

2. Materiais magnetostrictivos

Neste capítulo é descrito o fenômeno da magnetostricção, característico dos materiais ferromagnéticos. Este fenômeno será à base de um dos sensores propostos nesta tese.

2.1. Fenômeno da magnetostricção

O efeito da magnetostricção consiste na deformação de um material sobre a influência de um campo magnético externo. Trata-se de uma propriedade inerente ao material que não muda com o tempo. A deformação que se apresenta é independente do sentido do campo aplicado, ou seja, é unipolar e se manifesta com campos magnéticos em ambos os sentidos [14]. Os materiais magnetostrictivos experimentam também o efeito inverso, ou seja, ante uma deformação do material, um campo magnético é induzido, o que é conhecido como efeito Villari [15]. Outro efeito relacionado com os materiais magnetostrictivos é o efeito Wiedemann que acarreta uma torção no material ocasionada por um campo magnético helicoidal, ocorrendo também o efeito inverso, chamado efeito Matteucci [16].

A magnetostricção pode ser considerada positiva se, na presença de um campo magnético, o material se expande na direção do campo ou negativa, caso contrário. Em ambos os casos, o volume não varia porque na direção perpendicular, à deformação é produzida uma deformação proporcional de sinal contrário. Alguns efeitos magnetostrictivos implicam acoplamentos nas três direções do espaço é a natureza anisotrópica da magnetostricção. Assim, quando uma amostra desmagnetizada tem sua magnetização alinhada por um campo magnético, a deformação da amostra é anisotrópica [16]. A origem microscópica da magnetostricção pode ser explicada com base no modelo do acoplamento spin-órbita, que é a interação entre o spin do elétron e o seu movimento orbital ao redor do núcleo do átomo. Quando um campo magnético aplicado tenta reorientar a direção do spin eletrônico, a sua órbita precisa ser reorientada também.

Contudo a órbita, em alguns materiais está acoplada fortemente à rede o que modifica a distância inter-atômica do material levando a uma alteração nas dimensões do material sujeito ao campo magnético.

Nos materiais ferromagnéticos os momentos magnéticos se organizam por volumes, chamados domínios que contém grande quantidade de átomos, geralmente de 10^{12} - 10^{15} átomos por domínio. Os domínios são característicos dos materiais ferromagnéticos nos quais os momentos magnéticos estão orientados na mesma direção. De um modo geral, cada domínio comporta-se como um ímã, eles são separados por zonas de transição chamadas de paredes de domínio, onde a magnetização se afasta da orientação da magnetização do domínio e gradualmente, se aproxima da orientação da magnetização do domínio adjacente.

A variação das distâncias inter-atômicas acarreta uma modificação na configuração dos domínios magnéticos levando ao aumento ou à diminuição da dimensão na direção do campo magnético aplicado. No estado desmagnetizado, a orientação da magnetização dos domínios está distribuída de tal maneira que o material, como um todo, tenha magnetização nula. A figura 2-1 ilustra o comportamento dos domínios quando o campo externo é zero, e ao aplicar um campo magnético H_1 , onde os domínios tendem a se orientar e o comprimento L do material aumenta e a sua largura W diminui.

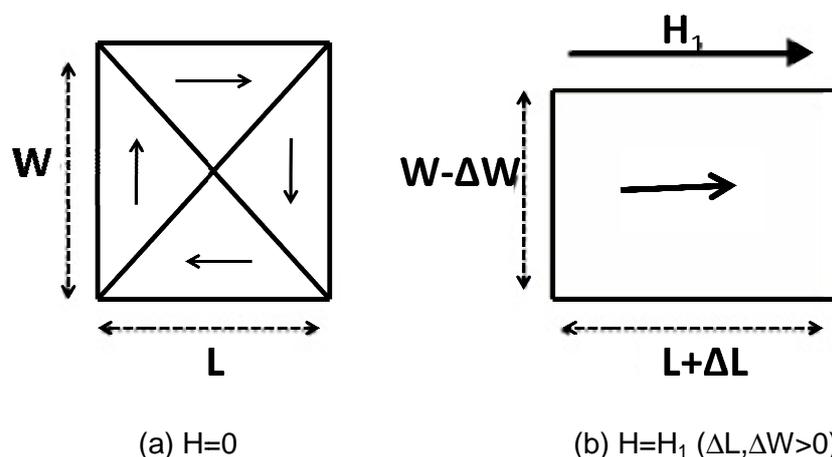


Figura 2-1. Comportamento dos domínios magnéticos (a) sem aplicar campo, (b) aplicando campo magnético.

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 muito 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. Quando o campo aumenta mais, os domínios que ainda não estão na direção do campo aplicado giram no sentido deste campo. É nesta etapa que 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. Os domínios são formados quando um material é resfriado abaixo da temperatura de Curie T_c , portanto o fenômeno da magnetostricção está ligado ao valor limite de T_c .

2.2. Materiais com 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, A. E. 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 10.000×10^{-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 3.000×10^{-6} , particularmente no composto TbFe₂ [14].

Este último composto apresenta uma elevada anisotropia magnética, ou seja, suas propriedades magnéticas dependem fortemente da direção em que são medidas. Esta anisotropia é compensada pela substituição parcial de Térbio por outra terra rara. Este novo material chamado de Terfenol- D, Tb_xDy_{1-x}Fe₂ onde $0,25 < x < 0,30$; 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 30×10^{-6} [17]. O nome deste material veio de **T**érbio, **F**erro, **N**aval **O**rdinance **L**aboratary e **D**isprósio. 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 1600×10^{-6} , a partir de campos magnéticos no valor de 0,2 T no espaço livre.

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 [18], 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 60.000×10^{-6} , mas tem uma resposta dinâmica inferior. Outros materiais que também estão em estudo são NiMnGa e a liga 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 [14,17].

Tabela 2-1. Deformação máxima e indução de saturação de diferentes materiais magnetostrictivos.

Material	Densidade (g /cm ³)	Temperatura de Curie (K)	Indução de Saturação (T)	Deformação máxima (10 ⁻⁶)
Fe	7,86	633	2,15	-14
Ni	8,9	1043	0,61	-50
Co	8,9	1393	1,79	-93
50%Co-50%Fe	8,25	773	2,45	87
50%Ni-50%Fe		773	1,60	19
Dy	8,56	77		6000
Tb	8,33	77		3000
TbFe ₂ (Terfenol)	9,06	703	2,5	2630
(Terfenol-D)	9,21	653	1,0	1620

Comercialmente o Terfenol-D pode ser encontrado nas formas maciço, filmes e pó. Este material, que é em geral usado na detecção de força, movimento e campo magnéticos foi inicialmente utilizado no formato maciço. A partir de 1994, com o trabalho de Sandlund [19], iniciou-se o estudo de materiais compósitos com magnetostricção gigante (GMC). Este tipo de compósito consiste em partículas de Terfenol-D imersas em uma matriz não-metálica. O Terfenol-D maciço é um material frágil, caro e sujeito a oxidação, além de apresentar limitação na faixa de frequência de operação (1kHz). Os compósitos magnetostrictivos oferecem algumas vantagens em relação ao material maciço. A vantagem mais tangível é a maior durabilidade do material, já que quando as partículas são introduzidas em uma matriz não-metálica, resultando em um material menos frágil. Outra importante característica é que a matriz não metálica isola o material protegendo-o da oxidação. Por outro lado, o processo de manufatura é mais simples, e com um custo menor. Com estes compósitos magnetostrictivos consegue-se frequências de operação de até 100 kHz [20].

Inicialmente os estudos com compósitos magnetostrictivos renderam poucas publicações devido ao fato de apresentarem redução da magnetização e da magnetostricção em relação ao maciço de Terfenol-D [21]. Entre os anos 1997-1999 foram estudados compósitos fabricados com matrizes metálicas. O uso deste tipo de matrizes mostrou que as deformações apresentadas requeriam de campos aplicados dez vezes maiores que os compósitos elaborados com matrizes não-metálicas. Na

mesma época, T. Duenas [22] fez um estudo mostrando que matrizes de resinas com baixa viscosidade misturadas com as partículas de Terfenol-D produzem deformações comparáveis com a apresentada pelo material na forma maciça e com porcentagem de volume de partículas de até 50%. A partir do trabalho de T. Duenas, tem sido descritos estudos de compósitos magnetostrictivos nos quais se obtém valores de magnetostricção máxima comparáveis com os valores apresentados pelo Terfenol-D maciço, com frequências de operação elevadas. Isto é conseguido variando-se o tamanho e o volume das partículas, e utilizando-se diferentes valores de campo para a orientação prévia das partículas [20].

Nesta pesquisa foi utilizado o Terfenol-D em formato maciço e em pó comercializado por Gansu Tianxing Rare Earth Functional Materials Co, Ltda, o qual tem um custo cerca de 10 vezes menor do que o cobrado pela ETREMA, comercializadora oficial do Terfenol-D.