



**Clara Johanna Pacheco**

**Aplicação de Materiais com Magnetostricção Gigante em  
sensores de Deslocamento sem Contacto.**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Prof. Antonio Carlos Bruno

Rio de Janeiro  
julho de 2007



Clara Johanna Pacheco

**Aplicação de Materiais com Magnetostricção Gigante em sensores  
de Deslocamento sem Contacto.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Física da PUC-Rio. Aprovada pela  
Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Antonio Carlos Bruno**

Orientador

Departamento de Física-PUC-RIO

**Prof. João Marcos Alcoforado Rebello**

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais-UFRJ

**Prof. José Luiz de França Freire**

Departamento de Engenharia Mecânica-PUC-RIO

**Prof. Arthur Martins Barbosa Braga**

Departamento de Engenharia Mecânica-PUC-RIO

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 5 de julho de 2007

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 dissertação de mestrado no departamento de Física da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Os tópicos de interes relacionados com sua pesquisa estão relacionados principalmente com materiais de magnetostricção gigante e com sensores de deslocamento.-

#### Ficha Catalográfica

Pacheco, Clara Johanna

Aplicação de materiais com magnetostricção gigante em sensores de deslocamento sem contacto / Clara Johanna Pacheco ; orientador: Antonio Carlos Oliveira Bruno. –Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Física, 2007.

69f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Física)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Incluí referências bibliográficas.

1. Física–Dissertação. 2. Sensor de deslocamento. 3. Material magnetostrictivo. 4. Rede de Bragg. 5. Strain gauge. I, Bruno, Antonio Carlos. II Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Física. III. Título.

CDD: 530

## Agradecimentos

A Deus por tudo.

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que direta e indiretamente colaboraram na realização deste trabalho, oferecendo tanto seu apoio acadêmico como pessoal. Dentre os primeiros gostaria de agradecer:

Ao meu orientador, professor Antonio Carlos Bruno, por sua paciência, apoio e dedicação para a realização deste trabalho.

Ao Hélio por sua ajuda sempre oportuna.

Ao pessoal do Laboratório de Sensores a Fibra Óptica da Engenharia Mecânica pela sua colaboração.

À minha família, sempre preocupados por minha estadia no Brasil, por me fazer acreditar em mim, e por tudo o carinho que sempre me fazem chegar mesmo desde longe.

Aos amigos que fiz durante estes dois anos e com os quais compartilhe momentos muitos especiais.

A os professores Edgar Benavidez e R. Moyano por me mostrar o caminho que percorro hoje.

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

## Resumo

Pacheco, Clara Johanna; Bruno, Antonio Carlos. **Aplicação de Materiais com Magetostriacção Gigante em Sensores de Deslocamento sem Contacto.** Rio de Janeiro, 2007.69p. Dissertação de mestrado-Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A magnetostricção é a propriedade dos materiais ferromagnéticos de se deformarem pela presença de um campo magnético externo. Trata-se de uma propriedade inerente ao material, que não muda com o tempo. Materiais que apresentam deformações da ordem de  $10^{-3}$  são conhecidos como materiais de magnetostricção gigante (GMM). Esta dissertação de mestrado estuda a aplicação destes materiais em sensores de deslocamento onde não há contacto entre o elemento cursor (um ímã) e o elemento sensor (GMM). O princípio de funcionamento consiste em aplicar um gradiente de campo magnético ao GMM que está fixo. O gradiente de campo magnético é gerado por um ímã preso ao componente ou estrutura na qual se quer medir o deslocamento. As variações no campo magnético no material GMM originados pelo deslocamento do ímã (estrutura), provocam uma deformação no GMM, que é detectada com extensômetros do tipo Strain Gauge ou Redes de Bragg. Neste trabalho apresenta-se a caracterização da deformação de GMM em relação a um campo constante aplicado, e análises do seu comportamento para diferentes geometrias. Efeitos de pressão, polarização com um segundo ímã, e diferentes gradientes de campo magnético são também estudados. É observado um comportamento local para a deformação quando a medida é realizada em diferentes regiões do GMM. Os resultados obtidos permitiram a medição de deslocamentos de alguns micra estando o elemento sensor a até 10 mm de distância do elemento cursor.

### Palavras- chave:

Sensor de deslocamento, material magnetostriectivo, rede de Bragg, Strain gauge.

## Abstract

Pacheco, Clara Johanna; Bruno, Antonio Carlos. **Giant Magnetostrictive Materials Applied to contactless displacement sensors.** Rio de Janeiro, 2007.69p. Dissertação de mestrado-Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Magnetostriction is a property of ferromagnetic materials to deform in the presence of a magnetic field. Magnetostriction is an inherent property of magnetic materials, which is unchangeable with time. Materials exhibiting strains in the order of  $10^{-3}$  are known as giant magnetostrictive materials (GMM). In this dissertation we study the application of these materials in displacement sensors where there is not contact between the cursor element (magnet) and sensor element (GMM). Its principle of operation consists of applying a magnetic field gradient to a GMM located at a fixed position. The magnetic field gradient is produced by a magnet attached to the component or structure in which the displacement will be measured. The variation on the magnetic field in the GMM position originated from the displacement of the magnet, results in a strain in the GMM that can be detected with a Strain Gauge or Bragg Grating extensometers. In this work is presented the characterization of the strain on GMM cuboids against a constant magnetic field and the analysis of its behavior for different geometries. Effects of pressure, polarization with a second magnet, and different gradients of magnetic field are also studied. It is observed a local behavior for strains when it is measured in different regions of GMM cuboid. The results obtained allow us to measure displacements of about few micra when the sensor is at a distance of 10 mm from the cursor element.

### Key-words:

Displacement sensor, magnetostrictive material, Bragg grating, strain gauge.

# Sumário

1 Introdução	12
2 A Magnetostricção	15
2.1. Fenômeno da magnetostricção	15
2.1.1. Campo de desmagnetização	20
2.1.2. Materiais de magnetostricção gigante	21
2.2. Extensômetros	23
2.2.1. Strain Gauges	23
2.2.2. Redes de Bragg em Fibras Ópticas (FBG)	24
3 Caracterização magnética	27
4 Montagem experimental	37
4.1. Geração do gradiente de campo	37
4.2. Montagem experimental	40
4.2.1. Colagem dos extensômetros	42
4.2.2. A ponte de Wheatstone	43
5 Análises dos resultados	46
5.1. O sensor de deslocamento	46
5.2. Comparação dos extensômetros	50
5.3. Desmagnetização prévia	51
5.4. Histerese	52
5.5. Polarização	54
5.6. Tensão compressiva	56
5.7. Variação da geometria do ímã	57
5.8. Comportamento das geometrias do TX	59
5.9. Magnetostricção localizada	63
6 Conclusões e perspectivas	65
7 Referências bibliográficas	67

## Lista de tabelas

Tabela 1.1: Características de sensores de posição lineares [1,2].	15
Tabela 2.1: Características de alguns materiais magnetostrictivos [7,10,14].	23
Tabela 5.1: Comportamento do melhor caso para cada geometria de GMM de acordo com a caracterização.	62
Tabela 5.2: Comportamento do pior caso para cada geometria de GMM de acordo com a caracterização.	62



## Lista de figuras

Figura 2-1:(a) Magnetostricção causada pela aplicação de um campo magnético (b) variação da deformação com relação ao campo aplicado. Retirada da referência [10].	17
Figura 2-2: Comportamento dos domínios magnéticos (a) sem aplicar campo, (b)aplicando campo magnético. Adaptada da referência [12].	18
Figura 2-3: Processo de deformação de um material ferromagnético, (a) a uma temperatura maior que $T_c$ , (b) a uma temperatura menor que $T_c$ , se tem uma magnetostricção espontânea, (c) magnetostricção de saturação. Adaptada da referência [10].	19
Figura 2-4: Campo de desmagnetização de um material ferromagnético.	21
Figura 2-5: Modelo de strain gauge utilizado neste trabalho [20], mostrando a direção de deformação a se medir.	25
Figura 2-6: Comportamento da rede de Bragg, ao passar um raio de luz, uma parte da luz é refletida e outra parte é transmitida.	26
Figura 3-1: Eletroímã com o qual foi feita a caracterização magnética.	28
Figura 3-2: Comportamento na caracterização de três cubóides de diferentes geometrias.	29
Figura 3-3:Curvas de caracterização para 4 cubóides de geometria 4x4x20 mm.	30
Figura 3-4: Curva de caracterização para 5 cubóides de geometria 4x4x10mm	30
Figura 3-5: Curvas de caracterização para 5 cubóides de geometria 4x4x6mm	31
Figura 3-6: Curvas de caracterização para 5 cubóides de geometria 4x4x3 mm.	31
Figura 3-7:Curvas de caracterização para 5 cubóides de geometria 2x2x10mm.	32
Figura 3-8:Curvas de caracterização para cubóides de geometria 2x2x6 mm.	32
Figura 3-9:Curvas de caracterização para cubóides de geometria 2x2x3 mm.	33
Figura 3-10: Curva do TX para diferentes geometrias, fornecida pelo fabricante.	34
Figura 3-11: Deformação de acordo ao campo magnético constante aplicado. Histerese para o TX de geometria 4x4x20 mm, (b) histerese para	

o cubóide 4x4x3 mm.	35
Figura 3-12: Histerese para o cilindro de Terfenol-D de 10mm de diâmetro e de 10 mm de altura fornecido pela ETREMA Products.	35
Figura 3-13: Histerese para diferentes cubóides da mesma geometria.	36
Figura 4.1: Modelo da simulação feita no programa Opera 8.7, para um ímã de dimensões 22.5 mm de comprimento e 9.6 mm de diâmetro.	38
Figura 4.2: Em vermelho medida experimental, em azul campo magnético obtido pela simulação.	39
Figura 4.3: Simulação variando a geometria do ímã.	40
Figura 4.4: Simulação para o ímã de diâmetro 25.5 mm variando a distancia no eixo y.	40
Figura 4-5: (a) Montagem do sensor. (b) Conjunto ímã-terfenol.	
(c) Diferentes geometrias de TX testadas com strain gauges colados.	42
Figura 4-6: Extensômetros: strain gauge e rede de Bragg colados em os cubóides de GMM.	43
Figura 4-7: Modelo do circuito básico da ponte de Wheatstone [23].	44
Figura 4.8: Ponte de Wheatstone tipo I de $\frac{1}{4}$ . [23].	45
Figura 4-9: Curva de comparação entre as leituras da PXI 4220 e o resistor padrão Tinsley ZX74.	46
Figura 5.1: Sensor de deslocamento.	47
Figura 5.2: Deslocamentos que podem ser detectados com o sensor de deslocamento (a) translação vertical, (b) translação horizontal, c) rotação e (d) flexão.	48
Figura 5.3: Cubóides de maior e menor resposta.	49
Figura 5.4: Resposta do TX 2x2x10 mm, em torno de uma distância de 5mm.	50
Figura 5.5: Curva de calibração do sensor de deslocamento.	50
Figura 5.6: Rede de Bragg e Strain gauge coladas no cubóide 4x4x20 mm.	52
Figura 5.7: Cubóides desmagnetizados(D), e sem desmagnetizar (S.D).	
(a) TX de geometria 4x4x10, (b) TX de geometria 2x2x10.	53
Figura 5.8: (a) TX de geometria 2x2x3 mm, (b) 2x2x6 mm, (c) 2x2x10 mm, (d) 4x4x mm, (e) 4x4x10 mm, (f) 4x4x20 mm.	54
Figura 5.9: Histerese na faixa de 1mm para o cubóide 2x2x10 mm.	55
Figura 5.10: Representação esquemática da polarização.	56
Figura 5.11: Cubóide com duas polarizações diferentes.	56
Figura 5.12. tensão compressiva sobre um cubóide de GMM.	57
Figura 5.13: TX 4x4x10 mm no qual se aplica uma pressão compressiva.	58

Figura 5.14: Em verde campo gerado pelo ímã retangular, em preto campo gerado pelo ímã cilíndrico.	59
Figura 5.15: Variação da deformação com a distancia para um gradiente de campo produzido por um ímã retangular.	59
Figura 5.16: Variações do comportamento do cubóide com relação a polarização, gradiente de campo e pressão.	60
Figura 5.17: Comportamento de diferentes cubóides da geometria 2x2x6 mm.	61
Figura 5.18: Curvas dos cubóides de diferentes geometrias para: (a) caso de maior resposta, (b) caso de menor resposta.	63
Figura 5.19: Espectro de três redes coladas no cubóide de 4x4x20 mm.	64
Figura 5.20: Redes coladas a diferentes distancias para (a) TX 2x2x20 mm, (b) 4x4x20 mm.	65