

### 3. Sensor magnetostrictivo maciço

Neste capítulo apresentamos o sensor de campo magnético magnetostrictivo utilizando Terfenol-D na forma maciça. É analisada sua resposta na presença de campos magnéticos uniformes e na presença de gradientes de campo.

#### 3.1. Medida da deformação

A magnetostricção pode ser medida através de métodos diretos que são aqueles onde a deformação é medida por meio de extensômetros que utilizam princípios elétricos ou ópticos. Quando se aplica um carregamento externo a um objeto, este pode produzir uma deformação longitudinal, uma compressão ou uma flexão. A forma comumente utilizada para quantificar a deformação é através da razão entre a variação do comprimento  $\Delta L$  e seu comprimento original  $L$ :

$$e = \frac{\Delta L}{L}, \quad (3-1)$$

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

#### 3.1.1. Redes de Bragg em fibras ópticas (FBG)

Uma rede de Bragg gravada em uma fibra óptica é formada por 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 valor proporcional do período de Bragg é refletido de volta. O comprimento de onda da luz refletida é dado por [23]:

$$\lambda_B = 2n\Lambda, \quad (3-2)$$

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

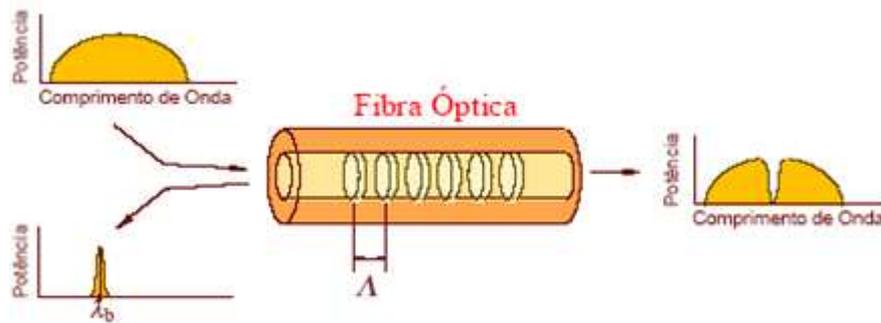


Figura 3-1. Comportamento da rede de Bragg, ao passar um feixe de luz, uma parte da luz é refletida e outra parte é transmitida.

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

$$\Delta\lambda_B = \left[ (1 - p_e) \frac{\Delta L}{L} + (\alpha_t + \alpha_n) \Delta T \right] \lambda_B, \quad (3-3)$$

onde  $\Delta L$  é a variação no comprimento imposta por algum agente externo,  $\Delta T$  é a mudança na temperatura,  $p_e$  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. O primeiro termo da equação (3-3) representa o efeito da deformação, e o segundo o efeito da temperatura na fibra óptica. Assumindo que a variação da temperatura pode ser compensada e utilizando parâmetros típicos para os coeficientes acima, a variação do comprimento de onda de Bragg refletido esperado para uma fibra ótica de germanosilicato é:

$$\Delta\lambda_B = 0,78(\Delta L/L)\lambda_B, \quad (3-4)$$

então, a deformação pode ser expressa como:

$$e = 1,28(\Delta\lambda_B/\lambda_B). \quad (3-5)$$

O princípio básico normalmente usado em sistemas de sensores à FBG é a monitoração da variação do comprimento de onda do sinal que retorna da rede de Bragg, que está relacionada com os parâmetros que se desejam medir (deslocamento, deformação, temperatura). A natureza da resposta das redes de Bragg faz com que estes extensômetros tenham uma capacidade auto-referenciável, necessitando de calibração uma só vez, além de poder ser utilizada a grandes distâncias da eletrônica de controle.

Nos últimos anos FBGs coladas à corpos de Terfenol-D têm sido usadas como sensores para detectar corrente elétrica e campo magnético. Sensores de campo magnético compostos da combinação de fibras ópticas com redes de Bragg e materiais magnetostrictivos tem como princípio de funcionamento a variação no comprimento do material magnetostrictivo na presença de um campo magnético para alterar o comprimento de onda da luz refletido pela FBG [12,13]. Em geral, para controle da variação da temperatura utiliza-se, uma FBG colada ao material magnetostrictivo, e uma segunda FBG como referência para temperatura. Assim ocorrendo variação da temperatura ela se manifestaria nas duas FBGs.

No sensor desenvolvido no presente trabalho e que será apresentado mais adiante, estudou-se a influência da geometria do material magnetostrictivo na sua resposta, utilizando só uma fibra óptica com rede de Bragg. Será mostrado ainda o efeito na resposta do sensor quando este está na presença de gradientes de campo magnético.

### **3.1.2. Strain gauge**

Em alguns casos as medidas de deformação foram feitas utilizando-se *strain gauges*. Os strain gauges são sensores que acusam variações de seu comprimento (alongamento ou encurtamento) através de variações da resistência elétrica. Quando um fio fino metálico é esticado, seu comprimento aumenta e sua seção transversal diminui. Ambos os efeitos tendem a alterar a resistência elétrica do fio. Os sensores de deformação elétricos, disponíveis comercialmente, consistem em um depósito de material semiconductor, sobre uma película isolante em formato sinuoso com o padrão de zig-zag. Na figura 3-2 está ilustrado o modelo do tipo de *strain gauge* utilizado neste trabalho.

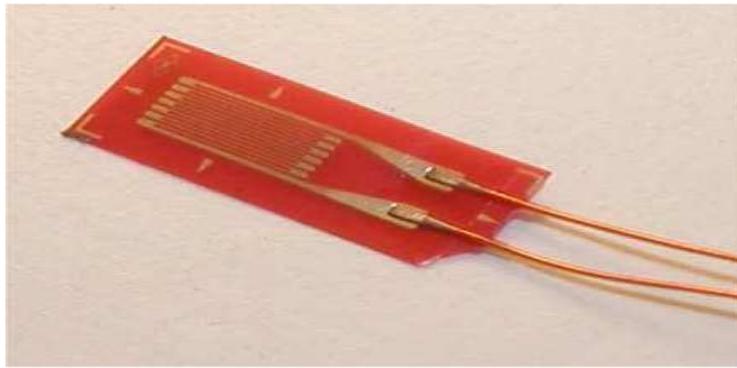


Figura 3-2. Modelo de *strain gauge* utilizado em este trabalho.

A medida da deformação utilizando *strain gauges* é dada razão entre a variação da sua resistência  $\Delta R/R$  e o chamado de *Gauge Factor (GF)*, que é um parâmetro fornecido pelo fabricante.

A deformação pode ser expressa como:

$$e = \left( \frac{\Delta R/R}{GF} \right). \quad (3-6)$$

De um modo geral, as variações  $\frac{\Delta R}{R}$  são transformadas em variações de tensão  $\Delta V$  através de dois tipos de circuitos: um circuito potenciométrico ou uma ponte de Wheatstone, que foi por nós utilizada.

### 3.2. Colagem dos extensômetros

Os extensômetros usados (*FBGs* e *Strain gauges*) foram colados paralelamente ao eixo principal de cubóides de GMM os quais foram inicialmente desmagnetizados como apresentamos na figura 3-3.

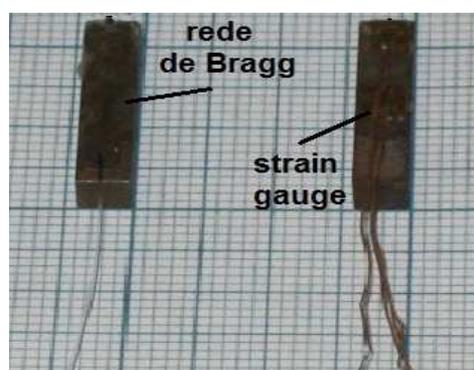


Figura 3-3. Extensômetros: *strain gauge* e rede de Bragg colados nos cubóides de Terfenol-D.

Para a colagem da fibra com redes de Bragg e do strain gauge o seguinte procedimento foi utilizado:

- Inicialmente as fibras com redes de Bragg foram clivadas.
- Utilizando uma máquina de emendas, a fibra com rede de Bragg foi unida à fibra dos cabos ópticos. A emenda é recoberta por um protetor de emenda.
- Em seguida, a peça de Terfenol-D é lixada. O GMM, a fibra e o strain gauge são limpados com álcool.
- Depois a região da fibra onde está inscrita a rede de Bragg ou o strain gauge são posicionados e colados sobre o GMM preso a um suporte de acrílico. Para garantir a colagem com Loctite 416 se fez pressão por uns minutos com mylar aluminizado.
- O conjunto foi deixado secar por aproximadamente 24 horas, antes de fazer as medições.

As medições do comprimento de onda da FBG foram realizadas usando o sistema de leitura sm125-200 da Micron Optics, com o Ethernet Remote Utility na versão 0.90. Este sistema tem uma resolução nominal de 10 pm. Ele faz uma emissão de radiação produzida por um laser sintonizável que varre o comprimento de onda na fibra óptica na faixa de 1520 nm a 1570 nm. Para as medidas com os strain gauges, o modelo 062BG produzido pela empresa Excel Sensors foi utilizado conectando-se à ponte de Wheatstone PXI-4220 da National Instruments. A resistência do strain gauge é de 350  $\Omega$ , fator gauge de  $2.1 \pm 0.05$  e dimensões para grelha de 2.03 mm x 1.57 mm. O comprimento das FBGs estava entre 1,5 mm a 2,0 mm.

### **3.3.**

#### **Resultados com campo magnético espacialmente uniforme**

Foram estudados cubóides de  $Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_{1,92}$  de nome comercial TX, fornecido pela Gansu Ltd. de diversas geometrias: área quadrada de 4x4 mm<sup>2</sup> e 2x2 mm<sup>2</sup> com 20 mm, 10 mm, 6 mm, e 3 mm de comprimento.

A medida da deformação do cubóide foi feita aplicando um campo magnético uniforme ao longo do lado de maior comprimento de cada cubóide como se apresenta na figura 3-4. Esta medida foi feita com o eletroímã da

GMW, modelo 3470 que produz um campo magnético aproximadamente constante na região entre os seus pólos. Posteriormente foi levantada a curva de deformação contra o campo magnético aplicado. Para o controle e registro da medição, foi usado um programa em Labview. 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 3-4. GMM posicionado entre os pólos do eletroímã para medir a resposta quando é aplicado um campo magnético uniforme.

Os cubóides foram desmagnetizados, utilizando o próprio eletroímã, através de sucessivas magnetizações de menor intensidade com polaridades invertidas. Para estudar a resposta dos cubóides quando é aplicado um campo magnético uniforme foram utilizados os *strain gages*, os quais foram colados no centro de cada cubóide.

De acordo com os resultados obtidos observou-se que a deformação ao aplicar um campo magnético varia notavelmente para cada geometria. A figura 3-5 mostra um exemplo das respostas para 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 para a geometria do GMM com  $4 \times 4 \text{ mm}^2$  de área na seção transversal e de 20 mm de comprimento pode-se ver que a faixa de baixa deformação é muito menor quando comparada com as outras geometrias da mesma seção transversal e diferente comprimento. Para o caso de cubóides com a área de

seção transversal  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  se observou de igual forma que na medida em que o comprimento aumenta a faixa de baixa deformação diminui e a deformação cresce.

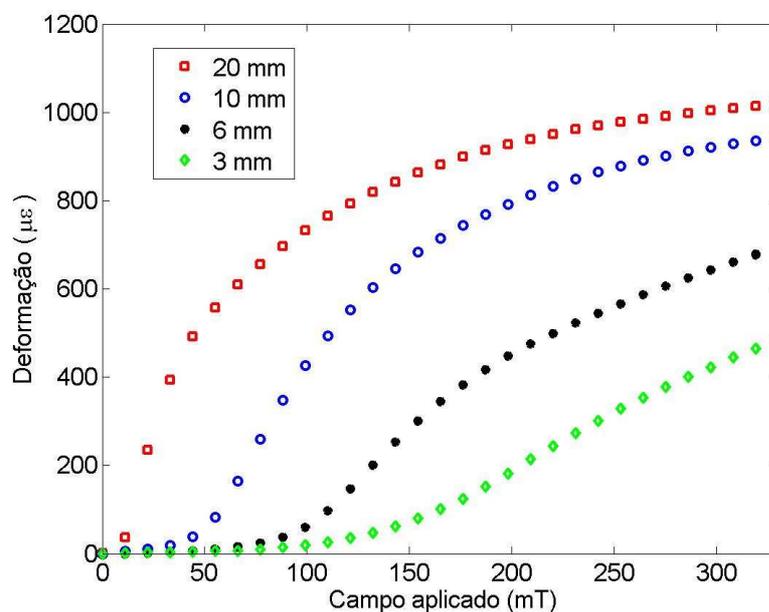


Figura 3-5. Resposta para diferentes cubóides com seção transversal  $4 \times 4 \text{ mm}^2$  e com comprimento variando de 3 mm até 20 mm.

Na figura 3-6 estão ilustradas as respostas de duas geometrias de cubóides, com o mesmo comprimento e diferentes seções transversais. Observa-se que para o GMM de  $4 \times 4 \times 6 \text{ mm}$  a faixa de baixa de deformação é maior com relação a do GMM  $2 \times 2 \times 6 \text{ mm}$ . No primeiro caso ela vai até cerca de 100 mT enquanto que no segundo caso ela vai até 50 mT. Nota-se também que a deformação máxima varia de  $692 \mu\text{s}$  no primeiro caso até  $856 \mu\text{s}$  no segundo caso, quando o campo magnético aplicado é de 330 mT. Este mesmo comportamento foi observado em todas as geometrias de cubóides com o mesmo comprimento e área quadrada de  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  e  $4 \times 4 \text{ mm}^2$ . Isto é, quando mais fino e longo o cubóide maior é a deformação para um mesmo campo magnético uniforme.

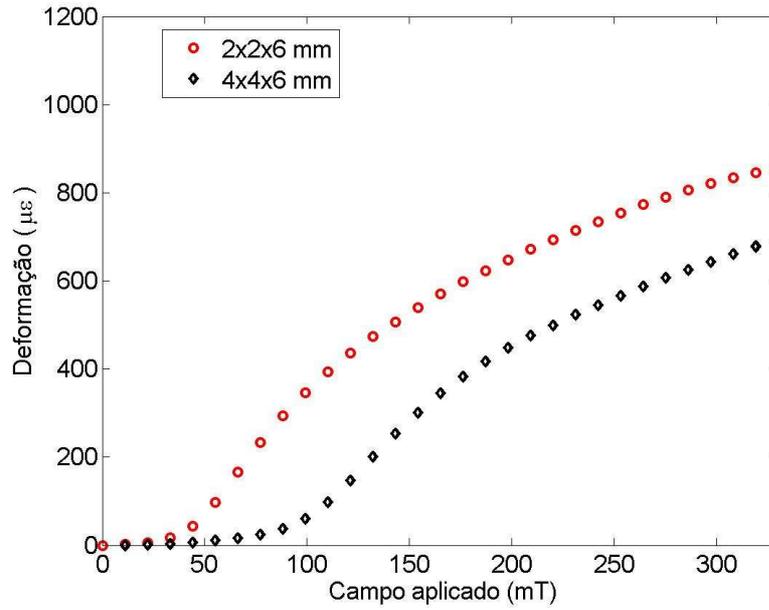


Figura 3-6. Resposta para dois cubóides com comprimento de 6 mm e seção transversal  $4 \times 4 \text{ mm}^2$  e  $2 \times 2 \text{ mm}^2$ .

Na figura 3-7 é mostrado que existe histerese na curva de variação da deformação em função do campo magnético aplicado. Nesta curva observa-se a histerese de um cubóide de  $4 \times 4 \times 20 \text{ mm}$ , comportamento característico do Terfenol-D [24].

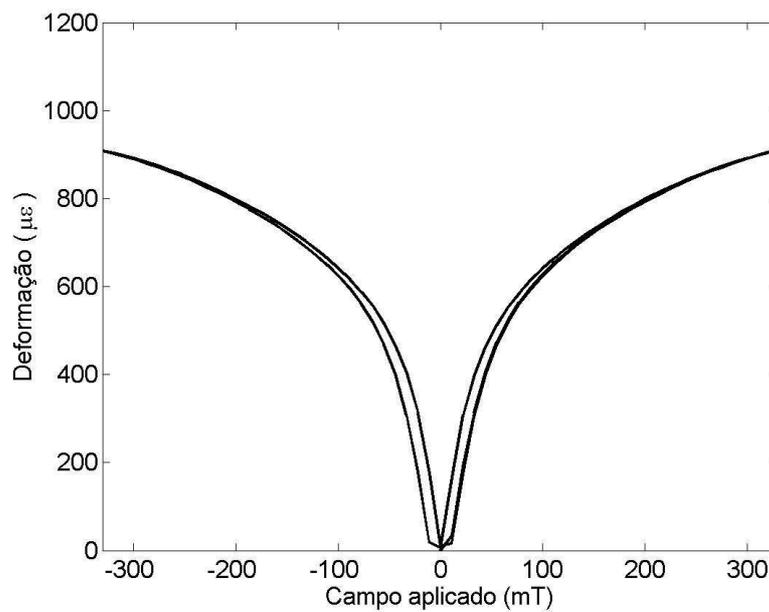


Figura 3-7. Variação da deformação de acordo ao campo magnético aplicado, mostrando a histerese do material.

O efeito observado anteriormente em relação à geometria pode ser explicado através do campo de desmagnetização presente no material magnetostrictivo. Quando é aplicado um campo magnético sobre um material ferromagnético, o material fica magnetizado. Ao longo da amostra, os momentos magnéticos, que podem ser considerados como pequenos ímãs interagem de tal forma que 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 tendendo a inverter os momentos de dipolo magnéticos vizinhos de forma a desmagnetizar o material. Este campo varia diretamente com a densidade de pólos na superfície do material. Em consequência a magnitude do campo total efetivo sobre o material magnetostrictivo não coincide com a magnitude do campo magnético aplicado. É necessário conhecer este efeito desmagnetizante para calcular o campo magnético efetivo  $H_{ef}$  no material, o qual é dado pela seguinte relação:

$$H_{ef} = H_a - H_d, \quad (3-7)$$

onde  $H_a$  é o campo aplicado e  $H_d$  o campo de desmagnetização.

Para uma amostra com geometria bem definida e magnetização uniforme, tal como o elipsóide, o campo de desmagnetização é dado por:

$$H_d = N_d M, \quad (3-8)$$

onde  $M$  é a magnetização e  $N_d$  é um fator que depende da geometria da amostra e só pode ser calculado teoricamente com exatidão para o caso do elipsóide. 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 o caso do cilindro e do cubóide, o campo de desmagnetização não é uniforme, a formação de pólos norte e sul tem lugar na superfície e no interior do material [25], isto incrementa o efeito do campo de desmagnetização e reduz o campo magnético efetivo no interior do material.

Diferentes modelos são encontrados na literatura para se lidar com o campo de desmagnetização nestas geometrias, No trabalho de M. Sato [26] são apresentadas expressões simples e aproximadas dos fatores de

desmagnetização de cubóides considerados como magnetizados uniformemente ao longo da face mais comprida. Definiremos  $q$  como a razão entre o comprimento do cubóide e um dos lados da sua face ( $m/l$ ). Veja a figura 3-8.

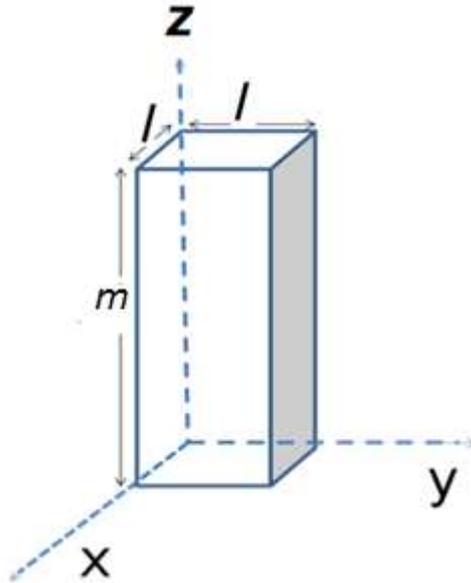


Figura 3-8. Campo de desmagnetização para um cubóide.

Quando o cubóide é magnetizado uniformemente na direção do eixo  $z$ , o fator de desmagnetização deste cubóide na direção do eixo  $z$  é proporcional a  $1/m$ , podemos escrever então  $N_z = c/m$ , quando o cubóide é magnetizado uniformemente no eixo  $x$  ou  $y$  então  $N_x = N_y = c/l$ . A constante  $c$  é determinada pela relação dos fatores de desmagnetização  $N_x, N_y$  e  $N_z$ , como se mostra na equação a seguir:

$$N_x + N_y + N_z = 1. \quad (3-9)$$

Substituindo e reorganizando 3-9 se obtém  $c$ :

$$c = \frac{m}{2q+1}. \quad (3-10)$$

Substituindo em  $N_x$  e  $N_y$ :

$$N_x = N_y = \frac{q}{2q+1}. \quad (3-11)$$

Para  $N_z$  então obtém-se:

$$N_z = \frac{1}{2q+1}. \quad (3-12)$$

Estes são os fatores de desmagnetização do cubóide correspondentes a cada eixo do volume.

Vamos analisar os resultados obtidos na figura 3-5. Para os cubóides de seção transversal  $4 \times 4 \text{ mm}^2$ . Os valores de  $q$  utilizados foram 5,0, 2,5, 1,5 e 0,75. Como descrito na literatura [25] o fator de desmagnetização não é constante, varia ao longo do cubóide. Além disso, foi determinado experimentalmente que o fator de desmagnetização varia com a susceptibilidade do material [27]. O cubóide estará magnetizado uniformemente quando estiver completamente saturado, neste caso poderia ser levado em conta o efeito do campo de desmagnetização usando a equação 3-8. Para o cubóide de comprimento 10 mm e  $q=2,5$ , o fator de desmagnetização  $N_z$  está na direção paralela ao campo aplicado e pode ser aproximado pela equação 3-12. Neste caso  $N_z=0,16$ . Para um campo aplicado de 330 mT usando o valor do fator de magnetização de saturação do Terfenol-D,  $M_s=8 \times 10^5 \text{ (A/m)}$  [28] pode-se estimar o campo efetivo para este cubóide de  $H_{eff}=162 \text{ mT}$ . Para este valor de campo de acordo com a figura (3-5) o cubóide de comprimento 20 mm, que teria um campo de desmagnetização pequeno ( $q=5$ ), apresenta uma variação de deformação de  $940 \mu\epsilon$  que é um valor próximo ao valor apresentado pelo cubóide de comprimento 10 mm a 330 mT ( $856 \mu\epsilon$ ). Isto indica que a deformação obtida em cubóides curtos tem valor próximo ao obtido em cubóides com comprimento maior para valores menores de campo aplicado de acordo com a equação 3-12. Observa-se que ao repetir este cálculo para campos menores que o campo de saturação, a correção estabelecida já não é válida, pois um valor único de fator de desmagnetização não pode ser utilizado.

Definiremos a sensibilidade do sensor como a razão entre a variação média da deformação pelo campo aplicado médio correspondente. A máxima sensibilidade medida nos cubóides testados foi  $18 \mu\epsilon/\text{mT}$  que corresponde ao cubóide com  $q=5,0$  para um campo médio de 15 mT. As sensibilidades encontradas na literatura são de  $21 \mu\epsilon/\text{mT}$  [29] para um cilindro de 6 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento ( $q=16,7$ ) e  $12 \mu\epsilon/\text{mT}$  [12], para um com 20 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento ( $q=7,5$ ). A tabela 3-1 resume os resultados encontrados.

Tabela 3-1. Resposta em função da geometria de cubóides com área quadrada 4x4 mm<sup>2</sup>.

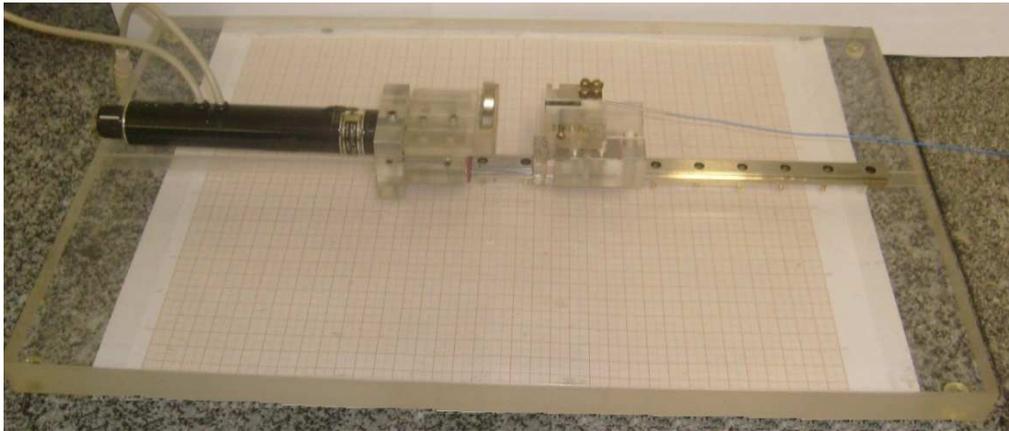
q	Campo magnético aplicado (mT)	Deformação (με)	Sensibilidade (με/mT)	Deformação (με) 330 mT
5,0	15	136	18	1005
2,5	71	211	8,6	921
1,5	127	115	4,9	643
0,75	205	197	2,9	422

### 3.4.

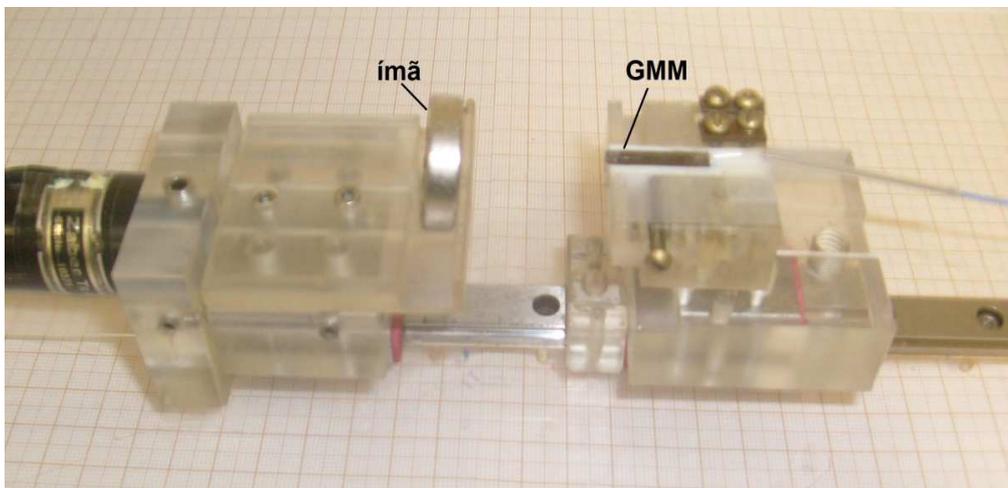
#### Resultados com gradiente de campo magnético

Na literatura só estão descritos resultados de sensores magnetostrictivos quando são submetidos a campos magnéticos espacialmente uniformes. Na prática, sensores estão sempre expostos a gradientes de campo magnético e raramente a campos magnéticos uniformes. Para analisar a resposta dos cubóides na presença de um gradiente de campo foi utilizando um ímã permanente cilíndrico de Nd-Fe-B de 25,5 mm de diâmetro e 9,0 mm de comprimento colocado em diversas posições em relação ao cubóide. A medida da distribuição espacial do gradiente de campo produzido pelo ímã na posição do sensor foi feita com o Gaussímetro F. W. Bell 9550.

Para fazer esta medição a montagem consistiu de um trilho (guia linear) de aço e dois patins onde foram colocados o ímã e o GMM como apresentado na foto a seguir. O ímã é movimentado através de um atuador linear ZABER T-LA60 na faixa entre 2,0 mm a 20 mm e o GMM permanece fixo. O passo utilizado em todas as medidas foi igual a 50 μm. O eixo central de cada cubóide foi alinhado com o eixo N-S do ímã. A origem para a posição foi tomada na face do ímã mais perto do cubóide magnetostrictivo. As fibras óticas com redes de Bragg foram coladas diretamente sobre o lado do cubóide mais comprido.



(a)



(b)

Figura 3-9. (a) Montagem do sensor magnetostrictivo. (b) Conjunto ímã-GMM.

Foi colada uma única fibra óptica com três FBGs no cubóide de 4x4x20 mm. As distâncias das FBGs foi de 4 mm, 10 mm e 16 mm com relação a face do cubóide mais perto do ímã. A figura 3-10 mostra o espectro das três FBGs com comprimentos de 1533 nm, 1537 nm e 1541 nm.

O campo aplicado na posição de cada FBG foi de 182 mT, 88 mT e 45 mT, decrescendo aproximadamente por um fator de 2. De acordo com o figura 3-11, os valores de gradiente de campo para cada região onde está colada a FBG são 25 mT/mm, 10 mT/mm e 5,0 mT/mm, também decrescendo por um fator de 2 aproximadamente. A variação da deformação para a primeira FBG foi de 640  $\mu\epsilon$ , para a segunda FBG 520  $\mu\epsilon$ , e para a terceira 400  $\mu\epsilon$ , refletindo um comportamento local para a magnetostricção. A tabela 3-2 resume os resultados obtidos para diferentes regiões do GMM.

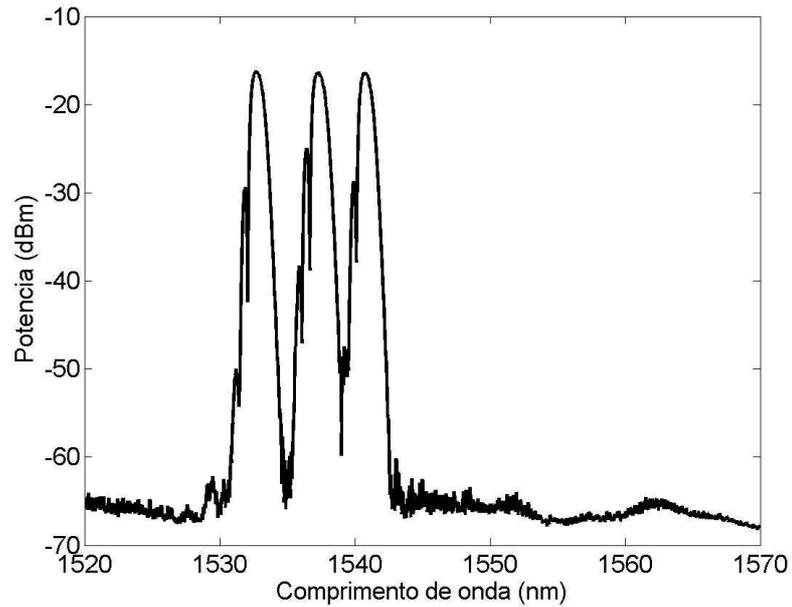


Figura 3-10. Espectro de três FBGs coladas no cubóide 4x4x20 mm.

Na figura 3-11 as linhas pontilhadas correspondem às posições onde as FBGs foram coladas. A sensibilidade e a variação do comprimento de onda máxima variam de forma importante, mostrando que o gradiente de campo tem um efeito localizado em cada região do cubóide. O sensor está posicionado a 2 mm da fonte de campo magnético.

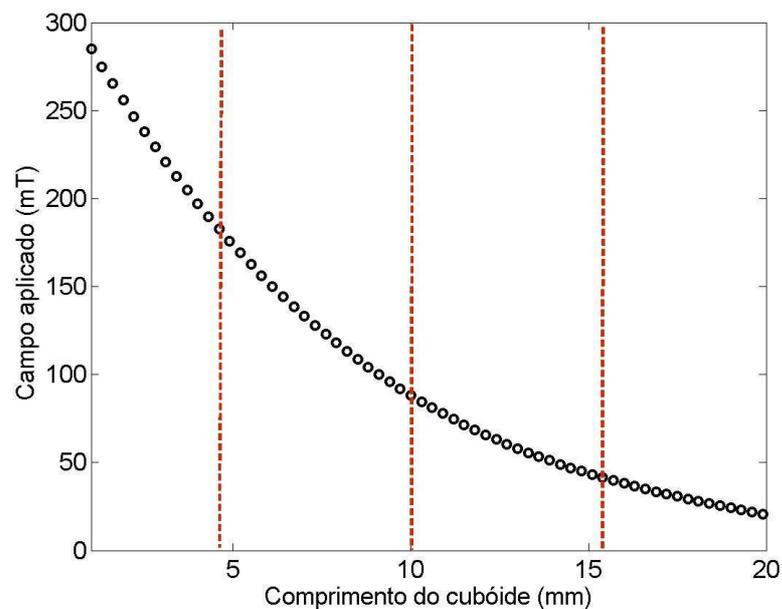


Figura 3-11. Dependência espacial do campo magnético aplicado ao longo de um cubóide de 20 mm.

Comparando os valores obtidos da deformação quando medida com campo uniforme, verificamos que, quando for sobreposto um gradiente de campo, a deformação máxima diminui. Agora o valor é de 630  $\mu\epsilon$ . Para um campo uniforme de 182 mT o valor da deformação seria de 914  $\mu\epsilon$ . A redução da deformação é de 30%. Nós achamos, que este comportamento pode ser explicado pelo incremento da não uniformidade do campo interno, produzido pela geração de pólos na região onde a FBG foi colada, reduzindo o campo total efetivo nas proximidades. De acordo com a tabela 3-2 ao comparar com outros valores de campo, a redução da deformação obtida com a FBG tende a aumentar quando o gradiente de campo aumenta.

Tabela 3-2. Resposta do GMM quando é submetido a um gradiente de campo.

<b>FBG (posição)</b>	<b>Campo magnético local (mT)</b>	<b>Gradiente (mT/mm)</b>	<b>Deformação (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	<b>Deformação redução (%)</b>
4,0 mm	182	25	630	30
10 mm	88	10	520	25
16 mm	44	5,0	400	20

A resposta localizada observada indica que a posição mais adequada para colar a FBG é perto da face do cubóide que está mais perto da fonte de campo. Geometrias diferentes de cubóides apresentam deformações diferentes como mostrado na tabela 3-3.

Quando sobrepomos um gradiente de campo, a máxima deformação obtida foi de 630  $\mu\epsilon$  para o cubóide com maior comprimento e 267  $\mu\epsilon$  para o de menor comprimento. Na terceira coluna da tabela mostramos a redução da deformação quando são comparadas as respostas para um campo uniforme aplicado e um gradiente de campo. Esta redução é mais intensa para os cubóides com maior valor de  $q$ . Estes resultados indicam que, no caso do gradiente de campo ser conhecido, pode ser considerada a redução do tamanho total do sensor mantendo o valor de  $q$  com a finalidade de diminuir o efeito do gradiente.

Tabela 3-3. Resposta do GMM quando é submetido a um gradiente de campo e um campo uniforme.

q	250 mT Gradiente(25mT/mm) Deformação ( $\mu\epsilon$ )	250 mT Campo uniforme Deformação( $\mu\epsilon$ )	Deformação redução (%)
5,0	630	978	34
2,5	584	879	34
1,5	529	566	6,5
0,75	267	329	19

### 3.4.1.

#### Fatores que influenciam na resposta do sensor

Outros fatores influenciam na resposta do sensor como estar ou não desmagnetizado e se existe uma força aplicada antes da exposição ao campo magnético. Como mostrado na figura 3-12, para a situação do cubóide estar desmagnetizado (D) ou não (ND). Observou-se que o valor máximo da deformação diminui 25% e a faixa linear diminui 44% para o segundo caso. Contudo, pode ser notado também que a sensibilidade do sensor nos dois casos é semelhante. Em aplicações práticas a não utilização do procedimento de desmagnetização simplificaria a utilização em campo do sensor.

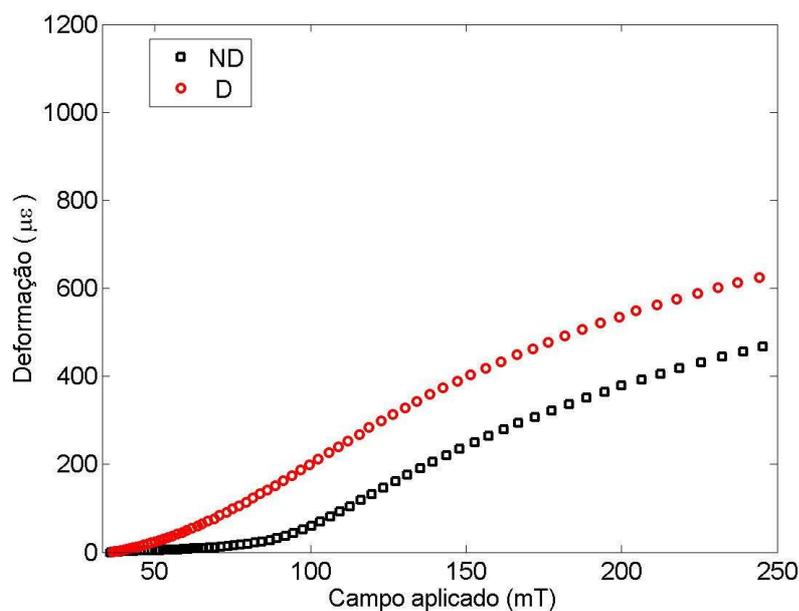


Figura 3-12. Cubóides desmagnetizados (D) e sem desmagnetizar (ND).

Outro efeito é o chamado pré-stress quando uma força de compressão é aplicada sobre o material magnetostrictivo [8,31]. A foto a seguir (figura 3-13) ilustra a montagem utilizada neste teste, no qual o cubóide e a mola estão presos entre duas lâminas de acrílico. Na figura 3-14 estão exemplificadas as duas respostas. O GMM utilizado foi o de área quadrada  $4 \times 4 \text{ mm}^2$  e comprimento 10 mm. A mola utilizada com 37 mm de comprimento quando comprimida 3,8 mm produz uma força no cubóide de aproximadamente 13 N, realizando uma pressão de aproximadamente 0,8 MPa.

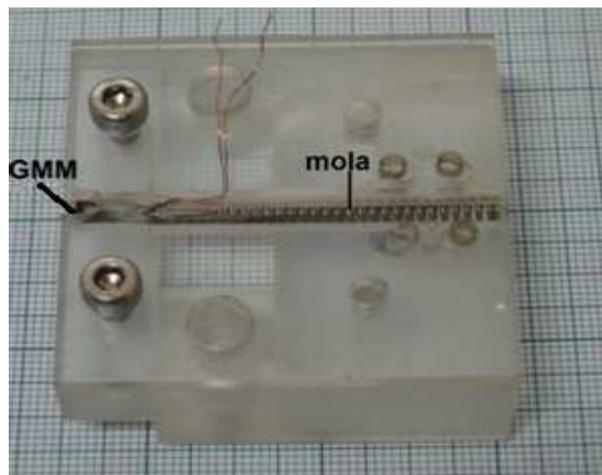


Figura 3-13. Pressão compressiva sobre um cubóide de GMM.

Podemos notar que ao aplicar a pressão compressora temos um aumento na deformação máxima [30,31] quando o sensor está imerso num gradiente de campo produzido neste caso pelo ímã cilíndrico. Para um gradiente de campo de 25 mT/mm quando foi aplicada pressão compressiva o valor do aumento da deformação chega a 43%.

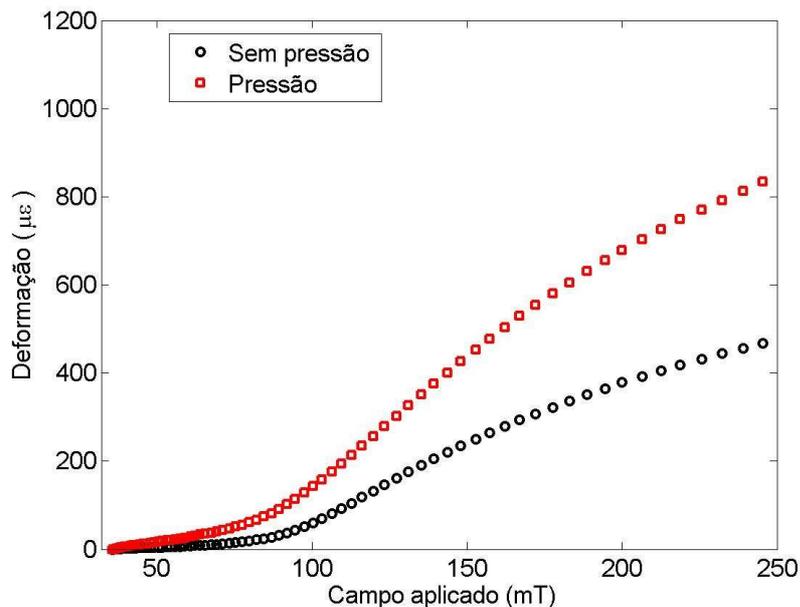


Figura 3-14. Comportamento do sensor quando é aplicada uma pressão compressiva.

### 3.5. Aplicações

As redes de Bragg têm grande aplicação na área de telecomunicações. Contudo, é na área do monitoramento de estruturas e equipamentos que estes dispositivos têm encontrado uma infinidade de aplicações em engenharia civil e geotecnia, indústrias aeronáutica, petrolífera, química, automóvel e naval, redes de energia e parques eólicos.

A figura 3-15 mostra uma possível aplicação do sensor de campo magnético magnetostrictivo apresentado neste capítulo. Neste caso o sensor magnetostrictivo, está sendo usado para monitorar, sem contacto, pequenos deslocamentos de algum componente ou estrutura. A montagem é a mesma utilizada para os testes com gradiente de campo, onde a variação da posição de um ímã fixado na estrutura a ser monitorada, deforma o material magnetostrictivo que produz uma variação no comprimento de onda de Bragg. Em torno de uma distância inicial de 5,0 mm entre o ímã (cursor) e o GMM, analisamos a resposta para variações do cursor ( $\pm 500\mu\text{m}$ ). Para a distância inicial, o valor do campo magnético aplicado na face do cubóide corresponde a 190 mT, e o gradiente corresponde a 22 mT/mm. Variações no passo de 100  $\mu\text{m}$  foram feitas. O cubóide utilizado para este caso foi o GMM de 4x4x20 mm.

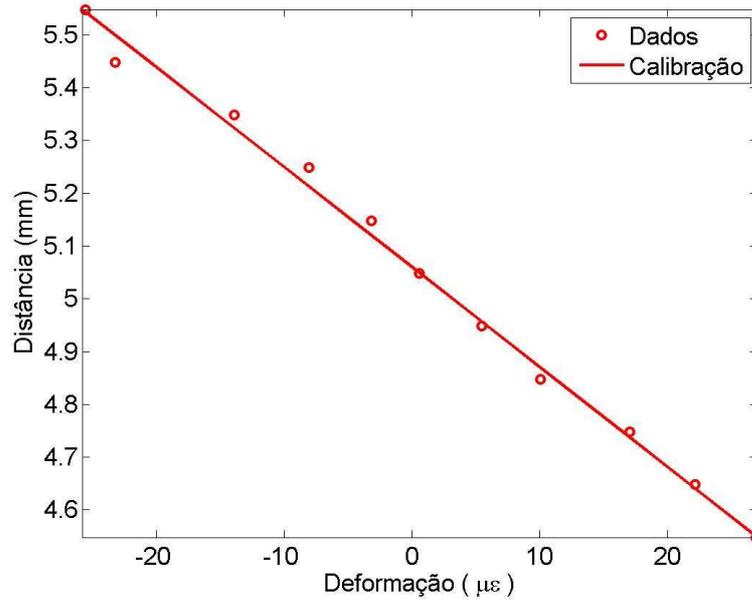


Figura 3-15. Curva de calibração do sensor de deslocamento.

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

$$d(e) = 0,019(e) + 5, \quad (3-13)$$

onde  $e$  é a deformação em  $\mu\epsilon$  medida pela FBG e  $d$  é o deslocamento em milímetros que desejamos determinar. Para este caso a sensibilidade obtida com o sensor é de  $19 \mu\text{m}/\mu\epsilon$ . A incerteza média da curva de calibração é de aproximadamente  $25 \mu\text{m}$ , calculada pela expressão [32]:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N [d_i - d(e)]^2}, \quad (3-14)$$

onde  $d_i$  é a medida experimental e  $N$  é o número de medidas, que neste caso é de 11. Este resultado foi obtido utilizando uma eletrônica com resolução de 10 pm. Melhorando a resolução da eletrônica uma incerteza menor será obtida.