Darwin Gramer Falcón Soria

**Monitoração de Defeitos por Corrosão em Estruturas
Planas Utilizando Sensores a Rede de Bragg**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Rio de Janeiro
Outubro de 2011

Darwin Gramer Falcón Soria

**Monitoração de Defeitos por Corrosão em Estruturas
Planas Utilizando Sensores a Rede de Bragg**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Roberth Waldo Angulo Llerena

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Marcelo Amorim Savi

Departamento de Engenharia Mecânica – COPPE-UFRJ

Prof. Fernando Dotta

Embraer

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC - Rio

Rio de Janeiro, 5 de Outubro de 2011

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

Darwin Gramer Falcón Soria

Graduou-se em Engenharia Mecânica na UNSA (Universidad Nacional de San Agustín), Arequipa-Perú, em 2008. Atua na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em integridade estrutural.

Ficha Catalográfica

Soria, Darwin Gramer Falcón

Monitoração de Defeitos por Corrosão em Estruturas Planas Utilizando Sensores a Rede de Bragg / Darwin Gramer Falcón Soria; orientador: Arthur Martins Barbosa Braga, – 2011.

113 f.: il. (color.); 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro, 2011.

Incluí referências bibliográficas.

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. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Ao Senhor Jesus Cristo, aos meus pais Pedro e Goyita, meus queridos irmãos e os meus valiosos amigos a que me auxiliaram em nesta caminhada.
Sou eternamente grato.

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Arthur Martins Barbosa Braga, pelos ensinamentos, orientações, pela ajuda e paciência pelas colaborações e auxílios durante o desenvolvimento da dissertação de Mestrado. Saiba que a minha admiração e o meu respeito por você é grande.

A PUC-Rio, pela oportunidade do curso de mestrado. Orgulho-me imensamente de ser parte dessa excelente instituição que contribui para o aperfeiçoamento intelectual, acadêmico e profissional de todos os seus alunos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro. A todos os professores pelos conhecimentos adquiridos, por suas aulas e pela forma que conduzem os alunos através do mestrado.

A todos os colegas da pós-graduação do Rio de Janeiro e em especial: Américo, Inoquio, Gary, Murillo, Cristian, Palomino, e da sala azul pela força e conselhos.

Aos meus amigos do laboratório a Sensores de Fibra óptica, em especial: Roberth, Daniel, Sully.

A minha família e meu amor Paula Barbara que sempre esteve presente nos momentos de alegria e nas decisões difíceis durante meu mestrado.

Resumo

Soria, Darwin Gramer Falcón; Braga, Arthur Martins Barbosa. **Monitoração de Defeitos por Corrosão em Estruturas Planas Utilizando Sensores a Rede de Bragg**. Rio de Janeiro, 2011. 113p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O foco do presente trabalho é a detecção e o monitoramento de defeitos tais como perda de espessura por corrosão ou dano produzido por impacto em painéis metálicos planos. O sistema proposto emprega sensores de deformação a fibra óptica baseados em redes de Bragg, que possuem alta capacidade de multiplexação. O campo de deformações produzido na superfície da placa por um mesmo carregamento, cuja amplitude pode variar, é continuamente comparado a um mapa de referência, obtido com a estrutura íntegra ou na presença um defeito previamente detectado. Variações nos gradientes de deformações são associadas ao surgimento ou crescimento de um ou mais defeitos. Neste estudo, a metodologia foi preliminarmente avaliada através da análise de campos de deformação produzidos por carregamentos de tração em corpos de alumínio contendo defeitos superficiais. Esses defeitos exemplificam danos causados por corrosão, e são monitorados através de sensores a fibra óptica baseados em redes de Bragg. Os sensores são posicionados ao longo de uma das superfícies da placa, medindo deformações em duas direções ortogonais, que neste estudo corresponderam às direções principais de deformação. A abordagem do problema fundamenta-se na análise de dados experimentais e modelagem numérica por elementos finitos. Os resultados numéricos para as deformações são comparados com os obtidos em experimentos em laboratório. A técnica é utilizada para avaliar qualitativamente os defeitos em estruturas submetidas a carregamento estático. A correlação entre resultados numéricos e experimentais mostraram-se satisfatórias, indicando que o método apresenta potencial para ser estendido para aplicações mais complexas.

Palavras-chave

Integridade estrutural; Monitoramento da saúde estrutural(SHM); Fibra óptica; Rede de Bragg; Corrosão; Elementos finitos.

Abstract

Soria, Darwin Gramer Falcón; Braga, Arthur Martins Barbosa. **Monitoring Corrosion Defects in Planar Structures with Fiber Bragg Grating Sensors**. Rio de Janeiro, 2011. 113p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present work is focused on detecting and monitoring damage such as loss of thickness due to corrosion or other planar defects in flat metallic panels. The proposed method employs fiber optic sensors that, due to their high multiplexing capability, are capable of mapping the strain fields in the panel surfaces produced by the same, controlled, loading, which are then continuously compared to a reference map obtained with the structure free of defects or with a previously detected damage. Changes in the strain gradient are attributed to the appearance or growth of structural damage. The proposed approach for structural health monitoring has been preliminarily evaluated in this dissertation by analyzing the strain fields produced on an aluminum plate under in plane tensile loads. Artificial, localized surface defects, simulating a loss of thickness due to corrosion where the investigated defects. A mesh of fiber Bragg grating sensors was installed on one of the panel surfaces measuring its principal strains. The strain fields obtained with the plate containing defects with different depths and sizes were compared to a reference measurement with the panel without defects. Experimental data was compared with numerical simulations based on the Finite Element method. The correlation between numerical and experimental results was satisfactory indicating that the method can be further developed in order to be applied in implementations of structural health monitoring systems.

Keywords

Structural Integrity; Structural health monitoring (SHM); Fiber optics;
Bragg grating; Corrosion; Finite elements.

Sumário

1 Introdução	23
1.1. Estrutura do trabalho	24
2 Fundamentos para avaliação e monitoramento de placas.	26
2.1. Integridade estrutural em placas	27
2.2. Critérios de resistência contra o escoamento	31
2.2.1. Influência da concentração de tensões.	32
2.3. Monitoração com SHM	32
2.3.1. Subsistemas e classificação de SHM.	33
2.4. Sensores a fibra Óptica.	34
3 Modelagem numérica.	38
3.1. Introdução	38
3.2. Descrição da modelagem numérica	39
3.2.1. Modelagem geométrica.	39
3.3. Materiais	42
3.4. Malha MEF	43
3.4.1. Tipo de elemento utilizado	43
3.5. Condições de contorno	46
3.5.1. Aplicação do carregamento	47
3.6. Distribuição das deformações nos corpos de prova.	47
3.6.1. Tensões nas placas com defeitos.	49
3.7. Discussão dos resultados numéricos.	53
4 Abordagem experimental	55
4.1. Introdução	55
4.2. Preparação e instrumentação dos corpos de provas.	55
4.2.1. Fabricação dos espécimes planos.	56
4.2.2. Instrumentação dos sensores nos corpos de prova.	56
4.3. Dispositivo experimental	58

4.3.1. Monitoração de deformações	58
4.4. Análise experimental dos resultados.	61
5 Comparação experimental e numérica.	65
5.1. Comparações das medições das deformações dos sensores	71
5.2. Comparação numérica e experimental, em direções principais X e Y.	74
5.2.1. Deformações atuantes nos sensores.	86
6 Conclusões e sugestões	99
Referências bibliográficas	101
Apendice A	103
Apêndice B	108
Apêndice C	110

Lista de Figuras

Figura 2.1 Limites de separação de placa espessa, placa fina e membrana.	25
Figura 2.2 Estado triaxial de tensões em um paralelepípedo elementar [5].	26
Figura 2.3 Paralelepípedos elementares (a) Tensão plana, e (b) deformação plana [7].	28
Figura 2.4 Estado de tensão plana numa placa fina submetida a tração [7].	28
Figura 2.5 Placa engastada tracionada em sentido do esforço principal.	30
Figura 2.6 Subsistemas do sistema SHM [8].	32
Figura 2.7 Representação esquemática do princípio de operação das redes de Bragg [11].	34
Figura 3.1 Dimensões geométricas para a modelagem da placa de Alumínio.	39
Figura 3.2 Zona elástica do material utilizado para o alumínio.	41
Figura 3.3 Geometria do elemento SOLID186 e SOLID187 tipo piramidal [13].	43
Figura 3.4 Modelagem geométrica de placa, malhado pelo (MEF).	44
Figura 3.5 Discretização da malha na face oposta do defeito de corrosão com malha hexa dominante.	45

Figura 3.6 Deformações da face oposta ao defeito (perda de espessura) da placa, em direção X, tração.	47
Figura 3.7 Deformações da face oposta ao defeito (perda de espessura), em direção Y, compressão.	47
Figura 3.8 Tamanho de defeito em relação ao porcentagem da deformação.	49
Figura 3.9 Influência dos defeitos em superfície e profundidade dos defeitos nos corpos de prova em direção Y.	50
Figura 4.1 Placas instrumentadas com sensores de rede de Bragg.	55
Figura 4.2 Distribuição dos 25 sensores em direções X e Y.	57
Figura 4.3 Analisador de espectro óptico para FBG Micon Optics sm125-500.	58
Figura 4.4 Descrição da configuração utilizada para o ensaio.	58
Figura 4.5 Configuração instrumenta utilizada para obter os dados de FBG.	59
Figura 4.6 Variação do comprimento de onda das FBGs e seu correspondente valor de deformação em função do deslocamento, sensor 2 placa com defeito, em direção Y.	61
Figura 4.7 Variação do comprimento de onda das FBGs e seu correspondente valor de deformação em função do deslocamento, sensor 2 placa sem defeito, em direção Y.	61
Figura 4.8 Variação do comprimento de onda das FBGs e seu correspondente valor de deformação em função do deslocamento, sensor 24 placa sem defeito, em direção X.	62
Figura 4.9 Variação do comprimento de onda das FBGs e seu correspondente valor de deformação em função do deslocamento, sensor 24 placa sem defeito, em direção X.	62

Figura 5.1 Diferença percentual teórico experimental da deformação em direção Y, dos carregamentos.	65
Figura 5.2 Diferença percentual teórico experimental da deformação em direção X, dos carregamentos.	66
Figura 5.3 Diferença percentual teórico experimental da deformação em direção Y, para 600 até 1400 kgf.	67
Figura 5.4 Diferença percentual teórico experimental, da deformação em direção Y, para 600 até 1400 kgf.	67
Figura 5.5 Diferença percentual teórico experimental, da deformação em direção X, para 600 até 1400 kgf.	68
Figura 5.6 Diferença percentual teórico experimental, da deformação em direção Y, para 600 até 1400 kgf.	68
Figura 5.7 Diferença percentual teórico experimental, da deformação em direção Y, para 600 até 1400kgf.	69
Figura 5.8 Diferença percentual teórico experimental, da deformação em direção X, para 600 até 1400kgf.	69
Figura 5.9 Histograma e distribuição gaussiana das comparações dos 25 sensores das forças aplicadas, placa com defeito.	70
Figura 5.10 Histograma e distribuição gaussiana das comparações dos 25 sensores das forças aplicadas, placa sem defeito.	71
Figura 5.11 Erro das medições de deformação para 1000kgf, placa com defeito.	72
Figura 5.12 Erro das medições de deformação para 1000kgf, placa sem defeito.	73
Figura 5.13 Localização dos sensores nos corpos de prova, Sensor1(170,16) e Sensor2(170,48).	77

Figura 5.14 Localização dos sensores nos corpos de prova, Sensor3 (206,72) e Sensor4 (206,40).	77
Figura 5.15 Localização dos sensores nos corpos de prova, Sensor5 (242,8) e Sensor6 (242,40).	77
Figura 5.16 Localização dos sensores nos corpos de prova, Sensor7 (278,72) e Sensor8 (278,40).	78
Figura 5.17 Localização dos sensores nos corpos de prova, Sensor9 (26,16) e Sensor10 (26,48).	78
Figura 5.18 Localização dos sensores nos corpos de prova, Sensor11 (98,48) e Sensor12 (98,16).	79
Figura 5.19 Localização dos sensores nos corpos de prova, Sensor13(134,48) e Sensor14 (134,80).	79
Figura 5.20 Localização dos sensores nos corpos de prova, Sensor15 (26,16) , Sensor16 (98,16) e Sensor17 (170,16).	80
Figura 5.21 Localização do sensor nos corpos de prova, Sensor18 (242,72).	80
Figura 5.22 Localização dos sensores nos corpos de prova, Sensor19 (278,8) e Sensor 20(206,8).	81
Figura 5.23 Localização dos sensores nos corpos de prova, Sensor21 (134,80).	81
Figura 5.24 Localização dos sensores nos corpos de prova, Sensor22 (224,40) e Sensor23 (188,40).	82
Figura 5.25 Localização dos sensores nos corpos de prova, Sensor24 (152,48) e Sensor25 (116,48).	82
Figura 5.26 Distribuição dos sensores ao longo de X=48.	83

Figura 5.27 Sensores na ao longo da linha X=48, sensores distribuídos ao longo do comprimento da linha.	84
Figura 5.28 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 1.	85
Figura 5.29 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 2.	86
Figura 5.30 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 3.	86
Figura 5.31 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 4.	87
Figura 5.32 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 5.	87
Figura 5.33 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 6.	88
Figura 5.34 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 7.	88
Figura 5.35 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 8.	89
Figura 5.36 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 9.	89
Figura 5.37 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 10.	90
Figura 5.38 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 11.	90
Figura 5.39 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 12.	91

Figura 5.40 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 13.	91
Figura 5.41 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 14.	92
Figura 5.42 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 15.	92
Figura 5.43 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 16.	93
Figura 5.44 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 17.	93
Figura 5.45 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 18.	94
Figura 5.46 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 19.	94
Figura 5.47 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 20.	95
Figura 5.48 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 21.	95
Figura 5.49 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 22.	96
Figura 5.50 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 23.	96
Figura 5.51 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 24.	97
Figura 5.52 Dados simulados Dados simulados vs dados experimentais, ao longo do teste, sensor 25.	97

Figura A.1 Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração.	102
Figura A.2 Processo de preparação das amostras para ensaio de tração.	103
Figura A.3 Curva tensão deformação dos corpos Ensaaiados.	104
Figura A.4 Determinação do limite de escoamento.	105
Figura A.5 Amostras depois da fratura.	106
Figura A.6 Configuração utilizada para os sensores em direção X, ao longo da placa.	107
Figura A.7 Configuração utilizada para os sensores em direção Y, ao longo da placa.	108

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Dimensões dos defeitos.	41
Tabela 3.2 Profundidades dos defeitos	41
Tabela 3.3 Equivalência de tipo de elementos utilizados.	45
Tabela 3.4 Fator de concentração de tensões mais solicitadas para defeitos grandes.	52
Tabela 3.5 Fator de concentração de tensões mais solicitadas para defeitos medianos.	52
Tabela 3.6 Fator de concentração de tensões mais solicitadas para defeitos pequenos.	52
Tabela 3.7 Esforço máximo no ponto mais solicitado para defeitos grandes.	53
Tabela 3.8 Esforços máximos nos pontos mais solicitados para defeitos meios.	53
Tabela 3.9 Esforços máximos mais solicitados para defeitos pequenos.	54
Tabela 4.1 Relação Força, deformação axial do corpo de prova, sem defeito.	61
Tabela 5.1 Desvio padrão e percentagem de erro das distribuição normal, sensores da placa sem defeito.	72
Tabela 5.2 Desvio padrão e percentagem de erro das distribuição normal, sensores da placa com defeito.	73
Tabela 5.3 Dados de Incerteza com respeito do incremento da força fornecidos pelo certificado de calibração da máquina de tração.	75
Tabela 5.4 Valores calculados para a incerteza.	76
Tabela 5.5 Tabela de incertezas nas medições, nos sensores.	77
Tabela 5.6 Valores de deformação e Poisson.	85

Tabela A.1 Propriedades Físicas dos corpos de prova para o ensaio de tração.	104
Tabela A.2 Medida dos resultados obtidos no ensaio de tração.	107
Tabela A.3 Comprimentos de onda Das FBG da placa sem defeito (nm).	110
Tabela A.4 Comprimentos de onda Das FBG da placa com defeito (nm).	111
Tabela A.5 Medida de deformação dos sensores na placa sem defeito ($\mu\epsilon$).	112
Tabela A.6 Medida de deformação dos sensores na placa com defeito ($\mu\epsilon$).	113

Lista de Símbolos

a	Largura da membrana
A	Área transversal da placa
Δm	Divisão mínima da escala da maquina
h	Espessura da membrana
ϵ_x	Deformação em direção x
ϵ_y	Deformação em direção y
ϵ_z	Deformação em direção z
ϵ_1	Deformação em direção principal x
ϵ_2	Deformação em direção principal y
$\Delta \epsilon$	Gama de deformações
F_x	Força em direção x
γ_{xy}	Deformação x normal ao plano y
γ_{xz}	Deformação x normal ao plano z
γ_{zy}	Deformação z normal ao plano y
E	Modulo de Young
G	Modulo de elasticidade transversal
ν	Coeficiente de Poisson
τ_{xy}	Tensão x normal ao plano y
τ_{xz}	Tensão x normal ao plano z
τ_{zy}	Tensão z normal ao plano y
σ_x	Tensão ao longo do eixo x
σ_y	Tensão ao longo do eixo y
σ_z	Tensão ao longo do eixo z
σ_1	Tensão ao longo do eixo x
σ_s	Desvio padrão
σ_2	Tensão ao longo do eixo y
S_y	Limite ao escoamento
σ_{eq}	Tensão equivalente
τ_{tresca}	Tensão equivalente de Tresca
σ_{Mises}	Tensão equivalente de Misses

$\sigma_{\max}$	Tensão da na vizinhança imediata da descontinuidade
σ_{nom}	Tensão sem descontinuidade
S_{flow}	Resistência ao colapso plástico
λ_B	Comprimento de luz refletido de ordem B
n_{eff}	Índice de refração efetivo dos modos guiados
Λ	Período das franjas gravadas nas fibra ópticas
$\Delta\lambda_B$	Variação do comprimento de luz refletido de ordem B
ϵ_z	Deformação relativa da fibra
Pe	Constante efetiva do efeito óptico induzido pela tensão
$\Delta\lambda_{\text{Bt}}$	Variação do comprimento de luz com respeito da temperatura
C_p	Largura da placa
L_p	Comprimento da placa
t_p	Espessura da placa
C_d	Comprimento do defeito
L_d	Largura do defeito
H	Profundidade do defeito