



Clara Johanna Pacheco

**Sensores de campo magnético à fibra óptica
com redes de Bragg**

Tese de Doutorado

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

Orientador: Prof. Antonio Carlos Bruno

Rio de Janeiro
Setembro de 2011



Clara Johanna Pacheco

**Sensores de campo magnético à fibra óptica
com redes de Bragg**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Física do Departamento de Física do Centro Técnico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão abaixo assinada.

Prof. Antonio Carlos Bruno

Orientador

Departamento de Física - PUC-Rio

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello

UFRJ

Prof. Guilherme Gonçalves Sotelo

UFF

Prof. Cristina Bormio Nunes

USP

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico, PUC-Rio

Rio de Janeiro, 2 de setembro de 2011

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

Clara Johanna Pacheco

Clara Johanna terminou sua graduação na Universidade Pedagógica Nacional (Bogotá, Colombia) e trabalho na sua tese de doutorado no departamento de Física da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Os tópicos de interesse da sua pesquisa estão relacionados principalmente com materiais de magnetostricção gigante e sensores de campo magnético.

Ficha Catalográfica

Pacheco, Clara Johanna

Sensores de campo magnético à fibra óptica com redes de Bragg./ Clara Johanna Pacheco; orientador: Antonio Carlos Oliveira Bruno. –Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Física, 2011.

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

Tese (Doutorado em Física)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

Incluí bibliografia.1. Física–Tese. 2. Sensor de campo magnético. 3. Sensor de força magnética. 4. Redes de Bragg. 5. Magnetostricção. I, Bruno, Antonio Carlos. II Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Física. III. Título.

CDD: 530

Agradecimentos

Agradeço a todas as pessoas que contribuíram na realização deste trabalho, oferecendo tanto seu apoio acadêmico como pessoal.

Ao meu orientador, professor Antonio Carlos Bruno, por sua paciência, ensinamentos, apoio e dedicação para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Hélio Carvalho, pela sua contribuição com críticas, comentários e ensinamentos ao longo destes anos. Aos colegas de laboratório Jefferson e Erick pelo convívio e pelas valiosas discussões.

Ao professor Arthur Braga e o pessoal do Laboratório de Sensores à Fibra Óptica da Engenharia Mecânica, pelo fornecimento das FBGs.

Ao professor Guilherme Sotelo, do Departamento de Engenharia Elétrica da UFF, pela sua colaboração para realizar as simulações em elementos finitos.

À professora Márcia Atiás, do Departamento de Biofísica da UFRJ, pelo fornecimento das resinas Spurr e Embded. À professora Isabel Carvalho do Departamento de Física da PUC-RJ, pelas fibras ópticas cedidas.

Aos colegas e professores do departamento de Física que contribuíram na minha formação acadêmica. Aos funcionários do departamento de Física pela sua colaboração com os assuntos burocráticos, em particular Márcia, Giza, e Julinho. Ao pessoal da oficina mecânica João, Wellington e Zanelli pela sua ajuda na construção das montagens experimentais.

À minha família pelo seu apoio contínuo. Ao meu esposo Alexandre, pelo companheirismo desde que nos conhecemos.

À PUC-Rio e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo apoio financeiro.

Resumo

Pacheco, Clara Johanna; Bruno, Antonio Carlos. **Sensores de campo magnético à fibra óptica com redes de Bragg**. Rio de Janeiro, 2011. 95 p. Tese de Doutorado- Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Sensores magnéticos são sensores que detectam o fluxo devido a campos magnéticos que existem na região do espaço delimitada pela geometria do sensor. Cada tipo de sensor possui propriedades únicas que os tornam mais para aplicações particulares, seja na detecção de campos magnéticos estáticos ou variáveis. Esta tese desenvolveu sensores de campo magnético utilizando materiais magnéticos e fibras ópticas com redes de Bragg (FBG). Foram desenvolvidos neste trabalho protótipos de sensores que são simples na sua construção, leves e compactos, facilitando sua utilização em lugares de difícil acesso como, por exemplo, para o monitoramento do campo magnético em locais remotos. Dois tipos de sensores foram desenvolvidos: o primeiro consiste em materiais magnetostrictivos no formato maciço e compósito, que possuem a propriedade de se deformarem na presença de um campo magnético externo. Esta deformação no material é detectada com redes de Bragg. É explorada a resposta do sensor quando este é imerso em campos magnéticos uniformes e gradientes de campo; o segundo sensor consiste em um ímã permanente de geometria cilíndrica fabricado com um furo central no qual uma fibra óptica contendo uma rede de Bragg pode ser inserida e colada. Quando o sensor interage com um material ferromagnético, a força magnética atrativa entre eles é transferida de forma axial para a FBG produzindo uma variação no comprimento de onda refletido. O sensor baseado em materiais magnetostrictivos funciona para campos magnéticos da ordem do militesla. Já o sensor de força magnética necessita de um gradiente de campo para funcionar. Com este sensor é possível a obtenção de imagens produzidas por áreas de corrosão em materiais ferromagnéticos. Em ambos os casos, a sensibilidade com relação à variação da geometria do sensor é estudada.

Palavras – chave

Sensor de campo magnético; sensor de força magnética; redes de Bragg; magnetostrictivo.

Abstract

Pacheco, Clara Johanna; Bruno, Antonio Carlos (Advisor). **Magnetic field sensors based on fiber Bragg gratings**. Rio de Janeiro, 2011. 95 p. PhD Thesis - Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Magnetic sensors detect the flux generated by magnetic fields which exists in the region of space delimited by the geometry of the sensor. Each kind of sensor has a unique property that makes it more appropriate for particular applications. In this thesis we have built magnetic field sensors using magnetic materials and fiber Bragg gratings (FBG). We have focused on prototypes simple to construct, light and compact, making it easy to measure magnetic fields in remote places. Two kinds of sensors were built: the first one consists of magnetostrictive materials in bulk shape and in composite format. They have the property of increase their size in the presence of an external magnetic field. The deformation in the material is detected by using a single FBG. The sensor sensitivity is analyzed when it is immersed in uniform magnetic fields and field gradients. The second sensor consists of a magnet fabricated with a central hole in which a fiber optics containing a FBG can be attached. When the sensor interacts with a ferromagnetic material, the attractive magnetic force between them is transferred to the FBG, producing variation in the reflected wavelength. The sensor based in magnetostrictive materials works for magnetic fields at the militesla range. The magnetic force sensor needs a gradient field to work. Using the force sensor, it was possible to image corrosion areas in ferromagnetic materials. In both cases, the sensitivity with regard to the sensor geometry was studied.

Keywords

Magnetic field sensor; magnetic force sensor; Bragg grating; magnetostriction.

Sumário

1.Introdução	14
2.Materiais magnetostrictivos	17
2.1. Fenômeno da magnetostricção	17
2.2. Materiais com magnetostricção gigante	19
3.Sensor magnetostrictivo maciço	23
3.1. Medida da deformação	23
3.1.1. Redes de Bragg em fibras ópticas (FBG)	23
3.1.2. Strain gauge	25
3.2. Colagem dos extensômetros	26
3.3. Resultados com campo magnético espacialmente uniforme	27
3.4. Resultados com gradiente de campo magnético	34
3.4.1. Outros fatores que influenciam na resposta do sensor	38
3.5. Aplicações	40
4.Sensor compósito magnetostrictivo	42
4.1. Fabricação dos compósitos	42
4.1.1. Matriz	42
4.2. Tamanho das partículas e fração de volume	43
4.2.1. Orientação previa	43
4.3. Resultados	44
5.Sensor de força magnética	54
5.1. Montagem experimental	54
5.2. Interação sensor e placa ferromagnética	58
5.3. Força magnética	59
5.4. Resultados	61
5.5. Aplicações	68
6.Obtenção de imagens	69
6.1. Montagem experimental	69

6.2. Perfil de <i>pits</i> de corrosão	70
6.2.1. Efeito da geometria do sensor	73
6.3. Arranjo de sensores	77
6.4. Imagens magnéticas	81
6.5. Solução do problema inverso	86
7. Conclusões	90
8. Referências	92

Lista de figuras

Figura 2-1. Comportamento dos domínios magnéticos (a) sem aplicar campo, (b) aplicando campo magnético.	18
Figura 3-1. Comportamento da rede de Bragg, ao passar um feixe de luz, uma parte da luz é refletida e outra parte é transmitida.	24
Figura 3-2. Modelo de strain gauge utilizado em este trabalho.	26
Figura 3-3. Extensômetros: strain gauge e rede de Bragg colados em os cubóides de GMM.	26
Figura 3-4. GMM posicionado entre os pólos do eletroímã para medir a resposta quando é aplicado um campo magnético uniforme.	28
Figura 3-5. Resposta para diferentes cubóides com seção transversal $4 \times 4 \text{ mm}^2$ e com comprimento variando de 3 mm até 20 mm.	29
Figura 3-6. Resposta para dois cubóides com comprimento de 6 mm e seção transversal $4 \times 4 \text{ mm}^2$ e $2 \times 2 \text{ mm}^2$	30
Figura 3-7. Variação da deformação de acordo ao campo magnético aplicado.	30
Figura 3-8. Campo de desmagnetização para um cubóide.	32
Figura 3-9. (a) Montagem. (b) Conjunto ímã-GMM.	35
Figura 3-10. Espectro de três FBGs coladas no cubóide $4 \times 4 \times 20 \text{ mm}$.	36
Figura 3-11. Dependência espacial do campo magnético aplicado ao longo de um cubóide de 20 mm.	36
Figura 3-12. Cubóides desmagnetizados (D) e sem desmagnetizar (ND).	38
Figura 3-13. Pressão compressiva sobre um cubóide de GMM.	39
Figura 3-14. Comportamento do sensor quando é aplicada uma pressão compressiva.	40
Figura 3-15. Curva de calibração do sensor de deslocamento.	41
Figura 4-1. Morfologia das partículas de Terfenol-D utilizadas com tamanho de até $500 \text{ }\mu\text{m}$.	44
Figura 4-2. (a) Formato dos compósitos magnetostrictivos fabricados. (b) Deformação dos compósitos fabricados com resinas de diferentes viscosidades.	46
Figura 4-3. Curva de magnetização do magnetostrictivo maciço e do compósito magnetostrictivo fabricado com a resina MC105-5.	48

Figura 4-5. Compósitos magnetostrictivos cilíndricos com o mesmo comprimento e valores diferentes de diâmetro.	49
Figura 4-6. Compósitos magnetostrictivos, variando o comprimento, e com o mesmo valor de diâmetro.	50
Figura 4-7. Imagem obtida com microscópio óptico. (a) Partículas sem orientação prévia. (b) Partículas orientadas no processo de cura.	52
Figura 4-8. Compósitos magnetostrictivos com partículas com orientação prévia, e compósitos magnetostrictivos com partículas não orientadas.	52
Figura 5-1. Distribuição espacial do campo magnético gerado pelos diferentes ímãs	55
Figura 5-2. Sensor utilizando ímãs de Nd-Fe-B e Sm-Co.	56
Figura 5-3. Sensor.	56
Figura 5-4. Variação do comprimento de onda refletido quando o sensor é aproximado a uma placa ferromagnética (verde: mais longe; vermelho: mais perto).	57
Figura 5-5. Montagem do sensor	57
Figura 5-6. Variação da força para o sensor com ímã de 9,5 mm x 9,5 mm.	58
Figura 5-7. Variação do comprimento de onda quando o sensor se aproxima a uma placa ferromagnética.	62
Figura 5-8. Variação do comprimento de onda para o sensor 9.5 mm x 9.5 mm	63
Figura 5-9. Modelo de simulação em duas dimensões feito no programa Ansys	63
Figura 5-10. Força para o sensor com ímã de 3,0 mm x 5,0 mm.	64
Figura 5-11. Força para o sensor de 1,9 mm x 5,0 mm.	65
Figura 5-12. Simulações variando o comprimento dos ímãs de Sm-Co.	65
Figura 5-13. Simulações variando o diâmetro dos ímãs de Sm-Co.	
Figura 5-14. Curva de calibração para o sensor com o ímã de 3,0 mm x 5,0 mm	66
Figura 5-15. Curva de calibração para o sensor com o ímã de 1,9 mm x 5,0 mm.	67
Figura 5-16. Sensor de vibração. (a) Amplitude $\pm 0,1$ mm. (b) Amplitude $\pm 0,5$ mm	68

Figura 6-1. Montagem sensor de força magnética para o mapeamento de defeitos em placas ferromagnéticas.	69
Figura 6-2. (a) Perfil do <i>pit</i> de corrosão medido com o perfilômetro.	
(b) Valor do comprimento de onda obtido pelo o sensor de força magnética quando o <i>pit</i> de corrosão é deslocado sob o sensor.	71
Figura 6-3. Perfis medidos com o perfilômetro e o com sensor de força magnética para diferentes geometrias de <i>pits</i> fabricados. (a) <i>Pit</i> 4,0 mm de diâmetro e 0,17 mm de profundidade. (b) <i>Pit</i> 6,2 mm de diâmetro e 0,49 mm de profundidade. (c) <i>Pit</i> 7,2 mm de diâmetro e 0,69 mm de profundidade.	72
Figura 6-4. Medida de <i>pit</i> de corrosão monitorado por (a) Sensor 9,5 mm x 9,5 mm com <i>standoff</i> de 7,0 mm e (b) Sensor 3,0 mm x 5,0 mm com <i>standoff</i> de 0,8 mm.	73
Figura 6-5. Perfil de <i>pits</i> retangulares com diferentes dimensões. Perfil traçado com o perfilômetro.	74
Figura 6-6. Medida de <i>pits</i> retangulares com diferentes dimensões e profundidades. O sensor utilizava um ímã de 1,9 mm x 5,0 mm, <i>standoff</i> de 0,5 mm	75
Figura 6-7. Perfil de <i>pits</i> retangulares com diferentes dimensões. Perfil traçado com o sensor de 3,0 mm x 5,0 mm.	76
Figura 6-8. <i>Pit</i> de 0,69 mm de profundidade monitorado com diferentes sensores com <i>standoff</i> de 0,40 mm.	77
Figura 6-9. Montagem do Arranjo.	
Figura 6-10. Espectro FBGs dos sensores que compõem o arranjo.	78
Figura 6-11. <i>Pit</i> retangular de 0,52 mm de profundidade e 5,0 mm de largura medido com o arranjo de sensores.	79 80
Figura 6-12. <i>Pit</i> retangular fabricado monitorado com arranjo de sensores na direção longitudinal à largura.	80
Figura 6-13. Monitoramento ao longo de um <i>pit</i> de corrosão retangular fabricado de 0,52 mm de profundidade, 8,0 mm largura e 60 mm de comprimento. A escala de cores foi normalizada.	81
Figura 6-14. Arranjo linear disposto em blocos, representando um arranjo quadrado.	82
Figura 6-15. Imagem obtida do <i>pit</i> circular fabricado de 39 mm de diâmetro e 1,95 mm de profundidade. Foi utilizado o arranjo disposto em blocos. A escala de cores foi normalizada.	83

Figura 6-16. (a) Foto. (b) Imagem do <i>pit</i> circular artificial de 39 mm de diâmetro e 1,95 mm de profundidade. A escala de cores foi normalizada	84
Figura 6-17. Foto <i>pit</i> natural. (b) Imagem defeito natural. A escala de cores foi normalizada.	85
Figura 6-18. Imagem obtida com o arranjo estático. A escala de cores foi normalizada.	86
Figura 6-19. Solução do problema inverso, a partir da curva ajustada obtida com o sensor que utiliza o ímã de 3,0 mm x 5,0 mm.	87
Figura 6-20. (a) Resposta obtida com o sensor para diferentes valores de <i>standoff</i> . (b) Comparação das amplitudes da variação do comprimento de onda obtido para cada valor de <i>standoff</i> .	88
Figura 6-21. Comparação da curva obtida com o perfilômetro e as curvas obtidas a diferentes valores de <i>standoff</i> . As curvas são ajustadas resolvendo o problema inverso.	89

Lista de tabelas

Tabela 2-1. A Tabela 2.1 mostra diversas características dos materiais mencionados anteriormente [14,17].	21
Tabela 3-1. Cubóides com área quadrada 4x4 mm ²	34
Tabela 3-2. Resposta do GMM quando é submetido a um gradiente de campo.	37
Tabela 3-3. Resposta do GMM quando é submetido a um gradiente de campo e um campo uniforme.	38
Tabela 4-1. Deformação máxima de compósitos magnetostrictivos fabricados com resinas de viscosidades diferentes.	47
Tabela 4-2. Compósitos cilíndricos magnetostrictivos.	50
Tabela 4-3. Resposta do compósito magnetostrictivo quando é submetido a um gradiente de campo e um campo uniforme.	51
Tabela 6-1. Medida de diferentes <i>pits</i> utilizando como <i>pit</i> de calibração o defeito de 0,31 mm de profundidade.	71
Tabela 6-2. Dimensões dos <i>pits</i> retangulares monitorados com o sensor 1,9 mm x 5,0 mm e 3,0 mm x 5,0 mm.	76