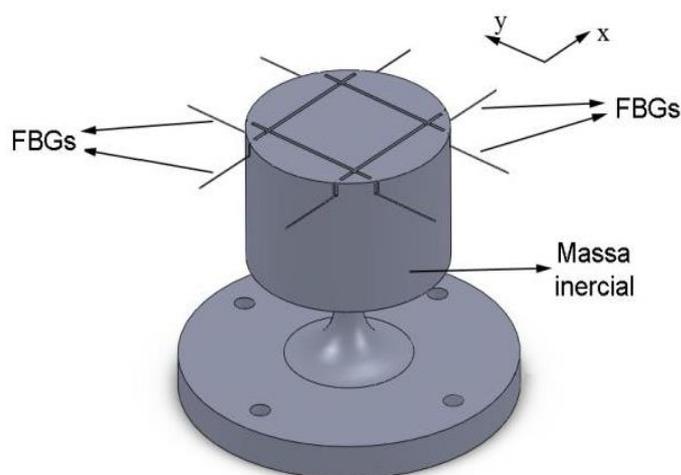


Figura 3.2 - Massa inercial e FBGs instaladas. Adaptado de [36].

Como consequência do movimento da massa inercial, para cada direção, uma das redes de Bragg é esticada enquanto a outra é comprimida, resultando em alterações do comprimento de onda de Bragg de cada uma das redes. Uma vez que, o movimento da massa inercial é provocado pela aceleração que esta está sujeita, é possível relacionar a mesma com a variação do comprimento de onda de Bragg. O valor da aceleração é obtido pelo sensor, para cada direção, através da diferença de variações do comprimento de onda de Bragg das redes correspondentes à direção em causa.

Como as redes foram gravadas do mesmo modo numa única fibra ótica a sua sensibilidade térmica é a mesma, pois qualquer alteração térmica traduz-se num deslocamento espectral da posição de todas as FBGs de igual modo, o que permite anular o efeito da temperatura através da subtração do comprimento de onda dos sinais das redes para cada direção [36]. Do mesmo modo, as relações inter-direcionais são também anuladas, pois a deformação provocada numa direção por movimentos segundo a outra direção é cancelada quando se calcula a diferença total de variações de comprimentos de onda de Bragg. A Figura 3.3 mostra o espectro de reflexão das FBGs gravadas na fibra ótica utilizada no acelerómetro, obtido pelo interrogador utilizado para a monitorização remota da estrutura (*FS22 Industrial BraggMETER DI* da *HBM FiberSensing*).

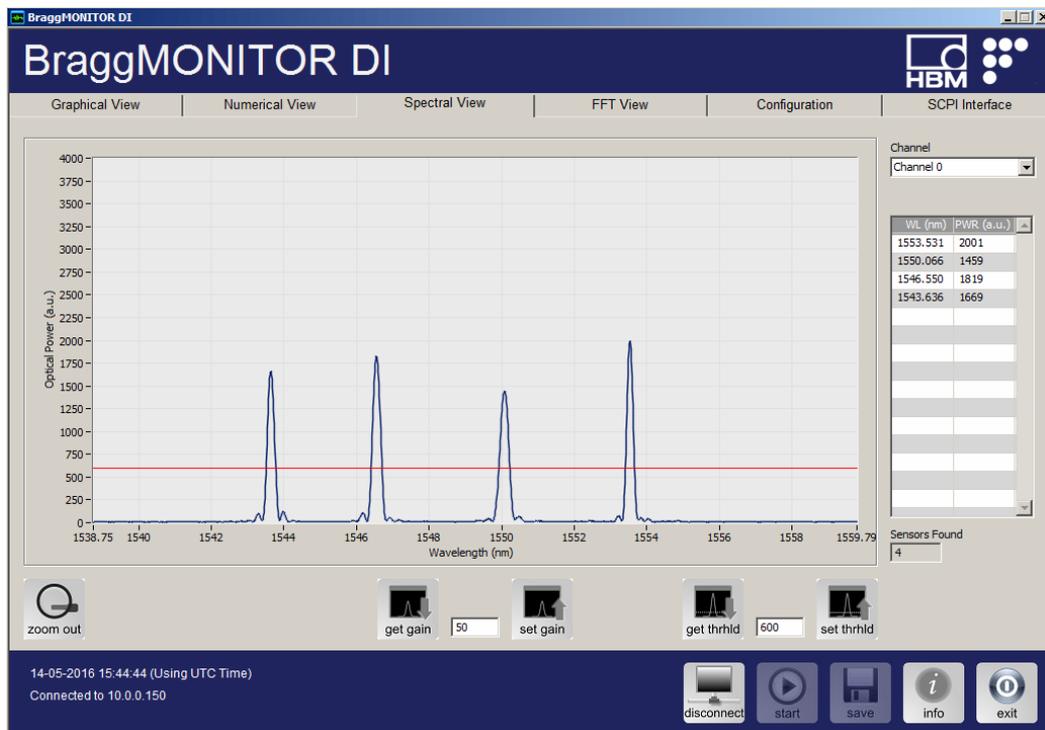


Figura 3.3 – Espectro de reflexão das quatro FBGs que constituem o acelerómetro.

O acelerómetro ótico foi calibrado por comparação a um acelerómetro eletrónico comercial da marca *Summit*, modelo 34201A. O sensor apresenta uma sensibilidade de

87,848 pm/G na direção do eixo xx (FBG1 e FBG2) e de 92,351 pm/G na direção do eixo yy (FBG3 e FBG4).

Como mostra a Figura 3.4, o sensor foi instalado numa caixa de aço como forma de proteção, melhorando a sua robustez física e a facilidade de aplicação à estrutura a monitorizar.

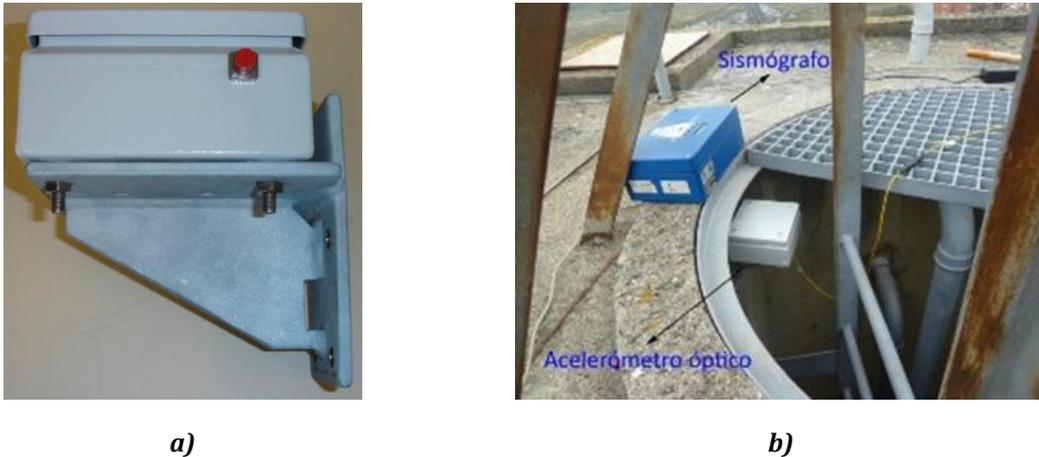


Figura 3.4 - a) Acelerómetro aplicado na sua estrutura protetora [36]. b) Fotografia do sensor aplicado na estrutura [31].

3.2 Sensor de nível

Um dos objetivos desta dissertação é o desenvolvimento de um sensor de nível baseado em redes de Bragg inscritas em fibra ótica. O sensor foi desenvolvido com a finalidade de medir o nível de água contido no depósito de água da Universidade de Aveiro, para que a variação de massa da estrutura seja tida em conta na variação do valor da sua frequência natural. Para tal, foram desenvolvidos vários protótipos com o objetivo de desenvolver um sensor que possa corresponder às necessidades.

Na Figura 3.5 está representado o primeiro protótipo do sensor de nível desenvolvido.

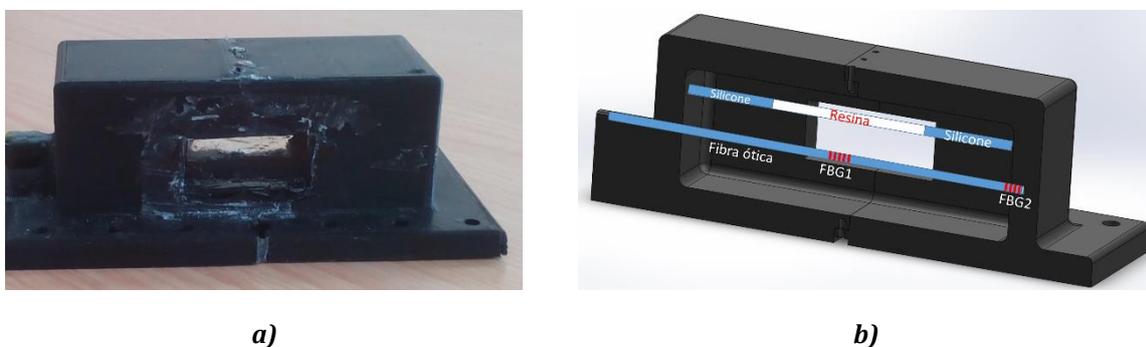


Figura 3.5 - Protótipo da primeira versão do sensor de nível. a) Fotografia. b) Esquema em corte.

Este protótipo é composto por duas peças, “macho” e “fêmea”, que encaixam e permitem uma maior facilidade de montagem da fibra ótica no seu interior. O sensor contém uma fibra ótica com duas redes de Bragg inscritas, FBG1 e FBG2. A FBG1 está no interior da resina e a FBG2 está fixa e protegida dentro de um orifício, com o objetivo de medir a temperatura e compensar o seu efeito. As duas peças foram desenhadas em *SOLIDWORKS* e impressas numa impressora 3D (*Cube* da *3D Systems*) em PLA (ácido polilático, polímero constituído por moléculas de ácido láctico). O sensor contém duas camadas de silicone com ≈ 10 mm de espessura, sendo o restante volume livre cheio com resina transparente de poliuretano, conforme está representado na Figura 3.5 b). Quando o sensor é submerso, as duas janelas do sensor são sujeitas à pressão P e a resina é comprimida segundo a direção perpendicular à face das janelas e, a maior elasticidade das duas camadas de silicone facilita a expansão na direção em que está instalada a fibra. Uma vez que a fibra expande juntamente com a resina, a variação do comprimento de onda de Bragg da FBG1 está relacionada com o nível do líquido no qual o sensor é submerso. O nível, ou a altura do líquido acima do sensor, pode ser relacionado com a pressão através da equação (3.1):

$$P = P_s + \rho gh, \quad (3.1)$$

onde P_s é a pressão à superfície do líquido, ρ é a densidade do líquido e h a altura do nível do líquido e g a constante de aceleração da gravidade.

Foi realizado um ensaio em que se aplicaram massas numa das janelas do sensor, enquanto na outra janela foi fixa uma barra de latão de modo a imobilizar a mesma e garantir a compressão da resina. Utilizando a equação (3.2), é possível reproduzir a resposta do sensor em função da altura e água no reservatório, Figura 3.6.

$$\frac{F}{A} = \rho gh \quad (3.2)$$

onde F representa a força e A a área da face da barra de latão.

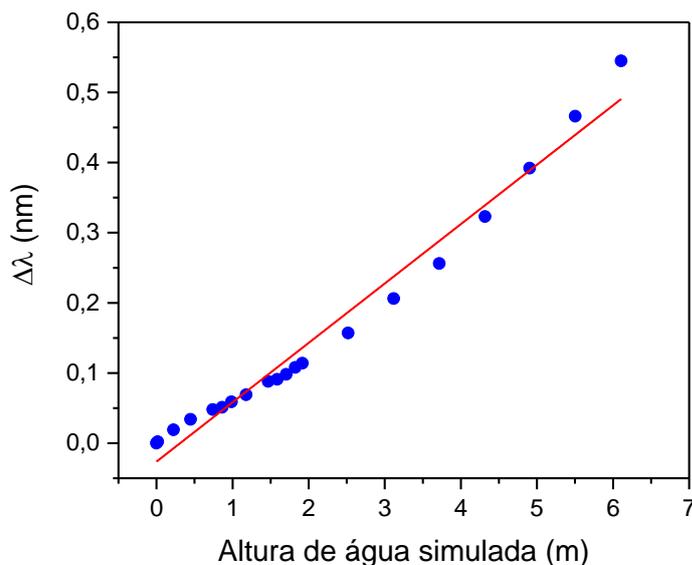


Figura 3.6 - Variação do comprimento de onda de Bragg em função da altura de água reproduzida calculada pela equação (3.2). Os pontos representam os dados obtidos e a reta o respetivo ajuste linear ($R^2=0,98$).

Numa primeira aproximação, fez-se um ajuste linear aos dados da Figura 3.6, e estimou-se a sensibilidade do sensor, obtendo-se um valor de $85\pm 3,0$ pm/m. Este valor, considerando uma precisão do sistema de interrogação de 5 pm, resultaria numa resolução de cerca de 5,91 cm na medida do nível. Embora os dados do gráfico da Figura 3.6 mostrem uma sensibilidade adequada, foi realizado um teste no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, numa coluna de água com 2 metros de altura, pois o objetivo do sensor é a implementação num reservatório de água. Na Figura 3.7, mostra-se o sensor imerso na coluna de água.



Figura 3.7 - Fotografia do sensor imerso na coluna de água.

Esta versão não se mostrou adequada para implementação devido à instabilidade provocada por uma possível falta de aderência entre a resina e o silicone, podendo

provocar tensões que, com o aumento da pressão são subitamente libertadas. Este fenómeno provoca alterações repentinas do comprimento de onda de Bragg da FBG1, impossibilitando a sua caracterização. O próprio desenho das peças não se revelou ideal, o que levou ao desenvolvimento de um novo protótipo para tentar colmatar todas as falhas do anterior.

O segundo protótipo teve como objetivo simplificar o anterior e ultrapassar as falhas mecânicas do seu antecessor. A Figura 3.8 mostra uma fotografia e um esquema em corte do segundo sensor desenvolvido.

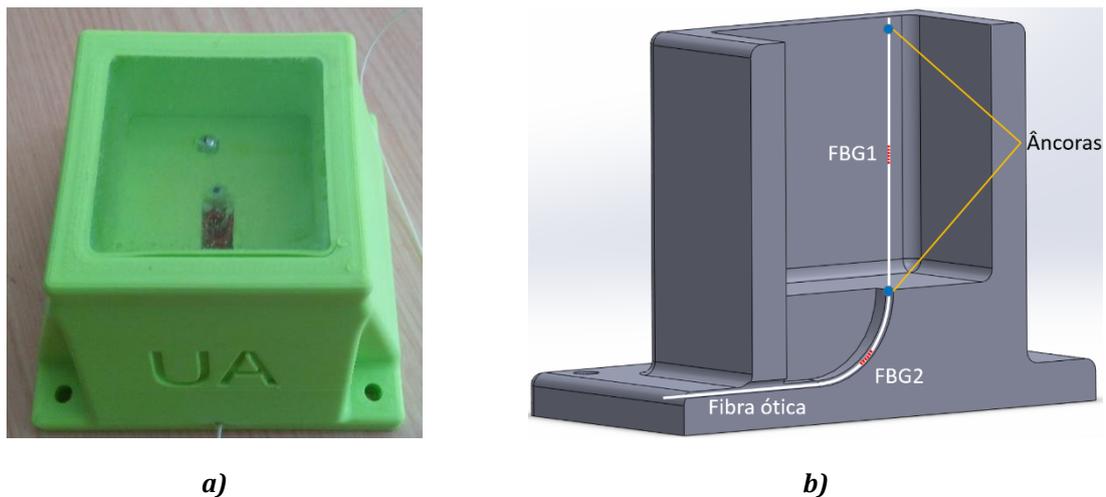


Figura 3.8 - a) Fotografia do sensor. b) Esquema em corte da versão 2 do sensor de nível.

A fibra na região da FBG2 e a âncora inferior foram coladas com cola de cianoacrilato para garantir a sua imobilidade, sendo previamente encapsulada com um tubo de PTFE (Politetrafluoretileno), de diâmetro interior 0,5 mm, para permitir a expansão térmica sem interferências. Posteriormente, a fibra foi tensionada e a âncora superior foi fixa perto da face superior do sensor da mesma forma. Por último, a cavidade do sensor foi preenchida com resina epoxy, incluindo o pequeno orifício que contém a FBG2. Assim, com a variação da pressão na face superior o comprimento de onda de Bragg da FBG1 irá também variar. Mais uma vez, a FBG2 é utilizada como sensor de temperatura para compensação na resposta global do sensor.

Relativamente à resposta do sensor em função da pressão, foi utilizada uma placa de latão, com as dimensões aproximadamente iguais às da área da superfície exposta da resina, como suporte para massas. De modo a reproduzir diferentes pressões, foram colocadas massas de diferentes valores sobre o suporte. A área exposta da resina, A , é um quadrado com 5 cm de lado. Através da expressão (3.3) pode reproduzir-se a pressão correspondente à altura de água, h , sobre o sensor.

$$\frac{mg}{A} + P_s = P = P_s + \rho_{\text{água}} gh \quad (3.3)$$

P_s representa a pressão à superfície da água, P a pressão à face da resina, g a aceleração da gravidade e ρ a densidade da água. Os valores das constantes utilizadas foram $P_s = 101325 \text{ N/m}^2$, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ e $\rho_{\text{água}} = 1000 \text{ kg/m}^3$. A Figura 3.9 mostra o comprimento de onda da FBG1 em função da altura de água reproduzida.

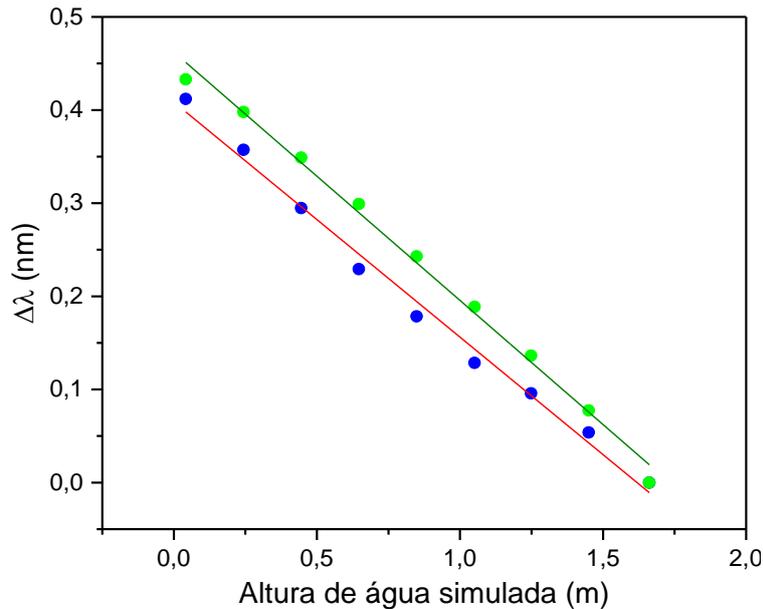


Figura 3.9 – Comprimento de onda de Bragg da FBG1 em função da altura de água calculada através da equação (3.2). Os pontos a azul e a verde representam, respetivamente, os dados obtidos ao longo da adição e remoção das massas. As linhas representam os respetivos ajustes lineares.

As sensibilidades obtidas, relativamente à subida e descida do nível da água, foram $252 \pm 9,00 \text{ pm/m}$ e $267 \pm 7,00 \text{ pm/m}$, respetivamente para a subida e descida do nível de água.

Para verificar a resposta do sensor em função de variações de temperatura foi utilizada uma câmara térmica no Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro (Angelantoni industrie, modelo Challenge CH340). O sensor foi colocado no seu interior e esta foi programada para variar a temperatura em intervalos de $7,5 \text{ }^\circ\text{C}$, dos $5 \text{ }^\circ\text{C}$ aos $42,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

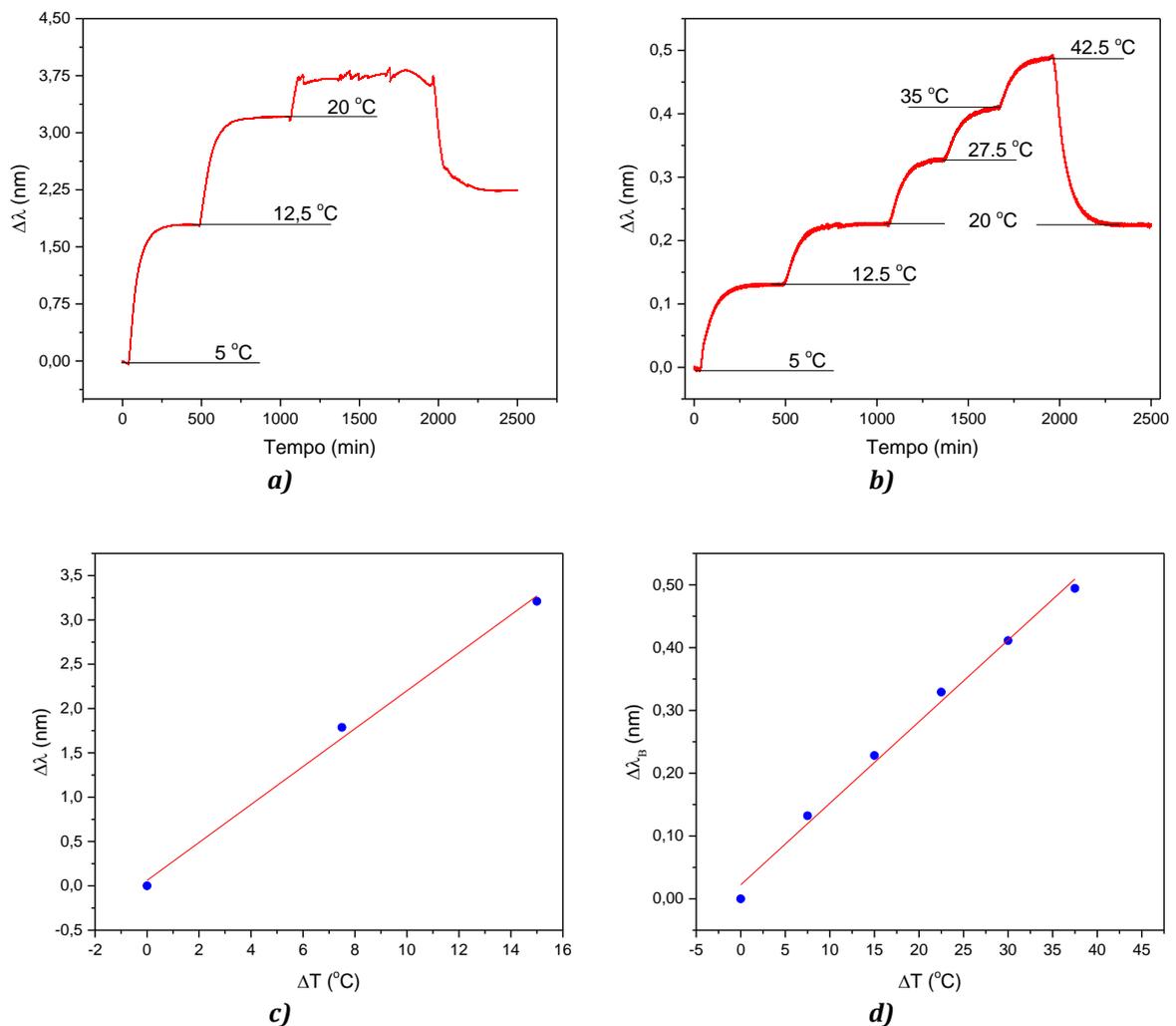


Figura 3.10 – Variação do comprimento de onda da FBG1 e FBG2 ao longo do tempo, a) e b), respectivamente. Variação do comprimento de onda em função da variação da temperatura da FBG1 e FBG2, c) e d), respectivamente. As linhas representam os respectivos ajustes lineares.

A Figura 3.10 mostra os dados relativos à calibração do sensor em função da temperatura. Como é visível na Figura 3.10 a), esta versão do sensor revelou um comportamento deficiente da FBG1 para temperaturas superiores a $\approx 25^{\circ}\text{C}$. Na gama dos 0°C aos 20°C para a qual a FBG1 e FBG2 apresentam uma sensibilidade térmica de $214 \pm 14,0 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ e $13,0 \pm 0,600 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$, respectivamente. A sensibilidade da FBG1 é bastante elevada pois é afetada pela expansão térmica do PLA. No entanto, devido a um possível escorregamento da fibra ótica, o comprimento de onda de Bragg da FBG 1 medido para 20°C depois da calibração não corresponde ao valor obtido durante a mesma.

A variação do comprimento de onda de Bragg da FBG1 e FBG2, em função da temperatura, é dada pelas seguintes equações:

$$\Delta\lambda_{FBG1,T} = S_{FBG1,T} \cdot \Delta T + C_{FBG1} \quad (3.4)$$

$$\Delta\lambda_{FBG2,T} = S_{FBG2,T} \cdot \Delta T + C_{FBG2} \quad (3.5)$$

sendo $S_{FBG1,T}$ e $S_{FBG2,T}$, as respectivas sensibilidades da FBG1 e FBG2 a variações de temperatura, ΔT , a temperatura e C_{FBG1} e C_{FBG2} , constantes do ajuste linear relativas à FBG1 e FBG2, respetivamente. As sensibilidades e as constantes são determinadas pelos respetivos ajustes lineares representados na Figura 3.10.

Através das equações (3.4) e (3.5) é possível compensar o efeito da temperatura na FBG1 e obter a variação do comprimento de onda de Bragg provocada apenas por variações de pressão, anulando a dependência com a temperatura. Essa variação é dada pela equação:

$$\Delta\lambda_p = \Delta\lambda_{FBG1,P} - S_{FBG1,T} \left(\frac{\Delta\lambda_{FBG2,T} - C_{FBG2}}{S_{FBG2,T}} \right) - C_{FBG1}, \quad (3.6)$$

onde $\Delta\lambda_{FBG1,P}$ é a variação do comprimento de onda de Bragg da FBG1. Assim, as sensibilidades e as constantes são características de cada FBG, sendo $\Delta\lambda_{FBG1,P}$ e $\Delta\lambda_{FBG2,T}$ os parâmetros medidos diretamente pelo interrogador.

Foram efetuados testes na coluna de água do Departamento de Engenharia Civil com o segundo protótipo do sensor de nível desenvolvido. O sensor foi colocado no fundo da coluna de água, como mostra a Figura 3.11.

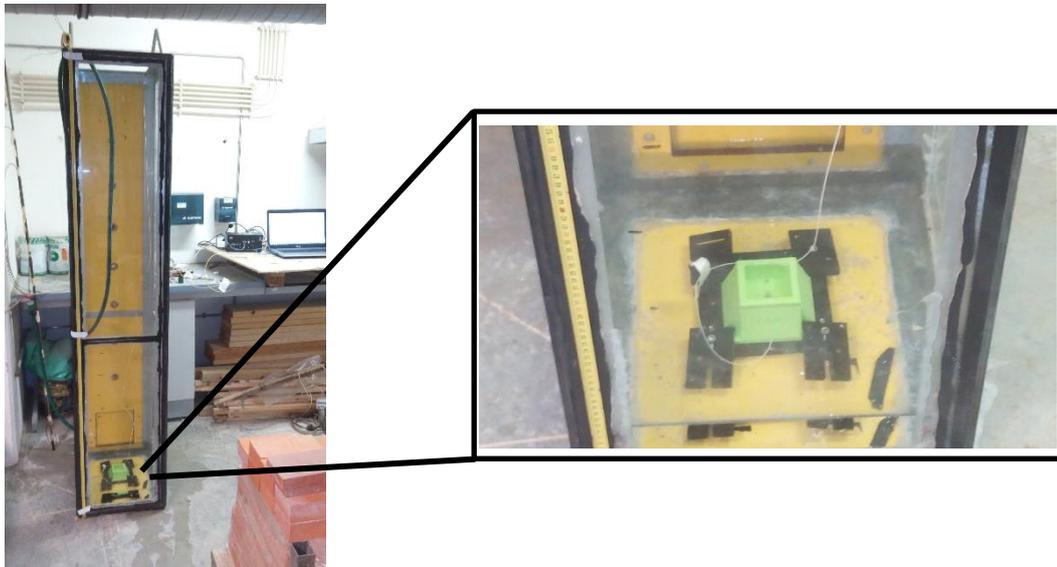


Figura 3.11 – Ilustração dos testes efetuados com o sensor de nível na coluna de água.

De seguida, a coluna foi cheia com água até 81,5 cm de altura relativamente à superfície da resina, em intervalos de 10 cm. O valor do comprimento de onda de Bragg

da FBG1 foi adquirido para cada intervalo. Neste teste não foram necessárias correções relativamente a variações de temperatura pois o sensor já estava submerso há algum tempo quando se efetuaram as medições. A observação do sinal da FBG2 confirmou que a variação de temperatura foi nula durante todo o ensaio. Os resultados obtidos estão representados no gráfico da Figura 3.12. Através do ajuste linear representado, obteve-se a sensibilidade do sensor relativamente ao nível de água em qualquer reservatório, $147 \pm 8,20$ pm/m. A sensibilidade obtida neste ensaio é inferior à sensibilidade obtida através da simulação com massas descrita na Figura 3.9. Uma das razões para este decréscimo é o facto de a área do suporte para as massas não ser exatamente igual à área exposta da resina. Por outro lado, a junção entre o suporte e a superfície da resina também não é perfeita, o que resulta na não uniformidade da pressão aplicada. Por fim, na simulação com as massas a pressão é apenas aplicada na direção vertical, o que pode levar a que o sensor expanda nas outras duas direções, pois o PLA possui alguma elasticidade, permitindo esta expansão. Neste ensaio este efeito é minimizado pois a pressão é aplicada em todas as direções, confinando o movimento da resina à direção vertical. Por estar confinada pelas paredes do sensor (assumindo que a pressão em causa não é suficiente para comprimir o PLA), para a mesma pressão, a resina é sujeita a uma menor compressão.

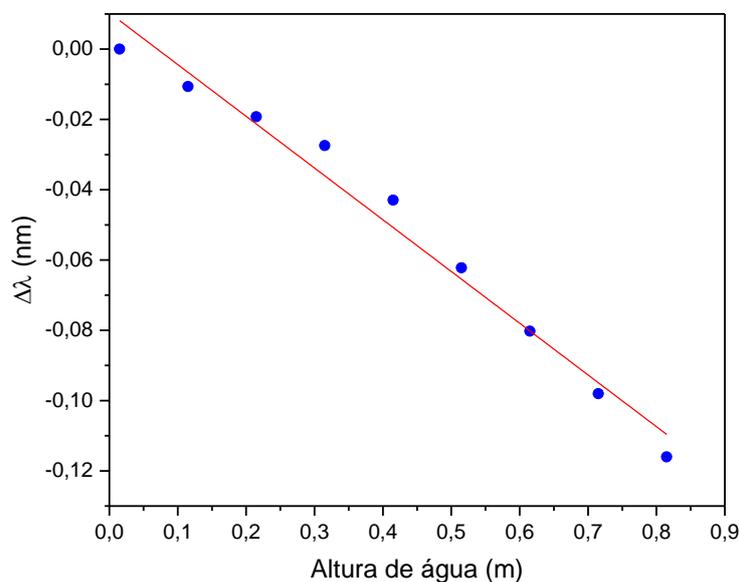


Figura 3.12 – Comprimento de onda da FBG1 da segunda versão do sensor de nível, em função do nível de água na coluna.

No entanto, mais uma vez, verificou-se que a resposta do sensor não era adequada. Através dos dados registados na Figura 3.10, verifica-se que para temperaturas superiores a 25 °C a resposta da FBG1 não é a esperada, possivelmente devido ao grande

volume de resina utilizado, à alteração das suas propriedades viscoelásticas e à sua aderência à fibra, com as variações de temperatura.

Com o objetivo de colmatar as falhas do sensor anterior, nomeadamente a sua ineficiência para temperaturas superiores a 25 °C, foram desenvolvidos mais dois sensores. Os dois sensores têm a mesma estrutura e princípio de funcionamento, no entanto o material em que as FBGs são inseridas é diferente. Uma das estruturas foi preenchida com a mesma resina dos sensores anteriores, enquanto a outra foi preenchida com silicone para altas temperaturas (Pattex – SL509). A Figura 3.13 mostra os dois sensores de nível.

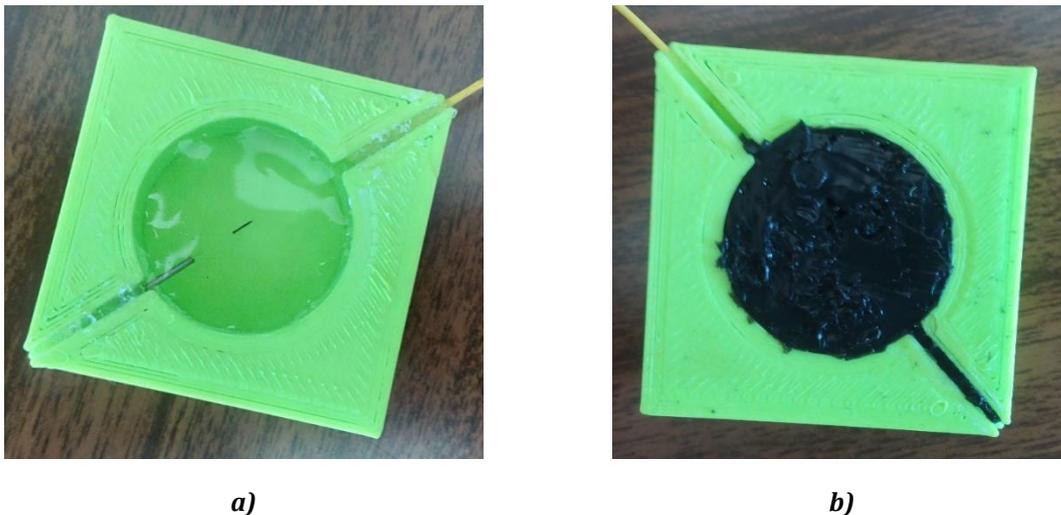


Figura 3.13 – Versão 3 do sensor de nível. a) Preenchido com resina. b) Preenchido com silicone de alta temperatura.

A experiência obtida com o sensor anterior levou a uma mudança no desenho destes sensores. Em vez de colocar a fibra ótica ao longo da direção de deformação, esta foi colocada perpendicularmente, mas próxima da superfície, de modo a maximizar a tensão transversal na fibra devido à pressão na superfície da resina/silicone. A Figura 3.14 representa o esquema do terceiro protótipo do sensor de nível.

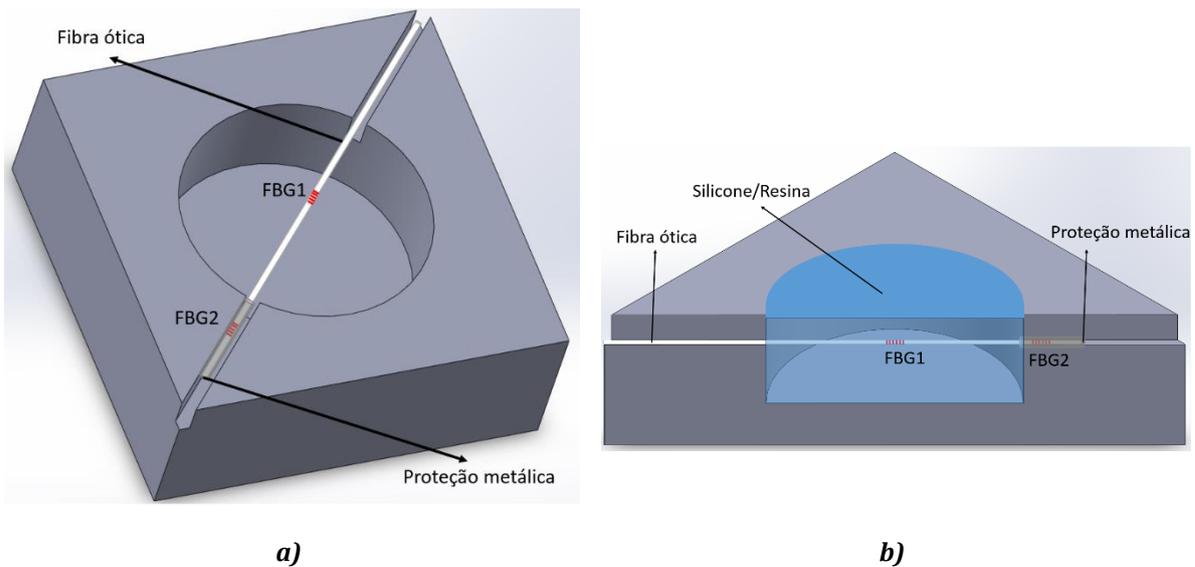


Figura 3.14 - Esquema do sensor de nível, versão 3. a) Vista em perspectiva. b) Vista em corte.

A estrutura do sensor é composta por um paralelepípedo com 4 cm de lado e 1.5 cm de altura, um furo circular com 2,5 cm de diâmetro e 1 cm de profundidade, e duas ranhuras com 0,3 cm de profundidade, onde é inserida a fibra ótica. A FBG2 é encapsulada dentro de uma proteção metálica de diâmetro interior de 0,5 mm e fixa utilizando cola de cianoacrilato. Em seguida a proteção metálica é fixa à estrutura na zona da ranhura, tal como a outra extremidade da fibra. Por fim o furo é preenchido com a resina numa das peças e com silicone de alta temperatura na outra. Quando sujeito à pressão proveniente da submersão do sensor num líquido, o material que preenche o furo irá ser deformado na direção perpendicular à fibra, que é deformada junto com o material, resultando numa alteração do comprimento de onda de Bragg da FBG 1. Uma vez que a FBG2 está fixa dentro da proteção metálica, a variação do seu comprimento de onda de Bragg é independente da pressão. Deste modo, tal como na versão anterior, é possível proceder à compensação das variações de temperatura.

A terceira versão do sensor de nível foi também sujeita a uma calibração térmica, na mesma câmara térmica utilizada anteriormente. A Figura 3.15 mostra a variação do comprimento de onda de Bragg para várias temperaturas, das duas FBGs de cada sensor em função do tempo. Foram realizados dois ciclos térmicos, com subida e descida dos valores da temperatura, de modo a verificar a repetibilidade dos sensores. O tempo de estabilização utilizado é menor que na versão anterior, pois o volume de material utilizado para preencher a cavidade dos sensores foi menor. Devido à longa duração do ensaio, cerca de 80 horas, e à falha do sistema de aquisição, alguns pontos não foram adquiridos, pelo que não foram considerados.

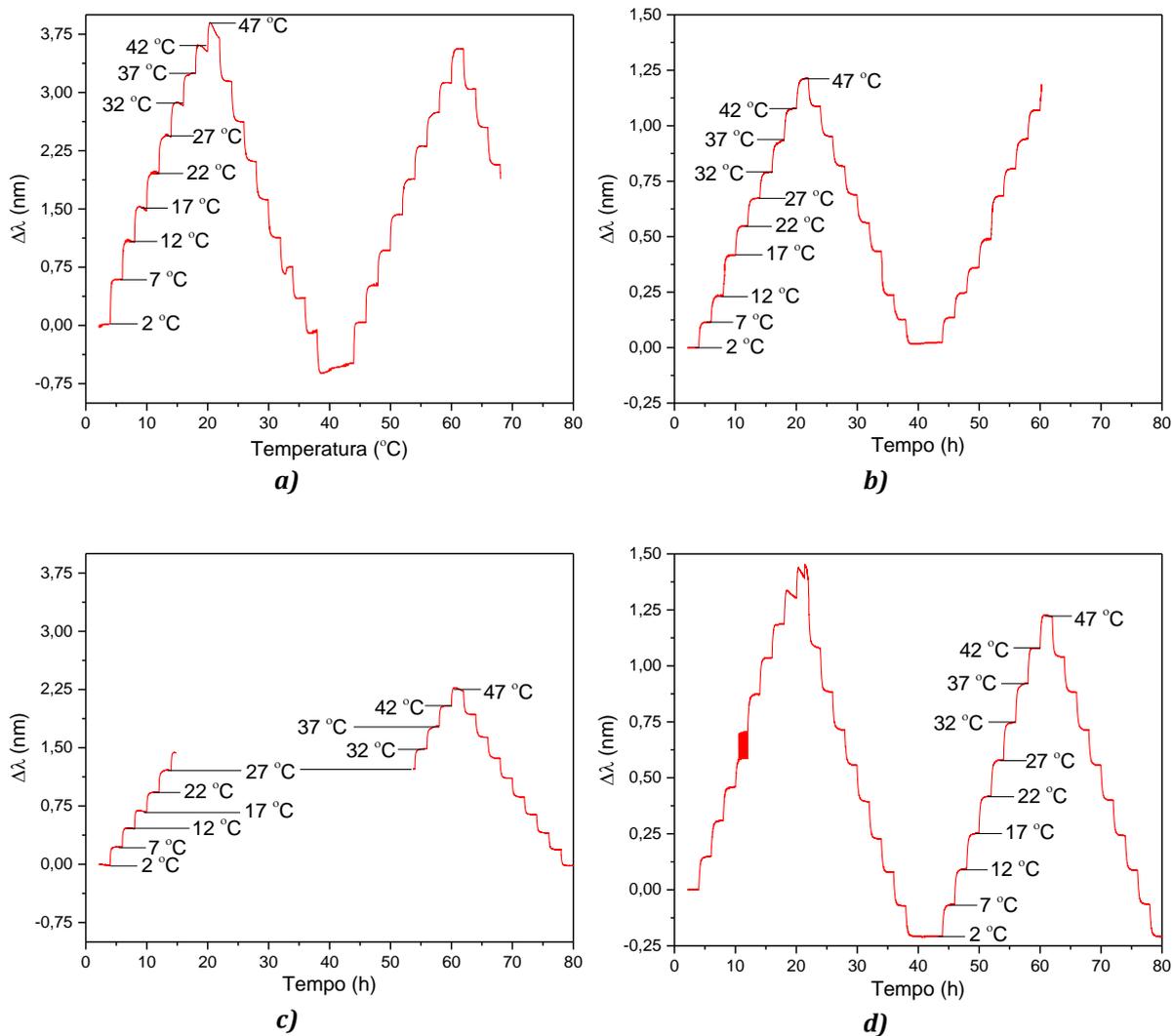


Figura 3.15 – Variação do comprimento de onda de Bragg, devida à variação de temperatura, das FBGs constituintes dos dois sensores de nível ao longo de 80 horas. a) FBG1 do sensor preenchido com resina. b) FBG2 do sensor preenchido com resina. c) FBG1 do sensor preenchido com silicone. d) FBG2 do sensor preenchido com silicone.

Os dados em falta nos gráficos a), b) e c) da Figura 3.15 resultam da perda de detecção do valor dos picos, relativos ao comprimento de onda de Bragg de cada FBG, por parte do interrogador. Na Figura 3.16 está representada a variação do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura para os dois sensores.

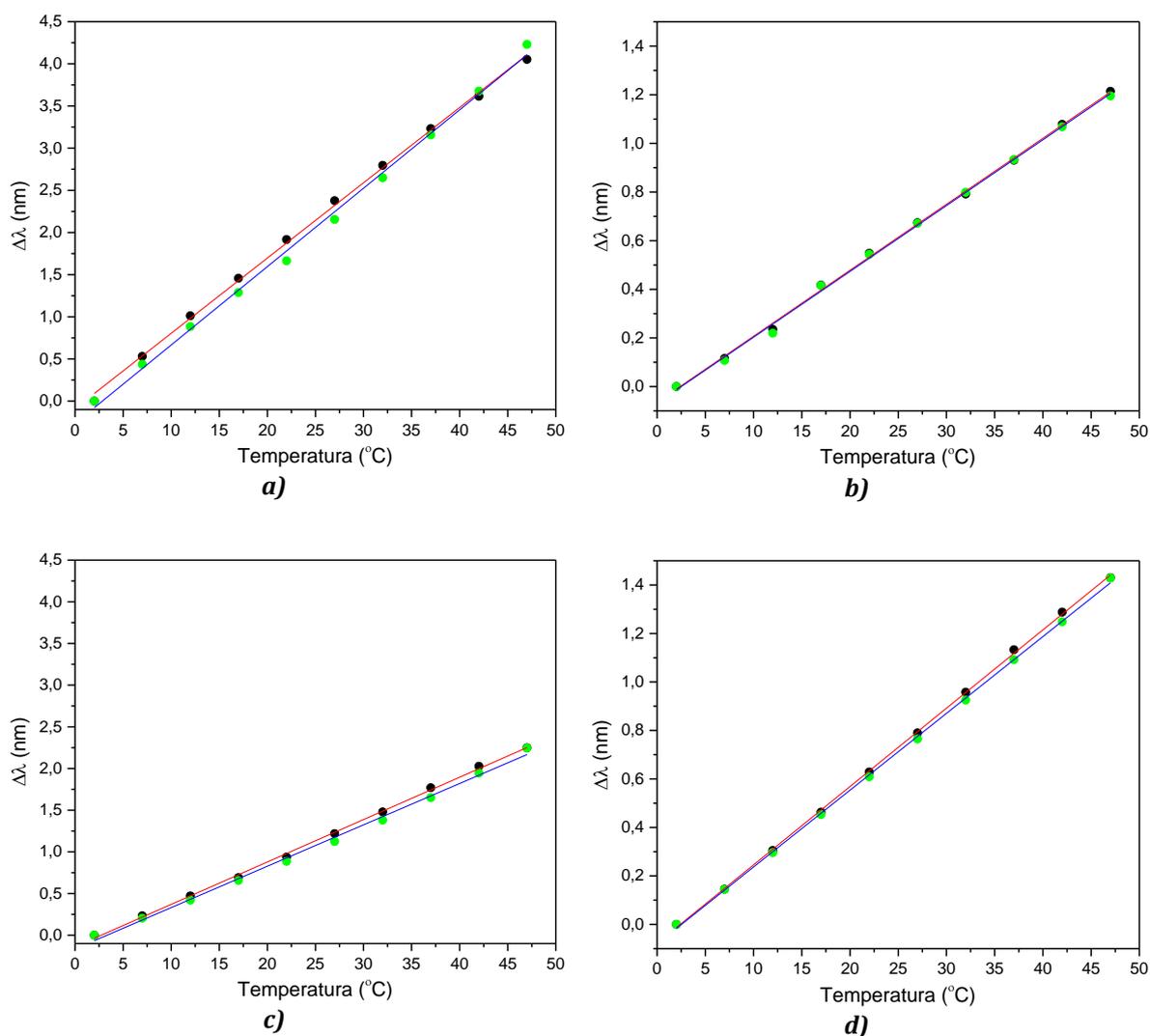


Figura 3.16 – Variação do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura para os dois sensores de nível. a) FBG1 do sensor preenchido com resina. b) FBG2 do sensor preenchido com resina. c) FBG1 do sensor preenchido com silicone. d) FBG2 do sensor preenchido com silicone. Os pontos a preto e a verde representam, respectivamente, as medidas obtidas durante a subida e descida da temperatura. As retas representam os ajustes lineares.

Relativamente aos dados representados na Figura 3.16, foram obtidas as sensibilidades para cada FBG. Esta foi calculada fazendo a média dos declives das retas de ajuste relativas à subida e descida da temperatura. Assim, as sensibilidades obtidas para a FBG1 e FBG2 do sensor preenchido com resina são, respetivamente, $91,0 \pm 1,50$ pm/°C e $27,0 \pm 0,400$ pm/°C. Os valores das constantes C_{FBG1} e C_{FBG2} foram também calculados, do mesmo modo, obtendo-se $-0,18 \pm 0,040$ pm e $-0,06 \pm 0,010$ pm, respetivamente. De igual modo, para o sensor preenchido com silicone de alta temperatura as sensibilidades da FBG1 e FBG2 são, respetivamente, $50,0 \pm 0,900$ pm/°C e $32,0 \pm 0,200$ pm/°C. Relativamente ao valor das constantes C_{FBG1} e C_{FBG2} , os valores obtidos foram $-0,15 \pm 0,020$ pm e

-0,08±0,01 pm, respetivamente. É notório que o sensor preenchido com silicone de alta temperatura apresenta uma sensibilidade térmica inferior, ao nível da FBG1, relativamente ao sensor preenchido com resina. Ambos os sensores apresentam sensibilidades térmicas muito inferiores à versão anterior, o que representa claramente uma evolução. A Figura 3.17 mostra o resultado da compensação térmica traduzida pela equação (3.6) para os dois sensores.

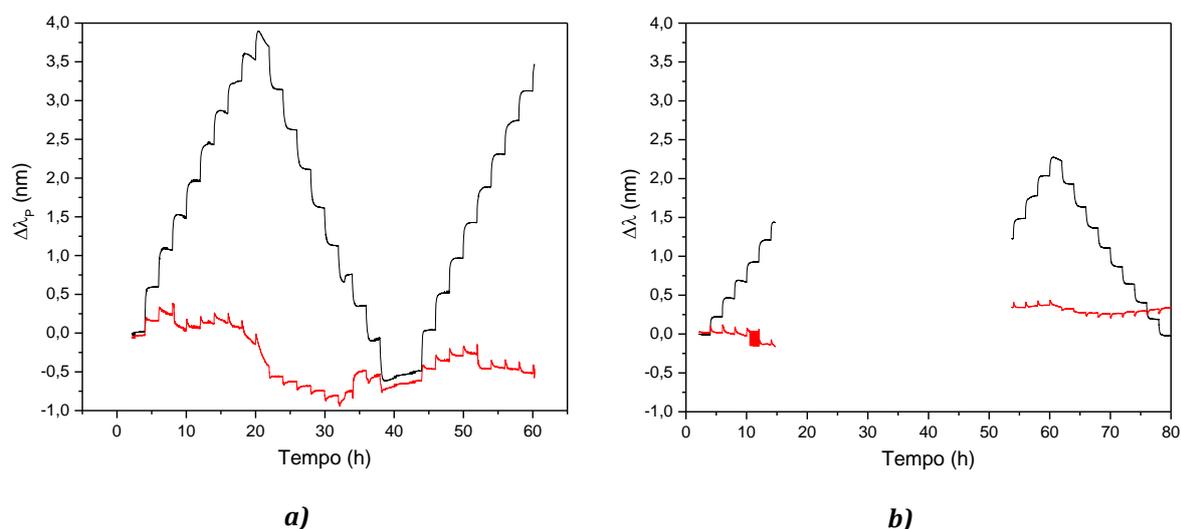


Figura 3.17 – Variação do comprimento de onda refletido pelas redes de Bragg FBG1, a) para o sensor preenchido com resina e b) para o sensor preenchido com silicone, antes e depois da compensação térmica, linha a preto e a vermelho, respetivamente.

Como é visível na Figura 3.17, a compensação térmica não é perfeita. No entanto, obteve-se uma diminuição muito significativa da dependência da temperatura para ambos os sensores. Uma vez que a FBG2 está dentro de uma proteção metálica com elevada condutividade térmica, pode existir um pequeno desfasamento temporal relativamente à temperatura entre as FBGs, pois apesar de estas estarem ao mesmo nível dentro da resina ou silicone, a proteção metálica encontra-se ligeiramente mais perto da superfície.

Relativamente à caracterização dos sensores com a profundidade, ou nível de água, ambos foram fixos numa placa metálica, e esta descida de forma gradual, em passos de 0,5 m, no interior de um poço artesiano, localizado no Campus da Universidade de Aveiro. Optou-se por este método, devido a problemas com a coluna de água antes utilizada, na caracterização das versões anteriormente desenvolvidas. Deste modo foi também possível a caracterização num intervalo de nível de água superior, até um máximo de 3.5 m. Na Figura 3.18 apresentam-se os valores da resposta dos dois sensores, em variação de comprimento de onda, considerando a compensação térmica como já

apresentado anteriormente. Entre cada um dos pontos registados foi dado um tempo de estabilização de 5 minutos.

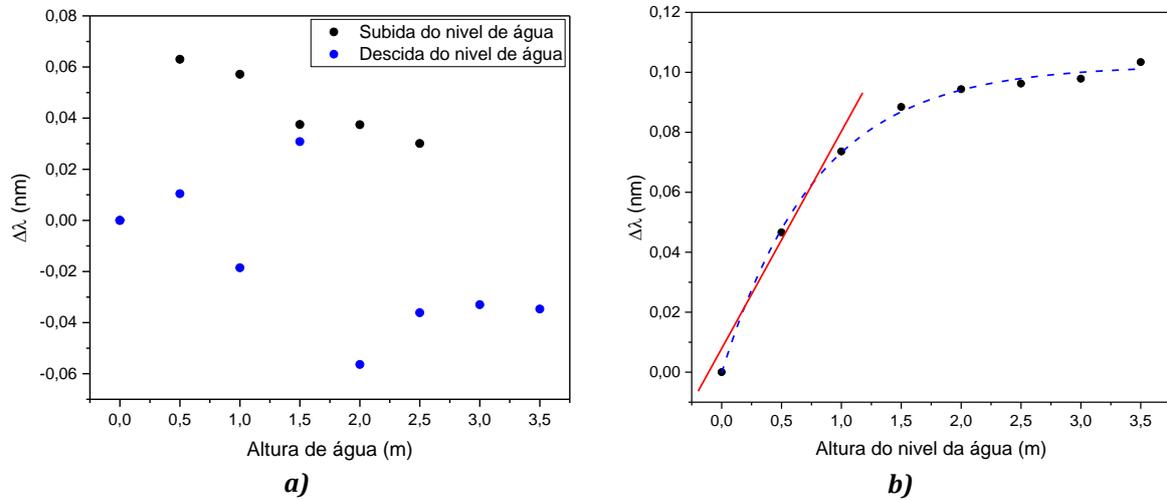


Figura 3.18 – Variação de comprimento de onda em função da altura de água. a) Sensor preenchido com resina. b) Sensor preenchido com silicone. Os pontos representam os dados experimentais, a linha o ajuste linear e a linha a tracejado o ajuste exponencial.

Verifica-se, através da análise dos dados da Figura 3.18 a) que a resposta do sensor preenchido com resina é irregular e não segue uma tendência monótona com a variação do nível de água, devido a prováveis problemas durante a sua construção, pelo que o seu uso como sensor não é indicado. No caso do sensor preenchido com silicone, os valores durante a descida do sensor para o interior do poço (subida de água) e subida do sensor (descida de nível) foram semelhantes (com menos de 5% de diferença ou coincidentes), pelo que os valores indicados na Figura 3.18 b) representam a média entre os valores durante a descida do sensor e subida no interior do poço. Os dados ajustam-se de forma adequada a uma expressão exponencial de crescimento, do tipo:

$$\Delta\lambda_B = A_1 \times e^{\frac{h}{t_1}} + y_0 \quad (3.7)$$

para a qual se estimaram, através do ajuste apresentado na Figura 3.18 b), valores de $-0,103 \pm 0,00200$ nm, $-0,793 \pm 0,0400$ nm e $0,102 \pm 0,00100$ nm, respetivamente para os coeficientes: A_1 , t_1 e y_0 . Verifica-se que de 0 a 1m de altura de água, o comportamento pode, aproximadamente, ajustar-se linearmente, e foi estimada uma sensibilidade de $72,4 \pm 0,100$ pm/m, através do ajuste linear apresentado na Figura 3.18 b).

Verifica-se também, que para os 3,5 m de profundidade, ou nível de água acima do sensor, este se encontra próximo da sua saturação. A resposta do sensor não é linear devido à sua geometria. A cavidade (preenchida com o silicone) limita a expansão do

silicone no seu interior, pelo que acima de um determinado valor de pressão, este deixa de responder de forma adequada.

Capítulo 4

Monitorização remota do reservatório de água da Universidade de Aveiro

Neste capítulo é descrita fisicamente a estrutura do reservatório de água da Universidade de Aveiro e o seu modelo numérico. É também descrita a instalação do acelerómetro biaxial e apresentados os dados da monitorização remota do reservatório por ele obtidos. O parâmetro que, neste caso, traduz o estado de saúde estrutural do reservatório é a sua frequência natural. Está prevista a instalação de um sensor de nível de modo a conhecer a variação da massa da estrutura, devido à variação do volume de água no reservatório, e compensar o seu efeito na variação da frequência natural.

4.1 Estrutura monitorizada e modelo numérico

O depósito de água da Universidade de Aveiro, Figura 4.1, é uma estrutura de betão armado com 34,5 m de altura. É composto por um paralelepípedo oco assente em dois elementos, uma secção cilíndrica oca e uma lâmina retangular, ambas com 30,2 m de altura [37].



Figura 4.1 - Depósito de água da Universidade de Aveiro.

A lâmina retangular tem 4 m de largura e 0,3 m de espessura. Já o cilindro oco mede 1,24 m de diâmetro interno e 0,62 m de espessura. O paralelepípedo tem 4 m de largura, 8,6 m de comprimento e 4,35 m de altura. O reservatório de água apresenta 3,805 m de altura. Existem aos terços da altura, entre a lâmina e o pilar cilíndrico, duas barras de aço inoxidável de seção oca com diâmetro externo de 150 mm e 5 mm de espessura [37].

Na Figura 4.2 está representado um modelo numérico tridimensional de toda a estrutura, elaborado no programa de elementos finitos SAP2000, com base nos planos originais da estrutura e inspeções visuais [38].

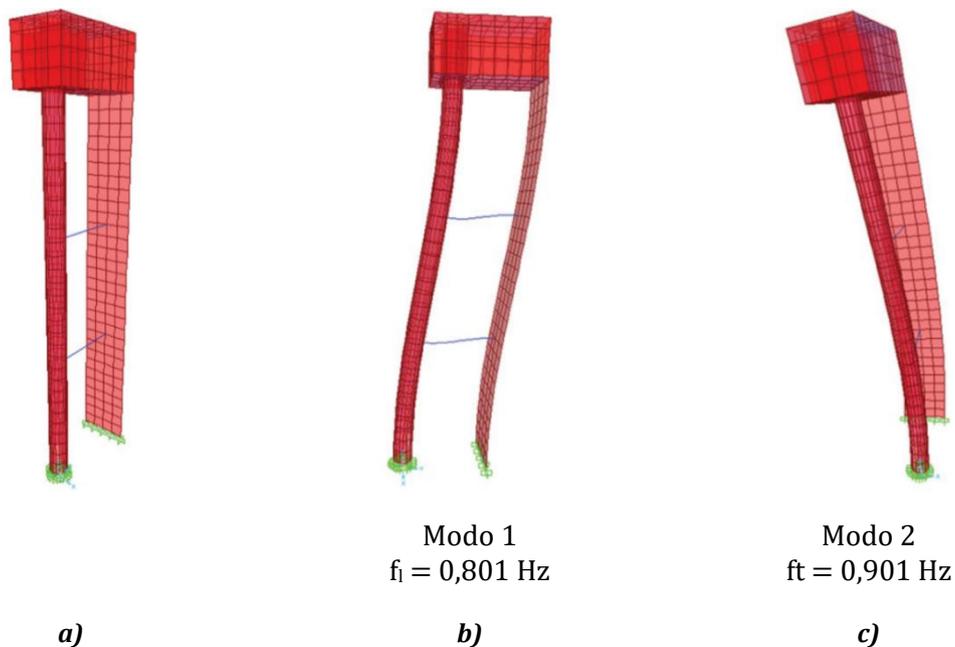


Figura 4.2 - a) Modelo numérico tridimensional do reservatório de água da Universidade de Aveiro. Modos de vibração estimados para a direção longitudinal (b) e direção transversal (c) [38].

Através do modelo tridimensional da estrutura foram estimadas as frequências naturais e as respectivas formas dos primeiros dois modos de vibração. O primeiro modo corresponde a uma vibração segundo a direção longitudinal, com o valor estimado de $f_1=0,801$ Hz. Relativamente ao segundo modo, este corresponde a uma vibração segundo a direção transversal cuja estimativa é $f_2=0,901$ Hz. Os dois modos de vibração estão representados na Figura 4.2 b) e c) [38]. Antunes *et al.* estimaram as propriedades dinâmicas do reservatório com base nas acelerações medidas no local.

A equação (4.1) relaciona a frequência natural, f , com a rigidez da estrutura, k , sendo $m = m_{\text{água}} + m_{\text{estrutura}}$ a massa total da estrutura.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.1)$$

Deste modo, é necessário descrever a variação da frequência natural da estrutura devida à variação da sua massa, provocada pela alteração do nível de água no reservatório, h . A Figura 4.3 contém as frequências naturais, para as direções transversal e longitudinal, obtidas através de um modelo numérico em função da variação da altura de água no reservatório [37].

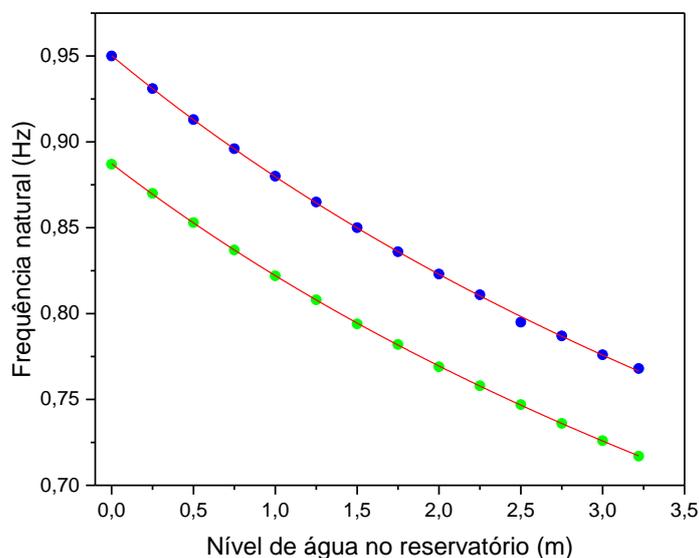


Figura 4.3 – Frequência natural da estrutura em função do nível de água no reservatório. Os pontos a azul e a preto correspondem às direções transversal e longitudinal, respetivamente. As linhas representam os respetivos ajustes.

As linhas de ajuste representadas nos gráficos da Figura 4.3 correspondem às equações (4.2) e (4.3), para as direções transversal e longitudinal, respetivamente, sendo

a área do depósito de água estimada, $A = 16 \text{ m}^2$, e a massa da estrutura, $m_{\text{estrutura}}$, e a sua rigidez calculadas através do ajuste.

$$f_t = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_t}{1000 \times A \times h + m_{\text{estrutura}}}} \quad (4.2)$$

$$f_l = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_l}{1000 \times A \times h + m_{\text{estrutura}}}} \quad (4.3)$$

Foram obtidos, respetivamente para a rigidez e massa, na direção transversal, os valores de $(3,453 \pm 0,003000) \times 10^6 \text{ Pa}$ e $(9,71 \pm 0,0200) \times 10^4 \text{ kg}$ e na direção longitudinal $(3,017 \pm 0,005000) \times 10^6 \text{ Pa}$ e $(9,71 \pm 0,0200) \times 10^4 \text{ kg}$. As equações (4.2) e (4.3) permitem então calcular os limites da variação das frequências naturais da estrutura, devido à variação da massa da estrutura provocada pela subida ou descida do nível de água dentro do reservatório. Qualquer alteração do valor da frequência natural da estrutura superior a estes limites estabelecidos pode ser atribuído a uma alteração da sua rigidez, resultante de uma eventual degradação estrutural.

4.2 Monitorização remota da estrutura

O valor da frequência natural do reservatório de água da Universidade de Aveiro foi estimado através da medição de acelerações, medidas remotamente a partir do edifício do Instituto de Telecomunicações. O sistema de monitorização remota implementado compreende um sensor de aceleração baseado em redes de Bragg em fibra ótica, instalado na estrutura, ligado à rede interna de fibra ótica da Universidade de Aveiro, um interrogador ótico (*FS22 Industrial BraggMETER DI* da *HBM FiberSensing*), e um computador com ligação à Internet. A Figura 4.4 mostra o esquema de toda a ligação, desde reservatório até ao Instituto de Telecomunicações, onde se encontra o sistema de interrogação.



Figura 4.4 - Esquema da ligação em fibra ótica entre o reservatório de água da Universidade de Aveiro e o Instituto de Telecomunicações.

No computador, com duas placas de Ethernet (uma para ligação ao interrogador e outra para ligação à Internet) foi instalado a aplicação dedicada BraggMONITOR DI da HBM Fibersensig que permite a monitorização do sinal ótico refletido por todas as FBGs, e a aplicação TeamViewer, versão 11 (da empresa TeamViewer), que permite o acesso remoto ao computador com total controlo da aplicação BraggMONITOR, para monitorização em tempo real e/ou gravação de dados. Foram obtidos dados ao longo do tempo que permitem monitorizar a estrutura a partir de qualquer lugar com acesso à internet, através da ligação ao servidor interno do Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro ou da utilização de aplicações informáticas que permitem o controlo remoto de computadores, como a já referida.

Através de um OTDR (*Optical Time-Domain Reflectometer*), EXFO, modelo AXS-100, foi possível determinar a distância desde o local de onde é realizada a aquisição (Instituto de Telecomunicações) até ao ponto de medida (Reservatório). De um modo simples, o OTDR envia um impulso ótico e mede o tempo até à receção de uma reflexão. Assim, conhecido o tempo de viagem do impulso ótico e sua velocidade de propagação na fibra ótica, é possível calcular a distancia percorrida. Obteve-se uma distância de 1658 m, entre o edifício do Instituto de Telecomunicações e o Reservatório de água da Universidade de Aveiro.

O sistema foi ligado em dias que existiam previsões de vento forte e os dados foram armazenados. Utilizando a informação sobre a velocidade do vento, foram escolhidos alguns ficheiros de dados correspondentes aos períodos de tempo em que as velocidades, transversal ou longitudinal, do vento eram elevadas. Foi criada uma rotina em *Matlab* para realizar o tratamento dos dados obtidos.

O acelerómetro foi instalado no topo do depósito de água da Universidade de Aveiro, como mostra a Figura 4.5.

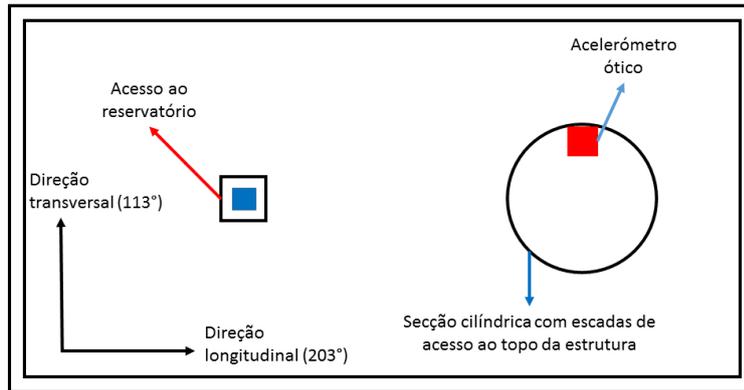


Figura 4.5 – Esquema do topo do depósito, identificação das direções e localização do sensor.

4.3 Resultados

O acelerómetro instalado permite monitorizar o valor da aceleração no topo do reservatório, através da qual, e por Transformada de Fourier, se pode estimar a frequência natural da estrutura. Existem, basicamente dois métodos dinâmicos para extrair o valor da frequência natural, por excitação externa forçada ou natural. Por excitação externa forçada entende-se a aplicação de impulsos mecânicos ou retirada rápida de forças da estrutura, que a forçam a oscilar na sua frequência natural.

No caso da excitação externa natural é usada a ação do vento, ou até mesmo o tráfego automóvel, no caso de pontes ou viadutos. Neste caso foi usada unicamente a ação do vento. Na Figura 4.6 encontra-se representada a aceleração medida com o acelerómetro ótico nas duas direções ortogonais, longitudinal e transversal do reservatório, para uma velocidade do vento de 8 m/s, onde se observa claramente a oscilação da estrutura.

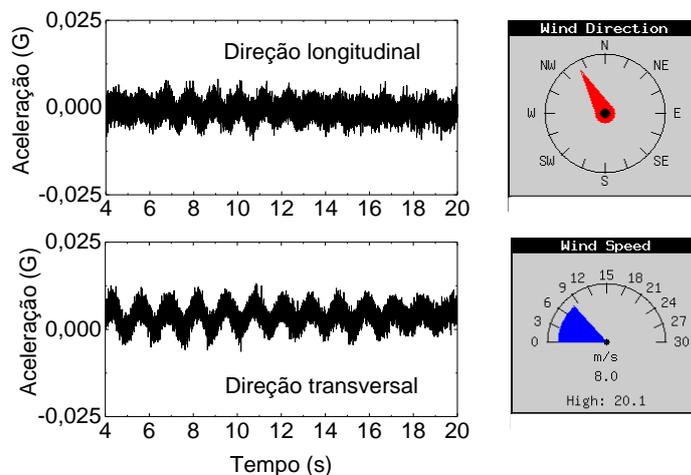


Figura 4.6 – Aceleração medida com o sensor ótico, nas direções longitudinal e transversal do reservatório, para uma velocidade do vento de 8 m/s.

Foram cedidos, pelo *CliM@UA* - Grupo de Meteorologia e Climatologia da Universidade de Aveiro, dados climatológicos em relação à velocidade e direção do vento ao longo do tempo com uma resolução temporal de 10 min. Através de uma bússola, determinou-se a orientação do depósito de água, obtendo-se os valores de 113° para a direção transversal e 203° para a direção longitudinal. A Figura 4.7 representa um esquema que permite o cálculo dos valores da intensidade do vento em cada direção. As componentes longitudinal, v_l , e transversal, v_t , da velocidade do vento, v , são dadas pelas equações (4.4) e (4.5), onde α é a direção do vento em graus.

$$v_l = v \cdot \cos(\alpha - 23) \quad (4.4)$$

$$v_t = v \cdot \sin(\alpha - 23) \quad (4.5)$$

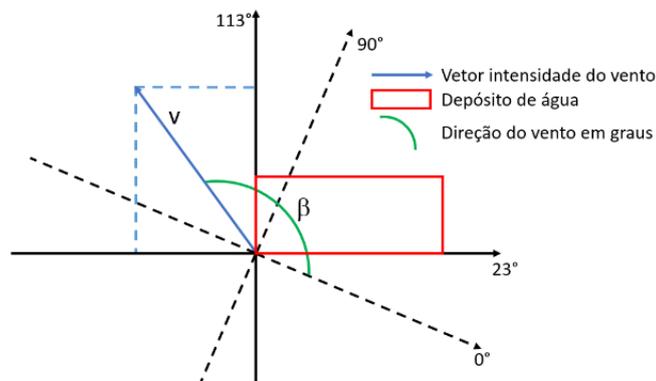
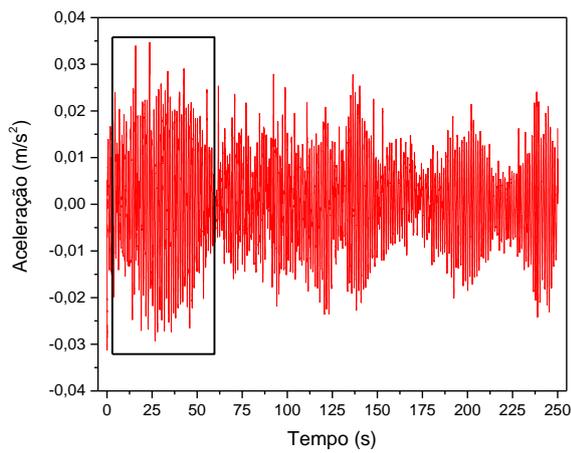
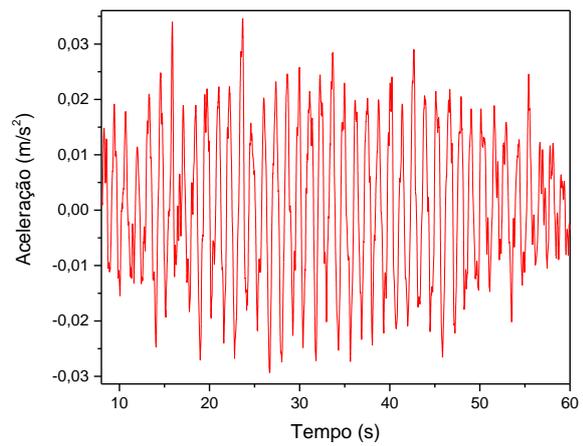


Figura 4.7 – Esquema da orientação do depósito de água da Universidade de Aveiro.

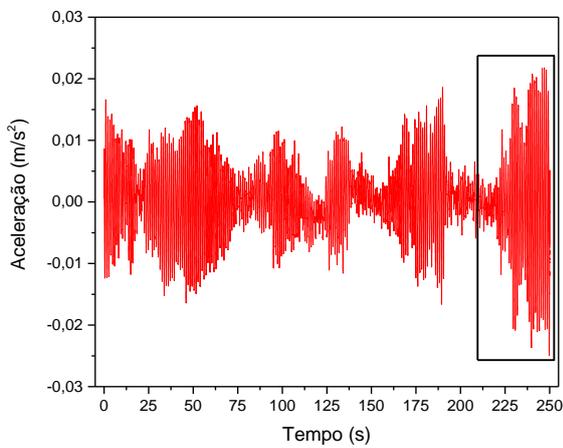
Deste modo, é possível analisar os dados obtidos pelo acelerómetro relativos aos dias cujas componentes transversais e longitudinais do vetor intensidade do vento são máximas. Os gráficos representados na Figura 4.8 mostram a aceleração medida pelo acelerómetro no topo da estrutura num destes períodos de tempo.



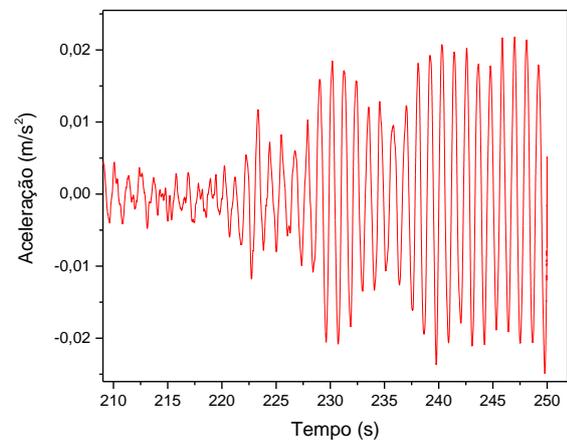
a)



b)



c)



d)

Figura 4.8 – Aceleração medida pelo acelerómetro ótico. a) Direção longitudinal. b) Aproximação ao gráfico a). c) Direção transversal. d) Aproximação ao gráfico c).

Para obter as frequências naturais da estrutura dos dados de aceleração em função de um período de tempo é aplicada uma FFT (*Fast Fourier Transform* ou Transformada Rápida de Fourier). Esta análise foi efetuada para cada uma das direções. Na Figura 4.9 estão representados os espectros de frequência resultantes da aplicação de FFT aos gráficos da Figura 4.8.

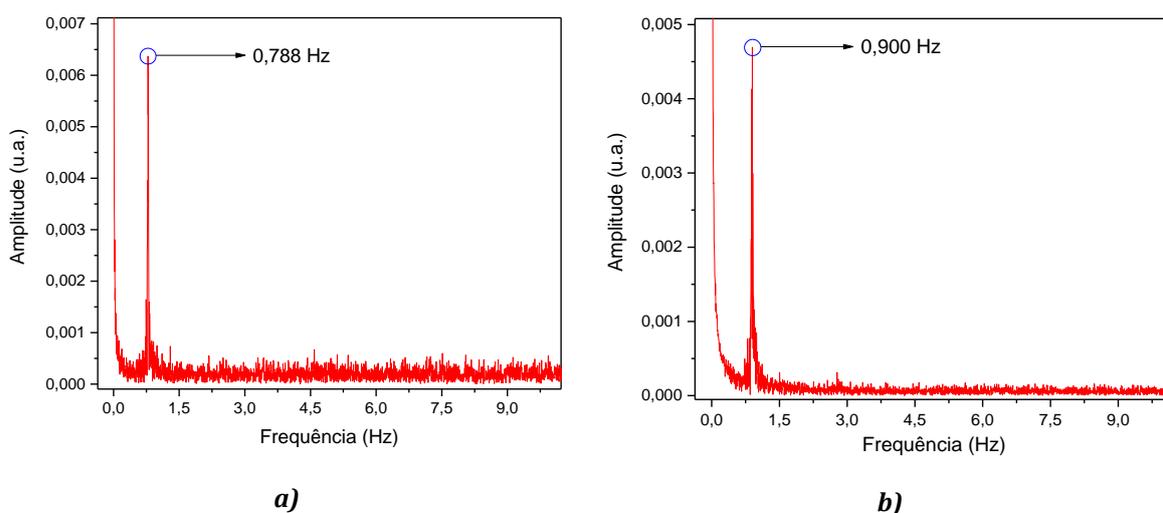


Figura 4.9 - Espectro de frequências dos dados relativos à aceleração representados nos gráficos da Figura 4.8. a) Direção longitudinal. b) Direção transversal.

Os valores das frequências naturais foram obtidos pelo método de seleção de picos nos espectros de frequências para cada direção. A Figura 4.10 representa os gráficos da evolução da frequência natural da estrutura, para cada direção, ao longo do tempo. Encontram-se também representados nos gráficos os limites para a variação das frequências, devida à variação do nível de água no reservatório, calculados pelas equações (4.2) e (4.3). Definiu-se 0 m como o nível de água mínimo e 3,805 m como o nível de água máximo. Foram também incluídas nos gráficos medidas obtidas junto ao reservatório, com o sensor de aceleração apresentado, antes de ser possível monitorização remota da estrutura, estas durante o ano de 2014.

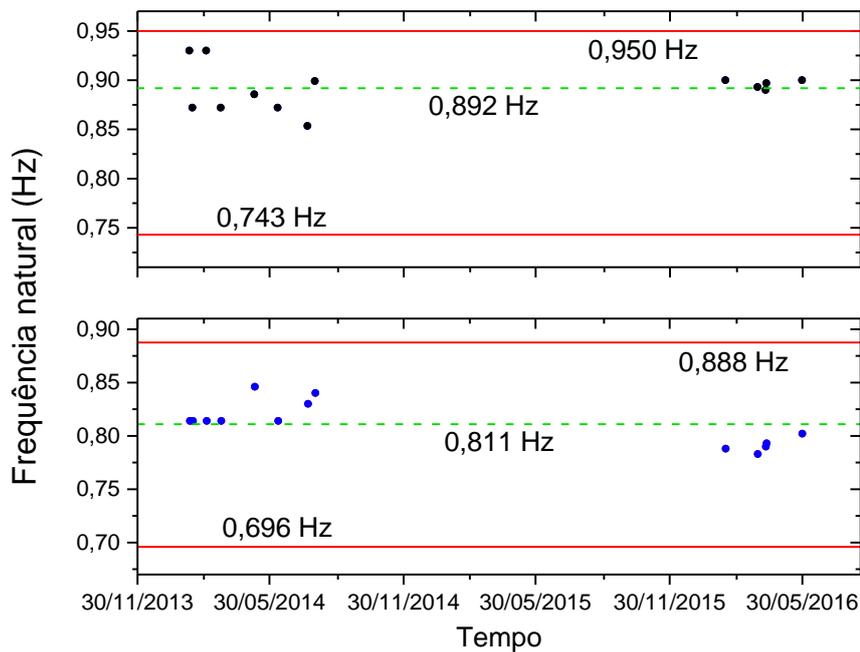


Figura 4.10 - Evolução temporal da frequência natural do depósito de água da Universidade de Aveiro, direção transversal em cima, e direção longitudinal em baixo. As linhas correspondem aos limites definidos pelo nível de água, máximo e mínimo, no interior do reservatório para cada direção. A linha a tracejado representa a média das frequências medidas.

Através da análise dos gráficos da Figura 4.10 é possível verificar que o valor da frequência natural da estrutura, em ambas as direções, manteve-se dentro dos limites estimados pelo modelo numérico. Assim, conclui-se que a rigidez da estrutura não sofreu alterações significativas e a estrutura manteve o seu estado de conservação. Com a informação do gráfico da Figura 4.10, é possível implementar um sistema de alarme para ser acionado na eventualidade de alguma medição se encontrar fora dos limites.

Capítulo 5

Conclusões e trabalho futuro

5.1 Conclusões

As atividades desenvolvidas ao longo desta dissertação permitiram a aquisição de experiência no desenvolvimento e implementação de sensores óticos baseados em redes de Bragg gravadas em fibra ótica, e na sua utilização para monitorização remota ou local de estruturas.

É implementado um sistema de monitorização remota no reservatório de água da Universidade de Aveiro. O sistema é constituído por um acelerómetro ótico instalado no topo da estrutura, um sistema central, composto por um interrogador ótico e um computador remotamente acessível através da ligação à internet, e a ligação por fibra ótica entre a estrutura e o Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro, onde se encontra o sistema central. O acelerómetro ótico apresenta uma sensibilidade de 87,848 pm/G na direção transversal e de 92,351 pm/G na direção longitudinal. O sistema de monitorização remota implementado é utilizado para monitorizar a aceleração na estrutura e a partir da qual é estimada a frequência natural, na direção transversal e longitudinal, do reservatório de água da Universidade de Aveiro. Com base em dados obtidos anteriormente são estimados para as duas direções os limites, superior e inferior, para as frequências naturais da estrutura devido à variação da sua massa, causada pela alteração do nível de água armazenada no reservatório. Verifica-se que, ao longo do período de monitorização, as frequências naturais da estrutura não sofreram alterações para além dos limites estimados. Conclui-se que a estrutura, durante o período em que

existem valores de frequência natural estimados (2014-2016), manteve o seu estado de conservação, não apresentando alterações estruturais, nomeadamente ao nível da sua rigidez.

É também desenvolvido ao longo desta dissertação um sensor de nível, com o objetivo de medir a variação de pressão no fundo do reservatório causada pela variação da altura de água, para futura implementação na estrutura monitorizada. São apresentadas três versões que são caracterizadas em função da pressão e da temperatura. O sensor de nível contruído com uso de silicone de alta temperatura, mostrou uma baixa sensibilidade térmica ($50,0 \pm 0,900$ pm/°C) relativamente aos sensores construídos com resina e uma sensibilidade à pressão apropriada ($72,4 \pm 0,100$ pm/m entre 0 e 1 m). Tendo em conta a uma precisão de 5 pm do interrogador usado (*FS22 Industrial BraggMETER DI* da *HBM FiberSensing*) obtém-se uma resolução de 6,9 cm na medida do nível de água.

5.2 Trabalho futuro

Na continuidade do trabalho realizado, é necessário otimizar o sensor de nível desenvolvido, ajustando a sua sensibilidade à realidade do reservatório de água da Universidade de Aveiro, e a sua instalação na estrutura. Será também necessário estudar a variação do centro de massa da estrutura com a variação do volume de água no reservatório, de modo a obter com maior precisão o valor da sua frequência natural.

A implementação de uma aplicação em *Labview*, que permita compensar no valor das frequências naturais estimadas com o nível de água no reservatório (e a sua influência no valor da massa da estrutura), em tempo real, é ainda um objetivo.

Será também interessante a configuração de um sistema de alarme para enviar um alerta, caso os valores das frequências naturais obtidos ultrapassem os seus limites.

A interligação com uma aplicação *online*, em tempo real, de monitorização das condições ambientais, como a velocidade do vento, pode ser interessante para a ativação da gravação de dados em situações de maior instabilidade atmosférica, evitando a gravação de dados em situações sem qualquer excitação ambiente, onde não é possível estimar os valores das frequências naturais.

Referências

- [1] S. J. Mihailov, "Fiber Bragg grating sensors for harsh environments," *Sensors*, vol. 12, no. 2, pp. 1898–1918, 2012.
- [2] C. R. Farrar and K. Worden, *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*, First Edit. John Wiley & Sons, Ltd., 2012.
- [3] X. W. Ye, Y. H. Su, and J. P. Han, "Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Using Optical Fiber Sensing Technology: A Comprehensive Review.," *ScientificWorldJournal*, vol. 2014, p. 652329, 2014.
- [4] P. S. Antunes, P., Lima, H., Alberto, N., Bilro, L., Pinto, P., Costa, A., Rodrigues, H., Pinto, J.L., Nogueira, R., Varum, H., Andre, "Optical Sensors Based on Fiber Bragg Gratings for Structural Health Monitoring," *New Dev. Sens. Technol. Struct. Heal. Monit.*, p. pp 253–295, 2011.
- [5] M. J. Chae, H. S. Yoo, J. Y. Kim, and M. Y. Cho, "Development of a wireless sensor network system for suspension bridge health monitoring," *Autom. Constr.*, vol. 21, pp. 237–252, 2012.
- [6] G. D. Zhou and T. H. Yi, "Recent developments on wireless sensor networks technology for bridge health monitoring," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2013, 2013.
- [7] X. Hu, B. Wang, and H. Ji, "A Wireless Sensor Network-Based Structural Health Monitoring System for Highway Bridges," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 28, no. 3, pp. 193–209, 2013.
- [8] G. Hackmann and S. Dyke, "Cyber-Physical Codesign of Distributed Structural Health Monitoring with Wireless Sensor Networks," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 63–72, 2014.
- [9] A. Araujo, J. García-Palacios, J. Blesa, F. Tirado, E. Romero, A. Samartín, and O. Nieto-Taladriz, "Wireless measurement system for structural health monitoring with high time-synchronization accuracy," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 61, no. 3, pp. 801–810, 2012.
- [10] K. S. C. Kuang, S. T. Quek, C. G. Koh, W. J. Cantwell, and P. J. Scully, "Plastic optical fibre sensors for structural health monitoring: A review of recent progress," *J. Sensors*, vol. 2009, 2009.
- [11] C. Rodrigues, C. Félix, A. Lage, and J. Figueiras, "Development of a long-term monitoring system based on FBG sensors applied to concrete bridges," *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 8, pp. 1993–2002, 2010.
- [12] C. Rodrigues, F. Cavadas, C. Félix, and J. Figueiras, "FBG based strain monitoring in the rehabilitation of a centenary metallic bridge," *Eng. Struct.*, vol. 44, pp. 281–290, 2012.
- [13] X. X. Li, W. X. Ren, and K. M. Bi, "FBG force-testing ring for bridge cable force monitoring and temperature compensation," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 223, pp. 105–113, 2015.
- [14] D. S. Li, L. Ren, H. N. Li, and G. B. Song, "Structural health monitoring of a tall building during construction with fiber bragg grating sensors," *Int. J. Distrib. Sens. Networks*, vol. 2012, 2012.
- [15] L. Ren, Z. G. Jia, H. N. Li, and G. Song, "Design and experimental study on FBG hoop-strain sensor in pipeline monitoring," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 20, no. 1,

- pp. 15–23, 2014.
- [16] K. Loupos, G. Kanellos, M. Bimpas, A. Amditis, O. Bursi, S. Frontistou, J. Meisner, D. Bairaktaris, V. K. Bruno, and A. O. Griffoni, "Fiber Sensors Based System For Tunnel Linings' Structural Health Monitoring"," in *2nd Conference On Smart Monitoring, Assessment And Rehabilitation Of Civil Structures*, 2013, pp. 9–11.
 - [17] K.-S. Choi, Y.-H. Huh, I.-B. Kwon, and D.-J. Yoon, "A tip deflection calculation method for a wind turbine blade using temperature compensated FBG sensors," *Smart Mater. Struct.*, vol. 21, no. 2, 2012.
 - [18] S.-W. Kim, W.-R. Kang, M.-S. Jeong, I. Lee, and I.-B. Kwon, "Deflection estimation of a wind turbine blade using FBG sensors embedded in the blade bonding line," *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, p. 125004, 2013.
 - [19] T. J. Arsenault, A. Achuthan, P. Marzocca, C. Grappasonni, and G. Coppotelli, "Development of a FBG based distributed strain sensor system for wind turbine structural health monitoring," *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 7, p. 75027, 2013.
 - [20] M. L. Filograno, P. Corredera Guillen, A. Rodriguez-Barrios, S. Martin-Lopez, M. Rodriguez-Plaza, A. Andres-Alguacil, and M. Gonzalez-Herraez, "Real-Time Monitoring of Railway Traffic Using Fiber Bragg Grating Sensors," *IEEE Sens. J.*, vol. 12, no. 1, pp. 85–92, 2012.
 - [21] D.-S. Xu, J.-H. Yin, Z.-Z. Cao, Y.-L. Wang, H.-H. Zhu, and H.-F. Pei, "A new flexible FBG sensing beam for measuring dynamic lateral displacements of soil in a shaking table test," *Measurement*, vol. 46, no. 1, pp. 200–209, Jan. 2013.
 - [22] H.-F. Pei, J.-H. Yin, and W. Jin, "Development of novel optical fiber sensors for measuring tilts and displacements of geotechnical structures," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 9, p. 95202, 2013.
 - [23] J. Huang, Z. Zhou, X. Wen, and D. Zhang, "A diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation," *Measurement*, vol. 46, no. 3, pp. 1041–1046, 2013.
 - [24] C. Lai, Y. Lo, J. Yur, and C. Chuang, "Application of Fiber Bragg Grating Level Sensor and Fabry-Pérot Pressure Sensor to Simultaneous Measurement of Liquid Level and Specific Gravity," *IEEE Sens. J.*, vol. 12, no. 4, pp. 827–831, 2012.
 - [25] P. Vengal Rao, K. Srimannarayana, M. Sai Shankar, and P. Kishore, "Polymer Packaged Fiber Grating Pressure Sensor with Enhanced Sensitivity," 2014.
 - [26] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 32, no. 10, p. 647, 1978.
 - [27] B. S. Kawasaki, K. O. Hill, D. C. Johnson, and Y. Fujii, "Narrow-band Bragg reflectors in optical fibers," *Opt. Lett.*, vol. 3, no. 2, pp. 66–68, 1978.
 - [28] K. O. Hill and G. Meltz, "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview," *J. Light. Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1263–1276, 1997.
 - [29] D. K. Lam and B. K. Garside, "Characterization of single-mode optical fiber filters," *Appl. Opt.*, vol. 20, no. 3, pp. 440–445, 1981.
 - [30] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method.," *Opt. Lett.*, vol. 14, no. 15, pp. 823–825, 1989.
 - [31] P. Antunes, "Sensores ópticos para monitorização dinâmica de estruturas,"

- Universidade de Aveiro, 2011.
- [32] R. N. Nogueira, "Redes de Bragg em fibra óptica," Universidade de Aveiro, 2005.
 - [33] T. Erdogan, "Fiber grating spectra," *J. Light. Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1277–1294, 1997.
 - [34] R. M. De Ridder and C. G. H. Roeloffzen, "Wavelength Filters in Fibre Optics," *Springer Ser. Opt. Sci.*, vol. 123, no. 0, pp. 196–198, 2006.
 - [35] C. A. F. Marques, "Gravação de redes de Bragg avançadas em fibra óptica," pp. 1 – 53, 2008.
 - [36] P. Antunes, C. Marques, H. Varum, and P. André, "Biaxial optical accelerometer and high angle inclinometer with temperature and cross axis insensitivity," *IEEE Sensors J.*, vol. 12, no. 7, pp. 2399–2406, 2012.
 - [37] J. Fernandes, "Avaliação das características dinâmicas de estruturas existentes," Universidade de Aveiro, 2014.
 - [38] P. F. D. C. Antunes, H. F. P. Rodrigues, H. Varum, and P. S. D. B. André, "Elevated water reservoir monitoring using optical fiber accelerometer," *Instrum. Sci. Technol.*, vol. 41, no. 2, pp. 125–134, 2013.