

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

MARCELO ANTONIO PEDROSO

**SENSORIAMENTO *QUASI*-DISTRIBUÍDO DE FORÇAS
COM TRANSDUTORES DE REDES DE BRAGG EM
FIBRAS ÓTICAS**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2018

MARCELO ANTONIO PEDROSO

**SENSORIAMENTO *QUASI*-DISTRIBUÍDO DE FORÇAS
COM TRANSDUTORES DE REDES DE BRAGG EM
FIBRAS ÓTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Fotônica em Engenharia.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Marcia Muller
Coorientador: Prof. Dr. José Luís Fabris

CURITIBA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

P00X Sobrenome, Nome Autor
2018 Sensoriamento *quasi*-distribuído de forças com transdutores de redes de Bragg em fibras óticas / Marcelo Antonio Pedroso. – 2018.
98 f. : il. ; 30 cm.

Texto em português com resumo em inglês.

Disponível também via World Wide Web.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2018.

Bibliografia: f. 00-00.

1. Sensores em Fibra Ótica. 2. Redes de Bragg. 3. Matriz de Sensores Táteis. 4. Sensoriamento Compressivo. 5. Sensoriamento Tátil *quasi*-distribuído. 6. Fotônica em Engenharia. 7. Engenharia Elétrica – Dissertações. I. Muller, Marcia. II. Fabris, José Luís. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD: Ed. 22 – 621.3

Título da Dissertação N°. 781

**SENSORIAMENTO *QUASI*-DISTRIBUÍDO DE FORÇAS COM
TRANSDUTORES DE REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS**

por

MARCELO ANTONIO PEDROSO

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Marcia Muller

Coorientador: Prof. Dr. José Luís Fabris

Esta Dissertação foi apresentada como requisito à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS - Área de concentração: Fotônica em Engenharia pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial– CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná– UTFPR, às 9h do dia 09 de Fevereiro de 2018. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos Doutores:

Prof.^a Dr.^a Marcia Muller
(UTFPR)

Prof. Dr. Jean Carlos Cardozo da Silva
(UTFPR)

Prof. Dr. Lucas Hermann Negri
(IFMS)

Visto da coordenação:

Prof. Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

Dedico este trabalho à minha família,
minha amada namorada e aos meus amigos
pelos momentos de ausência.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ter acontecido sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem. Certamente esses parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre estas palavras, mas elas podem estar certas de que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Primeiramente agradeço a Deus.

Aos meus pais e minha amada namorada pelo carinho, incentivo e total apoio em todos os momentos da minha vida.

Aos meus orientadores, que me mostraram os caminhos a serem seguidos e pela confiança depositada.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI), que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

Aos colegas do Grupo de Impressões 3D (GIP3D) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), pelos projetos realizados.

Aos meus colegas do Laboratório de Laser (LabLaser) e Laboratório de Fotônica (FOTON) da UTFPR.

Um agradecimento especial ao Prof. Dr. Lucas H. Negri por fornecer o método SDE utilizado neste trabalho e por toda experiência e conhecimento que tenha me passado.

À Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES), Fundação Araucária e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro.

Ao CPGEI e à UTFPR pelas instalações e equipamentos.

Enfim, a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

“Bem-aventurado o homem que acha
sabedoria, e o homem que adquire
conhecimento”.
(Provérbios 3:13)

Resumo

PEDROSO, Marcelo Antonio. **SENSORIAMENTO *QUASI*-DISTRIBUÍDO DE FORÇAS COM TRANSDUTORES DE REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS**. 2018. 98 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de sensoriamento tátil com transdutores de rede de Bragg em fibra ótica capaz de detectar até quatro cargas aplicadas simultaneamente em diferentes posições, utilizando a técnica de sensoriamento compressivo. Seis redes de Bragg, encapsuladas em borracha de silicone com auxílio de um molde confeccionado através de uma impressora 3D, formam a matriz de sensores táteis. Apresentam-se às respostas e sensibilidades do sensor com respeito às deformações mecânicas longitudinais e variações de temperatura. Por fim, apresentam-se os resultados obtidos durante os testes de mapeamento de forças aplicadas na matriz de sensores dividida em oito regiões de sensoriamento. Os resultados mostram SNRs médias maiores do que 19 dB e erros relativo médio menores que 10,5 %. Em adição, mostra-se o funcionamento da matriz de sensores táteis quando são aplicadas forças táteis por meio dos dedos da mão.

Palavras-chave: Sensores em Fibra Ótica. Redes de Bragg. Matriz de Sensores Táteis. Sensoriamento Compressivo. Sensoriamento Tátil *quasi*-distribuído.

Abstract

PEDROSO, Marcelo Antonio. **QUASI-DISTRIBUTED SENSING OF FORCES WITH OPTICAL FIBER BRAGG GRATING TRANSDUCERS**. 2018. 98 p. Dissertation – Graduate Program in Electrical and Computer Engineering – Federal University of Technology – Paraná. Curitiba, 2018.

This work describes the development of a tactile sensing array instrumented with fiber Bragg gratings. The system can detect up to four loads simultaneously applied on the array in different positions by using compressive sensing. The sensing array is composed of six Bragg gratings encapsulated in a sheet of silicone elastomer with the aid of a mold manufactured with a 3D printer. Response and sensitivity to applied loads and temperature changes, were assessed for one encapsulated FBG. Results obtained in tests of force mapping with the sensor array divided into eight sensing areas are presented. Average SNR higher than 19 dB and relative mean errors less than 10.5 % were obtained. The ability of the sensor array to detect forces applied by the finger tips is also demonstrated.

Keywords: Fiber Optical Sensors. Bragg Gratings. Tactile Sensor Array. Compressive Sensing. *Quasi*-distributed Tactile Sensing.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Estrutura de uma FBG construída em fibra ótica monomodo.	26
Figura 2 – Representação esquemática de uma rede de Bragg (a) não apodizada e uma (b) apodizada.	29
Figura 3 – (a) Representação esquemática do método de gravação por máscara de fase e (b) relação entre o período da máscara de fase e da rede de Bragg.	33
Figura 4 – (a) Exemplo de um sistema de sensoriamento com 3 sensores e 6 células e (b) Sistema Linear para o sistema de sensoriamento exemplo.	35
Figura 5 – Diagrama de blocos para a estratégia para realização do método <i>DE/rand/1/bin</i>	37
Figura 6 – Representação esquemática das dimensões da TSA e da localização das FBGs.	40
Figura 7 – (a) Representação esquemática do sistema de gravação de FBG (b) vista superior do suporte da máscara de fase e da fibra ótica.	41
Figura 8 – Determinação da (a) refletividade e (b) largura espectral.	44
Figura 9 – (a) Refletividade da FBG 3 e (b) largura espectral da FBG 2.	44
Figura 10 – Representação esquemática do sistema experimental usado para o ensaio em deformação.	45
Figura 11 – Curvas de resposta e de calibração para o ensaio de deformação longitudinal.	48
Figura 12 – Representação esquemática do sistema experimental usado para o ensaio de temperatura.	49
Figura 13 – Curvas de resposta e de calibração para o ensaio de temperatura.	50
Figura 14 – Representação esquemática do molde utilizado para encapsular uma FBG. (a) Vista Superior e (b) Vista Isométrica.	51
Figura 15 – Sistema de estágio <i>Z</i> utilizado para avaliar a resposta da FBG encapsulada em relação às cargas aplicadas perpendicularmente a fibra.	52
Figura 16 – Curvas de resposta e de calibração para célula de caracterização em deformação.	54
Figura 17 – Análise temporal da aplicação de uma carga de 200 g na célula de caracterização.	55
Figura 18 – (a) Tempo de subida e (b) tempo de descida quando uma carga de 200 g é aplicada na célula de caracterização.	56
Figura 19 – Curvas de resposta e de calibração para célula de caracterização em temperatura.	57
Figura 20 – (a) Tempo de subida e (b) tempo de descida quando uma variação de temperatura de 3 °C é aplicada na célula de caracterização.	58
Figura 21 – (a) Representação esquemática da disposição das FBGs no molde, (b) posição real das FBGs no molde.	59
Figura 22 – Representação esquemática da matriz de sensores táteis.	60
Figura 23 – Sistema de sensoriamento tátil <i>quasi</i> -distribuído.	60
Figura 24 – Análise de linearidade das FBGs na TSA.	61
Figura 25 – Análise da propriedade de aditividade da TSA na configuração de 6 células. (a) Teste nas células B e E, (b) teste nas células C e D. (c) Teste com três cargas de 100 g nas células A, D e E.	65

Figura 26 – Mapeamento de cargas na TSA; (a) Sinal original; (b) Solução do sistema linear com SNR de 5,78 dB; (c) SDE com SNR de 33,98 dB. . . .	67
Figura 27 – Mapa de reconstrução 3D das cargas aplicadas na TSA com 6 células; (a) Aplicação de cargas; (b) Reconstrução pelo SDE com SNR de 19,59 dB.	68
Figura 28 – Distribuição dos sensores nas células da TSA com (a) 12 células, (b) 8 células e dimensões de 60 × 80 mm e (c) 8 células com dimensões de 40 × 80 mm.	69
Figura 29 – Placa de metal utilizada como elemento de transferência junto com a TSA; (a) Vista lateral da placa fixa e (b) vista lateral da placa apoiada; (c) Vista superior da placa fixa e (d) vista superior da placa apoiada. .	69
Figura 30 – Análise de aditividade das FBGs na TSA com 8 células. (a) Teste nas células B e G, (b) teste nas células E e F; (c) Teste com três cargas de 100 g nas células A, D e H.	71
Figura 31 – Controle do posicionamento das cargas aplicadas na TSA.	72
Figura 32 – (a) Teste de reconstrução com 3 cargas com menor SNR de 18,51 dB; (b) Teste de reconstrução com 3 cargas com maior SNR de 28,32 dB; (c) Teste de reconstrução com 4 cargas com menor SNR de 7,77 dB; (d) Teste de reconstrução com 3 cargas com maior SNR de 28,10 dB. .	77
Figura 33 – Reconhecimento de toque no sistema de sensoriamento tátil <i>quasi</i> -distribuído de forças utilizando o algoritmo SDE; (a) Interface em tempo real; (b) Resultado do SDE em tempo real.	79
Figura 34 – Dispositivo de reabilitação para trabalhos futuros.	84
Figura 35 – Representação da forma de utilização do dispositivo.	84
Figura 36 – Materiais e procedimentos para a fabricação da borracha de silicone. .	91

Lista de Tabelas

Tabela 1	–	FBGs gravadas em $(22,0 \pm 0,5)$ °C.	42
Tabela 2	–	Características metrológicas de deformação da célula de caracterização.	54
Tabela 3	–	Sensibilidades obtidas da aplicação de cargas no centro da TSA.	62
Tabela 4	–	Homogeneidade da FBG 3 na TSA considerando a carga de 25 g como entrada inicial.	63
Tabela 5	–	Erros relativos médios de homogeneidade na TSA.	64
Tabela 6	–	Resultados dos testes de diferentes configurações de sensoriamento.	70
Tabela 7	–	Resultados dos testes de reconstrução da carga de 50 g aplicada na TSA.	73
Tabela 8	–	Resultados dos testes de reconstrução da carga de 100 g aplicada na TSA.	73
Tabela 9	–	Resultados dos testes de reconstrução da carga de 200 g aplicada na TSA.	74
Tabela 10	–	Resultados dos testes de mapeamento de 2 cargas aplicadas simultaneamente na TSA.	74
Tabela 11	–	Resultados dos testes de mapeamento de 3 cargas aplicadas simultaneamente na TSA.	75
Tabela 12	–	Resultados dos testes de mapeamento de 4 cargas aplicadas simultaneamente na TSA.	76
Tabela 13	–	Resultados dos testes de reconstrução de cargas aplicadas na TSA.	78
Tabela 14	–	Resultados dos testes de mapeamento na TSA sem a área de contato.	78
Tabela 15	–	Características metrológicas para o sistema de sensoriamento tátil.	80
Tabela 16	–	Posições e massas utilizadas na reconstrução de 2 cargas.	92
Tabela 17	–	Posições e massas utilizadas na reconstrução de 3 cargas.	93
Tabela 18	–	Posições e massas utilizadas na reconstrução de 4 cargas.	93

Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrônimos

CPGEI	Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
GIP3D	Grupo de impressões 3D da UTFPR
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
LabLaser	Laboratório de Laser da UTFPR
FOTON	Laboratório de Fotônica da UTFPR
CAPES	Comissão de aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i> – Redes de Bragg em fibra
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i> – Interferência eletromagnética
TSS	<i>Tactile Sensing System</i> — Sistema de sensoriamento tátil
TSA	<i>Tactile Sensor Array</i> – Matriz de sensores táteis
SDE	<i>Sparse Differential Evolution</i>
CS	<i>Compressive Sensing</i> – Sensoriamento compressivo
DE	<i>Differential Evolution</i> – Evolução diferencial
UV	Ultravioleta
PDMS	Polidimetilsiloxano
PMMA	Polimetilmetacrilato
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> — Relação sinal-ruído
RNA	Rede neural artificial
LASSO	<i>Least Absolute Shrinkage and Selection Operator</i>
GPRs	Georadares
FWHM	<i>Full Width at Half Maximum</i> – Largura de banda à meia altura
SA	<i>Simulated Annealing</i> — Recozimento simulado
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i> — Otimização por enxame de partículas
EA	<i>Evolutionary Algorithms</i> — Algoritmos evolutivos
GA	<i>Genetic Algorithms</i> — Algoritmos genéticos
LP	<i>Linear Program</i> – Programação linear
BP	<i>Basis Pursuit</i>
<i>sl0</i>	<i>Smoothed l0</i>
OMP	<i>Orthogonal Matching Pursuit</i>
EC	<i>Evolutionary Computation</i> – Computação evolucionária
OSA	<i>Optical Spectrum Analyzer</i> – Analisador de espectro ótico
SLD	<i>Superluminescent Diode</i> — Diodo superluminescente
SSMF	<i>Standard Single-Mode Fiber</i> – Fibra monomodo padrão
CAD	<i>Computer Aided Design</i>

ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
FC/PC	<i>Ferrule Connector/Physical Contact</i>
IM	<i>Index Matching</i> — Casador de índice
SEM	<i>Standard Error of the Mean</i> — Desvio padrão da média

Lista de Símbolos

n_{cl}	Índice de refração da casca da fibra
n_{co}	Índice de refração do núcleo da fibra
n_{eff}	Índice de refração efetivo dos modos guiados
Λ	Periodicidade espacial (em inglês <i>pitch</i>) da FBG
E	Energia do fóton
h	Constante de Plank
f	Frequência
\vec{K}	Vetor de onda
λ	Comprimento de onda
m	Ordem de difração da rede
β	Constante de propagação
λ_B	Comprimento de onda de Bragg
$n(z)$	Perfil do índice de refração do núcleo da fibra ao longo do seu eixo
z	Distância ao longo do eixo da fibra
$\delta n(z)$	Valor médio da modulação de índice de refração ao longo de Λ
n_0	Índice de refração médio da fibra ótica
$h(z)$	Visibilidade da troca de índice
$\phi(z)$	Gorjeio da rede
$\mathfrak{R}(l, \lambda)$	Refletividade máxima da rede
l	Comprimento da rede
Γ	Descasamento de fase
Ω	Coefficiente de acoplamento
δn_{eff}	Modulação do índice de refração efetivo dos modos guiados
M_p	Fração da potência ótica contida no núcleo da fibra ótica
V	Frequência da fibra ótica
a	Raio do núcleo da fibra ótica
$\Delta\lambda$	Varição do comprimento de onda
N	Número de planos da rede
s	Parâmetro que define redes fortes ($s = 1$) e redes fracas ($s = 0,5$)
Δn	Amplitude da modulação do índice de refração
ΔT	Varição de temperatura
Δl	Varição do comprimento da rede de Bragg
$\Delta\lambda_B$	Varição do comprimento de onda de Bragg
p_e	Coefficiente fotoelástico
$S_{\mu\varepsilon}$	Sensibilidade de um FBG a deformação

$\mu\epsilon$	Microstrain ($\mu\text{m}/\text{m}$)
ϵ_z	Deformação aplicada ao longo da fibra
α_n	Coefficiente termo-ótico
α_Λ	Coefficiente de expansão térmica
Λ_{pm}	Periodicidade espacial (em inglês <i>pitch</i>) da máscara de fase
S_τ	Sensibilidade térmica de uma FBG
x	Vetor de cargas a serem determinadas
A	Matriz de sensibilidades
y	Vetor de observações de p sensores
p	Número de sensores
q	Número de células (Regiões de sensoriamento)
α	Balanço entre a esparsidade e o erro da solução para o LASSO
P_i	Vetor alvo
M_i	Vetor doador
C_i	Vetor candidato
F	Fator de mutação que controla a amplificação da variação diferencial
CR	Taxa de cruzamento
$ulimit$	Parâmetro usado para limitar o espaço de busca do método SDE
σ	Balanço entre a esparsidade e o erro da solução para o SDE
\mathfrak{R}_{FBG}	Refletividade de uma FBG
P_o	Potência ótica transmitida
P_{λ_B}	Potência ótica refletida
σ_{r-imon}	Incerteza sistemática residual do interrogador
σ_m	Desvio padrão do valor médio
σ_e	Desvio padrão experimental
N_r	Número de medições em condições de repetibilidade
L_{r-paq}	Limite de erro residual do paquímetro
L_{r-micr}	Limite de erro residual do micrômetro
L_{e-paq}	Limite de erro estatístico do paquímetro
L_{e-micr}	Limite de erro estatístico do micrômetro
ΔL	Varição longitudinal do dispositivo tracionador
L	Distância longitudinal inicial do dispositivo tracionador
S_i	Sensibilidade inicial
σ_d	Incerteza em deformação longitudinal
σ'_d	Incerteza em deformação propagada para comprimento de onda
σ_{m-rep}	Incerteza em repetibilidade
σ_{m-pi}	Incerteza em precisão intermediária
σ_{pd}	Incerteza padrão para o ensaio de deformação
S_d	Sensibilidade em deformação de uma FBG utilizada no trabalho

$\sigma_{r-lauda}$	Incerteza sistemática residual do banho térmico
σ'_T	Incerteza em temperatura propagada para comprimento de onda
σ_{pT}	Incerteza padrão para o ensaio de temperatura
S_T	Sensibilidade térmica de uma FBG utilizada no trabalho
σ_Z	Incerteza residual do sistema de estágio Z
σ'_Z	Incerteza em deformação propagada para comprimento de onda
σ_{pZ}	Incerteza padrão para o ensaio com o estágio Z
S_z	Sensibilidade em deformação de uma FBG encapsulada
\emptyset	Diâmetro
T_S	Tempo de subida
T_D	Tempo de descida
σ_s	Incerteza relacionada com a expansão térmica da borracha
σ_{pTe}	Incerteza padrão para o ensaio de temperatura da FBG encapsulada
S_{Te}	Sensibilidade térmica de uma FBG encapsulada
k_x	Constante que multiplica a entrada de um sistema H
k_y	Constante que multiplica a saída de um sistema H
ϵ	Erro relativo percentual
$\bar{\epsilon}$	Erro relativo percentual médio
ϵ_{\max}	Erro relativo percentual máximo
ϵ_{\min}	Erro relativo percentual mínimo
x_0	Vetor de cargas aplicadas

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	MOTIVAÇÕES	19
1.2	OBJETIVOS	20
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
1.4	ESTADO DA ARTE	21
1.4.1	Redes de Bragg em Fibra Ótica	21
1.4.2	Sensoriamento Tátil <i>quasi</i> -distribuído com FBGs	23
1.4.3	Sensoriamento Compressivo	25
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
2.1	TEORIA SOBRE REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA	26
2.1.1	Comprimento de Onda de Bragg	27
2.1.2	Propriedades Espectrais das Redes de Bragg	28
2.1.3	Sensibilidade da FBG à Temperatura e Deformação	31
2.1.4	Método de Gravação de FBGs	32
2.2	SENSORIAMENTO COMPRESSIVO	33
2.2.1	Princípio de Funcionamento	34
2.3	EVOLUÇÃO DIFERENCIAL	36
2.4	<i>Sparse Differential Evolution</i>	38
3	METODOLOGIA E RESULTADOS	40
3.1	GRAVAÇÃO DAS REDES DE BRAGG	41
3.2	CARACTERIZAÇÃO DAS REDES DE BRAGG	43
3.2.1	Determinação da Refletividade e Largura Espectral das FBGs	43
3.2.2	Caracterização da FBG em Relação à Deformação Longitudinal	45
3.2.3	Caracterização da FBG em Relação à Variação de Temperatura	48
3.3	CARACTERIZAÇÃO DE UMA REDE DE BRAGG ENCAPSULADA	50
3.3.1	Processo de Encapsulação	50
3.3.2	Caracterização de uma FBG Encapsulada em Relação às Cargas Aplicadas	52
3.3.3	Caracterização de uma FBG Encapsulada em Relação às Variações de Temperatura	57
3.4	PRODUÇÃO DA MATRIZ DE SENSORES TÁTEIS	59
3.5	ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DA TSA	61
3.5.1	Homogeneidade	63
3.5.2	Aditividade	64
3.6	APLICAÇÃO DO MÉTODO SDE	66

3.6.1	Comparação entre SDE e Solução Direta do Sistema Linear . . .	66
3.6.2	Testes com Diferentes Configurações de Sensoriamento	68
3.7	APLICAÇÃO DO MÉTODO SDE	70
3.7.1	Resultados da Reconstrução do Vetor de Cargas	72
3.7.2	SDE para Mapeamento de Forças	78
4	CONCLUSÕES	82
4.1	TRABALHOS FUTUROS	83
	REFERÊNCIAS	85
	APÊNDICES	89
	APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES	90
	APÊNDICE B – FABRICAÇÃO DA BORRACHA DE SILICONE	91
	APÊNDICE C – POSIÇÕES UTILIZADAS NOS TESTES DE RECONSTRUÇÃO	92
	ANEXOS	94
	ANEXO A – CARACTERÍSTICAS DA FIBRA ÓTICA MONOMODO	95
	ANEXO B – FOLHA DE DADOS DO MONITOR INTERROGADOR	96
	ANEXO C – FOLHA DE DADOS DO BANHO TERMOSTÁTICO	97
	ANEXO D – FOLHA DE DADOS DA BORRACHA DE SILICONE	98

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÕES

Nas últimas quatro décadas as fibras óticas têm alcançado um papel importante no desenvolvimento de tecnologias e equipamentos nas áreas de comunicações óticas e de sensoriamento ótico.

No que se refere ao sensoriamento utilizando fibras óticas é importante ressaltar o uso de redes de Bragg em fibras óticas (FBG do inglês *Fiber Bragg Gratings*). As FBGs possuem vantagens em relação aos convencionais *strain gages*, tais como transmissão com baixas perdas, imunidade à interferência eletromagnética (EMI do inglês *Electromagnetic Interference*), flexibilidade, massa e tamanho reduzidos, que as tornam interessantes no uso em sistemas de sensoriamento *quasi*-distribuído. Além disso, as FBGs podem ser facilmente encapsuladas (OTHONOS; KALLI, 1999).

Outra característica interessante das FBGs é a capacidade de multiplexação em comprimento de onda de múltiplas FBGs em uma única fibra ótica, que torna ainda mais interessante o emprego desse sensor em sistemas de sensoriamento *quasi*-distribuído (SANTOS; FARAH, 2015). As FBGs podem ser aplicadas no sensoriamento *quasi*-distribuído de parâmetros físicos, tais como deformação (KERSEY et al., 1997) e temperatura (WERZINGER et al., 2016). Dessa forma, as FBGs tornam-se interessantes na aplicação de várias áreas como, por exemplo, monitoração de estruturas na engenharia civil (LI; LI; SONG, 2004), monitoração de estruturas em pontes (CHAN et al., 2006) e sensoriamento de pressão para aplicações biomédicas (KANELLOS et al., 2010). Além do mais, a característica de flexibilidade das FBGs permite a aplicação em superfícies curvas tornando-as atrativas para o uso em sistemas de reabilitação. FBGs foram aplicadas, por exemplo, na monitoração do movimento da junta do joelho durante a reabilitação (RO-

CHA et al., 2011), e em uma luva instrumentada usada para monitorar a postura da mão (FERREIRA; GONÇALVES; MENDES, 2011).

Uma das motivações deste trabalho é utilizar-se das propriedades das FBGs para o desenvolvimento de um sistema de sensoriamento tátil (TSS do inglês *Tactile Sensing System*) que possa ser utilizado, e.g., em sistemas de reabilitação para detetar forças táteis dos dedos das mãos. Podendo, assim, auxiliar no desenvolvimento de pacientes submetidos a reabilitação. Ainda, o desenvolvimento de um TSS poderá ser aplicado em sistemas robóticos inteligentes tornando possível a sensação tátil, por exemplo.

Em 2017, Negri desenvolveu um sistema de sensoriamento tátil com número reduzido de transdutores utilizando-se uma placa de metal. O número reduzido de sensores implica, em muitas vezes, numa grande redução no custo de um projeto. Em seu sistema Negri implementou o método SDE (em inglês *Sparse Differential Evolution*) que se mostrou adequado para o mapeamento de forças aplicadas na placa. Esse novo método baseia-se nas técnicas de sensoriamento compressivo (CS do inglês *Compressive Sensing*) e evolução diferencial (DE do inglês *Differential Evolution*), visando a redução do número de transdutores (NEGRI, 2017).

Dessa forma, neste trabalho busca-se como principal motivação obter uma matriz de sensores táteis (TSA em inglês *Tactile Sensor Array*) com número reduzido de transdutores e que seja flexível e aprimorada para sensoriamento tátil.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de uma matriz de sensores táteis com transdutores de rede de Bragg em fibra ótica capaz de detetar forças em diferentes posições através da utilização do método SDE para redução do número de transdutores.

Além disso, propõe-se o uso de borracha de silicone para encapsulação das FBGs. O uso desse material se deve as suas propriedades como flexibilidade, boa resposta tátil, resistência ao calor, durabilidade, biologicamente inerte, processo de cura rápida, ampla faixa de dureza (10 – 80 *Shore A*) e baixo custo de fabricação (XIAMETER, 2016).

Para isso, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Gravação de FBGs em seis comprimentos de ondas diferentes;

- Caracterização das FBGs utilizadas no trabalho;
- Encapsulação de uma FBG em borracha de silicone;
- Caracterização de uma FBG encapsulada em borracha de silicone;
- Construção de uma matriz de sensores táteis;
- Avaliação da linearidade da matriz de sensores;
- Aplicação e avaliação do método SDE com a matriz de sensores táteis;
- Teste de aplicação de forças táteis.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em quatro capítulos. O primeiro capítulo apresenta as motivações, os objetivos e o estado da arte.

Neste trabalho utiliza-se de redes de Bragg para sensoriamento e métodos computacionais. Desse modo, no segundo capítulo são apresentados os conceitos teóricos acerca desses conteúdos.

O terceiro capítulo descreve as metodologias aplicadas para realização do trabalho e os resultados obtidos.

No capítulo quatro estão descritas as conclusões e trabalhos futuros.

1.4 ESTADO DA ARTE

1.4.1 Redes de Bragg em Fibra Ótica

Em 1978, Hill et al. descobriram a fotossensibilidade em fibra ótica dopada com germânio no *Communication Research Center* no Canadá durante a realização de um estudo sobre os efeitos não lineares em fibras óticas dopadas com Germânio. Nesse estudo operou-se um laser de argônio (Ar^+ , 488 nm).

Quando a luz foi incidida, com exposição prolongada, no núcleo da fibra ótica percebeu-se que a luz transmitida pela fibra sofria atenuação ocasionada por uma estrutura

periódica sendo fotoinduzida no núcleo da fibra. Observou-se, também, que a medida que a estrutura se formava no núcleo da fibra a luz refletida aumentava significativamente.

Posteriormente, a equipe descobriu que devido à reflexão de Fresnel a luz refletia no final da fibra, na interface fibra e ar, e formava uma onda luminosa estacionária ao longo do núcleo da fibra, que ocasionava regiões de intensidades com máximos e mínimos. Na região onde a intensidade era máxima o índice de refração do núcleo da fibra sofreu alteração permanente, devido ao efeito de fotossensibilidade. Esta alteração gerou uma modulação periódica do índice de refração ao longo do núcleo da fibra ótica que deu origem a um dispositivo que ficou conhecido como redes de Hill (HILL et al., 1978).

Após a descoberta da fotossensibilidade Lam e Garside (1981) demonstraram que a mudança de índice de refração depende do quadrado da potência de escrita com o laser de argônio em 488 nm, indicando que a mudança de índice está associada à absorção de dois fótons. Isso sugere que um único fóton com o dobro da energia seria mais eficiente para fotoinduzir a mudança no índice de refração (LAM; GARSIDE, 1981).

Uma década após a publicação do trabalho de Hill et al., Meltz, Morey e Glenn (1989) relataram a fabricação de estruturas no núcleo de uma fibra ótica através de irradiação externa, através de um laser ultravioleta (UV) entre 240 e 250 nm. Nesse método de fabricação fez-se uso de um interferômetro para gerar um padrão de interferência entre dois feixes UV e a fibra ótica dopada com germânio foi posicionada perpendicularmente ao feixe para modificar permanentemente o índice de refração no núcleo da fibra e formar as redes de Bragg (MELTZ; MOREY; GLENN, 1989).

Em 1993, Hill e Meltz apresentaram uma nova técnica utilizando máscara de fase. Assim sendo, um feixe UV que incide perpendicularmente em relação à máscara de fase é difratado e gera um padrão de interferência no núcleo da fibra, em outras palavras há regiões de maior e menor intensidade que alteram o índice de refração no núcleo de uma fibra ótica, que resultam em uma FBG. Nessa técnica a reprodutibilidade é aprimorada, além de possuir uma grande simplicidade (HILL; MELTZ, 1997).

Uma FBG constitui-se, portanto, na modulação periódica no índice de refração do núcleo da fibra ótica, ao longo do seu comprimento. A modificação na estrutura de uma FBG devido à perturbações externas como pressão, temperatura ou deformação altera suas características espectrais (OTHONOS; KALLI, 1999). Consequentemente, as FBGs foram inicialmente utilizadas no sensoriamento de temperatura, deformação (MOREY; MELTZ; GLENN, 1990) e pressão (XU et al., 1993), sendo usadas, posteriormente, em

aplicações médicas (RAO et al., 1997) e no setor petrolífero (SILVA et al., 2003).

A literatura apresenta diversas aplicações das redes de Bragg como sensores óticos (CHEN; LIU; ZHANG, 2011).

1.4.2 Sensoriamento Tátil *quasi*-distribuído com FBGs

Devido à propriedade de sensoriamento em relação à deformação e pressão, as FBGs podem ser utilizadas em sensoriamento tátil *quasi*-distribuído onde uma matriz de transdutores baseados em FBG é utilizada.

Alguns sistemas de sensoriamento tátil utilizam um único sensor dedicado a cada ponto de sensoriamento, o que demanda um aumento no número de sensores se houver um aumento da área de sensoriamento. Além do mais, esses sistemas necessitam que as saídas dos sensores sejam independentes, caracterizando um sensoriamento pontual.

Entretanto, se as respostas dos sensores são acopladas, o número de sensores pode ser reduzida formando um sistema de sensoriamento *quasi*-distribuído, tornando o sistema mais barato e robusto (COWIE et al., 2007).

Em 2006, Heo, Chung e Lee implementaram uma matriz de sensores táteis usando nove FBGs, que pode ser utilizada em sistemas robóticos na medicina, uso militar e automação de indústrias, e.g. Essa matriz foi realizada com encapsulação em polímero polidimetilsiloxano (PDMS) o que a torna flexível e ideal para aplicações em superfícies curvadas. A TSA de Heo, Chung e Lee foi aplicada no abdômen de um manequim e através de forças táteis aplicadas com os dedos verificou-se a distribuição das forças em uma interface no LabVIEW®. A estimativa da força aplicada foi feita a partir da aproximação de um polinômio de segunda ordem, dado pelo ajuste da curva de resposta da matriz. Nesse trabalho os resultados apresentaram boa sensibilidade, boa repetibilidade e os autores relataram não apresentar histerese significativa, mas há uma FBG para cada área de sensoriamento (HEO; CHUNG; LEE, 2006).

Em 2007, Cowie et al. utilizaram a técnica de sensoriamento tátil *quasi*-distribuído em uma placa de Polimetilmetacrilato (PMMA) com nove FBGs para detectar duas cargas simultaneamente utilizando redes neurais. Uma matriz 5×7 foi montada e duas cargas foram aplicadas individualmente e simultaneamente. Os resultados mostraram uma taxa de 100 % no acerto do número de cargas aplicadas, erro médio de 4,8 % em relação à diagonal da placa na detecção da posição com duas cargas e erro médio de 2,7 % com

uma carga, mas há problemas com sensibilidade cruzada, propriedades mecânicas e relação sinal-ruído (SNR do inglês *Signal-to-Noise Ratio*) (COWIE et al., 2007).

Posteriormente, Negri et al. (2014) também usaram redes neurais para estimar a posição da força aplicada em uma placa de PMMA. Nesse trabalho utilizou-se apenas 4 FBGs e os resultados apresentaram erro médio de 1,93 % em relação à diagonal da placa, na estimativa da posição de uma carga (NEGRI et al., 2014).

Em 2015, Saccomandi et al. realizaram uma matriz de sensores táteis com nove FBGs encapsuladas em PDMS e utilizaram redes neurais *feedforward* para estimar a força aplicada, obtendo erro de 21 mN em uma faixa de 0 — 8 N (SACCOMANDI et al., 2015).

Também em 2015, Kamizi et al. realizaram o treinamento de uma rede neural artificial (RNA) para localizar impactos em estruturas. O arranjo experimental utilizado foi uma placa de PMMA ($60 \times 60 \times 0,6$ cm) contendo quatro FBGs. Um quadrado de 50×50 cm, dividido em células quadradas com 5 cm de lado, foi utilizado como guia para impactos e detecções. Com essa configuração obteve-se 22 % de erro em relação à posição de impacto.

Em 2016, Negri et al. implementaram um sistema capaz de detectar forças esparsas aplicadas em diferentes posições em uma placa de metal dividida em nove células contendo sete FBGs. O sistema foi capaz de determinar a posição e magnitude de três forças aplicadas simultaneamente em diferentes posições da placa. O método computacional utilizado foi o LASSO (em inglês *Least Absolute Shrinkage and Selection Operator*) numa configuração de sensoriamento *quasi*-distribuído. Esse sistema foi capaz de recuperar o valor da carga distribuída na placa com SNR maior que 12 dB. Negri et al. utilizaram a métrica SNR para obter a relação entre o sinal recuperado e o sinal original, quanto maior a SNR mais próximos são os sinais. Esse sistema é de grande interesse para monitoração da integridade de pontes, no sensoriamento de mudanças estruturais em asas de aeronaves e sensoriamento tátil (NEGRI et al., 2016).

Em busca de um melhor desempenho do sistema projetado em 2016, Negri et al. (2017) alteraram o número de transdutores de 7 para 8, aumentaram o número de regiões de 9 para 16 e mudaram o encapsulamento das cabeças sensoras. Além disso, Negri et al. implementaram um novo método de reconstrução chamado SDE, o qual é baseado em sensoriamento compressivo e evolução diferencial. Com esse sistema e o método SDE foi possível obter uma taxa de reconstrução (resultados com $SNR > 12$ dB) de 100 % para 1 carga aplicada na placa, 96 % para duas cargas e 84 % para 3 cargas. As SNRs médias

foram de 34,3 dB, 26,6 dB e 18,9 dB para 1, 2 e 3 cargas, respectivamente (NEGRI et al., 2017).

1.4.3 Sensoriamento Compressivo

Nos últimos anos o sensoriamento compressivo tem representado um dos campos de pesquisa mais ativos nas áreas de processamento de sinal, Engenharia Eletrônica e Ciência da Computação, gerando um grande número de publicações e obtendo sessões em conferências dedicadas ao tópico. Seu sucesso é devido à possibilidade de recuperar sinais com um número reduzido de medições (CANDES; WAKIN, 2008). Além disso, é possível utilizar em diversas aplicações de diferentes cenários (MASSA; ROCCA; OLIVERI, 2015).

Métodos de sensoriamento compressivo são aplicados em processamento de imagens e vídeo (LI et al., 2013), engenharia eletromagnética (MASSA; ROCCA; OLIVERI, 2015), diagnóstico de antenas (MIGLIORE, 2011), georadares (GPRs) (GURBUZ; MCCLELLAN; SCOTT, 2009) e em sistemas de mapeamento de forças (NEGRI et al., 2016; NEGRI et al., 2017).

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para este trabalho gravaram-se FBGs por meio da técnica de iluminação direta de uma máscara de fase. Tais FBGs foram encapsuladas formando uma rede de sensores *quasi*-distribuídos e métodos computacionais permitiram o desenvolvimento de um sistema de sensoriamento tátil com uma redução de número de transdutores. Posto isso, os próximos tópicos abordam conceitos fundamentais para a compreensão da produção e princípio de funcionamento das FBGs e da técnica computacional CS e SDE.

2.1 TEORIA SOBRE REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA

Uma rede de Bragg em fibra ótica, ou simplesmente FBG, traduz-se na modulação periódica do índice de refração ao longo do núcleo de uma fibra ótica (HILL; MELTZ, 1997).

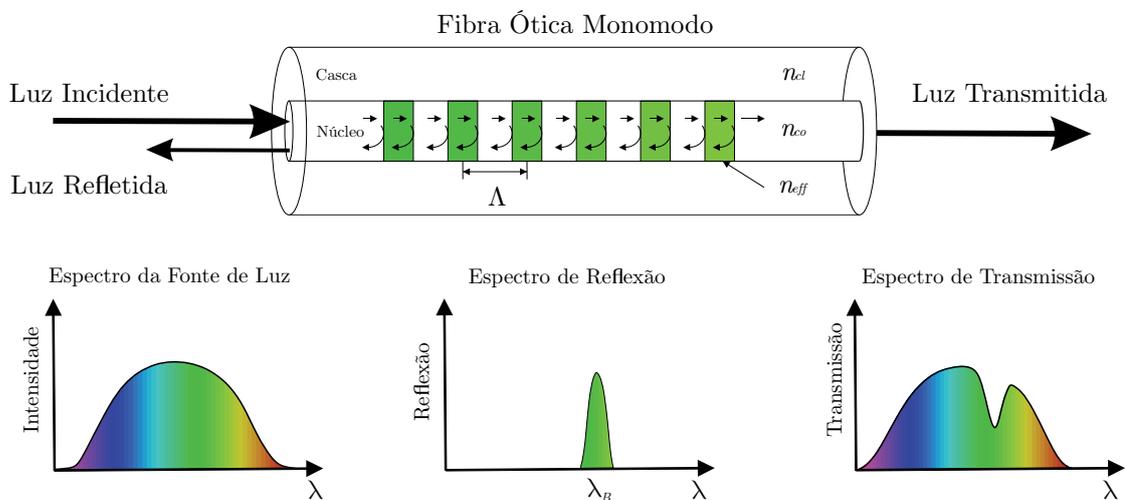


Figura 1 – Estrutura de uma FBG construída em fibra ótica monomodo.

A Figura 1 mostra a representação esquemática das redes de Bragg no núcleo de uma fibra ótica monomodo, onde n_{cl} , n_{co} e n_{eff} são os índices de refração na casca, no núcleo e efetivo dos modos de núcleo, respectivamente.

O período da rede é representado por Λ (em inglês *Pitch*). Ainda na Figura 1, pode-se observar que a FBG se comporta como um filtro ótico. Na reflexão a FBG se comporta como um filtro passa-banda, deixando passar apenas uma porção do espectro da fonte de luz incidente. Na transmissão o comportamento é de um filtro ótico rejeita-banda (OTHONOS; KALLI, 1999).

2.1.1 Comprimento de Onda de Bragg

Quando uma fonte de luz de banda larga é acoplada no núcleo da fibra uma pequena porção do espectro da fonte é refletida devido às múltiplas reflexões coerentes que ocorrem nas interfaces onde o índice no núcleo da fibra sofre alterações. Se a condição de Bragg é satisfeita, os feixes refletidos nas interfaces sofrem interferência construtiva na direção contrapropagante e gera o espectro de reflexão com comprimento de onda central definido pelos parâmetros da rede. Caso a condição de Bragg não seja satisfeita os feixes de luz refletidos começam a ficar progressivamente fora de fase e, nesse caso, haverá interferência destrutiva.

A condição de Bragg requer que a conservação de energia e de momento devam ser satisfeitas. A energia do fóton é dada por $E = hf$ onde h é a constante de Plank. Dessa forma, para que ocorra conservação de energia a frequência da luz incidente deve ser a mesma da luz refletida ($hf_i = hf_f$). A conservação de momento requer que o vetor de onda incidente, \vec{K}_i , somado ao vetor de onda da rede, \vec{K} , deva ser igual ao vetor de onda da luz espalhada, \vec{K}_f . A conservação de momento é definida pela Equação 1 (OTHONOS; KALLI, 1999):

$$\vec{K}_i + \vec{K} = \vec{K}_f \quad (1)$$

O vetor \vec{K} é normal aos planos da rede e possui magnitude $2\pi/\Lambda$, onde Λ é o período da rede. O vetor \vec{K}_f é igual em magnitude, mas oposto em sentido ao vetor \vec{K}_i .

Então, a condição de conservação de momento resulta na Equação 2:

$$\frac{2\pi n}{\lambda} \sin \theta_f = \frac{2\pi n}{\lambda} \sin \theta_i + m \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2)$$

O elemento m na Equação 2, representa a ordem de difração, sendo -1 para redes em fibra ótica. Como a constante de propagação (β) é dada por $\beta = (2\pi/\lambda) n_{eff}$, onde n_{eff} é o índice de refração efetivo para cada modo de propagação ($n_{eff} = n_{co} \sin \theta$), a simplificação da Equação 2 resulta na Equação 3:

$$\beta_f = \beta_i - \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (3)$$

Logo, a equação Equação 1 resulta na Equação 4:

$$2 \left(\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B} \right) = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (4)$$

A Equação 4, na sua forma simplificada, resulta na condição de Bragg de primeira ordem expressa pela Equação 5 (OTHONOS; KALLI, 1999),

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (5)$$

onde λ_B é o comprimento de onda de Bragg.

2.1.2 Propriedades Espectrais das Redes de Bragg

Uma rede de Bragg gravada no núcleo de uma fibra ótica, na direção de propagação z , possui equação do perfil de índice de refração dada pela Equação 6 (ERDOGAN, 1997):

$$n(z) = \delta n(z) + h(z) \cos \left(\frac{2\pi z}{\Lambda} + \phi(z) \right) \quad (6)$$

Na Equação 6, $\delta n(z)$ representa o valor médio da modulação do índice de refração, calculado ao longo do período espacial Λ , $h(z)$ representa a visibilidade da troca de índice e $\phi(z)$ descreve o gorjeio da rede.

Se $\phi(z)$ varia ao longo de z diz-se que a rede apresenta gorjeio (em inglês *Chirp*), isto é, o período da rede varia ao longo da estrutura.

O pico central do espectro de reflexão de uma rede de Bragg uniforme é acompanhado por uma série de lóbulos laterais. Esses lóbulos se formam pela descontinuidade do índice de refração nas extremidades da rede. A presença desses lóbulos afeta o desempenho de muitas aplicações, sendo necessário recorrer a técnicas de apodização. Quando $h(z)$ varia ao longo da fibra ótica picos laterais ao pico central do espectro de reflexão da rede podem ser atenuados, nesse caso a rede possui perfil de índice apodizado. Na prática, a apodização é alcançada através da redução gradativa da amplitude de modulação de índice nas extremidades da rede, como representado na Figura 2.

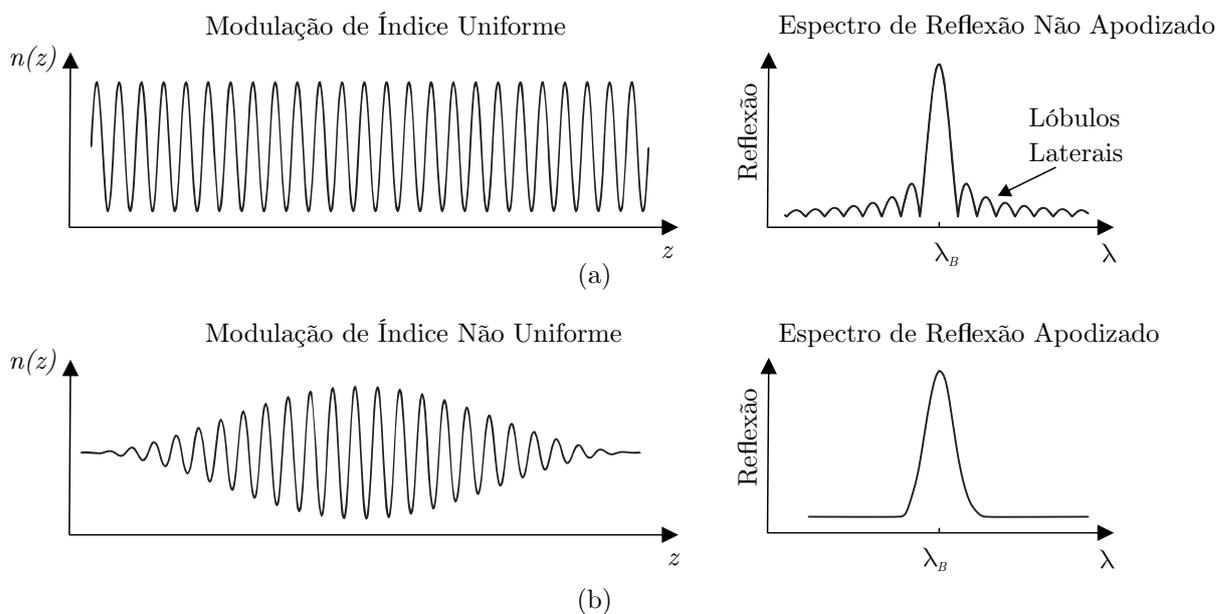


Figura 2 – Representação esquemática de uma rede de Bragg (a) não apodizada e uma (b) apodizada.

A partir da teoria de modos acoplados, a refletividade máxima de uma rede com amplitude e período de modulação de índice constantes é dada pela Equação 7:

$$\mathfrak{R}(l, \lambda) = \frac{\Omega^2 \sinh^2(sl)}{\left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2 \sinh^2(sl) + s^2 \cosh^2(sl)} \quad (7)$$

Na Equação 7, $\mathfrak{R}(l, \lambda)$ é a refletividade máxima, l é o comprimento da rede, Ω é o coeficiente de acoplamento entre ondas propagantes e contrapropagantes e Γ representa o descasamento de fase para um determinado comprimento de onda da banda espectral

da fonte ótica (λ). Γ é representado pela Equação 8 (LAM; GARSIDE, 1981):

$$\Gamma = \left(2 \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} \right) - \left(\frac{2\pi}{\Lambda} \right) \quad (8)$$

O parâmetro s da Equação 7 é expresso pela Equação 9:

$$s = \sqrt{\Omega^2 - \left(\frac{\Gamma}{2} \right)^2} \quad (9)$$

O coeficiente de acoplamento para uma variação senoidal da perturbação do índice de refração ao longo do eixo da fibra ótica é dado pela Equação 10 (OTHONOS; KALLI, 1999),

$$\Omega = \frac{\pi \delta n_{eff}}{\lambda} M_p, \quad (10)$$

onde, na Equação 10, M_p é fração da potência do modo contida no núcleo da fibra ótica. Se uma rede de Bragg é gravada uniformemente no núcleo de uma fibra ótica, o valor de M_p pode ser aproximado por (OTHONOS; KALLI, 1999):

$$M_p = 1 - \frac{1}{V^2} \quad (11)$$

O parâmetro V , na Equação 10, é a frequência da fibra, definida através da Equação 12,

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (12)$$

onde, na Equação 12, a é o raio do núcleo da fibra e n_{co} e n_{cl} , como mostra a Figura 1, são os índices de refração no núcleo e na casca, respectivamente. No comprimento de onda de Bragg (λ_B) há casamento de fase, isso é, $\Gamma = 0$. Consequentemente, a Equação 7 resulta na Equação 13:

$$\mathfrak{R}(l, \lambda) = \tanh^2(\Omega l) \quad (13)$$

Uma expressão aproximada para a largura espectral, ou também chamada de

largura de banda à meia altura (FWHM do inglês *Full Width at Half Maximum*), da rede é dada pela Equação 14 (OTHONOS; KALLI, 1999):

$$\Delta\lambda = \lambda_B s \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_o}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2} \quad (14)$$

O parâmetro N , na Equação 14, representa o número de planos da rede ($N = l/\Lambda$). O parâmetro s é aproximadamente 1 para redes fortes (refletividade próxima de 100 %) e 0,5 para redes fracas (OTHONOS; KALLI, 1999). As Equações 13 e 14 mostram que a refletividade aumenta e a largura espectral diminui com o aumento do comprimento da rede uniforme e/ou modulação do índice de refração (Δn).

2.1.3 Sensibilidade da FBG à Temperatura e Deformação

De acordo com a Equação 5 o comprimento de onda de Bragg depende do índice de refração efetivo do modo no núcleo da fibra e da periodicidade das redes. Ambos n_{eff} e Λ são afetados por mudanças de temperatura e deformação. Então, mudanças no índice de refração efetivo e na periodicidade das redes resultam num deslocamento de λ_B . Uma expressão geral do deslocamento do comprimento de onda de Bragg é obtida diferenciando a Equação 5 em função de uma variação da temperatura (ΔT) e em função da variação do comprimento das redes de Bragg (Δl) (OTHONOS; KALLI, 1999), que resulta na Equação 15:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (15)$$

O primeiro termo da Equação 15 representa o efeito da deformação sobre a rede, ou seja, corresponde à mudança do espaçamento da rede e à mudança fotoelástica induzida no índice de refração. Esse efeito é representado pela Equação 16 (OTHONOS; KALLI, 1999):

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \varepsilon_z \quad (16)$$

Na Equação 16, $\Delta\lambda_B$ é o deslocamento do comprimento de onda de Bragg, ε_z é a deformação aplicada ao longo da fibra e p_e é o coeficiente fotoelástico. Para uma fibra

ótica dopada com germânio o coeficiente fotoelástico é tipicamente 0,213 e, então, com esse valor de p_e a sensibilidade à deformação ($S_{\mu\epsilon}$) em $\lambda_B = 1550$ nm é em torno de 1,2 pm/ $\mu\epsilon$ (OTHONOS; KALLI, 1999).

O segundo termo da Equação 15 representa o efeito da temperatura na FBG. O deslocamento no comprimento de onda de Bragg devido à expansão térmica e ao efeito termo-ótico resultantes respectivamente da mudança no espaçamento da rede e da alteração no índice de refração. Esse deslocamento espectral com a mudança de temperatura é descrito através da Equação 17,

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_n + \alpha_\Lambda) \Delta T, \quad (17)$$

onde $\alpha_n = (1/n_{eff}) (\partial n_{eff} / \partial T)$ representa o coeficiente termo-ótico.

O coeficiente termo-ótico α_n é aproximadamente $8,6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para uma fibra dopada com germânio. O termo $\alpha_\Lambda = (1/\Lambda) (\partial \Lambda / \partial T)$ na Equação 17 é o coeficiente de expansão térmica. O valor de α_Λ é aproximadamente $0,55 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para sílica. Como $\alpha_n > \alpha_\Lambda$ é evidente que a mudança do índice de refração é o efeito dominante no deslocamento do comprimento de onda de Bragg. Os valores de α_n e α_Λ na Equação 17 resultam em uma sensibilidade térmica (S_τ) em torno de 14 pm/ $^\circ\text{C}$ para uma FBG com $\lambda_B = 1550$ nm (OTHONOS; KALLI, 1999).

As Equações 15, 16 e 17 mostram que λ_B sofre variações consequentes da soma entre as perturbações térmicas e mecânicas o que caracteriza o termo de sensibilidade cruzada. Para contornar a sensibilidade cruzada pode-se encapsular a FBG de tal forma que apenas um parâmetro físico de interesse seja perceptível.

Neste tópico discute-se sobre as FBGs e suas características espectrais. O próximo tópico trata sobre o método de gravação das redes de Bragg.

2.1.4 Método de Gravação de FBGs

Em 1993, Hill e Meltz apresentaram um método de gravação que se utiliza de uma máscara de fase, que consiste em um substrato de sílica transparente ao UV que apresenta em uma das suas faces uma estrutura periódica de ranhuras produzida pela técnica de fotolitografia, e.g. O formato dessa estrutura periódica possui um padrão aproximado de uma onda quadrada, conforme é representado na Figura 3.

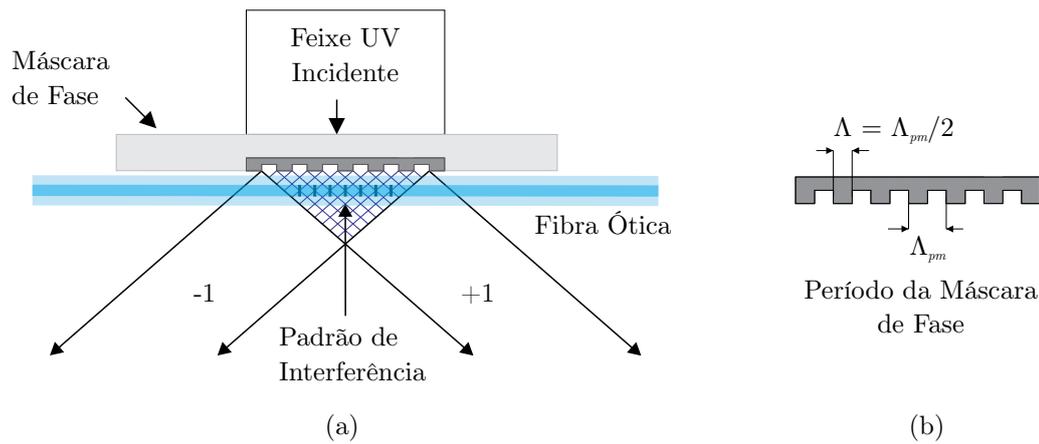


Figura 3 – (a) Representação esquemática do método de gravação por máscara de fase e (b) relação entre o período da máscara de fase e da rede de Bragg.

A Figura 3 mostra uma representação esquemática para o método de gravação de FBG com máscara de fase, onde Λ_{pm} é o *pitch* da máscara de fase. Esse método consiste em colocar a fibra ótica próxima a máscara de fase. A luz UV, cuja incidência é normal a superfície da máscara de fase, atravessa esse material e difrata em sua estrutura periódica. Como resultado, um padrão de interferência é originado. A maior parte da luz difrata nas ordens +1, e -1. As máscaras de fase são projetadas para suprimir as difrações de ordem zero, sendo que a difração de ordem zero pode ser reduzida para valores menores do que 5 %. Por conseguinte, as ordens +1 e -1 se interferem para gerar um padrão periódico com o mesmo *pitch* das redes de Bragg, que nesse caso é a metade do *pitch* da máscara de fase (HILL; MELTZ, 1997).

Nesta seção apresentou-se uma fundamentação teórica sobre as FBGs. Permitindo, assim, compreender o seu comportamento como elemento sensor.

Em muitas aplicações de sensoriamento utilizam-se de técnicas computacionais para solucionar problemas das mais diversas áreas. A seções seguintes apresentam uma abordagem teórica sobre as diferentes técnicas computacionais utilizadas neste trabalho.

2.2 SENSORIAMENTO COMPRESSIVO

O sensoriamento compressivo é um novo paradigma de sensoriamento que busca a redução do número de amostras ou medidas necessárias para a recuperação de sinais, aproveitando-se da informação que o sinal, a ser recuperado, é esparsa (maioria dos elementos são nulos). Em um sistema de sensoriamento isso se traduz em um número reduzido

de sensores (CANDES; WAKIN, 2008).

2.2.1 Princípio de Funcionamento

Para melhor compreensão da técnica CS considera-se um problema no qual busca-se estimar o vetor x de cargas aplicadas em uma matriz de sensoriamento de q células em um sistema linear, conforme a Equação 18,

$$A_{(p \times q)} x_{(q \times 1)} = y_{(p \times 1)}, \quad (18)$$

onde A é a matriz de sensibilidades obtida experimentalmente e y é o vetor de observações de p sensores. De forma simplificada, p é o número de sensores e q é o número de células.

Como exemplo toma-se o sistema da Figura 4(a) onde uma matriz com 6 células (regiões de sensoriamento) possui 3 sensores.

Para obter a matriz A aplica-se uma carga de massa conhecida em cada célula da matriz de sensoriamento e mede-se o deslocamento em comprimento de onda de cada FBG. Para cada célula determina-se uma coluna de A que corresponde aos valores de sensibilidade de cada FBG, dados pelos deslocamentos em comprimento de onda pela massa da carga utilizada. Cada linha da matriz A corresponde às respostas de uma das FBGs as cargas aplicadas em todas as células. A Figura 4(b) apresenta as dimensões da matriz A , do vetor de cargas x e do vetor coluna de deslocamentos de comprimento de onda y .

Se $p = q$, ou seja, o número de sensores é o mesmo que o número de células, e a matriz A for linearmente independente, o vetor x pode ser recuperado pela solução direta do sistema linear da Equação 18.

Mas, quando $p < q$ o sistema é subdeterminado e não possui uma única solução, pois há um número menor de observações para encontrar o vetor de cargas. Para obter uma única solução pode-se obter a solução com menor norma Euclidiana (norma l_2) através da pseudoinversa de Moore-Penrose, conforme a Equação 19.

$$x = A^+ y = A^T (A A^T)^{-1} y \quad (19)$$

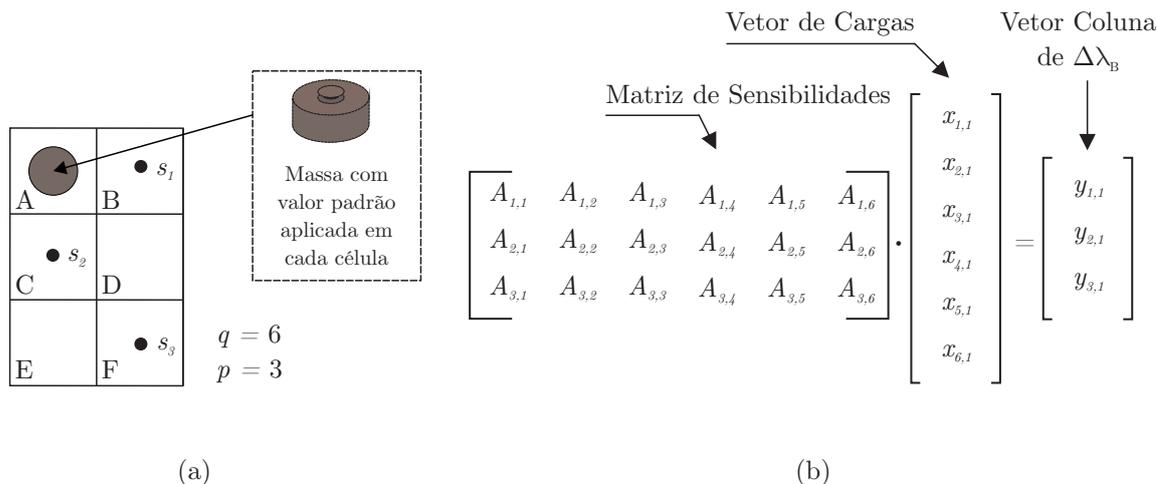


Figura 4 – (a) Exemplo de um sistema de sensoriamento com 3 sensores e 6 células e (b) Sistema Linear para o sistema de sensoriamento exemplo.

A solução pela Equação 19 não apresenta resultados satisfatórios, pois a norma l_2 converge para resultado menos esparsos. No entanto, em aplicações onde se sabe que o vetor x é esparsos, pode-se obter melhores resultados aproveitando-se da propriedade de esparsidade. Desse modo, ao invés de determinar uma solução que minimiza a menor norma (l_2), pode-se determinar uma que minimiza a norma l_0 do problema formulado como visto na Equação 20,

$$\begin{aligned} \min_x \|x\|_{l_0}, \\ \text{sujeito a } Ax = y, \end{aligned} \quad (20)$$

onde a norma l_p do vetor x é dada por $\|x\|_{l_p} = \sum_{i=1}^n |x_i|^p$, no caso da norma l_0 somente os elementos não nulos devem ser levados em consideração.

O problema de minimização da norma l_0 é computacionalmente intratável. Porém, a minimização da norma l_1 , na Equação 21, é uma boa alternativa para a norma l_0 (CANDES; TAO, 2005),

$$\begin{aligned} \min_x \|x\|_{l_1}, \\ \text{sujeito a } Ax = y, \end{aligned} \quad (21)$$

onde $\|x\|_{l_1} = \sum_{i=1}^n |x_i|$. A substituição da norma l_0 pela l_1 é computacionalmente tratável, pois compreende em um problema de programação linear (LP do inglês *Linear Program*) (CANDES; TAO, 2005).

O problema de otimização da Equação 21, também conhecido como *basis pursuit* (BP), consiste em um problema de LP cuja solução pode ser obtida pelo uso de pacotes computacionais, tal como *l1-magic* (CANDES; ROMBERG, 2005).

Para tornar o BP mais robusto quanto à presença de ruídos pode-se utilizar variações, como representada pela Equação 22,

$$\min_x \frac{1}{2} \|Ax - y\|_2^2 + \alpha \|x\|_{l1}, \quad (22)$$

onde α é o parâmetro que determina o balanço entre a esparsidade da solução e o erro de recuperação. Esse problema de otimização recebe os nomes de *basis pursuit denoising* (CHEN; LIU; ZHANG, 2011) e LASSO (TIBSHIRANI, 1996). Tal qual o *basis pursuit*, o LASSO também pode ser resolvido por LP. Mas, as soluções de LP resultantes do BP e LASSO requerem implementações sofisticadas. Por esse motivo, outros algoritmos para CS foram implementados em busca de soluções esparsas, como o *sl0* (em inglês *smoothed l0*) e OMP (em inglês *Orthogonal Matching Pursuit*).

2.3 EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

A Evolução Diferencial é um método de otimização estocástico que pertence à família dos métodos de computação evolucionária (EC do inglês *Evolutionary Computation*).

O método de evolução diferencial recebe esse nome por utilizar a diferença entre vetores para guiar a busca. Dessa forma, fazendo com que o método controle automaticamente a exploração do espaço de busca, diminuindo os espaços conforme a convergência das soluções (STORN; PRICE, 1997).

O diagrama na Figura 5 apresenta a estratégia para a realização da evolução diferencial.

Neste trabalho o método utilizado é o DE/*rand*/1/*bin* onde “*rand*” significa que os vetores para a mutação são escolhidos de forma aleatória, “1” significa que um único par de vetores é utilizado na mutação e, finalmente, “*bin*” significa que a recombinação utilizada é binominal.

DE é um método que trabalha com NP vetores de dimensão D onde cada ve-

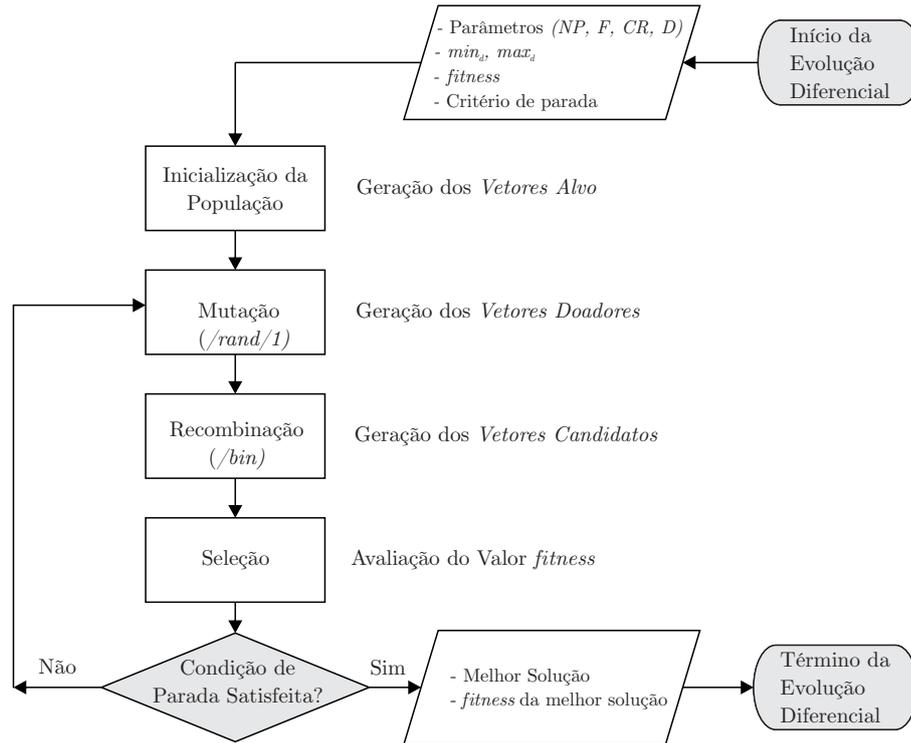


Figura 5 – Diagrama de blocos para a estratégia para realização do método $DE/rand/1/bin$.

tor é uma solução para o problema de otimização. Inicialmente os *vetores alvo* $P_i (i = 1, 2, \dots, NP)$ de dimensão $d(1, 2, \dots, D)$ são determinados pela Equação 23,

$$P_{i,d} = min_d + rand(0,1)(max_d - min_d), \quad (23)$$

onde a função $rand(0,1)$ retorna um número pseudo-aleatório na faixa $[0,1]$ e min_d e max_d são os limites inferior e superior para a dimensão d .

Em seguida, na etapa de mutação gera-se um *vetor doador* $M_i (i = 1, 2, \dots, NP)$ para cada *vetor alvo*. Cada *vetor doador*   a combinação de três vetores distintos de índices r_1, r_2 e r_3 obtidos aleatoriamente dos vetores alvo. O *vetor doador*   obtido de acordo com a Equação 24,

$$M_i = P_{r_1} + F(P_{r_2} - P_{r_3}), \quad (24)$$

onde F   o fator de mutação, usualmente na faixa $[0, 2]$, que controla a amplificação da variação diferencial $(P_{r_2} - P_{r_3})$.

A próxima etapa consiste em realizar a recombinação binominal $(/bin)$ de cada *vetor alvo* (P_i) com seu respectivo *vetor doador* (M_i) gerando o vetor candidato (C_i) ,

conforme a Equação 25,

$$C_{i,d} = \begin{cases} M_{i,d}, & \text{Se } \text{rand}(0,1) \leq CR \text{ ou } d = j, \\ P_{i,d}, & \text{Caso contrário.} \end{cases} \quad (25)$$

Na Equação 25 CR é a taxa de cruzamento, na faixa de $[0, 1]$, determinada pelo usuário e j é uma dimensão escolhida aleatoriamente para garantir que seja utilizado o valor de pelo menos uma dimensão do *vetor doador*. De forma a respeitar os limites inferior e superior pode-se limitar $C_{i,d}$ para que ele fique na faixa $[\min_d, \max_d]$.

Por fim, a etapa de seleção é realizada por meio da *função fitness*, utilizada para avaliar a qualidade das soluções atribuindo a elas um valor numérico (*fitness*). Em geral realiza-se a maximização da *função fitness*, mas qualquer problema de minimização pode ser convertido em um de maximização já que minimizar uma função é equivalente a maximizar o seu negativo.

Na etapa de seleção avalia-se o *fitness* de cada *vetor candidato* C_i e compara-se com o *fitness* do seu respectivo *vetor alvo* (P_i). Se o *fitness* de C_i for maior ou igual ao *fitness* de P_i , então P_i é substituído por C_i para a próxima iteração do método. Caso contrário, C_i é descartado.

O processo iterativo de mutação, recombinação e seleção ocorre até que uma condição de parada seja alcançada, que pode ser um número máximo de iterações, e.g. Ao final do processo, a solução com maior *fitness* é dada como resposta.

2.4 SPARSE DIFFERENTIAL EVOLUTION

O SDE busca utilizar uma minimização direta de uma aproximação da norma l_0 em vez de utilizar uma recuperação do sinal baseada na norma l_1 . O problema de otimização é representado pela Equação 26,

$$\begin{aligned} \min_x & \|Ax - y\|_{l_2}^2 + \sigma \|x\|_{l_p}^p, \\ \text{sujeito a} & \quad 0 \leq x \leq \text{ulimit}, \end{aligned} \quad (26)$$

onde o termo $\|Ax - y\|_{l_2}^2$ é o erro quadrático entre Ax e y . O termo *ulimit* é o limite superior para o valor de cada carga. O segundo termo da Equação 26 é a norma l_p utilizada para evitar os problemas de sensibilidade ao ruído presente na norma l_0 e também

para favorecer a convergência. O valor de p é definido como 0,01 para que a norma lp seja aproximadamente a norma $l0$ e σ é o parâmetro que determina o balanço entre a esparsidade e erro, esse valor é obtido experimentalmente, quanto menor for o valor de σ melhor será a qualidade da solução, mas a solução será menos esparsa (NEGRI, 2017).

Ainda assim, a minimização da norma lp é um problema intratável por métodos computacionais convencionais. Então, Negri et al. implementaram o método DE para solucionar o problema da Equação 26. O novo método da Equação 26 utiliza-se do esquema DE/*rand/1/bin*. Neste trabalho NP é 150 com no máximo 1500 iterações, taxa de cruzamento de $CR = 0,15$ e fator de mutação de $F = 0,8$. A dimensão do problema corresponde ao número de células na matriz de sensores, ou seja, $D = q$. A função *fitness* utilizada para avaliar a qualidade das soluções corresponde no negativo do problema da Equação 26. A restrição $0 \leq x \leq ulimit$ é usada para limitar o espaço de busca do método (NEGRI, 2017).

Com o problema e o método definidos, o próximo capítulo apresenta a metodologia para alcançar a reconstrução de x .

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA E RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os métodos e equipamentos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho e os principais resultados obtidos.

Inicialmente definiram-se as características da matriz de sensores táteis (TSA), onde se optou por utilizar uma configuração com seis FBGs com comprimentos de ondas diferentes. Escolheram-se as dimensões (75 × 105 × 5) mm para a TSA, tamanho suficiente para que se possa realizar um ensaio tátil com até quatro dedos da mão. Para a encapsulação das FBGs escolheu-se borracha de silicone devido à sua facilidade de fabricação, rápido processo de cura em temperatura ambiente, agilidade no processo de moldagem, além de, baixo custo e boas propriedades táteis. A Figura 6 apresenta o esquemático do posicionamento das FBGs na TSA, assim como as dimensões utilizadas.

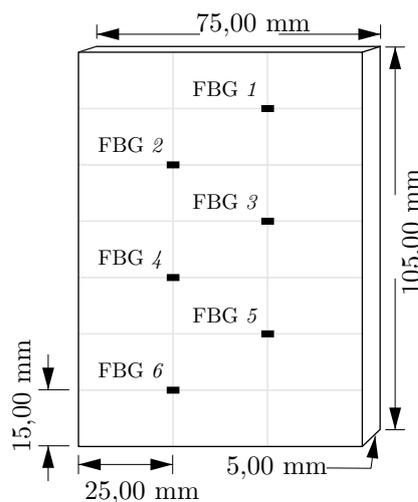


Figura 6 – Representação esquemática das dimensões da TSA e da localização das FBGs.

Definiu-se esse arranjo para as FBGs pensando em um sistema *quasi*-distribuído com número reduzido de transdutores. Após definida a quantidade de FBGs e a localiza-

ção de cada FBG na TSA realizou-se o processo de gravação e caracterização das FBGs. Em seguida, passou-se a etapa de encapsulação de uma FBG e caracterização do sensor para levantamento da sua resposta e sensibilidade a deformações e variações de temperatura. Finalmente, construiu-se a matriz de sensores e aplicou-se o método SDE para a reconstrução de forças aplicadas a mesma.

3.1 GRAVAÇÃO DAS REDES DE BRAGG

No processo de gravação das FBGs utilizou-se um sistema de gravação instalado no Laboratório de Fotônica (FOTON) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), representado no esquemático da Figura 7.

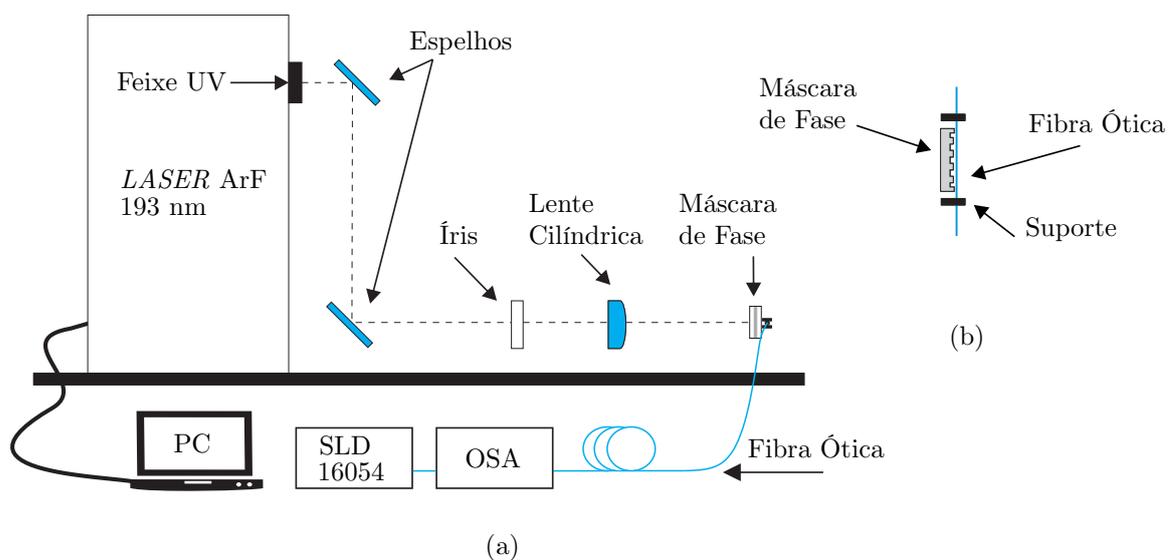


Figura 7 – (a) Representação esquemática do sistema de gravação de FBG (b) vista superior do suporte da máscara de fase e da fibra óptica.

A fonte ótica responsável pela emissão do feixe UV de gravação é um *laser* de excímero *ArF* (*Argon Fluoride*) (Coherent Xantos Xs) que opera em 193 nm. Nesse sistema, dois espelhos são utilizados para direcionar o feixe até uma íris. A íris seleciona parte do feixe laser que é focalizado por uma lente cilíndrica sobre a fibra. Nesse ponto o processo de gravação ocorre conforme descrito na subseção 2.1.4 (na página 32).

No decorrer do processo de gravação utilizou-se um analisador de espectro ótico (OSA do inglês *Optical Spectrum Analyzer*) (YOKOGAWA AQ6375) com resolução de 50 pm e uma fonte ótica SLD (em inglês *Superluminescent Diode*) (16054, THORLABS)

para acompanhar a formação da FBG por meio do seu espectro de reflexão. Durante todo esse processo buscou-se manter a temperatura da sala controlada, através da utilização de um aparelho de ar condicionado. Utilizou-se um termômetro químico com resolução de $\pm 0,5$ °C como referência até que a sala estivesse em $(22 \pm 0,5)$ °C.

Durante a gravação realizada ao longo de um tempo de exposição de aproximadamente 1 minuto, ajustou-se a energia do pulso do *laser* em 2,5 mJ e a frequência em 250 Hz.

A cada troca de máscara de fase preparou-se a fibra ótica para gravação realizando-se a remoção do acrilato, numa região maior do que o tamanho da máscara de fase. Após a remoção realizou-se a limpeza da fibra ótica com auxílio de lenços e álcool isopropílico, de modo a retirar impurezas e restos de acrilato.

Na gravação utilizou-se a fibra monomodo padrão (SSMF do inglês *Standard Single-Mode Fiber*) (G.652.B DRAKTEL), não hidrogenada, e seis máscaras de fase (IBSEN PHOTONICS), cada uma com um determinado *pitch*. Dessa forma é garantida uma faixa dinâmica de operação do sistema adequada a aplicação de tal forma que quando o sistema está sob ação de forças, o deslocamento do comprimento de onda de Bragg de uma dada FBG não venha a ocupar a posição espectral de outra FBG. Mais detalhes sobre a fibra ótica utilizada podem ser encontrados no Anexo A (na página 95).

A Tabela 1 apresenta os valores de *pitch* das máscaras utilizadas e os comprimentos de onda de Bragg resultantes do processo de gravação.

Tabela 1 – FBGs gravadas em $(22,0 \pm 0,5)$ °C.

FBG	<i>Pitch</i> da Máscara de Fase (nm)	λ_B (nm)
1	1050,80	1520,807
2	1053,10	1523,550
3	1055,20	1526,687
4	1057,90	1530,637
5	1060,00	1534,128
6	1062,50	1537,619

As máscaras de fase escolhidas permitem a gravação de redes de Bragg com separação espectral de aproximadamente 3 nm. A sobreposição das posições espectrais das FBGs, resultantes da variação de um determinado parâmetro externo, com as posições obtidas com o sistema relaxado ou sob a influência de uma variação do parâmetro com

outra magnitude consiste num problema na identificação de cada FBG. Por exemplo, se duas FBGs sofrem deslocamentos espectrais em direções opostas, pode ocorrer sobreposição na posição espectral da banda deslocada de uma das FBGs com a posição inicial da outra. Para minimizar esse efeito e permitir a viabilidade da aplicação da matriz de sensores táteis, foi escolhida uma separação espectral entre as FBGs de aproximadamente 3 nm, garantindo assim uma faixa dinâmica adequada de operação do sistema.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS REDES DE BRAGG

Após as gravações realizou-se o levantamento das características espectrais das FBGs e a caracterização em relação à deformação e à temperatura.

3.2.1 Determinação da Refletividade e Largura Espectral das FBGs

A norma IEC 61757-2 *FIBRE OPTIC SENSORS* apresenta que a refletividade de uma FBG (\mathfrak{R}_{FBG}) é a razão entre a potência ótica transmitida e a potência ótica refletida e pode ser determinada pela Equação 27,

$$\mathfrak{R}_{FBG} = \left(\frac{P_0 - P_{\lambda_B}}{P_0} \right) \times 100 \%, \quad (27)$$

onde P_0 é a potência ótica transmitida e P_{λ_B} é a potência ótica refletida no comprimento de onda central λ_B .

Os valores das potências óticas são obtidos conforme a Figura 8(a). Ainda, de acordo com a norma IEC 61757-2 a largura espectral de uma FBG é obtida conforme apresenta a Figura 8(b) (IEC 61757-2, 2016).

A norma IEC 61757-2 apresenta que a refletividade de uma FBG deve ser obtida em transmissão. Mas, as FBGs gravadas neste trabalho possuem baixas refletividades e não é possível realizar o cálculo em transmissão. Dessa forma, obteve-se a refletividade das FBGs em reflexão a partir da Equação 28:

$$\mathfrak{R}_{FBG} = \left(1 - \frac{P_0 - P_{\lambda_B}}{P_0} \right) \times 100 \% \quad (28)$$

A determinação da refletividade em reflexão é uma aproximação do valor real,

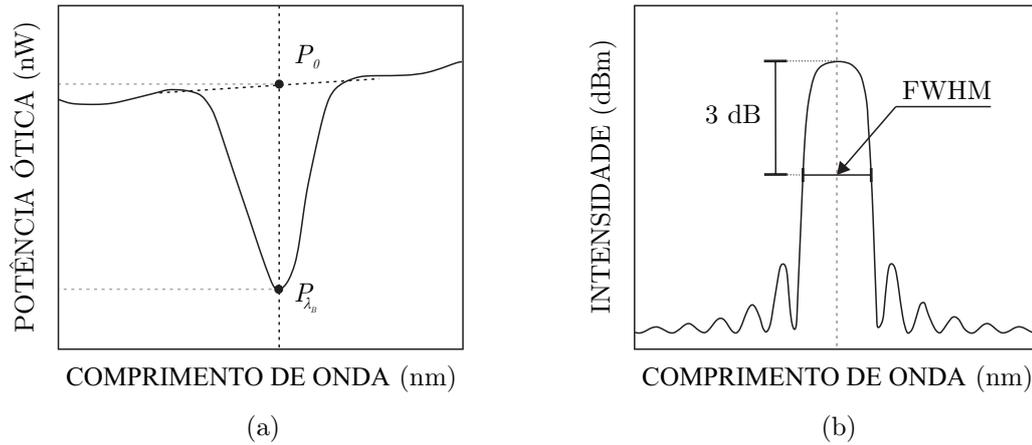


Figura 8 – Determinação da (a) refletividade e (b) largura espectral.

Fonte: Adaptado da IEC 61757-2: Strain Measurement - Part 2: Bragg Gratings (IEC 61757-2, 2016).

pois qualquer variação da fonte afeta diretamente no valor da refletividade.

Para obter os espectros em reflexão utilizou-se o OSA (ANRITSU MS9710B) com resolução inicialmente definida em 0,1 nm e com 1001 amostras e utilizou-se uma fonte ótica SLD (Superlum, Pilot-2) com FWHM de 73,8 nm e com comprimento de onda centrado em 1558,2 nm. As redes foram conectadas em um acoplador ótico juntamente com o OSA e a fonte SLD. A Figura 9(a) apresenta a refletividade para a FBG 3, que possui a maior refletividade dentre as FBGs deste trabalho. Dessa forma, todas as FBGs neste trabalho possuem refletividades menores que 5 %.

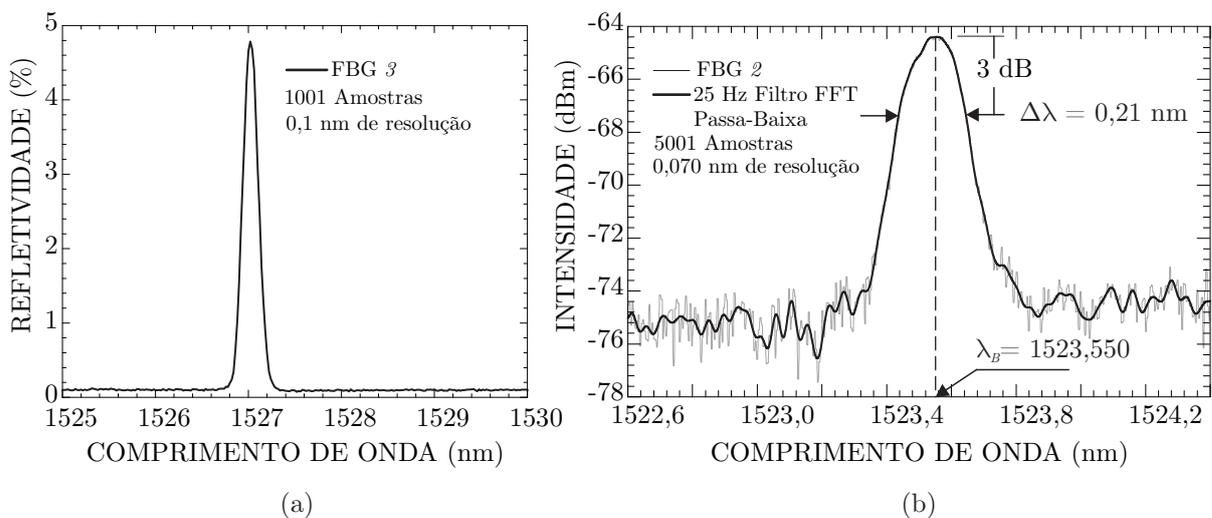


Figura 9 – (a) Refletividade da FBG 3 e (b) largura espectral da FBG 2.

Para a obtenção da largura espectral, a resolução do OSA foi alterada para

0,07 nm e o número de amostras alterado para 5001. Como resultado verificou-se que todas as FBGs usadas apresentam largura espectral de 0,21 nm. A Figura 9(b) apresenta o espectro da FBG 2 com a representação gráfica da obtenção da largura espectral.

A seguir serão apresentados os materiais e métodos aplicados na medição da resposta de uma FBG as deformações longitudinais (tração) e variações de temperatura. Todos os ensaios de deformação foram realizados com a temperatura da sala controlada em $(22 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$, a fim de reduzir o termo de sensibilidade cruzada.

3.2.2 Caracterização da FBG em Relação à Deformação Longitudinal

Para caracterizar a FBG em relação à deformação utilizou-se de um dispositivo (representado na Figura 10) capaz de tracionar a fibra.

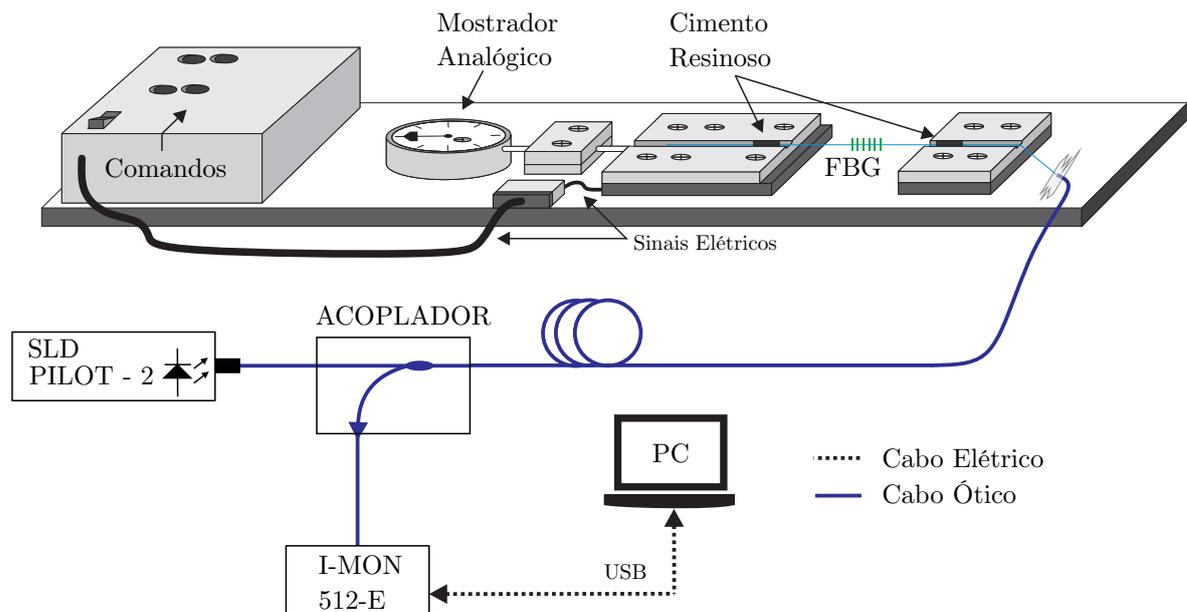


Figura 10 – Representação esquemática do sistema experimental usado para o ensaio em deformação.

Inicialmente, fixou-se a fibra no dispositivo tracionador. Para isso, realizou-se a limpeza e raspagem do suporte para obter melhor contato com o cimento resinoso. Logo após, retirou-se o acrilato da fibra e, então, com a utilização de álcool isopropílico e lenço realizou-se a limpeza para retirar resíduos. A remoção do acrilato se faz necessária para evitar que a fibra escorregue e comprometa o ensaio. Para a colagem utilizou-se cimento resinoso (RelyX U200, 3M) ativado com um fotopolimerizador (Ultraled, DABI

ATLANTE, $> 500 \text{ mW/cm}^2$ e comprimento de onda entre 460–490 nm). A secagem dura em torno de dez minutos, após esse tempo executaram-se os testes.

O equipamento para o ensaio em deformação aplica deslocamentos com resolução de 0,01 mm, podendo assim tracionar longitudinalmente a fibra. Inicialmente aplicou-se um pré estiramento para evitar flambagem na fibra e definiu-se uma referência no mostrador analógico. Em seguida mediu-se a distância inicial (L) entre os pontos de colagem com auxílio de um paquímetro com resolução de 0,05 mm.

Para esse ensaio aplicaram-se três ciclos de distensão e contração longitudinal da fibra, com deslocamentos a partir do tracionamento inicial de 0 a 0,15 mm com passos de 0,03 mm. Os ciclos de deformação foram realizados em condições de repetibilidade e precisão intermediária. A cada deslocamento anotou-se o comprimento de onda de Bragg central da FBG por meio do sistema de interrogação representado na Figura 10.

Para a determinação do comprimento de onda de Bragg usou-se uma fonte ótica SLD (Superlum, Pilot-2, FWHM de 73,8 nm e comprimento de onda centrado em 1558,2 nm) e um monitor interrogador (I-MON 512-E da IBSEN PHOTONICS, resolução menor do que 0,5 pm, frequência de operação de até 970 Hz e 512 amostras). O I-MON possui um *software* em LabVIEW® para aquisição dos dados, porém, neste trabalho recorreu-se ao uso do *software* QIMON¹ para plataforma LINUX. Mais detalhes sobre o interrogador podem ser encontrados na folha de dados no Anexo B (na página 96).

Após o experimento realizou-se um tratamento estatístico dos dados obtidos com o objetivo de determinar a incerteza nos valores medidos de comprimento de onda de Bragg da FBG (VUOLO, 1995).

A incerteza sistemática residual associada ao interrogador (σ_{r-imon}), cujo limite de erro é de $L_r = 0,5 \text{ pm}$, é dada pela Equação 29:

$$\sigma_{r-imon} = \frac{L_r}{2\sqrt{3}} = 0,144 \text{ pm} \quad (29)$$

A incerteza estatística, pressupondo uma distribuição de densidade gaussiana, é encontrada pela Equação 30,

$$\sigma_m = \frac{\sigma_e}{\sqrt{N_r}}, \quad (30)$$

¹ Desenvolvido por Lucas Hermann Negri (Professor no Instituto Federal do Mato Grosso do Sul)

onde a σ_m é o desvio padrão do valor médio, σ_e é o desvio padrão experimental e N_r é o número de medições em condições de repetibilidade (VUOLO, 1995).

Além da incerteza do interrogador existem as incertezas associadas com a medição do comprimento livre da fibra e com os deslocamentos. Estas incertezas estão relacionadas com o paquímetro, usado na medição do comprimento inicial da porção livre da fibra, e com o micrômetro do dispositivo tracionador.

A incerteza padrão combinada σ_d associada com a determinação da deformação relativa em microstrain é dada pela Equação 31 (VUOLO, 1995),

$$\sigma_d = \frac{\Delta L}{L} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\Delta L}}{\Delta L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_L}{L}\right)^2}, \quad (31)$$

onde $\Delta L = 0,03$ mm e $L = 83,1$ mm, e as incertezas nas medições de ΔL e de L são calculadas combinando as incertezas sistemática residual e estatística estimada do paquímetro e do micrômetro, dadas pelas Equações 32 e 33,

$$\sigma_L = \sqrt{\left(\frac{L_{r-paq}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{L_{e-paq}}{3}\right)^2}, \quad (32)$$

$$\sigma_{\Delta L} = \sqrt{\left(\frac{L_{r-micr}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{L_{e-micr}}{3}\right)^2}, \quad (33)$$

onde $L_{r-micr} = 0,01$ mm, $L_{r-paq} = 0,05$ mm são os limites de erro residual do micrômetro e do paquímetro, respectivamente. Os limites de erro estatístico estimado são e $L_{e-micr} = 0,01$ mm e $L_{e-paq} = 0,05$ mm. A incerteza na determinação da deformação relativa em microstrain σ_d (incerteza na grandeza do *eixo x*) pode ser transformada para uma incerteza σ'_d em comprimento de onda (incerteza do *eixo y*). Para tanto, deve-se multiplicá-la pela sensibilidade inicial S_i , conforme apresenta a Equação 34:

$$\sigma'_d = S_i \sigma_d \quad (34)$$

Por consequência, a incerteza padrão final dos valores de comprimento de onda de Bragg para o ensaio de deformação (σ_{pd}) é obtida pela Equação 35,

$$\sigma_{pd} = \sqrt{\sigma_{m-rep}^2 + \sigma_{m-pi}^2 + \sigma'_d{}^2 + \sigma_{r-imon}^2}, \quad (35)$$

onde σ_{m-rep} é o valor da incerteza estatística em condições de repetibilidade e σ_{m-pi} é o valor da incerteza estatística em condições de precisão intermediária.

Após a análise das incertezas utilizou-se o *software* Origin® para ajustar aos pontos experimentais a curva de calibração e obter a sensibilidade final da FBG a deformação longitudinal. As curvas de resposta e de calibração estão apresentadas na Figura 11.

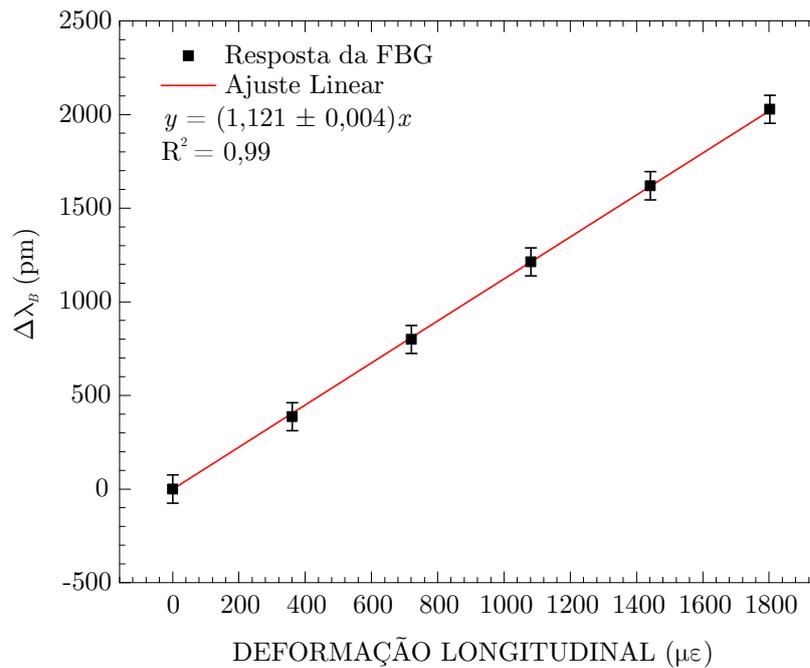


Figura 11 – Curvas de resposta e de calibração para o ensaio de deformação longitudinal.

A sensibilidade final obtida para o ensaio em deformação é de $S_d = (1,121 \pm 0,004) \text{ pm}/\mu\epsilon$.

Embora o parâmetro de interesse na FBG seja a deformação o parâmetro temperatura não pode ser desprezado, devido ao termo de sensibilidade cruzada. Então, a subseção seguinte apresenta o levantamento da sensibilidade térmica de uma das FBGs gravadas.

3.2.3 Caracterização da FBG em Relação à Variação de Temperatura

Para medir a resposta da FBG a variações de temperatura utilizou-se um banho termostático (LAUDA Ecoline Staredition RE 212 J, resolução de 0,01 °C). As características do banho termostático estão apresentadas no Anexo C (na página 97).

Realizou-se experimento anterior em temperatura controlada em $(22 \pm 0,5) \text{ °C}$ de

forma a reduzir os efeitos de sensibilidade cruzada. Agora para o ensaio em temperatura o efeito a ser minimizado é o de deformação. Portanto, um suporte com um tubo de ensaio foi utilizado para manter a FBG dentro do banho termostático sob tração mecânica longitudinal constante e livre de vibrações mecânicas externas. O sistema de aquisição de dados com a representação esquemática banho termostático da montagem experimental é apresentada na Figura 12.

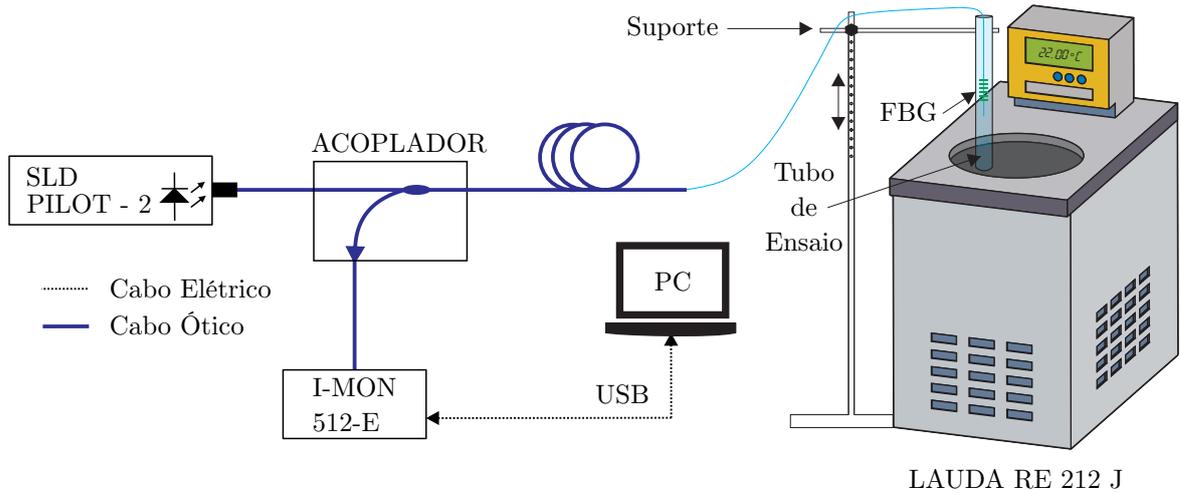


Figura 12 – Representação esquemática do sistema experimental usado para o ensaio de temperatura.

Definiu-se uma faixa de variação de temperatura de 20 a 40 °C com passos de 5 °C. Realizou-se a aquisição dos dados em repetibilidade e precisão intermediária em um ciclo de subida e descida de temperatura. O processo de resfriamento do banho termostático é lento e por esse motivo escolheu-se apenas um ciclo em precisão intermediária.

A incerteza residual associada ao I-MON é $\sigma_{r-imon} = 0,144$ pm conforme calculado anteriormente na subseção 3.2.2. Para o banho termostático, a incerteza sistemática residual é $\sigma_{r-lauda} = 2,89 \times 10^{-3}$ °C.

Transferiu-se a incerteza na temperatura em unidades de graus para incerteza em unidades de comprimento de onda por meio da Equação 36.

$$\sigma'_T = S_i \sigma_{r-lauda} \quad (36)$$

A incerteza padrão final na medição do comprimento de onda de Bragg da FBG

é obtida através da Equação 37:

$$\sigma_{pT} = \sqrt{\sigma_{m-rep}^2 + \sigma_{m-pi}^2 + \sigma_T'^2 + \sigma_{r-imon}^2}, \quad (37)$$

Novamente, recorreu-se ao *software* Origin® para ajustar a curva de calibração aos pontos experimentais e obter a sensibilidade final em temperatura. As curvas de resposta e de calibração estão representadas na Figura 13.

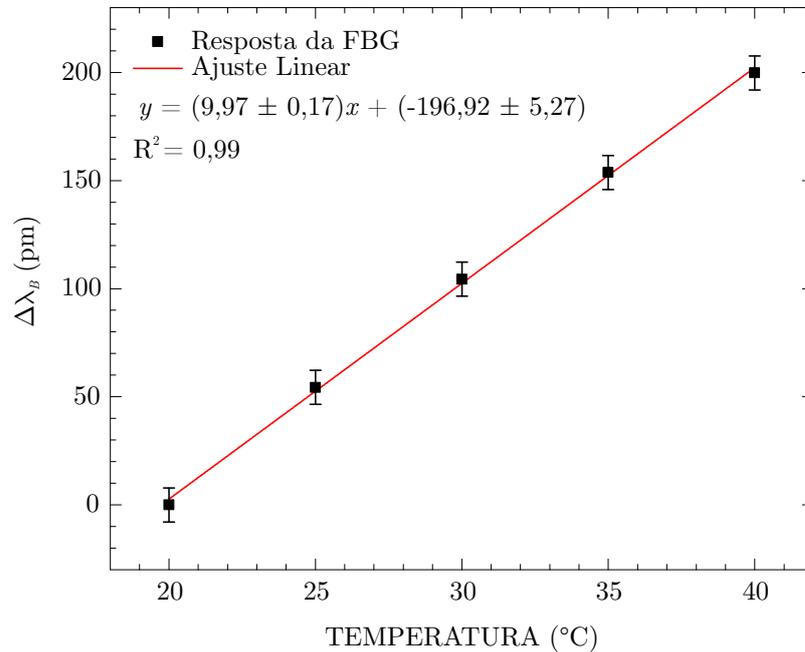


Figura 13 – Curvas de resposta e de calibração para o ensaio de temperatura.

Como exibido na Figura 13, a sensibilidade em temperatura encontrada através da curva de calibração é de $S_T = (9,97 \pm 0,17) \text{ pm}/^\circ\text{C}$.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DE UMA REDE DE BRAGG ENCAPSULADA

3.3.1 Processo de Encapsulação

Após realizadas as gravações e caracterizações realizou-se a etapa de encapsulação. Para encapsular a FBG corretamente projetou-se um molde 3D em CAD (em inglês *Computer Aided Design*). A Figura 14 mostra as dimensões do molde.

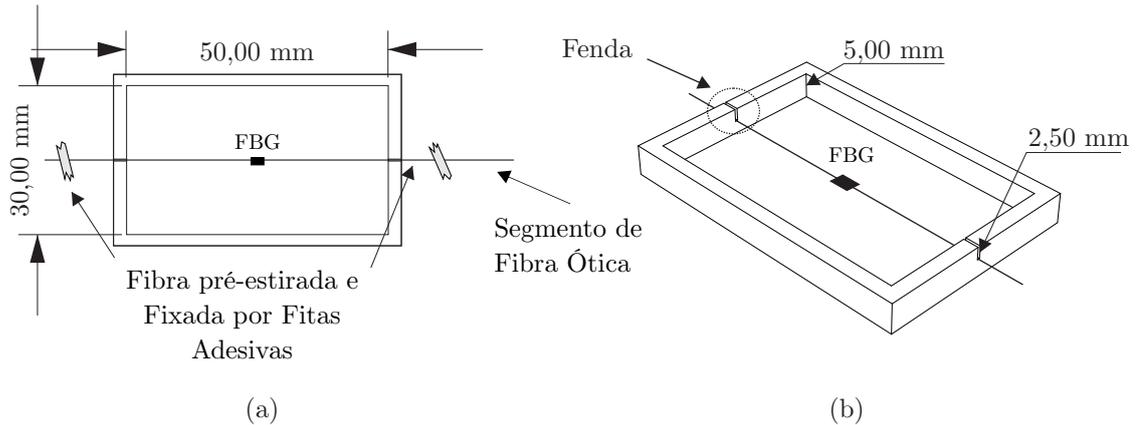


Figura 14 – Representação esquemática do molde utilizado para encapsular uma FBG. (a) Vista Superior e (b) Vista Isométrica.

O projeto foi confeccionado através de uma impressora 3D (resolução de 0,1 mm) pelo GIP3D da UTFPR utilizando filamento de ABS (em inglês *Acrylonitrile Butadiene Styrene*) de 1,75 mm. A utilização de tecnologia de impressão 3D simplifica o processo de produção de elementos com requerimentos específicos de projeto. Aproveitando-se dessa vantagem da impressão em 3D, projetou-se fendas nas paredes do molde para que o segmento de fibra óptica contendo a FBG ficasse no meio do encapsulamento e, dessa forma, fosse obtida a melhor proteção da rede de Bragg. Nesse processo o molde foi de suma importância para manter a FBG no meio da espessura do encapsulamento a uma distância de 2,5 mm das superfícies.

Encapsulou-se uma FBG (1535,921 nm) em borracha de silicone (DOW CORNING® BX3-8001: Silastic® 81 NW com pigmento azul e dureza de 13,6 *Shore A*), produzida de acordo com a folha de dados do fabricante (fornecida no Anexo D, na página 98). Adicionalmente, aplicou-se no processo de produção da borracha uma proporção de 1 : 1 de quartzo em pó. Esse processo aumenta a dureza do material e evita danos as FBGs encapsuladas. Com essa configuração, não se levantou qual é a escala de dureza do material visto que o objetivo era a encapsulação para manter a integridade das FBGs. O processo de fabricação da borracha de silicone está representado na Figura 36 do Apêndice B (na página 91), onde os materiais e procedimentos necessários para a produção estão apresentados de forma gráfica.

Sendo assim, para a encapsulação, primeiramente fixou-se o molde em uma superfície plana e nivelada, e com o auxílio de um lenço de papel e álcool isopropílico retirou-se todas as impurezas de dentro do molde e da superfície da fibra óptica. A segunda etapa

constituiu-se em posicionar a FBG conforme a Figura 14, nessa etapa aplicou-se um pré-estiramento na fibra ótica prendendo-a por meio de fitas adesivas para não ocorrer o efeito de flambagem. Na terceira e última etapa fabricou-se a mistura da borracha de silicone e depositou-se lenta e uniformemente sobre o molde.

Após esses procedimentos aguardaram-se 24 horas antes da desmoldagem, a qual ocorre de forma simples visto que a borracha utilizada neste trabalho não adere no ABS.

A superfície em contato com o molde é livre de irregularidades e por esse motivo utilizou-se como superfície de sensoriamento.

Em seguida, conectorizou-se uma das pontas da FBG encapsulada, formando uma célula de caracterização. Projetou-se essa célula para inicialmente verificar as propriedades elásticas do material e também as sensibilidades da FBG quando encapsulada.

3.3.2 Caracterização de uma FBG Encapsulada em Relação às Cargas Aplicadas

Para a aplicação de cargas utilizou-se o sistema da Figura 15 contendo um motor DC (em inglês *Direct Current*) com uma caixa de redução. Realizou-se o processo do controle do motor através de um micro controlador (PIC18F4550, MICROCHIP), enviando os comandos de uma interface. A massa aplicada é medida pela célula de carga, conforme esquematizado na Figura 15.

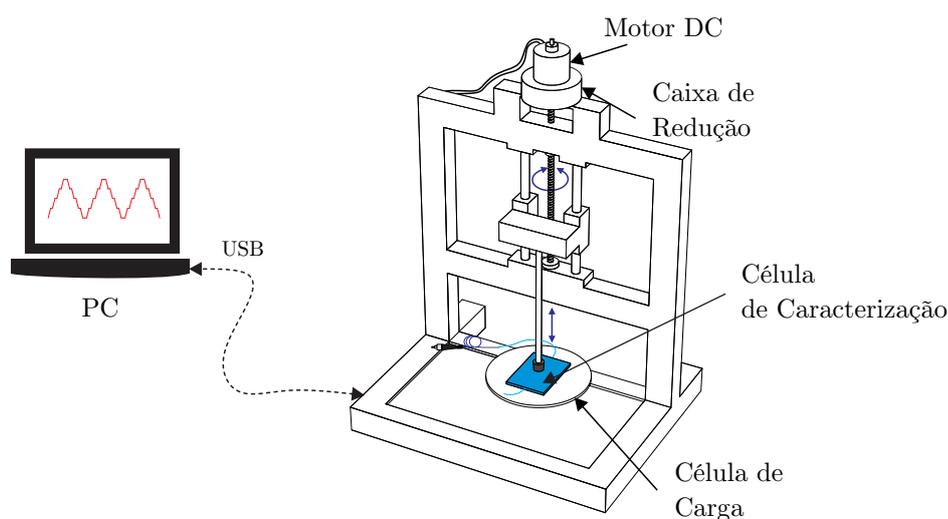


Figura 15 – Sistema de estágio Z utilizado para avaliar a resposta da FBG encapsulada em relação às cargas aplicadas perpendicularmente à fibra.

O limite de 250 g imposto pelo sistema é suficiente para analisar forças táteis.

Dessa forma, aplicaram-se cargas com massa de até 250 g com passos de 25 g.

A cada 25 g realizou-se 15 aquisições com o interrogador de redes I-MON para a análise de dados em repetibilidade e efetuou-se três ciclos de aumento e diminuição da carga para análise em precisão intermediária. Aplicaram-se cargas no centro da célula de caracterização numa área circular com diâmetro de $(20 \pm 0,05)$ mm contendo uma das FBGs.

Após a coleta de dados estimaram-se as incertezas nas medições. A incerteza residual da célula de carga do sistema de estágio Z (σ_Z) é de 1,5 g e deve-se converter para unidade de comprimento de onda. Para isso encontrou-se a sensibilidade inicial do sistema e através da Equação 38 encontrou-se a incerteza na massa em unidade de comprimento de onda σ'_Z .

$$\sigma'_Z = S_i \sigma_Z \quad (38)$$

Para os testes da FBG encapsulada levou-se em consideração a expansão térmica (σ_s) da borracha que neste trabalho é de $\sigma_s = 0,98$ pm para uma variação térmica de $\pm 0,5$ °C, visto que a temperatura da sala foi controlada em $(22 \pm 0,5)$ °C.

Dessa forma, a incerteza padrão final na determinação do comprimento de onda de Bragg da FBG com o ensaio de cargas é encontrada através da Equação 39:

$$\sigma_{pZ} = \sqrt{\sigma_{m-rep}^2 + \sigma_{m-pi}^2 + \sigma_S^2 + \sigma'_Z{}^2 + \sigma_{r-imon}^2} \quad (39)$$

Após a análise das incertezas fez-se o uso do *software* Origin® para realizar um ajuste na curva de resposta obtida (Figura 16). A derivada da função de ajuste resulta na sensibilidade da FBG as cargas aplicadas sobre a superfície do encapsulamento em pm/g.

Obteve-se uma sensibilidade de $S_Z = (0,371 \pm 0,003)$ pm/g. Além da sensibilidade analisaram-se outros parâmetros, tais como linearidade, resolução e histerese.

A linearidade é a máxima variação entre os pontos experimentais e a curva de calibração (IEC 61298-2, 2008).

A histerese é o máximo valor obtido pela soma aritmética das variações absolutas entre os pontos experimentais das curvas de subida e de descida em relação à curva de calibração dentro do intervalo de medida (IEC 61298-2, 2008).

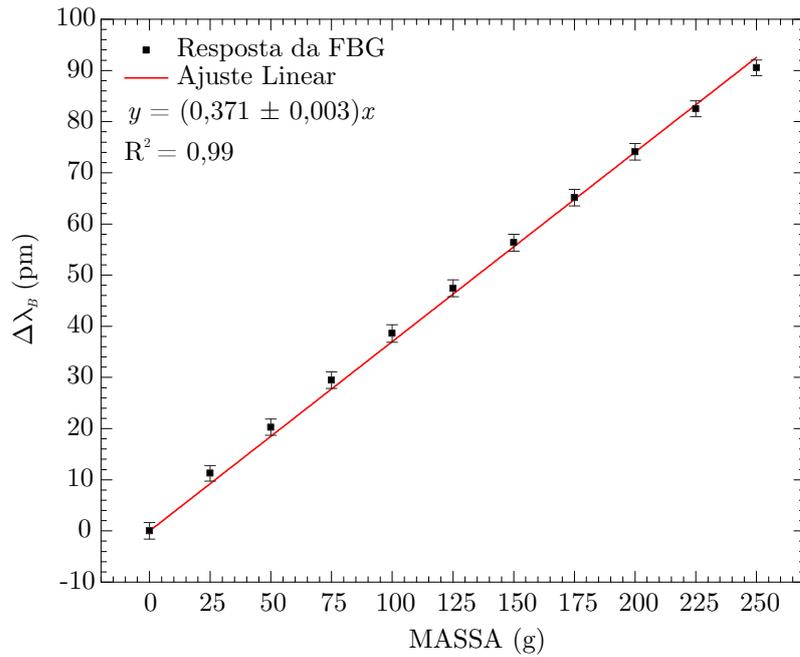


Figura 16 – Curvas de resposta e de calibração para célula de caracterização em deformação.

A Tabela 2 apresenta as características metrológicas de uma FBG encapsulada em borracha de silicone.

Tabela 2 – Características metrológicas de deformação da célula de caracterização.

Característica Metrológica	Célula de Caracterização
Intervalo de medida	0 – 250 g
R^2	0,999
Sensibilidade (pm/g)	$0,371 \pm 0,003$
Resolução (g)	$1,350 \pm 0,390$
Linearidade (%)	$\pm 2,42$
Histerese (%)	$\pm 4,33$

Observa-se pela Tabela 2 que a maior contribuição de erro na célula de caracterização é da histerese. A resolução do sistema é obtida considerando a resolução de 0,5 pm do interrogador de redes I-MON.

Após a análise das características metrológicas da célula de caracterização, realizou-se a análise temporal da resposta da célula. Para isso utilizou-se uma carga cilíndrica de massa padrão de 200 g aplicada e retirada da posição central da célula em intervalos de 10 s. Esse processo foi repetido 5 vezes.

Utilizou-se como área de contato entre carga aplicada e superfície do sensor uma

moeda de 10 centavos com diâmetro (\varnothing) de $(20 \pm 0,05)$ mm, espessura de $(2,20 \pm 0,05)$ mm e massa de $(4,85 \pm 0,01)$ g. A massa da moeda não foi considerada nas respostas das FBGs, pois adquiriu-se uma referência quando a moeda estava sobre a célula de caracterização, processo análogo à tara em balanças. Utilizou-se de uma área de contato, pois diferentes cargas possuem diferentes áreas de contato. Dessa forma, neste trabalho utilizou-se da área de contato toda vez que se fez o uso das cargas cilíndricas.

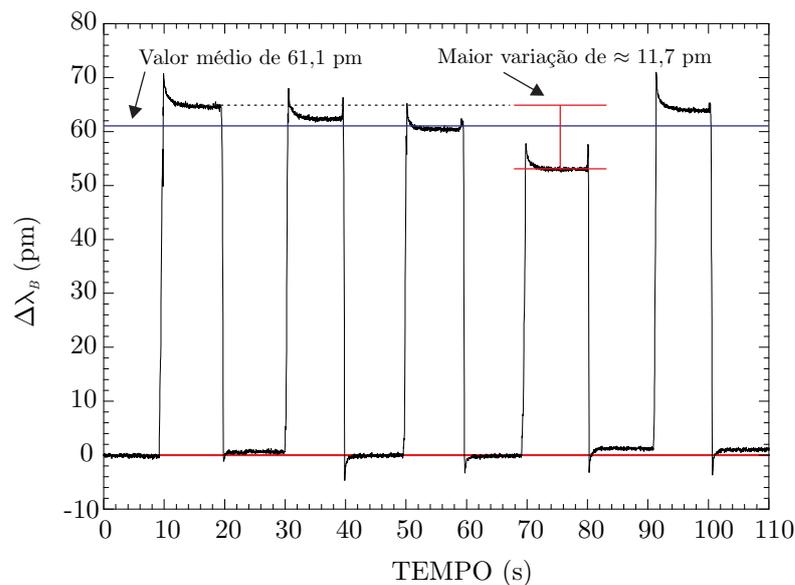


Figura 17 – Análise temporal da aplicação de uma carga de 200 g na célula de caracterização.

Durante os testes percebeu-se que uma pequena mudança no posicionamento da carga sobre a moeda resulta em variações do comprimento de onda. Na Figura 17 observa-se que a maior variação de comprimento de onda é aproximadamente 11,7 pm. O deslocamento de comprimento de onda médio obtido na análise temporal foi de 61,1 pm. O maior erro relativo percentual em relação à média foi de 12,68 %.

Com relação ao retorno as condições iniciais, isto é, quando a carga é removida observa-se que a partir de 80 s (Figura 17), há uma variação de aproximadamente 1 pm, que é resultado da expansão térmica e histerese do material.

A maior contribuição da variação nos picos deve-se à aplicação da carga, realizada manualmente. Diferente da aplicação pelo estágio Z a aplicação manual apresenta maior erro de posicionamento sobre a área de contato resultando, assim, num erro maior em comprimento de onda.

Adicionalmente, verificou-se o tempo de resposta da célula de caracterização em relação à uma carga com massa de 200 g. O tempo de resposta pode ser determinado pelo tempo de subida e de descida. Defini-se como tempo de subida T_s o tempo necessário para que a resposta aumente de 10 a 90 % do seu valor máximo. O tempo de descida T_D é o tempo para que a resposta decaia de 90 a 10 % do seu valor máximo (GOLNARAGHI; KUO, 2010).

Para a análise temporal aplicou-se a carga no centro da célula de caracterização e retirou-se rapidamente após um intervalo de tempo. As respostas da aplicação e remoção da carga podem ser observadas na Figura 18.

Neste teste a taxa de aquisição de dados do interrogador de redes (I-MON) foi de 100 Hz.

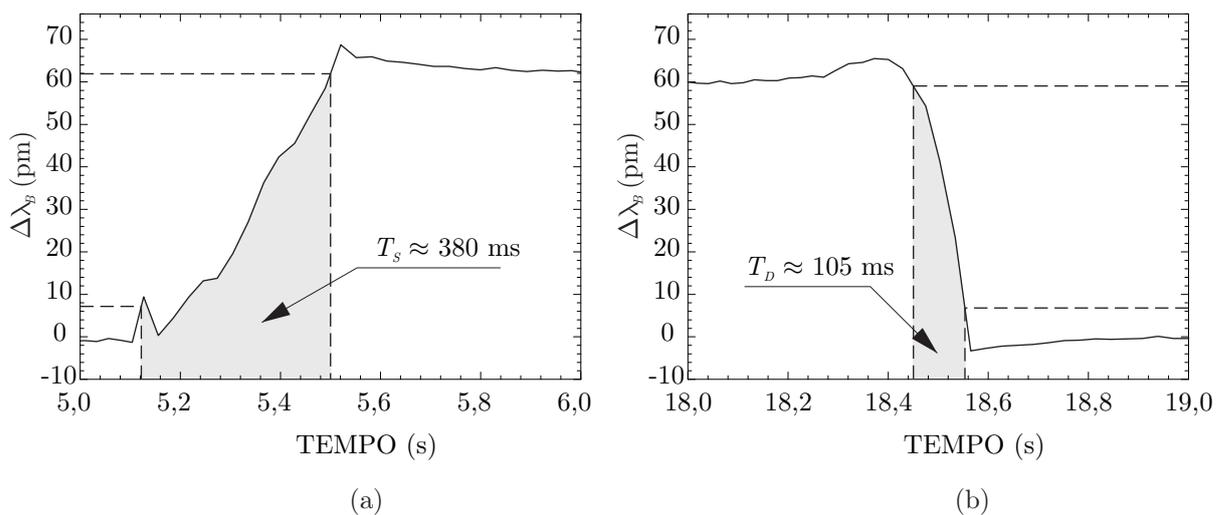


Figura 18 – (a) Tempo de subida e (b) tempo de descida quando uma carga de 200 g é aplicada na célula de caracterização.

A carga de 200 g é a maior carga cilíndrica dentro do intervalo de medição (0 a 250 g) por esse motivo utilizou-se essa para as análises da resposta temporal do sensor.

O tempo de subida quando uma carga de 200 g é aplicada na célula de caracterização foi de 380 ms, conforme mostra a Figura 18 e o tempo de descida foi de 105 ms (Figura 18(b)). Esses resultados apresentam o tempo de resposta da célula de caracterização. Em geral, o tempo de subida e de descida fornecem uma completa caracterização da FBG dentro da borracha de silicone.

3.3.3 Caracterização de uma FBG Encapsulada em Relação à Variações de Temperatura

A FBG é um sensor multiparâmetro, que resulta numa sensibilidade cruzada. Devido à isso, levantou-se a resposta da célula de caracterização quando submetida a variações de temperatura. O experimento foi o mesmo da subsecção 3.2.3 (na página 48) com adição do efeito da expansão térmica da borracha de $\sigma_s = 0,98$ pm para uma variação térmica de $\pm 0,5$ °C.

A incerteza padrão para a caracterização de uma FBG encapsulada em relação à temperatura é obtida pela Equação 40:

$$\sigma_{pTe} = \sqrt{\sigma_{m-rep}^2 + \sigma_{m-pi}^2 + \sigma_s^2 + \sigma_T'^2 + \sigma_{r-imon}^2} \quad (40)$$

Após a análise das incertezas realizou-se um ajuste na curva de resposta obtida. A derivação da curva de calibração resulta na sensibilidade da célula de caracterização em pm/°C.

O gráfico da Figura 19 apresenta um incremento na sensibilidade térmica. A sensibilidade das FBGs gravadas neste trabalho é de $S_T = (9,97 \pm 0,17)$ pm/°C. Com a encapsulação a sensibilidade térmica é de $S_{Te} = (13,96 \pm 0,21)$ pm/°C.

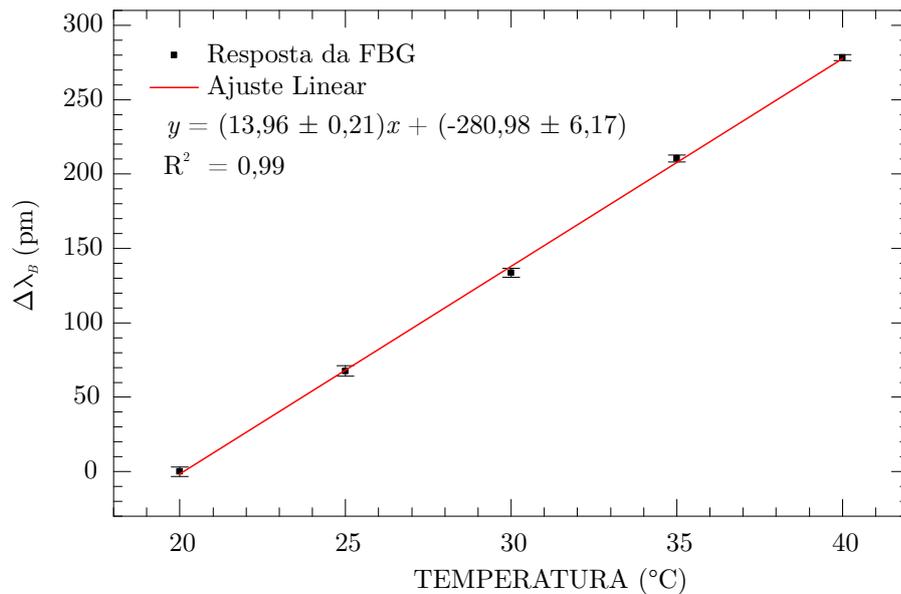


Figura 19 – Curvas de resposta e de calibração para célula de caracterização em temperatura.

O incremento da sensibilidade térmica ocorre devido à influência da expansão

térmica do material. Mas, a borracha de silicone possui baixo valor de condutividade térmica, o que torna a resposta mais lenta em relação à uma FBG sem a encapsulação (NEDOMA et al., 2016; PARK et al., 2011).

Para verificar o tempo de resposta da FBG encapsulada submeteu-se a célula de caracterização a uma variação de $(3,0 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$. Para isso utilizou-se o sistema da Figura 12 (na página 12). Inicialmente configurou-se a temperatura do banho termostático em $(23,00 \pm 0,01) \text{ }^\circ\text{C}$ e a temperatura ambiente em $(20,0 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$ com a ajuda de um aparelho de ar condicionado. Em seguida a célula que estava em $20 \text{ }^\circ\text{C}$ foi mergulhada no banho termostático em $23 \text{ }^\circ\text{C}$ com ajuda de um suporte. Monitorou-se a resposta da FBG num período de tempo de 125 s.

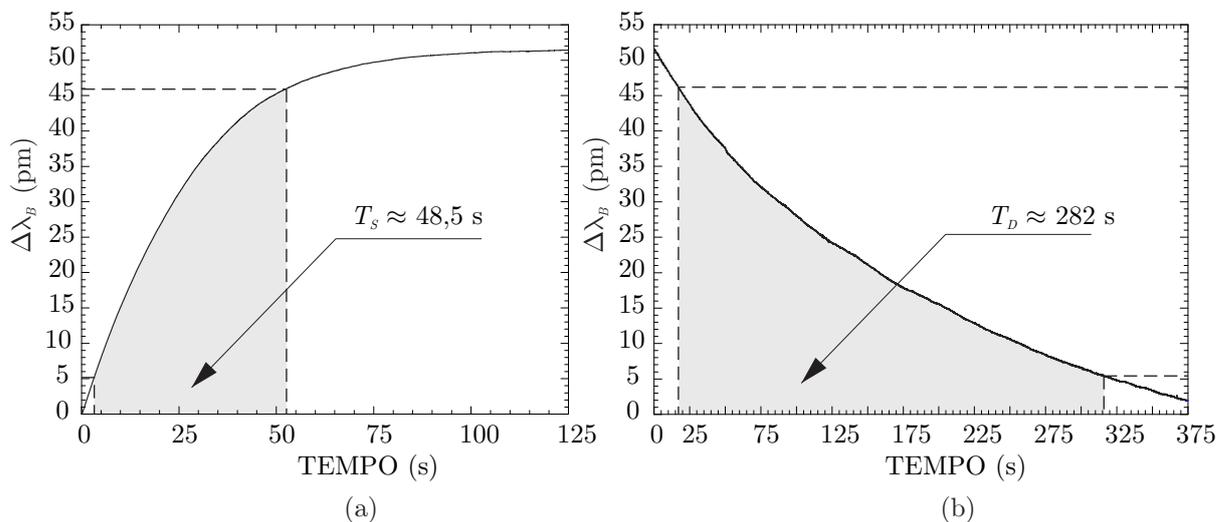


Figura 20 – (a) Tempo de subida e (b) tempo de descida quando uma variação de temperatura de $3 \text{ }^\circ\text{C}$ é aplicada na célula de caracterização.

Após esse tempo retirou-se cuidadosamente a célula retornando-a para a temperatura da sala em $(20,0 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$ e anotou-se a resposta da FBG por 375 s.

Novamente calcularam-se os tempos de subida e descida da resposta da FBG. O tempo de subida obtido foi de aproximadamente 48,5 s e de descida foi aproximadamente 282 s, conforme mostra a Figura 20. Observa-se que o tempo de resposta é lento para uma variação de $3 \text{ }^\circ\text{C}$. Dessa forma, verifica-se que o efeito da expansão térmica é um processo lento e que pode ser controlado, através da utilização de um aparelho de ar condicionado.

3.4 PRODUÇÃO DA MATRIZ DE SENSORES TÁTEIS

A célula de caracterização serviu como base de estudos para compreender o comportamento da FBG dentro da borracha. Para a produção da matriz de sensores, assim como apresentado na Figura 6 (na página 40), projetou-se em *software* do tipo CAD um novo molde.

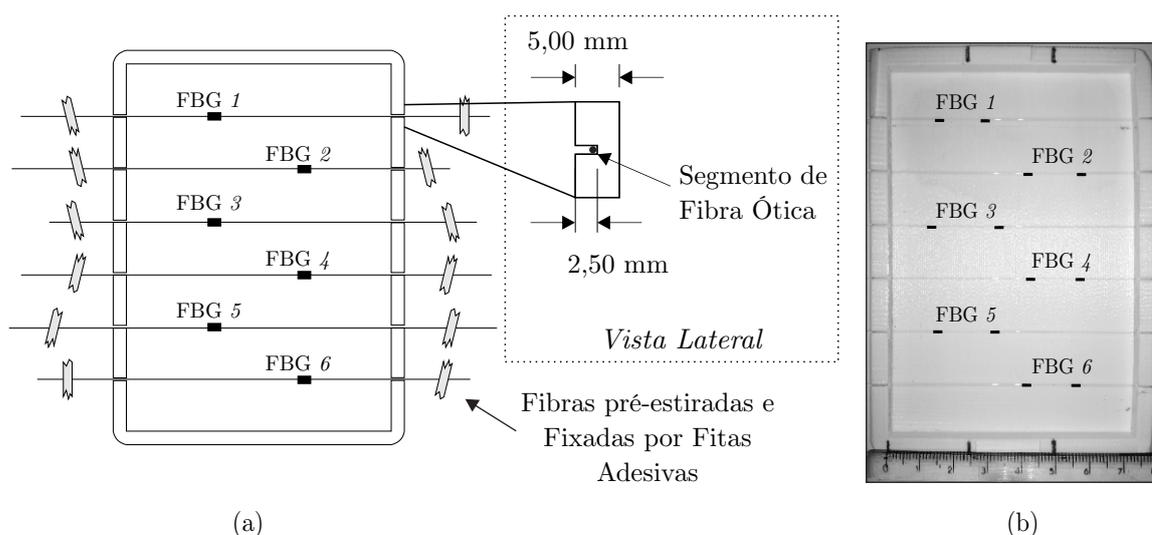


Figura 21 – (a) Representação esquemática da disposição das FBGs no molde, (b) posição real das FBGs no molde.

O processo de encapsulação ocorre como descrito na subseção 3.3.1 (na página 50), porém o molde possui dimensões internas de $(75 \times 105 \times 5)$ mm e as FBGs foram posicionadas conforme a Figura 21.

Tal como no processo de encapsulação para uma FBG, posicionou-se cada fibra ótica contendo uma FBG através de duas fendas paralelas e, então, aplicou-se um pré-tensionamento que foi mantido com fitas adesivas.

Na Figura 21(b) percebe-se que as FBGs, localizadas entre os dois pontos realçados na figura, não estão completamente alinhadas verticalmente.

Após dispor todas as fibras no molde, produziu-se a mistura de borracha de silicone com adição de quartzo em uma proporção de 1:1. O processo de produção da borracha está apresentado no Apêndice B, Figura 36. Após a preparação da mistura da borracha, essa foi cuidadosamente derramada no molde para evitar a formação de bolhas de ar. Novamente, aguardou-se 24 horas para retirar do molde. O processo de retirada do molde é simples, pois o ABS não adere com a borracha de silicone. A superfície

da borracha que fica em contato com o molde é utilizada como área de sensoriamento por apresentar maior regularidade.

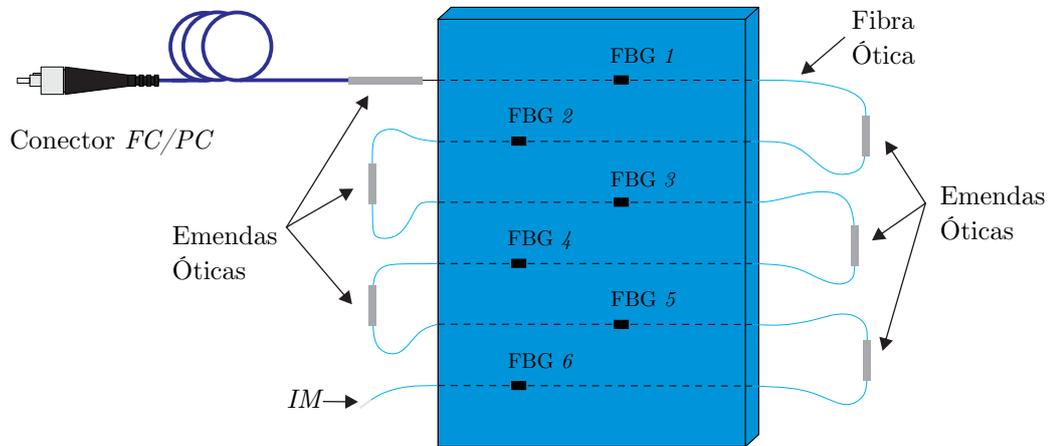


Figura 22 – Representação esquemática da matriz de sensores táteis.

Após o processo de encapsulação realizou-se a conectorização dos segmentos de fibra óptica e, enfim, obteve-se a matriz de sensores táteis representada no diagrama esquemático da Figura 22. Para conectar a matriz de sensores no acoplador utilizou-se o conector do tipo FC/PC (em inglês *Ferrule Connector/Physical Contact*) e emendas óticas foram realizadas com auxílio de uma máquina de emenda por fusão (Fujikura, modelo FSM-60S). Para proteção das emendas utilizou-se tubetes termo retráteis com elemento metálico embutido. Além disso, aplicou-se um gel casador de índice (IM do inglês *Index Matching*) na ponta da fibra para minimizar as reflexões de Fresnel.

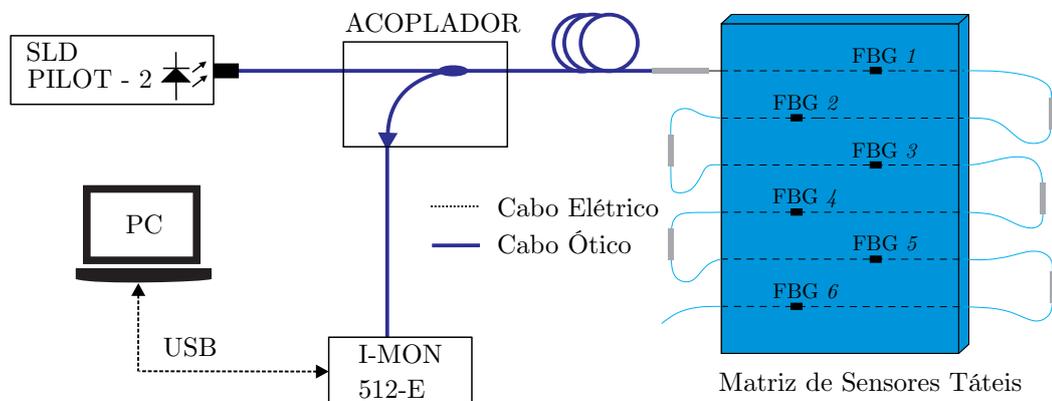


Figura 23 – Sistema de sensoriamento tátil *quasi*-distribuído.

A TSA juntamente com o sistema de interrogação formam o sistema de sensori-

amento tátil *quasi*-distribuído representado na Figura 23.

Após a montagem do sistema, iniciou-se a etapa de levantamento das características de operação do sistema de sensoriamento tátil construído.

3.5 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DA TSA

Na subsecção 3.3.2 (na página 52) apresentou-se a caracterização de uma única FBG encapsulada. Contudo, a TSA possui 6 FBGs que irão responder, simultaneamente e com diferentes intensidades, as deformações causadas por cargas aplicadas em diferentes posições do plano da superfície da TSA. Então, para avaliar o acoplamento das respostas das FBGs da TSA repetiu-se o experimento com o estágio *Z* (veja a Figura 10, na página 45), aplicando cargas de 0 a 250 g no centro da TSA.

Escolheu-se o centro da matriz de sensores táteis, pois esse ponto encontra-se sobre o eixo de simetria da distribuição espacial das FBGs na TSA.

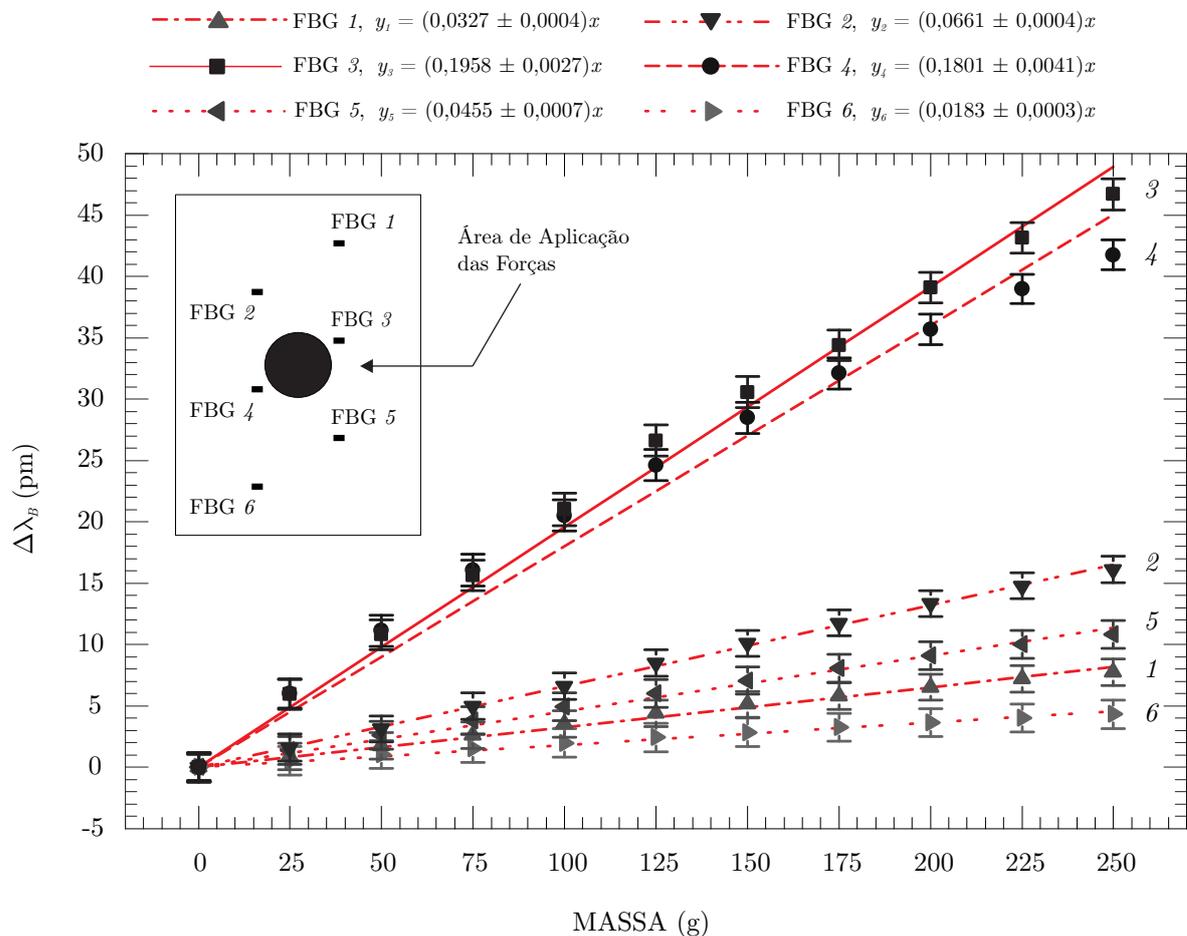


Figura 24 – Análise de linearidade das FBGs na TSA.

Para a faixa de cargas aplicadas, cinco das FBGs apresentam respostas lineares, conforme mostrado na Figura 24. A FBG 4 foi a única a apresentar um comportamento levemente não-linear, que pode ter sido originado por bolhas de ar formadas dentro da borracha durante a fabricação. O processo de fabricação não elimina totalmente as bolhas no material. Um processo ideal envolveria submeter a mistura da borracha de silicone em uma câmara a vácuo durante um período de 3 a 5 minutos para retirada total das bolhas.

Assim como esperado, as FBGs mais próximas do ponto de aplicação das cargas, FBGs 3 e 4, apresentaram maior sensibilidade. Observa-se, também, que as sensibilidades diminuem com o aumento da distância da FBG ao ponto de aplicação da carga. Quanto as FBGs posicionadas simetricamente com relação ao ponto central da TSA, FBGs 2 e 5, e FBGs 1 e 6, as sensibilidades chegam a apresentar valores 1,8 vezes maiores. Deve-se lembrar, no entanto, que as FBGs foram posicionadas manualmente no molde para encapsulação, portanto, não são perfeitamente simétricas com relação ao centro da TSA, como mostra a Figura 21(b) (na página 59). Além disso, a resolução da impressora 3D é de 0,1 mm. Dessa forma, as fendas podem ter $(0,25 \pm 0,1)$ mm de comprimento, fazendo com que algumas FBGs fiquem mais próximas da superfície de sensoriamento do que outras. Esses fatores explicam as diferenças de sensibilidade observadas. A informação mais importante extraída do resultado da Figura 24 diz respeito ao acoplamento do sistema, ou seja, verifica-se que todas as FBGs respondem às cargas de 25 g a 250 g aplicadas no centro da TSA. A Tabela 3 apresenta os valores de sensibilidade obtidos e a distância relativa das FBGs ao local da aplicação das cargas.

Tabela 3 – Sensibilidades obtidas da aplicação de cargas no centro da TSA.

FBG	Sensibilidade (pm/g)	R ²	Distância Relativa (mm)
1	$0,0327 \pm 0,0004$	0,998	39,53
2	$0,0661 \pm 0,0004$	0,999	25,74
3	$0,1958 \pm 0,0027$	0,998	14,58
4	$0,1801 \pm 0,0041$	0,994	14,58
5	$0,0455 \pm 0,0007$	0,998	25,74
6	$0,0183 \pm 0,0003$	0,998	39,53

Embora a FBG 4 possua pontos fora da curva de calibração o coeficiente de correlação entre os pontos e a curva de calibração é de 99,4 % considerando as barras de erro. As demais FBGs apresentaram valores maiores ou iguais a 99,8 % de correlação.

A aplicação do método SDE requer que alguns critérios sejam satisfeitos. O sistema deve apresentar linearidade e o vetor de cargas aplicadas deve ser esparso. Quanto a linearidade, pode-se analisar um sistema considerando as propriedades de homogeneidade e aditividade.

3.5.1 Homogeneidade

Supondo um sistema H cuja entrada é X e a saída é Y , se a entrada for multiplicada por um constante k_x então a saída é multiplicada por uma constante k_y . Em um sistema totalmente homogêneo $k_x = k_y$.

A partir dos dados da Figura 24 analisou-se a homogeneidade das respostas das FBGs da TSA. Considera-se como entrada inicial a carga de 25 g. A próxima entrada é 50 g, isto é, $k_x = 2$ e assim por diante até a carga de 250 g. Os fatores de multiplicação entre as entradas k_x e saídas k_y para a FBG 3, como exemplo, são apresentados na Tabela 4 com os erros relativos (ϵ). A relação entre as saídas é obtida a partir dos pontos experimentais e não da curva de calibração da Figura 24.

Tabela 4 – Homogeneidade da FBG 3 na TSA considerando a carga de 25 g como entrada inicial.

X (g)	k_x	k_y	k_y/k_x	ϵ (%)
50	2,00	1,82	0.91	9.02
75	1,50	1,45	0.96	3.53
100	1,33	1,34	1.01	0.79
125	1,25	1,27	1.01	1.31
150	1,20	1,15	0.96	4.29
175	1,17	1,13	0.96	3.56
200	1,14	1,14	0.99	0.52
225	1,13	1,10	0.98	1.94
250	1,11	1,08	0.97	2.61

Conforme a Tabela 4, a FBG 3 apresenta um erro relativo máximo (ϵ_{max}) de 9,02 % quando a carga é aumentada de 25 g para 50 g, sendo esse o maior erro apresentado em todas as FBGs. Na terceira coluna da Tabela 4, quanto mais próximo de 1 for a relação k_y/k_x mais homogênea é a resposta. Os erros relativos médios ($\bar{\epsilon}$), mínimo (ϵ_{min}) e máximo (ϵ_{max}) de homogeneidade para as seis FBGs são apresentados na Tabela 5.

Apesar de não apresentar o maior valor de erro de homogeneidade, a FBG 4

Tabela 5 – Erros relativos médios de homogeneidade na TSA.

FBG	$\bar{\epsilon}$ (%)	ϵ_{min} (%)	ϵ_{max} (%)
1	1,97	0,51	2,09
2	1,31	1,09	1,95
3	3,06	0,52	9,02
4	3,98	2,71	7,56
5	2,67	1,56	6,12
6	2,10	0,38	3,10

possui o maior erro relativo médio $\bar{\epsilon}$ de 3,98 %.

O maior erro médio da FBG 4 é confirmado pelo menor valor de coeficiente de correlação de 0,994.

3.5.2 Aditividade

Considere um sistema H cuja entrada X_1 tem resposta Y_1 e a entrada X_2 tem resposta Y_2 . O sistema H é totalmente linear se a soma das respostas individuais das entradas X_1 e X_2 for igual à resposta da entrada $X_1 + X_2$. Essa propriedade é conhecida como aditividade que com a propriedade de homogeneidade fornecem uma avaliação completa sobre a linearidade do sistema.

Para aplicar diferentes entradas no sistema, dividiu-se a TSA em 6 células (nomeadas de A até F) cada célula com área de $37,5 \times 35$ mm, e utilizaram-se duas cargas cilíndricas de valor padrão de 100 g e 50 g como sendo as entradas X_1 e X_2 , respectivamente. Realizaram-se três testes onde as cargas foram aplicadas no centro de cada célula. Inicialmente aplicaram-se as cargas individualmente e em seguida simultaneamente. As aplicações simultâneas das duas cargas foram repetidas 5 vezes obtendo-se a média dos resultados e o desvio padrão da média.

A Figura 25 apresenta a resposta dos sensores quando cargas são aplicadas individualmente (blocos empilhados) e a resposta quando as cargas são aplicadas simultaneamente (símbolo quadrado).

Para o primeiro teste (Figura 25(a)) obteve-se um erro relativo médio de 17,47 %. As FBGs 1 e 6 possuem maiores respostas, pois estão mais próximas das cargas aplicadas nas células E e B. As FBGs 2 e 3 estão mais próximas da carga de 100 g aplicada na célula B e por este motivo apresentam respostas maiores do que as FBGs 4 e 5 mais próximas da carga de 50 g aplicada na célula E.

No segundo teste (Figura 25(b)) obteve-se um erro relativo médio de 17,55 %. Observa-se que as FBGs 4 e 3 estão posicionadas sob a região da aplicação da carga e por esse motivo apresentam maiores respostas. A FBG 2 está mais próxima da carga de 100 g aplicada na célula C e, assim, apresenta maior resposta do que sua FBG simétrica (FBG 5). As FBGs 1 e 6 não apresentaram respostas significativas.

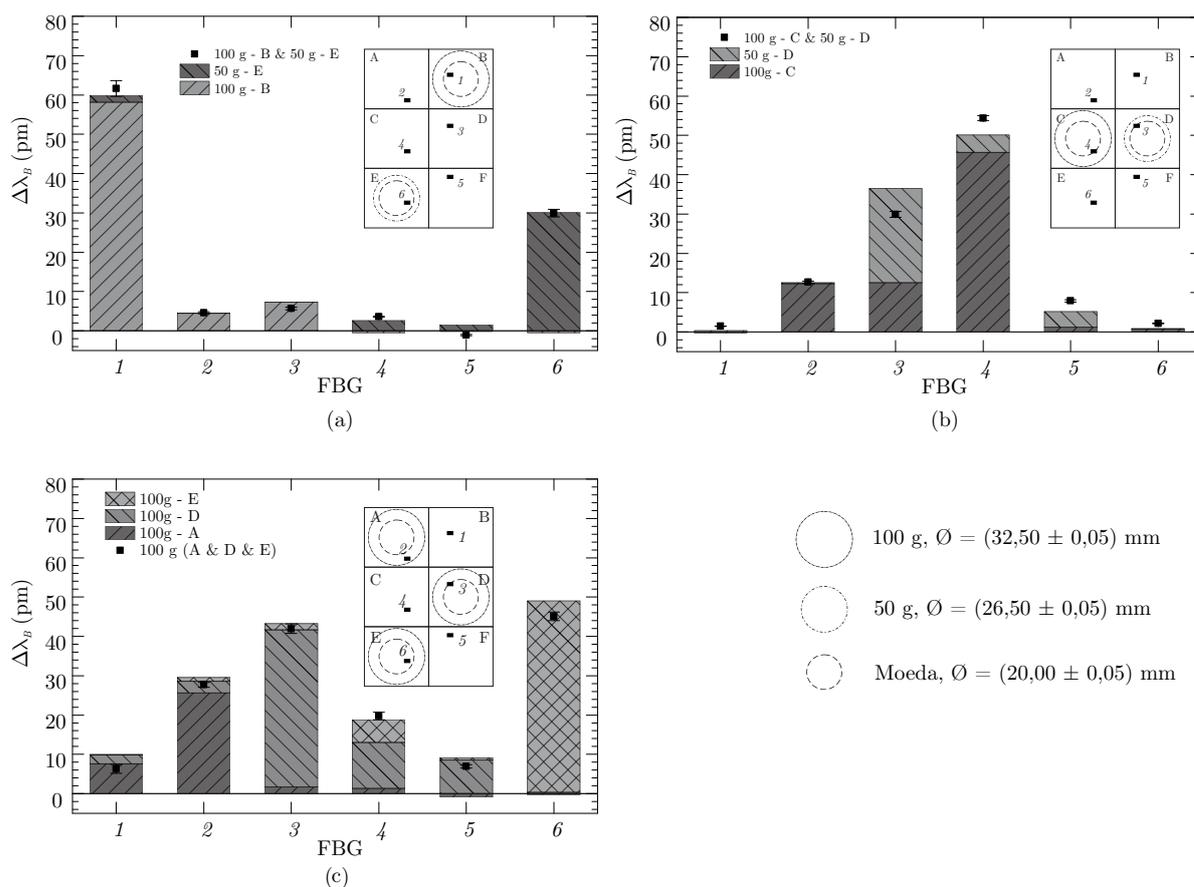


Figura 25 – Análise da propriedade de aditividade da TSA na configuração de 6 células. (a) Teste nas células B e E, (b) teste nas células C e D. (c) Teste com três cargas de 100 g nas células A, D e E.

O terceiro teste (Figura 25(c)) foi realizado com três cargas de 100 g e o erro médio relativo foi de 16,74 %. Nesse teste as cargas foram aplicadas nas células A, D e E próximas as posições das FBGs 2, 3 e 6, que apresentaram as maiores respostas. As FBGs 1 e 5 sofrem efeitos de duas cargas, enquanto a FBG 4 sofre efeitos de três cargas, assim, apresentando maior resposta.

Com esses testes foi possível verificar o acoplamento das respostas das FBGs. No primeiro teste, duas das redes, as FBGs 1 e 6, foram fortemente influenciadas pela carga aplicada. No segundo teste três FBGs apresentaram respostas significativas sendo que

somente duas delas foram diretamente submetidas às cargas. No terceiro e último teste há uma distribuição maior das cargas na TSA e conseqüentemente mais acoplamento das respostas.

A matriz de sensores apresentou erro relativo médio de aditividade dos três testes de 17,25 %. No teste de homogeneidade o sistema apresenta erro médio de todas as FBGs de 2,52 %. Observa-se que no teste de aditividade comparam-se os deslocamentos em comprimento de onda, mas como observado na Figura 17 (na página 55) há variações de comprimento de onda ocasionados pelas diferenças na forma do posicionamento da carga. Dessa forma, verifica-se que a aplicação manual das cargas resulta em maiores erros de aditividade. Apesar desses erros apresentados considera-se que a TSA possui comportamento linear.

3.6 APLICAÇÃO DO MÉTODO SDE

Na subseção 2.2.1 (veja a página 34) apresenta-se o uso do CS em um problema onde se considera que o sistema é linear e esparsos. Visto que a TSA possui comportamento linear, então, pode-se utilizá-la com o SDE, que é um método baseado em CS.

Sendo assim, o parágrafo a seguir apresenta os resultados obtidos com a TSA dividida em 6 células para inicialmente analisar o método SDE e comparar com a solução direta de um sistema linear.

3.6.1 Comparação entre SDE e Solução Direta do Sistema Linear

Se o sistema possui o mesmo número de sensores e de células, ou seja, $p = q$, então, a simples resolução do sistema linear basta para solucionar o problema da Equação 18 (veja a página 34). O SDE fornece um resultado melhor por ser mais robusto ao ruído e considerar que a solução é esparsa.

A Figura 26 apresenta a comparação entre o SDE e a solução do sistema linear. Para esse teste aplicou-se 100 g na célula B e 50 g na célula E (Figura 26(a)). Para comparar o vetor de cargas estimadas com o vetor de cargas aplicadas utilizou-se a métrica SNR da Equação 41,

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{\|x_0\|}{\|x - x_0\|} \right), \quad (41)$$

onde x_0 é o vetor contendo as cargas aplicadas e x é o vetor de cargas estimadas. Essa métrica compara o quanto o vetor de cargas estimadas está próximo do vetor de cargas aplicadas, quanto maior for a SNR em dB (decibéis) mais próximo é o resultado.

O resultado do SDE é considerado satisfatório quando a $SNR > 12$ dB, que garante que o método acertou o posicionamento, apesar do valor da carga possuir um erro (NEGRI, 2017).

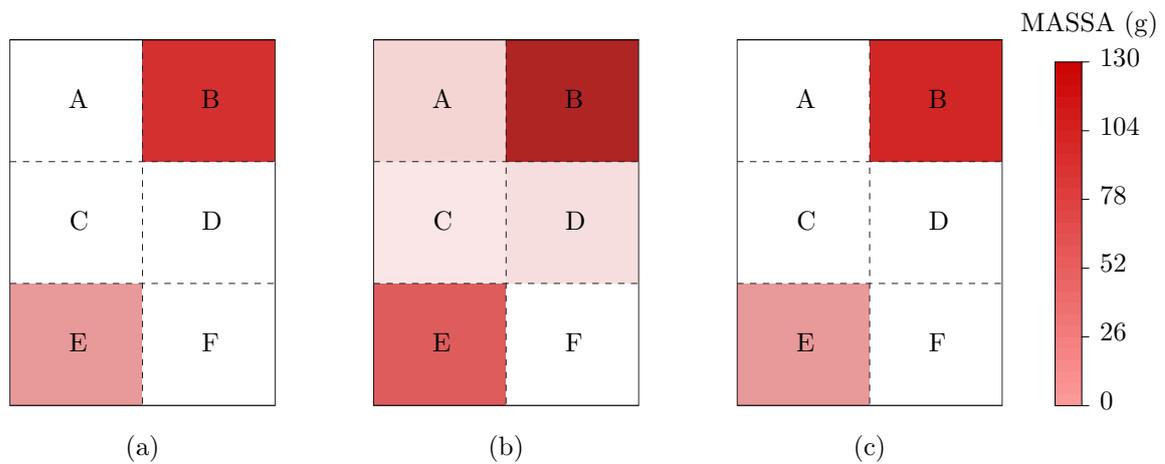


Figura 26 – Mapeamento de cargas na TSA; (a) Sinal original; (b) Solução do sistema linear com SNR de 5,78 dB; (c) SDE com SNR de 33,98 dB.

O resultado obtido para a solução do sistema linear possui uma SNR de 5,78 dB. Observa-se na Figura 26(b) que a reconstrução do sinal fornece uma carga estimada para as células A, C e D. Apesar de haver uma distribuição de forças nessas células o objetivo é estimar em qual célula a carga foi efetivamente aplicada.

Nos testes com 6 células levantou-se uma matriz de sensibilidades inicial aplicando-se uma carga de 100 g em cada célula da TSA (para mais detalhes veja a subseção 2.2.1 na página 34). Com essa matriz inicial buscou-se o melhor valor para σ , no qual se obteve $\sigma = 0,01$. A partir disso levantou-se novamente a matriz A e, então, avaliou-se a reconstrução do vetor x .

Além do teste com duas cargas verificou-se a possibilidade de reconstrução de 3 cargas aplicadas simultaneamente a TSA. Aplicou-se 100 g em B e D e 50 g em E (Figura 27(a)). O resultado obtido foi 96 g em B, 80 g em D e 52 g em E com uma SNR de 19,59 dB, conforme apresenta a Figura 27(b). Apesar do sucesso na reconstrução das cargas aplicadas a TSA, a configuração utilizada é formada por um número igual de sensores e áreas de sensoriamento.

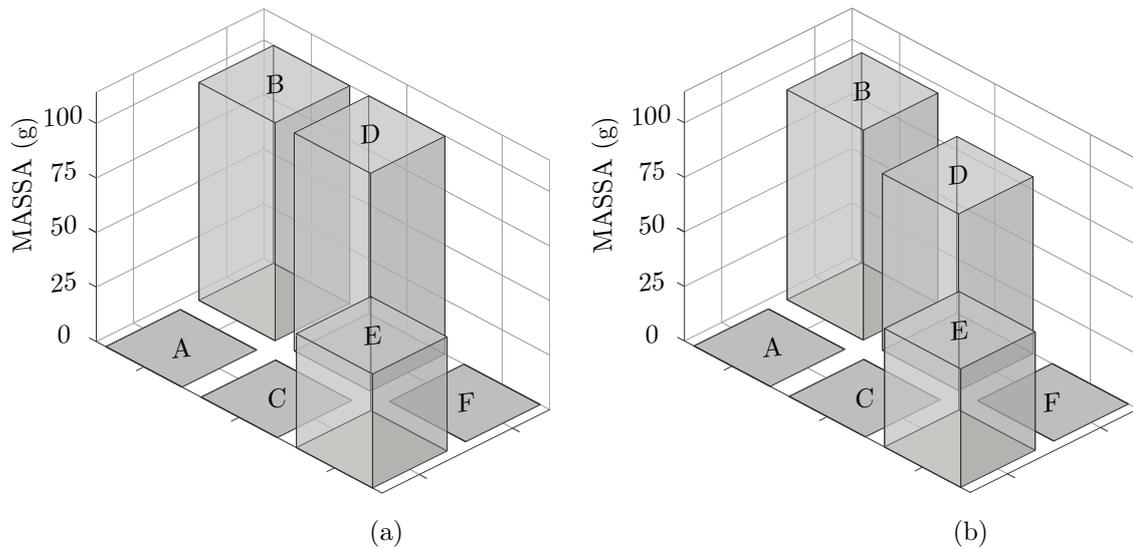


Figura 27 – Mapa de reconstrução 3D das cargas aplicadas na TSA com 6 células; (a) Aplicação de cargas; (b) Reconstrução pelo SDE com SNR de 19,59 dB.

Com o objetivo de obter uma matriz de sensoriamento tátil com um número de sensores reduzido em relação ao número de áreas de sensoriamento, aumentou-se o número de células de 6 para 12 mantendo a configuração da TSA composta por seis sensores.

Novamente levantou-se a matriz A e ajustou-se o σ . Com 12 células o sistema não se comportou adequadamente e poucos testes foram reconstruídos com sucesso. Buscou-se variar o σ para obter um melhor desempenho, mas o valor de 0,01 apresentou o melhor resultado.

Então, iniciou-se uma busca por uma configuração capaz de produzir os resultados esperados com $\sigma = 0,01$, $CR = 0,15$ e $F = 0,8$.

3.6.2 Testes com Diferentes Configurações de Sensoriamento

O acoplamento entre as respostas das FBGs é uma característica desejada em sistemas de sensoriamento *quasi*-distribuído de forças. Para alcançar melhores reconstruções com o SDE buscou-se melhorar o acoplamento entre as respostas das FBGs. Para isso, testaram-se algumas configurações.

Considerou-se duas possibilidades para melhorar o acoplamento. A primeira é a redução do tamanho da TSA, que faz com que as cargas aplicadas fiquem mais próximas de todas as FBGs tornando, assim, o sistema mais acoplado.

A Figura 28 apresenta a TSA dividida em 12 células, 8 células com dimensões de 60×80 mm, e 8 células com dimensões de 40×80 mm.

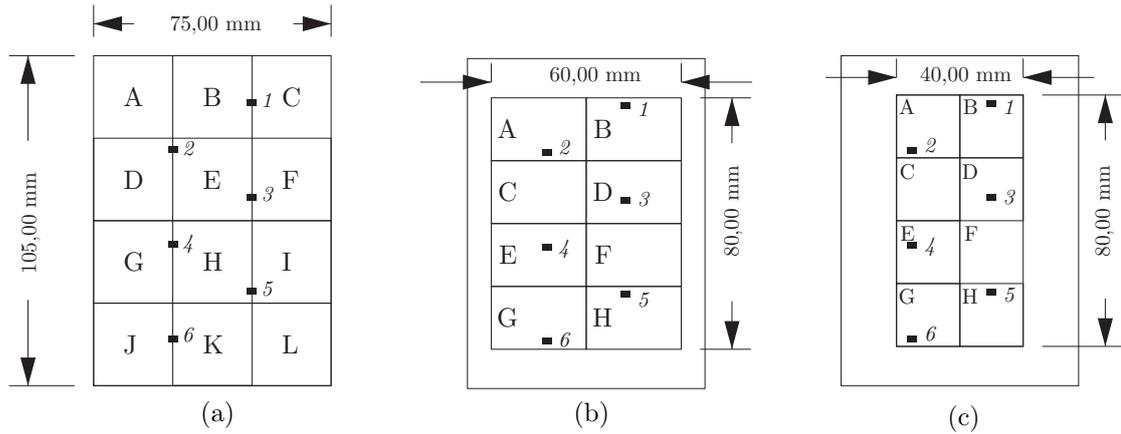


Figura 28 – Distribuição dos sensores nas células da TSA com (a) 12 células, (b) 8 células e dimensões de 60×80 mm e (c) 8 células com dimensões de 40×80 mm.

A segunda possibilidade é utilizar um material cuja transferência da força é maior que na borracha. Então, utilizou-se uma placa de aço de $(0,5 \pm 0,05)$ mm de espessura.

A Figura 29 apresenta um esquemático de como se montou a TSA com a placa de aço. Na Figura 29(a) a TSA está entre duas placas e presa por parafusos de fixação.

Ainda, na Figura 29(b) a placa de aço está apenas apoiada na TSA e devido à placa de aço ser maior que a TSA utilizou-se quatro suportes de borracha para apoiar a placa.

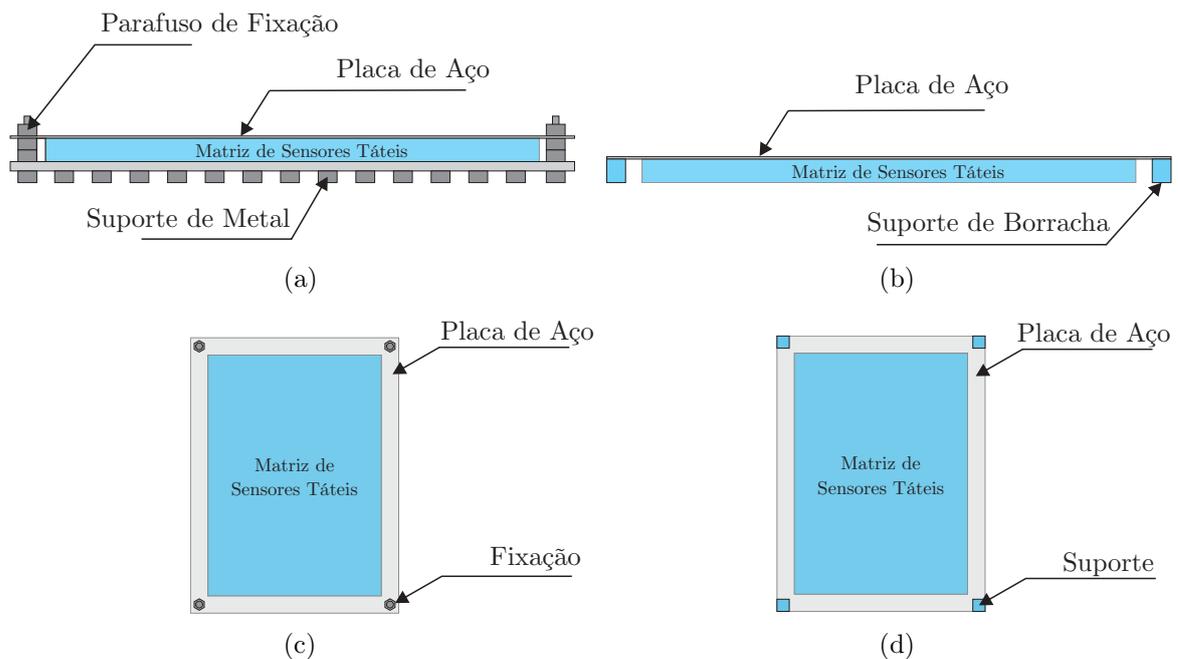


Figura 29 – Placa de metal utilizada como elemento de transferência junto com a TSA; (a) Vista lateral da placa fixa e (b) vista lateral da placa apoiada; (c) Vista superior da placa fixa e (d) vista superior da placa apoiada.

Ao todo 8 configurações foram testadas utilizando-se apenas a TSA, a TSA com a placa fixada e apoiada. Para cada configuração levantou-se a matriz de sensibilidades e com um conjunto de 18 testes avaliou-se a convergência do método SDE e a SNR média. Os testes foram realizados com a aplicação de até 3 cargas.

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para a escolha da melhor configuração. Observa-se que a TSA nas configurações com 8 células e dimensões de 60×80 mm e 40×80 mm apresentaram os melhores resultados.

Tabela 6 – Resultados dos testes de diferentes configurações de sensoramento.

Configuração n°	Superfície de contato	n° de Células	Dimensões (mm)	Convergência > 12 dB (%)	\overline{SNR} dB
1	TSA	12	75×105	40,91	$12,14 \pm 8,23$
2	TSA + Placa Fixa	12	75×105	27,27	$9,60 \pm 8,71$
3	TSA + Placa Apoiada	12	75×105	40,91	$11,34 \pm 9,98$
4	TSA + Placa Fixa	8	60×80	88,89	$17,01 \pm 7,83$
5	TSA	8	60×80	100,00	$19,98 \pm 4,20$
6	TSA	8	40×80	100,00	$21,07 \pm 6,23$
7	TSA + Placa Apoiada	8	60×80	33,33	$9,78 \pm 9,55$
8	TSA + Placa Apoiada	8	40×80	38,89	$11,89 \pm 9,41$

A configuração n° 4 apresentou bons resultados, mas as configurações n° 5 e n° 6 apresentam convergência de 100 %. Isso é, um acerto em todas as posições. Dessa forma, a TSA como superfície de contato possui desempenho melhor do que com a placa de aço.

A matriz de sensoramento tátil com dimensões de 40×80 mm apresentou SNR média melhor do que a com 60×80 mm. Confirmando, assim, que a redução do tamanho da matriz gera melhores resultados por promover um melhor acoplamento da resposta dos sensores. Contudo, o tamanho de 40×80 mm limitaria o número de testes que poderiam ser realizados, pois devido às dimensões das cargas cilíndricas utilizadas não seria possível aplicar várias cargas simultaneamente sobre a TSA.

Dessa forma, escolheu-se a configuração n° 5 para ser usada na continuidade do trabalho com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema.

3.7 APLICAÇÃO DO MÉTODO SDE

Após a escolha da configuração que apresentou resultados satisfatórios iniciaram-se os testes de mapeamento de forças com o SDE. Para isso, inicialmente avaliou-se nova-

mente a aditividade da TSA, mas desta vez para verificar o acoplamento das respostas. O procedimento realizado foi o mesmo da 3.5.1 (na página 63), mas com posições diferentes.

A Figura 30(a) apresenta a aplicação de cargas nas extremidades da TSA. Observa-se que neste teste as FBGs 2 e 3 que estão mais próximas da carga de 100 g apresentam maiores respostas do que as FBGs 4 e 5. Ao comparar com o resultado obtido na Figura 25(a) constata-se que o acoplamento é maior. No teste da Figura 25(b) as FBGs apresentam maiores respostas devido ao fato de que há duas FBGs na posição da colocação da carga.

Na Figura 30(b) apenas a FBG 4 está diretamente submetida a carga, mas as FBGs 3 e 5 também apresentam respostas. Esse acoplamento é ideal para que o método SDE consiga reconstruir com sucesso as cargas aplicadas na TSA.

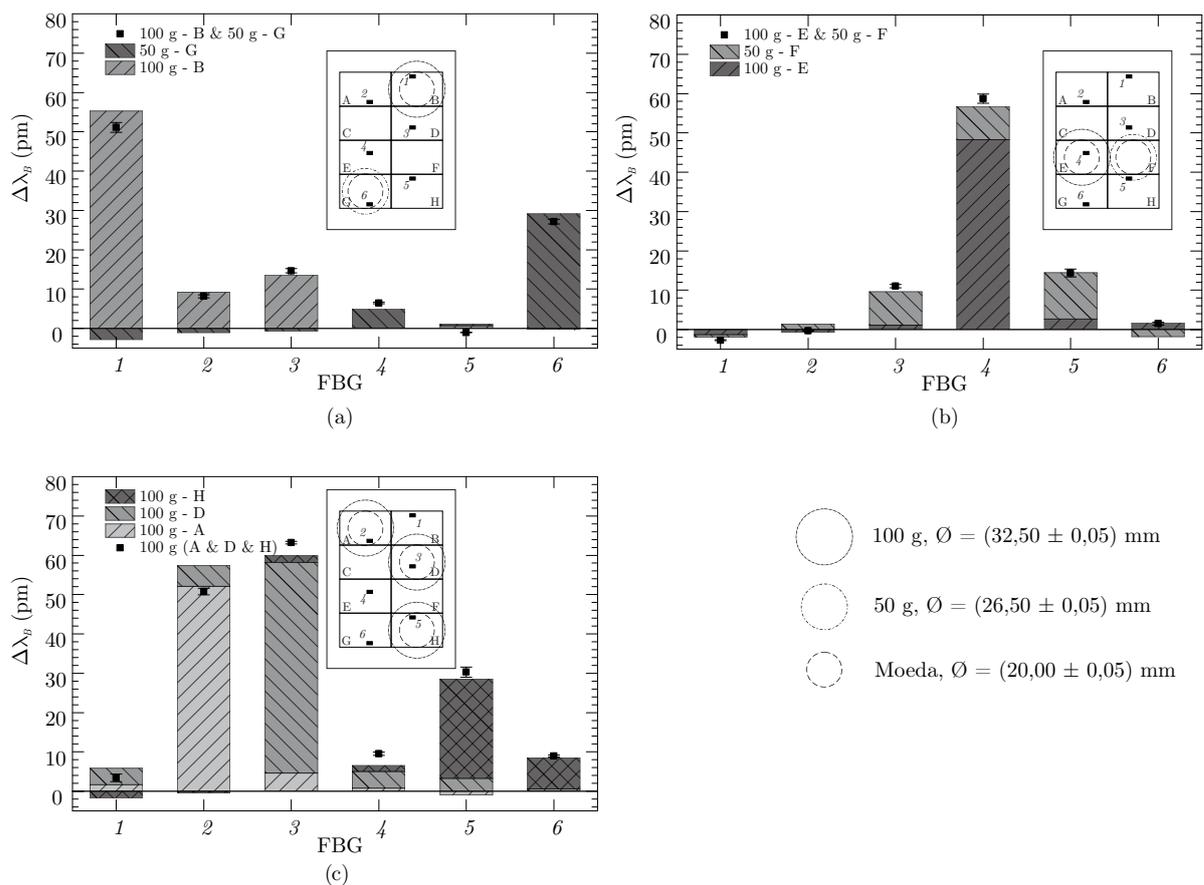


Figura 30 – Análise de aditividade das FBGs na TSA com 8 células. (a) Teste nas células B e G, (b) teste nas células E e F; (c) Teste com três cargas de 100 g nas células A, D e H.

Após vários testes para verificar a linearidade, acoplamento e escolha de uma configuração adequada iniciou-se a etapa de avaliação do método.

Durante os testes manteve-se a temperatura da sala em $(22 \pm 0,5)$ °C. O posicionamento das cargas foi realizado utilizando-se círculos com o diâmetro característico de cada carga, indicados sobre a superfície da TSA, conforme a Figura 31. Desse modo, as cargas foram aplicadas sobre a área de contato localizada no centro da célula com maior precisão do posicionamento, que se faz necessário para garantir menores erros na estimativa da carga. A indicação das posições das cargas foi impressa em papel e colada sobre a TSA com cianoacrilato.

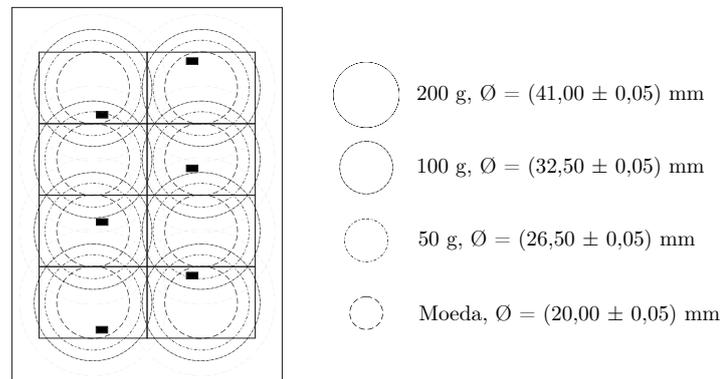


Figura 31 – Controle do posicionamento das cargas aplicadas na TSA.

Utilizou-se uma carga de 200 g para levantar a matriz de sensibilidades e em seguida iniciaram-se os testes.

Para as cargas de 50 g, 100 g e 200 g aplicadas individualmente utilizaram-se todas as células (A-H). Realizou-se a aplicação de uma carga nas células de A até H em condições de repetibilidade com cinco aquisições.

Para um número maior de cargas utilizaram-se as posições conforme Tabela 16 para duas cargas, Tabela 17 para três cargas e na Tabela 18 para quatro cargas (veja o Apêndice C, na página 92).

3.7.1 Resultados da Reconstrução do Vetor de Cargas

A carga aplicada em cada uma das células é representada pelo vetor x_0 , contendo p elementos correspondentes a cada uma das regiões. As leituras do sistema são realizadas obtendo os deslocamentos de comprimento de onda das FBGs. Os deslocamentos são representados pelo vetor y com q observações. Neste trabalho $p = 6$ e $q = 8$, ou seja, o número de sensores é 6 e o número de células é 8.

Após a coleta dos deslocamentos dos comprimentos de ondas utilizou-se o método SDE cujo resultado fornece o vetor de cargas estimadas x , a SNR e a convergência dos resultados com $SNR > 12$ dB.

As SNRs médias e os erros relativos médios de cada teste estão apresentados na Tabela 7 para a carga de 50 g, na Tabela 8 para a carga de 100 g e na Tabela 9 para a carga de 200 g.

Tabela 7 – Resultados dos testes de reconstrução da carga de 50 g aplicada na TSA.

Test n°	Célula	x_0 (g)	\bar{x} (g)	\overline{SNR} (dB)	$\bar{\epsilon}$ (%)
1	A	50	52.20	24.34	4.40
2	B	50	56.00	18.27	12.00
3	C	50	54.60	23.02	9.20
4	D	50	56.80	18.10	13.60
5	E	50	55.80	17.91	11.60
6	F	50	49.20	20.57	1.60
7	G	50	56.40	17.34	12.80
8	H	50	51.00	26.58	2.00
Média das Médias				20,76	8,40
Máx				26,58	13,60
Min				17,34	1,60

Tabela 8 – Resultados dos testes de reconstrução da carga de 100 g aplicada na TSA.

Test n°	Célula	x_0 (g)	\bar{x} (g)	\overline{SNR} (dB)	$\bar{\epsilon}$ (%)
1	A	100	109.20	23.28	9.20
2	B	100	106.80	24.93	6.80
3	C	100	116.20	15.95	16.20
4	D	100	114.40	17.36	14.40
5	E	100	116.20	16.15	16.20
6	F	100	109.00	21.92	9.00
7	G	100	114.00	17.25	14.00
8	H	100	97.40	25.99	2.60
Média das Médias				20,35	11,10
Máx				25,99	16,20
Min				15,95	2,60

As SNRs médias de todos os testes foram de $(20,76 \pm 1,20)$ dB, $(20,35 \pm 1,50)$ dB e $(35,20 \pm 1,60)$ dB para 50 g, 100 g e 200 g, respectivamente. Os erros relativos médios para os cinco testes foram de 8,40 %, 11,10 % e 1,70 % para 50 g, 100 g e 200 g, respectivamente. Todos os testes apresentam SNRs maiores do que 12 dB, dessa forma a convergência é de 100 %.

Realizou-se a reconstrução de uma carga aplicada individualmente em condição de repetibilidade. Assim, é possível saber qual carga o sistema consegue recuperar com maior SNR. Como resultado observa-se que a carga de 200 g apresenta erro menor do que 50 g e 100 g. Isso ocorre pelo fato de que no levantamento da matriz de sensibilidades utilizou-se a carga de 200 g, e os erros das outras cargas são relacionados aos erros de linearidade do sistema.

As sensibilidades obtidas na matriz A são uma relação dos deslocamentos em comprimento de onda das FBGs pela massa da carga utilizada. Apesar dos erros de linearidade apresentados na seção 3.5 (página 61) o SDE conseguiu estimar as cargas de 50 g e 100 g com SNR maiores do que 17 dB para uma carga aplicada individualmente.

Tabela 9 – Resultados dos testes de reconstrução da carga de 200 g aplicada na TSA.

Test n°	Célula	x_0 (g)	\bar{x} (g)	\overline{SNR} (dB)	$\bar{\epsilon}$ (%)
1	A	200	200.60	35.32	0.30
2	B	200	204.20	30.19	2.10
3	C	200	200.00	42.03	0.00
4	D	200	203.80	32.08	1.90
5	E	200	205.40	33.07	2.70
6	F	200	207.40	31.71	3.70
7	G	200	202.20	35.68	1.10
8	H	200	202.80	41.52	1.40
Média das Médias				35,20	1,70
Máx				42,03	3,70
Min				30,19	0,00

A Tabela 10 apresenta os valores das cargas estimadas pelo método SDE na aplicação simultânea de duas cargas. A SNR média foi de $(25,17 \pm 0,85)$ dB.

O erro relativo percentual é apresentado para cada carga na Tabela 10, onde para a primeira carga o erro médio foi de 6,8 % e para a segunda carga foi de 7,93 %. A média dos erros médios é de 7,36 %.

Tabela 10 – Resultados dos testes de mapeamento de 2 cargas aplicadas simultaneamente na TSA.

Teste n°	$x_{0,1}$ (g)	$x_{0,2}$ (g)	x_1 (g)	x_2 (g)	SNR (dB)	ϵ_1 (%)	ϵ_2 (%)
1	200	100	195	102	33,22	2,50	2,00
2	200	100	202	119	23,07	1,00	19,00

(continua)

Tabela 10 – Resultados dos testes de reconstrução de 2 cargas aplicadas na TSA.

(continuação)							
Teste n°	$x_{0,1}$ (g)	$x_{0,2}$ (g)	x_1 (g)	x_2 (g)	SNR (dB)	ϵ_1 (%)	ϵ_2 (%)
3	200	100	194	103	30,83	3,00	3,00
4	200	100	202	110	27,97	1,00	10,00
5	100	200	111	197	26,73	11,00	1,50
6	100	200	116	205	23,32	16,00	2,50
7	100	200	110	207	25,17	10,00	3,50
8	100	200	100	212	27,88	0,00	6,00
9	200	100	202	109	28,94	1,00	9,00
10	200	100	195	115	23,38	2,50	15,00
11	200	100	186	118	19,65	7,00	18,00
12	200	100	208	114	22,63	4,00	14,00
13	100	200	106	209	25,92	6,00	4,50
14	100	200	112	197	26,16	12,00	1,50
15	100	200	121	190	19,75	21,00	5,00
16	100	200	120	188	19,46	20,00	6,00
17	200	100	193	92	26,16	3,50	8,00
18	200	100	192	112	23,55	4,00	12,00
19	200	100	215	113	20,72	7,50	13,00
20	200	100	194	105	28,90	3,00	5,00
Média					25,17	6,80	7,93
Máx					33,22	21,00	19,00
Min					19,46	0,00	1,50

Os valores estimados da aplicação simultânea de três cargas são apresentados na Tabela 11. A SNR média para três cargas foi de $(23,28 \pm 0,57)$ dB.

Tabela 11 – Resultados dos testes de mapeamento de 3 cargas aplicadas simultaneamente na TSA.

Teste n°	$x_{0,1}$ (g)	$x_{0,2}$ (g)	$x_{0,3}$ (g)	x_1 (g)	x_2 (g)	x_3 (g)	SNR (dB)	ϵ_1 (%)	ϵ_2 (%)	ϵ_3 (%)
1	200	100	100	198	124	110	20,82	1,00	24,00	10,00
2	200	100	100	195	109	111	24,08	2,50	9,00	11,00
3	100	200	100	120	195	122	18,51	20,00	2,50	22,00
4	100	200	100	103	212	96	26,84	3,00	6,00	4,00
5	100	200	100	96	213	90	23,20	4,00	6,50	10,00
6	100	200	100	91	203	122	21,37	9,00	1,50	22,00
7	100	100	200	98	120	209	22,19	2,00	20,00	4,50
8	100	100	200	92	104	203	28,32	8,00	4,00	1,50
9	50	100	100	58	102	99	26,37	16,00	2,00	1,00
10	200	100	100	196	111	105	25,75	2,00	11,00	5,00
11	100	200	100	100	189	84	23,50	0,00	5,50	16,00
12	100	200	100	108	213	99	25,40	8,00	6,50	1,00
13	100	100	50	98	108	62	21,36	2,00	8,00	24,00
14	100	100	200	105	111	188	23,20	5,00	11,00	6,00
15	100	100	50	97	94	60	22,68	3,00	6,00	20,00
16	100	100	50	97	112	54	22,35	3,00	12,00	8,00
17	200	100	100	192	126	95	20,33	4,00	26,00	5,00

(continua)

Tabela 11 – Resultados dos testes de reconstrução de 3 cargas aplicadas na TSA.

(continuação)										
Teste n°	$x_{0,1}$ (g)	$x_{0,2}$ (g)	$x_{0,3}$ (g)	x_1 (g)	x_2 (g)	x_3 (g)	SNR (dB)	ϵ_1 (%)	ϵ_2 (%)	ϵ_3 (%)
18	200	50	100	193	51	110	25,77	3,50	2,00	10,00
19	100	200	50	111	189	51	23,78	11,00	5,50	2,00
20	100	100	50	92	114	53	19,75	8,00	14,00	6,00
Média							23,28	5,75	9,15	9,45
Máx							28,32	20,00	26,00	24,00
Min							18,51	0,00	1,50	1,00

Tabela 12 – Resultados dos testes de mapeamento de 4 cargas aplicadas simultaneamente na TSA.

Teste n°	$x_{0,1}$ (g)	$x_{0,2}$ (g)	$x_{0,3}$ (g)	$x_{0,4}$ (g)	x_1 (g)	x_2 (g)	x_3 (g)	x_4 (g)	SNR (dB)	ϵ_1 (%)	ϵ_2 (%)	ϵ_3 (%)	ϵ_4 (%)
1	50	50	50	50	41	60	50	43	17,77	18,00	20,00	0,00	14,00
2	100	50	50	100	112	60	49	92	19,65	12,00	20,00	2,00	8,00
3	50	50	50	50	55	61	42	55	16,58	10,00	22,00	16,00	10,00
4	50	50	50	100	53	61	49	105	22,10	6,00	22,00	2,00	5,00
5	100	100	50	100	99	107	49	96	28,10	1,00	7,00	2,00	4,00
6	100	50	50	100	96	61	47	96	23,08	4,00	22,00	6,00	4,00
7	100	50	50	100	86	57	63	87	16,09	14,00	14,00	26,00	13,00
8	50	50	50	50	43	43	55	51	19,96	14,00	14,00	10,00	2,00
9	100	50	50	100	86	44	54	87	18,17	14,00	12,00	8,00	13,00
10	100	50	50	100	98	54	54	108	23,93	2,00	8,00	8,00	8,00
11	50	50	50	100	62	52	55	107	19,72	24,00	4,00	10,00	7,00
12	50	50	50	50	56	56	50	42	20,13	12,00	12,00	0,00	16,00
13	50	50	50	50	56	43	49	52	21,90	12,00	14,00	2,00	4,00
14	100	50	50	100	97	40	34	87	7,77	3,00	20,00	32,00	13,00
15	100	50	100	100	100	36	84	89	9,84	0,00	28,00	16,00	11,00
16	100	100	100	100	101	108	97	93	26,63	1,00	8,00	3,00	7,00
17	50	50	50	50	57	56	43	49	19,70	14,00	12,00	14,00	2,00
18	100	50	100	50	92	55	94	48	23,41	8,00	10,00	6,00	4,00
19	50	100	50	100	55	115	44	89	18,06	10,00	15,00	12,00	11,00
20	50	100	100	100	63	110	97	94	20,61	26,00	10,00	3,00	6,00
Média									19,66	10,25	14,70	8,90	8,10
Máx									28,10	26,00	28,00	32,00	16,00
Min									7,77	0,00	4,00	0,00	2,00

Os resultados para o teste com 4 cargas aplicadas simultaneamente na TSA podem ser observados na Tabela 12. Diferentemente dos casos anteriores, a reconstrução do vetor de cargas não convergiu para todos os casos. Nos testes 14 e 15 da Tabela 12 as SNRs são menores que 12 dB. A Tabela 18, no Apêndice C, mostra as posições para os testes 14 e 15. Na Figura 32(c) pode-se observar que, para o teste 14, aplicou-se a carga de 50 g na célula A, mas o método estimou a aplicação de uma carga na célula C. No caso com 4 cargas a convergência foi de 90 % dos testes realizados.

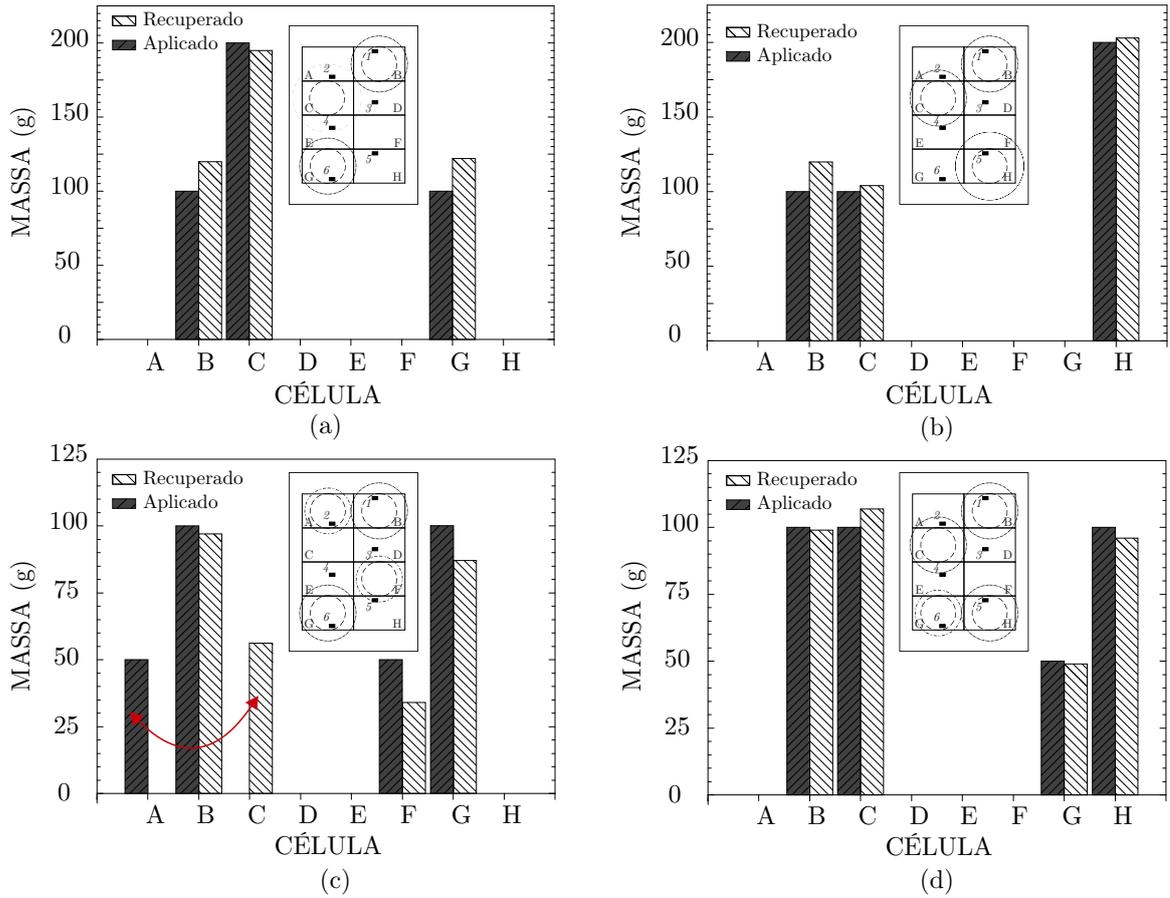


Figura 32 – (a) Teste de reconstrução com 3 cargas com menor SNR de 18,51 dB; (b) Teste de reconstrução com 3 cargas com maior SNR de 28,32 dB; (c) Teste de reconstrução com 4 cargas com menor SNR de 7,77 dB; (d) Teste de reconstrução com 3 cargas com maior SNR de 28,10 dB.

A Figura 32 mostra a maior e a menor SNR para os testes de reconstrução com 3 e 4 cargas. Na Figura 32(a) a SNR foi de 18,51 dB e erro médio de 14,83 %. O melhor caso para 3 cargas (Figura 32(b)) possui SNR de 28,32 dB com erro médio de 4,50 %.

Com 4 cargas a menor SNR foi de 7,77 dB (Figura 32(c)) com erro médio de 16,75 % e a maior SNR foi de 28,10 dB com erro médio de 3,5 %.

De forma geral, a Tabela 13 apresenta as SNRs médias para os testes com até 4 cargas, os desvios padrão dos valores médios (SEM do inglês *Standard Error of the Mean*), os erros relativos percentuais médios e a convergência dos resultados, isto é, número de casos com SNR > 12 dB.

A condição de esparsidade requer que a maioria dos elementos do vetor x sejam nulos. Assim, a aplicação de 4 cargas faz com que o sistema não seja totalmente esparsa, mas ainda assim há um grau de esparsidade de 50 %. O SDE usa essa informação para conseguir reconstruir o vetor x , mas como pode-se observar na Tabela 13 quanto menor

o grau de esparsidade menores são as SNRs obtidas.

Tabela 13 – Resultados dos testes de reconstrução de cargas aplicadas na TSA.

Nº de Cargas	\overline{SNR} (dB)	SEM (dB)	$\bar{\epsilon}$ (%)	Convergência > 12 dB (%)	Nº de Testes	Grau de Esparsidade (%)
1	25,44	0,99	8,78	100	24	87,50
2	25,17	0,85	7,36	100	20	75,00
3	23,28	0,57	8,12	100	20	62,50
4	19,66	1,08	10,49	90	20	50,00

O controle do posicionamento da carga sobre a TSA é crucial para obter uma reconstrução adequada. Além disso, a utilização da área de contato única favorece o reconhecimento de um número maior de cargas, alcançando reconstruções até o limite de 4 cargas. Apesar dos erros de linearidade apresentados pelas respostas das FBGs na TSA, o método SDE foi capaz de reconstruir quase todos os casos testados.

De forma a verificar o comportamento do sistema sem a área de contato, repetiram-se os testes de reconstrução com as mesmas posições, mas sem área de contato e com uma nova matriz de sensibilidades. A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos sem a área de contato, como pode-se notar apenas 5 % dos casos para 3 cargas convergiram com $SNR > 12$ dB e nenhum caso para 4 cargas convergiu.

Tabela 14 – Resultados dos testes de mapeamento na TSA sem a área de contato.

Nº de Cargas	\overline{SNR} (dB)	SEM (dB)	Convergência > 12 dB (%)	Nº de Testes
1	11,86	3,27	45,83	24
2	13,41	2,42	55,00	20
3	5,96	0,99	5,00	20
4	3,25	0,46	0,00	20

Assim, verifica-se que a utilização da área de contato é importante para obter a reconstrução de um número maior de cargas.

3.7.2 SDE para Mapeamento de Forças

A habilidade de detecção de até 4 cargas aplicadas na TSA abre a possibilidade para o mapeamento de forças. A Figura 33 apresenta o desempenho em tempo real do

TSS quando simultaneamente 4 dedos da mão tocam a TSA.

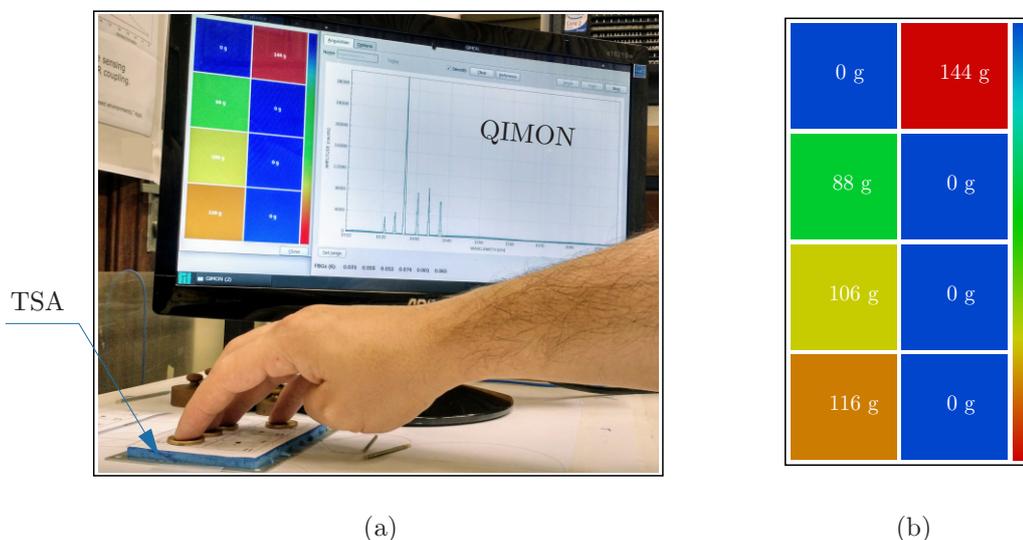


Figura 33 – Reconhecimento de toque no sistema de sensoriamento tátil *quasi*-distribuído de forças utilizando o algoritmo SDE; (a) Interface em tempo real; (b) Resultado do SDE em tempo real.

O reconhecimento de toque mostra que o TSS deste trabalho pode ser utilizado na reabilitação da mão ou qualquer outra atividade onde os requisitos sejam reconhecer o toque dos dedos em tempo real.

Há variadas áreas de aplicação em que o sistema de sensoriamento tátil pode ser utilizado, como exemplo, pode-se citar o campo da robótica. A sensação tátil, ou tato, é um dos cinco sentidos, incluindo visão, audição, olfato e paladar. Através da utilização da matriz de sensores táteis deste trabalho, sistemas robóticos podem alcançar a sensação tátil. Além do mais, a TSA é maleável e pode ser adaptada em superfícies curvadas, permitindo seu emprego em diferentes partes de um sistema robótico.

Observa-se pela Figura 26 que o sistema de sensoriamento é capaz de realizar o mapeamento de forças aplicadas na matriz. O sistema pode, por exemplo, determinar a forma do objeto que está em contato com a superfície de sensoriamento e, nesse caso não há a necessidade da utilização das áreas de contato. Dessa forma, além do sistema robótico conseguir identificar a região da sensação tátil, poderá determinar a forma da base do objeto e também a intensidade da resposta tátil.

Através da Figura 33 vemos o sistema reconhecendo as forças táteis diretamente aplicadas sobre a superfície da matriz, com o toque dos dedos. Porém, a matriz também pode ser usada em um sistema de reabilitação onde o paciente submetido à reabilitação

deve posicionar um determinado objeto em uma determinada célula. Nesse caso a avaliação de desempenho baseia-se na determinação do posicionamento do objeto sobre a TSA.

Tabela 15 – Características metroológicas para o sistema de sensoriamento tátil.

Características Metroológicas	TSS + SDE
Intervalo de medida (g)	25 — 220
Dimensões de sensoriamento (mm)	60 × 80
Resolução espacial (mm)	30 × 20
Erro relativo médio (%)	< 10,5

A menor carga que o TSS com SDE reconheceu foi de 25 g e neste trabalho limitaram-se as aplicações de cargas até 200 g para os testes de reconstrução, pois foi estabelecido um limite superior (*ulimit*) para o SDE de 220 g. Assim, o intervalo de medida, como apresenta a Tabela 15, é de 25 a 220 g. A Tabela 15 apresenta as características do TSS (veja a Tabela 2 na página 54) com o SDE.

As características da Tabela 15 são próprias do TSS utilizando como interrogador o I-MON, caso a TSA seja utilizada com outro interrogador essas características irão mudar.

As dimensões de sensoriamento são de 60 × 80 mm, com número de 8 células (regiões de sensoriamento), que resulta numa resolução espacial de 30 × 20 mm. Embora a aplicação seja no centro de cada célula numa região circular com diâmetro de (20,00 ± 0,05) mm, ainda assim, consideram-se as células como área de sensoriamento.

O sistema de sensoriamento tátil é baseado na detecção da variação de comprimentos de onda devido à aplicação de forças na TSA. De forma a verificar o desempenho do sistema realizou-se testes de reconstrução em temperaturas diferentes (17 e 27 °C), no qual obteve-se um desempenho similar quando em 22 °C.

No entanto, a influência da temperatura no comprimento de onda irá afetar o resultado do sistema, devido a sensibilidade cruzada. Quando o sistema é submetido à forças táteis há transferência de calor pelo corpo humano. Para verificar esse efeito, realizou-se testes com a carga cilíndrica em temperatura diferente da TSA, ou seja, sem equilíbrio térmico. Para isso, utilizou-se uma carga cilíndrica de 100 g em 37 °C (próximo da temperatura do corpo humano) e a TSA em 22 °C. Depois de 15 s o sistema apresentou um erro de 11 % no valor da massa e com acerto na posição. Esse erro deve-se à influência do

gradiente de temperatura e expansão térmica da borracha de silicone.

Diferente da carga cilíndrica, a pele humana possui baixo valor de condutividade térmica o desempenho do sistema não é afetado pela transferência de calor quando forças táteis são aplicadas pelos dedos em curto período de tempo.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES

As propriedades da borracha de silicone possibilitaram a produção de uma matriz de sensores flexível e ajustável, diferente do sistema apresentado por Negri et al. onde uma placa rígida foi utilizada. Dessa forma, a TSA pode ser utilizada em superfícies curvadas e/ou atividades que requerem flexibilidade. Em adição, os baixos custos aliados com a facilidade de produção fazem da borracha de silicone uma boa escolha de material para encapsulação.

O uso de um molde impresso com tecnologia de impressão 3D possibilitou projetar fendas nas paredes do molde para que os segmentos de fibra ótica contendo as FBGs ficassem no meio do encapsulamento e, dessa forma, obteve-se a melhor proteção das redes de Bragg. Além disso, a influência da temperatura nas respostas dos sensores é reduzida pela encapsulação devido ao baixo valor de condutividade térmica da borracha.

Além do mais, a capacidade de reconstrução também foi avaliada com a TSA e as cargas cilíndricas em equilíbrio térmico em $(17 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ e $(27 \pm 0,01) ^\circ\text{C}$, mostrando que o sistema opera de forma equivalente em temperaturas diferentes.

Uma FBG encapsulada apresentou resposta linear numa faixa de medida entre 0 – 250 g e a maior contribuição de incertezas é devido à histerese da borracha. Além disso, as 6 FBGs da TSA apresentaram respostas acopladas, o que significa que é possível utilizar a TSA para um sensoriamento *quasi*-distribuído.

O uso de um número reduzido de sensores em relação ao número de regiões de sensoriamento (células) da TSA resulta num problema indeterminado que é satisfatoriamente resolvido com a utilização do método SDE. Com esse método é possível reconstruir a posição onde a carga foi aplicada e, também, qual a massa da carga aplicada.

Neste trabalho obtiveram-se boas reconstruções com a TSA dividida em 8 células com resolução espacial de 30×20 mm e 6 sensores. Resolução espacial menor quando

comparados com o sistema empregado por Negri et al. contendo 8 sensores e 16 células, cuja resolução espacial é de 40×40 mm.

Negri et al. alcançaram boas reconstruções para até 3 cargas. Neste trabalho foi possível alcançar reconstruções para até 4 cargas com SNR média de 19,66 dB e erro relativo percentual médio menor do que 10,5 %. O aumento da capacidade de reconhecimento de cargas deve-se ao controle do posicionamento das cargas e o aumento do acoplamento através da redução da área de sensoriamento.

Apresentou-se que é possível reconhecer forças táteis aplicadas por quatro dedos da mão. Além disso, a borracha de silicone torna a TSA flexível e com resposta tátil aprimorada (devido ao uso da borracha de silicone).

A capacidade da TSA de reconhecimento tátil aprimorada, assim como, as ótimas características das FBGs fazem com que o sistema de sensoriamento tátil deste trabalho possa ser utilizado em diversas aplicações que se busca o reconhecimento de forças táteis, especialmente na reabilitação da mão.

4.1 TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho utilizaram-se áreas de contatos. Para trabalhos futuros, orienta-se, substituir as áreas de contatos por áreas circulares produzidas na própria encapsulação.

Recomenda-se para trabalhos futuros utilizar um único segmento de fibra ótica contendo todas as FBGs. Assim, não haverá necessidade de emendas óticas tornando a TSA mais robusta.

Além disso, o processo de produção da mistura da borracha gera bolhas que podem ser retiradas com o processo de desaeração para assegurar um encapsulamento livre de bolhas. A desaeração deve ser realizada sob um vácuo de 30 a 60 mmHg por um tempo de até 5 minutos.

Neste trabalho mostrou-se que com o TSS desenvolvido é possível alcançar o reconhecimento de forças táteis, mas há a necessidade de utilizar-se as áreas de contato para tal finalidade. Para aplicações futuras pode-se remover o uso dessas áreas de contato através de um grande aumento no número de transdutores e de regiões de sensoriamento.

Além disso, em trabalhos futuros pode-se utilizar a matriz de sensores táteis juntamente com um dispositivo de reabilitação, conforme a Figura 34.

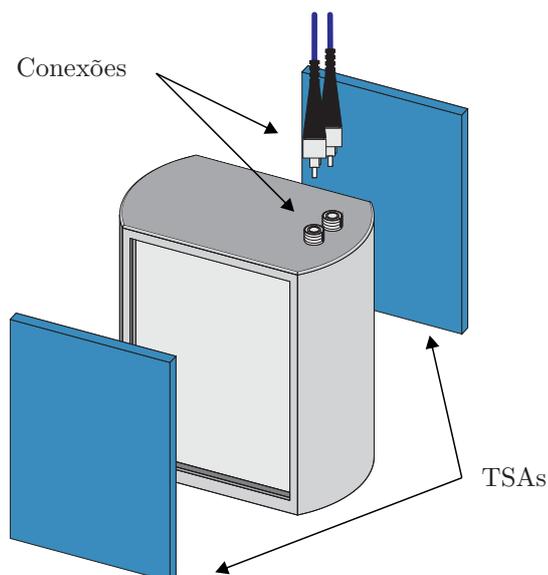


Figura 34 – Dispositivo de reabilitação para trabalhos futuros.

O dispositivo também pode ser projetado em CAD e impresso em 3D, de tal forma, que pode-se encaixar duas matrizes de sensores táteis, uma para o polegar e a outra para os demais dedos da mão, conforme apresenta a Figura 35.

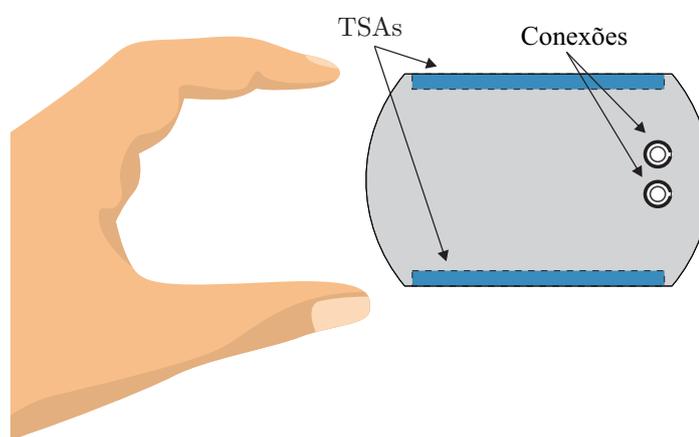


Figura 35 – Representação da forma de utilização do dispositivo.

Uma vez que o sistema está conectado na interface QIMON pode-se monitorar em tempo real a força tátil do paciente, bem como o posicionamento dos dedos ao segurar o dispositivo. Estas informações são úteis para informar a evolução da capacidade motora do paciente em reabilitação.

REFERÊNCIAS

CANDES, E.J.; WAKIN, M.B. An Introduction To Compressive Sampling. **IEEE Signal Processing Magazine**, v. 25, n. 2, p. 21–30, 2008.

CANDES, E. J.; ROMBERG, Justin. **11-magic: Recovery of Sparse Signals via Convex Programming Seven problems**. [S.l.], 2005. 1–19 p. Disponível em: <<https://statweb.stanford.edu/~candes/11magic/downloads/11magic.pdf>>.

CANDES, E. J.; TAO, T. Decoding by linear programming. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 51, n. 12, p. 4203–4215, dec 2005. ISSN 0018-9448.

CHAN, T H T et al. Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge : Background and experimental observation. **Engineering Structures**, v. 28, p. 648–659, 2006.

CHEN, Jinjie; LIU, Bo; ZHANG, Hao. Review of fiber Bragg grating sensor technology. **Frontiers of Optoelectronics in China**, v. 4, n. 2, p. 204–212, 2011.

COWIE, Barbara M et al. Fibre Bragg grating sensors for distributive tactile sensing. **Measurement Science and Technology**, v. 18, n. 1, p. 138–146, 2007.

ERDOGAN, Turan. Fiber grating spectra. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 8, p. 1277–1294, 1997.

FERREIRA, Alexandre; GONÇALVES, Anselmo Filipe; MENDES, Paulo Mateus. FBG Sensing Glove for Monitoring Hand Posture. **Ieee Sensors Journal**, v. 11, n. 10, p. 2442–2448, 2011.

GOLNARAGHI, Farid; KUO, Benjamin C. **Automatic Control Systems**. 9th. ed. Danvers, MA: John Wiley & Sons, INC., 2010. 926 p.

GURBUZ, Ali Cafer; MCCLELLAN, James H.; SCOTT, Waymond R. A compressive sensing data acquisition and imaging method for stepped frequency GPRs. **IEEE Transactions on Signal Processing**, v. 57, n. 7, p. 2640–2650, 2009.

- HEO, Jin-Seok; CHUNG, Jong-Ha; LEE, Jung-Ju. Tactile sensor arrays using fiber Bragg grating sensors. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 126, n. 2, p. 312–327, 2006. ISSN 09244247.
- HILL, K.O. et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. **Applied Physics Letters**, v. 32, n. 10, p. 647–649, 1978.
- HILL, Kenneth O.; MELTZ, Gerald. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 8, p. 1263–1276, 1997.
- IEC 61298-2. **INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION 61298-2: Tests under reference conditions**. Geneva: [s.n.], 2008.
- IEC 61757-2. **INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION 61757-2: Strain Measurement - Part 2: Fibre Bragg Gratings**. New York: [s.n.], 2016.
- KAMIZI, Marcos Aleksandro et al. Fiber Bragg grating sensors probed by artificial intelligence to detect and localize impacts on structures. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 14, n. SI-1, p. 25–34, 2015.
- KANELLOS, George T et al. Two dimensional polymer-embedded quasi-distributed FBG pressure sensor for biomedical applications. **Optics express**, v. 18, n. 1, p. 583–589, 2010.
- KERSEY, Alan D et al. Fiber Grating Sensors. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 8, p. 1442–1463, 1997.
- LAM, D K W; GARSIDE, B K. Characterization of single-mode optical fiber filters. **Applied Optics**, v. 20, n. 3, p. 440–445, 1981.
- LI, Chengbo et al. A new compressive video sensing framework for mobile broadcast. **IEEE Transactions on Broadcasting**, v. 59, n. 1, p. 197–205, 2013.
- LI, Hong-nan; LI, Dong-sheng; SONG, Gang-bing. Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. **Engineering Structures**, v. 26, p. 1647–1657, 2004.
- MASSA, Andrea; ROCCA, Paolo; OLIVERI, Giacomo. Compressive sensing in electromagnetics - A review. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v. 57, n. 1, p. 224–238, 2015.

MELTZ, G; MOREY, W W; GLENN, W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. **Optics letters**, v. 14, n. 15, p. 823–825, 1989.

MIGLIORE, Marco Donald. A compressed sensing approach for array diagnosis from a small set of near-field measurements. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 59, n. 6, p. 2127–2133, 2011.

MOREY, W. W.; MELTZ, G.; GLENN, W. H. Fiber Optic Bragg Grating Sensors. **Fiber Optic and Laser Sensors VII**, v. 1169, p. 98–104, 1990.

NEDOMA, Jan et al. Encapsulation of FBG sensor into the PDMS and its effect on spectral and temperature characteristics. **Advances in Electrical and Electronic Engineering**, v. 14, n. 4, p. 460–466, 2016.

NEGRI, L.H. et al. Sparse Force Mapping System Based on Compressive Sensing. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 66, n. 4, p. 830–836, 2017.

NEGRI, Lucas H. **Inteligência Computacional no Sensoriamento a Fibra Ótica**. 2017. 112 p. Tese (Tese) — Tese - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017, 2017.

NEGRI, Lucas Hermann et al. An approach to improve the spatial resolution of a force mapping sensing system. **Measurement Science and Technology**, v. 27, n. 2, p. 8, 2016.

NEGRI, L H et al. Distributive Surface Load Position Estimation by Smart Optical Sensing. **Anais do MOMAG**, n. 4, p. 359–362, 2014.

OTHONOS, Andreas; KALLI, Kyriacos. **Fibre Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing**. London: Artech House, 1999.

PARK, Chang-Sub et al. A PDMS-Coated Optical Fiber Bragg Grating Sensor for Enhancing Temperature Sensitivity. **Journal of the Optical Society of Korea**, v. 15, n. 4, p. 329–334, 2011.

RAO, Yun-jiang et al. In-Fiber Bragg-Grating Temperature Sensor System for Medical Applications. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 5, p. 779–785, 1997.

ROCHA, R P et al. FBG in PVC foils for monitoring the knee joint movement during the rehabilitation process. **Annual International Conference of the IEEE EMBS**, v. 33, p. 458–461, 2011.

SACCOMANDI, Paola et al. Feedforward neural network for force coding of an MRI-compatible tactile sensor array based on fiber Bragg grating. **Hindawi Publishing Corporation: Journal of Sensors**, v. 2015, n. August, p. 9, 2015.

SANTOS, Jose Luis; FARAHI, Faramarz. **Handbook of Optical Sensors**. New York: CRC Press, 2015. 706 p. ISSN 00161152.

SILVA, J. C. C da et al. Termômetro de Alta Temperatura (0-400 °C) baseado em Redes de Bragg em Fibra Ótica para Aplicação no Setor de Petróleo. In: **III Seminário Nacional de Controle e Automação**. Salvador: [s.n.], 2003. p. 187–192.

STORN, Rainer; PRICE, Kenneth. Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. **Journal of Global Optimization**, v. 11, n. 4, p. 341–359, 1997.

TIBSHIRANI, Robert. Regression Shrinkage and Selection via the Lasso. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B**, v. 58, n. 1, p. 267–288, 1996.

VUOLO, J. H. **Fundamentos da Teoria de Erros**. São Paulo: Blucher, 1995. v. 2.

WERZINGER, Stefan et al. Quasi-Distributed Fiber Bragg Grating Sensing Using Stepped Incoherent Optical Frequency Domain Reflectometry. **Journal of Lightwave Technology**, v. 34, n. 22, p. 5270–5277, 2016.

XIAMETER. **Silicone Rubber**. 2016. Disponível em: <https://www.xiameter.com/en/ExploreSilicones/ProductTypes/Silicone_Rubber/Pages/LSR.aspx>.

XU, M.G. et al. Optical in-fibre grating high pressure sensor. **Electronics Letters**, v. 29, n. 4, p. 398, 1993.

Apêndices

APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES

O trabalho gerou um artigo completo publicado em Anais de Conferência Internacional e um artigo submetido para periódico.

1. PEDROSO, M. A. et al. Fabrication of a tactile sensor array with fiber Bragg gratings using a 3D printed mold. **SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference**, p. 4, 2017.
2. PEDROSO, M. A. et al. Tactile sensor array with fiber Bragg gratings in *quasi*-distributed sensing. **Hindawi Publishing Corporation: Journal of Sensors**, p. 8, 2017.(SUBMETIDO)

Também foi publicado um artigo completo em Anais de Conferência Internacional em colaboração com outro trabalho em desenvolvimento no grupo, e um artigo está em fase de elaboração para submissão a periódico indexado da área.

3. KAMIZI, M. A. et al. Fabrication and characterization of fiber Bragg grating based sensors for force measurements. **SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference**, p. 5, 2017.

APÊNDICE B – FABRICAÇÃO DA BORRACHA DE SILICONE



Figura 36 – Materiais e procedimentos para a fabricação da borracha de silicone.

APÊNDICE C – Posições Utilizadas nos Testes de Reconstrução

Tabela 16 – Posições e massas utilizadas na reconstrução de 2 cargas.

Teste n°	Carga Aplicada na Célula A (g)	Carga Aplicada na Célula B (g)	Carga Aplicada na Célula C (g)	Carga Aplicada na Célula D (g)	Carga Aplicada na Célula E (g)	Carga Aplicada na Célula F (g)	Carga Aplicada na Célula G (g)	Carga Aplicada na Célula H (g)
1	200	–	–	–	–	–	100	–
2	–	200	–	–	–	–	–	100
3	–	–	200	–	–	–	100	–
4	–	–	–	200	–	–	–	100
5	–	100	–	–	200	–	–	–
6	100	–	–	–	–	200	–	–
7	–	100	–	–	–	–	200	–
8	–	–	100	–	–	–	–	200
9	200	–	–	–	100	–	–	–
10	–	200	–	–	–	100	–	–
11	–	–	200	–	–	–	–	100
12	–	–	–	200	–	–	100	–
13	100	–	–	–	–	–	200	–
14	–	100	–	–	–	–	–	200
15	–	–	100	–	–	–	200	–
16	–	–	–	100	–	–	–	200
17	–	200	–	–	100	–	–	–
18	200	–	–	–	–	100	–	–
19	–	200	–	–	–	–	100	–
20	200	–	–	–	–	–	–	100

Tabela 17 – Posições e massas utilizadas na reconstrução de 3 cargas.

Teste n°	Carga Aplicada na Célula A (g)	Carga Aplicada na Célula B (g)	Carga Aplicada na Célula C (g)	Carga Aplicada na Célula D (g)	Carga Aplicada na Célula E (g)	Carga Aplicada na Célula F (g)	Carga Aplicada na Célula G (g)	Carga Aplicada na Célula H (g)
1	200	–	–	100	–	–	100	–
2	–	200	100	–	–	–	–	100
3	–	100	200	–	–	–	100	–
4	100	–	–	200	–	–	–	100
5	–	100	–	–	200	–	–	100
6	100	–	–	–	–	200	100	–
7	–	100	–	–	–	100	200	–
8	–	100	100	–	–	–	–	200
9	50	–	–	–	100	–	–	100
10	–	200	–	–	–	100	100	–
11	–	100	200	–	–	–	–	100
12	100	–	–	200	–	–	100	–
13	100	–	–	100	–	–	50	–
14	–	100	–	–	100	–	–	200
15	–	100	100	–	–	–	50	–
16	100	–	–	100	–	–	–	50
17	–	200	–	–	100	–	–	100
18	200	–	–	–	–	50	100	–
19	–	100	–	–	–	200	50	–
20	100	–	–	100	–	–	–	50

Tabela 18 – Posições e massas utilizadas na reconstrução de 4 cargas.

Teste n°	Carga Aplicada na Célula A (g)	Carga Aplicada na Célula B (g)	Carga Aplicada na Célula C (g)	Carga Aplicada na Célula D (g)	Carga Aplicada na Célula E (g)	Carga Aplicada na Célula F (g)	Carga Aplicada na Célula G (g)	Carga Aplicada na Célula H (g)
1	50	50	–	–	–	–	50	50
2	–	–	100	50	–	–	50	100
3	–	–	50	50	–	–	50	50
4	–	50	50	–	–	–	50	100
5	–	100	100	–	–	–	50	100
6	–	100	50	–	–	–	50	100
7	100	–	–	50	–	50	100	–
8	50	–	–	50	–	50	50	–
9	100	–	–	50	–	50	100	–
10	–	100	50	–	50	–	–	100
11	–	50	50	–	50	–	–	100
12	–	50	50	–	50	–	–	50
13	–	–	50	50	50	50	–	–
14	50	100	–	–	–	50	100	–
15	50	100	–	–	–	100	100	–
16	–	100	100	–	–	100	100	–
17	–	50	50	–	–	50	50	–
18	–	100	50	–	–	100	50	–
19	–	50	100	–	–	50	100	–
20	–	50	100	–	–	100	100	–

Anexos

ANEXO A – CARACTERÍSTICAS DA FIBRA ÓTICA MONOMODO

Single-Mode Optical Fiber (SMF)

First class reliability thanks to Draka proprietary processes and coating system

Product Type: G.652.B

Coating Type: ColorLock-XS and Natural

Issue date: 08/10

Supersedes: 05/09

Optical Specifications

Attenuation	
Attenuation at 1310 nm	0.33 – 0.35 dB/km
Attenuation at 1383 nm	1 dB/km
Attenuation at 1550 nm	0.19 – 0.22 dB/km
Attenuation at 1625 nm	0.21 – 0.24 dB/km

Other values available on request

Attenuation vs. Wavelength

Maximum attenuation change over the window from reference

Wavelength range (nm)	Reference λ (nm)	(dB/km)
1285 – 1330	1310	≤ 0.03
1525 – 1575	1550	≤ 0.02
1550 – 1625	1550	≤ 0.03

Point discontinuities

No point discontinuity greater than 0.05 dB at 1310 nm and 1550 nm.

Attenuation with Bending

Number of Turns	Mandrel Radius (mm)	Wavelength (nm)	Induced Attenuation (dB)
100	25	1310	≤ 0.05
100	25	1550	≤ 0.05
100	30	1625	≤ 0.05

Cutoff Wavelength

Cable Cutoff wavelength (Acctf) ≤ 1260 nm

Mode Field Diameter

Wavelength (nm)	MFD (μm)
1310	9.0 ± 0.4
1550	10.1 ± 0.5

Chromatic Dispersion

Wavelength (nm)	Chromatic Dispersion (ps/(nm.km))
1285 – 1330	$\leq 3 $
1550	≤ 18.0
1625	≤ 22.0

Zero Dispersion Wavelength (λ_0): 1300 – 1322 nm

Slope (S_0) at λ_0 : ≤ 0.090 ps/(nm².km)

Polarization Mode Dispersion (PMD)

PMD Link Design Value* (ps $\sqrt{\text{km}}$)	≤ 0.08
Max. Individual Fiber (ps $\sqrt{\text{km}}$)	≤ 0.20

* According to IEC 60794 –3, Ed 3 (Q=0.01%)

Geometrical Specifications

Glass Geometry

Cladding Diameter	125.0 ± 1.0 μm
Core/Cladding Concentricity Error	≤ 0.6 μm
Cladding Non-Circularity	≤ 1.0 %
Fiber Curl (Radius)	> 4 m

Coating Geometry

Coating Diameter	242 ± 7 μm
Coating/Cladding Concentricity Error	≤ 12 μm
Coating Non-Circularity	≤ 5 %
Length	Standard lengths up to 50.4 km

Mechanical Specifications

Proof Test

The entire length is subjected to a tensile proof stress ≥ 0.7 GPa (100 kpsi); 1% strain equivalent

Tensile Strength

Dynamic tensile strength (0.5 meter gauge length):

Aged** and unaged: median > 3.8 GPa (550 kpsi)

** Aging at 85°C, 85% RH, 30 days

Dynamic and Static Fatigue

Dynamic fatigue, unaged and aged** $n_d \geq 20$

Static fatigue, aged** $n_s \geq 23$

Coating Performance

Coating strip force unaged and aged***:

- Average strip force: 1 N to 3 N

- Peak strip force: 1.2 N to 8.9 N

*** Aging:

- 0°C and 45°C
- 30 days at 85°C and 85% RH
- 14 days water immersion at 23°C
- Wasp spray exposure (Telcordia)

Environmental Specifications

Attenuation

Environmental Test	Test Conditions	Induced Attenuation at 1310, 1550 nm (dB/km)
Temperature cycling	- 60°C to 85°C	≤ 0.05
Temperature-Humidity cycling	- 10°C to 85°C, 4-98% RH	≤ 0.05
Water Immersion	14 days; 23°C	≤ 0.05
Dry Heat	30 days; 85°C	≤ 0.05
Damp Heat	30 days; 85°C; 85% RH	≤ 0.05

Typical Values

Miscellaneous

Nominal Zero Dispersion Slope	0.085 ps/(nm ² .km)
Effective group index @ 1310 nm	1.467
Effective group index @ 1550 nm	1.468
Effective group index @ 1625 nm	1.468
Rayleigh Backscatter Coefficient for 1 ns pulse width:	
@ 1310 nm	- 79.4 dB
@ 1550 nm	- 81.7 dB
@ 1625 nm	- 82.5 dB
Median Dynamic Tensile Strength	5.3 GPa (750 kpsi)
(Aged at 85°C, 85% RH, 30 days; 0.5 m gauge length)	

ANEXO B – FOLHA DE DADOS DO MONITOR INTERROGADOR

Features
High measurement frequency
Broad wavelength ranges
High resolution
Large dynamic range
Compact size
No moving parts

Applications
Stand-alone Interrogation monitor and/or
OEM Interrogation monitor modules:
- Vibration analysis
- Temperature measurements
- Pressure monitoring
- Strain measurements

I-MON software

The I-MON 512 E comes with LabVIEW based software providing plug-and-play operation. Driver software packages and DLL files allow the user to develop own measurement applications for OEM integration.

Operating principle

The Ibsen I-MON Interrogation Monitors build on patented (*) Ibsen high-resolution spectrometer technology, utilizing Ibsen fused silica transmission gratings. The I-MON splits the wavelength spectrum spatially to allow for

parallel processing of the individual FBG sensor peaks. The FBG sensor peaks are measured by a diode array, and the embedded electronics provides USB interface.

About Ibsen Photonics

Ibsen Photonics is building its portfolio of high resolution spectrometer modules on more than 20 years of experience in diffractive optics. Ibsen Photonics also has a leading position within phase masks for FBG manufacturing, holographic fused silica transmission gratings, and spectrometers. Ibsen Photonics welcomes partnerships with original equipment manufacturers based on the Ibsen high resolution spectrometer technology. Ibsen Photonics is a privately held company.

(*) US patents no's.: 6,842,239 and 6,978,062

Specifications

Parameter	Unit	I-MON 512 E
Wavelength range	nm	1275-1345 / 1510-1595
Max no. of FBG's and spacing		>70 at 1000 pm / >70 at 1200 pm
Wavelength fit resolution	pm	< 0.5
Repeatability (over any pol state)	pm	3 (5 max.)
Wavelength linearity	pm	5 (typ.)
Wavelength drift	pm/°C	1 (3 max.)*
Dynamic range	dB	30
Input optical power range	dBm	-80 to -20
Measurement frequency	Hz	970
Interface		USB 2.0
Current consumption	mA	250 **
Temperature range	°C	0 - 50
Size	mm	104 x 94 x 48

(*) Note that by applying temperature control or temperature correction the wavelength accuracy over the entire temperature range can be improved.

(**) USB bus power.

Specifications are subject to change without prior notice. Design and specifications can be modified to suit a range of customer requirements.



For further information you can contact us directly at:

Ibsen Photonics A/S Ryttermarken 15-21 DK-3520 Farum Denmark
 Phone +45 4434 7000 Fax +45 4434 7001 www.ibsenphotonics.com E-mail inquiry@ibsen.dk

ANEXO C – FOLHA DE DADOS DO BANHO TERMOSTÁTICO

LAUDA Special devices

Calibration thermostats

Calibration thermostats
Ecoline Staredition and Proline

The calibration thermostats of the LAUDA Ecoline Staredition range offer you temperature stabilities to ± 0.01 K at temperatures down to -30 °C. The RE 212 J model with its two-line display, digital interface and basic programmer is convincing. The even more user-friendly RE 312 J offers the possibility of external control for even better accuracy and the PC software LAUDA Wintherm Plus. In the heating range, the compact Proline PJ 12 C models reach maximum temperatures up to 300 °C. The P.J.L 12/P.J.L 12 C were designed especially for operation with the LAUDA DLK 45 through-flow cooler and reach temperatures down to -40 °C.

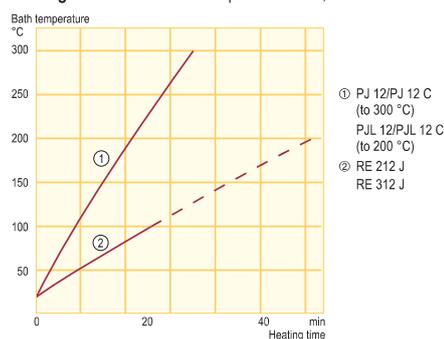


Ecoline Staredition RE 312 J



Proline PJ 12 C

Heating curves Heat transfer liquid: Ultra 300, bath closed

Temperature range
 $-40...300$ °C

Included accessories

Nipples - screw caps - pump link
(only RE 212 J and RE 312 J) - bath cover (PJ/PJL)

Additional accessories

Bath cover (RE 212 J, RE 312 J) - calibration racks

Applications
DevicesAll technical data on page 98 and following
Other power supply variants on page 111

Technical features		RE 212 J	RE 312 J
Working temperature range*	°C	$-30...200$	$-30...200$
Temperature stability	$\pm K$	0.01	0.01
Resolution of indication	°C	0.05	0.05/0.01
Heater power	kW	2.25	2.25
Cooling output at 20 °C	kW	0.30	0.30
Pump pressure max.	bar	0.40	0.40
Pump flow (pressure) max.	L/min	17	17
Bath volume	L	9...12	9...12
Bath opening/usable depth	mm	$\varnothing 150/180$	$\varnothing 150/180$
Cat. No. 230 V; 50 Hz		LCK 1879	LCK 1880

Technical features		PJ 12	PJ 12 C	P.J.L 12	P.J.L 12 C
Working temperature range	°C	$30...300$	$30...300$	$30...200$	$30...200$
Operating temperature range	°C	$0...300$	$0...300$	$-40^{**}...200$	$-40^{**}...200$
Temperature stability	$\pm K$	0.01	0.01	0.01	0.01
Resolution of indication	°C	0.1	0.1/0.01/0.001	0.1	0.1/0.01/0.001
Heater power	kW	3.5	3.5	3.5	3.5
Pump pressure max.	bar	0.8	0.8	0.8	0.8
Pump flow (pressure) max.	L/min	25	25	25	25
Bath volume	L	8.5...13.5	8.5...13.5	8.5...13.5	8.5...13.5
Bath opening/depth	mm	$\varnothing 120/320$	$\varnothing 120/320$	$\varnothing 120/320$	$\varnothing 120/320$
Usable depth	mm	300	300	300	300
Cat. No. 230 V; 50/60 Hz		LCB 0720	LCB 0721	LCB 0718	LCB 0719

ANEXO D – FOLHA DE DADOS DA BORRACHA DE SILICONE

**Informação de
Produto**


Dow Corning® BX3-8001 Borracha Líquida de Silicone

Características

Tipo

Elastômero de silicone
Bicomponente

Forma Física

Borracha firme e de cor
branca a creme

Propriedades Especiais

Grande resistência ao rasgo e
alongamento. Excelente
desmoldante.

APLICAÇÕES

Confecção de moldes de borracha de silicone flexível e de alta resistência, encapsulado de componentes eletrônicos, fabricação de peças, moldes de pele de elevada resistência para a indústria de calçados, moldagem por alta frequência, etc.

DESCRIÇÃO

Dow Corning® BX3-8001 Borracha Líquida de Silicone para moldagem é um produto bicomponente, composto de base e catalisador, de media viscosidade. Ao misturar os componentes na proporção de 20:1 (100 partes da base por 5 do catalisador, em peso), cura-se à temperatura ambiente e forma um elastômero de silicone flexível e altamente resistente ao rasgo. Outras vantagens que Dow Corning® BX3-8001 Borracha Líquida de Silicone para moldagem oferece, são:

- Excelente reprodução de detalhes.
- Características excepcionais de desmoldagem.
- Fácil de misturar e desaerar.
- Longo tempo de trabalho.
- Cura não sensível à inibição.
- Baixo encolhimento (0,5).
- Cura não exotérmica.
- Excelente resistência ao rasgo.
- Grande capacidade de alongamento.
- Boa resistência à tração.

PROPRIEDADES TÍPICAS

Estes valores não se destinam a ser utilizados na preparação de especificações. É favor contatar seu representante local de vendas da Dow Corning antes de escrever qualquer especificação sobre este produto.

	BX3 8001 + Catalisador	
	<u>Silastic® 81 NW</u>	<u>Silastic® 81-VF NW</u>
Taxa de mistura, Base:Catalisador em peso	100:5	100:5
Cor da Mistura	branco opaco	branco opaco
Viscosidade da Mistura, mPa.s	5100 cp	6200 cP
Tempo de Trabalho a 23°C, minutos mínimo	90-120	8-10
Dureza, Shore A	13.6	17.1
Tensão, psi	343.09	315.19
Alongamento de Ruptura, %	520.07	389.02
Resistência ao rasgo, ppi	19.61	14.1
Densidade a 25°C	1.146	1.141
Encolhimento linear, % a 7 dias de cura	0.2-0.4	0.2-0.4
Tempo de cura, horas mínimo	24	6