

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Felipe Oliveira Barino

**Sensores ópticos baseados em LPFGs para identificação de condições de
carregamento em estruturas**

Juiz de Fora

2021

Felipe Oliveira Barino

**Sensores ópticos baseados em LPFGs para identificação de condições de
carregamento em estruturas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas Eletrônicos

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Bessa dos Santos

Juiz de Fora

2021

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Barino, Felipe Oliveira.

Sensores ópticos baseados em LPFGs para identificação de condições de carregamento em estruturas / Felipe Oliveira Barino. – 2021.

64 f. : il.

Orientador: Alexandre Bessa dos Santos
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2021.

1. Instrumentação óptica. 2. Grades de difração. 3. Carregamento estrutural. I. dos Santos, Alexandre Bessa, orient. II. Título.

Felipe Oliveira Barino

Sensores ópticos baseados em LPFGs para identificação de condições de carregamento em estruturas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas Eletrônicos

Aprovada em 30 de Julho de 2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Bessa dos Santos - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Andrés Pablo López Barbero
Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. André Luís Marques Marcato
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais pela presença, esforço por uma educação de qualidade e principalmente pelo estímulo à curiosidade. Aos demais familiares agradeço pelo apoio e incentivo. À minha companheira pela cumplicidade, companheirismo e paciência.

Agradeço aos professores da Universidade Federal de Juiz de Fora pelos ensinamentos. Um agradecimento especial ao Professor Alexandre Bessa dos Santos, orientador deste trabalho, pelo apoio, confiança e instrução, desde a época da Iniciação Científica. Aos colegas do Laboratório de Instrumentação e Telemetria (LITel/UFJF) pelo compartilhamento de aprendizado, experiência e aprimoramento nas pesquisas.

Ao Programa de Bolsas de Pós-Graduação da Universidade Federal de Juiz de Fora – PBPG/UFJF e à EDP pelo apoio financeiro a esta pesquisa.

RESUMO

Para garantir a segurança e durabilidade de estruturas em serviço, o monitoramento constante da saúde estrutural destas vem sendo utilizado por engenheiros para melhor gerenciamento, tomada de decisões e planejamento de manutenção. Neste cenário, sistemas de sensoriamento são extremamente importantes. Este trabalho apresenta o uso de sensores ópticos a fibra baseados em grades de período longo (LPFGs, do inglês *long period fiber gratings*) na identificação de forças em estruturas. Sensores ópticos a fibra são interessantes para monitorar estruturas em tempo real devido à capacidade de lidar com ambientes hostis, imunidade eletromagnética e baixa atenuação do sinal. Nesta dissertação são analisados dois cenários: identificação de um carregamento concentrado em uma viga biapoiada e identificação de forças bidimensionais por meio da compressão da LPFG. No primeiro caso, desenvolveu-se um modelo matemático para identificação da intensidade e posição de uma força aplicada a tal viga, obtendo um erro absoluto relativo de, em média, 1,22% na estimativa da intensidade e 2,51% na estimativa da posição. Já no segundo caso, um modelo de regressão baseado em aprendizado de máquinas foi utilizado para identificar a intensidade e direção de uma força com erro absoluto relativo de, em média, 2,19% e 3,93%, respectivamente.

Palavras-chave: Sensores. Grades de período longo em fibra. Identificação de força. Carregamento. Viga biapoiada. Sensor multidimensional.

ABSTRACT

To ensure the safety and durability of in service structures, constant monitoring of their structural health has been used by engineers to aid management, decision-making, and maintenance scheduling. In this context, sensing systems are extremely important. This work presents the use of long-period fiber grating (LPFGs) based optical fiber sensors on loading condition estimation. Optical fiber sensors are great candidates to real-time monitoring of structures because they are capable of handling harsh environments, have electromagnetic immunity, and low attenuation. This work shows two force identification scenarios: loading condition estimation at a simply-supported beam and two-dimensional compression force at an optical fiber. The first was accomplished by a mathematical model of the beam and was capable of estimating the force intensity with a relative mean absolute error of 1.22% and 2.51% for its position. Whereas the latter was accomplished by a machine learning data-driven model that estimated the force intensity with relative mean absolute error of 2.19% and 3.93% concerning its direction.

Keywords: Sensors. Long period fiber grating. Force identification. Loading. Simply-supported beam. Multidimensional sensor.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Corpo rígido	15
Figura 2	– Viga biapoiada sujeita a um carregamento concentrado.	16
Figura 3	– Forças internas.	17
Gráfico 1	– Diagrama de força cortante.	18
Gráfico 2	– Diagrama de momento fletor.	18
Figura 4	– Ilustração de uma viga pré e pós deformação.	19
Figura 5	– Cilindro sujeito a deformação por compressão lateral.	20
Figura 6	– Esquema de uma fibra óptica (seção transversal).	21
Figura 7	– Distribuição de energia em alguns modos LP.	22
Figura 8	– Representação da reflexão da luz em uma FBG utilizando uma aproximação por óptica geométrica.	24
Figura 9	– Ilustração de uma FBG, sua característica de transmissão e de reflexão. .	24
Figura 10	– Representação do acoplamento do modo fundamental para um modo de casca em uma LPFG utilizando uma aproximação por óptica geométrica.	25
Figura 11	– Ilustração de uma LPFG e sua característica de transmissão.	26
Figura 12	– Esquema da interrogação de uma LPFG pelo Método da Análise espectral.	29
Figura 13	– Esquema da interrogação de uma LPFG pelo Método da Filtragem. .	30
Figura 14	– Ilustração de uma rede neural artificial $N \times H \times 1$ (N entradas, H neurônios na única camada escondida e uma saída)	33
Gráfico 3	– Diagrama de momento fletor estimado pelas quatro LPFGs.	37
Figura 15	– Esquema do aparato experimental (PM: medidor de potência óptica). .	38
Gráfico 4	– Espectros de transmissão das LPFGs e reflexão das FBGs utilizadas neste trabalho.	38
Gráfico 5	– Curva de calibração do interrogador para cada LPFG.	39
Gráfico 6	– Curva de calibração de cada sensor LPFG.	40
Gráfico 7	– Relação entre deformação e fator R	40
Gráfico 8	– Relação entre massa, distância e deformação em cada sensor LPFG. .	41
Gráfico 9	– Comparação entre a deformação obtida pelas LPFGs e a obtida pela simulação feita pelo método dos elementos finitos.	42
Gráfico 10	– Comparação entre o carregamento aplicado e carregamento estimado pelo método proposto.	43
Gráfico 11	– Comparação entre o carregamento aplicado e carregamento estimado pelo método proposto.	44
Figura 16	– Esquema da atuação de uma força lateral a uma fibra óptica e a decomposição dos estresses ao longo dos eixos x e y da fibra.	47
Figura 17	– Aparato experimental utilizado para caracterização da LPFG sob carregamento lateral (Pol.: polarizador, Ctrl. pol.: controlador de polarização). .	49

Gráfico 12 – Espectro da LPFG em alguns dos cenários testados durante a caracterização desta.	50
Gráfico 13 – Comprimento de onda ressonante, em cada SOP, como uma função da carga aplicada e seu ângulo de incidência. (a) Ângulo de incidência como uma função dos comprimentos de onda ressonante e (b) projeção no plano <i>xy</i> (ângulo cresce no sentido anti-horário).	50
Gráfico 14 – Sensibilidade da LPFG à força lateral como uma função do ângulo de incidência desta força.	51
Gráfico 15 – Resultados da seleção do modelo.	52
Gráfico 16 – Comparação entre os valores observados e estimados pelas RNAs nos dados de teste. (a) MLP_F : estimativa da intensidade da força e (b) MLP_θ : estimativa do ângulo de aplicação.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sensibilidade das LPFGs à deformação.	41
Tabela 2 – Comparação entre as condições de carregamento mostradas no Gráfico 11.	44
Tabela 3 – Métricas de avaliação das RNAs propostas para identificação da força (MLP_F) e do ângulo (MLP_θ).	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÕES	11
1.2	OBJETIVO	11
1.3	PRODUÇÃO CIENTÍFICA	12
1.3.1	Trabalhos publicados em revistas	12
1.3.1.1	<i>Trabalhos relacionados à dissertação</i>	12
1.3.1.2	<i>Outros trabalhos desenvolvidos</i>	13
1.3.2	Trabalhos apresentados em congressos	13
1.3.2.1	<i>Trabalhos relacionados à dissertação</i>	13
1.3.2.2	<i>Outros trabalhos desenvolvidos</i>	13
1.3.3	Patentes	14
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS	15
2.2	SENSORES ÓPTICOS A FIBRA	21
2.2.1	Fibras ópticas	21
2.2.2	Grades de difração em fibra óptica	22
2.2.2.1	<i>Grades de período curto</i>	23
2.2.2.2	<i>Grades de período longo</i>	23
2.3	INTERROGAÇÃO DE SENSORES LPFG	28
2.3.1	Análise espectral	28
2.3.2	Filtragem	29
2.3.3	Pós-processamento e interpretação	31
2.3.3.1	<i>Redes neurais artificiais</i>	32
3	IDENTIFICAÇÃO DO CARREGAMENTO EM VIGAS BIAPOIADAS	35
3.1	Contexto e aplicações	35
3.2	Princípio de funcionamento	36
3.3	Aparato experimental	37
3.4	Resultados	39
4	IDENTIFICAÇÃO BIDIRECIONAL DE FORÇAS	45
4.1	Contexto e aplicações	45
4.2	Princípio de funcionamento	46
4.3	Aparato experimental	48
4.4	Resultados	49
5	CONCLUSÃO	54
5.1	TRABALHOS FUTUROS	54

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÕES

As últimas décadas foram marcadas pelo grande avanço tecnológico na área de automação, informação e ciência de dados. Neste contexto, as telecomunicações desempenharam importante papel devido a alta demanda por comunicação eficiente a longas distâncias e altas taxas, surgindo assim a área de comunicações ópticas. Estes avanços na área de telecomunicações, por sua vez, beneficiaram o desenvolvimento de sensores ópticos a fibra. Principalmente devido ao aumento da oferta de componentes ópticos com um custo-benefício que viabilizou o emprego de tal tecnologia em soluções alternativas, como instrumentos de medição [1].

O uso das fibras ópticas na fabricação de sensores é interessante, pois elas conferem aos sensores ópticos algumas vantagens sobre os sensores eletrônicos convencionais como por exemplo: baixo peso, baixo consumo (sensores passivos), imunidade à interferência eletromagnética, alta sensibilidade, grande largura de banda, robustez ao ambiente, capacidade de multiplexação, compatibilidade com optoeletrônica de telecomunicações, fácil integração e resistência a ambientes hostis [2]. Além destas vantagens, os sensores a fibra possuem ampla e crescente aplicabilidade, sendo capazes de mensurar grandezas como deformação, pressão, força, rotação, aceleração, campos elétricos e magnéticos, vibração, temperatura, umidade, pH e variadas propriedades químicas e biológicas.

Dentre as diversas tecnologias de sensores a fibra óptica, podemos destacar as grades (ou redes) de difração em fibra. Elas ganharam notoriedade nas últimas décadas devido ao crescente uso das grades de período curto, ou grades de Bragg (FBG, do inglês *fiber Bragg grating*), como *strain gauges* ópticos a medida que esta tecnologia passou pela transição do uso em laboratórios de pesquisa para o uso na indústria [3]. Outra tecnologia de grades de difração em fibra que se mostra promissora é a grade de período longo (LPFG, do inglês *long-period fiber grating*). As LPFGs têm se destacado pela maior facilidade de produção, comparada à contraparte de período curto, e outras vantagens metrológicas como maior sensibilidade [4] e auto-compensação [5, 6], por exemplo.

Devido a estas vantagens metrológicas, logísticas e econômicas que o uso de LPFGs têm sobre as tradicionais soluções baseadas em FBGs, este trabalho se propõe a demonstrar o uso das grades de período longo no sensoriamento de estruturas. Especificamente com a finalidade de identificar a condição de carregamento aplicada a estas estruturas.

1.2 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é apresentar uma solução para identificação da condição de carregamento aplicada a estas estruturas utilizando sensores ópticos, em

específico LPFGs. Ou seja, apresenta-se as LPFGs como uma alternativa aprimorada às soluções hoje bem estabelecidas que utilizam sensores elétricos/eletrônicos ou ópticos baseados em FBGs. Aprimorada devido à robustez ambiental, alta relação sinal-ruído, multidimensionalidade e custo.

Para cumprir este objetivo dois casos de identificação de forças utilizando LPFGs foram analisados: (a) identificação de um carregamento concentrado em uma viga biapoiada por meio de um arranjo de sensores ópticos LPFGs e (b) identificação da intensidade e direção de uma força transversal imposta à uma LPFG. Nestes cenários foram utilizadas diferentes técnicas para análise e interpretação dos dados coletados pelos transdutores ópticos. Técnicas que variaram desde modelos matemáticos descritos pelas condições de contorno da estrutura à técnicas modernas e robustas baseadas em aprendizado de máquinas.

Portanto, o caso (a) estudado neste trabalho contribui com o aprimoramento dos sistemas de monitoramento de saúde estrutural por meio de sensores resistentes à corrosão, imunes à interferência eletromagnética e com cabeamento simplificado. Já com relação ao caso (b), a principal contribuição está relacionada com a identificação da intensidade e direção de uma força com um único sensor, podendo reduzir o número de transdutores em sistemas de monitoramento atuais.

1.3 PRODUÇÃO CIENTÍFICA

1.3.1 Trabalhos publicados em revistas

1.3.1.1 Trabalhos relacionados à dissertação

BARINO, Felipe O.; ÉBIAS, GUILHERME ; BITTENCOURT, JÚLIA ; DISCINI, DANIEL ; SANTOS, ALEXANDRE BESSA . Two-dimensional long-period fiber grating sensor for touch applications. *MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS*, v. 63, p. 647-652, 2021.

BARINO, Felipe Oliveira; FARACO-FILHO, RENATO ; CAMPOS, DEIVID ; SILVA, VINICIUS N. H. ; LOPEZ-BARBERO, ANDRES P. ; HONORIO, LEONARDO ; DOS SANTOS, ALEXANDRE BESSA . Loading condition estimation using long-period fiber grating array. *IEEE Sensors Journal*, 2020.

BARINO, F. O.; DELGADO, F. S. ; SANTOS, A. B. . Transverse load discrimination in Long-Period Fiber Grating via Artificial Neural Network. *JOURNAL OF MICROWAVES AND OPTOELECTRONICS*, v. 19, p. 1-10, 2020.

BARINO, FELIPE; DELGADO, F.S. ; JUCÁ, MARCO AURÉLIO ; COELHO, THIAGO V.N. ; DOS SANTOS, A. BESSA . Comparison of Regression Methods for Transverse Load Sensor based on Optical Fiber Long-Period Grating. *MEASUREMENT*, v. 146, p. 728-735, 2019.

1.3.1.2 Outros trabalhos desenvolvidos

BARINO, Felipe O.; SANTOS, ALEXANDRE BESSA DOS . LPG interrogator based on FBG array and Artificial Neural Network. *IEEE Sensors Journal*, v. 20, p. 14187-14194, 2020.

BARINO, Felipe O.; SILVA, VINICIUS N. H. ; LOPEZ-BARBERO, ANDRES P. ; HONORIO, LEONARDO DE MELLO ; DOS SANTOS, ALEXANDRE BESSA . Correlated time-series in multi-day-ahead streamflow forecasting using convolutional networks. *IEEE Access*, v. 8, p. 215748-215757, 2020.

1.3.2 Trabalhos apresentados em congressos

1.3.2.1 Trabalhos relacionados à dissertação

ÉBIAS, GUILHERME ; BITTENCOURT, JÚLIA ; **BARINO, Felipe O.** ; ALEXANDRE BESSA DOS SANTOS . Monitoramento de nós de pontes estruturadas com treliças planas por sensores ópticos. In: *MOMAG2020*, 2020, Niterói. MOMAG2020, 2020.

BARINO, Felipe O.; DELAROTA, D. E. ; FARACO-FILHO, R. L. ; ALVARENGA, I. ; SANTOS, A. B. . Monitoramento de estruturas utilizando sensores ópticos: modelagem, simulação e setup experimental. In: *ENMC & ECTM 2019*, 2019, Juiz de Fora. XXII Encontro de Ciência e Tecnologia de Materiais e Modelagem Computacional, 2019.

BARINO, Felipe O.; EURIPEDES, M. ; TINTI, E. ; SANTOS, A. B. . Sensor óptico de tato aplicado a efetuadores robóticos utilizando LPGs e redes neurais artificiais. In: *ENMC & ECTM 2019*, 2019, Juiz de Fora. XXII Encontro de Ciência e Tecnologia de Materiais e Modelagem Computacional, 2019.

1.3.2.2 Outros trabalhos desenvolvidos

BARINO, Felipe O.; SANTOS, A. B. . Rede Neural Convolucionar 1D aplicada à previsão da vazão no Rio Madeira. In: *SBrT 2020*, 2020, Florianópolis. XXXVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2020.

BARINO, Felipe O.; ALEXANDRE BESSA DOS SANTOS . Interrogador para LPGs utilizando FBGs e Rede Neural. In: *MOMAG2020*, 2020, Niterói. MOMAG2020, 2020.

BARINO, FELIPE; SANTOS, A. B. . LPG Spectrum Estimation Using Neural Networks and Temperature Modulated FBG. In: *Latin American Workshop on Optical Fiber Sensors*, 2019, Rio de Janeiro. Proceedings of the Latin American Workshop on Optical Fiber Sensors. São Caetano do Sul, SP: Sociedade Brasileira de Micro-ondas e Optoeletrônica, 2019. p. 55-58.

BARINO, Felipe O.; EURIPEDES, M. ; TINTI, E. ; SANTOS, A. B. . Análise das séries temporais de turbidez e vazão no rio Madeira para desenvolvimento de um modelo preditivo multiparâmetro para vazão do rio. In: ENMC & ECTM 2019, 2019, Juiz de Fora. XXII Encontro de Ciência e Tecnologia de Materiais e Modelagem Computacional, 2019.

1.3.3 Patentes

Dispositivo de Medição de Vórtice. 2020, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR1020190272473, título: "Dispositivo de Medição de Vórtice", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 10/02/2020

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além deste capítulo, que visa contextualizar e introduzir o tema da dissertação ao leitor, este trabalho contém mais quatro capítulos.

O Capítulo 2 apresenta os fundamentos teóricos que o trabalho se baseia, com sugestões de leituras futuras para o leitor interessado em aprofundar os estudos nos temas relacionados à dissertação. São brevemente apresentados os fundamentos de resistência dos materiais para a análise de deformação em estruturas. Em seguida, apresenta-se o conceito de modos de propagação na fibra óptica, seguido pela teoria do acoplamento de modos e o uso das grades de difração como sensores. Por fim, discute-se os fundamentos para interpretação dos sensores baseados em LPFGs, desde a extração das características de transmissão do dispositivo à obtenção do mensurando.

Os Capítulos 3 e 4 apresentam os dois esquemas de identificação de forças que este trabalho se propõe a resolver com as LPFGs. O Capítulo 3 apresenta o uso de LPFGs para identificação da condição de carregamento em uma viga biapoiada. Enquanto o Capítulo 4 apresenta o uso de uma LPFG para identificação de uma força transversal aplicada ao sensor, obtendo sua intensidade e direção. Ambos capítulos apresentam a mesma estrutura, separada em quatro seções: contexto e aplicações, princípio de funcionamento, aparato experimental e resultados. Desta forma cada um destes capítulos apresenta uma contextualização do problema com as soluções do estado-da-arte (primeira seção), a metodologia utilizada na proposta apresentada (segunda e terceira seção) e os resultados observados (quarta seção). Note que estes dois capítulos são apresentados de maneira relativamente independente, ou seja, o leitor familiarizado com os fundamentos teóricos e interessado apenas nas soluções propostas pode se atentar a estes capítulos sem perda de generalidade ou conteúdo.

Por fim, o Capítulo 5 discute as conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento deste trabalho e aborda as perspectivas desta área de pesquisa, sob a visão do autor.

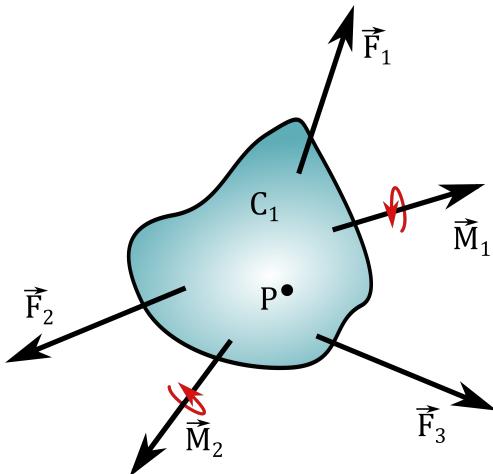
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

Este trabalho se propõe a estudar sensores ópticos a fibra para identificação de forças e, portanto, deve-se discutir a relação entre tais forças e a deformação causada por elas. Este estudo é importante, pois os transdutores ópticos utilizados neste trabalho oferecem uma via para mensurar a deformação. Sendo assim, após esta seção o leitor deve ser capaz de entender razoavelmente a relação entre o carregamento aplicado a uma estrutura e a deformação causada por este carregamento. Nos capítulos seguintes, serão apresentados os esquemas de identificação de forças. Esquemas estes que percorrem a lógica inversa: a partir da medição da deformação na estrutura, por meio das LPFGs, calcula-se a condição de carregamento. Serão apresentadas e analisadas as situações relacionadas aos problemas abordados neste trabalho: (a) viga biapoiada sob ação de um carregamento concentrado e (b) cilindro sob compressão lateral. O leitor interessado pode encontrar maiores detalhes a cerca do tema desta seção na literatura básica de estática e mecânica dos materiais [7, 8].

A estática desenvolve um papel fundamental na resistência dos materiais, portanto esta seção se inicia com uma revisão das condições para o equilíbrio de um corpo rígido. Considere o corpo rígido C_1 ilustrado na Figura 1, note que as forças e momentos que atuam em C_1 podem ser reduzidos à força resultante \vec{F}_R e momento resultante \vec{M}_R em um ponto arbitrário P . De acordo com a primeira lei de Newton, tal corpo rígido está em repouso se tais resultantes são nulas. Dessa forma, as condições de equilíbrio para o corpo rígido C_1 , ilustrado neste exemplo, são resumidas pelas equações (2.1) e (2.2).

Figura 1 - Corpo rígido



Fonte: Elaborada pelo autor.

$$\vec{F}_R = \sum_i \vec{F}_i = \vec{0} \quad (2.1)$$

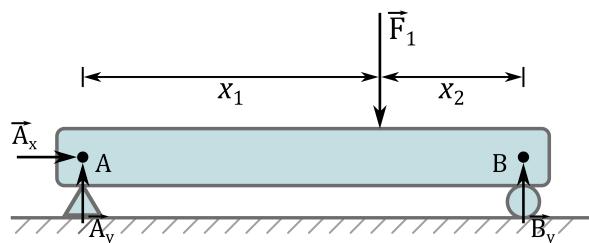
$$\vec{M}_R = \sum_i \vec{M}_i = \vec{0} \quad (2.2)$$

Dado um diagrama de corpo livre, as equações (2.1) e (2.2) são úteis para determinar numericamente as forças atuando em tal corpo com base nas condições de contorno do problema sob análise. Por exemplo, seja viga biapoiada mostrada na Figura 2, em que o triângulo representa uma reação de apoio de segundo grau (impede translação em x e em y) e o círculo uma reação de apoio de primeiro grau (impede translação em y). Sabendo que esta viga se encontra estática, em repouso, pode-se aplicar as equações (2.1) e (2.2) para encontrar as reações de apoio \vec{A}_x , \vec{A}_y e \vec{B}_y com o conhecimento das variáveis \vec{F}_1 , x_1 e x_2

As forças mostradas na Figura 2 são chamadas de forças externas. Para conhecer o comportamento da estrutura sob efeito destas forças e, por exemplo, definir se o material suporta tais forças é necessário conhecer as forças internas. Que podem, por sua vez, ser determinadas pelo método das seções. Suponha a necessidade de se obter as forças internas na seção transversal do ponto C mostrado na Figura 3. Realiza-se então um corte, ilustrado pela seção transversal $c - c$, que separa a viga em duas partes e expõe as forças internas. O procedimento de análise se dá então de forma análoga à análise das forças externas, porém no diagrama de corpo livre de cada parte cortada.

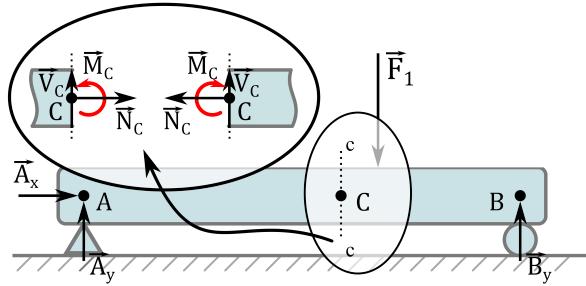
A componente \vec{N}_C , perpendicular à seção, é chamada de força normal, já a componente \vec{V}_C , tangente à seção, é chamada de força cortante e o momento \vec{M}_C é chamado de momento fletor. Ao variarmos a posição do ponto C ao longo do comprimento da viga, diferentes intensidades para estas forças são obtidas, ou seja, pode-se derivar tais intensidades como funções de uma variável independente x que corresponde ao posicionamento do corte.

Figura 2 - Viga biapoiada sujeita a um carregamento concentrado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3 - Forças internas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

No caso ilustrado, em específico, é comum a utilização dos diagramas de força cortante e momento fletor. Estes diagramas são, respectivamente, as funções $V(x)$ e $M(x)$, onde x é a variável independente supracitada e referenciada (usualmente) com zero na extremidade esquerda da viga e crescente à direita. O procedimento para construção destes diagramas pode ser resumido pela equação diferencial que relaciona a força cortante ao carregamento $w(x)$ [7]:

$$\frac{dV(x)}{dx} = w(x) \quad (2.3)$$

e pela equação diferencial que relaciona o momento fletor à força cortante:

$$\frac{dM(x)}{dx} = V(x) \quad (2.4)$$

No exemplo apresentado anteriormente, e ilustrado na Figura 2, se a viga possui comprimento L e $x_1 = d$ e $x_2 = L - d$, pode-se aplicar as equações (2.1) e (2.2) e obter:

$$\sum F_y = A_y + B_y - F = 0$$

$$\sum M_A = B_y L - Fd = 0$$

$$\sum M_B = A_y L - F(L - d) = 0$$

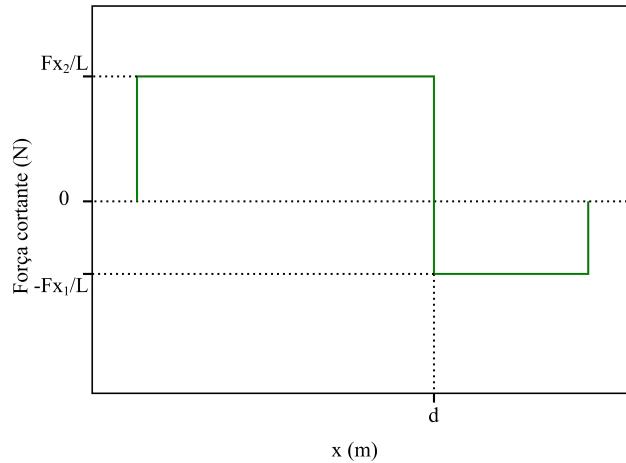
logo:

$$A_y = \frac{L - d}{L} F = \frac{F x_2}{L}$$

$$B_y = \frac{d}{L} F = \frac{F x_1}{L}$$

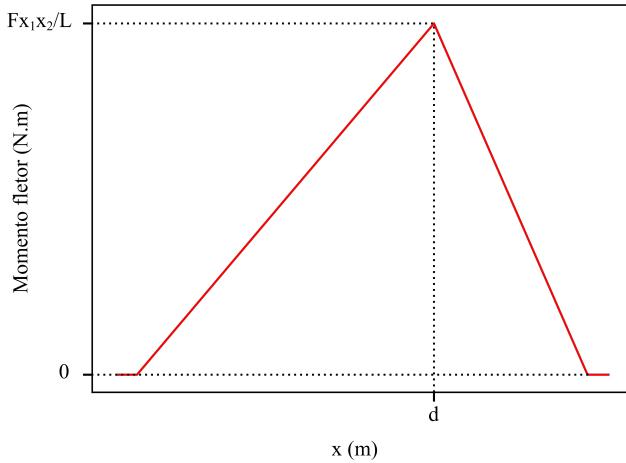
e, portanto, os diagramas de força cortante e momento fletor podem ser vistos nos gráficos 1 e 2, respectivamente.

Gráfico 1 - Diagrama de força cortante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 2 - Diagrama de momento fletor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do cálculo das forças internas é possível obter a deformação na viga. A deformação normal é o alongamento ou contração de um segmento por unidade de seu comprimento. Ou seja, ao traçar um segmento de reta AB de comprimento Δs em um corpo sólido em repouso e observar a taxa de variação deste após a ação de uma força no corpo sólido tem-se a deformação. Seja $\Delta s'$ o comprimento do segmento AB quando o corpo é submetido à tal força, calcula-se a deformação normal média neste segmento (ϵ_{med}) por:

$$\epsilon_{med} = \frac{\Delta s' - \Delta s}{\Delta s} \quad (2.5)$$

e no limite de $B \rightarrow A$ tem-se a deformação normal ϵ no ponto A .

No caso de uma viga biapoiada, a força \vec{F}_1 ilustrada na Figura 2 tende a curvar a viga, causando, portanto, uma deformação na mesma. O comportamento de um corpo prismático, como o ilustrado, antes e depois de sofrer deformação pode ser visto na Figura 4. Note que as linhas longitudinais se curvam, alterando de tamanho: as linhas da porção superior da viga são encurtadas e da porção inferior se alongam. Consequentemente, há uma linha entre estas que não sofre deformação e está contida no chamado plano neutro.

Logo, a deformação em um ponto da viga varia linearmente (regime elástico) de zero, no plano neutro, a um valor máximo, o mais distante deste plano. Essa deformação pode ser calculada por [8]:

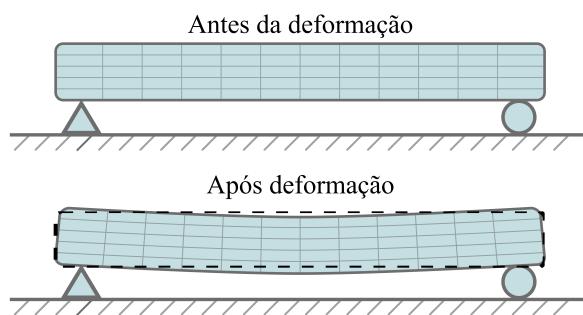
$$\epsilon = -\frac{My}{EI} \quad (2.6)$$

onde M é o momento fletor em tal ponto, y é a distância acima do plano neutro, E é o módulo de Young do material e I o momento de inércia do corpo sólido.

Note que, no caso da viga, as forças internas foram utilizadas para demonstrar a deformação nesta. A seguir, a deformação em um cilindro será apresentada de maneira direta, pois enquanto no Capítulo 3 os conceitos de momento fletor na viga serão utilizados para o desenvolvimento do modelo matemático para identificação de forças nesta, no Capítulo 4 o sistema de identificação de forças no cilindro é completamente baseado em dados experimentais.

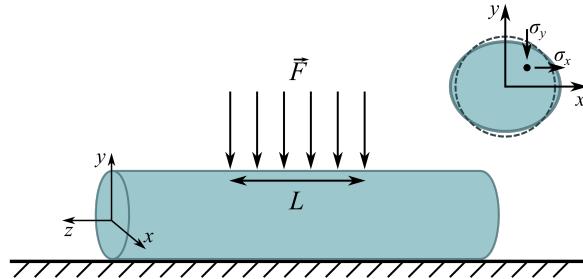
A compressão lateral de um cilindro e os efeitos dessa compressão estão ilustrados na Figura 5. Neste caso, tem-se um carregamento distribuído, constante, ao longo de

Figura 4 - Ilustração de uma viga pré e pós deformação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5 - Cilindro sujeito a deformação por compressão lateral.



Fonte: Elaborada pelo autor.

uma seção longitudinal de comprimento L que totaliza uma força \vec{F} colinear ao eixo y do cilindro. Note que o corte transversal do cilindro antes da deformação é uma circunferência, mas após a deformação se torna uma elipse. Observe que raio colinear à força aplicada reduz enquanto o perpendicular a esta aumenta.

Seja E o módulo de Young do material da fibra óptica, $\sigma_x(x, y)$ e $\sigma_y(x, y)$, a tensão pontual nas direções x e y , conforme ilustra a Figura 5. Calcula-se a deformação na direção x nos pontos colineares a este eixo por:

$$\epsilon_x(x, 0) = \frac{\sigma_x(x, 0)}{E} \quad (2.7)$$

Já a deformação nestes pontos, porém na direção do eixo y é calculada por:

$$\epsilon_y(x, 0) = \frac{\sigma_y(x, 0)}{E} \quad (2.8)$$

Analogamente, as deformações nos pontos colineares ao eixo y são calculadas pelas seguintes equações:

$$\epsilon_x(0, y) = \frac{\sigma_x(0, y)}{E} \quad (2.9)$$

e

$$\epsilon_y(0, y) = \frac{\sigma_y(0, y)}{E} \quad (2.10)$$

Para determinação numérica dos estresses demonstrados nas equações (2.7)-(2.10) deve-se calcular as tensões pontuais pelas equações [9]:

$$\sigma_x(x, 0) = \frac{2F}{\pi DL} \cdot \left(\frac{D^2 - 4x^2}{D^2 + 4x^2} \right)^2 \quad (2.11)$$

$$\sigma_y(x, 0) = -\frac{2F}{\pi DL} \cdot \left(\frac{4D^4}{(D^2 + 4x^2)^2} - 1 \right) \quad (2.12)$$

$$\sigma_x(0, y) = \frac{2F}{\pi DL} \quad (2.13)$$

$$\sigma_y(0, y) = -\frac{2F}{\pi L} \cdot \left(\frac{2}{D - 2y} + \frac{2}{D + 2y} - \frac{1}{D} \right) \quad (2.14)$$

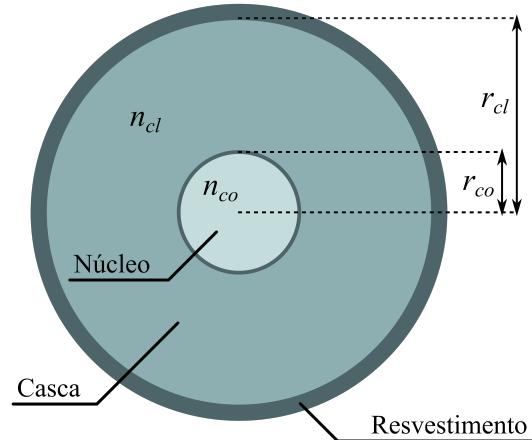
onde D é o diâmetro do cilindro.

2.2 SENSORES ÓPTICOS A FIBRA

2.2.1 Fibras ópticas

As fibras ópticas são guias de onda dielétricos utilizados para transmissão de sinais ópticos desde a região espectral do infravermelho à da luz visível. A transmissão destes sinais ópticos, ou a propagação da luz, nestas fibras é estudada por meio das equações de Maxwell com condições de contorno cilíndricas adequadas à geometria da fibra. Uma ilustração dessa geometria pode ser vista na Figura 6, onde a seção transversal de uma fibra está esquematizada. Nesta ilustração, r_{cl} e r_{co} indicam, respectivamente, os raios da casca e do núcleo da fibra, enquanto n_{cl} e n_{co} indicam os índices de refração também da casca e do núcleo. Para garantir o confinamento e propagação da luz na direção longitudinal da fibra, pelo mecanismo de reflexão interna total, os índices de refração devem atender à condição $n_{co} > n_{cl}$.

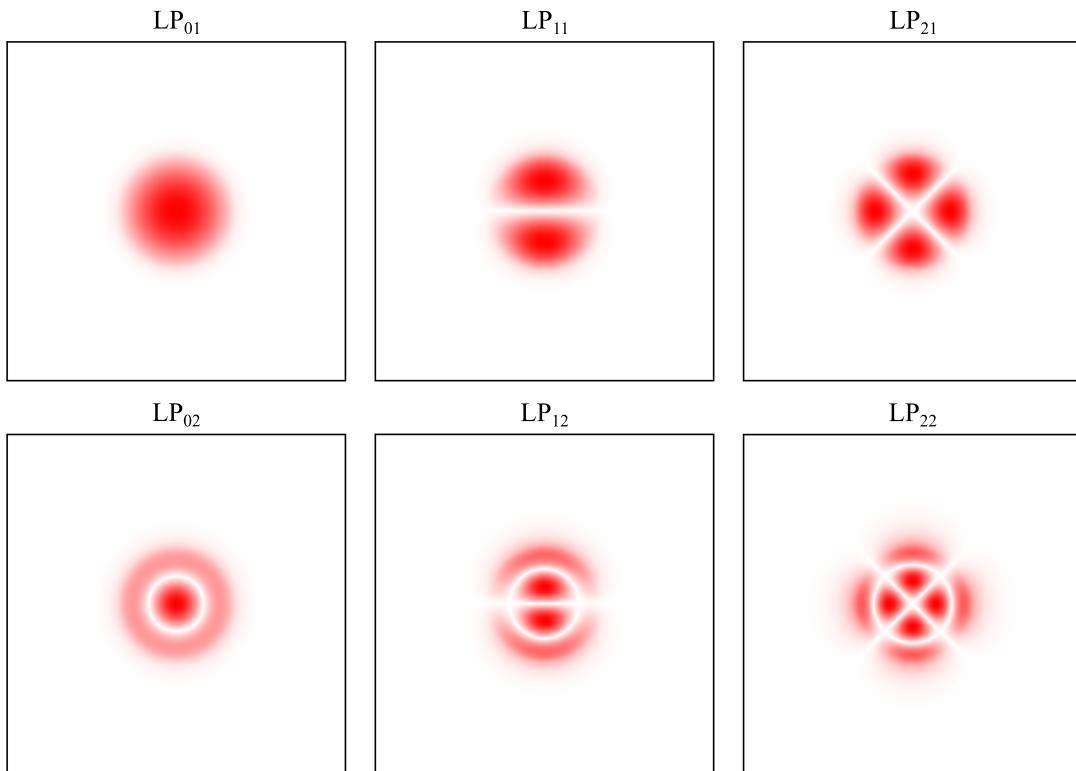
Figura 6 - Esquema de uma fibra óptica (seção transversal).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao equacionar e resolver as equações de Maxwell para a fibra óptica, utiliza-se o conceito de modos de propagação, que são padrões de distribuição do campo eletromagnético que satisfazem às equações de Maxwell e transportam parte da energia luminosa através da fibra [10]. Nas fibras ópticas comerciais, a diferença entre os índices de refração n_{cl} e n_{co} é pequena, ou seja, $n_{co} - n_{cl} \ll 1$. Sob estas condições, nas chamadas fibras de guiamento fraco (do inglês *weakly guiding fibers*), a descrição dos modos de propagação na fibra se torna mais simples e os modos resultantes são conhecidos como modos linearmente polarizados (LP), com alguns destes ilustrados na Figura 7. Uma discussão matemática formal a cerca da solução das equações de onda em fibra óptica e da aproximação por guiamento fraco está além do escopo deste trabalho e o leitor interessado em mais detalhes pode facilmente encontrá-la na literatura [11–15].

Figura 7 - Distribuição de energia em alguns modos LP.



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.2.2 Grades de difração em fibra óptica

Este trabalho foca na aplicação de sensores ópticos a fibra baseados em grades, ou redes, de difração. Uma grade de difração em fibra é uma perturbação nas propriedades da fibra óptica, geralmente periódica e no índice de refração do seu núcleo [16], mas também pode ocorrer na sua geometria, com o afunilamento do guia de onda, por exemplo [17–19].

Esta perturbação periódica no guia de onda é também conhecida na literatura como modulação periódica e causa uma troca parcial de energia entre modos de propagação do mesmo, fenômeno descrito pela teoria do acoplamento entre modos [16]. Esta troca ocorre quando uma condição de casamento entre a fase destes modos é satisfeita. Seja β_1 e β_2 as constantes de propagação dos tais modos e Λ o período de modulação da grade, o casamento de fase para a m -ésima ordem de difração ocorre em um comprimento de onda λ seguindo a condição [20]:

$$\beta_2 = \beta_1 - m \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.15)$$

Observe que a condição de casamento de fase descrita em (2.15) depende do período de modulação da grade. Portanto, é natural classificarmos as grades de difração quanto ao seu período e neste contexto, surgem duas grandes subdivisões de grades de difração: as grades de Bragg (ou grades de período curto) e as grades de período longo, FBGs (*fiber Bragg grating*) e LPFGs (*long-period fiber grating*), respectivamente.

2.2.2.1 Grades de período curto

Uma FBG é uma grade de difração em fibra com período de modulação curto, na ordem de centenas de nanômetros (operando na faixa do infra-vermelho), e acopla o modo fundamental do núcleo LP₀₁ (β_{01}) ao modo contrapropagante também do núcleo ($-\beta_{01}$), conforme ilustra a representação do acoplamento de modos por óptica geométrica na Figura 8. Ou seja, uma FBG é um espelho dielétrico em fibra, para um dado comprimento de onda. Substituindo as constantes de propagação destes modos na equação (2.15), obtém-se tal comprimento de onda, que é chamado comprimento de onda de Bragg (λ_{bragg}) e é dado por:

$$\lambda_{bragg} = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.16)$$

pois $\beta = (2\pi/\lambda)n_{eff}$.

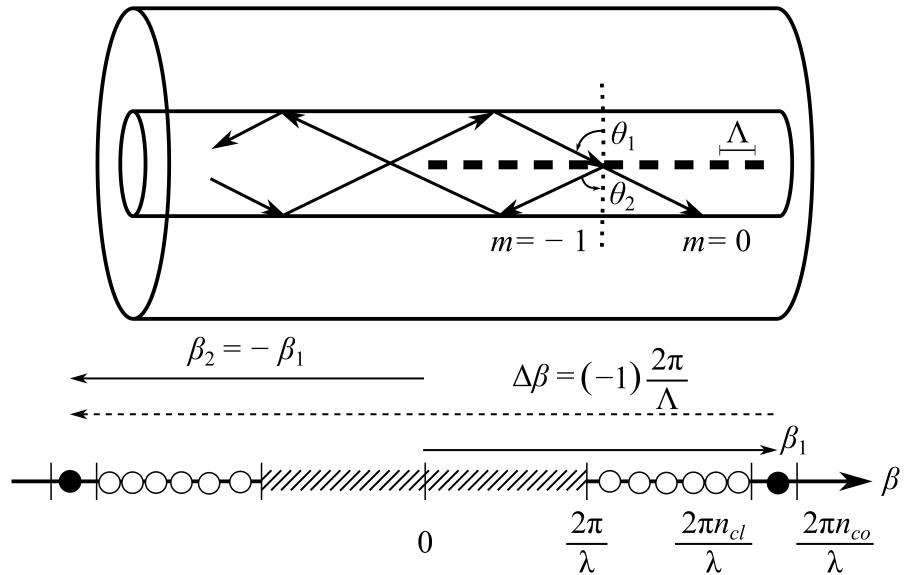
Observe também no diagrama da Figura 8 que $\Delta\beta$ em uma FBG é grande. Por outro lado, a relação inversamente proporcional entre $\Delta\beta$ e o comprimento de onda acoplado (veja a equação (2.15)) explica o curto período deste tipo de grade.

Ao refletir a luz ao redor do comprimento de onda de Bragg, as FBGs atuam como um filtro passa-faixa em sua característica de reflexão e como um filtro rejeita-faixa em sua característica de transmissão, veja a Figura 9.

2.2.2.2 Grades de período longo

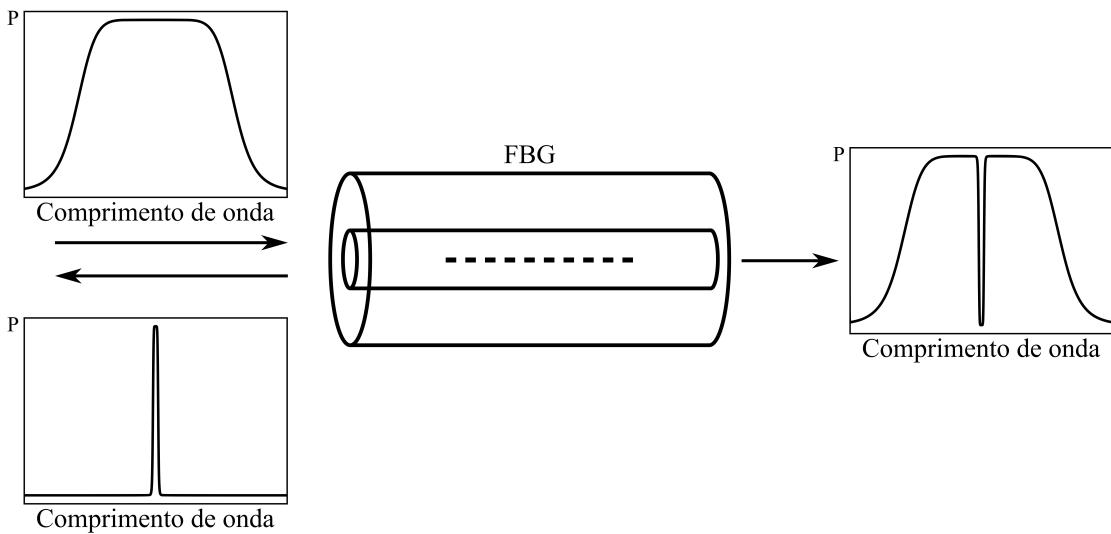
Ao contrário das FBGs, as LPFGs não acoplam energia para um modo contrapropagante, elas acoplam parte da energia do núcleo da fibra para m modos copropagantes

Figura 8 - Representação da reflexão da luz em uma FBG utilizando uma aproximação por óptica geométrica.



Fonte: Adaptada pelo autor [20].

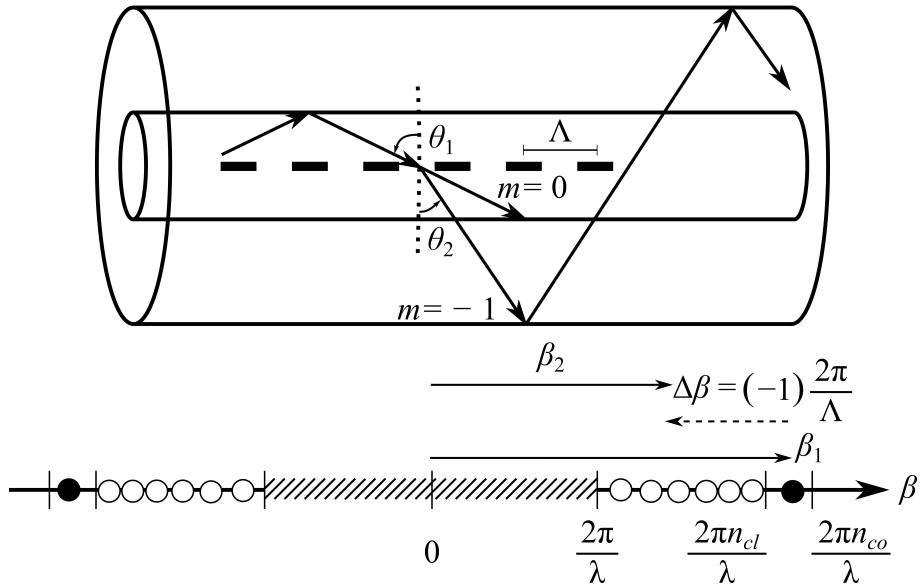
Figura 9 - Ilustração de uma FBG, sua característica de transmissão e de reflexão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

da casca da fibra. Como o próprio nome sugere, o período de modulação da grade que constitui uma LPFG é consideravelmente maior que o período de modulação da grade que caracteriza uma FBG. Analogamente ao demonstrado para as FBGs, uma representação

Figura 10 - Representação do acoplamento do modo fundamental para um modo de casca em uma LPFG utilizando uma aproximação por óptica geométrica.



Fonte: Adaptada pelo autor [20].

do acoplamento do modo fundamental do núcleo para um modo de casca, em uma LPFG, pode ser vista na Figura 10.

Seja β_m um dos m modos de casca, a partir da equação (2.15), obtém-se os comprimentos de onda ressonantes de uma LPFG:

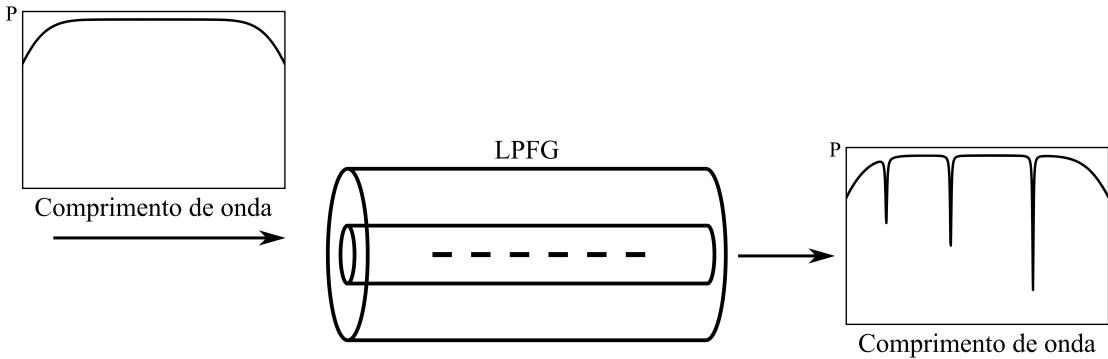
$$\lambda_{res}^m = (n_{eff,co} - n_{eff,clad}^m) \Lambda \quad (2.17)$$

que são os comprimentos de onda em que ocorre o acoplamento de energia do modo do núcleo para os m -ésimos modos de casca.

Ao acoplar parte da energia do núcleo para a casca, bandas de atenuação centradas nos comprimentos de onda ressonantes são observadas na característica de transmissão das LPFGs. Isso ocorre, pois a energia acoplada para a casca rapidamente se espalha na interface entre esta e o meio externo, conforme ilustra o esquema da Figura 11, e essas bandas de atenuação são frequentemente chamadas de vale de ressonância.

As grades de difração, além de filtros, podem atuar também como sensores, uma vez que seu comprimento de onda central (λ_{Bragg} para FBGs e λ_{res}^m para LPFGs) depende de parâmetros sensíveis ao meio ambiente. Este trabalho foca no uso de LPFGs como elementos sensores, especificamente para mensuração de deformação física, mas maiores informações sobre grades de Bragg como elemento sensor podem ser facilmente encontradas na literatura [21–24].

Figura 11 - Ilustração de uma LPFG e sua característica de transmissão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma LPFG é sensível à temperatura, deformação e ao (índice de refração do) meio que engloba o dispositivo. A sensibilidade à temperatura se dá pela variação no período de modulação da grade e no índice efetivo, por dilatação térmica e efeito termo-óptico, respectivamente. Já a sensibilidade à deformação é explicada pela lei de Hooke e por efeito elasto-óptico. Ao passo que a sensibilidade ao meio externo ocorre, pois o índice efetivo dos modos de casca depende do índice de refração da fibra e do meio externo (SRI, do inglês *surrounding refractive index*).

Matematicamente, essas sensibilidades podem ser resumidas pelas derivadas $d\lambda_{res}/dT$, $d\lambda_{res}/d\epsilon$ e $d\lambda_{res}/dn_{sur}$, que representam, respectivamente, a sensibilidade da LPFG à temperatura, deformação e SRI. Elas podem ser obtidas a partir da equação (2.17), que relaciona o comprimento de ressonância central às variáveis de derivação. Essas expressões são dadas por [4]:

$$\frac{d\lambda_{res}}{dT} = \lambda_{res} \cdot \gamma \cdot (\alpha + \Gamma_{temp}) \quad (2.18)$$

$$\frac{d\lambda_{res}}{d\epsilon} = \lambda_{res} \cdot \gamma \cdot (1 + \Gamma_{strain}) \quad (2.19)$$

$$\frac{d\lambda_{res}}{dn_{sur}} = \lambda_{res} \cdot \gamma \cdot \Gamma_{sur} \quad (2.20)$$

onde α é o coeficiente de expansão térmica da fibra e γ descreve a dispersão na fibra. Já Γ_{temp} , Γ_{strain} e Γ_{sur} descrevem a dependência entre a dispersão na fibra e a temperatura, deformação e SRI, respectivamente, e são calculados por [4]:

$$\Gamma_{temp} = \frac{\xi_{co} n_{eff,co} - \xi_{cl} n_{eff,cl}^m}{n_{eff,co} - n_{eff,cl}^m} \quad (2.21)$$

$$\Gamma_{strain} = \frac{\eta_{co}n_{eff,co} - \eta_{cl}n_{eff,cl}^m}{n_{eff,co} - n_{eff,cl}^m} \quad (2.22)$$

$$\Gamma_{sur} = -\frac{u_m^2 \lambda_{res}^3 n_{sur}}{8\pi r_{cl}^3 n_{cl} (n_{eff,co} - n_{eff,cl}^m) (n_{cl}^2 - n_{sur}^2)^{3/2}} \quad (2.23)$$

em que ξ_{co} , ξ_{cl} , η_{co} e η_{cl} são os coeficientes termo-ópticos e elasto-ópticos dos materiais que constituem o núcleo e a casca da fibra, respectivamente. Já u_m é a m -ésima raiz da função de Bessel de ordem zero do tipo um, r_{cl} é o raio da casca da fibra, n_{cl} e n_{sur} o índice de refração da casca e do meio em que o sensor está envolvido.

A partir das sensibilidades mostradas, analiticamente, nas equações (2.18) a (2.20) diversos autores exploram o potencial sensor das LPFGs para medição de temperatura, deformação e SRI. Em [25] os autores comparam simulações feitas a partir das expressões analíticas com resultados experimentais para LPFGs submetidas à diferentes temperaturas. Já Yin et al. apresentam uma LPFG com alta sensibilidade à temperatura ($2,1 \text{ nm}^\circ\text{C}^{-1}$) em [26].

Já com relação à deformação física, LPFGs podem ser utilizadas para a mensuração de estresse, torção e curvatura [27], inclusive com alta sensibilidade à deformação e baixa sensibilidade cruzada com relação à temperatura [28]. Além disso, outros parâmetros podem ser mensurados indiretamente por meio da deformação, como temperatura [29] e corrente elétrica [30].

Uma característica intrínseca das LPFGs é sua sensibilidade ao índice de refração externo, em [31] os autores demonstram o uso de LPFGs para medição do SRI, apresentando uma comparação entre os modelos matemáticos do sensor e os resultados experimentais. Diversos outros trabalhos abordaram o uso de LPFGs para mensuração do SRI [32, 33]. Recentemente, novas abordagens de sensores SRI-LPFG têm surgido, com o uso de fibra com núcleo reduzido para aumento da sensibilidade [34] ou revestimento da LPFG com óxido de grafeno para aumento da sensibilidade a gases [35], por exemplo. Explorando principalmente o uso de LPFGs revestidas, biossensores também vêm sendo reportados para detecção de triglicerídios [36], vírus [37] e glicose [38].

Ao comparar o espectro de transmissão de uma LPFG com o espectro de reflexão ou transmissão de uma FBG, nota-se que este é consideravelmente mais complexo, de fato, diversas bandas de atenuação surgem a partir do acoplamento aos modos de casca. Portanto, é de se esperar que mais informação sobre o ambiente em que o sensor está presente esteja contida neste espectro. Neste cenário, é possível que as LPFGs possam atuar como sensores multi-parâmetro, uma vez que cada modo de casca apresenta um índice efetivo único e, portanto, sensibilidade única à temperatura, deformação e índice externo [39–41].

2.3 INTERROGAÇÃO DE SENSORES LPFG

As equações (2.18) a (2.20) indicam que, para utilização das LPFGs como elementos sensores, o(s) comprimento(s) de onda ressonante(s) deve(m) ser conhecido(s). De fato, as LPFGs representam uma grandeza física através da sua característica de transferência. Portanto, a informação do mensurando, que está contida no espectro da LPFG, deve ser extraída deste. A esse processo dá-se o nome de interrogação.

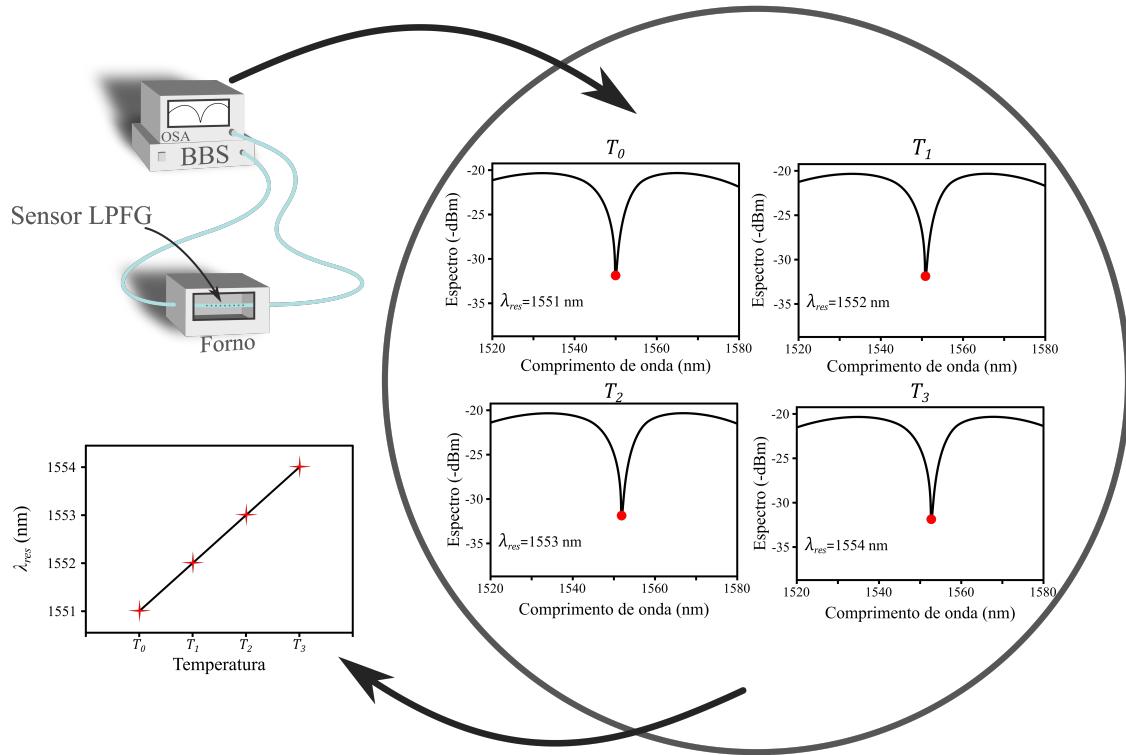
Devido à grande largura de banda das LPFGs este processo é mais desafiador do que, por exemplo, a interrogação de sensores FBG. Por isso é comum se interrogar uma LPFG diretamente pela medição do espectro de transmissão do dispositivo, tal abordagem será denominada por Método da análise espectral nesta dissertação, e é discutida na Subseção 2.3.1. Outra abordagem consiste em converter a modulação do comprimento de onda ressonante em uma modulação de intensidade luminosa e subsequente conversão em tensão elétrica, que é uma maneira de leitura mais apropriada para os métodos convencionais de instrumentação [42]. Esta segunda abordagem será denominada por Método da filtragem nesta dissertação, e é abordada na Subseção 2.3.2. O tópico de interrogação de sensores ópticos a fibra está em constante desenvolvimento, como pode ser visto por publicações recentes [43–46]. Em contra partida métodos tradicionais, além dos abordados neste texto, estão bem descritos em [47].

2.3.1 Análise espectral

Como brevemente abordado na introdução desta seção, as técnicas de interrogação baseadas no Método de análise espectral visam mensurar o espectro de transmissão da LPFG de maneira direta, ou seja, visam obter ao menos um vale de ressonância do espectro de transmissão da LPFG. Para tal, utiliza-se equipamentos robustos como Analisadores de Espectro Óptico (OSA, do inglês: *optical spectrum analyzer*) ou lasers variáveis [48, 49]. A partir da coleta do espectro de transmissão da LPFG, geralmente, o comprimento de onda ressonante é detectado e correlacionado ao mensurando por meio da curva de calibração estática do sensor.

Um esquema demonstrando a calibração de um sensor de temperatura baseado em LPFG utilizando este método de interrogação pode ser visto na Figura 12. Considere a calibração de um sensor de temperatura a partir de quatro temperaturas $T_0 < T_1 < T_2 < T_3$ conhecidas e controladas por um forno. Uma LPFG colocada dentro deste forno é iluminada por uma fonte de espectro largo (BBS, do inglês: *broadband source*) e o espectro de transmissão é observado em um OSA, conforme ilustra o *setup* experimental esquematizado na Figura 12. A partir dos espectros obtidos pelo OSA, extraí-se o comprimento de onda para o ponto mais baixo da curva de transmissão, obtendo assim o λ_{res} para cada temperatura. A partir destes valores, calcula-se a curva de calibração estática do sensor por uma aproximação linear dos dados experimentais. Após o cálculo

Figura 12 - Esquema da interrogação de uma LPFG pelo Método da Análise espectral.



Fonte: Elaborada pelo autor.

desta curva, basta identificar o comprimento de onda ressonante da LPFG por meio do espectro de transmissão mensurado pelo OSA para realizar a estimativa da temperatura.

2.3.2 Filtragem

Ao contrário do método tratado anteriormente, que obtém a potência óptica para diversos comprimentos de onda (isto é, o espectro de transmissão), a interrogação de uma LPFG por meio do Método da filtragem obtém a potência óptica em comprimentos de onda pontuais. Esta extração pontual de potência é feita por meio de filtros ópticos passa-faixa de largura de banda estreita, como FBGs, por exemplo [50–52]. Dessa forma, demodula-se a variação do comprimento de onda ressonante da LPFG em uma variação de potência óptica que pode ser mensurada com um medidor de potência óptica (PM, do inglês: *power meter*), fotodetector ou fotodiodo, por exemplo. Por utilizar instrumentos de medição mais baratos, simples e compactos que àqueles utilizados na mensuração do espectro de transmissão, pode-se dizer que o Método da filtragem é mais adequado para o uso em campo, enquanto o Método da análise espectral é mais adequado para o uso em laboratório.

Para se interrogar uma LPFG utilizando o Método da filtragem deve-se projetar um ou mais, geralmente dois, filtros ópticos ao redor do vale de transmissão da LPFG.

Nesta dissertação, foram utilizadas FBGs como os filtros ópticos do Método da filtragem.

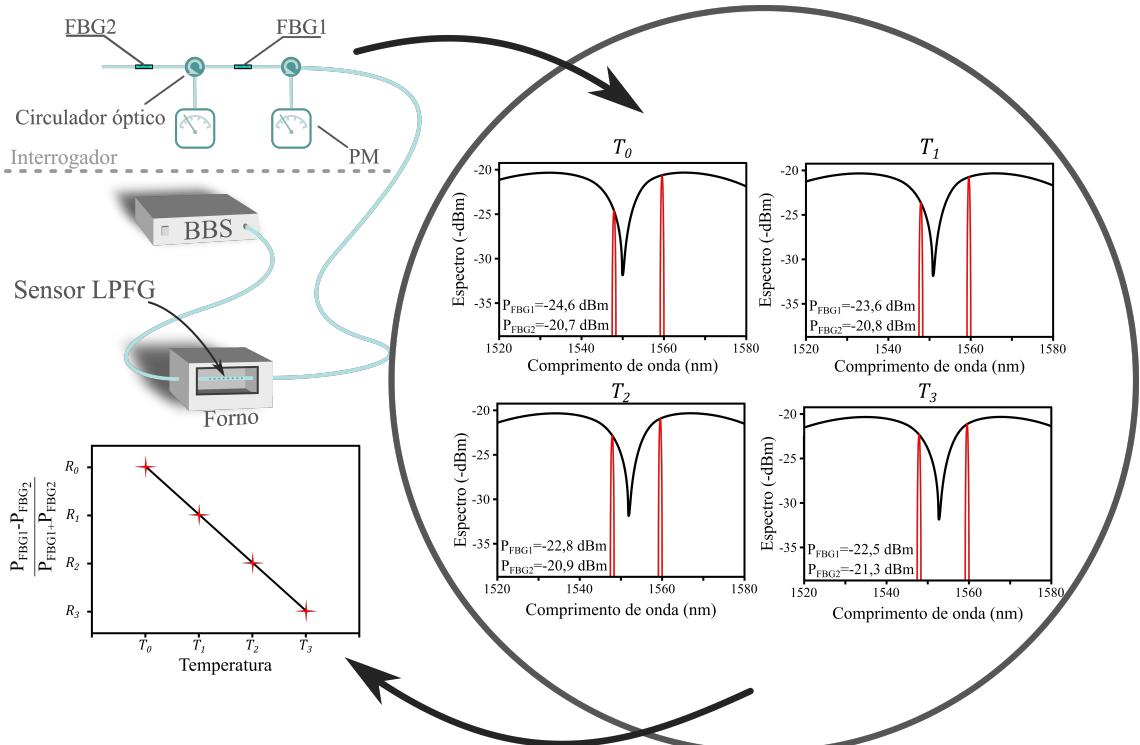
Note que o vale de ressonância de uma LPFG possui uma curvatura na faixa de transição. Portanto, para compensar a não linearidade da potência filtrada por um único filtro, a razão da diferença pela soma da potência em dois filtros (em lados opostos - bordas - do vale de ressonância) é utilizada [50]:

$$R = \frac{P_{FBG_1} - P_{FBG_2}}{P_{FBG_1} + P_{FBG_2}} \quad (2.24)$$

onde P_{FBG_1} e P_{FBG_2} são, respectivamente, as potências ópticas filtradas pelos filtros FBGs localizados nas bordas do vale de ressonância da LPFG interrogada, com $\lambda_{Bragg,FBG_1} < \lambda_{res} < \lambda_{Bragg,FBG_2}$.

Analogamente ao demonstrado na Subseção 2.3.1, a Figura 13 ilustra a calibração de um sensor de temperatura baseado em uma LPFG que é interrogada por um par de FBGs ao redor de seu vale de ressonância. Observe que ao deslocar o vale de ressonância da direita, a potência P_{FBG_1} aumenta e P_{FBG_2} diminui, pois λ_{res} se aproxima de λ_{Bragg,FBG_2} . Note que, apesar da relação não linear entre P_{FBG_i} e λ_{res} , a relação entre R e λ_{res} é linearizada pela equação (2.24).

Figura 13 - Esquema da interrogação de uma LPFG pelo Método da Filtragem.



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.3.3 Pós-processamento e interpretação

Após a identificação do comprimento de onda ressonante e do mensurando, é comum uma etapa de pós-processamento e interpretação do mensurando. Este último processo depende exclusivamente da aplicação específica do sensor e do problema pelo qual ele foi projetado para resolver no contexto desta aplicação. No caso da identificação de forças, por exemplo, pode-se utilizar modelos matemáticos da estrutura sob monitoramento que permitem relacionar o mensurando à força que se deseja identificar.

Um sensor de deformação colado à uma estrutura estima a deformação no ponto em que este é colado (ϵ_{mens}). Esta deformação, por sua vez, pode ser utilizada para o cálculo de um parâmetro externo por meio de um modelo matemático ($Par(\epsilon_{mens})$). Esta abordagem pode ser utilizada para mensuração de torque e ângulo [53], forças em microcirurgias [54] e outros parâmetros como medição de curvatura, torção e força em um manipulador [55].

Porém, em alguns casos um modelo matemático é inviável, seja pelo grande número de variáveis que impactam no parâmetro externo ou pela complexidade da relação entre este parâmetro e o mensurando estimado pelo sensor. Nestes casos, a solução adotada é realizar uma série de ensaios, coletando dados em diversas situações distintas, e desenvolver um modelo que melhor se ajusta a esses dados. Tal solução é normalmente chamada de abordagem baseada em dados, em alusão ao termo *data-driven* utilizado em inglês, popularizada em diversas áreas nos últimos anos pelo aumento do interesse em aprendizado de máquinas.

O uso de soluções utilizando aprendizado de máquinas como ferramenta para processar dados de sensores a fibra óptica é crescente e bem reportado na literatura. Sensores FBGs foram utilizados para solucionar o problema de localização e gravidade de um impacto em uma estrutura laminada com auxílio de um modelo baseado em máquinas de vetor de suporte em [56]. FBGs também foram utilizadas para identificação de campo magnético com a posição sendo identificada por um classificador *k*-NN em [57]. E outros trabalhos propuseram o uso de arranjos de FBGs acoplados a redes neurais convolucionais para identificação/classificação de danos estruturais em veículos [58, 59].

Assim como para FBGs, o uso destas técnicas para processar dados de LPFGs também é encontrado na literatura de instrumentação óptica. Um classificador baseado em rede neural artificial (RNA) foi desenvolvido para classificar qualidade de combustível utilizando um transdutor LPFG em [60]. Em [61] os autores utilizaram dados de duas LPFGs e uma RNA para medir temperatura e curvatura. Já em [62] outro esquema de sensoriamento multi-parâmetro baseado em LPFGs e RNAs é demonstrado para discriminação entre temperatura e deformação. Por outro lado, [63] demonstra um esquema utilizando diversos dados espectrais de uma única LPFG acoplados a uma RNA para desenvolver um sensor de curvatura.

Este trabalho aborda a identificação de forças por ambos os métodos. No Capítulo 3 um esquema para identificação da força aplicada a uma viga biapoiada é demonstrado utilizando um modelo matemático com base na fundamentação teórica demonstrada na Seção 2.1. Já no Capítulo 4, utiliza-se RNAs para identificação bidirecional de forças transversais a uma LPFG. Portanto, a Subseção a seguir apresenta ao leitor uma introdução às redes neurais artificiais.

2.3.3.1 Redes neurais artificiais

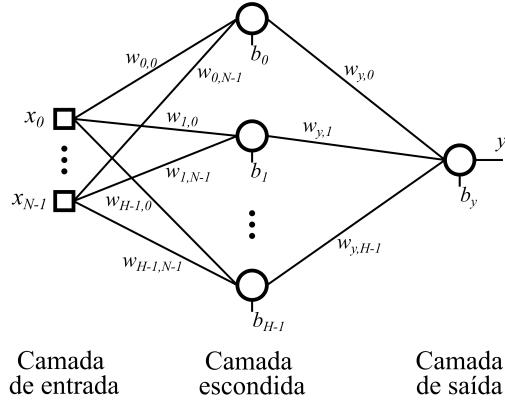
Rede Neural Artificial (RNA) é o nome dado a um modelo computacional inspirado no sistema nervoso de animais. Tal modelo é formado por um conjunto de unidades interconectadas e organizadas em camadas que são chamadas de neurônios artificiais por alusão ao sistema nervoso. Uma das topologias de RNA mais conhecidas e utilizadas é o *Multilayer Perceptron* (MLP). Esta topologia se tornou popular e muito utilizada devido à sua capacidade de aproximar qualquer função com apenas três camadas de processamento (entrada, intermediária e saída), desde que esta função possua um número finito de descontinuidades [64–66].

Da mesma forma que um neurônio biológico processa informação e transmite para outros neurônios do sistema nervoso, os neurônios artificiais de uma rede neural recebem valores de entrada, processam essa informação e geram uma saída que, por sua vez, será entrada para outros neurônios. Esses neurônios são as unidades básicas da RNA, que interconectadas e organizadas em camadas formam a rede neural. A primeira camada recebe o nome de camada de entrada, as seguintes de camadas escondidas e a última camada é chamada de camada de saída. Na Figura 14 pode-se ver o esquema de um MLP com N nós de entrada, H neurônios na sua única camada escondida e um neurônio de saída.

As RNAs passam essencialmente por três estágios: projeto, treinamento e uso. No primeiro estágio (projeto) determina-se a arquitetura geral da rede neural, ou seja, número de neurônios e camadas, funções de ativação, método de treinamento, além da escolha dos dados de entrada e pré-processamento destes. No segundo estágio (treinamento) uma RNA adquire conhecimento, pois os pesos sinápticos $w_{n,a}$ que conectam o nó a ao nó n , são atualizados para minimizar o erro entre as estimativas da rede neural e as saídas conhecidas. Ou seja, durante o treinamento, um algoritmo de otimização é utilizado para adaptar os pesos e tornar a RNA capaz de mapear um conjunto de pares entrada-saída conhecidos (conjunto de treino) com baixo erro. Dessa forma, o modelo adquire um conhecimento que é baseado nos dados mostrados a ele neste processo [67, 68].

Por isso, as RNAs possuem algumas características interessantes à modelagem baseada em dados: aprendizado por exemplo com alta capacidade de adaptação a partir da experiência, memória e armazenamento distribuído (conhecimento é armazenado nos

Figura 14 - Ilustração de uma rede neural artificial $N \times H \times 1$ (N entradas, H neurônios na única camada escondida e uma saída)



Fonte: Elaborada pelo autor.

pesos). Além da capacidade de generalização, pois quando o conjunto de treinamento é uma amostra significativa do problema o qual a RNA é desenvolvida para solucionar, o erro para dados desconhecidos também é baixo. E é no último estágio (uso), que a generalização se mostra importante, pois novas informações serão processadas com base no aprendizado adquirido durante o treinamento. Nesta fase, o processamento se dá por partes, camada a camada, da entrada em direção à saída. Por exemplo, para a rede neural ilustrada na Figura 14, a saída do i -ésimo neurônio da camada escondida é dada por:

$$h_i = f \left(b_i + \sum_{k=0}^{N-1} x_k w_{i,k} \right) \quad (2.25)$$

em que b_i é o termo independente (*bias*) do i -ésimo neurônio, $w_{i,k}$ o peso sináptico que conecta a entrada k a este neurônio e $f(\cdot)$ sua função de ativação. Já a saída da RNA é calculada em função das saídas h_i dos H neurônios da camada escondida:

$$y = b_y + \sum_{i=0}^{H-1} h_i w_{y,i} \quad (2.26)$$

onde b_y é o termo independente do neurônio de saída e $w_{y,i}$ o peso sináptico que conecta o i -ésimo neurônio da camada oculta a este.

Um procedimento padrão para o desenvolvimento de uma rede neural é separar os dados disponíveis (compostos por diversos pares entrada-saída) em três grupos: treino, validação e teste. Destes, os dois primeiros são utilizados para treinar diferentes modelos durante o estágio de projeto, a fim de se determinar a arquitetura da RNA. Estes são os mesmos grupos utilizados para treinar o modelo, enquanto o último é utilizado apenas

para simular o uso da RNA em um cenário de dados desconhecidos. Observe que, esta abordagem visa minimizar o viés na avaliação do modelo que pode ser introduzido pelo treinamento dele. Ou seja, avalia-se a RNA com dados nunca vistos por ela (grupo de teste), avaliando assim sua capacidade de generalização e, consequentemente, seu aprendizado.

Já para treinar RNAs, geralmente se utiliza um algoritmo de propagação reversa (do inglês *back-propagation*), que é uma aplicação do gradiente descendente e sua descrição formal pode ser encontrada em [69]. Neste tipo de algoritmo, os pesos são inicializados aleatoriamente ou com valores conhecidos, ou seja, com transferência de aprendizado (do inglês *transfer learning*). Em seguida, os dados de entrada são propagados para a saída, gerando uma estimativa. Tal estimativa é comparada com a saída desejada, gerando um erro, que por sua vez é propagado na direção inversa, da saída para entrada. Durante a propagação inversa, os pesos são ajustados visando minimizar o erro. Esse procedimento continua até que um critério de parada seja atingido, como é comum em algoritmos de otimização. Ao leitor interessado em aprofundar no tema de RNAs e aprendizado de máquinas, uma descrição formal e detalhada sobre o desenvolvimento, treinamento e avaliação de RNAs pode ser encontrada na literatura básica sobre aprendizado de máquinas e reconhecimento de padrões [67–70].

3 IDENTIFICAÇÃO DO CARREGAMENTO EM VIGAS BIAPOIADAS

3.1 Contexto e aplicações

Estruturas como prédios, pontes, torres de transmissão, autoestradas e ferrovias sofrem ação contínua de cargas e intempéries, que podem acarretar em degradação e/ou dano estrutural das mesmas. Para aumentar a segurança e durabilidade de tais estruturas, engenheiros têm implementado sistemas para monitoramento da saúde das estruturas e este campo de estudo é conhecido como *structural health monitoring* (SHM).

Pode-se destacar a importância dos instrumentos de medição de deslocamento e deformação para tal área da engenharia e a maior parte dos instrumentos utilizados para tal, na literatura de SHM, utiliza *strain gauges* resistivos [71–75]. Porém tais sensores possuem algumas desvantagens, como baixa relação sinal-ruído, alta atenuação, alta sensibilidade cruzada com a temperatura, são ativos e, portanto, necessitam de vários cabos (alimentação e sinal).

Para contornar algumas destas desvantagens, alguns autores propuseram o uso de sensores piezoelétricos, que são mais sensíveis à deformação, passivos (detecta-se a tensão gerada pela ação da deformação no material piezoelétrico) e rápidos [76–79]. Apesar de reduzir o número de conexões necessárias, melhorando a logística de cabeamento, e também melhorar a relação sinal ruído [80], os sensores de deformação piezoelétricos ainda são suscetíveis à interferência eletromagnética e atenuação, principalmente em aplicações de longa distância.

Em 1978 a primeira alternativa óptica aos *strain gauges* elétricos foi apresentada por Butter e Hocker [81]. A proposta de sensoriamento de deformação por fibras ópticas resolve aqueles problemas apresentados nos sensores elétricos, pois são imunes à interferência eletromagnética e podem ser facilmente multiplexados em um único cabo de fibra óptica, que por sua vez transmite o sinal por quilômetros com baixa atenuação. Desde então, sensores ópticos têm sido utilizados em sistemas de SHM com diferentes objetivos. Dentre eles, tem-se a detecção de rachaduras em concreto [82, 83], monitoramento de estruturas de concreto [84–88] e pontes [89–92]. Com grande destaque para as FBGs [84–92].

Já o uso de LPFGs é relatado na literatura de SHM principalmente devido à sua sensibilidade ao SRI [93, 94]. Porém, as LPFGs possuem alta sensibilidade à deformação, que pode ser explorada para a fabricação de sistemas SHM baseados em fibra com transdutores de custo reduzido. De fato, o período longo das LPFGs permite que elas sejam fabricadas por técnicas mais simples (e baratas), como a técnica do arco elétrico [95].

Neste contexto, propõe-se o uso de um arranjo com quatro LPFGs para mensuração da deformação em uma viga biapoiada para estimativa da condição de carregamento

aplicada a esta viga. Ou seja, com base nas medições de deformação realizadas pelas LPFGs, a força aplicada e posição desta ao longo do comprimento da viga são estimadas. A investigação apresentada neste capítulo pode ser o ponto de partida para solução de vários problemas envolvendo identificação de carregamento em vigas e pode ser estendida para cargas dinâmicas, possibilitando o monitoramento de tráfego em pontes, por exemplo. Além do mais, o uso de LPFGs permite sensoriamento multi-parâmetro, podendo monitorar além da carga, a temperatura ou o SRI, abrindo precedente para diversas aplicações interessantes à engenharia civil.

3.2 Princípio de funcionamento

Para identificar o carregamento aplicado à viga (conforme ilustra a Figura 2), o diagrama de momento fletor da viga será estimado por meio das medições de deformação realizadas pelas LPFGs. Para identificação do carregamento concentrado, duas informações são necessárias: i) a posição onde a força é aplicada e ii) a intensidade desta força. Observe que o diagrama de momento fletor de uma viga biapoiada sujeita a um carregamento concentrado possui perfil triangular com o pico do triângulo posicionado na localização de aplicação da força. Observe também que a altura deste triângulo é relacionada à intensidade desta (ver Gráfico 2).

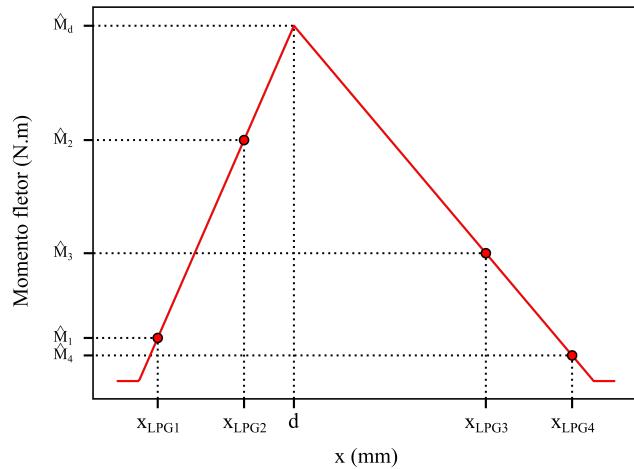
A deformação em um ponto desta viga, por sua vez, depende do momento fletor neste ponto (ver equação (2.6)). Ou seja, pode-se estimar o momento fletor em um ponto ao longo da viga (eixo x), se a deformação em algum ponto de mesma coordenada x é conhecida. Matematicamente, estima-se momento fletor \hat{M} em um ponto $(x_{\hat{\epsilon}}, y_{\hat{\epsilon}})$ onde a deformação foi estimada em $\hat{\epsilon}$ por:

$$\hat{M}_{x_{\hat{\epsilon}}} = -\frac{\hat{\epsilon}EI}{y_{\hat{\epsilon}}} \quad (3.1)$$

segundo a mesma notação da equação (2.6).

Ao posicionar quatro sensores LPFG na viga em diferentes pontos do eixo x : x_{LPFG_1} , x_{LPFG_2} , x_{LPFG_3} e x_{LPFG_4} , pode-se traçar uma estimativa do momento fletor para qualquer ponto x e então estimar o carregamento, veja o Gráfico 3. Note que para estimar o momento fletor da viga basta traçar a reta entre os pontos estimados pelas $LPFG_1$ e $LPFG_2$, e também a reta entre os pontos estimados pelas $LPFG_3$ e $LPFG_4$, formando assim um triângulo, que representa o diagrama de momento fletor estimado. Observe que esta abordagem apresenta uma limitação, o diagrama de momento fletor só pode ser estimado para $x_{LPFG_2} < d < x_{LPFG_3}$.

Gráfico 3 - Diagrama de momento fletor estimado pelas quatro LPFGs.



Fonte: Elaborado pelo autor.

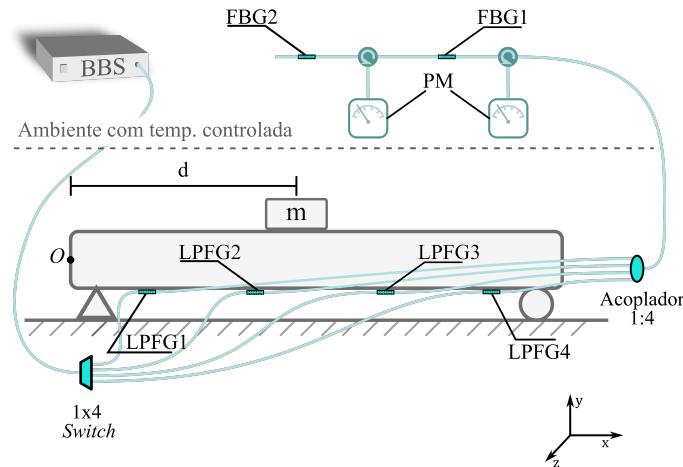
3.3 Aparato experimental

Um esquema do aparato experimental pode ser visto na Figura 15. Na montagem do aparato experimental utilizado para identificação de forças na viga foram utilizadas quatro LPFGs, inscritas em fibra monomodo padrão de telecomunicações (SMF-28) pela técnica do arco elétrico [95]. Todas elas com o mesmo período $\Lambda = 430 \mu\text{m}$ e comprimento $L = 12,9 \text{ mm}$. Para aumentar a reprodutibilidade na fabricação das LPFGs e, portanto, garantir uma resposta espectral semelhante, [95] sugere utilizar uma configuração da máquina de fusão que garanta uma baixa temperatura média, mas com grande gradiente.

As LPFGs foram iluminadas individualmente por uma única fonte luminosa de largo espectro (BBS) com o auxílio de um *switch* óptico de quatro canais. Para interrogar as LPFGs um par de FBGs foi utilizado conforme a abordagem descrita na Seção 2.3.2 desta dissertação, a fonte e o interrogador devem ser mantidos em um ambiente com temperatura controlada para manter a característica espectral destes tão constante quanto possível. As FBGs utilizadas possuíam comprimento de onda de Bragg iguais a 1545,6 nm e 1548,4 nm. Os espectros de transmissão das LPFGs e de reflexão das FBGs podem ser vistos no Gráfico 4. Note que, ao utilizar o *switch* óptico para selecionar cada LPFG individualmente, simplifica-se o sistema de interrogação, sendo necessário apenas um par de FBGs com a relação $\lambda_{res} \times R$ calibrada para cada sensor.

As LPFGs foram fixadas na parte inferior de uma viga de alumínio 6351-T6 com dimensões $605 \text{ mm} \times 64 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$. Tal viga foi fixada por suportes a 25 mm das extremidades. O posicionamento das LPFGs ao longo do eixo x foi 50 mm, 155 mm, 450 mm e 555 mm. Estas foram nomeadas de um a quatro conforme seu posicionamento

Figura 15 - Esquema do aparato experimental (PM: medidor de potência óptica).

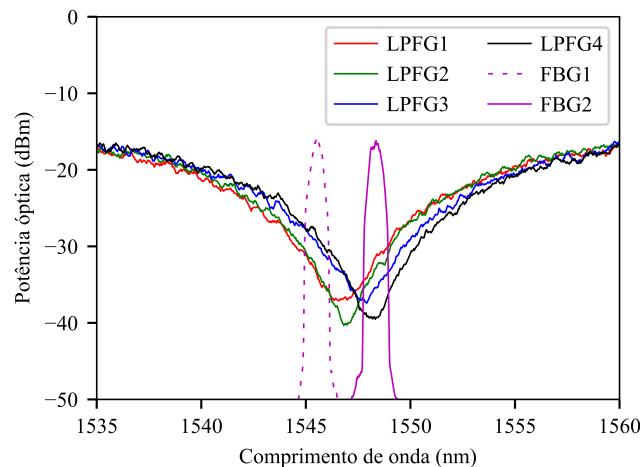


Fonte: Elaborada pelo autor.

ao longo do eixo x . Considera-se a origem do sistema de coordenadas o ponto médio (em y e z) da viga em sua extremidade esquerda, portanto todas as LPFGs foram posicionadas no zero do eixo z e -32 mm do eixo y .

Para exercer a força sobre a viga, uma massa conhecida foi colocada sobre esta, como ilustra a massa m na Figura 15. O valor de tal massa foi variado entre 100 e 200 kg. Assim como o valor massa, a posição também variou, no intervalo de 160 a 445 mm,

Gráfico 4 - Espectros de transmissão das LPFGs e reflexão das FBGs utilizadas neste trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

considerando o ponto médio da massa.

As LPFG foram submetidas à deformações de $0 \mu\epsilon$ a $150 \mu\epsilon$, em intervalos de $15 \mu\epsilon$, para calibração. Em cada caso os espectros foram mensurados com um OSA e o comprimento de onda ressonante extraído. Em seguida os dados foram ajustados para obtenção das curvas de calibração dos sensores de deformação. Utilizando um procedimento semelhante, o interrogador foi calibrado, porém ao invés de relacionar o comprimento de onda ressonante à deformação, este foi relacionado ao fator R , calculado por (2.24). Por fim a relação $\epsilon \times R$ foi calculada para cada sensor e o aparato utilizado para identificar as diferentes condições de carregamento seguindo a abordagem proposta.

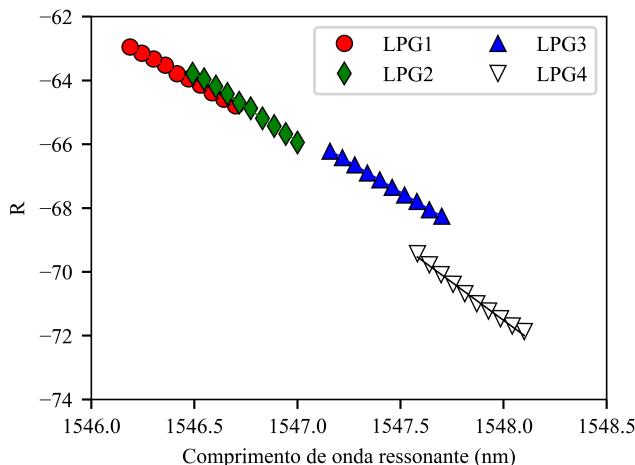
3.4 Resultados

Os resultados de calibração do aparato experimental utilizado estão sumarizados na Tabela 1 e nos gráficos 5, 7 e 6. A curva de calibração do interrogador, para cada LPFG, está mostrada no Gráfico 5, estimou-se uma ótima linearidade do interrogador, com $R^2 > 0,99$ para todas as LPFGs utilizadas.

Já o Gráfico 6 mostra as curvas de calibração de cada LPFG, ou seja, a relação entre seu comprimento de onda ressonante e a deformação aplicada a esta durante o procedimento calibração. A sensibilidade, coeficiente angular das retas ajustadas, e linearidade, coeficiente de determinação do ajuste linear das curvas do Gráfico 6, estão resumidos na Tabela 1.

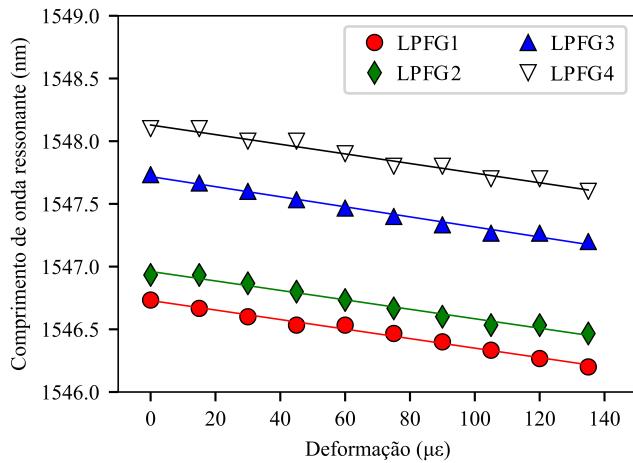
Por fim, o Gráfico 7 a mostra a curva que relaciona a deformação em cada LPFG e

Gráfico 5 - Curva de calibração do interrogador para cada LPFG.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 6 - Curva de calibração de cada sensor LPFG.

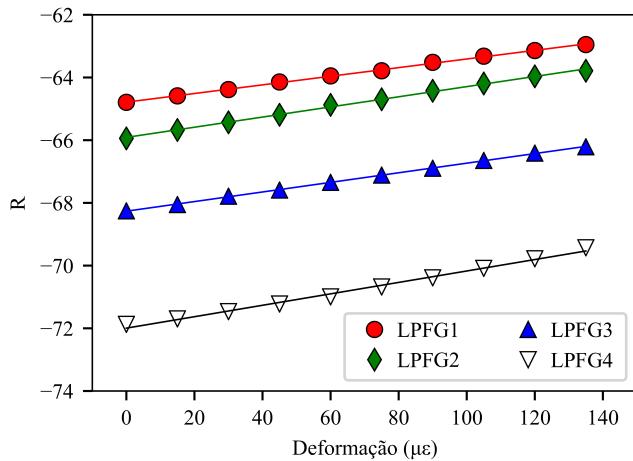


Fonte: Elaborado pelo autor.

o fator R observado no interrogador. As curvas mostradas neste gráfico foram utilizadas para mensurar a deformação em cada LPFG e estimar a condição de carregamento aplicada à viga.

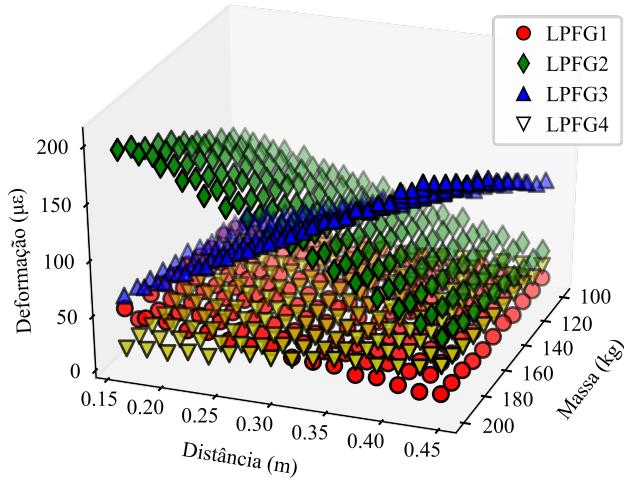
As deformações mensuradas pelas LPFGs em cada combinação de massa m e distância d (ver Figura 15) podem ser vistas no Gráfico 8. Pôde-se observar que a deformação aumenta com o aumento da massa em todos os casos e em todos os pontos em que ela foi mensurada, note que os pontos seguem um plano crescente em direção ao

Gráfico 7 - Relação entre deformação e fator R .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 8 - Relação entre massa, distância e deformação em cada sensor LPFG.



Fonte: Elaborado pelo autor.

aumento da massa. Já com relação à variação da distância, observou-se que a deformação é inversamente proporcional à esta nos pontos em que as LPFGs 1 e 2 foram instaladas, ao passo que ela é proporcional à distância nos pontos em que as LPFGs 3 e 4 foram instaladas. Note que o plano formado pelos pontos segue decrescente com relação à distância para as LPFGs 3 e 4, e decrescente para as LPFGs 1 e 2.

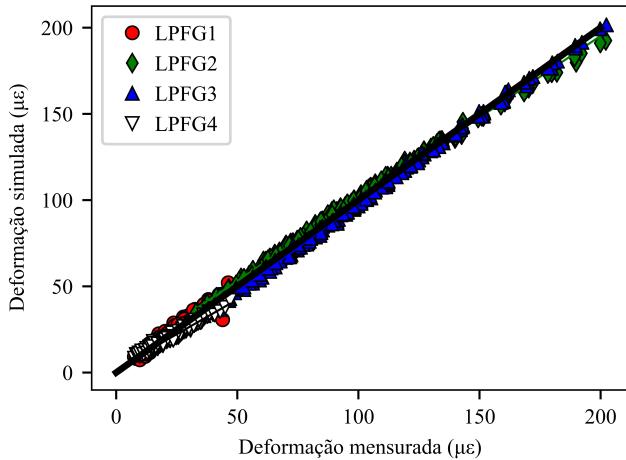
As condições de carregamento utilizadas foram simuladas pelo método dos elementos finitos com as condições de contorno configuradas de acordo com o aparato experimental demonstrado na Figura 15. Extraiu-se então a deformação pontual em cada coordenada em que as LPFGs foram instaladas e os dados obtidos nesta simulação foram comparados aos dados obtidos pelos sensores ópticos desenvolvidos. Para uma melhor comparação e visualização destes dados, eles foram dispostos em um gráfico com o eixo x representando

Tabela 1 – Sensibilidade das LPFGs à deformação.

	Sensibilidade ($\text{pm } \mu\epsilon^{-1}$)	Linearidade (R^2)
LPFG ₁	-3,798	0,9893
LPFG ₂	-3,771	0,9833
LPFG ₃	-4,013	0,9879
LPFG ₄	-3,838	0,9733

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Gráfico 9 - Comparaçāo entre a deformāo obtida pelas LPFGs e a obtida pela simulaçāo feita pelo mētodo dos elementos finitos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

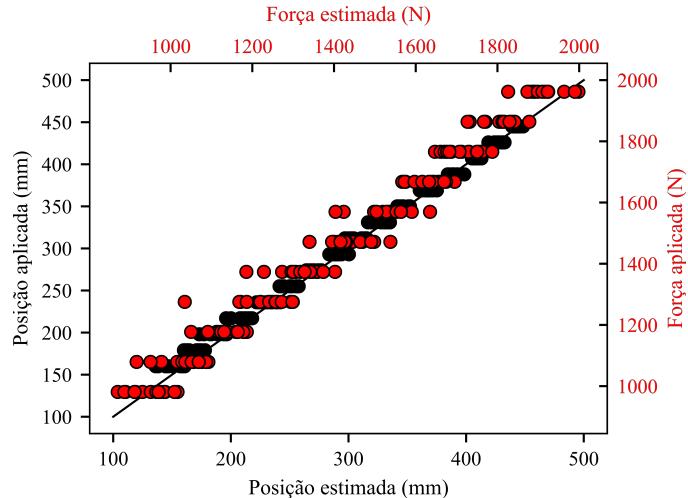
a deformāo mensurada e o eixo y representando a deformāo simulada via mētodo dos elementos finitos, note que uma reta unitária $y = x$ indica que as medições concordam com as simulações e, portanto, é desejada. Tal comparaçāo está ilustrada no Gráfico 9.

A partir das deformāes mensuradas para cada combinação de massa e distācia mostrada no Gráfico 8 estimou-se o diagrama de momento fletor para identificaçāo do carregamento aplicado à viga. A partir das identificações realizadas calculou-se a raiz do erro quadrático mēdio (RMSE) na estimaçāo da posicāo em 7,6 mm e o erro absoluto mēdio (MAE) em 5,5 mm. Valores estes que representam, respectivamente, 1,71% e 1,22% do valor māximo. Jā para a estimativa da intensidade da força, calculou-se o RMSE em 64 N e MAE em 49 N, que sāo equivalentes a 3,28% e 2,51% do fundo de escala.

Analogamente à comparaçāo entre deformāo observada e simulada apresentada no Gráfico 9, a comparaçāo força estimada \times força aplicada e posicāo estimada \times posicāo aplicada pode ser vista no Gráfico 10. Neste gráfico pôde-se observar uma ligeira subestimaçāo na posicāo quando $d < 200$ mm, pois os pontos se encontram relativamente concentrados à esquerda da reta $y = x$. Uma análise semelhante nos pontos que representam a força sugere uma subestimaçāo na intensidade desta em todos os casos, devido à tendēcia dos pontos de se deslocarem para a esquerda da mesma reta ao longo de todos os valores. De fato, o RMSE e MAE para estimaçāo da força apresentou valores relativos ao redor de duas vezes maior que àquele observado na estimaçāo da posicāo, podendo este ser atribuído a esta subestimaçāo, mēdia, da força.

Observe no Gráfico 9 que os pontos mensurados desviaram para valores maiores que

Gráfico 10 - Comparação entre o carregamento aplicado e carregamento estimado pelo método proposto.

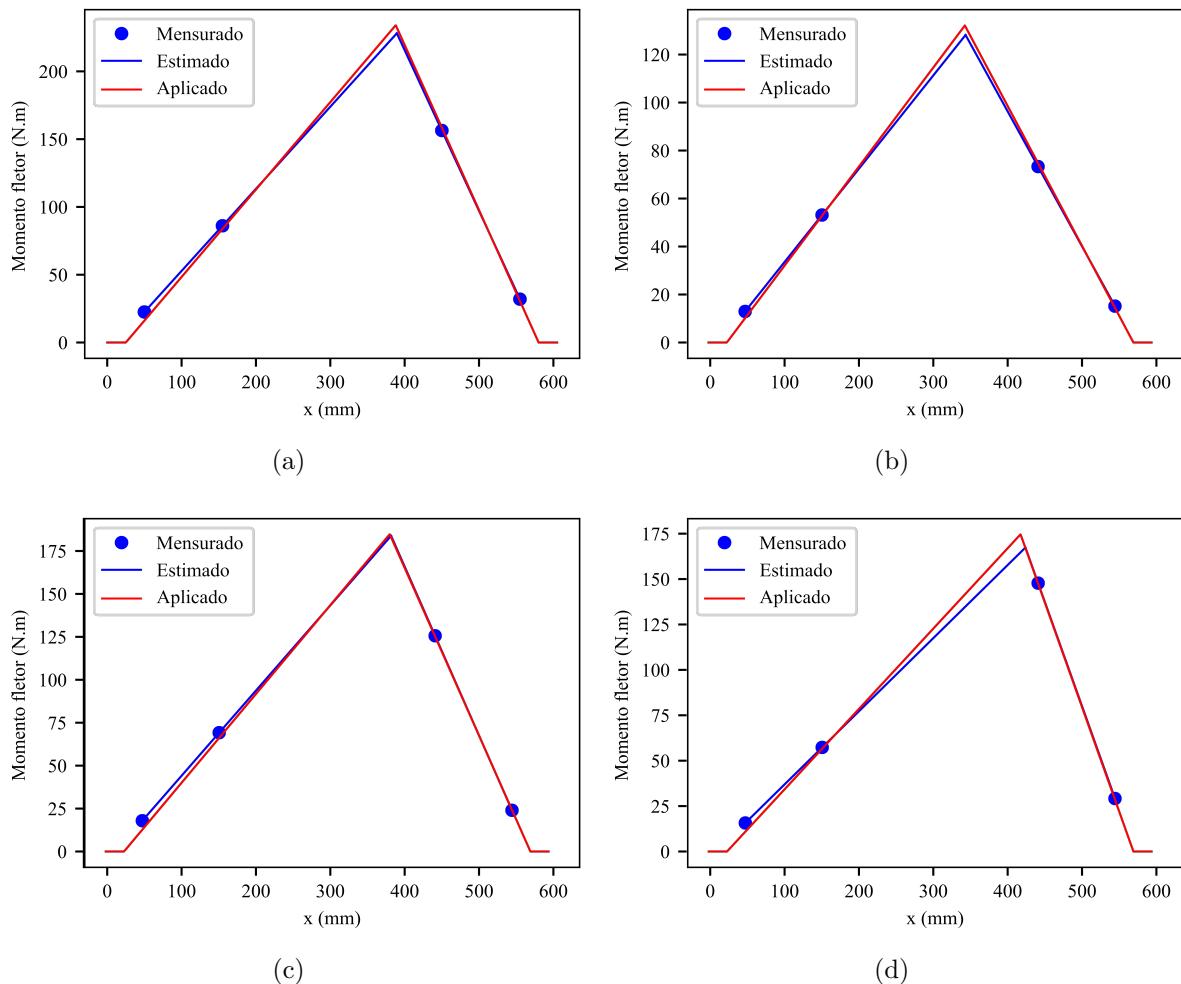


Fonte: Elaborado pelo autor.

os simulados quando a deformação é pequena, fato que pode ser notado pela concentração de pontos abaixo da reta $y = x$ para deformações pequenas. Ou seja, quando a deformação é pequena, os sensores LPFGs tenderam a superestimar tal deformação, tomando as simulações como base. Dessa forma, os sensores LPFG 1 e 4, sujeitos a menores deformações, tenderam a superestimar o momento fletor nos pontos em que estavam instalados na viga. Essa superestimação pode ter levado à subestimação da intensidade da força, uma vez que a superestimação do momento fletor pelas LPFGs 1 e 2 acarreta em um erro na angulação do momento fletor estimado e, consequentemente, um menor “pico” do momento fletor. Como o ponto de máximo do momento fletor é utilizado para estimativa da intensidade da força, caso este for subestimado, a força também será.

Para ilustrar estes resultados, o momento fletor mensurado pelas deformações e o diagrama estimado a partir destes pode ser visto no Gráfico 11 para algumas situações selecionadas aleatoriamente. Para cada um dos casos mostrados neste gráfico, os valores de intensidade e posição da força, tanto aplicados quanto estimados, podem ser vistos na Tabela 2. Observe que o momento fletor calculado pela deformação mensurada pela LPFG₁ foi maior que o real em todos os exemplos ilustrados e que isso acarretou em uma subestimação na intensidade da força.

Gráfico 11 - Comparação entre o carregamento aplicado e carregamento estimado pelo método proposto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 – Comparação entre as condições de carregamento mostradas no Gráfico 11.

	Posição (mm) Aplicada	Posição (mm) Estimada	Intensidade (N) Aplicada	Intensidade (N) Estimada
(a)	388.0	389.5	1863.9	1816.4
(b)	350.0	351.0	981.0	951.5
(c)	388.0	389.8	1471.5	1464.1
(d)	426.0	432.6	1569.6	1504.1

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

4 IDENTIFICAÇÃO BIDIRECIONAL DE FORÇAS

4.1 Contexto e aplicações

As LPFGs são dispositivos ópticos importantes para fabricação de instrumentos ópticos a fibra para mensuração de deformação [96–98]. Conforme demonstrado no Capítulo 3, tais instrumentos combinados podem ser utilizados para identificação de forças. E devido ao complexo espectro de transmissão das LPFGs, com múltiplos vales que apresentam sensibilidade singular para cada parâmetro externo [4], elas vêm sendo extensivamente utilizadas em esquemas de sensoriamento multi-parâmetro [39–41, 62, 97, 99].

Além da capacidade de sensoriamento multi-parâmetro, outra característica interessante das LPFGs é a capacidade de sensoriamento multidimensional de deformação, em específico, de um campo bidirecional de estresse ao longo de sua seção transversal. Neste aspecto, a análise da compressão lateral em uma LPFG é de suma importância. Alguns trabalhos anteriores investigaram as características espectrais de uma LPFG sob compressão lateral. Em [100, 101] os autores utilizaram LPFGs fabricadas por laser UV e observaram que o vale de atenuação destas se separou em duas sub-bandas de atenuação com o aumento de uma carga lateral. Em [102] os autores demonstraram os efeitos da rotação axial de LPFG induzida por laser CO₂ sob efeito de uma carga lateral. Isto indica que a sensibilidade da LPFG à esta carga depende periodicamente da rotação. Mais tarde confirmou-se que a sensibilidade da LPFG à carga lateral de fato depende da orientação da carga com relação ao eixo axial da fibra por uma relação senoidal [103].

Diante deste cenário, surge a possibilidade de fabricar sensores de força bidimensionais com uma única LPFG. Observe que a aplicação da carga lateral divide o vale de ressonância e que a separação depende da intensidade e direção da carga, possibilitando a decomposição da força aplicada em dois eixos a partir do ângulo de aplicação. Porém, ao melhor conhecimento do autor, não se encontra na literatura trabalhos focados na solução da não-linearidade imposta pela variação de sensibilidade à força causada por diferentes ângulos de aplicação. Ou seja, os esforços de pesquisa até esta data foram em demonstrar a sensibilidade de uma LPFG à carga lateral e a variação desta com relação ao ângulo de aplicação da força, mas não em obter o campo bidirecional de forças a partir do espectro de transmissão da LPFG.

O desenvolvimento de um esquema para identificação de forças bidimensionais com uma única LPFG pode ser utilizado de diferentes formas e, portanto, possui aplicabilidade em diversas áreas, desde usinagem [104] à medicina [105]. Atualmente arranjos de FBGs contendo diversos sensores são amplamente utilizados para monitoramento de materiais laminados [106, 107], uma área que pode ser beneficiada pelo uso de sensores bidimensionais de forças baseados em LPFGs, podendo assim reduzir o número de sensores incorporados

à estrutura.

Em robótica, a capacidade de percepção de forças é um tópico que chama a atenção desde os anos 1970 [108], e para tal FBGs têm sido utilizadas em robôs contínuos [55], atuadores cirúrgicos [54] e dedos robóticos [109, 110]. Necessitando de um grande número de FBGs para percepção multidimensional [109–111]. Assim como no monitoramento de saúde estrutural de materiais laminados, a incorporação de um sensor bidirecional com uma única LPFG também tem o potencial de reduzir significativamente o número de dispositivos ópticos utilizados na mensuração de força em robótica.

4.2 Princípio de funcionamento

Como brevemente discutido na seção anterior, o vale de transmissão de uma LPFG tende a se separar em dois quando esta é sujeita a uma carga lateral, conforme observado por [100, 101]. Além do mais, a intensidade dessa separação é uma função do ângulo de aplicação desta carga [102, 103]. Isto ocorre pelo surgimento de uma birrefringência na fibra, causada pela força. Ao aplicar uma força transversal à fibra óptica, o estresse na seção transversal da fibra não é homogêneo. Desta forma, a variação do índice de refração nesta seção também não o é, induzindo birrefringência à fibra.

Geralmente as LPFGs possuem birrefringência causada pela fabricação da grade de difração, especialmente em LPFGs fabricadas pelo método do arco elétrico [103, 112, 113]. Portanto, as características de transmissão dessas LPFGs como comprimento de onda ressonante e intensidade de atenuação, por exemplo, dependem do estado de polarização (SOP, do inglês *state of polarization*) da luz incidente à LPFG. Para uma LPFG birrefringente, pode-se assumir dois principais eixos de polarização da luz, o eixo rápido e lento, com índice de refração iguais a n_f e n_s , e constante de propagação β_f e β_s , respectivamente. Observe que β_f e β_s exercem grande influência no acoplamento de modos (veja a equação (2.15)), influenciando portanto na característica de transmissão das LPFGs, que passa a apresentar um comprimento de onda ressonante para cada SOP.

Adicionalmente, a compressão lateral induz uma nova birrefringência à fibra óptica, devido ao efeito fotoelástico [114]. A variação no índice de refração causada por este efeito é relacionada aos estresses calculados a partir das equações (2.11) a (2.14). Tal variação, ao longo dos eixos x e y da fibra é:

$$\Delta n_x = -\frac{n_{eff}^3}{2E} [(p_{11} - 2\nu p_{12}) \sigma_x + ((1 - \nu) p_{12} - \nu p_{11}) (\sigma_y + \sigma_z)] \quad (4.1)$$

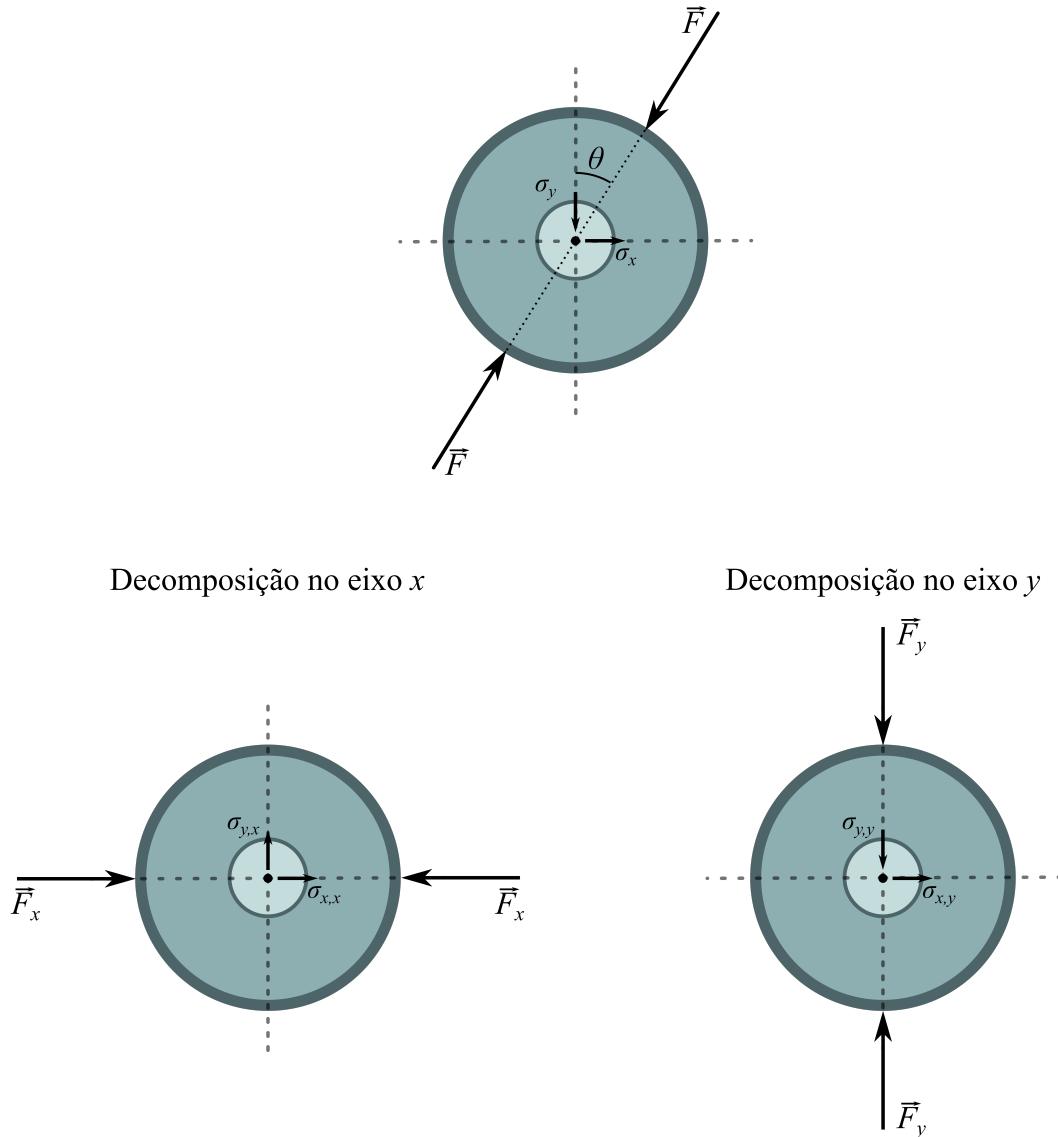
$$\Delta n_y = -\frac{n_{eff}^3}{2E} [(p_{11} - 2\nu p_{12}) \sigma_y + ((1 - \nu) p_{12} - \nu p_{11}) (\sigma_x + \sigma_z)] \quad (4.2)$$

onde E , ν e p_{ij} são, respectivamente, o módulo de Young, coeficiente de Poisson e componentes do tensor fotoelástico dos materiais da fibra óptica.

Na Figura 16 tem-se uma ilustração de uma força \vec{F} aplicada transversalmente a uma LPFG com distância angular de θ a partir do eixo y da fibra. Nela estão ilustrados os estresses σ_x e σ_y devido a esta força, bem como a decomposição desta nos dois eixos da fibra, com as contribuições individuais de cada componente aos estresses.

Apesar de terem demonstrado a mudança de sensibilidade da LPFG à carga lateral em função do ângulo θ , [102, 103] não propuseram um esquema de identificação para a intensidade e ângulo, ou do campo de forças \vec{F}_x e \vec{F}_y . Uma abordagem para se obter tal campo de forças a partir do espectro de transmissão da LPFG é obter um modelo de regressão que mapeia os comprimentos de onda ressonante nos dois eixos (f e s) de

Figura 16 - Esquema da atuação de uma força lateral a uma fibra óptica e a decomposição dos estresses ao longo dos eixos x e y da fibra.



Fonte: Elaborada pelo autor.

polarização à intensidade da força e ao ângulo de aplicação desta.

Neste trabalho, propõe-se o uso de redes neurais artificiais para realizar esse mapeamento, devido à característica de aproximação universal que elas possuem [64–66]. Dessa forma, a RNA deve ser capaz de discriminar a intensidade e ângulo de aplicação da força após seu treinamento. Dois modelos foram projetados, treinados e avaliados. Um para identificação individual da força, MLP_F , e outro para identificação individual do ângulo, MLP_θ .

Um banco de dados contendo diversos cenários de carregamento lateral de uma LPFG foi utilizado, com 60% dos dados para treino, 20% para validação e os 20% restante para teste. Durante o processo de projeto destes modelos apenas os dados de treinamento e validação foram utilizados e diversas topologias foram testadas. Para avaliação final, a topologia melhor avaliada nos dados de validação foi escolhida e em seguida foram estimados o erro quadrático médio, erro médio absoluto e coeficiente de determinação utilizando os dados de teste para simular o uso do esquema de identificação de forças em dados desconhecidos.

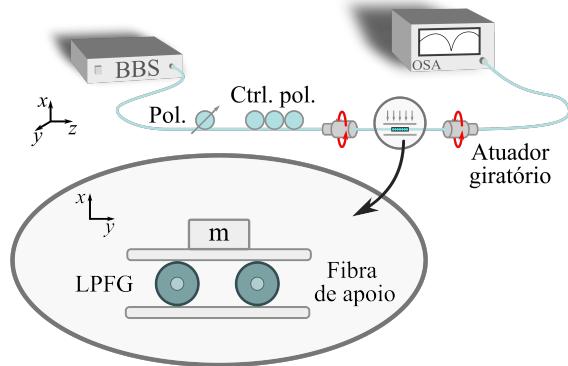
4.3 Aparato experimental

Uma LPFG com período $\Lambda = 520 \mu\text{m}$ foi inscrita em fibra monomodo padrão de telecomunicações (SMF-28) pela técnica do arco elétrico [95]. Tal LPFG foi comprimida por duas placas retificadas, estabilizadas por uma seção de fibra (fibra de apoio) paralela à LPFG, com a intensidade de compressão controlada por uma massa adicionada sobre uma das placas. O ângulo de aplicação da carga pode ser controlado por meio de atuadores giratórios presos à fibra óptica. Um esquema do aparato experimental proposto para coleta dos dados pode ser visto na Figura 17.

A LPFG foi submetida a 13 diferentes cargas (incluindo o zero) com máximo equivalente a uma massa de 2 kg (total, incluindo a massa da placa superior), igualmente espaçadas. Desta forma, a força máxima aplicada à LPFG é $\approx 10 \text{ N}$. A LPFG foi rotacionada também em 13 passos, por carga, entre $[0^\circ, 360^\circ]$. Observe que, em termos práticos, o ângulo θ mostrado na Figura 16 é limitado pela própria estrutura em que a LPFG é fixada. E mais, note que o intervalo de $[0^\circ, 180^\circ]$ é equivalente ao intervalo de $[180^\circ, 360^\circ]$, devido à força de reação da superfície em que a LPFG está apoiada. Portanto, neste trabalho avaliou-se a resposta da LPFG à carga lateral no intervalo de $[0^\circ, 360^\circ]$ para demonstração desta, mas apenas os dados no intervalo de $[0^\circ, 180^\circ]$ foram utilizados no desenvolvimento das RNAs que realizam a identificação das forças.

Para cada combinação de força e ângulo aplicada à LPFG, a polarização foi ajustada para dois estados de polarização: SOP_1 e SOP_2 , relacionados aos valores de máximo e mínimo comprimento de onda ressonante da LPFG birrefringente, respectivamente. Para cada SOP , o espectro foi coletado pelo OSA e posteriormente processado para determinação

Figura 17 - Aparato experimental utilizado para caracterização da LPFG sob carregamento lateral (Pol.: polarizador, Ctrl. pol.: controlador de polarização).



Fonte: Elaborada pelo autor.

do comprimento de onda ressonante. O comprimento de onda ressonante em cada SOP foi então utilizado como entrada das RNAs MLP_F e MLP_θ .

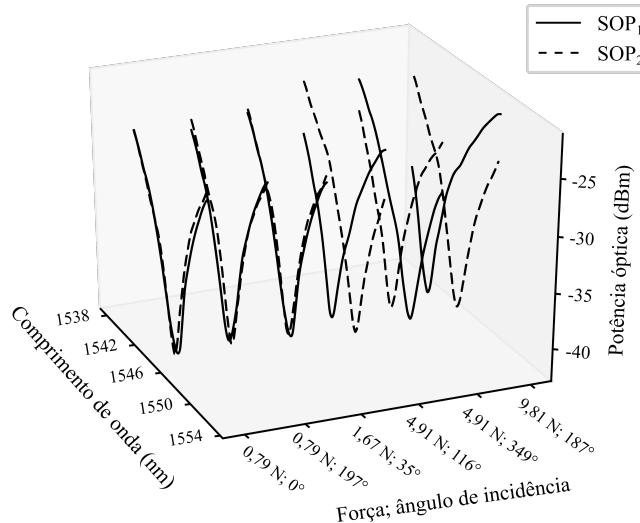
4.4 Resultados

Alguns dos espectros coletados durante a caracterização do sensor podem ser vistos no Gráfico 12. A característica dos comprimentos de onda ressonantes com relação à condição de carga aplicada à LPFG, por outro lado, pode ser vista no Gráfico 13. Ao observar o Gráfico 13(a) nota-se o comportamento senoidal do comprimento de onda ressonante com relação ao ângulo de aplicação da força, com amplitude que depende da intensidade da força. Por isso, ao plotar o ângulo da força com relação ao comprimento de onda ressonante em cada estado de polarização obtém-se as hélices vistas em tal gráfico. Este mesmo gráfico é mostrado de uma vista superior no Gráfico 13(b), onde pode-se perceber claramente a diferença de fase entre as senoides que representam o ângulo de aplicação em função do comprimento de onda ressonante em SOP_1 e SOP_2 , pela angulação e diferença nos raios das elipses projetadas no plano xy . Cada elipse mostrada neste gráfico representa uma intensidade de força, com os ângulos rotacionando no sentido anti-horário ao redor da elipse.

Note que a distância entre cada elipse depende do quanto distante o ponto observado está do seu centro, quanto mais alinhado à direção do raio maior, maior a distância entre elas. Ou seja, a sensibilidade da LPFG à compressão lateral, de fato, é uma função do ângulo de aplicação da força. Tal função está ilustrada no Gráfico 14 e pode-se notar que esta também é senoidal com o ângulo de incidência da força.

Apesar dessa não-linearidade, representada pela variação de sensibilidade com o

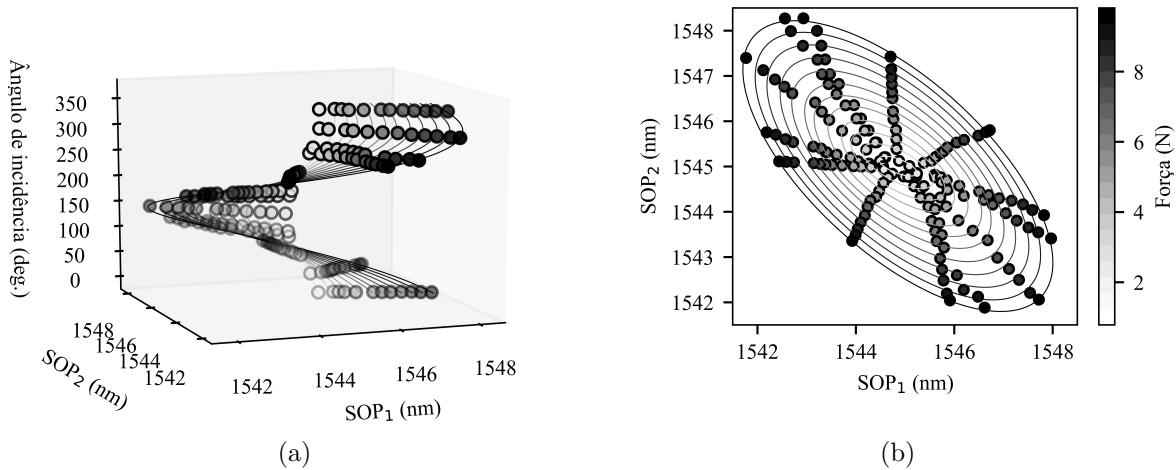
Gráfico 12 - Espectro da LPFG em alguns dos cenários testados durante a caracterização desta.



Fonte: Elaborado pelo autor.

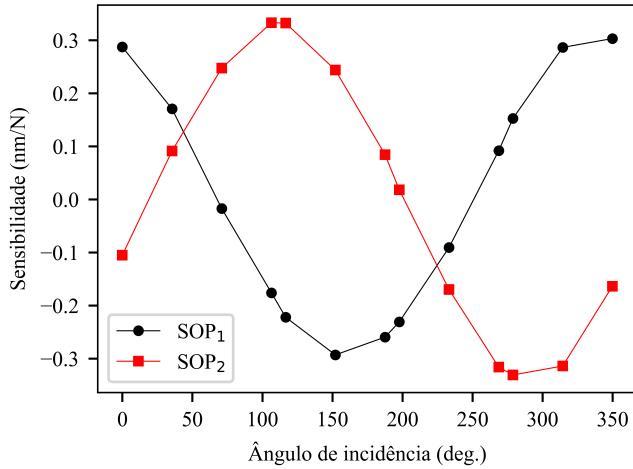
ângulo, cada par de comprimento de onda ressonante ($\lambda_{res,SOP_1}, \lambda_{res,SOP_2}$) representa uma única condição de carregamento, isto é, um único par (F, θ) . De fato, observe que as elipses projetadas no plano xy não se cruzam e, portanto, pode-se realizar o mapeamento

Gráfico 13 - Comprimento de onda ressonante, em cada SOP, como uma função da carga aplicada e seu ângulo de incidência. (a) Ângulo de incidência como uma função dos comprimentos de onda ressonante e (b) projeção no plano xy (ângulo cresce no sentido anti-horário).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 14 - Sensibilidade da LPFG à força lateral como uma função do ângulo de incidência desta força.



Fonte: Elaborado pelo autor.

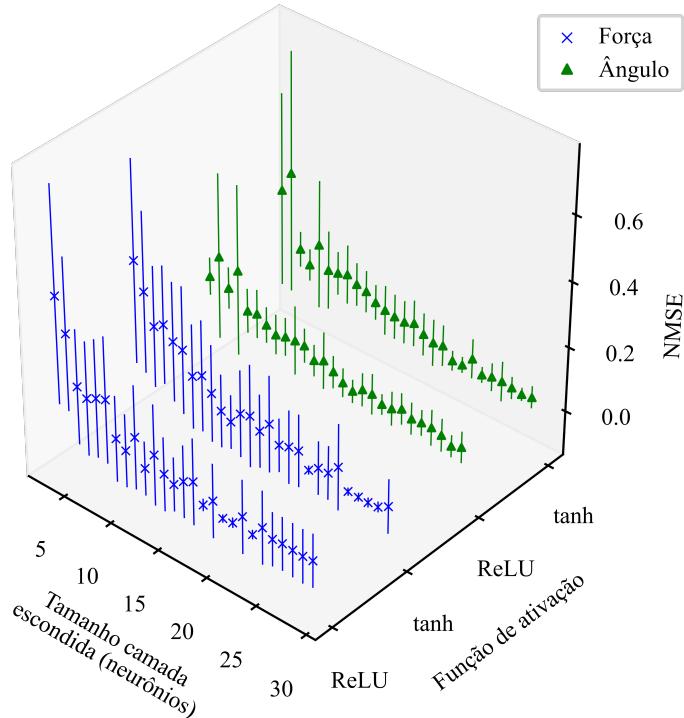
$$(\lambda_{res,SOP_1}, \lambda_{res,SOP_2}) \rightarrow (F, \theta) \text{ utilizando as RNAs propostas neste trabalho.}$$

Conforme discutido anteriormente, o banco de dados foi restrinrido para $\theta \in [0^\circ, 180^\circ]$, depois separado em treino, teste e validação e então diversas topologias de MLP foram testadas. As topologias testadas compõe o subespaço de hiperparâmetros dado por $H \in \{3, 4, \dots, 28, 29\}$ neurônios na camada escondida e função de ativação $f(\cdot) \in \{\tanh(\cdot), \text{ReLU}(\cdot)\}$. Cada topologia foi treinada vinte vezes com pesos iniciados aleatoriamente, o valor médio e a variância do erro ao longo destes vinte testes foram considerados para a escolha do melhor modelo de regressão para a intensidade e direção da força.

O Gráfico 15 mostra os resultados da seleção do modelo, isto é, da busca pelo melhor modelo dentro do subespaço de hiperparâmetros testado. Busca esta realizada com os modelos treinados com os dados de treino e avaliados nos dados de validação. O gráfico tridimensional relaciona o número de neurônios da camada escondida, a função de ativação destes neurônios ao erro quadrático médio normalizado (NMSE). Este NMSE é o erro médio quadrático de cada modelo dividido pelo maior MSE observado, essa métrica foi abordada para que em um mesmo gráfico os resultados de força e ângulo pudessem ser mostrados, já que após a normalização ambos se tornam adimensionais e têm mesma ordem de grandeza. Note que esta métrica pode ser interpretada como o quanto cada modelo erra em relação ao pior caso avaliado.

Este gráfico foi analisado em busca de uma combinação de parâmetros, tamanho da camada escondida e função de ativação, que apresentasse um baixo NMSE médio

Gráfico 15 - Resultados da seleção do modelo.



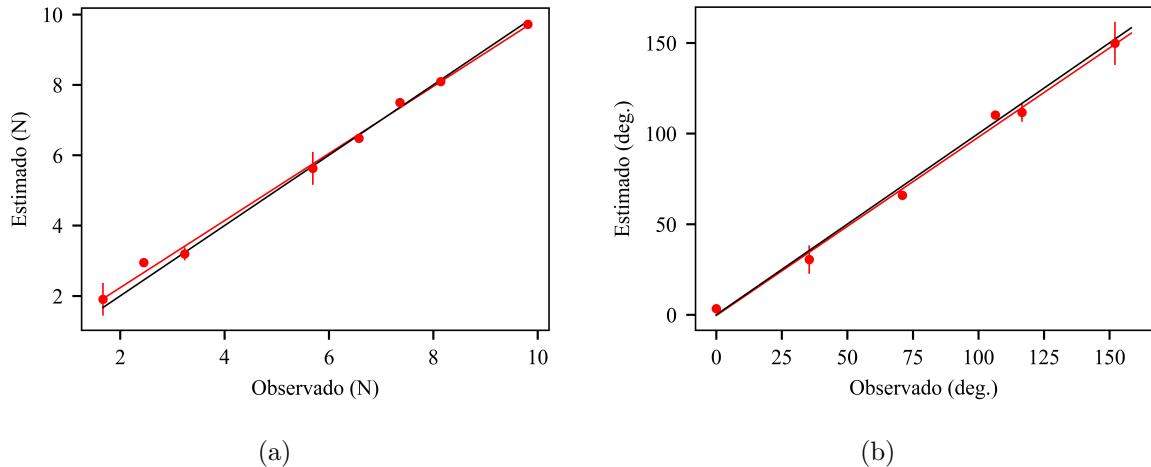
Fonte: Elaborado pelo autor.

ao longo dos vinte treinamentos realizados e também uma baixa variância do NMSE nestes treinamentos. Concluiu-se que a melhor configuração, dentre as testadas, para o modelo MLP_F é composta por $H = 18$ neurônios na camada escondida, sendo que estes possuem função de ativação unidade linear retificada (ReLU). Já para o modelo MLP_θ , concluiu-se que a melhor configuração testada apresenta $H = 15$ neurônios na camada escondida e função de ativação também ReLU. Dentre os vinte modelos treinados com estas configurações, foram escolhidos àqueles com menor MSE de validação, obtendo $2,343 \cdot 10^{-2} N^2$ e $19,27 \text{ deg}^2$ para os modelos MLP_F e MLP_θ escolhidos, respectivamente.

Estes modelos escolhidos foram então avaliados nos dados de teste, simulando a implementação da proposta em uma situação real e com dados desconhecidos. Os valores observados, reais, e estimados pelas RNAs estão comparados nos gráficos 16(a) e 16(b). Neles, o eixo x representa as observações, ou seja, a condição de carga aplicada à LPFG, enquanto o eixo y representa as estimativas, ou seja, a saída das RNAs. Observe que uma mesma intensidade de força pode ter sido aplicada à diferentes ângulos e, analogamente, um mesmo ângulo de aplicação pode ter sido utilizado para diferentes intensidades. As possíveis variações nos valores estimados da força quando há vários ângulos e nos valores do ângulo quando há várias forças estão representadas por barras de erro nos gráficos 16(a) e 16(b), respectivamente.

Observou-se que os valores estimados e observados para ambos modelos seguem

Gráfico 16 - Comparação entre os valores observados e estimados pelas RNAs nos dados de teste. (a) MLP_F : estimativa da intensidade da força e (b) MLP_θ : estimativa do ângulo de aplicação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Métricas de avaliação das RNAs propostas para identificação da força (MLP_F) e do ângulo (MLP_θ).

	MLP_F	MLP_θ
MAE	0,21493 N	5,98 deg
MSE	0,07632 N ²	61,4 deg ²
R ²	0,9893	0,9758

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

aproximadamente uma reta $y = x$, indicando bom ajuste dos dados estimado à realidade. De fato, estimou-se no banco de dados de teste um coeficiente de determinação $R^2 = 0,9893$ para estimativa da força aplicada à LPFG e $R^2 = 0,9758$ para estimativa do ângulo de aplicação desta. Esta métrica juntamente com o erro absoluto médio (MAE) e erro quadrático médio (MSE) estão resumidas na Tabela 3. Note que, em média, o erro absoluto representa 2,19% da maior força aplicada e 3,93% do maior ângulo.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram desenvolvidos dois métodos para identificação de forças utilizando sensores a fibra óptica baseados em grades de período longo. Cada método apresenta um cenário diferente e, consequentemente, uma abordagem também diferente. Estes métodos foram contextualizados e suas possíveis aplicações expostas ao leitor por meio de uma análise bibliográfica do atual estado da arte em monitoramento de estruturas e sensores ópticos a fibra.

No Capítulo 3 a identificação de forças acontece ao longo da estrutura sob monitoramento e utilizou-se o modelo matemático do momento fletor ao longo desta para estimar a condição de carregamento aplicada à ela. Já no Capítulo 4, demonstrou-se a identificação de uma força pontual (considerando que o diâmetro da fibra é muito menor que o tamanho da estrutura sob monitoração) decomposta em duas dimensões, sendo portanto, capaz de determinar a intensidade e direção da força. Ao contrário da abordagem demonstrada no Capítulo 3, o esquema de identificação demonstrado no Capítulo 4, não utilizou um modelo matemático da estrutura e sim uma rede neural artificial para aproximar tal modelo, com base nos dados coletados.

Ambas abordagens se mostraram promissoras, os resultados apresentados no Capítulo 3 demonstraram ser possível identificar uma força aplicada a uma viga biapoiada utilizando quatro sensores LPFGs com erro absoluto relativo de, em média, 1,22% na estimativa da intensidade e 2,51% na estimativa da posição. Já os resultados apresentados no Capítulo 4 apontaram para a possibilidade de identificar a intensidade e direção da força a um erro absoluto relativo de, em média, 2,19% e 3,93%, respectivamente.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Os esquemas de identificação de forças apresentados neste trabalho abrem um leque de possibilidades para o emprego de sensores ópticos LPFG em trabalhos futuros. O esquema de identificação do carregamento em vigas biapoiadas apresenta alta aplicabilidade e pode ser estendido para diferentes carregamentos, cargas móveis e sistemas dinâmicos. Podendo transformar o esquema em um sistema para monitoramento de pontes, rodovias e ferrovias, por exemplo. Já o esquema de identificação bidirecional de forças deve ser avaliado em uma estrutura real, são sugestões: robôs, atuadores, sistemas de interface homem-máquina e nós estruturais, por exemplo.

Melhorias no esquema de identificação do carregamento em vigas biapoiadas podem ser feitas com o emprego de mais sensores LPFG para melhorar a estimativa do momento fletor da barra e, consequentemente, melhorar a identificação da força. Com um maior número de deformação pontual mensurados, pode-se então empregar o método dos mínimos quadrados para traçar a curva do momento fletor com maior robustez a ruído e erros

de cada sensor individualmente. Sugere-se também, para um trabalho futuro, explorar os demais vales das LPFGs para realizar compensação de temperatura e/ou índice de refração.

Melhorias no esquema de identificação bidirecional de forças podem ser feitas com relação ao aparato experimental. A utilização de um *polarization beam spliter* ou outro esquema para melhor gerenciamento da polarização durante as medições é bem vindo. A rotação do sensor por meio da translação da placa de apoio superior (suporte da massa) também é um possível aprimoramento para a coleta de dados e calibração do comportamento da LPFG sob rotação. Além do mais, é necessário o estudo da proposta com uma LPFG encapsulada e/ou embutida em uma estrutura.

REFERÊNCIAS

- 1 LÓPEZ-HIGUERA, J. Introduction to fibre optic sensing technology. In: LÓPEZ-HIGUERA, J. (Ed.) *Handbook of Optical Fibre Technology*. New York: Wiley, 2004. Cap. 1, p. 1–22.
- 2 RAJAN, G.; INIEWSKI, K. (Eds.). *Optical Fiber Sensors*. CRC Press, dec 2017.
- 3 HABEL, W. R.; SCHUKAR, V. G.; KUSCHE, N. Fibre-optic strain sensors are making the leap from lab to industrial use—reliability and validation as a precondition for standards. *Measurement Science and Technology*, v. 24, n. 9, p. 094006, jul 2013.
- 4 SHU, X.; ZHANG, L.; BENNION, I. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings. *Journal of Lightwave Technology*, v. 20, n. 2, p. 255–266, 2002.
- 5 NG, M. N.; CHEN, Z.; CHIANG, K. S. Temperature compensation of long-period fiber grating for refractive-index sensing with bending effect. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002.
- 6 TRONO, C.; BALDINI, F.; BRENCI, M.; CHIAVAIOLI, F.; MUGNAINI, M. Flow cell for strain- and temperature-compensated refractive index measurements by means of cascaded optical fibre long period and Bragg gratings. *Measurement Science and Technology*, 2011.
- 7 HIBBEKER, R. C. *Engineering mechanics: Statics*. 12. ed. Prentice Hall, 2009.
- 8 HIBBEKER, R. C. *Mechanics of materials*. 8th. ed. Pearson Prentice Hall, 2010.
- 9 GIANINO, P. D.; BENDOW, B. Calculations of stress-induced changes in the transverse refractive-index profile of optical fibers. *Appl. Opt.*, v. 20, n. 3, p. 430–434, Feb 1981.
- 10 KEISER, G. Optical fiber communications. *Wiley encyclopedia of telecommunications*, 2003.
- 11 GLOGE, D. Weakly guiding fibers. *Applied optics*, v. 10, n. 10, p. 2252–2258, 1971.
- 12 SNITZER, E. Cylindrical dielectric waveguide modes. *JOSA*, v. 51, n. 5, p. 491–498, 1961.
- 13 SNYDER, A. W. Asymptotic expressions for eigenfunctions and eigenvalues of a dielectric or optical waveguide. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, v. 17, n. 12, p. 1130–1138, 1969.
- 14 MARCUSE, D. Theory of dielectric optical waveguides. *New York, Academic Press, Inc., 1974. 267 p.*, 1974.
- 15 LIFANTE, G. *Integrated photonics: fundamentals*. Wiley Online Library, 2003.
- 16 HAUS, H.; HUANG, W. Coupled-mode theory. *Proceedings of the IEEE*, v. 79, n. 10, p. 1505–1518, 1991.

- 17 YIN, G.; WANG, Y.; LIAO, C.; ZHOU, J.; ZHONG, X.; WANG, G.; SUN, B.; HE, J. Long period fiber gratings inscribed by periodically tapering a fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 26, p. 698–701, 2014.
- 18 WONKO, R.; MARÉ, P.; JAROSZEWICZ, L. R. Fabrication of tapered long period fiber gratings for sensors application by filament heating. In: . Editors DOROSZ, J.; ROMANIUK, R. S. SPIE, c2017. v. 10325. p. 46 – 50.
- 19 NAVRUZ, I.; ARI, F.; BILSEL, M.; AL-MASHHADANI, Z. A. Enhancing refractive index sensitivity using micro-tapered long-period fiber grating inscribed in biconical tapered fiber. *Optical Fiber Technology*, v. 45, p. 201–207, 2018.
- 20 ERDOGAN, T. Fiber grating spectra. *Journal of Lightwave Technology*, v. 15, n. 8, p. 1277–1294, 1997.
- 21 MOREY, W. W.; MELTZ, G.; GLENN, W. H. Fiber Optic Bragg Grating Sensors. In: . Editors DEPAULA, R. P.; UDD, E. SPIE, c1990. v. 1169. p. 98 – 107.
- 22 RAO, Y.-J. In-fibre bragg grating sensors. *Measurement science and technology*, v. 8, n. 4, p. 355, 1997.
- 23 OTHONOS, A.; KALLI, K. *Fiber bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing*. Artech house Boston, 1999. v. 99.
- 24 MÉNDEZ, A.; MORSE, T. F. *Specialty optical fibers handbook*. Elsevier, 2011.
- 25 NG, M. N.; CHIANG, K. S. Thermal effects on the transmission spectra of long-period fiber gratings. *Optics Communications*, Amsterdam, v. 208, n. 4-6, p. 321–327, 2002.
- 26 YIN, S.; CHUNG, K.-W.; ZHU, X. A highly sensitive long period grating based tunable filter using a unique double-cladding layer structure. *Optics communications*, v. 188, n. 5-6, p. 301–305, 2001.
- 27 LIN, C.-Y.; WANG, L. A.; CHERN, G.-W. Corrugated long-period fiber gratings as strain, torsion, and bending sensors. *Journal of Lightwave Technology*, v. 19, n. 8, p. 1159, 2001.
- 28 WANG, Y.-P.; XIAO, L.; WANG, D. N.; JIN, W. Highly sensitive long-period fiber-grating strain sensor with low temperature sensitivity. *Optics Letters*, 2006.
- 29 TSUTSUMI, Y.; HASE, T.; OHASHI, M.; MIYOSHI, Y.; KUBOTA, H. Low-cost temperature sensors using mechanical long period fiber grating in 850 nm-wavelength range. In: . c2017. p. 1–2.
- 30 DELGADO, F. D. S. Redes de período longo em fibras ópticas aplicadas ao sensoriamento de corrente elétrica em vant? s. 2017.
- 31 PATRICK, H.; KERSEY, A.; BUCHOLTZ, F. Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction. *Journal of Lightwave Technology*, v. 16, n. 9, p. 1606–1612, 1998.
- 32 KIM, D. W.; ZHANG, Y.; COOPER, K. L.; WANG, A. In-fiber reflection mode interferometer based on a long-period grating for external refractive-index measurement. *Applied optics*, v. 44, n. 26, p. 5368–5373, 2005.

- 33 GENG, T.; ZHANG, S.; PENG, F.; YANG, W.; SUN, C.; CHEN, X.; ZHOU, Y.; HU, Q.; YUAN, L. A temperature-insensitive refractive index sensor based on no-core fiber embedded long period grating. *Journal of Lightwave Technology*, v. 35, n. 24, p. 5391–5396, 2017.
- 34 FU, C.; ZHONG, X.; LIAO, C.; WANG, Y.; WANG, Y.; TANG, J.; LIU, S.; WANG, Q. Thin-core-fiber-based long-period fiber grating for high-sensitivity refractive index measurement. *IEEE Photonics Journal*, v. 7, n. 6, p. 1–8, 2015.
- 35 SINGH, M.; RAGHUVANSHI, S. K.; PRAKASH, O. Ultra-sensitive fiber optic gas sensor using graphene oxide coated long period gratings. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 31, n. 17, p. 1473–1476, 2019.
- 36 BALIYAN, A.; SITAL, S.; TIWARI, U.; GUPTA, R.; SHARMA, E. K. Long period fiber grating based sensor for the detection of triacylglycerides. *Biosensors and Bioelectronics*, v. 79, p. 693–700, 2016.
- 37 JANCZUK-RICHTER, M.; DOMINIKA, M.; ROŹNIECKA, E.; KOBA, M.; MIKULIC, P.; BOCK, W. J.; ŁOŚ, M.; ŚMIETANA, M.; NIEDZIŁKA-JÖNSSON, J. Long-period fiber grating sensor for detection of viruses. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 250, p. 32–38, 2017.
- 38 XU, B.; HUANG, J.; DING, L.; CAI, J. Graphene oxide-functionalized long period fiber grating for ultrafast label-free glucose biosensor. *Materials Science and Engineering: C*, v. 107, p. 110329, 2020.
- 39 FRAZÃO, O.; FERREIRA, L.; ARAÚJO, F.; SANTOS, J. Applications of fiber optic grating technology to multi-parameter measurement. *Fiber and integrated optics*, v. 24, n. 3-4, p. 227–244, 2005.
- 40 DELGADO, F. S.; DOS SANTOS, A. B. Multi-measurement scheme for a fiber-optic sensor based on a single long-period grating. *Journal of Modern Optics*, v. 64, n. 21, p. 2428–2432, 2017.
- 41 HRROMADKA, J.; KORPOSH, S.; PARTRIDGE, M. C.; JAMES, S. W.; DAVIS, F.; CRUMP, D.; TATAM, R. P. Multi-parameter measurements using optical fibre long period gratings for indoor air quality monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 244, p. 217–225, 2017.
- 42 SANTOS, J. L.; FERREIRA, L. A. Fiber bragg grating interrogation techniques. In: LÓPEZ-HIGUERA, J. (Ed.) *Handbook of Optical Fibre Technology*. New York: Wiley, 2004. Cap. 18, p. 379–402.
- 43 DOS SANTOS, P.; JORGE, P.; DE ALMEIDA, J. M.; COELHO, L. Low-cost interrogation system for long-period fiber gratings applied to remote sensing. *Sensors*, v. 19, n. 7, 2019.
- 44 NETO, P. X.; CARNEIRO, A. C.; LÓPEZ-BARBERO, A. P.; SILVA, V. N. H.; RIBEIRO, R. M.; DOS SANTOS, A. B. A mathematical model for the interrogation of lpg fiber optical sensors based on electrical harmonic analysis. *IEEE Sensors Journal*, v. 20, n. 8, p. 4237–4244, 2020.

- 45 JUCÁ, M. A.; HADDAD, D. B.; DOS SANTOS, A. B. Interrogation system for optical sensor using filter bank and artificial neural network. *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 62, n. 12, p. 4015–4020, 2020.
- 46 BARINO, F. O.; D. SANTOS, A. B. LPG interrogator based on fbg array and artificial neural network. *IEEE Sensors Journal*, v. 20, n. 23, p. 14187–14194, 2020.
- 47 WEBB, D. Fiber bragg grating sensors. In: SANTOS, J. L.; FARAHÍ, F. (Eds.) *Handbook of Optical Sensors*. Boca Raton: CRC Press, 2014. Cap. 17, p. 503–532.
- 48 LEE, B. C.; JUNG, E.-J.; KIM, C.-S.; JEON, M. Y. Dynamic and static strain fiber bragg grating sensor interrogation with a $1.3 \mu\text{m}$ fourier domain mode-locked wavelength-swept laser. *Measurement Science and Technology*, v. 21, n. 9, p. 094008, 2010.
- 49 PARK, J.; KWON, Y. S.; KO, M. O.; JEON, M. Y. Dynamic fiber bragg grating strain sensor interrogation based on resonance fourier domain mode-locked fiber laser. In: . c2016. p. 291–292.
- 50 ALLSOP, T.; EARTHROWL, T.; REEVES, R.; WEBB, D.; BENNION, I. The interrogation and multiplexing of long period grating curvature sensors using a bragg grating based, derivative spectroscopy technique. *Measurement Science and Technology*, v. 15, n. 1, p. 44, 2003.
- 51 CARVALHO, J.; COELHO, L.; PONTES, M.; BARBERO, A.; MARTINEZ, M.; RIBEIRO, R.; WEYL, J.; BAPTISTA, J.; GIRALDI, M.; DIAS, I. et al. Long-period gratings dynamic interrogation with modulated fiber bragg gratings and optical amplification. *IEEE Sensors Journal*, v. 12, n. 1, p. 179–183, 2011.
- 52 KAHANDAWA, G.; EPAARACHCHI, J.; WANG, H.; FOLLOWELL, D.; BIRT, P. Use of fixed wavelength Fibre-Bragg Grating (FBG) filters to capture time domain data from the distorted spectrum of an embedded fbg sensor to estimate strain with an artificial neural network. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 194, p. 1–7, 2013.
- 53 SANCHEZ, M. R. A.; LEAL-JUNIOR, A. G.; SEGATTO, M. V.; MARQUES, C.; DOS SANTOS, W. M.; SIQUEIRA, A. A. G.; FRIZERA, A. Fiber bragg grating-based sensor for torque and angle measurement in a series elastic actuator's spring. *Appl. Opt.*, v. 57, n. 27, p. 7883–7890, Sep 2018.
- 54 GONENC, B.; IORDACHITA, I. Fbg-based transverse and axial force-sensing micro-forceps for retinal microsurgery. In: . c2016. p. 1–3.
- 55 XU, R.; YURKEWICH, A.; PATEL, R. V. Curvature, torsion, and force sensing in continuum robots using helically wrapped FBG sensors. *IEEE Robotics and Automation Letters*, v. 1, n. 2, p. 1052–1059, 2016.
- 56 DATTA, A.; AUGUSTIN, M. J.; GUPTA, N.; VISWAMURTHY, S. R.; GADDIKERI, K. M.; SUNDARAM, R. Impact localization and severity estimation on composite structure using fiber bragg grating sensors by least square support vector regression. *IEEE Sensors Journal*, v. 19, n. 12, p. 4463–4470, 2019.

- 57 LEAL-JUNIOR, A. G.; CAMPOS, V.; DÍAZ, C.; ANDRADE, R. M.; FRIZERA, A.; MARQUES, C. A machine learning approach for simultaneous measurement of magnetic field position and intensity with fiber bragg grating and magnetorheological fluid. *Optical Fiber Technology*, v. 56, p. 102184, 2020.
- 58 ZHANG, W.; WANG, D. Damage identification using deep learning and long-gauge fiber bragg grating sensors. *Appl. Opt.*, v. 59, n. 33, p. 10532–10540, Nov 2020.
- 59 FRNIAK, M.; MARKOVIC, M.; KAMENCAY, P.; DUBOVAN, J.; BENCO, M.; DADO, M. Vehicle classification based on fbg sensor arrays using neural networks. *Sensors*, v. 20, n. 16, p. 4472, Aug 2020.
- 60 POSSETTI, G. R. C.; CÔCCO, L. C.; YAMAMOTO, C. I.; DE ARRUDA, L. V. R.; FALATE, R.; MULLER, M.; FABRIS, J. L. Application of a long-period fibre grating-based transducer in the fuel industry. *Measurement Science and Technology*, v. 20, n. 3, p. 034012, feb 2009.
- 61 SUN, J.; CHAN, C.; NI, N.; TAN, K.; DONG, X.; SHUM, P. Application of an artificial neural network for simultaneous measurement of bending curvature and temperature with long period fiber gratings. In: . Optical Society of America, c2006. p. TuE78.
- 62 SUN, J.; CHAN, C. C.; DONG, X. Y.; SHUM, P. Application of an artificial neural network for simultaneous measurement of temperature and strain by using a photonic crystal fiber long-period grating. *Measurement Science and Technology*, v. 18, n. 9, p. 2943–2948, aug 2007.
- 63 COSTA, R. Z. V.; POSSETTI, G. R. C.; DE ARRUDA, L. V. R.; MULLER, M.; FABRIS, J. L. Curvature vector smart sensing with a long-period fibre grating probed by artificial intelligence. *Measurement Science and Technology*, v. 21, n. 9, p. 094027, jul 2010.
- 64 HORNIK, K.; STINCHCOMBE, M.; WHITE, H. et al. Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural networks*, v. 2, n. 5, p. 359–366, 1989.
- 65 ATTALI, J.-G.; PAGÈS, G. Approximations of functions by a multilayer perceptron: a new approach. *Neural networks*, v. 10, n. 6, p. 1069–1081, 1997.
- 66 CASTRO, J. L.; MANTAS, C. J.; BENITEZ, J. Neural networks with a continuous squashing function in the output are universal approximators. *Neural Networks*, v. 13, n. 6, p. 561–563, 2000.
- 67 SIMPSON, P. K. *Artificial neural systems: Foundations, paradigms, applications, and implementations*. Pergamon press, 1990.
- 68 PATTERSON, D. W. *Artificial neural networks: theory and applications*. Prentice Hall, 1998.
- 69 HAYKIN, S. *Neural networks and learning machines*. Prentice Hall, 2008.
- 70 THEODORIDIS, S.; KOUTROUMBAS, K. *Pattern recognition*. Academic Press, 2008.

- 71 Haksoo Choi; Sukwon Choi; Hojung Cha. Structural Health Monitoring system based on strain gauge enabled wireless sensor nodes. In: . IEEE, c2008. p. 211–214.
- 72 VAFAEI, M.; ALIH, S. C. An Ideal strain gage placement plan for structural health monitoring under seismic loadings. *Earthquakes and Structures*, v. 8, n. 3, p. 541–553, mar 2015.
- 73 ZHANG, Y.; ANDERSON, N.; BLAND, S.; NUTT, S.; JURSICH, G.; JOSHI, S. All-printed strain sensors: Building blocks of the aircraft structural health monitoring system. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 253, p. 165–172, 2017.
- 74 DOS REIS, J.; Oliveira Costa, C.; Sá da Costa, J. Double bridge circuit for self-validated structural health monitoring strain measurements. *Strain*, v. 54, n. 5, p. e12278, oct 2018.
- 75 BOSE, A. K.; ZHANG, X.; MADDIPATLA, D.; MASIH, S.; PANAH, M.; NARAKATHU, B. B.; BAZUIN, B. J.; ATASHBAR, M. Z. Highly Sensitive Screen Printed Strain Gauge for Micro-Strain Detection. In: . IEEE, c2019. p. 1–3.
- 76 BABAEV, A. S.; YANCHEVSKII, I. V. Identification of external load and control of deformed state of an asymmetric trimorphic beam in unsteady modes. *Mechanics of Solids*, v. 48, n. 6, p. 697–705, nov 2013.
- 77 ZHANG, H.; SHEN, M.; ZHANG, Y.; CHEN, Y.; LÜ, C. Identification of Static Loading Conditions Using Piezoelectric Sensor Arrays. *Journal of Applied Mechanics*, v. 85, n. 1, jan 2018.
- 78 CHEN, Y.; ZHANG, H.; ZHANG, Y.; LI, C.; YANG, Q.; ZHENG, H.; LÜ, C. Mechanical Energy Harvesting From Road Pavements Under Vehicular Load Using Embedded Piezoelectric Elements. *Journal of Applied Mechanics*, v. 83, n. 8, aug 2016.
- 79 WANG, J. H.; CHEN, C. Q. Effects of Thickness on the Responses of Piezoresponse Force Microscopy for Piezoelectric Film/Substrate Systems. *Journal of Applied Mechanics*, v. 84, n. 12, dec 2017.
- 80 SIROHI, J.; CHOPRA, I. Fundamental Understanding of Piezoelectric Strain Sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 11, n. 4, p. 246–257, apr 2000.
- 81 BUTTER, C. D.; HOCKER, G. B. Fiber optics strain gauge. *Applied Optics*, New York, v. 17, n. 18, p. 2867, sep 1978.
- 82 KUANG, K. S. C.; AKMALUDDIN; CANTWELL, W. J.; THOMAS, C. Crack detection and vertical deflection monitoring in concrete beams using plastic optical fibre sensors. *Measurement Science and Technology*, v. 14, n. 2, p. 205–216, feb 2003.
- 83 ZHAO, J.; BAO, T.; AMJAD, U. Optical fiber sensing of small cracks in isotropic homogeneous materials. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 225, p. 133–138, apr 2015.
- 84 MAHER, M. H.; NAVY, E. G. Evaluation of fiber optic Bragg grating strain sensor in high strength concrete beams. In: *Applications of Fiber Optic Sensors in Engineering Mechanics*. 1993. p. 120–133.

- 85 DAVIS, M.; BELLEMORE, D.; KERSEY, A. Distributed fiber Bragg grating strain sensing in reinforced concrete structural components. *Cement and Concrete Composites*, v. 19, n. 1, p. 45–57, jan 1997.
- 86 LIN, Y. B.; CHANG, K. C.; CHERN, J. C.; WANG, L. A. The health monitoring of a prestressed concrete beam by using fiber Bragg grating sensors. *Smart Materials and Structures*, v. 13, n. 4, p. 712–718, aug 2004.
- 87 MOYO, P.; BROWNJOHN, J.; SURESH, R.; TJIN, S. Development of fiber Bragg grating sensors for monitoring civil infrastructure. *Engineering Structures*, v. 27, n. 12, p. 1828–1834, oct 2005.
- 88 KANG, L.-H.; KIM, D.-K.; HAN, J.-H. Estimation of dynamic structural displacements using fiber Bragg grating strain sensors. *Journal of Sound and Vibration*, v. 305, n. 3, p. 534–542, aug 2007.
- 89 CHAN, T.; YU, L.; TAM, H.; NI, Y.; LIU, S.; CHUNG, W.; CHENG, L. Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation. *Engineering Structures*, v. 28, n. 5, p. 648–659, apr 2006.
- 90 TENNYSON, R. C.; MUFTI, A. A.; RIZKALLA, S.; TADROS, G.; BENMOKRANE, B. Structural health monitoring of innovative bridges in Canada with fiber optic sensors. *Smart Materials and Structures*, v. 10, n. 3, p. 560–573, jun 2001.
- 91 LIN, Y. B.; PAN, C. L.; KUO, Y. H.; CHANG, K. C.; CHERN, J. C. Online monitoring of highway bridge construction using fiber Bragg grating sensors. *Smart Materials and Structures*, v. 14, n. 5, p. 1075–1082, oct 2005.
- 92 LI, D.; ZHOU, Z.; OU, J. Development and sensing properties study of FRP–FBG smart stay cable for bridge health monitoring applications. *Measurement*, v. 44, n. 4, p. 722–729, may 2011.
- 93 ZHENG, S. Long-period fiber grating moisture sensor with nano-structured coatings for structural health monitoring. *Structural Health Monitoring: An International Journal*, v. 14, n. 2, p. 148–157, mar 2015.
- 94 HUANG, Y.; TANG, F.; LIANG, X.; CHEN, G.; XIAO, H.; AZARMI, F. Steel bar corrosion monitoring with long-period fiber grating sensors coated with nano iron/silica particles and polyurethane. *Structural Health Monitoring: An International Journal*, v. 14, n. 2, p. 178–189, mar 2015.
- 95 REGO, G. Arc-Induced Long Period Fiber Gratings. *Journal of Sensors*, v. 2016, p. 1–14, 2016.
- 96 YI, Y.; MA, Y.; WANG, S.; LI, X.; ZHU, H.; SUN, C.; ZHANG, S.; YAO, C.; TONG, C.; GENG, T.; SUN, W.; YUAN, L. A new strain sensor based on depth-modulated long-period fiber grating. *Infrared Physics & Technology*, v. 111, p. 103520, 2020.
- 97 ZHANG, S.; DENG, S.; GENG, T.; SUN, C.; NIU, H.; LI, X.; WANG, Z.; LI, X.; MA, Y.; YANG, W.; TONG, C.; YUAN, L. A miniature ultra long period fiber grating for simultaneous measurement of axial strain and temperature. *Optics & Laser Technology*, v. 126, p. 106121, 2020.

- 98 HU, X.; SI, H.; SHEN, H.; YU, Z. A fuzzy neural network model to determine axial strain measured by a long-period fiber grating sensor. *Measurement and Control*, v. 53, n. 3-4, p. 704–710, mar 2020.
- 99 DU, C.; WANG, Q.; ZHAO, Y. Long-period fiber grating sensor induced by electric-arc discharge for dual-parameter measurement. *Instrumentation Science & Technology*, v. 46, n. 1, p. 1–11, 2018.
- 100 LIU, Y.; ZHANG, L.; BENNION, I. Fibre optic load sensors with high transverse strain sensitivity based on long-period gratings in b/ge co-doped fibre. *Electronics letters*, v. 35, n. 8, p. 661–663, 1999.
- 101 ZHANG, L.; LIU, Y.; EVERALL, L.; WILLIAMS, J.; BENNION, I. Design and realization of long-period grating devices in conventional and high birefringence fibers and their novel applications as fiber-optic load sensors. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, v. 5, n. 5, p. 1373–1378, 1999.
- 102 RAO, Y.-J.; WANG, Y.-P.; RAN, Z.-L.; ZHU, T. Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency co 2 laser pulses. *Journal of Lightwave Technology*, v. 21, n. 5, p. 1320, 2003.
- 103 WANG, Y.; WANG, D. N.; JIN, W.; RAO, Y. Asymmetric transverse-load characteristics and polarization dependence of long-period fiber gratings written by a focused co 2 laser. *Applied optics*, v. 46, n. 16, p. 3079–3086, 2007.
- 104 LIU, M.; ZHANG, Z.; ZHOU, Z.; PENG, S.; TAN, Y. A new method based on fiber bragg grating sensor for the milling force measurement. *Mechatronics*, v. 31, p. 22–29, 2015.
- 105 Tada, M.; Sasaki, S.; Ogasawara, T. Development of an optical 2-axis force sensor usable in mri environments. In: . c2002. v. 2. p. 984–989 vol.2.
- 106 SHRESTHA, P.; KIM, J.-H.; PARK, Y.; KIM, C.-G. Impact localization on composite wing using 1d array fbg sensor and rms/correlation based reference database algorithm. *Composite Structures*, v. 125, p. 159–169, 2015.
- 107 KIRKBY, E.; de Oliveira, R.; MICHAUD, V.; MåNSON, J. Impact localisation with fbg for a self-healing carbon fibre composite structure. *Composite Structures*, v. 94, n. 1, p. 8–14, 2011.
- 108 Ge, Yunjian; Zhang Jianjun; Ge, Y. Ubiquitous sensing and robot perception. *Acta Automatica Sinica*, v. 28, n. SUPP, p. 125–133, 2002.
- 109 PARK, Y.-L.; CHAU, K.; BLACK, R. J.; CUTKOSKY, M. R. Force sensing robot fingers using embedded fiber Bragg grating sensors and shape deposition manufacturing. *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007.
- 110 PARK, Y.-L.; RYU, S. C.; BLACK, R. J.; CHAU, K. K.; MOSLEHI, B.; CUTKOSKY, M. R. Exoskeletal force-sensing end-effectors with embedded optical fiber-Bragg-grating sensors. *IEEE Transactions on Robotics*, v. 25, n. 6, p. 1319–1331, 2009.

- 111 XIONG, L.; JIANG, G.; GUO, Y.; LIU, H. A three-dimensional fiber Bragg grating force sensor for robot. *IEEE Sensors Journal*, v. 18, n. 9, p. 3632–3639, 2018.
- 112 BACHIM, B. L.; GAYLORD, T. K. Polarization-dependent loss and birefringence in long-period fiber gratings. *Applied optics*, v. 42, n. 34, p. 6816–6823, 2003.
- 113 REGO, G. M.; SANTOS, J. L.; SALGADO, H. M. Polarization dependent loss of arc-induced long-period fibre gratings. *Optics Communications*, Amsterdam, v. 262, n. 2, p. 152–156, 2006.
- 114 LIU, H.-Y.; LIANG, D.-K.; HAN, X.-L.; ZENG, J. Long period fiber grating transverse load effect-based sensor for the omnidirectional monitoring of rebar corrosion in concrete. *Applied optics*, v. 52, n. 14, p. 3246–3252, 2013.