

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**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

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



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 magnetostrictivo, 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 ¼. [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:<br>(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<br>(a) TX 2x2x20 mm, (b) 4x4x20 mm.                                | 65 |

# 1 Introdução

A medição do deslocamento de um corpo é de fundamental importância no campo da Física e da Engenharia. O deslocamento está associado à mudança da posição de um corpo e pode ser expresso por um vetor tridimensional que representa a mudança do corpo de uma posição estável para outra em relação a uma origem. Para determinar o deslocamento, é necessário medir a mudança da posição em cada direção, o que pode ser feito por meio de uma ampla gama de sensores, dos quais os mais comumente utilizados são os resistivos, os indutivos, os magnéticos e os interferômetros laser. Tipicamente a faixa de deslocamentos medidos por estes sensores varia de alguns nanômetros até o metro.

- Sensores resistivos: o potenciômetro é a tecnologia mais antiga dentre as citadas. Neste tipo de sensor, o movimento mecânico é traduzido por uma variação da resistência [1]. Ele consiste em uma resistência de valor fixo sobre a qual se desloca um contacto deslizante chamado cursor. O movimento do cursor através de uma haste acoplada origina a variação na resistência que é usada para medir deslocamento. Este tipo de medição tem a desvantagem de ter um contacto móvel deslizando sobre condutores fixos, o que produz ruído e causa o rápido envelhecimento do sensor, além da excursão do cursor ter seu movimento limitado pelo tamanho do potenciômetro.

- Sensores capacitivos: estes sensores estão baseados na detecção de uma variação na capacitância de um capacitor de placas paralelas através do deslocamento de um dielétrico em seu interior [1]. Este tipo de sensor permite uma boa exatidão para medições mais com faixa dinâmica reduzida. Outras desvantagens são suas sensibilidades a vibrações, perturbações eletromagnéticas e umidade no ambiente de realização das medidas.

- Sensores Indutivos: se destacam os LVDTs (iniciais de Linear Variable Differential Transformer [2]) Consiste basicamente de três bobinas, uma emissora e duas receptoras acopladas a um núcleo ferromagnético. O princípio

de medição está relacionado com a variação da indutância mútua entre as bobinas de acordo com a posição do núcleo móvel [3]. A vantagem deste tipo de sensor sobre os outros é seu alto grau de robustez o que o torna pouco sensível a vibrações. Isto é devido ao seu princípio de funcionamento no qual não há contato físico com o elemento sensor, havendo assim desgaste zero deste elemento, tendo uma vida mais longa e boa exatidão.

- Interferômetro laser: é um dos sistemas de medição mais precisos [1], se baseia na interferência de um feixe emitido com o feixe detectado por reflexão sobre o elemento cursor. Os interferômetros laser são usados frequentemente para a calibração em fabricação de outros sistemas de medida de deslocamento. Tem como desvantagem sua sensibilidade a vibrações.

- Sensores magnetostrictivos: tradicionalmente são baseados na propagação de ondas acústicas através de um tubo, uma fita ou um fio magnetostrictivos [2]. O sensor consiste em um guia de onda magnetostrictivo e um cursor que gera um campo magnético local perpendicular ao guia. Inicialmente uma excitação é gerada ao longo do guia através de um pulso de corrente elétrica. A interação do campo magnético local com o campo gerado pelo pulso de corrente provoca uma força de torção sobre o guia de onda na região do cursor. Devido ao efeito magnetostrictivo, uma deformação mecânica é gerada e se propaga como uma onda elástica na guia de onda, afastando-se em ambos sentidos da região do cursor. Em um dos extremos está colocado um atenuador que impede a reflexão da onda, enquanto no outro está o transdutor receptor da onda propagada. A medição do tempo de voo desde a geração do pulso de excitação até a chegada da onda elástica ao transdutor determina a posição do cursor. Esta técnica é conhecida como *magnetostrictive delay line*. O cursor pode ser uma espira [2,4,5] ou um ímã permanente [5,6]. Os receptores podem ser indutivos [4,6] ou piezoelétricos [2]. Este tipo de sensor tem ótima resolução, mas não é apropriado para aplicações remotas devido à necessidade de utilização de vários equipamentos e circuitos complexos próximos ao sensor.

A seguir uma tabela com as características dos sensores mencionados.

Tabela 1.1: Características de sensores de posição lineares [1,2].

| Sensor                          | Faixa(mm)       | Contacto       | Abs/Inc    | Precisão ( $\mu\text{m}$ ) |
|---------------------------------|-----------------|----------------|------------|----------------------------|
| <b>LVDT</b>                     | <b>1,0 - 60</b> | <b>Sim</b>     | <b>Abs</b> | <b>250</b>                 |
| <b>Potenciômetro</b>            | <b>1000</b>     | <b>Sim</b>     | <b>Abs</b> | <b>400</b>                 |
| <b>Magnetostrictivo</b>         | <b>1000</b>     | <b>Sim/Não</b> | <b>Abs</b> | <b>200</b>                 |
| <b>Capacitivo</b>               | <b>150</b>      | <b>Sim</b>     | <b>Inc</b> | <b>5</b>                   |
| <b>Interferômetro<br/>laser</b> | <b>150</b>      | <b>Não</b>     | <b>Inc</b> | <b>0.01</b>                |

A presente dissertação consiste no desenvolvimento de um novo tipo de sensor magnético de deslocamento sem contacto do elemento sensor com o cursor, utilizando materiais com magnetostricção gigante (GMM), ímãs permanentes e extensômetros. O sensor é composto de duas partes. Na primeira estão pequenos cubóides de GMM com extensômetros colados e na segunda, um ímã permanente, que funciona como cursor a ser fixado no objeto ou estrutura cujo deslocamento se deseja medir. No capítulo 2, é feita uma revisão sucinta do fenômeno da magnetostricção, são detalhados os extensômetros utilizados, o material com magnetostricção gigante é caracterizado em termos de sua capacidade de deformação na presença de campos magnéticos. No capítulo 3 descreve-se a montagem experimental. No capítulo 4, tem-se a análise dos resultados, a partir da qual são obtidas as conclusões apresentadas no capítulo 5.

## 2

### A Magnetostricção

Neste capítulo o efeito da magnetostricção é descrito. Como será detalhado adiante, nossa medição de deslocamento será realizada através de extensômetros do tipo strain-gauge e redes de Bragg acopladas a fibras ópticas colados em materiais com magnetostricção gigante.

#### 2.1.

##### Fenômeno da magnetostricção

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, como pode acontecer com alguns materiais ferroelétricos. Este fenômeno foi descoberto por James Joule em 1842, quando ele observou que, na presença de um campo magnético na direção do eixo de uma barra de ferro, esta experimentava um incremento em seu comprimento.

Os materiais magnetostrictivos experimentam também o efeito inverso, ou seja, ante uma deformação do material, se induz um campo magnético, o que é conhecido como efeito Villari [7]. Outro efeito relacionado é o efeito Wiedemann [8], que acarreta uma torção no material ocasionada por um campo magnético helicoidal, ocorrendo também o efeito inverso, chamado efeito Matteucci [7].

A magnetostricção pode ser positiva se, na presença de um campo magnético, o material se expande ou negativa, caso contrário. Em ambos os casos, o volume não varia porque na direção perpendicular à deformação se produz uma deformação proporcional de sinal contrário. Alguns efeitos magnetostrictivos implicam acoplamentos nas três direções do espaço e a natureza anisotrópica da magnetostricção. Assim, quando uma amostra desmagnetizada tem sua magnetização alinhada por um campo magnético, a deformação da amostra é anisotrópica [8].

Manifestações de magnetostricção podem ser evidenciadas devido a aplicação de campos magnéticos constantes, aumentando sua intensidade ou

variando sua direção. A Figura 2.1(a) ilustra a aplicação de um campo magnético ao longo do maior eixo do material ferromagnético e a sua deformação correspondente medida em termos da variação do comprimento relativa ao comprimento original. Podemos observar também em (b) que para campos magnéticos mais intensos existe uma saturação do efeito. A deformação que se apresenta é independente do sinal do campo aplicado, ou seja, é unipolar e se manifesta com campos magnéticos em ambos os sentidos. Como veremos a seguir, a deformação é proporcional ao quadrado da magnetização e a resposta é inerentemente não linear [9].

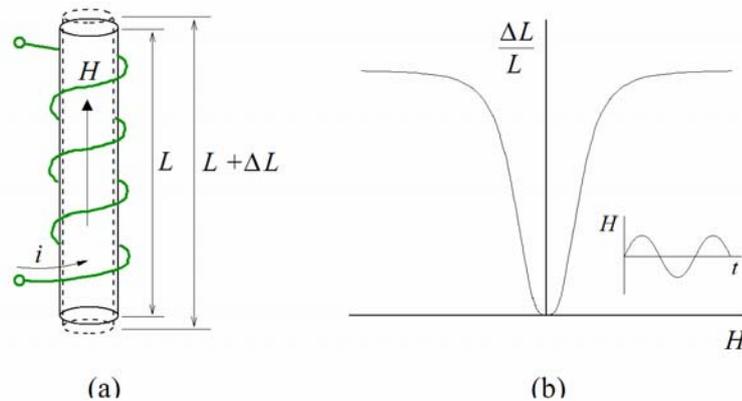


Figura 0-1:(a) Magnetostricção causada pela aplicação de um campo magnético, (b) variação da deformação com relação ao campo aplicado. Retirada da referência [10].

Os materiais ferromagnéticos têm regiões chamadas domínios magnéticos nos quais os momentos magnéticos estão orientados na mesma direção. De um modo geral, cada domínio tem dimensões da ordem do micron e comporta-se como um ímã, eles são separados por zonas de transição chamadas de paredes de domínio, onde a magnetização afasta-se da orientação da magnetização do domínio e gradualmente, aproxima-se da orientação da magnetização do domínio adjacente.

No estado desmagnetizado, a orientação da magnetização dos domínios está distribuída de tal maneira que o material, como um todo, tenha magnetização nula [11]. A Figura 2.2 ilustra o comportamento dos domínios quando o campo aplicado é zero, e ao aplicar um campo magnético  $H_1$ , onde os domínios tendem a se orientar e o comprimento  $L$  do cubóide aumenta e a sua largura  $W$  diminui.

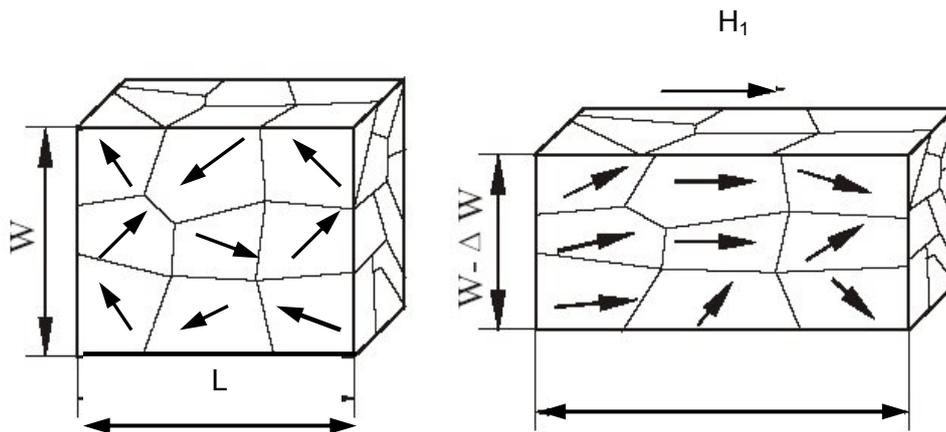


Figura 0-2: Comportamento dos domínios magnéticos (a) sem aplicar campo, (b) aplicando campo magnético. Adaptada da referência [12].

O limite da deformação que pode ser alcançado em um material magnetostrictivo depende da distribuição prévia dos domínios. A orientação inicial dos domínios pode ser forçada, por exemplo, mediante uma deformação inicial ou a um tratamento térmico sob a ação de um campo magnético. As ações mecânicas sobre um material magnetostrictivo variam o limite alcançável de deformação. Assim, em materiais com coeficiente de magnetostricção positivo, a compressão inicial de uma peça magnetostrictiva alinha os domínios magnéticos na direção perpendicular ao eixo de compressão. Neste caso, o material terá mais domínios susceptíveis a girar na presença de um campo magnético aplicado na direção adequada e então a deformação máxima possível aumentará. Contudo um campo magnético mais intenso pode ser necessário para se chegar a este valor máximo.

Para valores pequenos de campo aplicado, um deslocamento é produzido nos limites dos domínios de orientação contrária ao campo aplicado, favorecendo os domínios que se encontram no mesmo sentido do campo aplicado que então se expandem. O incremento de volume destes domínios não produz deformação. Quando o campo aumenta mais, os domínios que ainda não estão na direção do campo aplicado giram no sentido deste campo. É nesta etapa onde se produz a deformação magnetostrictiva. Em um campo mais intenso ainda, o material se comporta como contendo um único domínio alinhado com o campo externo. A temperatura de Curie é a temperatura na qual os materiais magnéticos perdem suas propriedades ferromagnéticas, esta transição é reversível através do

resfriamento do material [7]. Os domínios são formados quando um material é resfriado abaixo da temperatura de Curie  $T_c$ . A Figura 2.3 apresenta a dependência da deformação com a magnetização, Considerando uma esfera ferromagnética a uma temperatura maior que  $T_c$ , como se ilustra na Fig. 2.3(a), quando a temperatura fica abaixo de  $T_c$ , os domínios se formam e acontece uma magnetostricção espontânea  $\lambda_0$ , Na Fig.2.4(b) quando um campo é aplicado os domínios se expandem até um valor máximo que é dado pela magnetostricção de saturação  $\lambda_s$ ,

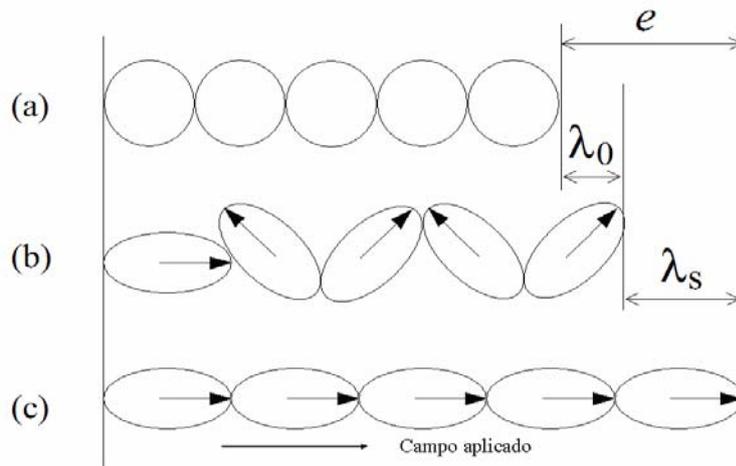


Figura 0-3: Processo de deformação de um material ferromagnético, (a) a uma temperatura maior que  $T_c$ , (b) a uma temperatura menor que  $T_c$ , se tem uma magnetostricção espontânea, (c) magnetostricção de saturação. Adaptada da referência [10].

Num material isotrópico, sem campo magnético aplicado, os domínios são orientados aleatoriamente, cada um tem um ângulo  $\theta$  diferente em relação à um referencial de medida. A magnetização total resultante é nula e a deformação  $e(\theta)$  espontânea de cada domínio na direção de interesse é dada por [7]:

$$e(\theta) = e \cos^2 \theta. \quad (1)$$

A magnetostricção espontânea é obtida por integração levando em conta todas as possíveis orientações:

$$\lambda_0 = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} e \cos^2 \theta \sin \theta d\theta = \frac{e}{3}. \quad (2)$$

A magnetostricção de saturação vem dada pela diferença entre  $e$  e a magnetostricção espontânea

$$\lambda_s = e - \lambda_0 = \frac{2}{3}e. \quad (3)$$

A deformação magnetostrictiva anisotrópica relativa ao sentido de magnetização pode ser descrita para um material isotrópico pela relação:

$$e = \frac{3}{2}\lambda_s \left( \cos^2 \theta - \frac{1}{3} \right) \quad (4)$$

Onde  $e$  é a deformação medida para um ângulo  $\theta$  relativo ao sentido da magnetização de saturação. O termo  $1/3$  na equação (4) fixa o zero da deformação para ocorrer no estado desmagnetizado, onde a média de  $\cos^2 \theta$  sobre todos os domínios é  $1/3$ .

Portanto, a maior deformação a ser medida, na direção do campo aplicado, acontece quando o material passa de um estado desmagnetizado a um estado magnetizado. A deformação medida seria menor se o material já apresentasse uma magnetização remanente no sentido do campo aplicado. Supondo que o volume permanece constante, as deformações máximas nas direções paralela e perpendicular e ao campo aplicado são dadas respectivamente por:

$$e_{\parallel} = \frac{3}{2}\lambda_s \left( 1 - \frac{1}{3} \right) = \lambda_s, \quad e_{\perp} = \frac{3}{2}\lambda_s \left( 0 - \frac{1}{3} \right) = -\frac{\lambda_s}{2} \quad (5)$$

Tomando a magnetização  $\mathbf{M}_s$  como a magnetização de saturação relacionada a  $\lambda_s$ , e  $\theta$  como o ângulo entre o  $\mathbf{M}_s$  e a direção do campo aplicado, então podemos escrever  $M(\theta) = M_s \cos \theta$ , obtém-se [7]:

$$e = \frac{3}{2}\lambda_s \left( \frac{M}{M_s} \right)^2 \quad (6)$$

Esta expressão apresenta uma relação quadrática entre a magnetização e a magnetostricção.

### 2.1.1. Campo de desmagnetização

As cargas magnéticas não são cargas físicas, mas são ferramentas convenientes para determinar o valor do campo de desmagnetização dos corpos magnetizados. A Figura 2.4 apresenta uma amostra magnetizada constituída por momentos magnéticos, representados por pequenos ímãs. No interior da amostra, cada pólo norte é compensado por um pólo sul do momento magnético seguinte, nas extremidades não há compensação e os pólos livres produzem um campo interno  $H_d$  com direção oposta à magnetização.

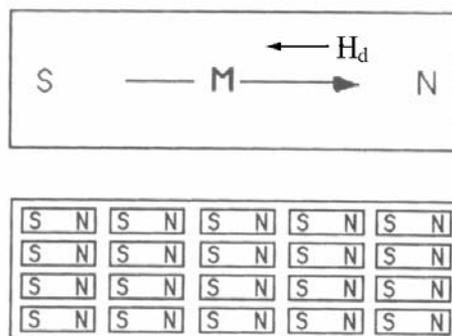


Figura 0-4: Campo de desmagnetização de um material ferromagnético.

Considerando uma amostra com geometria bem definida e magnetização uniforme, tal como o elipsóide de revolução, pode-se considerar um campo efetivo dado pela soma do campo aplicado com o campo de desmagnetização que é dado por [7]:

$$H_d = -N_d M, \tag{7}$$

onde  $M$  é a magnetização e  $N_d$  é o fator que depende da geometria da amostra e para o caso do elipsóide pode ser calculado teoricamente. Portanto, sempre que houver um campo de desmagnetização  $H_d$  o valor de campo total no material será menor do que o campo externo aplicado.

Para um cubóide foi mostrado [12,13] que o fator de desmagnetização  $N_c$  também pode ser calculado a partir do fator de desmagnetização  $N_d$  do elipsóide, sendo dado por:

$$N_c = \frac{2}{q} \left( \frac{3}{q} - \frac{1}{9} \right) \tag{8}$$

onde  $q$  é a razão entre um dos lados da face do cubóide e seu comprimento.

Para os casos estudados neste trabalho o fator  $N_c$  variou de 0.75 até 5.

### 2.1.2.

#### **Materiais de magnetostricção gigante**

Durante os anos sessenta o início do estudo de materiais com magnetostricção gigante (GMM) se deu com a descoberta de terras raras que apresentavam uma alta magnetostricção. Em 1972 Clark descobriu que materiais baseados em terras raras aos quais se acrescentava ferro experimentavam grandes deslocamentos magnetostrictivos. A deformação nestes elementos era da ordem de  $10.000 \times 10^{-6}$  (10.000 partes por milhão), possuindo três ordens de magnitude maior que a magnetostricção do níquel, contudo esta deformação somente era alcançada a baixas temperaturas. A adição de terras raras altamente magnetostrictivas principalmente samário, térbio e disprósio combinados a metais de transição como o níquel, cobalto e ferro apresentaram um aumento na temperatura de Curie das ligas estudadas. No estudo destas ligas, foram também analisadas combinações de térbio e ferro (TbFe) e disprósio e ferro (DyFe), onde foi alcançada uma deformação em temperaturas mais altas, acima de  $3.000 \times 10^{-6}$ , particularmente no composto TbFe<sub>2</sub> [14].

Este último composto apresentava uma elevada anisotropia magnética, ou seja, suas propriedades magnéticas dependiam fortemente na direção em que eram medidas. Esta anisotropia foi compensada pela substituição parcial de Térbio por outra terra rara [4]. Este novo material chamado de Terfenol-D, Tb<sub>x</sub>Dy<sub>1-x</sub>Fe<sub>2</sub> onde  $0.25 < x < 0.3$ ; tem a característica que para um  $x$  fixo, e com o mesmo valor de temperatura, uma pequena variação do ferro produz uma variação na deformação de aproximadamente  $30 \times 10^{-6}$  [14]. O nome deste material veio de **T**érbio, **F**erro, **N**aval **O**rdinance **L**aboratoy e **D**isprósio [15]. O Terfenol-D é o material com magnetostricção gigante comercialmente mais usado e o primeiro material magnetostrictivo utilizado como um transdutor. Ele tem uma elevada não-linearidade e consegue deformações da ordem de  $1600 \times 10^{-6}$  para campos magnéticos no valor de 160 kA/m (0.2 T).

Nas últimas pesquisas sobre materiais magnetostrictivos tem-se buscado o desenvolvimento de compostos que minimizem a anisotropia magnética e histerese. Por exemplo, compostos como o Terfenol-DH [10], são produzidos pela substituição parcial do térbio e disprósio por hólmio. Ligas compostas por

titânio e níquel comercialmente conhecidas como Nitinol oferecem grandes valores da deformação da ordem de  $60.000 \times 10^{-6}$ , mas tem uma resposta dinâmica inferior. Outros materiais que também estão em estudo são NiMnGa e a ligas de ferro com níquel que em princípio apresentam as características procuradas: alta magnetostricção a temperatura ambiente e baixa anisotropia.

A Tabela 2.1 mostra diversas características dos materiais mencionados anteriormente.

Tabela 2.1: Características de alguns materiais magnetostrictivos [7,10,14].

| Material                                     | Densidade<br>(g /cm <sup>3</sup> ) | Temperatura<br>de Curie (K) | Campo de<br>Saturação<br>(T) | Deformação<br>máxima (10 <sup>-6</sup> ) |
|----------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------------|
| <b>Fe</b>                                    | <b>7.86</b>                        | <b>633</b>                  | <b>2.15</b>                  | <b>-14</b>                               |
| <b>Ni</b>                                    | <b>8.9</b>                         | <b>1043</b>                 | <b>0.61</b>                  | <b>-50</b>                               |
| <b>Co</b>                                    | <b>8.9</b>                         | <b>1393</b>                 | <b>1.79</b>                  | <b>-93</b>                               |
| <b>50%Co-50%Fe</b>                           | <b>8.25</b>                        | <b>773</b>                  | <b>2.45</b>                  | <b>87</b>                                |
| <b>50%Ni-50%Fe</b>                           |                                    | <b>773</b>                  | <b>1.60</b>                  | <b>19</b>                                |
| <b>Dy</b>                                    | <b>8.56</b>                        | <b>77</b>                   |                              | <b>6000</b>                              |
| <b>Tb</b>                                    | <b>8.33</b>                        | <b>77</b>                   |                              | <b>3000</b>                              |
| <b>TbFe<sub>2</sub></b><br><b>(Terfenol)</b> | <b>9.06</b>                        | <b>703</b>                  | <b>2.5</b>                   | <b>2630</b>                              |
| <b>(Terfenol-D)</b>                          | <b>9.21</b>                        | <b>653</b>                  | <b>0.2</b>                   | <b>1620</b>                              |

Comercialmente o Terfenol-D pode ser encontrado em várias formas como sólido, filmes e pó. Nesta pesquisa foi utilizado o Terfenol-D sólido comercializado por Gansu Tianxing Rare Earth Functional Materials Co, Ltda, o qual para um cilindro de 10 mm de diâmetro e 10 mm de comprimento oferece um preço cerca de 10 vezes menor do que o cobrado pela ETREMA (US\$ 100), comercializadora oficial do Terfenol-D. Este material é em geral usado na detecção de força, movimento e campo magnéticos.

Sensores baseados nas propriedades do Terfenol-D podem se agrupar em três grupos de acordo com suas propriedades magneto-mecânicas [9]: sensores passivos, sensores ativos e sensores combinados. Os sensores passivos usam o efeito magneto-mecânico como o efeito Villari ao medir parâmetros externos como força, pressão, vibração. Sensores ativos usam uma excitação interna do Terfenol-D para facilitar alguma medida deste que mude com a propriedade externa de interesse. Como exemplo se tem que a temperatura pode ser determinada por variação na permeabilidade, que é uma função da temperatura de uma amostra de Terfenol-D excitada de uma forma conhecida. Sensores combinados são passivos e ativos simultaneamente. Utiliza-se o Terfenol-D

como um elemento ativo ao mudar outro material que permitirá medir a propriedade de interesse. Por exemplo, um sensor de campo magnético com fibra óptica e redes de Bragg usa a variação na longitude do material magnetostrictivo na presença de um campo magnético para alterar o comprimento de onda de luz refletida pela rede de Bragg [18,19, 20]

## **2.2. Extensômetros**

A magnetostricção pode ser medida através de métodos diretos que são aqueles onde a deformação é observada por meio de um princípio mecânico ou óptico [21]. Entretanto, como os efeitos magnetostrictivos são em geral bastante pequenos, o uso destes métodos é limitado a amostras cujo tamanho seja relativamente pequeno. Alguns dos métodos diretos de medida são os extensômetros que serão utilizados neste trabalho.

Quando se aplica um carregamento externo a um objeto, este pode produzir uma deformação longitudinal, uma compressão ou uma flexão do objeto. Uma forma de quantificar a deformação longitudinal é dada por a razão entre a variação do comprimento  $\Delta L$  e o comprimento original  $L$ .

$$e = \Delta L / L \quad (9)$$

a deformação é adimensional e a unidade utilizada será o  $\mu\text{m}/\text{m}$  ou  $\mu\epsilon$  (micro strain).

### **2.2.1. Strain Gauges**

Os strain gauges são sensores que acusam variações de seu comprimento (alongamento ou encurtamento) através de variações da resistência elétrica. Quando um fino fio metálico é esticado, seu comprimento aumenta e sua seção transversal diminui. Ambos os efeitos tendem a variar a resistência elétrica do fio. Os sensores de deformação, disponíveis comercialmente, consistem em um depósito de material condutor ou semicondutor, sobre uma película isolante em formato sinuoso com o padrão de zig-zag. Na Figura 2.5 esta ilustrado o modelo do tipo de strain gauge utilizado neste trabalho.

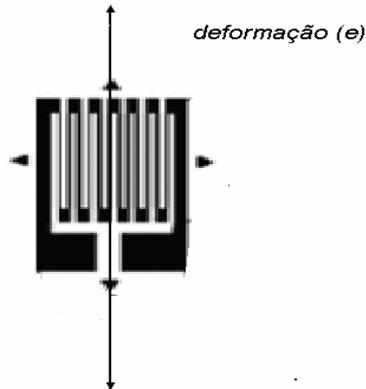


Figura 0-5: Modelo de strain gauge utilizado neste trabalho [20], mostrando a direção de deformação a se medir.

A sensibilidade de um strain gauge é medida pela razão entre a variação da sua resistência  $\Delta R/R$  e sua deformação  $\Delta L/L$ . Esta razão é chamada de *Gauge Factor* (GF):

$$GF = \left( \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \right) \quad (10)$$

De um modo geral as variações  $\Delta R/R$  são transformadas em variações de voltagem  $\Delta V$  através de dois tipos de circuitos: o circuito potenciométrico e a ponte de Wheatstone que é a mais utilizada.

### 2.2.2. Redes de Bragg em Fibras Ópticas (FBG)

Uma rede de Bragg gravada em uma fibra óptica constitui uma modulação local e periódica do índice de refração do núcleo da fibra. Geralmente para este fim utilizam-se fibras com alta concentração de germânio.

Quando a luz guiada ao longo do núcleo da fibra encontra o plano da rede, o comprimento de onda da luz que coincide com um múltiplo do período de Bragg é refletido de volta. O comprimento de onda da luz refletida é dado por [21]:

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (11)$$

onde  $n$  é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra e  $\Lambda$  é o período da rede de Bragg.

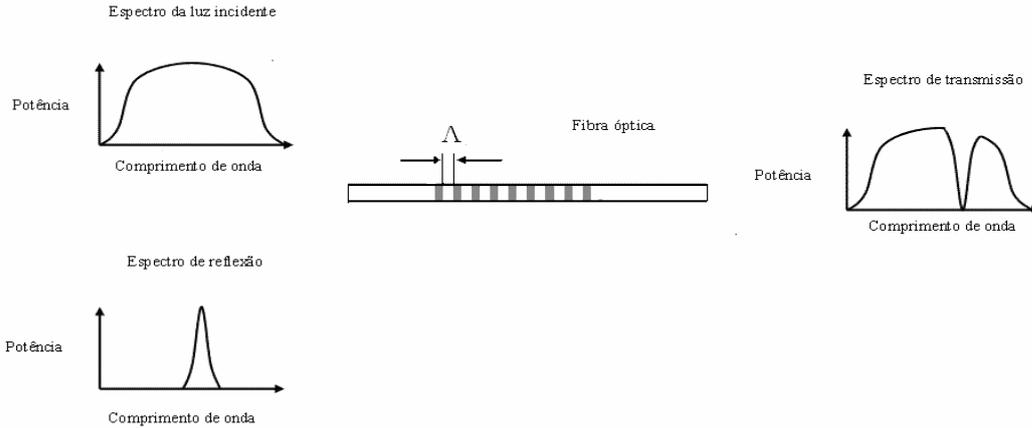


Figura 0-6: Comportamento da rede de Bragg, ao passar um raio de luz, uma parte da luz é refletida e outra parte é transmitida.

O índice de refração efetivo e o afastamento periódico entre os planos da rede pode ser alterado por tensão na rede de Bragg e por variações na temperatura. A variação do comprimento de onda refletido causado por estes fatores pode ser representado por:

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{\partial n}{\partial L} + n \frac{\partial \Lambda}{\partial L}\right)\Delta L + 2\left(\Lambda \frac{\partial n}{\partial T} + n \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right)\Delta T \quad (12)$$

onde  $\Delta L$  é a mudança na comprimento imposta por algum agente externo e  $\Delta T$  é a mudança na temperatura. O primeiro termo da equação (12) representa o efeito da deformação, e o segundo o efeito da temperatura na fibra óptica. Estes efeitos podem ser expressos como:

$$\Delta\lambda_B = \left[ (1 - p_e) \frac{\Delta L}{L} + (\alpha_t + \alpha_n) \Delta T \right] \lambda_B \quad (13)$$

Onde  $p_e$  é o coeficiente de deformação óptica efetiva da fibra,  $\alpha_t$  é o coeficiente termo-óptico e  $\alpha_n$  é o coeficiente de expansão térmica da fibra. Assumindo que a temperatura efetiva pode ser compensada e utilizando parâmetros típicos para os coeficientes acima, o comprimento de onda de Bragg refletido esperado para uma fibra óptica de germanosilicato [22] é:

$$\Delta\lambda_B = 0.78(\Delta L/L)\lambda_B \quad (14)$$

O princípio básico normalmente usado em sistemas de sensores a FBG é a monitoração da variação do comprimento de onda do sinal que retorna da rede de Bragg relacionado com os parâmetros que se desejam medir (deslocamento, deformação, temperatura, etc.). A natureza da resposta das redes de Bragg faz com que estes extensômetros tenham uma capacidade auto-reverenciável [22], tornando-o independente de flutuações de luz e imune a perdas.

A rede de Bragg tem uma resposta bastante linear em relação à deformação aplicada, em contraste com muitos sensores elétricos, além disso possui outras vantagens tais como a imunidade a interferência eletromagnética, baixo peso, estabilidade, pequenas dimensões, facilidade de multiplexação, além de poder ser utilizada a grandes distâncias da eletrônica do controle.

### 3 Caracterização magnética

Neste capítulo apresentamos a caracterização da deformação com relação à aplicação de um campo magnético constante feita para as diferentes geometrias de GMM.

Foram caracterizados cubóides de GMM de nome comercial TX, fornecido pela Gansu Ltd. de diversas geometrias: 2x2x3 mm, 2x2x6 mm, 2x2x10 mm, 2x2x20 mm, 4x4x3 mm, 4x4x6 mm, 4x4x10 mm, 4x4x20 mm. Neste trabalho vão ser utilizados os termos GMM e TX indistintamente ao fazer referência aos cubóides magnetostrictivos de Terfenol-D utilizados.

Primeiramente foi levantada a curva de deformação contra campo magnético aplicado. Esta medida foi feita com o eletroímã da GMW, modelo 3470 que produz um campo magnético aproximadamente constante na região entre os seus pólos. Para o controle e registro da mediação, foi usado um programa em Labview 7.1. (desenvolvido pelo aluno de Iniciação Científica Jan Krueger). Os pólos do eletroímã foram afastados a uma distância de 20 mm que, de acordo com o fabricante proporciona uma relação de campo magnético para corrente igual a 0,11 T/A.



Figura 0-1: Eletroímã com o qual foi feita a caracterização magnética.

Os cubóides foram desmagnetizados, utilizando o próprio eletroímã, através de magnetizações de menor intensidade sucessivas. Os strain gauges foram colados no centro de cada cubóide.

De acordo com os resultados obtidos nesta caracterização observou-se que a deformação ao aplicar campo magnético varia para cada geometria. A Fig. 3.1 mostra um exemplo das respostas para três geometrias diferentes de cubóides. Pode-se notar que para baixos campos existe uma faixa de baixa deformação que depende da geometria. A faixa de baixa deformação foi definida de forma qualitativa como o intervalo entre o campo zero e o ponto onde a derivada da deformação em relação ao campo muda abruptamente. Assim na geometria do TX 4x4x20 mm pode-se ver que a faixa de baixa deformação é muito menor quando comparada com a do TX 2x2x6 mm que também difere do cubóide TX 4x4x3 mm. Notamos também que a deformação máxima tem uma variação grande de 500  $\mu\epsilon$  até 1000  $\mu\epsilon$ .

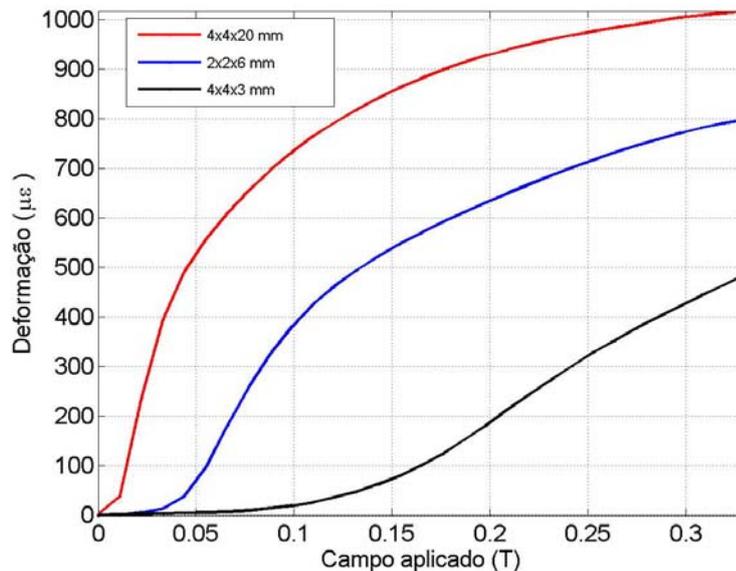


Figura 0-2: Comportamento na caracterização de três cubóides de diferentes geometrias.

Na Figura 3.2 se observam as respostas de 4 cubóides TX 4x4x20 mm, nestes casos a faixa de baixa deformação corresponde a campos menores que 15 mT, e a deformação máxima obtida para esta geometria varia de 890  $\mu\epsilon$  até 1020  $\mu\epsilon$ .

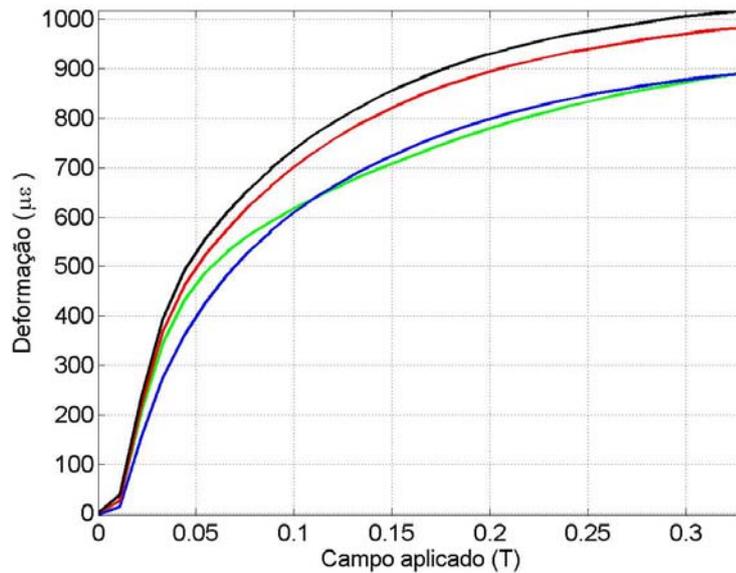


Figura 0-3: Curvas de caracterização para 4 cubóides de geometria 4x4x20.

Em 5 cubóides de geometria de 4x4x10 mm, notou-se que a faixa de baixa deformação corresponde a campos menores de 60 mT, e o valor da deformação máxima varia de 850 μs até 1010 μs.

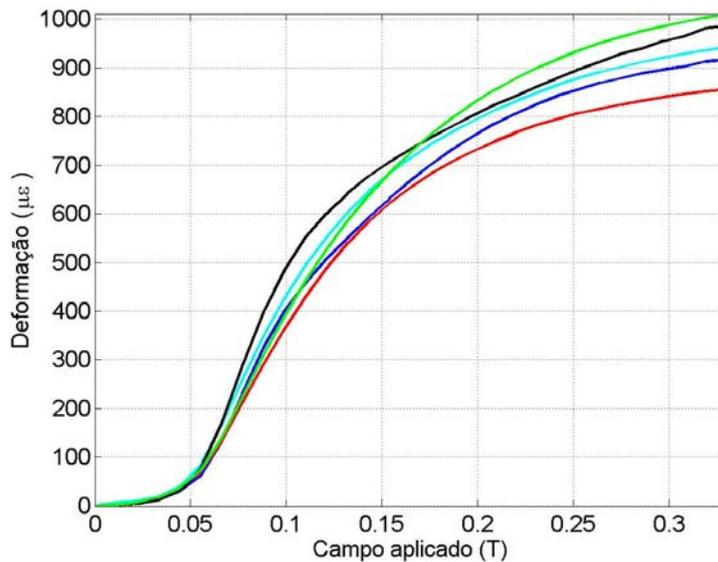


Figura 0-4: Curva de caracterização para 5 cubóides de geometria 4x4x10 mm.

Na geometria de 4x4x6 mm, para os 5 cubóides testados a faixa de baixa deformação corresponde a campos menores de 110 mT, observa-se que neste caso, diferentemente dos anteriores, esta faixa tem uma variação para cada cubóide. O valor da deformação máxima varia de 690 μs até 870 μs.

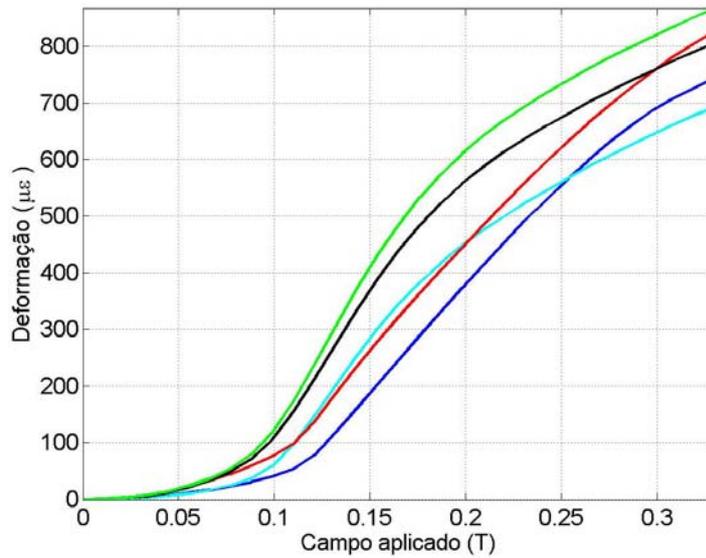


Figura 0-5: Curvas de caracterização para 5 cubóides de geometria 4x4x6 mm.

No caso da geometria de 4x4x3 mm, a faixa de baixa deformação corresponde a campos menores de 130 mT, e o valor da deformação máxima varia numa faixa de 480  $\mu\epsilon$  até 850  $\mu\epsilon$ .

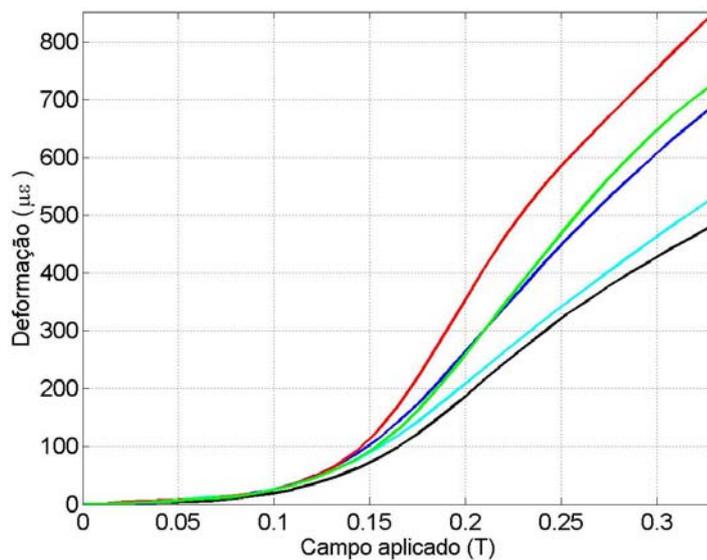


Figura 0-6: Curvas de caracterização para 5 cubóides de geometria 4x4x3 mm.

Para a geometria de 2x2x10 mm, a faixa de baixa deformação corresponde a campos menores de 30 mT, e o valor da deformação máxima varia de 680  $\mu\epsilon$  até 950  $\mu\epsilon$ .

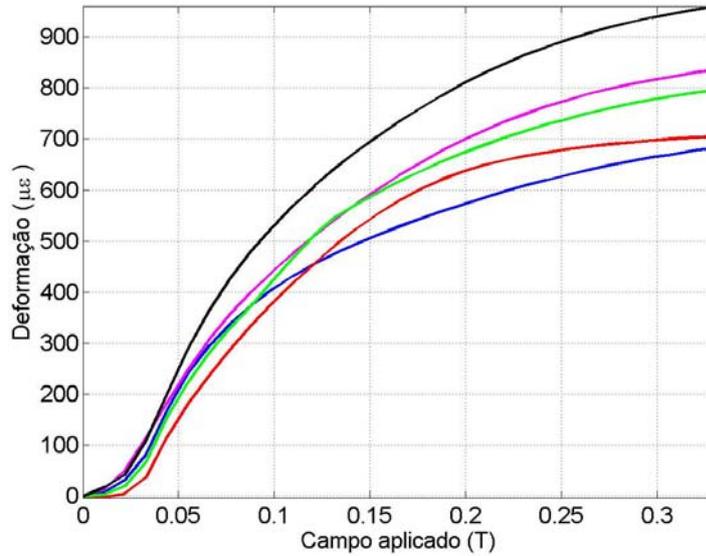


Figura 0-7:Curvas de caracterização para 5 cubóides de geometria 2x2x10 mm.

Para a geometria de 2x2x6 mm, a faixa de baixa deformação corresponde a campos menores de 50 mT, e o valor da deformação máxima varia de 630 μ $\epsilon$  até 1140 μ $\epsilon$ . Neste caso foram testados 10 cubóides, nos quais pode-se observar respostas bem variadas da deformação máxima com relação ao campo aplicado, variando de 600 μ $\epsilon$  até 1100 μ $\epsilon$ .

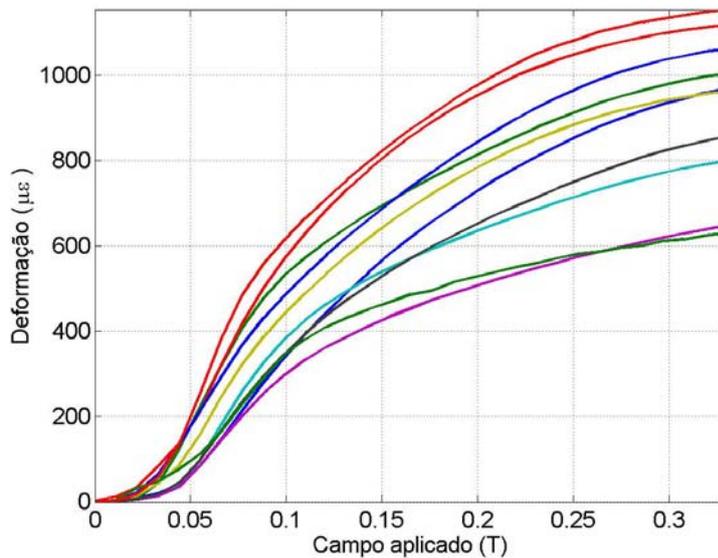


Figura 0-8:Curvas de caracterização para cubóides de geometria 2x2x6 mm.

Na geometria de 2x2x3 mm, notou-se que a faixa de baixa deformação

corresponde a campos menores de 75 mT, e o valor da deformação máxima varia numa faixa de 720  $\mu\epsilon$  até 970  $\mu\epsilon$ .

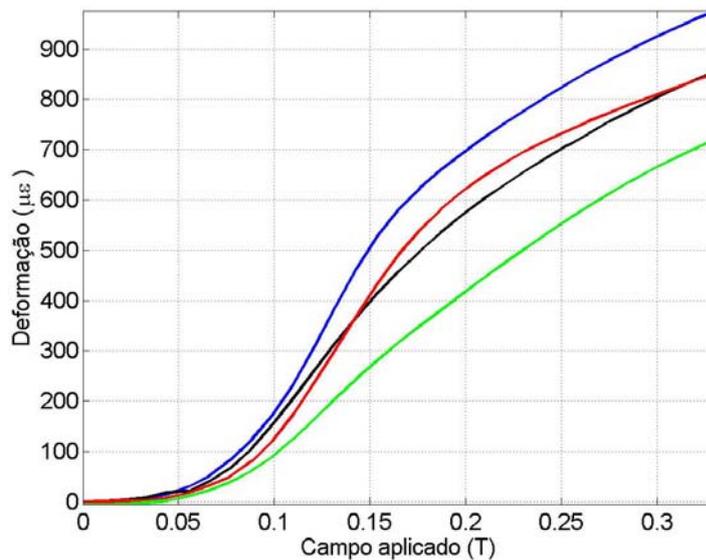


Figura 0-9: Curvas de caracterização para cubóides de geometria 2x2x3 mm.

Para as geometrias medidas tem-se que a variação da faixa da baixa deformação diminui com o aumento no comprimento do cubóide e com a diminuição da seção reta, como era esperado devido ao campo de desmagnetização.

De acordo com a caracterização, observa-se que na medida em que os pólos magnéticos induzidos nas extremidades de cada cubóide estejam mais afastados, isto é, nos cubóides mais compridos, temos um campo de desmagnetização menor, e em cubóides com a seção reta menor, o campo de desmagnetização também é menor, como foi explicado no capítulo 2. Isto poderá ter implicações na escolha de geometria apropriada do GMM para utilização no sensor de deslocamento, se existir alguma restrição ao tamanho do sensor.

A curva seguinte é apresentada pelo fabricante (Gansu Tianxing Rare Earth Functional Materials Co., Ltda), onde para um campo de 0,3 T (aproximadamente 240 kA/m) a deformação é de aproximadamente 1350  $\mu\epsilon$ . A curva do fabricante é uma média para todas as geometrias de um mesmo lote, não podendo ser comparada com as curvas de cada cubóide de TX. Não foi esclarecida pelo fabricante, as condições em que a curva foi obtida.

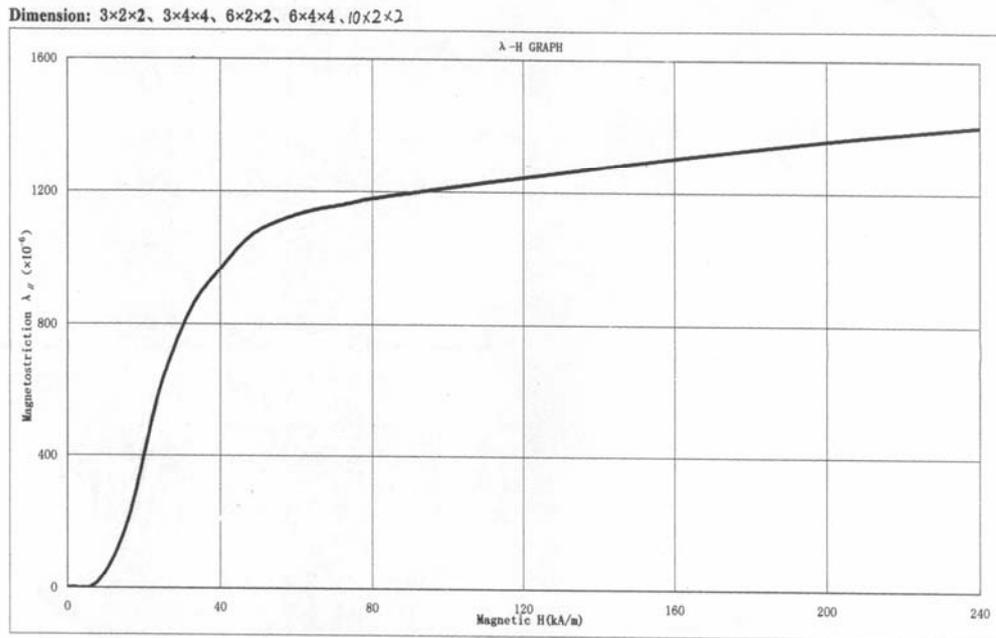
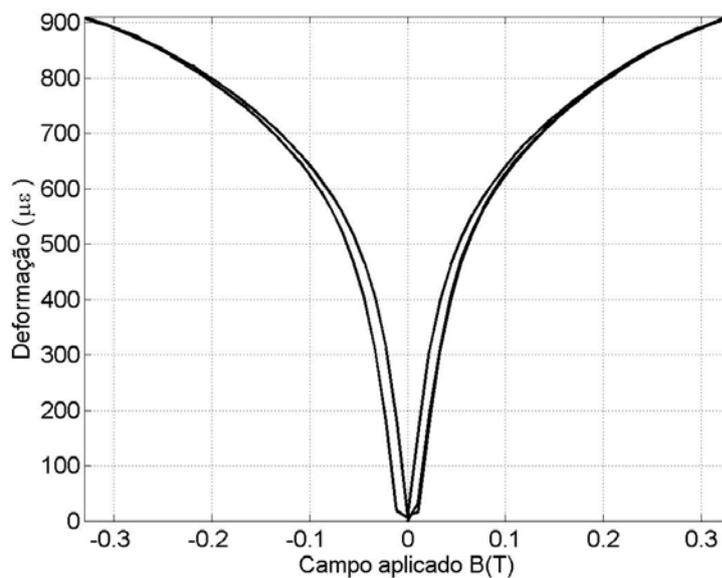
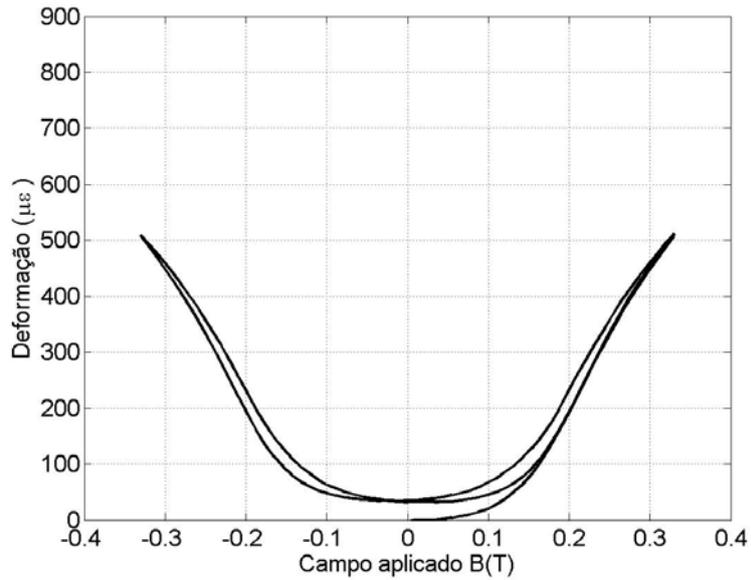


Figura 0-10: Curva do TX para diferentes geometrias, fornecida pelo fabricante.

As curvas de deformação em função do campo aplicado, exibem histerese quando o campo é diminuído [7,23]. O comportamento com relação à histerese varia para cada cubóide. As figuras 3.11 (a) e (b) mostram a histerese para dois cubóides de TX de diferentes geometrias.



(a)



(b)

Figura 0-11: Deformação de acordo ao campo magnético constante aplicado. Histerese para o TX de geometria 4x4x20 mm, (b) histerese para o cubóide 4x4x3 mm.

Para comparação, foi feita também uma curva de deformação de um cilindro de Terfenol-D de 10 mm de diâmetro e 10 mm de altura comprado da ETREMA Products.

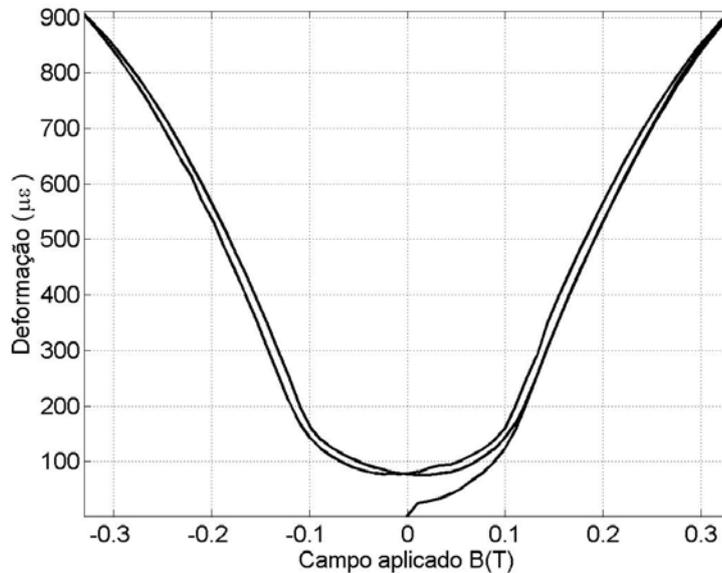


Figura 0-12: Histerese para o cilindro de Terfenol-D de 10mm de diâmetro e de 10 mm de altura fornecido pela ETREMA Products.

Pode ser constatado que o comportamento do cilindro de Terfenol-D da ETREMA, em relação à deformação, foi similar aos cubóides de TX de mesmo comprimento.

O comportamento variável da histerese apresenta-se também em cubóides da mesma geometria como pode-se ver na Figura 3.12.

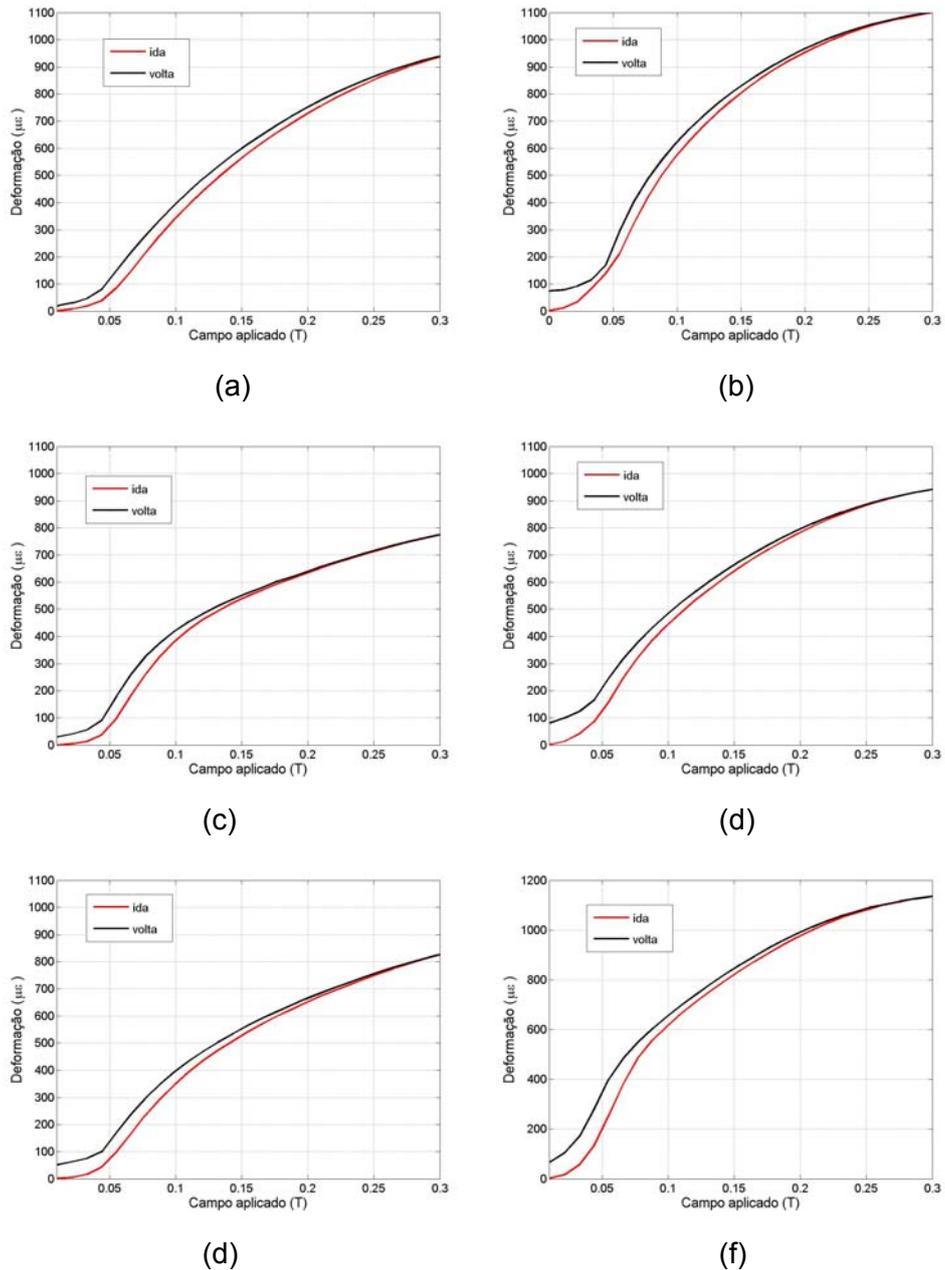


Figura 0-13: Histerese para diferentes cubóides da mesma geometria.

De uma forma geral a caracterização magnética para as diferentes geometrias apresentou uma variação da deformação máxima de  $480 \mu\epsilon$  até  $1200 \mu\epsilon$ , e faixas de baixa deformação de 15mT até 130 mT. Um comportamento

semelhante foi verificado na referência [24] com cilindros de Terfenol-D da ETREMA, onde para diferentes amostras de Terfenol-D da mesma geometria foram exibidos diferentes valores da deformação.

## 4 Montagem experimental

Neste capítulo apresentamos a montagem experimental. Mostramos também os resultados obtidos ao fazer uma simulação do ímã que gera o gradiente de campo variando sua geometria e sua posição.

### 4.1. Geração do gradiente de campo

Como nosso interesse está na medida de deslocamentos medidos através de deformações no material (GMM) fizemos simulações utilizando elementos finitos com o objetivo de analisar algumas configurações de gradientes espaciais de campos magnéticos gerados por ímãs permanentes. Para isto utilizamos o programa da Vector Fields, Opera-3D versão 8.7. Mantendo o volume do ímã utilizado nas medidas experimentais, simulamos cilindros de NdFeB de diversas geometrias. O centro do cilindro foi colocado na origem do sistema de coordenadas com seu eixo geométrico e o pólo norte magnético apontando na direção do eixo z positivo. Foi utilizada uma curva de magnetização padrão para ímãs de NdFeB disponível no programa. A Fig. 4.1 mostra a geometria do ímã simulado, feita com 437.503 elementos e 134.704 nós.

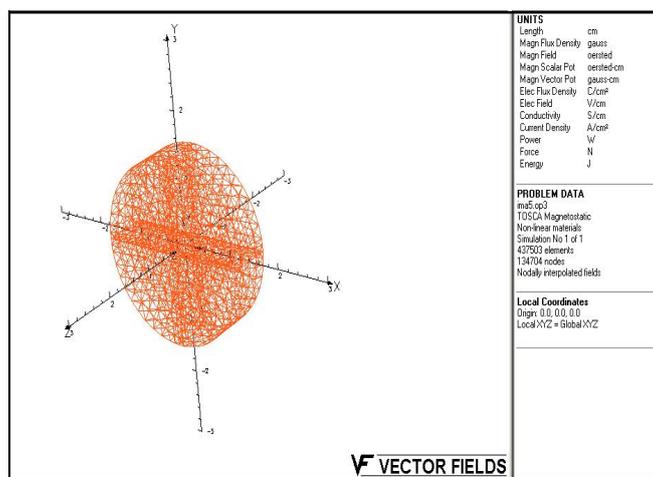


Figura 4.1: Modelo da simulação feita no programa Opera 8.7, para um ímã de dimensões 22.5 mm de comprimento e 9.6 mm de diâmetro.

A medição experimental foi feita utilizando um ímã permanente cilíndrico de NdFeB de 25.5 mm de diâmetro e 9.6 mm de comprimento, o eixo central da ponta de prova Gaussímetro (F. W. Bell 9550) foi colocado de forma a ser coincidente com o eixo N-S do ímã e medir o campo ao longo do eixo do ímã. A medida experimental (em azul) foi comparada com a simulação (em vermelho) e o resultado está na Fig. 4.2, onde foi constatada a validação do modelo.

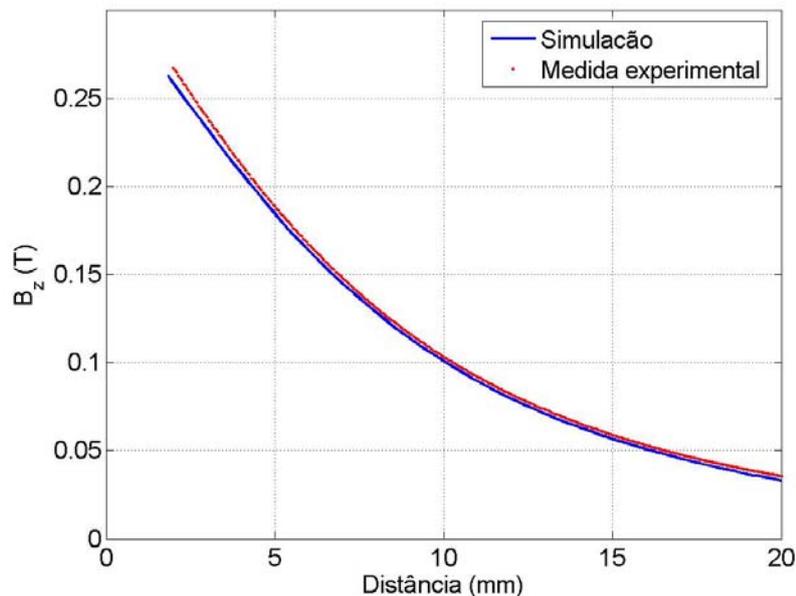


Figura 4.2: Em vermelho medida experimental, em azul campo magnético obtido pela simulação.

Na Fig. 4.3 pode-se verificar que com pequenas variações de geometria o gradiente de campo muda, aumentando quando o diâmetro é menor e o comprimento é maior, diminuindo quando o diâmetro é maior e o comprimento menor. Nas distâncias dentro da faixa de 12-20 mm pode-se notar que o campo é o mesmo para as três configurações simuladas. De acordo com a simulação para o ímã usado nas experiências de diâmetro de 25.5 mm tem-se que a 5 mm de distância, o gradiente na direção do eixo do ímã é de 21 mT/mm, a 10 mm de distância é de 12 mT/mm. Para o menor diâmetro de 23.5 mm o gradiente a 5 mm aumenta para 25 mT/mm e a 10 mm de distância é de 13 mT/mm. Para o diâmetro maior de 27.5 mm teremos 17 mT/mm a 5 mm e 11 mT/mm a 10 mm. Já na distância de 15 mm o gradiente cai para 6 mT/mm para todos. Portanto um ímã com diâmetro somente 2 mm menor e com mesmo volume geraria um gradiente de campo magnético a 5 mm de distância cerca de 20% maior.

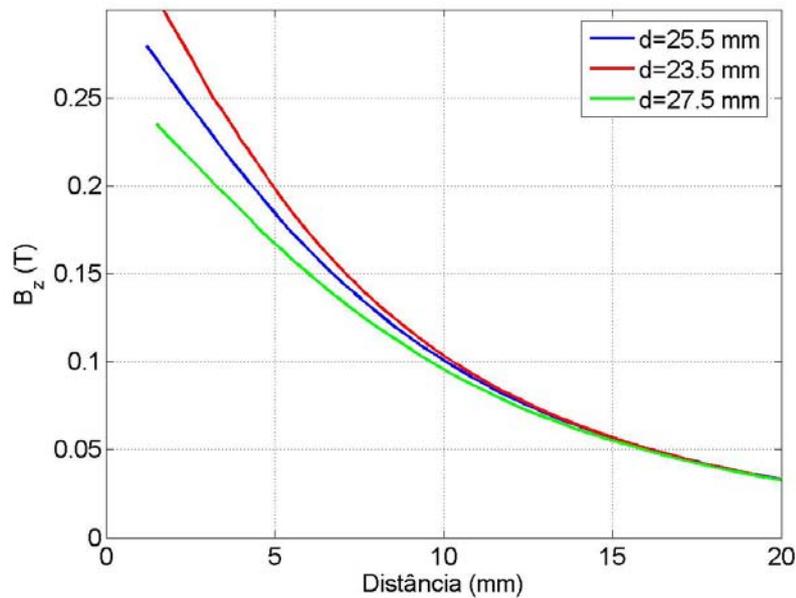


Figura 4.3: Simulação variando a geometria do ímã.

Observa-se que deve se ter cuidado no posicionamento do ímã com relação ao cubóide, já que como se vê no gráfico a seguir, uma pequena variação a uma distância de 5mm, na posição vertical (1mm) gera uma variação de 40mT no campo, o valor do gradiente neste caso cai para 14 mT/mm, isto é, 35% menor que quando o ímã esta na origem do sistema de coordenadas. O valor do gradiente maior se obtém quando o cubóide e o ímã estão centrados sobre o mesmo eixo.

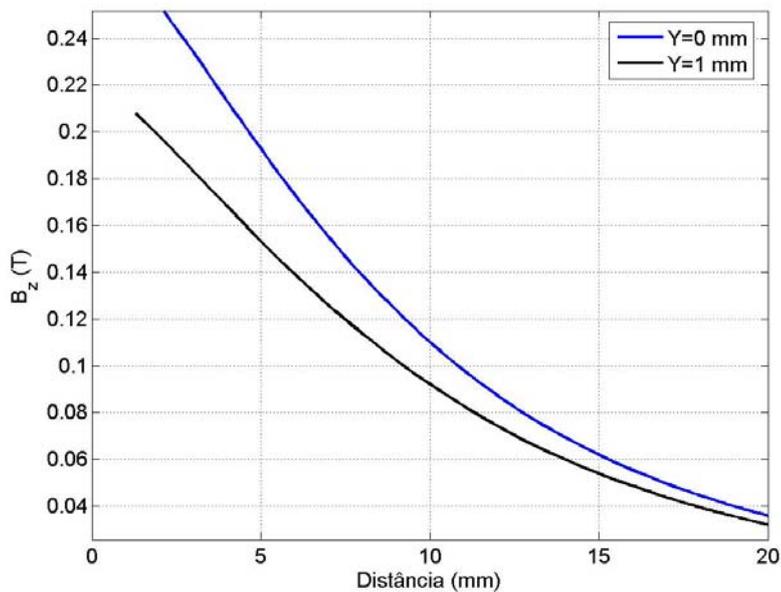
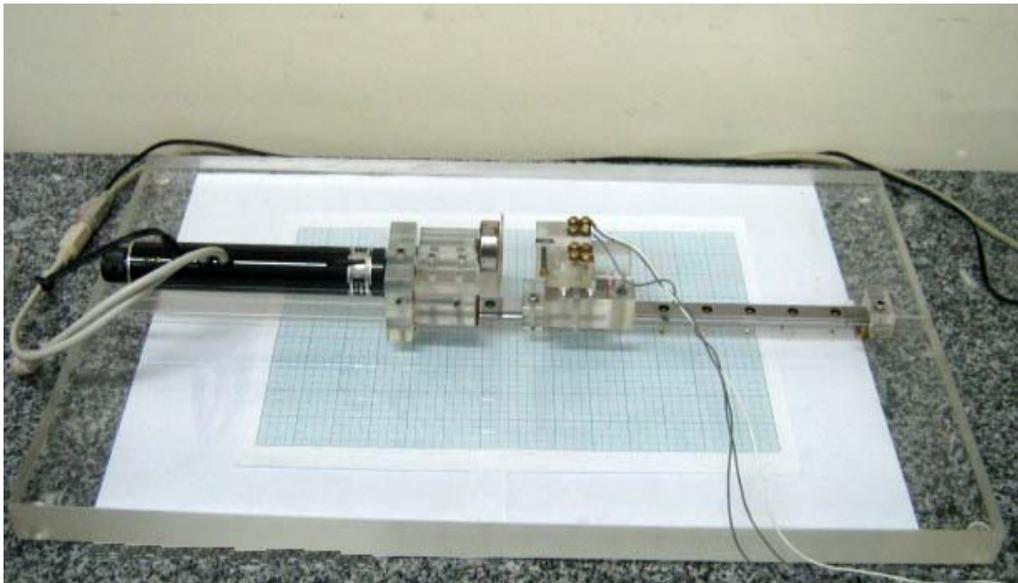


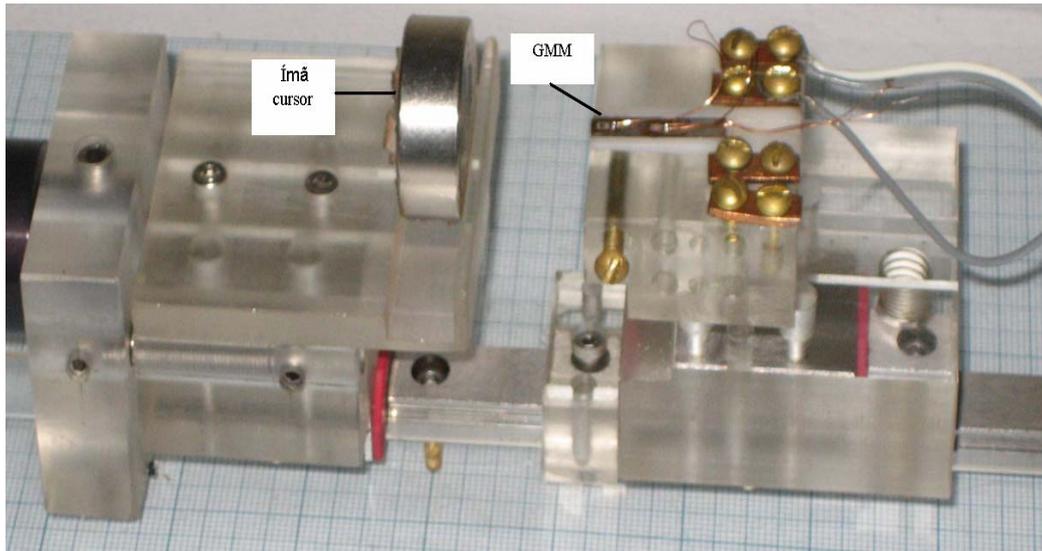
Figura 4.4: Simulação para o ímã de diâmetro 25.5 mm variando a distancia no eixo y.

## 4.2. Montagem experimental

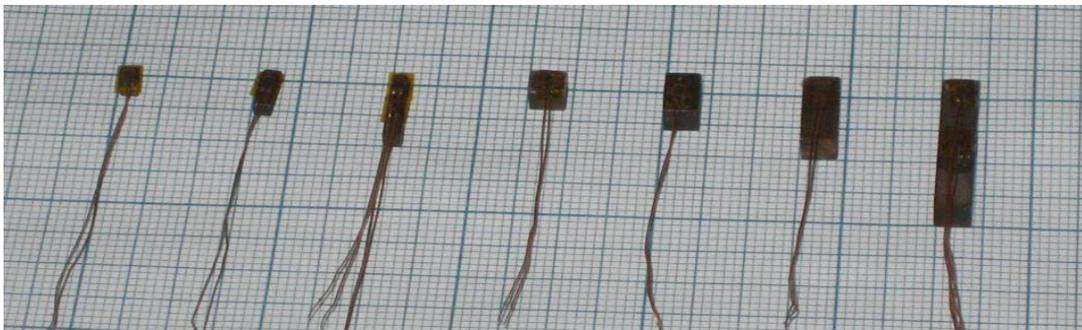
A montagem consistiu de um trilho de aço e dois patins onde estão colocados o ímã e o GMM. Foi utilizado um ímã de NdFeB de 25.5 mm de comprimento e 9.6 mm de diâmetro. O ímã pode se movimentar através de um atuador linear ZABER T-LA60 numa faixa de 2 a 20 mm e o GMM permanece parado, fixado usando um parafuso. O passo utilizado em todas as medidas foi igual a  $50\ \mu\text{m}$ . Veja foto a seguir. O ímã vai gerar um gradiente de campo na faixa de 30 mT a 280 mT na posição da face do cubóide mais perto do ímã. O eixo central de cada cubóide era coincidente com o eixo N-S do ímã. A origem para a posição foi tomada na face da íma mais perto do cubóide magnetostrictivo. As fibras óticas com redes de Bragg e o strain gauge foram coladas diretamente sobre o lado mais comprido do cubóide.



(a)



(b)



(c)

Figura 0-5: (a) Montagem do sensor. (b) Conjunto ímã-terfenol. (c) Diferentes geometrias de TX testadas com strain gauges colados.

#### 4.2.1. Colagem dos extensômetros

Os extensômetros usados foram colados paralelamente ao eixo principal dos cubóides de GMM os quais foram inicialmente desmagnetizados como se apresenta na seguinte figura.

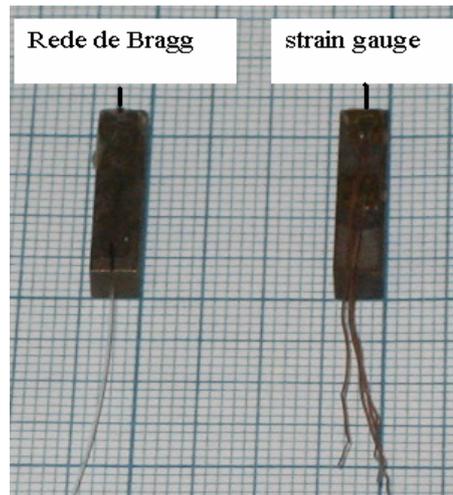


Figura 0-6: Extensômetros: strain gauge e rede de Bragg colados em os cubóides de GMM.

Para a colagem da fibra com redes de Bragg o seguinte procedimento foi utilizado:

- Clivar as fibras com as redes de Bragg.
- Colocar a fibra com Rede de Bragg e a fibra clivada nos cabos ópticos na máquina de emenda, depois esquentar o protetor de emenda para proteger a fibra.
- Lixar a peça de Terfenol-D, e logo limpa-la com álcool assim como a fibra.
- Posicionar a rede sobre a peça colocada em um suporte de acrílico e logo colocar cola, nosso caso Loctite 416. Fazer pressão por uns minutos com mylar aluminizado.
- O conjunto é deixado secar por aproximadamente 24 horas, antes de fazer as medidas.

As medidas do comprimento de onda da FBG foram realizadas usando o sistema de leitura sm125-200 Micron Optics, Ethernet Remote Utility, versão 0.90 que tem uma exatidão nominal de 10 pm, este sistema faz uma emissão de radiação produzida por um Laser sintonizável que varre o comprimento de onda na fibra óptica na faixa do comprimento de onda de 1520 nm a 1570 nm

Para as medidas com os strain gauges, o modelo 062BG produzido pela empresa Excel Sensors foi utilizado. A resistência do 062BG é de 350  $\Omega$ , fator gauge de  $2.1 \pm 0.05$  e dimensões para grelha de 2.03 mm x 1.57 mm. Para a colagem do strain gauge, a peça de GMM foi lixada com o objetivo de retirar as impurezas mais grosseiras, depois se limpou com acetona para a remoção de contaminantes e posteriormente colou-se o strain gauge com Loctite 416, deixando secar e fazendo pressão por aproximadamente 1 minuto. Para a

medição com strain gauge conectou-se o strain gauge à uma ponte de Wheatstone.

#### 4.2.2.

#### A ponte de Wheatstone

Uma ponte de Wheatstone é uma rede de quatro resistências que forma um circuito fechado, onde uma ou mais resistências são desconhecidas

As resistências desconhecidas são os elementos sensores, que terão sua resistência alterada de acordo com a variação de algum parâmetro físico como, por exemplo, a variação na deformação ou temperatura. A Fig. 4.7 mostra o circuito da ponte que é o equivalente elétrico de dois divisores de tensão, R1 e R2, e R3 e R4.  $V_{EX}$  é a tensão de alimentação e a saída da ponte de Wheatstone é  $V_{CH}$ . A resistência a ter sua variação medida constitui um dos braços da ponte, se todas as resistências forem idênticas o valor lido será zero ou sim o produto  $R_1 R_3 = R_2 R_4$ .

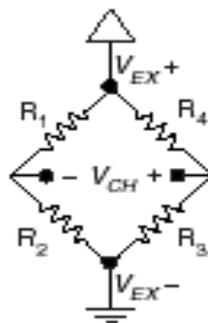


Figura 0-7: Modelo do circuito básico da ponte de Wheatstone [23].

O número de resistências ativas determina a classe de configuração da ponte, assim na configuração de  $\frac{1}{4}$  temos um elemento ativo, a configuração de  $\frac{1}{2}$  tem 2 elementos ativos e a total tem os quatro elementos ativos.

#### 4.2.1.1.

#### A ponte de wheatstone $\frac{1}{4}$

Para a leitura do strain gauge nesta pesquisa foi usada uma ponte configurada como do tipo  $\frac{1}{4}$  da National Instruments PXI-4220.

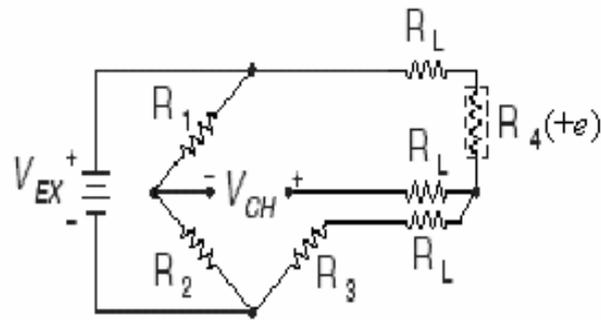


Figura 4.8: Ponte de Wheatstone tipo I de ¼. [23].

- $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  são os resistores fixos da ponte ( $350 \Omega$ ).
- $R_4$  é o strain gauge ativo ( $350 \Omega$ ).
- $\Delta R_4 = R_4 + e$
- $R_L$  é a resistência dos fios que em nosso caso é de  $0,4 \Omega$ .
- $V_{CH}$  é a medida do sinal da voltagem.
- $V_{EX}$  é a voltagem de excitação.

Para converter as leituras da voltagem na deformação  $e$ , se utiliza a seguinte relação:

$$e = \frac{4 V_{CH}}{GF V_{EX}}$$

(4.1)

onde:

$$V_{CH} = \frac{V_{EX}}{4} \frac{\Delta R_4}{R_4} \quad (4.2)$$

- $GF$  é o fator de gauge especificado pelo fabricante.

A calibração da ponte com strain gauge é feita através do programa MAX (Measurement & Automation Explorer) da National Instruments. O GMM é colocado a mais de 20 mm do ímã, onde então a ponte é zerada. Para avaliação das medidas realizadas pela ponte PXI 4220 utilizou-se o resistor variável de precisão Tinsley ZX74 com resolução de 1 m $\Omega$ , onde comparamos os valores selecionados do resistor com as medidas feitas com o PXI 4220. Esta medida foi também comparada com outra disponível no certificado de calibração do Tinsley, realizada com um multímetro de precisão Time Electronics 5075. Foi constatado um erro médio na medida é de 0,13 m $\Omega$  entre a PXI4220 , o ZX74 e o Time Electronics 5075.

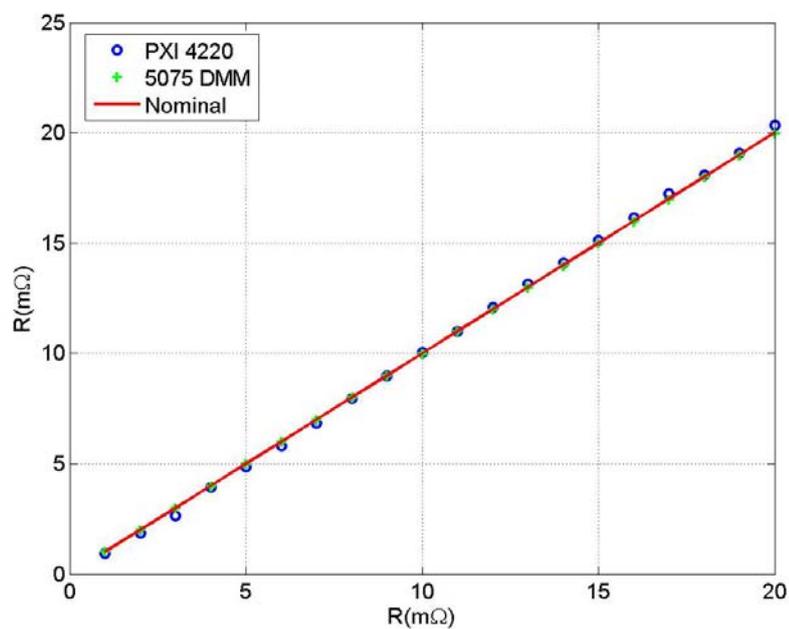


Figura 0-9: Curva de comparação entre as leituras da PXI 4220 e o resistor padrão Tinsley ZX74.

## 5 Análises dos resultados

Neste capítulo é apresentado o sensor de deslocamento. São discutidos os resultados dos testes para diferentes geometrias de TX na presença de um gradiente de campo, usando para isto dois tipos de extensômetros: rede de Bragg e strain gauge.

### 5.1. O sensor de deslocamento

Todos os testes e análises realizados para o sensor de deslocamento são para a situação onde desejamos monitorar pequenos deslocamentos de algum componente ou estrutura que deve permanecer fixa. O sensor de deslocamento tem duas partes como se ilustra na Fig. 5.1, a primeira é um ímã que fará o papel de cursor e que será colado no componente para o qual queremos medir o deslocamento. A segunda parte fixa consistirá do GMM e do extensômetro.

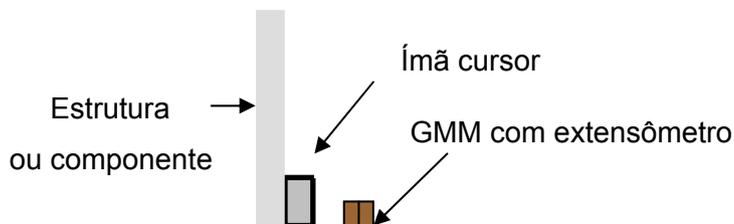


Figura 5.1: Sensor de deslocamento.

Na figura seguinte estão as possíveis situações em que se pode medir deslocamento com nosso sensor. Todos estes deslocamentos provocariam o deslocamento do ímã e a conseqüente variação no campo magnético na posição do GMM, portanto seriam passíveis de serem medidos. Entretanto, a montagem experimental só nos permitiu avaliar a translação horizontal ilustrada em (b). Note que o cursor não fará contacto com o elemento sensor.

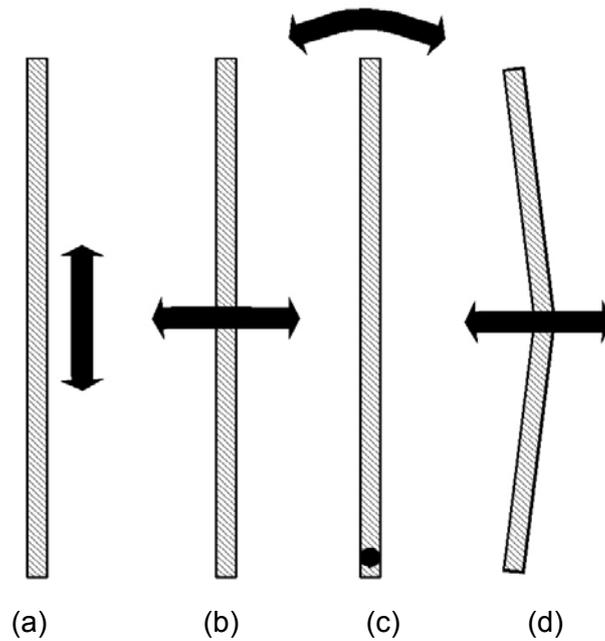


Figura 5.2: Deslocamentos que podem ser detectados com o sensor de deslocamento (a) translação vertical, (b) translação horizontal, (c) rotação e (d) flexão.

Como será detalhada adiante, a resposta do sensor de deslocamento varia conforme diversos parâmetros: geometria do GMM, polarização magnética, pressão, etc. Na figura seguinte está ilustrado a melhor e a pior resposta obtida, em termos de deformação máxima dos diferentes cubóides testados, isto para uma mesma variação do campo magnético na posição do GMM. Para a maior resposta que corresponde ao TX 2x2x10 mm a sensibilidade é de  $65 \mu\epsilon/\text{mm}$ , e para pior resposta que foi observada no cubóide de geometria 4x4x3 mm se tem uma sensibilidade de  $45 \mu\epsilon/\text{mm}$ .

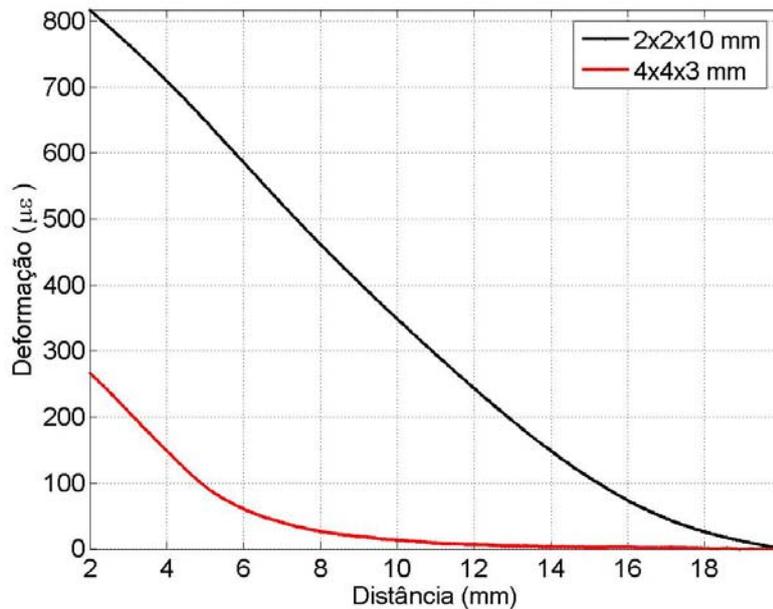


Figura 5.3: Cubóides de maior e menor resposta.

A resposta do sensor será analisada basicamente por dois parâmetros: sensibilidade e faixa dinâmica. A sensibilidade será a razão da deformação pelo deslocamento correspondente. Iremos definir a faixa dinâmica como a máxima distância entre o ímã cursor e o GMM para a qual a sensibilidade a 5 mm de distância entre o ímã e o cubóide varia de 10%. Para o cubóide 4x4x3 mm tem-se que a faixa dinâmica é de 1 mm, para o cubóide de 2x2x10 mm esta faixa é de 8 mm aproximadamente, ou seja, para este último, o mesmo sensor pode ser utilizado com aproximadamente a mesma sensibilidade para as distâncias de 2 mm até 10 mm do componente que se deseja medir o deslocamento.

A Fig. 5.4 mostra a resposta para variações do cursor ( $\pm 500\mu\text{m}$ ) em torno de uma distância inicial de 5 mm entre o cursor e o GMM. Para esta distância inicial, o valor do campo magnético aplicado na face do cubóide corresponde a 190 mT, e o gradiente corresponde a 22 mT/mm. Para cada passo de 50  $\mu\text{m}$  se obteve um erro médio quadrático de 0.14  $\mu\text{s}$ . O cubóide utilizado para este caso foi o TX 2x2x10 mm.

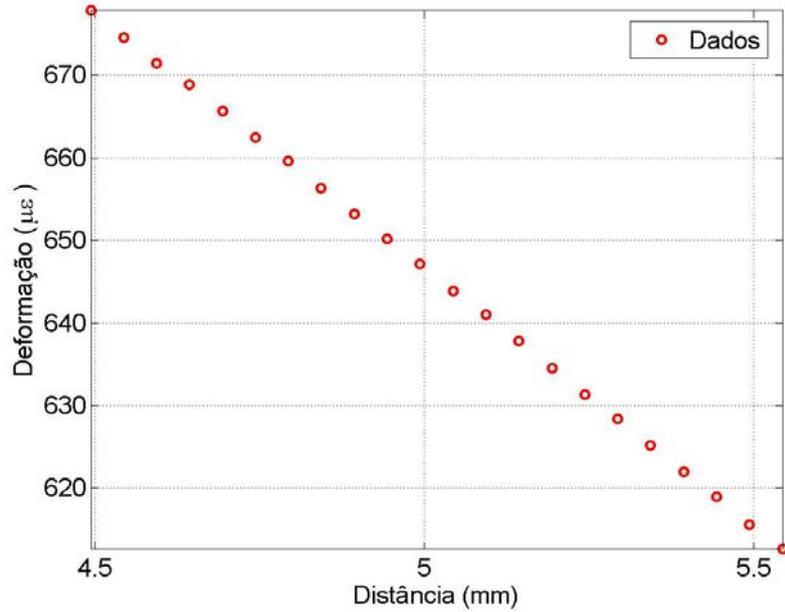


Figura 5.4: Resposta do TX 2x2x10 mm, em torno de uma distância de 5mm.

Para a obtenção da curva de calibração do sensor de deslocamento, trocamos os eixos com mostrado na Fig. 5.5 onde temos o gráfico do deslocamento em função da deformação, a seguir ajustamos a curva de calibração.

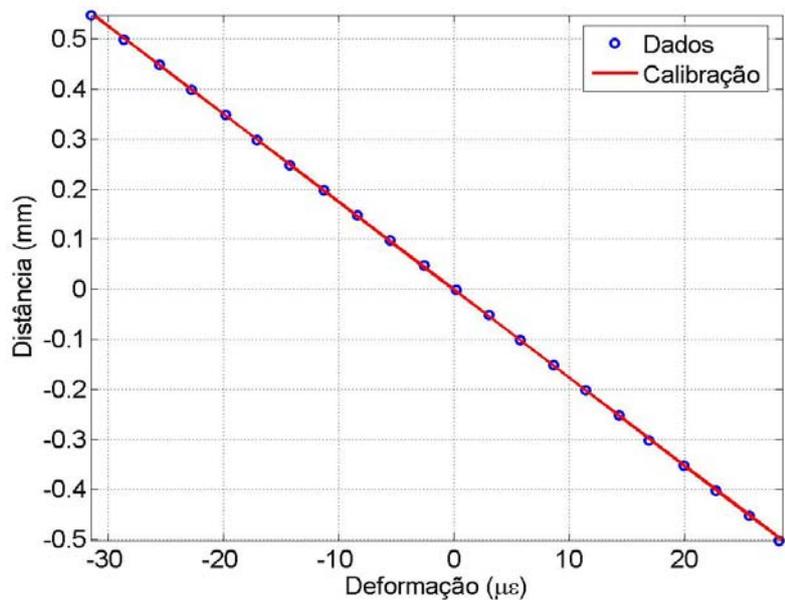


Figura 5.5: Curva de calibração do sensor de deslocamento.

O ajuste, linear para este caso, nos permite obter o deslocamento em função da deformação medida.

$$d(e) = -0.0175 e \quad (5.1)$$

Onde  $e$  é a deformação em  $\mu\epsilon$  medida pelo extensômetro e  $d$  é o deslocamento em milímetros que desejamos determinar. A incerteza média da curva de calibração é de aproximadamente  $3.3 \mu\text{m}$ , calculada pela expressão [28]:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N [d_i - d(\Delta l/l)]^2} \quad (5.2)$$

onde  $N$  é o número de medidas, que neste caso é de 22.

## 5.2. Comparação dos extensômetros

Inicialmente testou-se cada TX medindo a sua deformação ao aplicar um gradiente de campo provocado pelo ímã descrito no capítulo anterior. A distância máxima utilizada entre as faces do ímã e do cubóide foi de 20 mm, e a distância mínima foi de 2 mm, devido às restrições na montagem experimental.

As medidas foram feitas com strain gauge e com FBG observando uma semelhança nas medições como se apresenta na referência [25]. Tanto a rede como o strain gauge foram colados num mesmo cubóide a uma distância com relação a face que está mais próxima ao ímã de aproximadamente 4 mm. Comparou-se estas medidas e observou-se que as respostas eram praticamente as mesmas, como pode ser visto na Fig. 5.6 a medição com strain gauge foi feita utilizando uma média com 10 pontos e a medida com FBG foi feita com uma média de 3 pontos. Nestas condições a medida com strain gauge apresentou-se menos ruidosa que a medida utilizando a FBG.

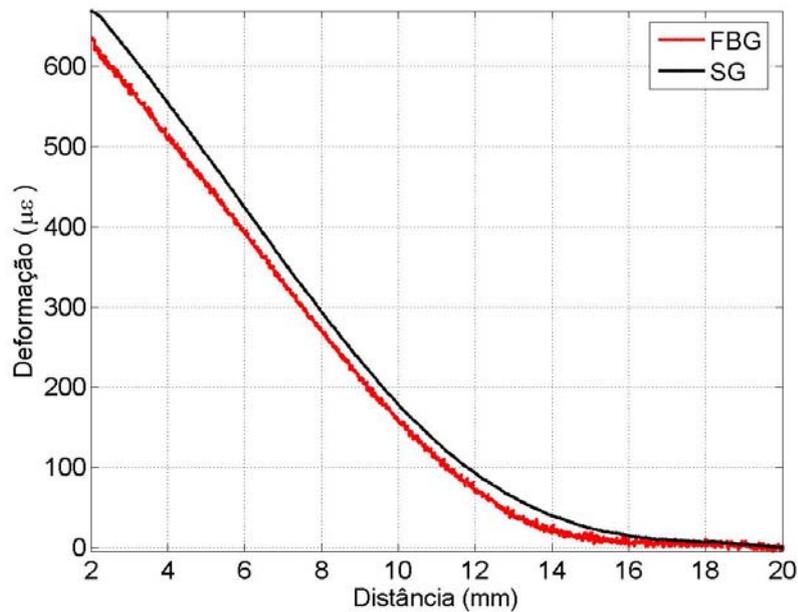


Figura 5.6: Rede de Bragg e Strain gauge coladas no cubóide 4x4x20 mm.

### 5.3. Desmagnetização prévia

Ao iniciar a medida o TX era desmagnetizado observando qual era a resposta. Notou-se uma variação do valor máximo da deformação nas mesmas condições de medida, para quando o procedimento de desmagnetização era repetido, isto acontecia ao utilizarmos um desmagnetizador do tipo usado para fitas cassete. Utilizou-se, depois um outro desmagnetizador que gerava um campo máximo de 0.03 T rms na região do cubóide, com o qual se constatou uma melhor reprodução das medições.

Explorou-se também o que acontecia com a deformação máxima sem desmagnetizar o cubóide, como está ilustrado na Fig. 5.7 para as situações de desmagnetizado (D) e sem desmagnetizar (SD). Observou-se que o valor máximo da deformação e a faixa linear diminuíam para o segundo caso. Contudo, pode ser notado também que a inclinação da parte linear, ou seja, a sensibilidade do sensor nos dois casos é semelhante.

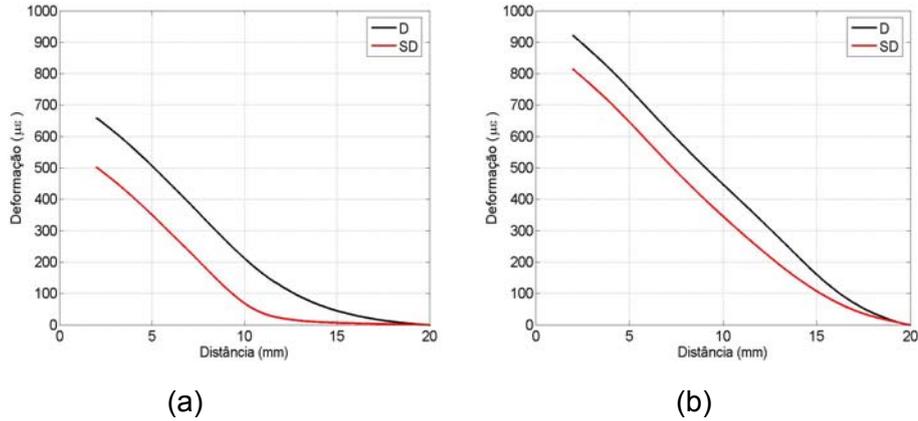


Figura 5.7: Cubóides desmagnetizados(D), e sem desmagnetizar (S.D). (a) TX de geometria 4x4x10, (b) TX de geometria 2x2x10.

No caso do TX 4x4x10 mm desmagnetizado a sensibilidade é de  $57.4 \mu\text{e}/\text{mm}$  e sem desmagnetizar de  $57.0 \mu\text{e}/\text{mm}$ . Note que a diferença entre as sensibilidades é mínima. No caso do TX de geometria 2x2x10 mm sem desmagnetizar a sensibilidade é  $63.0 \mu\text{e}/\text{mm}$ , no caso desmagnetizado a sensibilidade é de  $62.1 \mu\text{e}/\text{mm}$ . Optou-se, portanto em não desmagnetizar os cubóides antes de cada medida. A não utilização deste procedimento simplificaria em muito a utilização em campo do sensor.

#### 5.4. Histerese

Devido às características ferromagnéticas do GMM ele apresenta uma histerese na sua deformação para quando o cursor se aproxima e quando ele se afasta do cubóide. Denominou-se ida para o trajeto quando o ímã se aproxima do cubóide, e volta para quando o ímã se afasta deste. Nestas duas situações verificou-se uma variação da sensibilidade, como exemplo o caso do TX 4x4x10 mm a sensibilidade diminuiu 5% para a volta com relação ao percurso de ida. Ou seja, com este cubóide o sensor é um pouco mais sensível para um deslocamento que leva a uma aproximação do que para um deslocamento que resulta em um afastamento.

A Fig. 5.8 apresenta o comportamento dos percursos de ida e volta para distintos cubóides de diferente geometria, nos quais encontrou-se uma diferença no maior de 10% na sensibilidade no percurso de volta com relação á trajetória de ida.

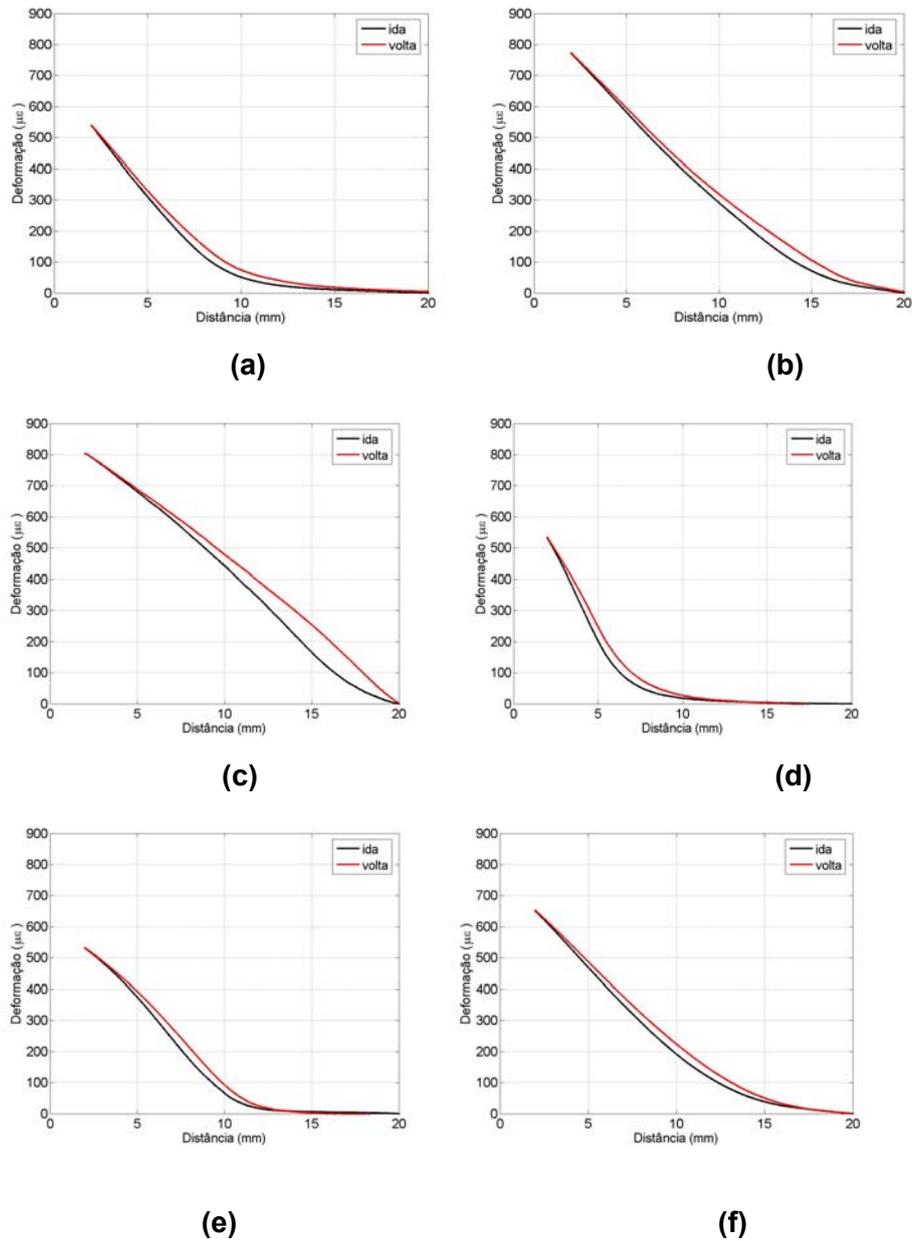


Figura 5.8: (a) TX de geometria 2x2x3 mm, (b) 2x2x6 mm, (c) 2x2x10 mm, (d) 4x4x mm, (e) 4x4x10 mm, (f) 4x4x20 mm.

Tendo em conta a finalidade do sensor foi analisada a histerese para o cubóide 2x2x10 mm na faixa de 1 mm em torno da distância de 5 mm com passo de 50 µm como se apresenta na figura 5.9; no percurso de ida a sensibilidade é de 57.0 µε/mm e na volta a sensibilidade é de 57.2 µε/mm e resolução por µε de 17.4 µm.

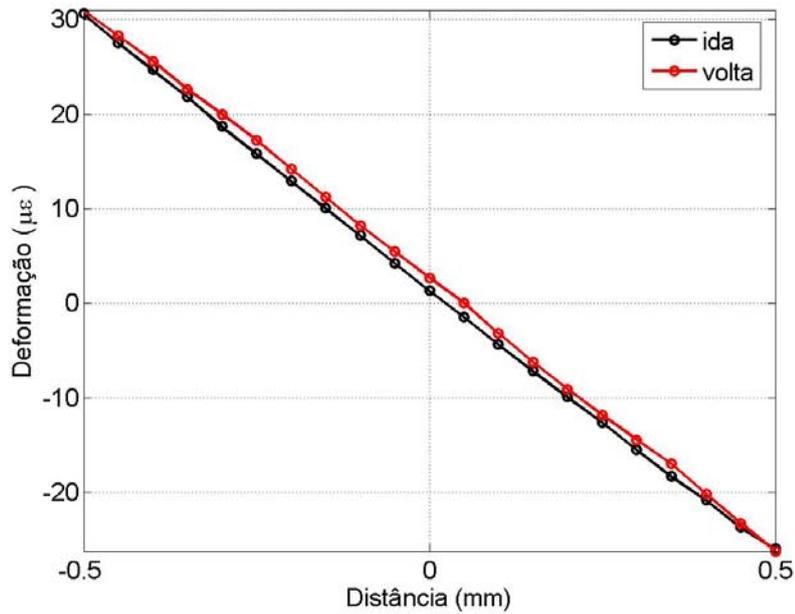


Figura 5.9: Histerese na faixa de 1mm para o cubóide 2x2x10 mm.

### 5.5. Polarização

Em algumas situações pode ser vantajosa a colocação de um segundo ímã menor, junto ao cubóide fixo com o fim de deslocar o ponto de operação do sensor para uma posição de maior sensibilidade para a mesma distância ao elemento cursor [21]. A colocação deste ímã foi chamada de polarização. Como se observa na Fig. 5.10 o ímã que produz o gradiente de campo move-se com relação ao conjunto do GMM e o ímã de polarização; cada ímã foi colocado no eixo central com relação ao cubóide. Para observar o efeito da polarização em cada cubóide testou-se com dois ímãs permanentes cilíndricos de NdFeB, o primeiro com diâmetro de 3.3 mm e comprimento de 1.6 mm que produz um campo de 100 mT na sua face, o segundo ímã de 3.1 mm de diâmetro e 2.5 mm de comprimento com um campo de 90 mT na sua face.

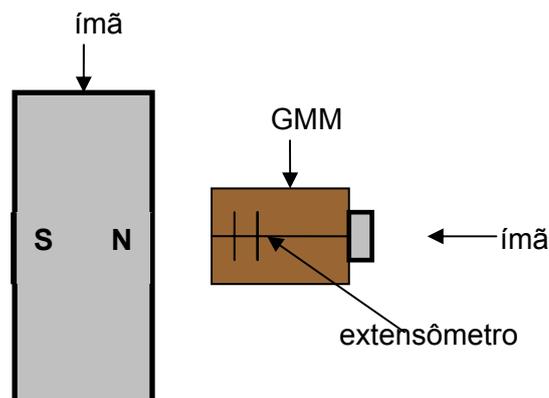


Figura 5.10: Representação esquemática da polarização.

Para a geometria de TX 4x4x10 mm na Fig. 5.11, o primeiro ímã produz uma polarização P1 obtendo-se uma sensibilidade de 61.5  $\mu\epsilon/\text{mm}$ . O segundo ímã aplicou a polarização P2 levando a uma sensibilidade igual a 68.0  $\mu\epsilon/\text{mm}$ . Nota-se que a colocação dos dois ímãs de polarização causam uma variação no valor da deformação máxima e na sensibilidade em relação à medida sem polarizar. A sensibilidade teve um aumento de cerca de 10% para P1 e 20% para P2, mas a faixa dinâmica ficou a mesma, aproximadamente 4 mm nos três casos.

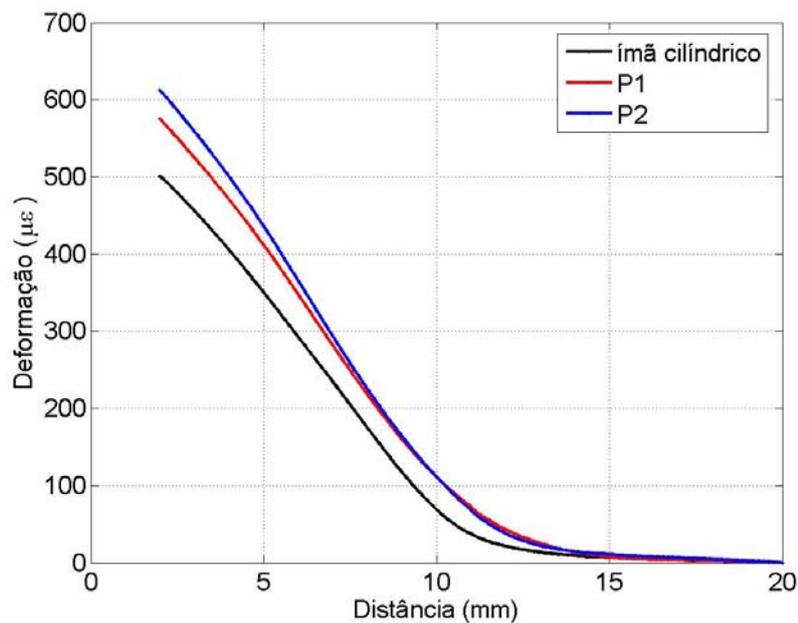


Figura 5.11: Cubóide com duas polarizações diferentes.

Para a otimização do valor do campo de polarização teríamos que colocar um ímã maior e com uma distância variável ao cubóide que seria ajustada conforme cada caso.

## 5.6. Tensão compressiva

Aplicou-se também uma pressão de tensão compressiva no cubóide 4x4x10 mm. A pressão compressiva foi aplicada ao longo da sua direção longitudinal. Para este caso o cubóide foi desmagnetizado antes de aplicar a pressão. A mola utilizada tem 37 mm de comprimento a qual quando comprimida de 3.8 mm produz uma força no cubóide de aproximadamente 13 N, realizando

uma pressão de aproximadamente 0.8 MPa. A Fig. 5.12 ilustra a montagem utilizada neste teste, no qual o cubóide e a mola estão presos entre duas laminas de acrílico.

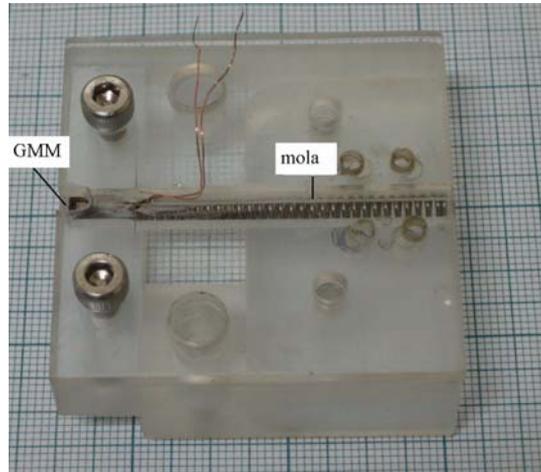


Figura 5.12. tensão compressiva sobre um cubóide de GMM.

Na Fig. 5.13 pode-se notar que ao aplicar a pressão compressora temos um aumento na deformação máxima, estes resultados são observados igualmente em [25,26]. A sensibilidade também aumentou de  $57 \mu\epsilon/\text{mm}$  para  $97 \mu\epsilon/\text{mm}$ , quer dizer um incremento de 70% com relação a sensibilidade sem pressão; a faixa dinâmica somente foi aumentada de aproximadamente 5%.

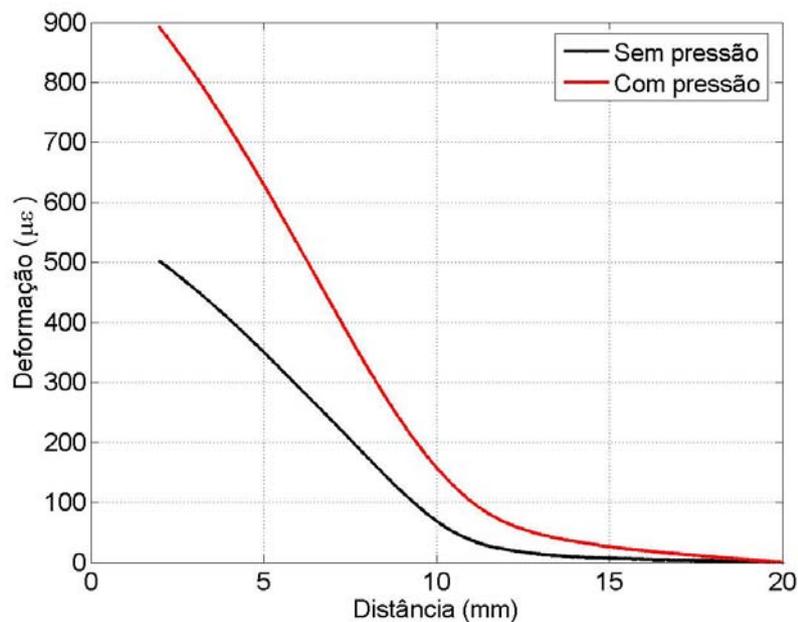


Figura 5.13: TX 4x4x10 mm no qual se aplica uma pressão compressiva.

## 5.7. Variação da geometria do ímã

Testou-se a mesma montagem colocando um outro ímã permanente de NdFeB de forma retangular com dimensões 40x20x10 mm, que produz um campo de 0.3 T na sua face. A Fig. 5.14 apresenta o comportamento deste ímã com relação ao ímã cilíndrico. Para a distância de 5 mm os gradientes de campo gerados pelos ímãs cilíndrico e retangular são semelhantes, tendo uma variação mais acentuada quanto a distância aumenta. Assim a 20 mm de distância o gradiente de campo gerado pelo ímã cilíndrico é de 35 mT/mm enquanto o gerado pela ímã retangular é de 50 mT/mm. Note que estes gradientes se dão entre valores de campos diferentes, ou seja o sensor vai estar num ponto de operação diferente.

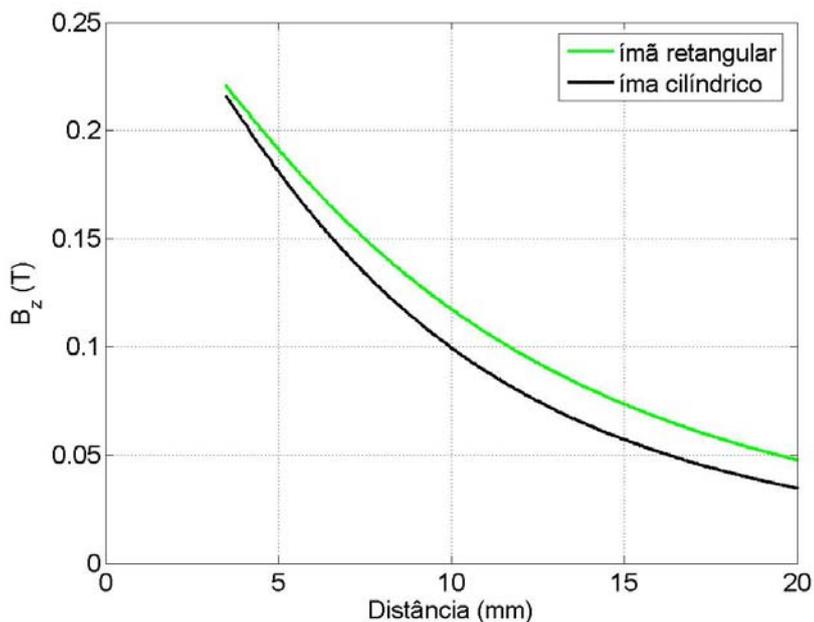


Figura 5.14: Em verde campo gerado pelo ímã retangular, em preto campo gerado pelo ímã cilíndrico.

Fazendo o teste com o ímã retangular, para o caso do TX 4x4x10 mm a sensibilidade medida foi de  $72.6 \mu\epsilon/\text{mm}$ . Com esta geometria se obtém um aumento na sensibilidade de aproximadamente 30%. O valor da deformação máxima aumentou em  $370 \mu\epsilon$  como pode se ver na Fig. 5.15. A faixa dinâmica aumentou-se de 4 mm para 8 mm, ou seja com esta geometria a faixa dinâmica aumenta 50% com relação a o ímã cilíndrico.

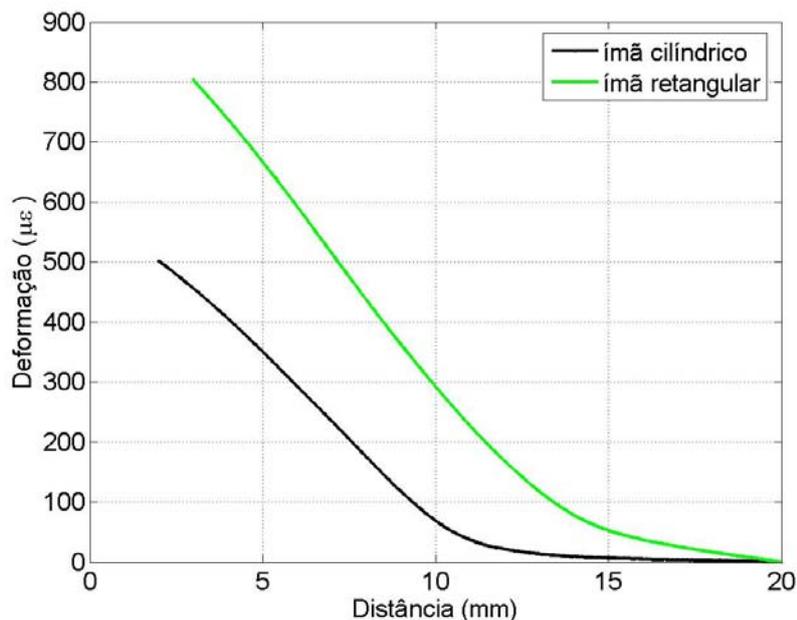


Figura 5.15: Variação da deformação com a distancia para um gradiente de campo produzido por um ímã retangular.

A Figura 5.16 apresenta para o mesmo cubóide com as mesmas condições, o que acontece para o TX 4x4x10 mm, quando a geometria do ímã cursor é alterada, quando foi aplicada polarização e pressão. Em termos de sensibilidade o maior efeito está na aplicação de pressão no GMM, embora o efeito do gradiente e da polarização tenham se mostrado interessantes. A aplicação da pressão tem a desvantagem da necessidade uma montagem mais complexa e mais robusta para o cubóide GMM.

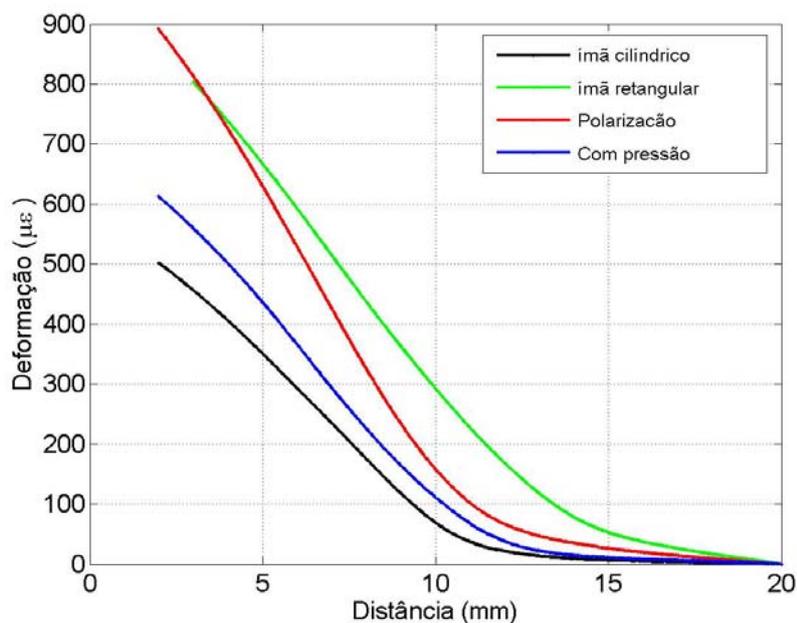


Figura 5.16: Variações do comportamento do cubóide com relação a polarização, gradiente de campo e pressão.

## 5.8. Comportamento das geometrias do TX

Ao fazer os testes com vários cubóides da mesma geometria observou-se que o valor da deformação máxima e a sensibilidade variavam. A Fig. 5.17 mostra a deformação de 10 cubóides de geometria 2x2x6 mm onde o valor máximo da deformação varia numa faixa de 593  $\mu\epsilon$  até 946  $\mu\epsilon$  e a sensibilidade varia de 55  $\mu\epsilon/\text{mm}$  até 69  $\mu\epsilon/\text{mm}$ .

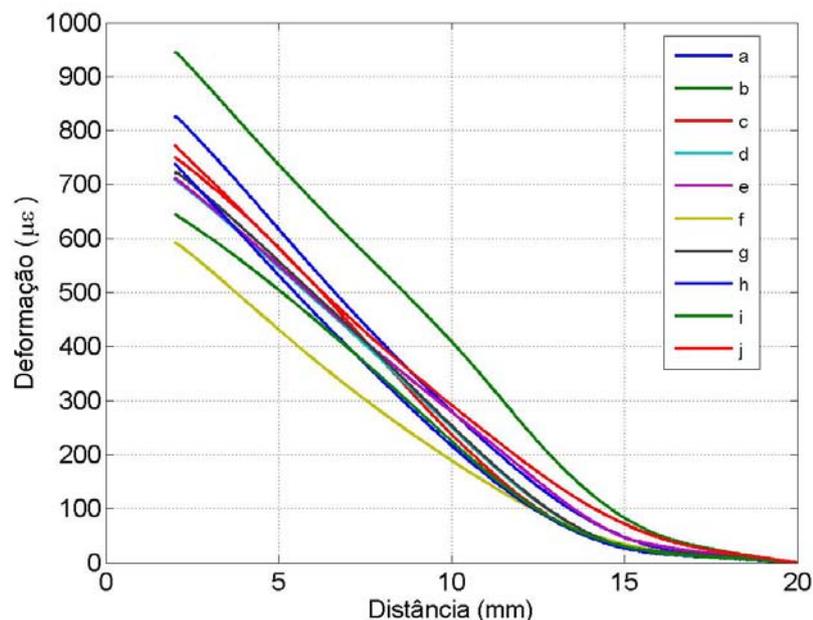


Figura 5.17: Comportamento de diferentes cubóides da geometria 2x2x6 mm.

Como se observa na figura anterior as 10 curvas apresentam respostas bem variadas. Contudo, a faixa dinâmica do sensor para os cubóides testados tem uma variação de 3 mm aproximadamente.

Na tabela 5.1 está resumido o comportamento das diferentes geometrias de cada cubóide aplicando o gradiente de campo com o ímã cilíndrico. O melhor caso de acordo com a caracterização significa que o cubóide apresentou o maior valor da deformação máxima. Na tabela 5.2 é mostrado o comportamento para o pior caso, de acordo com o critério anterior.

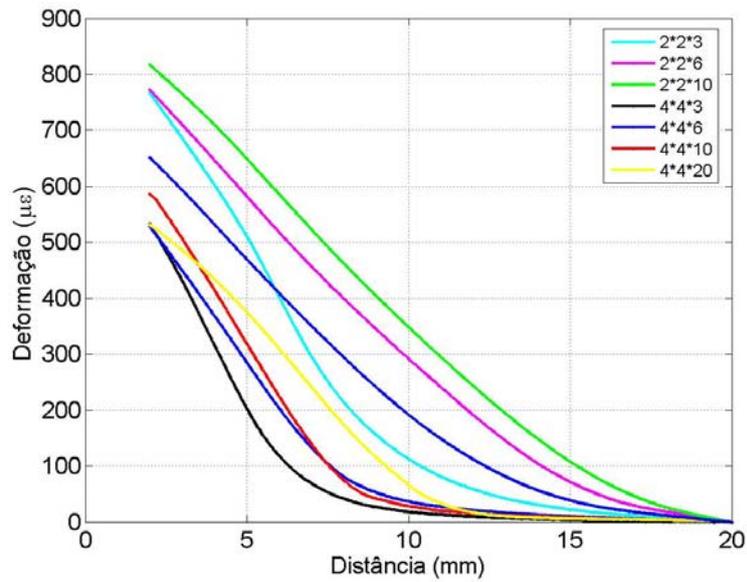
Tabela 5.1: Comportamento do melhor caso para cada geometria de GMM de acordo com a caracterização.

| <b>Geometria</b> | <b>Sensibilidade<br/>(<math>\mu\epsilon/\text{mm}</math>)</b> | <b>Faixa<br/>dinâmica<br/>(mm)</b> | <b>Resolução<br/>(<math>\mu\text{m}</math>)</b> |
|------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>2x2x3</b>     | <b>100</b>                                                    | <b>3.0--6.0</b>                    | <b>10</b>                                       |
| <b>2x2x6</b>     | <b>65</b>                                                     | <b>2.5- 9.0</b>                    | <b>15</b>                                       |
| <b>2x2x10</b>    | <b>62</b>                                                     | <b>3.0- 10</b>                     | <b>16</b>                                       |
| <b>4x4x3</b>     | <b>103</b>                                                    | <b>4.5- 5.5</b>                    | <b>9</b>                                        |
| <b>4x4x6</b>     | <b>95</b>                                                     | <b>2.5- 6.0</b>                    | <b>10</b>                                       |
| <b>4x4x10</b>    | <b>62</b>                                                     | <b>4.0- 7.0</b>                    | <b>16</b>                                       |
| <b>4x4x20</b>    | <b>58</b>                                                     | <b>3.0- 8.0</b>                    | <b>17</b>                                       |

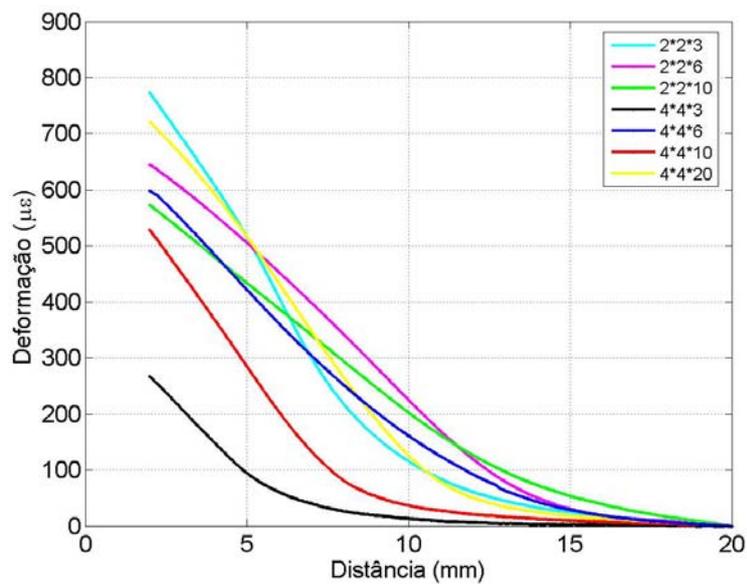
Tabela 5.2: Comportamento do pior caso para cada geometria de GMM de acordo com a caracterização.

| <b>Geometria</b> | <b>Sensibilidade<br/>(<math>\mu\epsilon/\text{mm}</math>)</b> | <b>Faixa<br/>dinâmica<br/>(mm)</b> | <b>Resolução<br/>(<math>\mu\text{m}</math>)</b> |
|------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>2x2x3</b>     | <b>76</b>                                                     | <b>3.0-6.0</b>                     | <b>13</b>                                       |
| <b>2x2x6</b>     | <b>50</b>                                                     | <b>2.5-9.0</b>                     | <b>20</b>                                       |
| <b>2x2x10</b>    | <b>47</b>                                                     | <b>3.0-10</b>                      | <b>25</b>                                       |
| <b>4x4x3</b>     | <b>45</b>                                                     | <b>4.5-5.5</b>                     | <b>20</b>                                       |
| <b>4x4x6</b>     | <b>82</b>                                                     | <b>2.5-6.0</b>                     | <b>12</b>                                       |
| <b>4x4x10</b>    | <b>86</b>                                                     | <b>4.0-7.0</b>                     | <b>11</b>                                       |
| <b>4x4x20</b>    | <b>62</b>                                                     | <b>3.0-8.0</b>                     | <b>16</b>                                       |

As Figuras 5.18 (a) e (b) mostram as curvas das diferentes geometrias mostradas nas tabelas anteriores para o melhor e o pior caso. Observa-se que cada cubóide diferente, apresenta uma faixa de baixa deformação o mesmo acontece para a sensibilidade e deformação máxima. Não foi usada compressão, polarização e o ímã utilizado foi o cilíndrico.



(a)



(b)

Figura 5.18: Curvas dos cubóides de diferentes geometrias para: (a) caso de maior resposta, (b) caso de menor resposta.

Na Fig. 5.18 (a) note que os cubóides de menor comprimento tem as maiores sensibilidades ( $100 \mu\epsilon/\text{mm}$ ), mas as menores faixas dinâmicas, significando só podem ser utilizados nestas condições a até aproximadamente 5 mm do cursor; já os cubóides mais longos tem a sensibilidade reduzida mas podem ser utilizados à distancias maiores.

## 5.9 Magnetostricção localizada

Finalmente, para se determinar o efeito do gradiente do campo no cubóide foram colados extensômetros em diferentes regiões. Não se sabia se o cubóide experimentava como um todo uma deformação média ou se cada região do cubóide ao longo do gradiente de campo se deformava localmente. Neste teste foi colada uma única fibra óptica com 3 redes de Bragg nas distancias de 4 mm, 10 mm e 16 mm com relação à face do cubóide mais perto do ímã sensor. Os cubóides utilizados foram de geometrias 4x4x20 mm e 2x2x20 mm. A figura 5.19 mostra o espectro das 3 FBGs coladas no cubóide de 4x4x20 mm.

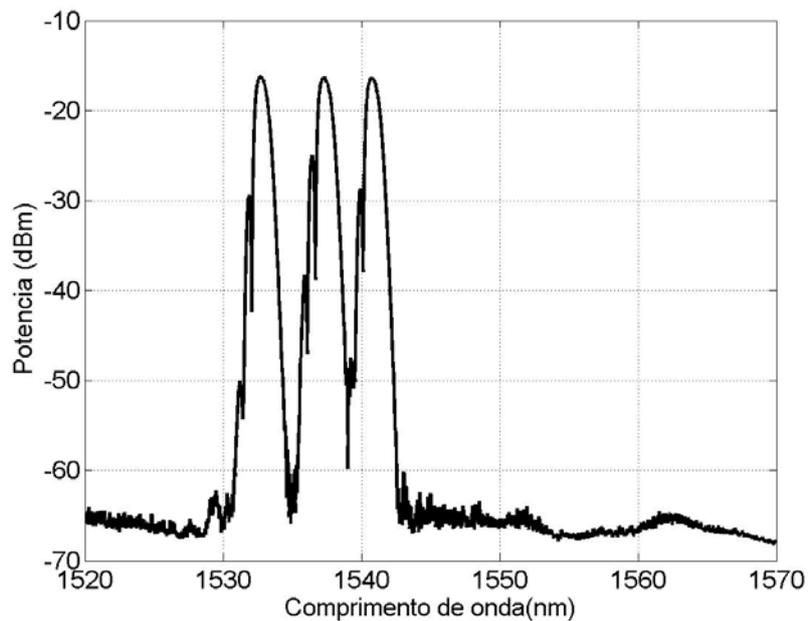
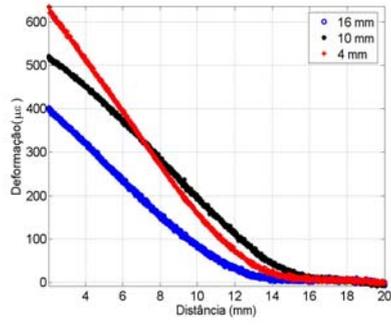
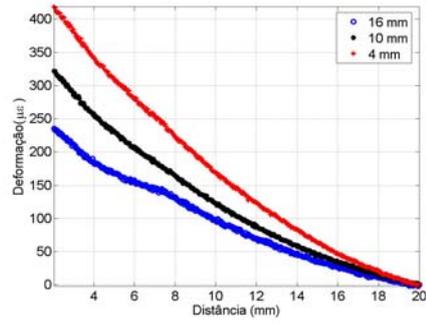


Figura 5.19: Espectro de três redes coladas no cubóide de 4x4x20 mm.

Nas figuras 5.20 (a) e (b) podemos observar que o comportamento nas diferentes regiões do cubóide é similar, apresentam uma queda abrupta na curva entre 12 e 14 mm aproximadamente nas três regiões. Entretanto, a sensibilidade e a deformação máxima variam de forma importante, mostrando que o gradiente de campo tem um efeito localizado em cada região do cubóide.



(a)



(b)

Figura 5.20: Redes coladas a diferentes distancias para (a) TX 2x2x20 mm, (b) 4x4x20 mm.

Note que o cubóide mais fino tem uma região de baixa deformação muito menor que o outro.

## 6

### Conclusões e perspectivas

Nesta dissertação propomos um novo tipo de sensor de deslocamento baseado em materiais com magnetostricção gigante, ímãs permanentes e extensômetros resistivos e à fibra óptica. A principal característica que diferencia este tipo de sensor de deslocamento dos outros já propostos é o fato do elemento cursor estar distante do elemento sensor. Este fato é importante quando a estrutura ou componente a ser monitorado tenha alguma restrição para o contacto direto com o cursor de um sensor deslocamento convencional. A distância entre cursor e sensor nas geometrias testadas chegou a 10 mm podendo ser ampliada. A resolução para este caso chegou a  $16 \mu\text{m}/\mu\epsilon$  podendo ser também diminuída. O menor deslocamento medido foi de  $10 \mu\text{m}$  com o cursor a 5 mm de distância do sensor. Estes resultados acima foram conseguidos em um gradiente de campo magnético de cerca de 20 mT/mm.

O sensor é muito simples de ser construído, tem em si um baixíssimo custo e no caso do extensômetro à fibra óptica, com uma única eletrônica de controle é possível monitorar centenas deles. Ele pode ter uma forma bem compacta ( $12 \text{ mm}^3$  a  $40 \text{ mm}^3$ ), sem levar em conta o ímã cursor, que também pode ser pequeno dependendo da distância requerida entre os dois. Estes aspectos facilitariam sua utilização em grandes quantidades para monitoramento de vários pontos em uma estrutura.

As propriedades de deformação dos cubóides com magnetostricção gigante foram estudadas e se observou uma grande variação delas para cubóides de mesma geometria, mesmo fabricante e mesmo lote. Isto acarretará um procedimento de calibração para cada sensor construído. Foi observado que a histerese magnética e conseqüentemente de deformação não foi um fator importante para a sensibilidade do sensor. Utilizando cubóides mais longos (20 mm) foi observado que a deformação ocorre localmente ao longo do cubóide quando exposto a um gradiente de campo magnético, isto implicará em um cuidado maior no posicionamento do extensômetro no cubóide.

De forma nenhuma se procurou esgotar as formas de se otimizar o sensor. Foram apontados caminhos, com resultados promissores, com relação à utilização de um segundo ímã para colocar o sensor em um ponto de operação

de maior sensibilidade e com a utilização do sensor com o cubóide sob pressão para maximizar sua deformação. Contudo buscou-se sempre manter simplicidade de construção na solução final encontrada. O mesmo podemos dizer com relação ao ímã cursor.

Em termos dos limites de resolução que este sensor pode alcançar, temos que, de acordo com a caracterização magnética obtida das várias geometrias testadas, pode-se estimar que para o mesmo gradiente de campo magnético utilizado, da ordem de 20 mT/mm, uma deformação máxima de 400  $\mu\epsilon$  poderia ser obtida para um determinado ponto de operação da curva característica do sensor. Se este ponto de operação puder ser alcançado, através de uma configuração mais complexa de ímãs, isto significará uma resolução máxima de 2,5  $\mu\text{m}/\mu\epsilon$ . Alterando-se o gradiente de campo poderemos aumentar também a resolução. Configurações de ímãs permanentes gerando um gradiente de campo magnético mais intenso podem ser encontradas na área de geradores e rotores eletromagnéticos. Os mancais utilizados nestes geradores [27] têm geometria compatível para serem utilizados como cursor e geram gradientes de campo até 3 vezes mais intensos. A utilização destas configurações poderia levar a resoluções de até 0,7  $\mu\text{m}/\mu\epsilon$ .

## Referências bibliográficas

- [1] SINCLAIR,I. **Sensors and transducers**. 2ed. Boston. U. Science Books, Salsalito,CA,1982.305p.
- [2] SECO,F. et al. A high accuracy magnetostrictive linear position sensor, **Sensor and actuators**, v.123, p. 216-223, agosto 2005.
- [3] HEALEY.G.W;, MEYDAN,T. Linear Variable differential transformer (LVDT): linear displacement transducer utilizing ferromagnetic amorphous metallic glass ribbons. **Sensors and actuors**. V.30, p.582-587. 1992.
- [4] HRISTOFOROU,E. et al. On the calibration of position sensors based on magnetic delay lines. **Sensors and actuors**. v.59, p.89-93.1997.
- [5] KARAGIANNIS,V; MANASIS,C; BARGIOTAS,D. Position sensors based on the delay line principle. **Sensors and actuors**. v.106, p.183-186. 2003.
- [6] CHIRIAC,H; MARINESCU,C.S. New position sensor based on ultraacoustic standing waves in FeSiB amorphous wires. **Sensors and actuators**, v.81, p.174-175. 2000.
- [7] HANDLEY,R. **Modern magnetic materials. Principles and applications**.New York, Jhon Wiley & Sons, Inc, 2000.740p.
- [8] CRAIK, D. **Magnetism, principles and aaplications**. New York, Jhon Wiley & Sons, Inc,1995.459p.
- [9] CALKINS,F.T; FLATAU,A.B. 15th National Conference on Noise Control Engineering, Iowa State University.1997. Disponível em <http://www.aerosmart.umd.edu/TechPubs/calkins>. Acesso em 20 de mar. 2006.
- [10] BOHN, F. Magnetostricção e ruído Barkhausen em aços elétricos de grão não-orientado. Santa Maria. 2005. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria.
- [11] ASSIS.B.G. Caracterização de ímãs por meio da visualização dos domínios magnéticos. **Revista Brasileira de Física**, vol.20, n2, junho. 1998.
- [12] CHEN,D.X, SANCHEZ,A. Demagnetizing factors for rectangular prism. **IEEE Transacations on magnetics**, vol.41, n.6, junho. 2005.
- [13] CRAIK, D.J. Demagnetizing fields in uniformly magnetized retangular prismatic crystals. **Journal appy.Phys**, v.18.1967.

- [14] [33] DAPINO, J. On magnetostrictive materials and their use in smart materialas transducers.. <http://www.mecheng.osu.edu/~dapino/article.pdf>. Acesso em 25 de abr. 2006
- [15] ENGBAHL, G. **Handbook of Giant Magnetostrictive Materials**. San Diego, Academic Press, 2000. 386p.
- [16] ETREMA, Products, ing, <http://www.etrema-usa.com>. Acesso em 7 de jun.2006.
- [17] SOSHIN, C. **Physics of magnetism**. 2.ed. New York. Jhon Wiley & Sons, Inc, 1964. 554p.
- [18] TX-GMM, Gansu Tianxing Rare Earth Functional Materials Co. Ltd., <http://www.txre.net>. Acesso em 13 de mai. 2006.
- [19] MORA, J. et al. A magnetostrictive sensor interrogated by fiber Gratings for DC-current and temperature discrimination. **IEE photonics tecnology letters**, v,12. n.12, dezembro 2000.
- [20] MOORE, J; ENNIS, M.G. Design of a Terfenol-D based Fiber-optic current transducer. **IEEE Sensors Journal**, v.5, n.5, outubro. 2005.
- [21] CARVALHO, H.R. et al. Remote magnetostrictive position sensors interrogated by fiber Bragg gratings. **Sensors and actuators**, v.135, p.141-145, março. 2007.
- [22] OTHONS, A, KALLY, K. **Fiber Bragg Grattings, Fundamentals and applications in telecommunications and sensing**. Boston. Artech House Publishers. 1999.
- [23] SECO, F. Hysteresis Compensation in a Magnetostrictive Linear Position sensor. **Sensors and actuators**, v.110, p.247-253. 2004.
- [24] National instruments. <http://www.ni.com>. Acesso em 7 de abr. 2006.
- [25] YAMAMOTO, K; NAKANO, H; YAMASHIRO, Y. Effect of compressive stress on hysteresis loss of Terfenol-D. **Journal of magnetism and magnetic materials**. V.255, p.222-224. 2003.
- [26] MOFFETT, M. et al. Characterization of Terfenol-D for magnetostrictive transducers. **J.Acoust.Soc.Am**, v.89, n.3, p.1448-1455, novembro. 1990.
- [27] YONNET, E.P. Permanent Magnet Bearings and Couplings. **IEEE Transacations on magnetics**, v.17, n.1, p.1169-1173, janerio 1981.
- [28] RIBEIRO, A; S. et al. Comparação entre extensômetro óptico e extensômetro elétrico. **Sociedade Brasileira de Metrologia**, Pernambuco-Brasil, setembro. 2003.
- [29] KITTEL, C. **Introduction to Solid State Physics**. 2ed. New York. Jhon Wiley & Sons, Inc, 1984. 808p.

- [30] TAYLOR,J. **An introduction to error analysis**.2ed.California. University Science Books.1997.327p.
- [31]REITZ,J,MILFORD,F,CHRISTHY,W, Fundamentos de la teoria electromagnetica. 4ed. Mexico. Addison-Wesley Iberoamericana,S.A.
- [32] BRINDLEY, K. **Sensors and transducers**. Great Britanian. Redwood Burn Ltda. 1988. 180p.
- [33] NUSSBAUM, A. Comportamento eletrônico e magnético dos materiais. São Paulo. Editora Edgar Blucher Ltda. 1973.160p.
- [34] CHAKRABORTY.S; TOMLINSON.G.R. An initial experimental investigation into the change in magnetic induction of a Terfenol-D rod to external stress. **Smarts materials and structures**. V.12, p.763-768., setembro. 2003.
- [35] DAPINO,M. et al. Statistical analysis of Terfenol-D material properties. **Journal of inteligent material systems and structures**, v.17,p.587-599, julho. 2006.
- [36] SATPATHI,D. et al. Design of a Terfenol-D based Fiber Optic current transducer. **IEE Sensors Journal**, v.5, n.5, outubro. 2005.
- [37] MILLER,M.M. et al. Novel absolute displacemet sensor utilizing giant magnetoressitance elements.**Journal of Appl.Physics**, v81, n.8, p.4284-4286, abril. 1997.
- [38] ZHOU,Y; SHIN,F.G; Modeling of magnetostriction in particulate composite materials. **IEE Transactions on magnetics**, v41, n.6, junho. 2005.
- [39] CAZO, R.M. et al. Sensor de deformação usando grades de Bragg, **Revista cientifica telecomunicaciones**, v.3,n.2, dezembro. 2000.
- [40]HRISTOFOROU,E; REILLY, E. Displacement sensors using soft magnetostrictive alloys. **EE Transactions on magnetics**, v.30, n.5, setembro. 1994.
- [41] AFFANI,A. et al. Design and Characterization of Magnetostrictive Linear Displacement Sensors. V.1, p.206-209, maio. 2004.
- [42]YAO, S.X. et al. A study on the wave generation principle of the magnetostrictive linear position sensor. **IEEE International Magnetics Conference**. 1999.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)