

Daniel Ramos Louzada

Detecção e caracterização de danos estruturais através de sensores a rede de Bragg e Redes Neurais Artificiais

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Arthur Martins Barbosa Braga
Co-orientador: Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa

Rio de Janeiro
Outubro de 2013

Daniel Ramos Louzada

Detecção e caracterização de danos estruturais através de sensores a rede de Bragg e Redes Neurais Artificiais.

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga
Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa
Co-orientador

Programa de Pós-Graduação em Metrologia - PUC-Rio

José Luiz de França Freire

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Luis Carlos Guedes Valente

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Marcelo Amorim Savi, UFRJ

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Lazaro Valentim Donadon

Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 22 de outubro de 2013

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Daniel Ramos Louzada

Graduou-se em Licenciatura Plena Física, em janeiro de 2003, pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ. Recebeu o título de Mestre pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2006.

Ficha Catalográfica

Louzada, Daniel Ramos

Detecção e caracterização de danos estruturais através de sensores a rede de Bragg e Redes Neurais Artificiais/ Daniel Ramos Louzada; orientador: Arthur Martins Barbosa Braga; Co-orientador: Carlos Roberto Hall Barbosa. - Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2013.

v.,173 f.: il. (color.); 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2013.

Incluí bibliografia.

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Detecção de defeitos por corrosão em materiais tipo placa. 3.Integridade Estrutural. 4 Elementos Finitos. 5. Extensiometria. 6.Teste em zona elástica. I Braga, Arthur Martins Barbosa.II Barbosa, Carlos Roberto Hall III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD:621

Dedico todo este trabalho ao meu querido pai, Ruy Carlos e a minha saudosa mãe,
Maria Hermínea que sempre preencheram todos os dias da minha vida.

Agradecimentos

Aos meus pais que sempre me apoiaram nas minhas decisões.

A toda a minha família que sempre esteve presente nos meus momentos mais difíceis.

Aos meus orientadores Arthur Martins Barbosa Braga e Carlos Roberto Hall Barbosa, pelo constante apoio e incentivo.

À Paula Medeiros Proença de Gouvêa e Luis Carlos Guedes Valente por todo apoio e orientações durante o andamento do projeto da qual esta tese resultou.

À todos os funcionários do departamento de engenharia mecânica da PUC que sempre me auxiliaram em tudo o que precisei.

Aos meus amigos da pós graduação do DEM, que sempre estiveram ao meu lado, me ajudando sempre que possível.

À FINEP e a PUC-Rio por todo apoio recebido.

Resumo

Ramos, Daniel Louzada; Braga, Arthur Martins Barbosa; Barbosa, Carlos Roberto Hall . **Deteção e caracterização de danos estruturais através de sensores a rede de Bragg e Redes Neurais Artificiais**. Rio de Janeiro, 2013. 173 p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O aumento dos custos relacionados aos processos de manutenção em estruturas como aeronaves, aliadas à crescente demanda das mesmas, alimentam a necessidade de investimentos em técnicas inovadoras de monitoramento estrutural. Dessa forma, o trabalho realizado nesta tese, busca o desenvolvimento de uma técnica de monitoramento ativo, visando o acompanhamento de parâmetros da estrutura analisada, a fim de identificar e caracterizar processos de dano não visíveis, tais como corrosão e delaminação. A metodologia empregada, teve como base a análise dos padrões de deformação superficial, obtidos com o uso de grades de sensores à fibra óptica baseadas em redes de Bragg (FBG). Inicialmente, tais padrões foram provocados por carregamentos estáticos (tração), e posteriormente por atuadores PTZ fixados à estrutura. Estes últimos são submetidos a uma voltagem alternada e frequência fixa. Esta técnica apresenta todas as vantagens dos sensores FBG (massa e dimensões reduzidas, imunidade eletromagnética, elevado poder de multiplexação e alta sensibilidade entre outras), além de permitir a visualização de alterações nos padrões de deformação, provocados por danos, através da variação da frequência de excitação. Com relação à interpretação dos resultados, a estratégia empregada consistiu em separar o problema de deteção e caracterização dos danos. Dessa forma, a deteção é realizada comparando a energia das deformações superficiais dos corpos de prova nos casos com e sem defeito, enquanto a caracterização é obtida através a utilização de redes neurais artificiais (RNA), por meio de rotinas de reconhecimento de padrões.

Palavras-Chave

Monitoramento da Saúde Estrutural (SHM); Sensores de Rede de Bragg (FBG); Delaminação em Compósitos; Corrosão; Redes Neurais Artificiais.

Abstract

Ramos, Daniel Louzada; Braga, Arthur Martins Barbosa; Barbosa, Carlos Roberto Hall (Advisor). **Detection and characterization of structural damage using fiber Bragg grating sensors and artificial neural networks.** Rio de Janeiro, 2013. 173 p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The higher costs related to maintenance processes in structures such as aircraft, coupled with the growing demand of them, fueling the need for investment in innovative techniques for structural monitoring. Thus, the work done in this thesis seeks to develop a technique of active monitoring, aiming at monitoring of structure parameters analyzed in order to identify and characterize processes of hidden damage such as corrosion and delamination. The main methodology was based on the analysis of patterns of surface deformation, obtained with the use of nets of optical fiber sensors based on fiber Bragg gratings (FBG). Initially, these patterns were caused by static loads (tension), and later by PTZ actuators fixed to the frame, who are subjected to an AC voltage and fixed frequency. This technique has all the advantages of the FBG's sensors (mass and small dimensions, electromagnetic immunity, high multiplexing's power and high sensitivity among others), in addition to allowing visualization of changes in the patterns of deformation caused by damage, by varying the frequency excitation. With respect to the interpretation of the results, the strategy employed was to separate the problem of detection and characterization of damage. Thus, the detection is performed by comparing the deformation energy of the surface of the specimens in the cases with and without defect, whereas the characterization is obtained through the use of artificial neural networks (ANN) by means of pattern recognition routines.

Keywords

Structural Health Monitoring (SHM); Fiber Bragg Grating Sensors; Artificial Neural Networks; Corrosion; Composite Delamination.

Sumário

1	Introdução	22
1.1	Contextualização e motivação	22
1.2	Objetivos da tese	24
1.3	Estrutura da Tese	25
2	Sensores a fibra óptica	27
2.1	Fundamentos	27
2.2	Classificação dos Sensores a Fibra Óptica	33
2.2.1	Local de Interrogação	33
2.2.2	Configuração de Sensoriamento	34
2.2.3	Interrogação do Sinal	36
2.2.4	Técnicas de endereçamento	38
2.3	Sensores de Redes de Bragg (FBG)	39
2.3.1	Caracterização Histórica	40
2.3.2	Princípios Básicos de Sensores FBGs	41
2.3.3	Descrição Matemática $\Delta\lambda_B$ com a temperatura e tração.	43
2.3.4	Sensibilidade	45
2.3.5	Gravação de Redes de Bragg em fibras ópticas	46
2.3.6	Técnicas de Leitura dos sensores FBG	49
3	Sistema de Monitoramento Estrutural - SHM	51
3.1	Introdução	51
3.2	Implementação de um Sistema SHM	52
3.3	Formas de interrogação estrutural	54
3.3.1	Sensores e Atuadores	55
3.4	Transmissão de Dados	56
3.5	Sistemas SHM Propostos	57
3.5.1	Estruturas de Alumínio e Corrosão	57
3.5.2	Laminados Compósitos e Delaminação	61
3.6	Processamento de sinais	64

4	Redes Neurais Artificiais – RNAs	66
4.1	Histórico	66
4.2	Neurônio Artificial	69
4.3	Funções de Ativação	70
4.4	Arquitetura	71
4.5	Formas de Aprendizado - Treinamento.	73
4.6	Modelagem de uma RNA	75
4.6.1	Validação cruzada e generalização e testes do modelo	75
4.6.2	Tratamento dos padrões de entrada para as RNA	76
4.6.3	Número de neurônios	77
5	Monitoramento Estático de Estruturas de Alumínio	79
5.1	Descrição	79
5.2	Simulações Computacionais (Modelagem em ANSYS)	79
5.2.1	Modelagem	80
5.2.2	Mapas de Deformação	82
5.3	Ensaio Experimentais	87
5.3.1	Incerteza de Medição	90
5.3.2	Correlação dos Resultados Numéricos e Experimentais	96
5.4	Sistema SHM para corrosão	97
5.4.1	Deteção da corrosão	99
5.4.2	Caracterização da corrosão por RNA	102
5.4.3	Probabilidade de deteção (<i>Probability of Detection - PoD</i>)	105
6	Monitoramento Dinâmico de Compósitos	110
6.1	Simulações Computacionais	110
6.1.1	Modelagem do Problema	110
6.1.2	Exame de Frequência	113
6.1.3	Mapas de Deformação	118
6.1.4	Relação entre Malha e Deteção	136
6.2	Ensaio Experimentais	148
6.2.1	Descrição experimental.	148
6.2.2	Ensaio realizados.	150

6.3	Sistema SHM para Delaminação	153
6.3.1	Detecção	153
6.3.2	Probabilidade de Detecção - PoD	161
7	Conclusão e Discussões	165
7.1	Trabalhos Futuros	168
8	Referencias Bibliográficas	169

Lista de figuras

Figura 1 – Distribuição populacional entre 1950 e 2010. (Fonte: UN, Population Division, 2011)	22
Figura 2 – Cenário de necessidades a respeito do monitoramento estrutural.	24
Figura 3 – Ilustração de uma fibra óptica.	28
Figura 4 – Diferentes padrões de índices de refração em FO.	29
Figura 5 - Fenômeno da reflexão interna total da luz	30
Figura 6 - Trajeto percorrido por um raio de luz em uma fibra óptica.	30
Figura 7- Atenuação óptica causada por curvatura na fibra.	32
Figura 8- Esquema de sensoriamento de um sensor extrínseco.	34
Figura 9- Esquema de sensoriamento de um sensor intrínseco.	34
Figura 10- Representação de um sensor multiponto em uma mesma fibra óptica (multiplexação).	35
Figura 11 - Esquema de um circuito óptico de inferência a com sensores de modulação de intensidade.	36
Figura 12 - Esquema de um circuito óptico de inferência com sensores de modulação de fase.	37
Figura 13 - Esquema de um circuito óptico de inferência com sensores de modulação de frequência.	38
Figura 14 - Esquemático de uma rede de Bragg impressa em uma fibra.	42
Figura 15 - Esquemático de uma rede de Bragg impressa em uma fibra.	43
Figura 16 - Padrões de modulação existentes em sensores FGB. a) padrão homogêneo, b) <i>apodization</i> c) <i>Chirp</i> .	47
Figura 17 - Configuração típica de um sistema de leitura por demodulação por comprimento de onda.	49
Figura 18 - Configuração típica de um sistema de leitura por demodulação por filtro fixo.	50
Figura 19 – Diagrama de processos inerentes ao SHM.	53
Figura 20 – Ilustração do efeito Piezelétrico direto.	55
Figura 21 - Exemplo da formação de corrosão galvânica em uma	

estrutura de alumínio e aço. (Fonte: http://aluminumsurface.blogspot.com.br/2009/04/corrosion-between-anodized-aluminum-and.html , acessado em 15/09/2013).	58
Figura 22 - Corrosão por pontos em uma peça de alumínio (Fonte: http://www.amteccorrosion.co.uk/aluminium.html , acessado em 15/09/2013).	59
Figura 23 - Em <i>a</i> , é exemplificado a corrosão intergranular em uma placa de liga de Al, enquanto que em <i>b</i> é observada microscopicamente a estrutura. (Fonte: http://moraisvinna.blogspot.com.br/2011/10/quanto-tempo-dura-um-aviao-comercial.html , acessado em 15/09/2013)	60
Figura 24 - Corrosão por esfoliação em uma peça feita de liga de alumínio. (Fonte: http://www.epoxipiso.com.br/2012/11/formas-de-corrosao.html , acessado em 15/09/20013)	60
Figura 25 - Falha estrutural ocorrida em uma aeronave, devido a falhas na detecção de processos de corrosão por tensão na sua fuselagem de alumínio. (Fonte: http://aviationtroubleshooting.blogspot.com.br/2010_10_01_archive	61
Figura 26 – Diagrama de classificação dos materiais compósitos.	62
Figura 27 - Desenho exemplificando uma seção transversal de um corpo de material compósito com a presença de delaminação localizado entre as suas camadas centrais.	63
Figura 28 - Delaminação observada em um material compósito híbrido de fibra/epóxi/alumínio, provocada por uma força de compressão.	64
Figura 29 - Esquemático de direção de propagação de sinais durante o processamento de informações pelo cérebro (Rede Neural natural).	67
Figura 30 - Ilustração da organização existente entre os neurônios naturais.	68
Figura 31 - Representação de um neurônio artificial.	70
Figura 32 - Formato das principais funções de ativação.	71
Figura 33 - Representação gráfica de uma topologia de rede neural.	72
Figura 34 - Na figura <i>a</i>) esta representado uma RNA com uma camada (<i>Perceptron</i>) enquanto na figura <i>b</i>) a RNA possui	

múltiplas camadas (MLP).	72
Figura 35 - Rede parcialmente recorrente (Rede de Elman).	73
Figura 36 - Rede totalmente recorrente (Rede de Hopfield).	73
Figura 37 - Relação entre o erro de treinamento e o erro de validação em uma RNA do tipo MLP com treinamento por <i>Backpropagation</i> .	76
Figura 38 - Condição de carregamento aplicado ao modelo numérico.	81
Figura 39 - Formato das áreas de desgaste provocadas para a simulação de processos de corrosão.	82
Figura 40 - Indicação da superfície sobre a qual são coletados os dados simulados.	83
Figura 41 - Mapa de deformação superficial [$\mu\varepsilon$] de uma placa submetida a uma tração de 1600 kg.	83
Figura 42 - Mapas de deformação superficial [$\mu\varepsilon$] de placas submetidas a uma tração de 1200 kgf e com processos de corrosão central, com comprometimento de 45% da espessura inicial.	84
Figura 43 - Mapas de deformação superficial [$\mu\varepsilon$] de placas submetidas a uma tração de 1600 kgf e com processos de corrosão central, com comprometimento de 45% da espessura inicial.	84
Figura 44 - Procedimentos de realizados sobre os dados simulados a fim de promover a sua redução e adequação à situações experimentais.	85
Figura 45 - Filtragem dos mapas de deformação para linhas.	85
Figura 46 - Espaçamento dos sensores ao longo de cada linha de deformação.	86
Figura 47 - Processo de redução e condicionamento dos dados brutos.	86
Figura 48 - Placa de alumínio (dimensões de 400mm de comprimento, 130 mm de largura e 3mm de espessura) usinada com um desgaste no seu centro simulando a presença de uma corrosão.	87
Figura 49 - Desenho esquemático do posicionamento dos sensores FBG sobre a placa de alumínio a ser ensaiada.	88
Figura 50 – a) placa de alumínio com os sensores FBG. B) aparelho de medição ótica (BraggMETER) e máquina de tração. C) detalhe da placa de alumínio sendo tracionada.	88
Figura 51 - Primeiro ensaio de tração com a placa de alumínio com um desgaste central de 45% da espessura e área quadrada de lados com 32mm.	89

Figura 52 - Resposta de um único sensor durante o ensaio de tração.	89
Figura 53 - Segundo ensaio de tração com a placa de alumínio com um desgaste central de 45% da espessura e área quadrada de lados com 32mm.	90
Figura 54 - Principais modelos de distribuição de probabilidade.	92
Figura 55 - Representação da distribuição dos resultados observados pelo sensor A4, durante o primeiro ensaio de tração.	95
Figura 56 - Representação da distribuição dos resultados observados pelo sensor A4, durante o segundo ensaio de tração.	96
Figura 57 - Comparação dos resultados simulados e experimentais.	96
Figura 58 - Esquema do sistema SHM proposto para o caso do problema de corrosão em estruturas laminares de alumínio.	99
Figura 59 - Energia por linha de deformação, associada cada um dos 88 padrões de corrosão simulados.	100
Figura 60 - Detecção da linha onde se encontra a corrosão por meio da comparação da energia com o limiar.	100
Figura 61 - Variação do erro de detecção com o tamanho da malha de sensores.	101
Figura 62 - Comparação entre as previsões das RNA e os valores de referência da largura das corrosões. Os dados apresentados à RNA nesse caso são distintos dos usados na fase de treinamento e validação.	103
Figura 63 - Comparação entre as previsões das RNA e os valores de referência de comprimento das corrosões. Os dados apresentados à RNA nesse caso são distintos dos usados na fase de treinamento e validação.	103
Figura 64 - Comparação entre as previsões das RNA e os valores de referência da profundidade das corrosões. Os dados apresentados à RNA nesse caso são distintos dos usados na fase de treinamento e validação.	104
Figura 65 - Ilustração de uma curva típica de PoD.	105
Figura 66 - Dados de classificação quanto ao defeito.	107
Figura 67 - Ilustração de uma curva típica de PoD.	107
Figura 68 - Dados utilizados para a construção da curva de PoD.	108
Figura 69 - Ilustração de uma curva típica de PoD.	109
Figura 70 - Desenho esquemático, representando a disposição da camada extra no interior do compósito, a qual tem o papel	

de simular a delaminação.	111
Figura 71 – Corpo de prova instrumentado com os atuadores piezelétricos.	112
Figura 72 – Visão das camadas do compósito. No esquema da esquerda a delaminação está modelada entre as camadas 8 e 9 enquanto no esquema da direita a delaminação esta entre as camadas 4 e 5.	112
Figura 73 - Desenho esquemático da placa de compósito, com uma delaminação quadrada de lados com 25,4mm, instrumentada com uma malha de sensores fictícios espalhados sobre a sua superfície.	115
Figura 74 - Deformação superficial por varredura de frequência (10kHz a 24kHz).	116
Figura 75 - Deformação superficial por varredura de frequência (24kHz a 50kHz).	116
Figura 76 - Deformação superficial por varredura de frequência com passo de 100 Hz (11kHz à 15kHz).	117
Figura 77 - Padrões de deformação para diferentes <i>Cpm</i> submetidos a frequência de 11,2 kHz.	119
Figura 78 - Padrões de deformação para diferentes <i>Cpm</i> submetidos a frequência de 13,3 kHz.	120
Figura 79 - Padrões de deformação para diferentes <i>Cpm</i> submetidos a frequência de 13,5 kHz.	121
Figura 80 - Padrões de deformação para diferentes <i>Cpm</i> submetidos a frequência de 14,7 kHz.	122
Figura 81 - Mapa de Deformação (Situação 01, frequência de 11,3 kHz).	123
Figura 82 - Mapa de Deformação (Situação 2, frequência de 13,3 kHz).	124
Figura 83 - Mapa de Deformação (Situação 3, frequência de 11,3 kHz).	124
Figura 84 - Mapa de Deformação (Situação 4, frequência de 11,3 kHz).	125
Figura 85 - Mapa de Deformação (Situação 5, frequência de 12,3 kHz).	125
Figura 86 - Mapa de Deformação (Situação 6, frequência de 11,1 kHz).	126
Figura 87 - Mapa de Deformação (Situação 7, frequência de 11,3 kHz).	126
Figura 88 - Mapa de Deformação (Situação 8, frequência de 11,3 kHz).	127
Figura 89 - Mapa de Deformação (Situação 9, frequência de 13,8 kHz).	127
Figura 90 - Mapa de Deformação (Situação 10, frequência de 11,3 kHz).	128
Figura 91 - Mapa de Deformação (Situação 11, frequência de 11,3 kHz).	128

Figura 92 - Mapa de Deformação (Situação 12, frequência de 11,kHz).	129
Figura 93 - Mapa de Deformação da superfície superior e inferior com uma frequência de excitação de 11,3kHz.	130
Figura 94 -- Mapa de Deformação da superfície superior e inferior com uma frequência de excitação de 13,3kHz.	130
Figura 95 - Mapa de Deformação da superfície superior e inferior com uma frequência de excitação de 13,8kHz.	131
Figura 96 - Mapas de Deformação em diferentes camadas e frequência de excitação de 13,3kHz (Delaminação de 1 Polegada quadrada).	132
Figura 97 - Mapa de Deformação em diferentes camadas e frequência de excitação de 13,4kHz (Delaminação de 1 Polegada quadrada).	132
Figura 98 - Mapa de Deformação em diferentes camadas e frequência de excitação de 13,5kHz (Delaminação de 1 Polegada quadrada).	133
Figura 99 - Mapa de Deformação em diferentes camadas e frequência de excitação de 13,3kHz (Delaminação de 1,5 Polegada quadrada).	133
Figura 100 - Mapa de Deformação em diferentes camadas e frequência de excitação de 13,4kHz (Delaminação de 1,5 Polegada quadrada).	134
Figura 101 - Mapa de Deformação em diferentes camadas e frequência de excitação de 13,5kHz (Delaminação de 1,5 Polegada quadrada).	134
Figura 102 - Mapa de Deformação em diferentes camadas e frequência de excitação de 13,3kHz (Delaminação de 2 Polegada quadrada).	135
Figura 103 - Mapa de Deformação em diferentes camadas e frequência de excitação de 13,4kHz (Delaminação de 2 Polegada quadrada).	135
Figura 104 - Mapa de Deformação em diferentes camadas e frequência de excitação de 13,5kHz (Delaminação de 2 Polegada quadrada).	136
Figura 105 - Grade de Sensores espalhados de 15mm em 15mm.	137
Figura 106 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 6,35mm por 6,35mm.	138
Figura 107 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 25,4mm por 25,4mm.	138
Figura 108 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 50,8mm por 50,8mm.	139
Figura 109 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com	

defeito de 25,4mm por 12,7mm.	139
Figura 110 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 25,4mm por 50,8 mm.	140
Figura 111 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 12,7mm por 63,1mm.	140
Figura 112 - Grade de Sensores espalhados de 30mm em 30mm.	141
Figura 113 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 6,35mm por 6,35mm.	141
Figura 114 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 25,4mm por 25,4mm.	142
Figura 115 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 50,8mm por 50,8mm.	142
Figura 116 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 25,4mm por 12,7mm.	143
Figura 117 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 25,4mm por 50,8 mm.	143
Figura 118 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 12,7mm por 63,1mm.	144
Figura 119 - Grade de Sensores espalhados de 50mm em 50mm.	144
Figura 120 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 6,35mm por 6,35mm.	145
Figura 121 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 25,4mm por 25,4mm.	145
Figura 122- Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 50,8mm por 50,8mm.	146
Figura 123 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 25,4mm por 12,7mm.	146
Figura 124 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 25,4mm por 50,8 mm.	147
Figura 125 - Mapa de deformação de 1mm em 1mm e com defeito de 12,7mm por 63,1mm.	147
Figura 126 - Foto do Coupon suspenso por fios no laboratório LSFO da PUC-Rio.	148

Figura 127 - Sinal obtido pela convolução do espectro do laser e da FBG.	149
Figura 128 - Desenho esquemático do sistema de medição do <i>Coupon</i> .	150
Figura 129 - Representação da configuração da grade de 20 sensores FBG.	151
Figura 130 - Mapa de deformação obtidos experimentalmente, com uma excitação à 13,3kHz.	151
Figura 131 - Mapa de deformação obtidos experimentalmente, com uma excitação à 13,4kHz.	152
Figura 132 - Mapa de deformação obtidos experimentalmente, com uma excitação à 13,kHz.	152
Figura 133 - Mapas de deformação por frequências de excitação.	154
Figura 134 - Esquemático geral de detecção.	154
Figura 135 - Esquemático do algoritmo desenvolvido para a detecção de delaminação em uma placa de material compósito.	155
Figura 136 - Mapas de probabilidade de se obter um caso de defeito (delaminação).	156
Figura 137- Delaminação de dimensões iguais à 0,5 polegadas por 0,5 polegadas.	157
Figura 138 - Delaminação de dimensões iguais à 0,5 polegadas por 1,5 polegadas.	157
Figura 139- Delaminação de dimensões iguais à 0,5 polegadas por 2,5 polegadas.	158
Figura 140 - Delaminação de dimensões iguais à 0,25 polegadas por 0,25 polegadas.	158
Figura 141 - Delaminação de dimensões iguais à 0,75 polegadas por 0,75 polegadas.	158
Figura 142 - Delaminação de dimensões iguais à 1,0 polegadas por 1,0 polegadas.	158
Figura 143 - Delaminação de dimensões iguais à 1,0 polegadas por 0,5 polegadas.	159
Figura 144 - Delaminação de dimensões iguais à 1,0 polegadas por 2,0 polegadas.	159
Figura 145 - Delaminação de dimensões iguais à 1,5 polegadas por 1,0 polegadas.	159

Figura 146 - Delaminação de dimensões iguais à 1,5 polegadas por 1,5 polegadas.	159
Figura 147 - Delaminação de dimensões iguais à 2,0 polegadas por 0,5 polegadas.	160
Figura 148 - Delaminação de dimensões iguais à 2,0 polegadas por 2,0 polegadas.	160
Figura 149 - Dados classificados por defeito (Delaminação).	163
Figura 150 - Curva de PoD obtida com os dados simulados para os coupons.	163
Figura 151 - Resultados experimentais e simulados contra a incerteza de medição.	165

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características da placa modelada numericamente.	80
Tabela 2 - Modelos de carregamento realizados.	81
Tabela 3 - Área das corrosões introduzidas no modelo numérico.	82
Tabela 4 - Resultado das incertezas para o primeiro ensaio de tração.	94
Tabela 5 - Resultado das incertezas para o segundo ensaio de tração.	95
Tabela 6 - Erros registrados no ensaio da placa de alumínio.	97
Tabela 7 - Erro médio quadrático dos resultados obtidos pelas RNAs.	104
Tabela 8 - Respostas do sistema MSE aos dados experimentais.	104
Tabela 9 – Posicionamento de cada atuador com relação ao seu centro.	111
Tabela 10 - Tamanhos das delaminações testadas nas simulações.	113
Tabela 11 - Dimensões das delaminações testadas com respeito à detecção.	157
Tabela 12 - Relação das delaminações testadas e suas detecções.	160
Tabela 13 - Resultados de classificação das delaminações nos testes simulados	162
Tabela 14 - Posicionamento da delaminação pelo sistema de detecção.	166
Tabela 15 - PoD obtidas para os modelos estático e dinâmico.	167

Só existem dois dias no ano que nada pode ser feito. Um se chama ontem e o outro se chama amanhã, portanto hoje é o dia certo para amar, acreditar, fazer e principalmente viver.

Dalai Lama