

5. Sensor de força magnética

O sensor de campo magnético magnetostrictivo apresentado nos capítulos anteriores necessita de uma fonte de campo intensa para funcionar ($> \text{mT}$). Para aplicações que requeiram o monitoramento da posição, deformação, vibração, inclinação, etc. esta fonte de campo precisa estar solidária à estrutura a ser monitorada. Isto pode ser conseguido com a fixação de um ímã na superfície da estrutura com os pólos alinhados com o eixo de magnetostricção do sensor.

Neste capítulo desenvolvemos um novo tipo de sensor, no qual o material magnetostrictivo é substituído por um pequeno ímã, fabricado com um furo central aonde a fibra óptica contendo a FBG pode ser inserida e colada. Através de um encapsulamento especial este conjunto cumpre as funções de fonte de campo e elemento sensor, dispensando a fixação de ímãs na estrutura a ser monitorada desde que ela seja de material ferromagnético.

O sensor proposto é simples na sua construção, de baixo peso e custo. Em aplicações práticas basta que o conjunto FBG-ímã esteja a alguns milímetros de qualquer estrutura ferromagnética, ou em uma região de gradiente de campo magnético, para que o sensor produza uma resposta mensurável. Um pedido de patente para este sensor foi depositado no INPI em 01/04/2011.

5.1. Montagem experimental

Foram fabricados, sob encomenda, ímãs de Nd-Fe-B e Sm-Co cilíndricos com um furo passante central de diversos diâmetros e comprimentos pela Logimag Ltd. De acordo com o fabricante, para o Nd-Fe-B, o campo coercitivo $\vec{H}_c$ é de 952 kA/m e a indução remanente $\vec{B}_r$ é de 1,05 T. Já para o Sm-Co $\vec{H}_c = 818 \text{ kA/m}$ e $\vec{B}_r = 1,08 \text{ T}$. Para os ímãs de Nd-Fe-B o diâmetro interno do furo é de 0,5 mm e diâmetro externo de 1,9 mm. No caso dos ímãs de Sm-Co o diâmetro interno do furo é de 0,5 mm e os

diâmetros externos são de 1,0 mm e 3,0 mm variando o comprimento para os dois tipos de materiais de 1,0 mm a 10 mm.

Na figura 5-1 é apresentada a medida experimental da distribuição espacial de campo magnético gerado pelos ímãs de 5,0 mm de comprimento. O eixo central da ponta de prova do Gaussímetro (F.W.Bell 9550) foi colocado de forma a ser coincidente com o eixo N-S dos ímãs.

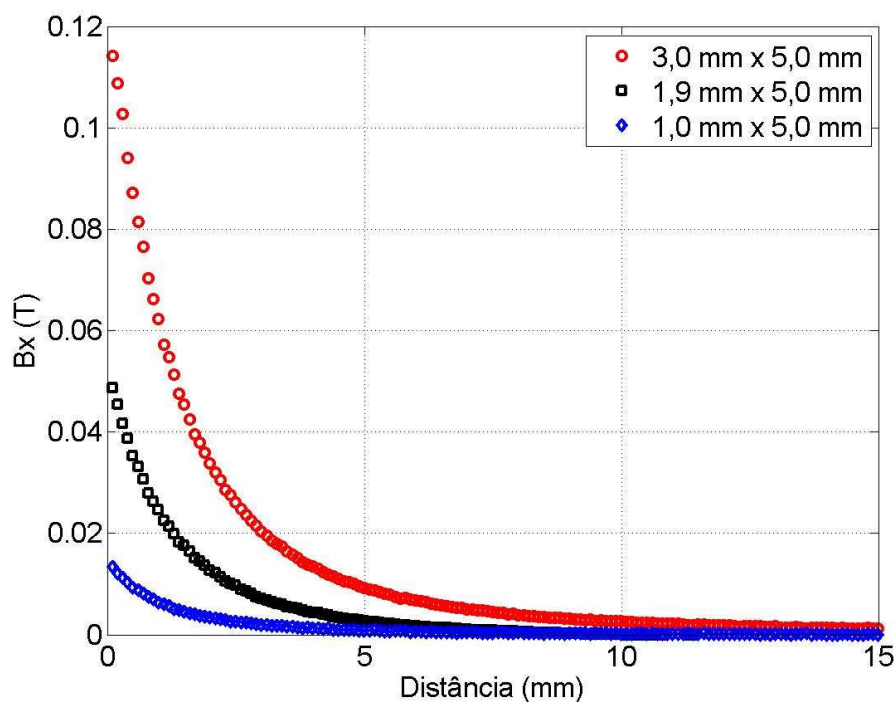


Figura 5-1. Distribuição espacial do campo magnético gerado pelos diferentes ímãs com 5 mm de comprimento e diâmetros externos de 1,0 mm, 1,9 mm e 3,0 mm.

Na figura 5-2 é mostrado o desenho esquemático do sensor. Ele consiste em uma fibra óptica contendo uma rede de Bragg fixada no canal interno do ímã com cola Loctite 496. O sensor deve ser encapsulado em uma peça de material não magnético como acrílico, teflon, vidro ou resina, com um furo passante central que permite o deslocamento do ímã no seu interior. Em todos os casos, a parte da fibra óptica acima da rede de Bragg é fixada com cola na extremidade superior do encapsulamento como apresentamos na fotografia na figura 5-3.

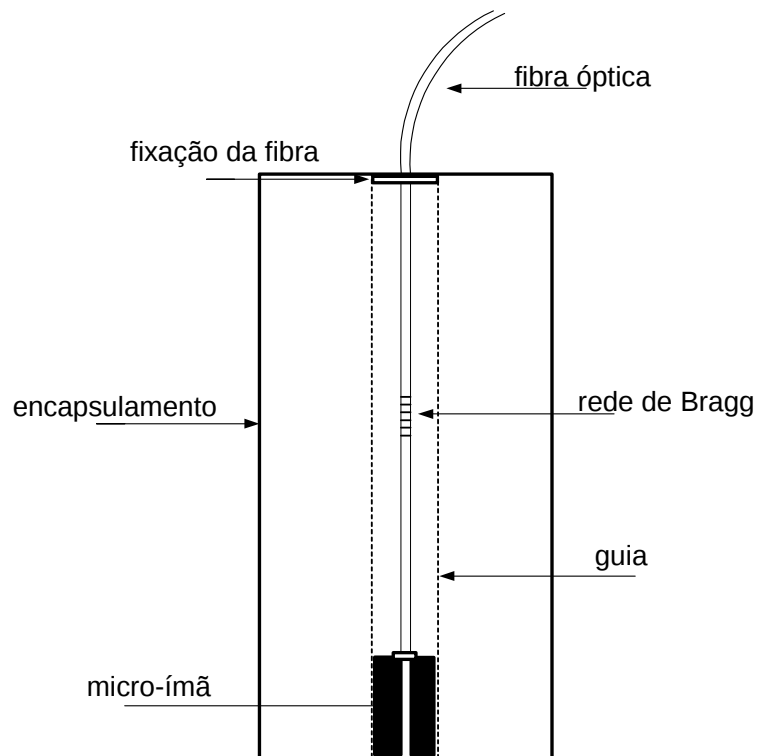


Figura 5-2. Esquema do sensor utilizando ímas de Nd-Fe-B e Sm-Co.



Figura 5-3. Fotografia do sensor após sua montagem.

A força magnética originada pela interação entre o ímã e o material ferromagnético (aço doce), que é atrativa, é transferida para a FBG produzindo uma variação no comprimento de onda refletido. Na figura 5-4 se observa o espectro da FBG quando o sensor vai se aproximando a uma placa ferromagnética em cinco posições distintas. Quanto mais próximos, a força entre eles aumenta e o pico da FBG vai se deslocando para a direita.

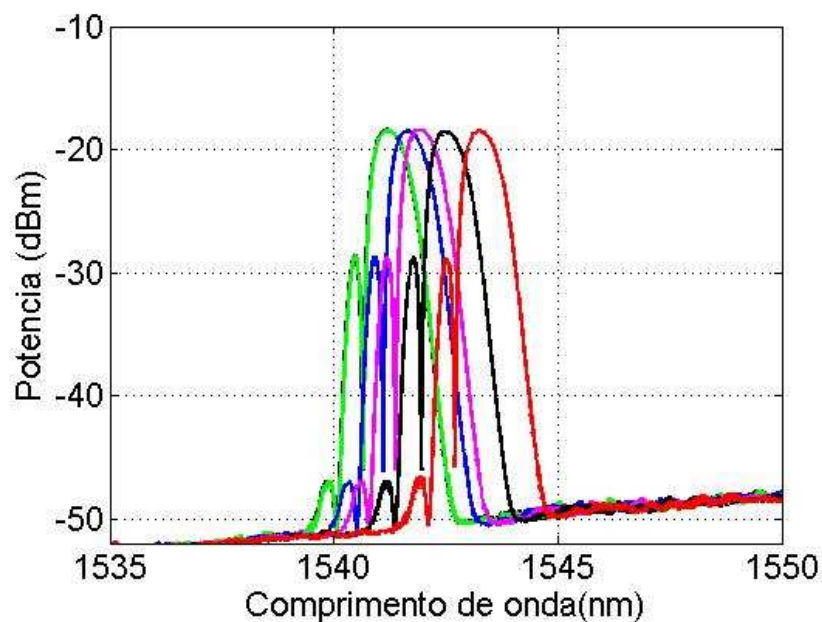


Figura 5-4. Variação do comprimento de onda refletido quando o sensor é aproximado a uma placa de aço doce. - 5,0 mm, - 1,0 mm, - 0,5 mm, - 0,3 mm, - 0,1 mm.

Para analisar a resposta do sensor quando é aproximado de uma peça de aço doce, é utilizada a montagem apresentada no capítulo 3. Uma placa ferromagnética de aço SAE-1020 com dimensões 5,0 cm x 2,5 cm x 0,6 cm se movimenta através do atuador linear enquanto o sensor permanece fixo como se observa na figura 5-5.

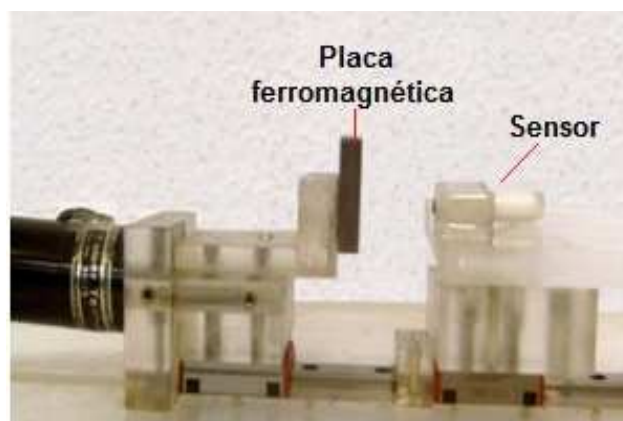


Figura 5-5. Montagem do aparato experimental para caracterização do sensor.

5.2. Interação sensor e placa ferromagnética

A força entre o ímã e a placa foi medida fixando um dinamômetro Force Gauge modelo FG-20KG-232 com resolução de 0,05 N, e com uma capacidade de medição de até 196,10 N. O ímã foi colado em um cilindro de acrílico de 150 mm de comprimento, que estava preso ao dinamômetro. Foi utilizada a montagem mostrada na figura 5-5, com o dinamômetro fixo e placa aproximando-se ao ímã.

Para cada uma das geometrias dos ímãs fabricados, foi analisada a resposta dada pelo dinamômetro para diferentes distâncias de separação da placa ferromagnética. Foi testado também, um ímã de Nd-Fe-B de maior porte com 9,5 mm de diâmetro e 9,5 mm de comprimento, sem furo central. Com sua face à uma distância de 1,1 mm da placa ferromagnética obteve-se uma força de 13,15 N.

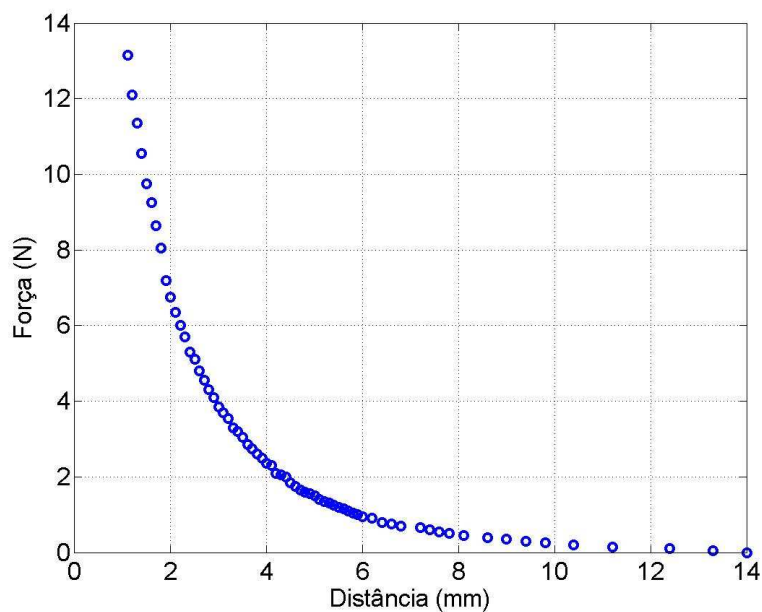


Figura 5-6. Variação da força para o sensor com ímã de 9,5 mm x 9,5 mm.

Com o objetivo de otimizar a resposta do sensor, através de variações na geometria do ímã, foram desenvolvidos modelos usando o Método de Elementos Finitos (FEM - Finite Element Method). O software utilizado foi o Ansys 11, que permite a realização de simulações de problemas

eletromagnéticos. A partir das medidas da força entre os diferentes ímãs disponíveis e a placa de aço doce, o modelo foi ajustado.

As simulações foram realizadas em duas dimensões com simetria axial e a força foi calculada através do tensor de Maxwell.

5.3. Força magnética

Um dos métodos que permite obter informações sobre o módulo, direção e sentido da força que atua sobre um corpo ferromagnético imerso em um campo magnético, é o tensor de Maxwell. Este método foi desenvolvido por J. C. Maxwell e se tornou muito popular nos últimos anos, por sua eficiência em termos computacionais, pois requer somente uma solução do campo magnético para avaliar a força associada a uma determinada posição do corpo. Maxwell mostrou que para avaliar a força que age em um corpo, basta desenhar uma superfície fechada que o envolva e determinar o campo magnético, em módulo, direção e sentido, em todos os pontos dessa superfície. Para sua aplicação prática, é necessário conhecer a distribuição do campo que envolve o corpo sobre o qual se deseja calcular a força.

A partir da expressão da força de Lorentz podemos obter a força aplicada sobre um corpo na presença de um campo elétrico $\vec{E}$ e do campo magnético $\vec{B}$. A força total vem dada pela relação [44]:

$$\vec{F} = \int_V \vec{f} dV, \quad (5-1)$$

onde $\vec{f}$ é a força de Lorentz por unidade de volume:

$$\vec{f} = \rho \vec{E} + \vec{j} \times \vec{B}. \quad (5-2)$$

Considerando o caso magnetostático e as equações de Maxwell formuladas para meios lineares, temos que:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j}, \quad (5-3)$$

onde $\vec{j}$ é densidade de corrente. O campo $\vec{H}$ é definido como:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu}; \quad (5-4)$$

onde μ é a permeabilidade magnética do material. Pode-se substituir $\vec{j}$ em (5-2), obtendo a seguinte relação:

$$\vec{f} = \frac{1}{\mu} [\vec{B} \times (\nabla \times \vec{B})]. \quad (5-5)$$

E possível reescrever esta equação utilizando a seguinte condição de produto vetorial:

$$\nabla(\vec{B}^2) = 2(\vec{B} \cdot \nabla)\vec{B} + 2\vec{B} \times (\nabla \times \vec{B}). \quad (5-6)$$

Substituindo obtém-se a expressão:

$$\vec{f} = \frac{1}{\mu} [(\nabla \cdot \vec{B})\vec{B} + (\vec{B} \cdot \nabla)\vec{B}] - \frac{1}{2\mu} \nabla \cdot \vec{B}^2, \quad (5-7)$$

onde foi inserido o termo $(\nabla \cdot \vec{B})\vec{B}$, já que $\nabla \cdot \vec{B} = 0$. Assim pode-se escrever a equação anterior da seguinte forma:

$$\vec{f} = \nabla \cdot \vec{T}, \quad (5-8)$$

onde $\vec{T}$ é definido com o Tensor de Maxwell. Reorganizando as equações (5-7) e (5-8):

$$\nabla \cdot \vec{T} = \frac{1}{\mu} [(\nabla \cdot \vec{B})\vec{B} + (\vec{B} \cdot \nabla)\vec{B}]. \quad (5-9)$$

Utilizando o teorema da divergência obtém-se a força total:

$$\vec{F} = \frac{1}{\mu} \oint_S \vec{T} \cdot d\vec{s}. \quad (5-10)$$

O tensor é a pressão definida como a força por unidade de área, e quando este é integrado sobre a área total a resultante é a força. O vetor $d\vec{s}$ representa um elemento infinitesimal de área da superfície e pode ser escrito como $d\vec{s} = \vec{n}ds$ e $\vec{n}$ é o vetor normal a superfície.

O Tensor de Maxwell pode ser escrito de uma forma simplificada como:

$$\vec{T}_{ij} = \frac{1}{\mu} \left(B_i B_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} B^2 \right). \quad (5-11)$$

Os índices i e j fazem referência aos sistemas de coordenadas x , y , z . de forma que o tensor possui um total de nove componentes (T_{xx} ; T_{yy} ; T_{zz} ; T_{xy} ; T_{xz} ; T_{yx} ; T_{yz} ; T_{zx} ; T_{zy}). O delta de Kronecker δ_{ij} é 1 se $i=j$, e zero quando $i \neq j$.

Assim o tensor de Maxwell para o caso magnetostático pode ser obtido da seguinte forma:

$$\frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} B_x^2 - \frac{1}{2}|B|^2 & B_x B_y & B_x B_z \\ B_y B_x & B_y^2 - \frac{1}{2}|B|^2 & B_y B_z \\ B_z B_x & B_z B_y & B_z^2 - \frac{1}{2}|B|^2 \end{pmatrix}. \quad (5-12)$$

5.4. Resultados

No presente trabalho será feita referência ao ímã que compõe o sensor especificando primeiramente o diâmetro externo e em seguida seu comprimento. A figura 5-7 ilustra a variação no comprimento de onda $\Delta\lambda$ quando o sensor composto pelos ímãs de 3,0 mm x 5,0 mm e 1,9 mm x 5,0 mm são aproximados da placa ferromagnética. O passo dado foi de 0,1 mm. Para o caso do primeiro sensor, quando o ímã se encontra a uma distância de 0,1 mm da placa ferromagnética, a variação no comprimento de onda $\Delta\lambda$ é de 2,17 nm. Quando a variação do comprimento de onda é de 10 pm o ímã se encontra a uma distância de 5,0 mm. A partir desta distância entre a placa e o sensor, não foi possível detectar variação no comprimento de onda da FBG com o equipamento utilizado. Já para o sensor composto pelo segundo ímã, o $\Delta\lambda$ máximo é de 0,63 nm para a distância de 0,1 mm. Utilizando um ímã menor ainda, com 1,0 mm x 5,0 mm, o $\Delta\lambda$ máximo de 0,04 nm é obtido para a mesma distância anteriormente usada. Para as duas últimas geometrias de sensores citados quando a variação do comprimento é de 10 pm o ímã se encontra a uma distância de 3,0 mm e 0,7 mm respectivamente.

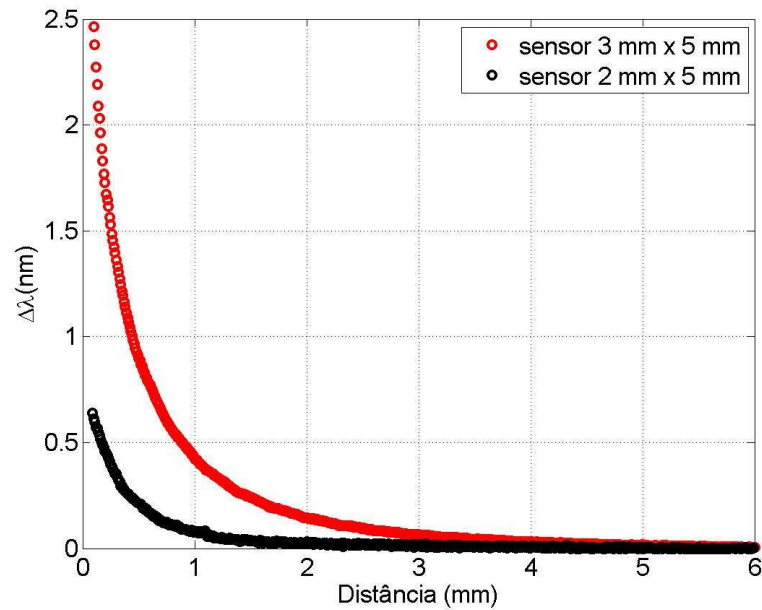


Figura 5-7. Variação do comprimento de onda quando o sensor se aproxima a uma placa ferromagnética.

No caso de monitoramento à distâncias mais afastadas será preciso utilizar ímãs mais potentes. Como exemplo a figura 5-8 mostra a resposta para um sensor composto por um ímã de Nd-Fe-B de 9,5 mm x 9,5 mm de comprimento, sem o furo central. O ímã foi colado com Loctite a um cilíndrico de acrílico no qual a fibra foi também colada com Araldite 24 h, e todo o conjunto e encapsulado numa peça de acrílico. O passo utilizado foi de 0,1 mm. A uma distância de 3,0 mm $\Delta\lambda$ é de 3,83 nm e a uma distância de 5,0 mm $\Delta\lambda$ é de 1,41 nm.

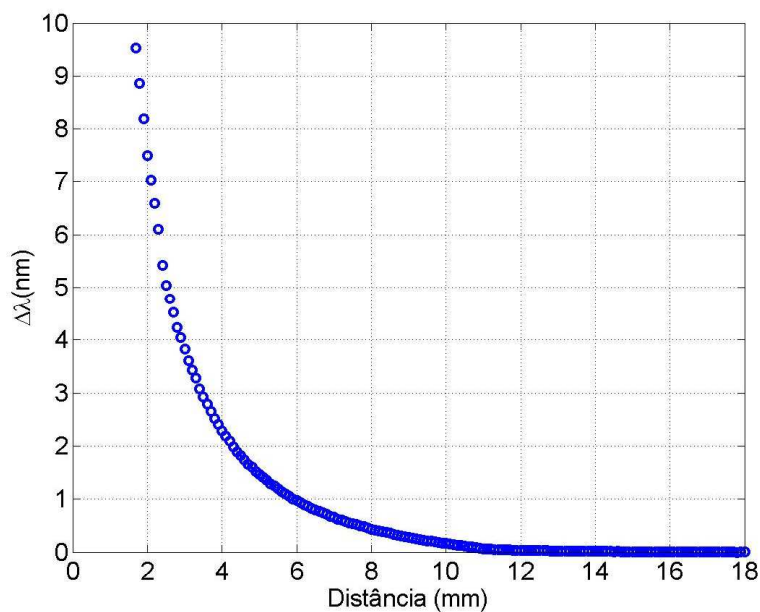


Figura 5-8. Variação do comprimento de onda para o sensor 9.5 mm x 9.5 mm.

Na figura 5-9 são mostradas as linhas de fluxo de um dos modelos desenvolvidos no qual um ímã de geometria 3,0 mm x 5,0 mm interage com a placa ferromagnética. Adotou-se uma simulação axis-simétrica, na qual a solução apresenta simetria ao redor de um eixo axial. A simulação foi feita com o modelo contendo 12.228 elementos.

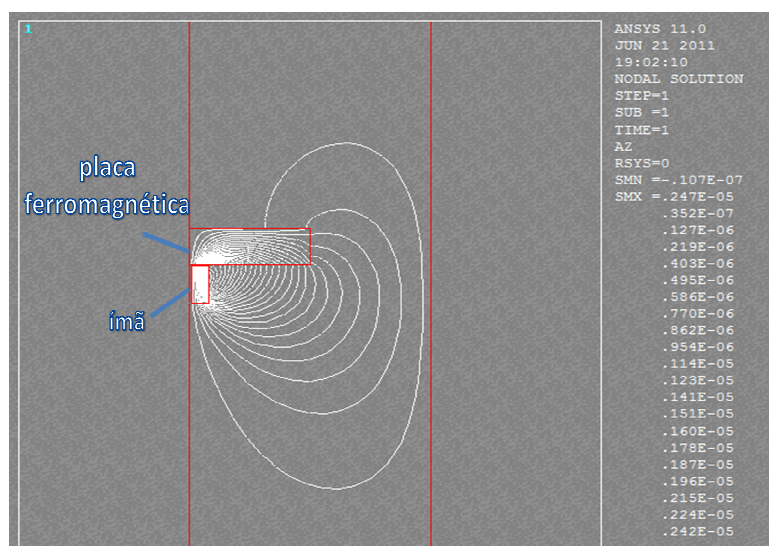


Figura 5-9. Modelo de simulação em duas dimensões feito no programa Ansys11.

A medida experimental da força para o sensor de 3,0 mm x 5,0 mm de Sm-Co foi utilizada para ajustar o modelo como ilustra a figura 5-10. Com o

modelo já ajustado a medida foi realizada até uma distância de 2,0 mm, devido à resolução do dinamômetro utilizado. O ajuste foi realizado modificando-se o campo coercitivo do ímã e mantendo sua permeabilidade magnética. Para o caso acima o campo $\vec{H}_c$ ajustado foi de 715 kA/m.

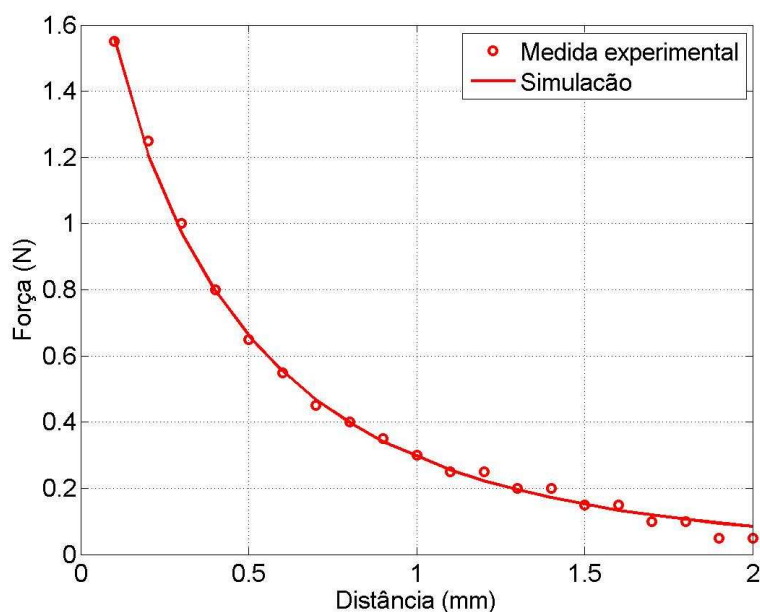


Figura 5-10. Força para o sensor com ímã de 3,0 mm x 5,0 mm.

A figura 5-11 apresenta o comportamento do ímã de 1,9 mm x 5,0 mm de Nd-Fe-B. Novamente só foi possível obter resultados razoáveis com o dinamômetro até uma distância de até 0,7 mm. A resposta do modelo foi extrapolada até uma distância de 2,0 mm. Para este caso o campo coercitivo na simulação $\vec{H}_c$ foi de 695 kA/m, valor muito próximo ao encontrado anteriormente.

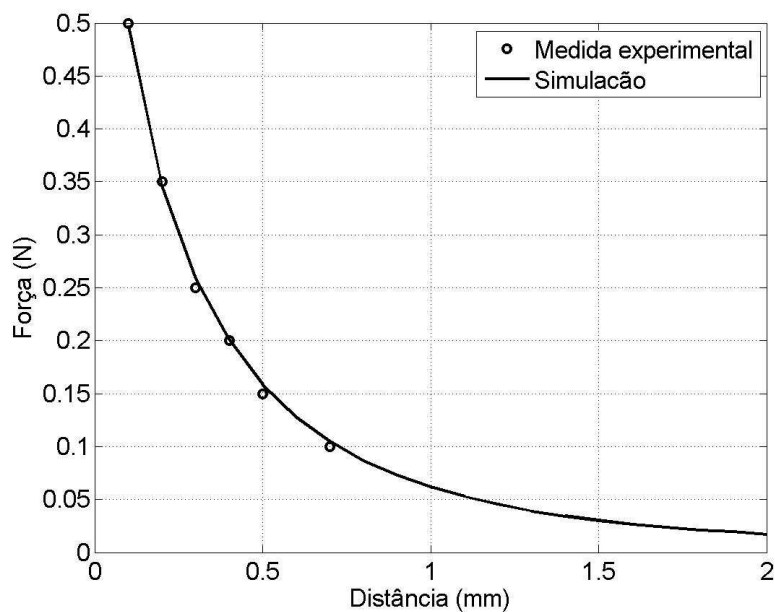


Figura 5-11. Força para o sensor de 1,9 mm x 5,0 mm.

De acordo com a simulação, para o sensor utilizando o ímã de 1,9 mm x 5,0 mm à 3,0 mm de distância o valor da força é de 7,10 mN.

A figura 5-12 apresenta os resultados das simulações para o ímã de 3,0 mm x 5,0 mm, quando variamos o comprimento.

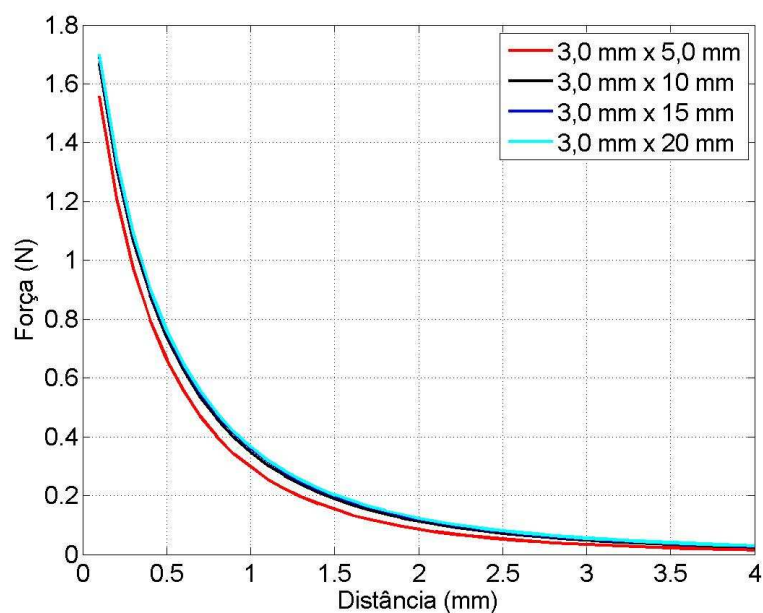


Figura 5-12. Simulações variando o comprimento dos ímãs de Sm-Co.

De acordo com as simulações para o ímã de 3,0 mm de diâmetro, quando o comprimento varia de 5,0 mm à 20 mm, observa-se o aumento da força é pouco significativo. Este mesmo comportamento foi observado para o ímã de 1,9 mm de diâmetro. Portanto para estas configurações podemos limitar o comprimento máximo dos ímãs em 10 mm.

Simulações variando o diâmetro do sensor foram feitas como são apresentadas na figura 5-13. O aumento no diâmetro produz uma força bem mais intensa. A 1,0 mm de distância o valor da força aumenta mais de 10 vezes quando o diâmetro aumente de 1,9 mm para 5,0 mm. Isto prova que, dependendo da aplicação, o uso de ímãs com diâmetro maior aos testados neste trabalho podem aumentar em muito a sensibilidade do sensor.

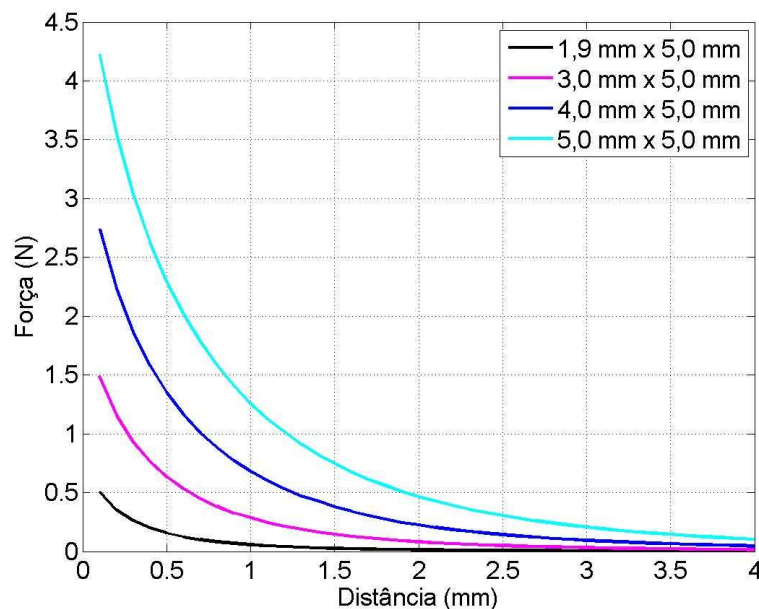


Figura 5-13. Simulações variando o diâmetro dos ímãs de Sm-Co.

Foi encontrado um comportamento aproximadamente linear entre a variação do comprimento de onda e a força entre os ímãs e a placa ferromagnética como mostram as figuras 5-14 e 5-15. A sensibilidade do sensor com o ímã de 3,0 mm x 5,0 mm foi obtida da inclinação da reta na figura 5-14, que para este caso é de 1,37 nm/N. No caso do sensor com o ímã de 1,9 mm x 5,0 mm a sensibilidade encontrada foi de 0,94 nm/N, como pode ser observado na figura 5-15.

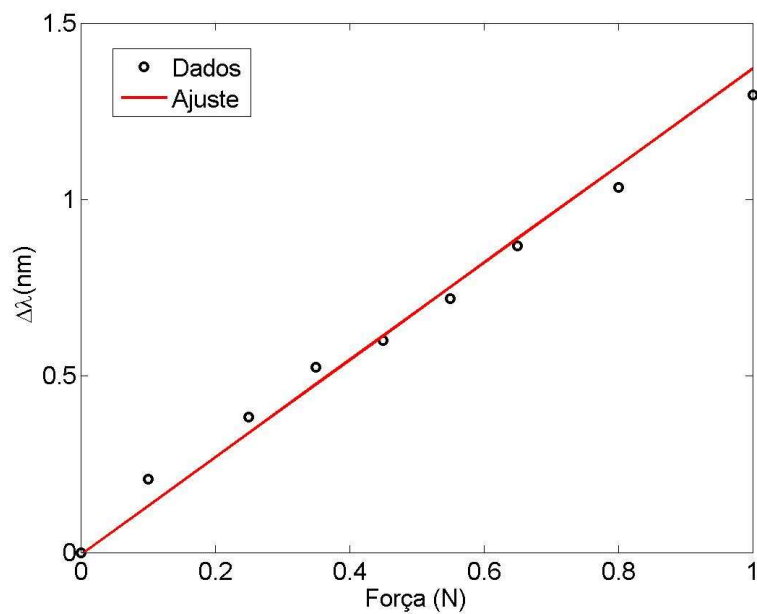


Figura 5-14. Curva de calibração para o sensor com o ímã de 3,0 mm x 5,0 mm.

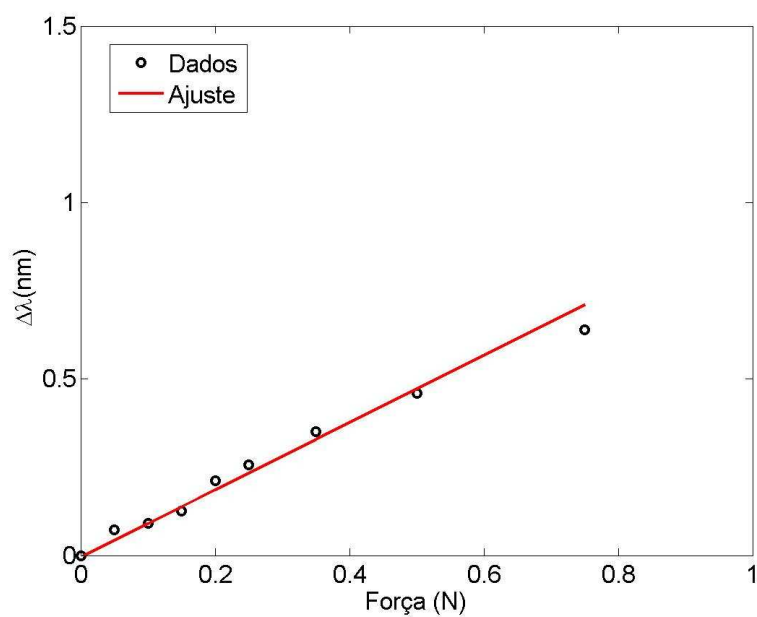


Figura 5-15. Curva de calibração para o sensor com o ímã de 1,9 mm x 5,0 mm.

Para uma resolução de 10 pm da eletrônica do Micron Optics utilizada podemos estimar uma resolução em força para o sensor com o ímã de 3,0 mm x 5,0 mm em 7mN.

5.5. Aplicações

A força magnética entre o ímã e material ferromagnético varia em função da distância, o que corresponde a diferentes valores de campo magnético. Esta variação permite a utilização deste sensor em inúmeras situações, como por exemplo, no monitoramento, sem contacto, da integridade de estruturas que sejam feitas ou que contenham aço ferromagnético. Uma aplicação possível é o monitoramento de deformações, deslocamentos, vibrações, inclinações e corrosão em torres, estruturas e equipamentos utilizados na geração e transmissão de energia elétrica e na indústria de petróleo e gás [45,46].

Nas figuras 5-16 (a) e (b) apresentamos um exemplo para uma situação onde se deseja monitorar vibrações de estruturas ferromagnéticas com o sensor que utiliza o ímã de 3,0 mm x 5,0 mm. Neste caso, o sensor é posicionado num ponto fixo e deslocamentos consecutivos são feitos nas proximidades deste ponto. Nas figuras o ponto fixo está a uma distância de 1,0 mm e as vibrações com amplitudes de $\pm 0,1$ mm e $\pm 0,5$ mm. No caso de maior amplitude o valor da variação máxima de comprimento de onda é em módulo 0,3 nm e no menor amplitude é de 0,06 nm.

Notou-se para os dois casos, boa repetibilidade nas medidas.

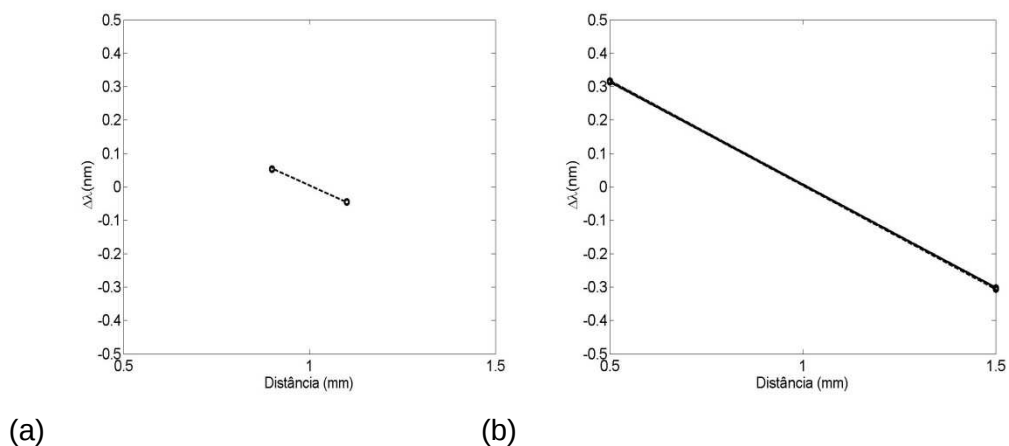


Figura 5-16. Sensor de vibração. (a) Amplitude $\pm 0,1$ mm. (b) Amplitude $\pm 0,5$ mm.