

4. Sensor compósito magnetostrictivo

Neste capítulo o sensor de campo magnético magnetostrictivo utilizando um compósito contendo Terfenol-D será apresentado e comparado com o sensor magnetostrictivo utilizando Terfenol-D maciço.

4.1. Fabricação dos compósitos

De acordo com a análise realizada no capítulo anterior, concluiu-se que a geometria do GMM tem um papel importante no desempenho do sensor. Especificamente, observou-se que a geometria influencia de forma direta na faixa de baixa deformação, na deformação máxima e na sensibilidade do sensor. Uma forma de fabricarmos sensores com qualquer geometria desejada é a através de compósitos constituídos por partículas magnetostrictivas. Compósitos com magnetostricção gigante (GMC) apresentam algumas vantagens que podem torná-lo interessante dependendo da aplicação. Entre as vantagens podemos citar a facilidade na manipulação, que permite a fabricação do compósito no laboratório com o formato desejado, redução do custo, resistência à corrosão, maior resistência mecânica e a ausência de correntes parasitas quando são aplicados campos com altas frequências [21].

Os compósitos estudados, os quais serão apresentados neste capítulo, foram preparados misturando partículas de Terfenol-D ($Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.92}$) com uma resina de baixa viscosidade. Na sequência serão analisados alguns dos fatores levados em conta na fabricação dos compósitos.

4.1.1. Matriz

A matriz na qual são imersas as partículas influi de forma direta nas propriedades magnetostrictivas do compósito, já que dependendo do tipo de matriz a deformação das partículas pode ser mascarada pela sua

elasticidade. Na medida em que as partículas sofram uma deformação esta deve ser transmitida para uma partícula vizinha através da matriz. Diferentes tipos de matrizes foram testados. Entre as citadas na literatura, encontram-se matrizes não-metálicas [19], termoplásticas [33], poliméricas [20] resinas epóxi [19,34, 35], silicone [20], e elastômero de poliuretano [36]. Neste trabalho foram utilizadas resinas epóxi para a fabricação dos compósitos. A escolha foi feita procurando uma matriz que de acordo com a literatura aproxime a deformação do compósito à deformação obtida com o Terfenol-D maciço, além de ser facilmente manipulada no laboratório.

4.2. Tamanho das partículas e fração de volume

Estão citados na literatura estudos sobre a influência do tamanho das partículas [34,37,38] demonstrando que esta característica interfere nas propriedades magnetostrictivas dos compósitos. Foi mostrado que para que o compósito apresente uma boa propriedade magnetostrictiva, deve ser utilizada uma distribuição de partículas com tamanhos de 30 μm até 500 μm ao invés de uma distribuição de tamanho de partículas mais concentrada [39]. As partículas de maior tamanho misturadas com partículas de tamanhos menores favorecem a ausência de bolhas quando a matriz é uma resina polimérica. Isto acontece devido ao fato de que as partículas menores encaixam-se nos buracos que aparecem no espaço entre as partículas maiores, o que possibilita à transferência da magnetostricção entre as partículas da matriz. Por outro lado, o campo de desmagnetização diminui com o incremento do tamanho da partícula, que resulta no aumento do campo magnético efetivo produzindo uma maior magnetostricção.

Estudos com diferentes porcentagens em volume de partículas têm sido desenvolvidos, nos quais se conclui de modo geral, quando se aumenta a porcentagem de partículas no volume na fabricação do compósito, o valor da magnetostricção aumenta [21,22,33,35,36].

4.2.1. Orientação previa

Devido à anisotropia de forma das partículas, ao aplicar um campo magnético durante o processo de cura do compósito, as partículas podem ser orientadas de forma que o eixo do lado mais longo de cada partícula

coincida com a direção do campo aplicado. Com esta orientação as partículas ficam distribuídas em canais na matriz o que produz um aumento da magnetostricção [22]. Para orientar as partículas o campo tem um valor limite a partir do qual a magnetostricção aumenta lentamente indicando que o eixo fácil das partículas já foi orientado [40,41].

4.3. Resultados

Os compósitos foram fabricados utilizando uma distribuição de partículas sem formato definido com tamanhos de até 500 μm . A foto a seguir mostra a morfologia das partículas de Terfenol-D.

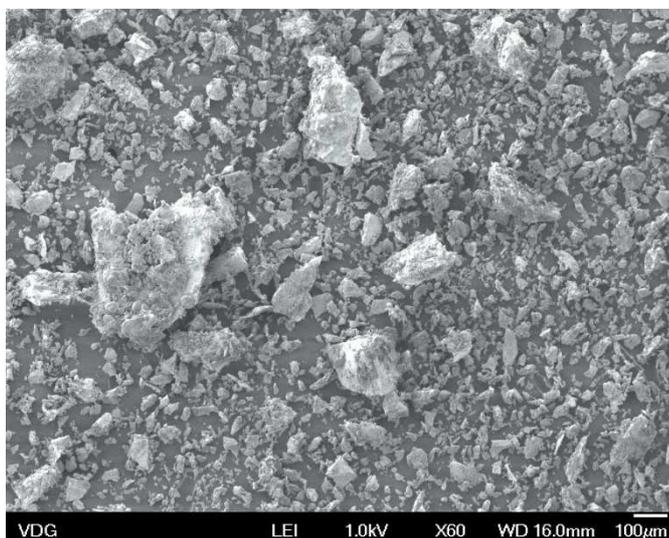


Figura 4-1. Morfologia das partículas de Terfenol-D utilizadas com tamanho de até 500 μm .

Diferentes resinas epóxi foram testadas no presente trabalho. Inicialmente foi utilizada a resina epóxi Araldite 5min. Devido ao tempo de cura ser muito reduzido, não se conseguia uma mistura homogênea com as partículas. Por este motivo, adotou-se a resina epóxi Araldite 24 h.

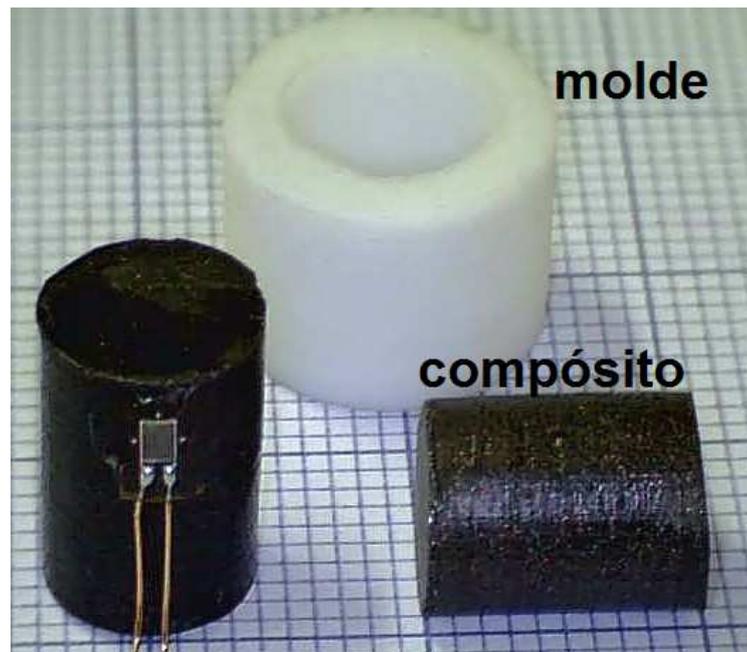
T. Duenas [22] fez um estudo da influência da viscosidade de resinas epóxi nas propriedades magnetostrictivas do compósito, mostrando que compósitos fabricados com resinas de baixa viscosidade apresentam uma melhor magnetostricção. Foram por nós testados quatro tipos de resinas: Araldite 24 horas [Brascola], EMBED812 (Ted Pella Inc), MC105 – 5 (Epoxyfiber Ind. Com.Ltda) e Spurr (Ted Pella Inc), com viscosidades de 30.000 cps, 400 cps, 800 cps, e 60 cps respectivamente. Foi considerado

como valor da viscosidade da resina o valor obtido depois de misturar a respectiva resina com seus componentes (endurecedor, flexibilizador), de acordo com os dados fornecidos pelos fabricantes. As três últimas resinas são utilizadas para recobrimento de amostras a serem estudadas em microscopia eletrônica. A resina Spurr é considerada a resina epóxi com mais baixa viscosidade utilizada na fabricação de compósitos magnetostrictivos [20].

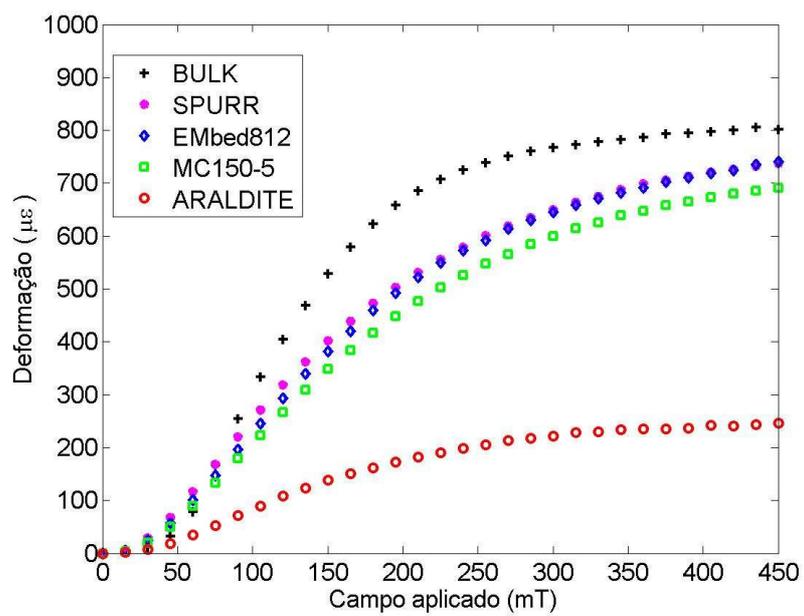
Para a fabricação dos compósitos, são misturadas homogeneamente em um molde a resina e as partículas. A quantidade de partículas foi de 50% em volume em relação ao volume total da mistura. O tempo de cura varia de acordo a resina utilizada, assim a mistura contendo as resinas Araldite e MC105-5 ficaram curando cerca de 24 horas na temperatura ambiente. As misturas com as resinas Embed e Spurr foram colocadas num forno a 60°C por 24 horas e 8 horas, respectivamente. Por último os compósitos são lixados para eliminar o excesso de material.

Na figura 4-2 (a) apresentamos o aspecto final dos compósitos e na (b) o comportamento dos compósitos testados. Os compósitos foram fabricados em formato cilíndrico com 8 mm de diâmetro e 10 mm de comprimento, como ilustrado na figura 4-2 (a), por que dispúnhamos de um cilindro maciço de Terfenol-D com a mesma geometria. As comparações entre os vários compósitos e o Terfenol-D maciço foram feitas submetendo todos a um campo magnético uniforme produzido pelo eletroímã utilizado anteriormente. Notou-se de acordo com a figura 4-2 (b) que para um campo de 450 mT o valor máximo da deformação obtido foi de 800 $\mu\epsilon$ para o cilindro maciço. Para os compósitos magnetostrictivos este valor cai, no melhor dos casos, cerca de 8% para 740 $\mu\epsilon$. Pode ser observado também o notável papel das resinas na magnetostricção apresentada pelo compósito. A diferença da magnetostricção máxima obtida utilizando a resina Spurr e a resina Araldite chegou a variar por um fator 3,2. Já para campos magnéticos menores que 70 mT a deformação do compósito com a resina Spurr e do Terfenol-D maciço é muito semelhante.

Por uma questão prática, neste trabalho utilizaremos para a fabricação dos compósitos a resina MC105-5 por seu baixo custo e facilidade no manuseio, além de apresentar um comportamento semelhante ao apresentado pela resina Spurr.



(a)



(b)

Figura 4-2. (a) Formato dos compósitos magnetostrictivos fabricados. (b) Deformação dos compósitos fabricados com resinas de diferentes viscosidades.

Tabela 4-1. Deformação máxima de compósitos magnetostrictivos fabricados com resinas de viscosidades diferentes.

| RESINA | TEMPO DE CURA | VISCOSIDADE (cps) | Deformação ($\mu\epsilon$) |
|-----------------|------------------------------|--------------------------|--|
| ARALDITE 24h | 24 h temperatura ambiente | 30000 | 250 |
| MC105-5 | 24 h temperatura ambiente | 800 | 690 |
| EMBED812 | 24 horas 60°C | 400 | 740 |
| SPURR | 8 horas 60° – 70°C | 60 | 740 |

A mistura de partículas com a resina MC105-5 foi levada para uma câmara de vácuo por 30 minutos para remover as bolhas que são produzidas por causa da resina, segundo o recomendava a literatura [22].

A figura 4-3 apresenta a curva de magnetização para o Terfenol-D maciço e para o compósito magnetostrictivo fabricado com a resina MC105-5 a 50% em volume [42]. As medidas foram feitas utilizando um porta-amostra 3,0 x 2,6 mm. Nota-se que para o compósito, o valor da magnetização de saturação é diminuída em 55 % com relação à magnetização de saturação do Terfenol-D maciço. O resultado está compatível com os encontrados na literatura [43].

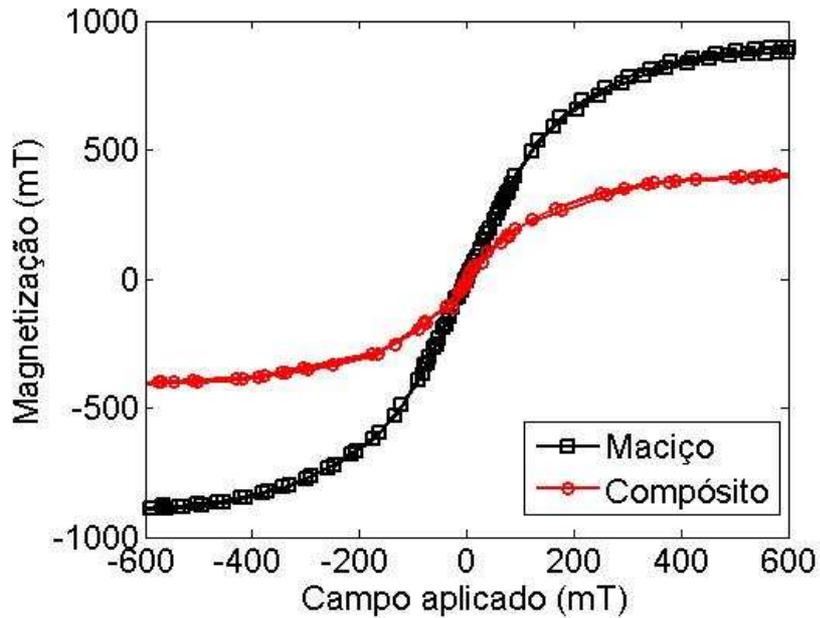


Figura 4-3. Curva de magnetização do magnetostrictivo maciço e do compósito magnetostrictivo fabricado com a resina MC105-5.

A figura 4-4 apresenta diferentes compósitos com a geometria cilíndrica escolhida, fabricados com a mesma resina. Os compósitos correspondem a porcentagens diferentes de partículas no volume, 15%, 25% e 50%, onde a deformação máxima medida foi de 151 $\mu\epsilon$, 320 $\mu\epsilon$ e 691 $\mu\epsilon$ respectivamente. Nota-se que a relação entre a deformação máxima medida e o percentual de partículas em volume utilizados é aproximadamente linear.

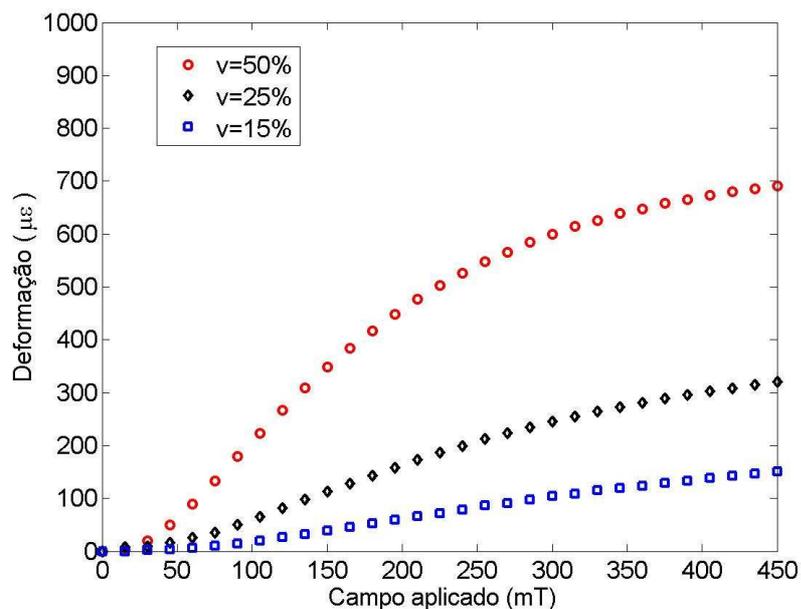


Figura 4-4. Compósitos da mesma geometria e com diferente porcentagem de partículas magnetostriativas.

A porcentagem de 50% em volume de partículas foi selecionada de certa forma arbitrariamente. Na literatura encontramos compósitos feitos com porcentagens em volume que variam desde 10% até 90%. Escolhemos um valor médio.

Estudaremos agora o efeito da geometria na deformação dos compósitos como estudado no capítulo 3. Na figura 4-5 apresentamos a deformação dos compósitos magnetostrictivos cilíndricos de mesmo comprimento e diâmetros diferentes. Os valores da razão q (comprimento por diâmetro) foram 2,5, 1,67 e 1,25. Note que não apresentaram variação considerável em toda a faixa de campos aplicados, resultado bem diferente do observado com os cubóides do Terfenol-D maciço. De acordo com estes resultados observou-se que a faixa de resposta para os compósitos independe da geometria o que em aplicações práticas poderia ser uma vantagem.

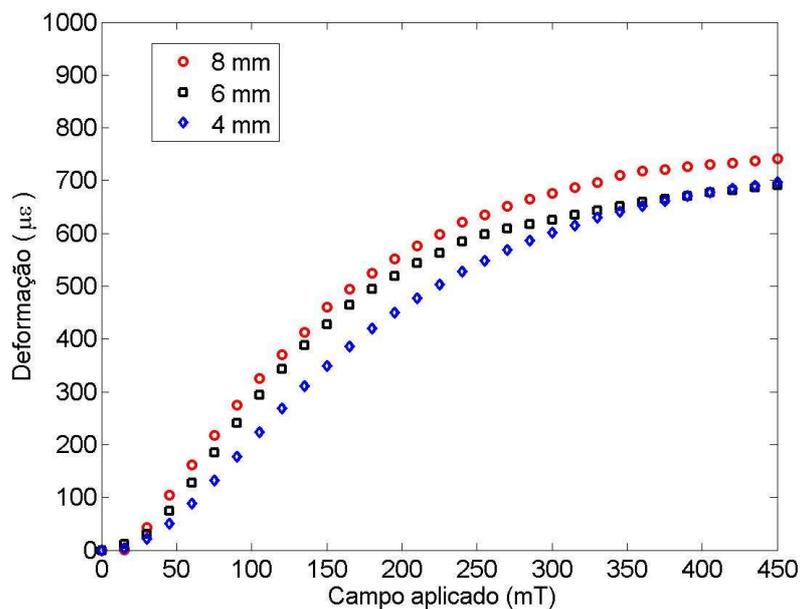


Figura 4-5. Compósitos magnetostrictivos cilíndricos com o mesmo comprimento e valores diferentes de diâmetro.

Considerando compósitos com o mesmo diâmetro de 4,0 mm e variando seu comprimento, os valores da razão comprimento por diâmetro q foram 5,0, 3,7, 2,5 e 1,3. Observando a figura 4-6, notou-se uma diferença mais acentuada entre as diversas respostas, com um comportamento semelhante ao do encontrado no caso do Terfenol-D maciço. Contudo os valores da

sensibilidade obtida com os compósitos são muito inferiores aos encontrados no Terfenol-D maciço, como demonstra a tabela 4-2. Embora a deformação máxima encontrada para $q=5,0$ seja de $802 \mu\epsilon$ a maior sensibilidade é de somente $3,4 \mu\epsilon/mT$. Que é um resultado equivalente a outras sensibilidades encontradas na literatura.

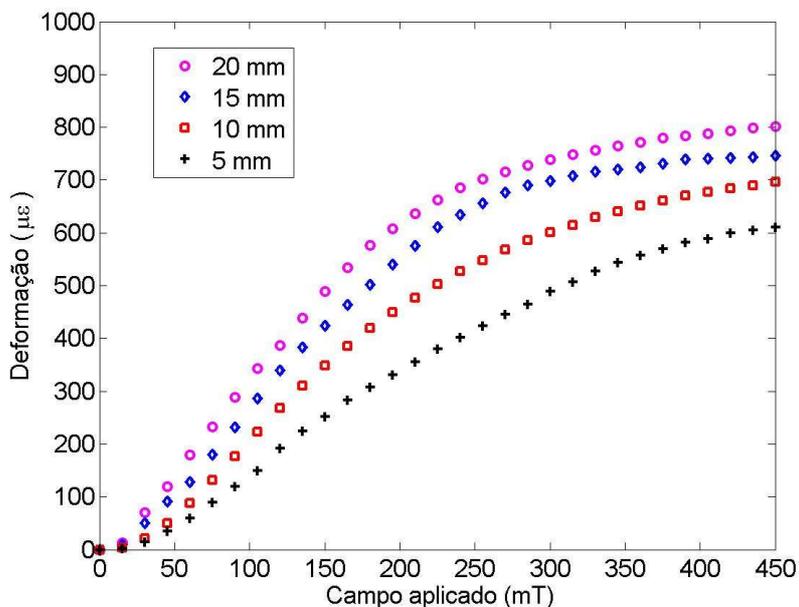


Figura 4-6. Compósitos magnetostriictivos, variando o comprimento, e com o mesmo valor de diâmetro.

Tabela 4-2. Resposta com relação à geometria dos compósitos cilíndricos magnetostriictivos.

| q | Campo magnético aplicado(mT) | Deformação ($\mu\epsilon$) | Sensibilidade ($\mu\epsilon/mT$) | Deformação máxima ($\mu\epsilon$) |
|------|------------------------------|------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 5,00 | 97 | 312 | 3,4 | 802 |
| 3,75 | 90 | 295 | 2,9 | 745 |
| 2,50 | 90 | 249 | 2,5 | 696 |
| 1,25 | 90 | 185 | 1,9 | 611 |

Os compósitos cilíndricos também foram submetidos a um gradiente de campo magnético, neste caso a deformação também diminuiu consideravelmente em relação à resposta ao campo uniforme. A tabela 4-3 apresenta os resultados obtidos, onde observamos que as reduções

encontradas estão na mesma faixa das encontradas com o Terfenol-D maciço.

Tabela 4-3. Resposta do compósito magnetostrictivo quando é submetido a um gradiente de campo e um campo uniforme.

| q | 250mT Gradiente(25mT/mm) ($\mu\epsilon$) | 250 mT Campo uniforme ($\mu\epsilon$) | Deformação Redução (%) |
|------|--|---|------------------------------|
| 5,00 | 500 | 702 | 29 |
| 3,75 | 420 | 655 | 36 |
| 1,50 | 390 | 548 | 29 |
| 1,25 | 300 | 424 | 28 |

Como descrito na literatura a deformação resposta do compósito pode ser aumentada quando as partículas dentro do compósito são orientadas previamente na direção do campo aplicado. Para a fabricação dos compósitos com partículas orientadas, o molde que contém a mistura da resina com as partículas, é colocado em um suporte de acrílico posicionado entre dois ímãs de Nd-Fe-B. As partículas foram orientadas ao longo da direção longitudinal do cilindro. Os ímãs de geometria 30x20x10 mm estão com os seus pólos opostos nos extremos do suporte. O campo produzido pelos ímãs medido no ponto médio onde está posicionando o compósito é de 90 mT. A figura 4-7 mostra a imagem obtida para o compósito com partículas orientadas e para compósitos com partículas sem orientação prévia.

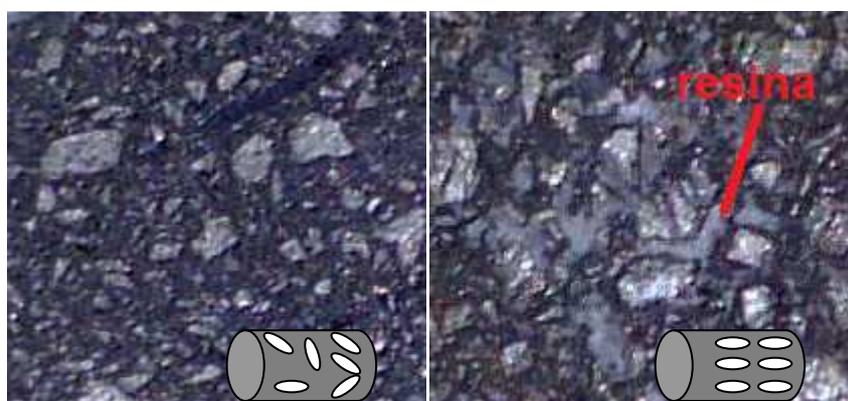


Figura 4-7. Imagem obtida com microscópio óptico. (a) Partículas sem orientação prévia. (b) Partículas orientadas no processo de cura.

A figura 4-8 mostra o comportamento de dois compósitos cilíndricos de 8 mm de comprimento e 10 mm de diâmetro fabricados, um com partículas orientadas e o outro com partículas sem orientação prévia. Nota-se que para o primeiro caso a deformação máxima é de $916 \mu\epsilon$, aumentando em 23 % com relação ao compósito no qual as partículas não foram orientadas. Neste caso a sensibilidade também teve um aumento de 22 % indo para $3,5 \mu\epsilon/\text{mT}$. A deformação máxima do compósito orientado quando é comparado com a deformação do material maciço com a mesma geometria tem diferença de 13%. Já a sensibilidade ainda ficou 25% abaixo da sensibilidade do Terfenol-D maciço que foi de $4,7 \mu\epsilon/\text{mT}$.

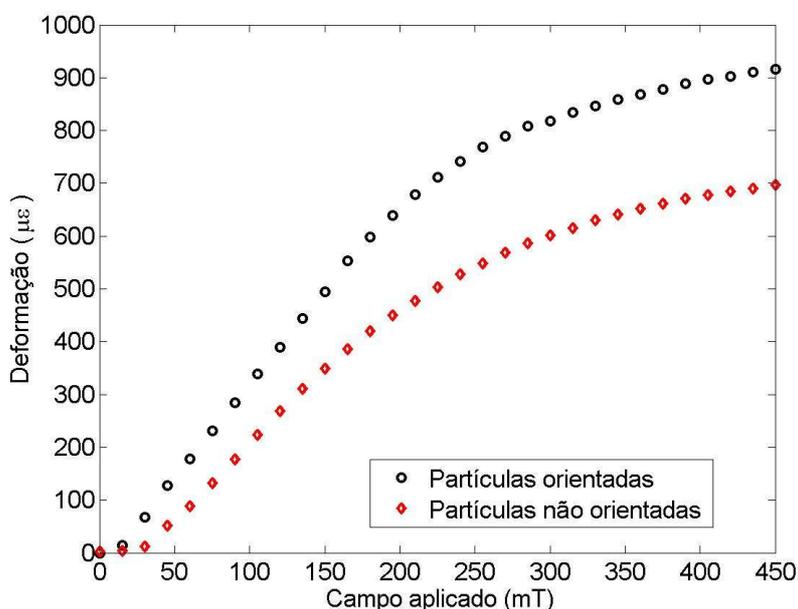


Figura 4-8. Compósitos magnetostrictivos com partículas com orientação prévia, e compósitos magnetostrictivos com partículas não orientadas.

De acordo com [40], compósitos de 10 mm de diâmetro x 25 mm de comprimento ($q=2,5$), nos quais as partículas foram orientadas com um campo de 100 mT é possível obter uma sensibilidade de $2,7 \mu\epsilon/\text{mT}$. Como foi mencionado inicialmente, a utilização dos compósitos magnetostrictivos vai depender da aplicação na qual seja requerida condições de campo magnético e geometria muito específicas, neste caso sem perda relevante de sensibilidade e mantendo a faixa de utilização.

Em todos os casos aqui apresentados o extensômetro foi colado na superfície do compósito.

Com o intuito de aumentar o efeito apresentado pelo material magnetostrictivo, iniciou-se a mistura de partículas de Nd-Fe-B nos compósitos. Neste caso notamos que a resposta diminui notavelmente, observando-se que as partículas de Nd-Fe-B apresentavam um comportamento característico, que decidimos analisar. Passamos então a introduzir somente partículas de Nd-Fe-B dentro de uma fibra óptica oca emendada à fibra com rede de Bragg, de forma que esta fosse atraída por um ímã e tencionasse a rede de Bragg. Foi desta idéia que surgiu o segundo tipo de sensor construído nesta tese, o sensor de força magnética e que será apresentado no capítulo a seguir.