

1

INTRODUÇÃO

1.1.

Introdução ao Magnetismo

Os materiais magnéticos vêm desempenhando um papel importante e contribuído de forma vital na história das civilizações e no seu desenvolvimento tecnológico. Todas as substâncias sejam elas sólidas, líquidas ou gasosas mostram alguma característica magnética, em todas as temperaturas. Dessa forma, o magnetismo é uma propriedade básica de qualquer material [1].

O magnetismo é uma propriedade cuja natureza é de origem elétrica, e está relacionada com uma carga em movimento. As propriedades magnéticas dos materiais têm sua origem na estrutura eletrônica dos átomos. Do ponto de vista clássico, são de dois tipos os movimentos, associados ao elétron que podem explicar a origem dos momentos magnéticos: o momento angular orbital do elétron, e o momento angular do "spin" do elétron [2].

Alguns materiais apresentam a capacidade de atração e repulsão entre eles, isto pode estar relacionado às propriedades magnéticas. As propriedades básicas observadas em materiais magnéticos podem ser explicadas pela existência de dois pólos diferentes no material. A esses pólos se dão os nomes de pólo norte e sul. A esta configuração de dois pólos dá-se o nome de "dipolo magnético".

As propriedades magnéticas dos materiais têm sua origem nos átomos, pois quase todos os átomos são dipolos magnéticos naturais e podem ser considerados como pequenos ímãs, com pólos norte e sul. Isto é algo que decorre de um somatório de dipolos magnéticos intrínsecos devidos ao spin do elétron, pois este movimento cria um dipolo magnético próprio [3]. Sabe-se que dois dipolos próximos e de igual intensidade anulam seus efeitos se estiverem alinhados anti-paralelamente e somam seus efeitos se estiverem alinhados paralelamente (figura 1), portanto apenas os elétrons desemparelhados é que contribuem para o magnetismo.

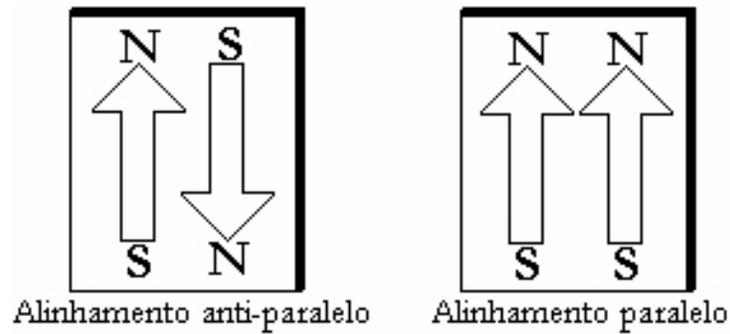


Figura 1: Spin up e Spin down em um alinhamento anti-paralelo, somente Spin up em um alinhamento paralelo.

1.2.

Unidades e Termos Magnéticos

Quando algum material é colocado em um campo magnético externo \mathbf{H} , os momentos magnéticos atômicos individuais no material contribuem para a sua resposta ao campo magnético \mathbf{M} , a indução magnética \mathbf{B} é descrita abaixo [4]:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (1)$$

onde μ_0 é a permeabilidade magnético do vácuo. O campo magnético externo tende a alinhar os momentos magnéticos dipolares (tanto induzidos como permanentes) dentro do material, nesta situação o material é dito magnetizado. Descreve-se um material magnetizado por sua magnetização \mathbf{M} , que é definida como a soma de todos os momentos magnéticos elementares, por unidade de volume. Para materiais do tipo paramagnéticos e ferromagnéticos, \mathbf{M} está na mesma direção de \mathbf{H} ; para materiais diamagnéticos, \mathbf{M} é contrário a \mathbf{H} . Para materiais paramagnéticos e diamagnéticos, na maioria das situações a magnetização é proporcional ao campo magnético aplicado. A magnetização nos materiais varia, desde diamagnético até ferromagnético.

A magnetização pode ser representada da seguinte forma:

$$\mathbf{M} = \sum_i^n \frac{m_i}{V} \quad (2)$$

onde n corresponde ao número total de momentos magnéticos m , e V é o volume total que eles ocupam [5,6]. Na prática é mais apropriado definir a magnetização dividida pela massa m em vez do volume.

$$\sigma = \frac{nm}{m} \quad (3)$$

A resposta do material a um campo aplicado, caracterizada pelo comportamento da magnetização, é representada pela susceptibilidade magnética (χ), definida por $\chi = M/H$. E esta propriedade é importante, pois descreve o comportamento magnético dos materiais. Dividindo a susceptibilidade magnética pela densidade do material ρ , obtemos a susceptibilidade por massa, $\kappa = \frac{\chi}{\rho}$. No quadro 1 apresentamos as definições e unidades mais importantes das quantidades magnéticas [6]. A permeabilidade magnética no material é definida como $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$.

Quadro 1: Quantidades e unidades magnéticas [6].

Termos Magnéticos	Símbolo	SI UNIDADES
Indução Magnética	B	T
Campo Magnético	H	A. m ⁻¹
Magnetização	M	A. m ⁻¹
Magnetização por Massa	σ	A. m ² .Kg ⁻¹
Momento Magnético	m	A. m ²
Susceptibilidade Magnética	χ	-----
Susceptibilidade por Massa	κ	m ³ .Kg ⁻¹
Permeabilidade Magnética do Vácuo	μ_0	H.m ⁻¹
Permeabilidade Magnética no Material	μ	H.m ⁻¹

A=Ampères; g=Gramas; H=Henry; Kg=Kilograma; m=Metro; T=Tesla

1.3.

Tipos de Comportamento Magnético

Como já havíamos dito antes, a resposta do material a um campo aplicado pode ser representada pela susceptibilidade magnética e também pela permeabilidade, pois são parâmetros importantes que descrevem o comportamento magnético dos materiais. Em alguns casos, como nos materiais diamagnéticos, a susceptibilidade é pequena e negativa. Em outros casos a relação entre magnetização e campo aplicado não é linear, de modo que a susceptibilidade magnética varia com a intensidade de campo magnético [7]. Dependendo da origem microscópica de sua magnetização e das interações internas, os materiais são comumente classificados em uma das seguintes categorias representada no quadro 2.

Quadro 2: Os principais tipos de comportamentos magnéticos conhecidos [8].

Material	χ	μ / μ_0
Paramagnético	>0	>1
Diamagnético	<0	<1
Ferromagnético	$\gg 0$	$\gg 1$
Ferrimagnético	$\gg 0$	$\gg 1$
Antiferromagnético	>0	>1

Os materiais paramagnéticos [2, 5-6] são materiais cujos átomos possuem momentos de dipolo magnéticos permanentes. De acordo com a figura 2 na ausência de campo aplicado, os momentos de dipolos estão inicialmente orientados aleatoriamente no espaço, portanto, a magnetização resultante é zero. Quando um campo magnético externo é aplicado ao material, os dipolos tendem a alinhar-se com o campo, sendo que o vetor soma dos momentos de dipolo individuais não é mais nulo. O campo dentro do material tem agora dois componentes: o campo aplicado e o campo induzido proveniente da magnetização ou orientação dos dipolos.

A agitação térmica dos átomos tende a perturbar o alinhamento dos dipolos e, conseqüentemente, a magnetização diminui com o aumento da temperatura. A magnetização alcança o seu valor máximo quando todos os dipolos estão alinhados.

Quando o campo externo é removido da amostra paramagnética, a agitação térmica faz com que os momentos de dipolo magnético tenham

novamente direções aleatórias. As forças magnéticas entre os átomos são muito fracas para manter o alinhamento. Os materiais paramagnéticos apresentam valores reduzidos e positivos de susceptibilidade magnética, $10^{-5} < \chi < 10^{-3}$.

Os efeitos diamagnéticos [2,5-6] ocorrem em todos os materiais. Entretanto, por ser um efeito muito mais fraco que o paramagnetismo (figura 2), só pode ser facilmente observado em materiais que não sejam paramagnéticos, ou seja, cujos momentos orbitais e de spin se somam vetorialmente, resultando em momento total nulo. Os diamagnéticos são caracterizados pelo fato dos átomos ou moléculas não produzirem um momento magnético resultante. Os momentos magnéticos dos elétrons no interior de cada um dos átomos se anulam, de modo que o momento magnético resultante é zero. Nessas circunstâncias, quando aplicamos um campo magnético, de acordo com a Lei de Lenz, as correntes induzidas são tais que se opõem ao crescimento do fluxo aplicado. Assim, os momentos magnéticos induzidos nos átomos terão sentido oposto ao campo externo aplicado (Figura 2), apresentando valores reduzidos e negativos de susceptibilidade magnética, $-10^{-6} < |\chi| < -10^{-5}$.

Os efeitos ferromagnéticos assim como os paramagnéticos ocorrem em materiais cujos átomos possuam momentos de dipolo magnéticos resultantes. O que diferencia os materiais ferromagnéticos dos paramagnéticos é que nos primeiros existe uma forte interação entre momentos de dipolo atômicos vizinhos que os mantêm alinhados, mesmo quando o campo magnético externo é removido. Se isto ocorre ou não, depende da intensidade dos dipolos atômicos e da separação entre os átomos do material. Nos materiais ferromagnéticos existe forte interação entre os spins. O resultado é tal que um grande número de spins alinha-se numa mesma direção (figura 2). Mesmo à temperatura ambiente, o alinhamento é tão forte que as vibrações térmicas não podem destruí-lo. Os materiais ferromagnéticos familiares em temperatura ambiente incluem os elementos ferro, cobalto e níquel. Os materiais ferromagnéticos menos familiares, alguns exibindo ferromagnetismo somente em temperaturas muito abaixo da temperatura ambiente, são compostos de terras raras como, por exemplo, o gadolínio ou o disprósio. A temperatura a partir da qual um material ferromagnético passa a ser paramagnético é denominada temperatura de Curie, a temperatura de Curie do ferro, por exemplo, é de 1043 K, acima da qual ele é paramagnético. A temperatura de Curie do metal gadolínio é 289 K, ou seja, em temperatura ambiente o gadolínio é paramagnético, a temperatura de Curie do

níquel é 627 K. Abaixo, no quadro 3, estão alguns materiais ferromagnéticos e sua respectiva temperatura de Curie.

Quadro 3: Alguns materiais ferromagnéticos e sua respectiva temperatura de Curie [9].

Material Ferromagnético	Temperatura de Curie (K)
Cromel	436
Níquel	627
Ferro	1043
Gadolínio	289

A resposta ao campo aplicado nos materiais ferromagnéticos é considerável. O campo magnético total (soma do campo aplicado no material com o campo induzido) no interior desse material pode ser 10^3 ou 10^4 vezes o campo aplicado. Tanto a permeabilidade magnética quanto a susceptibilidade magnética de um material ferromagnético não são constantes, apresentando valores altos e positivos de susceptibilidade magnética $10^{-2} < \chi < 10^6$. Nem o campo total nem a magnetização crescem linearmente com o campo aplicado, mesmo para pequenos valores deste campo aplicado.

Em materiais ferrimagnéticos [2,5-6] os átomos possuem momentos de dipolo permanentes que interagem entre si, causando alinhamento antiparalelo e desigual, e na presença de um campo magnético externo alinham-se na direção e sentido do campo aplicado, apresentando valores altos e positivos de susceptibilidade magnética $10^{-2} < \chi < 10^6$. Exemplo: ferrita Fe_2O_3 .

Os materiais ferrimagnéticos possuem uma propriedade cristalina, por exemplo, as ferritas que são certos óxidos duplos de ferro e outro metal, são divididas cristalograficamente em quatro subgrupos: espinélio, magnetoplumbita, granadas e perovskita. As ferritas magnéticas distribuem-se principalmente dentro de dois grupos com estrutura cristalina diferentes.

- Cúbica – Estas têm a estrutura molecular geral $\text{MO.Fe}_2\text{O}_3$, onde M é um cátion metálico de valência 2+. A ferrita de cobalto $\text{CoO.Fe}_2\text{O}_3$ é classificada magneticamente como “hard”, mas todas as outras ferritas cúbicas são magneticamente “soft”.
- Hexagonal – A mais importante neste grupo é a ferrita de bário $\text{BaO.Fe}_2\text{O}_3$ que é classificada magneticamente como “hard”.

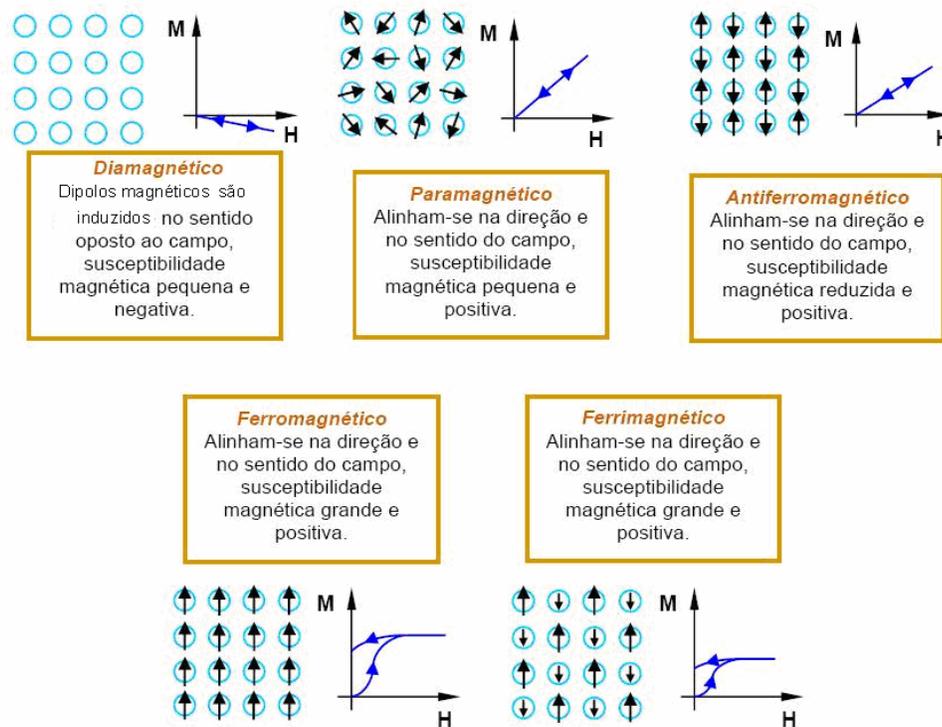


Figura 2: Orientação dos dipolos magnéticos em campo nulo e temperatura ambiente, e curvas de M versus H para as diferentes classes de materiais magnéticos [6].

1.4.

O Conceito de Domínio

Quando Ampère descobriu que os efeitos magnéticos também poderiam ser produzidos por correntes ele propôs a teoria de que as propriedades magnéticas de um corpo fossem originadas por um grande número de minúsculas correntes circulares dentro desse corpo [10]. O campo magnético total no material seria, então, a soma do campo gerado pela corrente externa com o campo gerado por estas correntes microscópicas. Mais tarde, foi desenvolvida a teoria dos domínios. Os elétrons apresentam uma propriedade chamada spin que faz com que eles se comportem como pequenos ímãs. Nos materiais magnéticos, o campo magnético total devido aos spins dos elétrons é zero, seja porque eles se anulam naturalmente, seja porque estão orientados de forma aleatória, isto acontece por conta do princípio de minimização da energia. Em materiais magnéticos, como o ferro e o aço, os campos magnéticos dos elétrons se alinham formando regiões que apresentam magnetismo espontâneo. Essas regiões são chamadas de domínios.

Em uma peça não-magnetizada de um material magnético os domínios estão distribuídos de forma aleatória e o campo magnético total em qualquer direção é zero, como mostrado na figura 3.

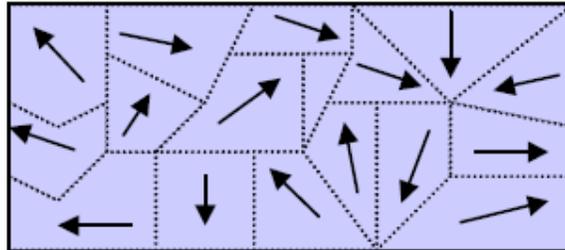


Figura 3: Domínios magnéticos desalinhados.

Quando esse material sofre a ação de um campo magnético externo, os domínios que estão aproximadamente alinhados com o campo aplicado crescem à custa dos outros domínios. Se o campo externo aplicado for suficientemente intenso, todos os domínios se orientarão nessa direção (figura 4) e, daí em diante, qualquer aumento do campo externo não causará nenhum aumento na magnetização da peça. Nesse caso diz-se que o material atingiu a saturação.

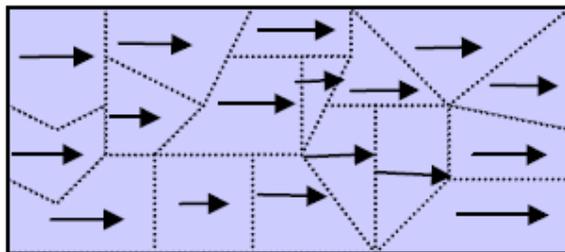


Figura 4: Domínio magnético alinhados.

Quando o campo magnético externo é removido, o grau de alinhamento diminui e o campo no interior do material cai para um valor, não necessariamente igual ao anterior, ou seja, a remoção do campo magnético externo faz com que alguns domínios voltem a ficar desalinhados.

1.5.

Curva de Histerese Magnética

Uma curva típica experimental é a da magnetização em função do campo magnético aplicado apresentado na figura 5, que mostra a história passada da magnetização de uma amostra de um material ferromagnético. Iniciamos com a amostra desmagnetizada. Aplicando um campo crescente H , a magnetização cresce. As magnetizações dos domínios vão se alinhando, até todos estarem alinhados chegando à magnetização de saturação, M_s . Nesse ponto, a amostra está saturada. Essa primeira curva normalmente recebe a denominação de curva de primeira magnetização (figura 5). Quando diminuimos a intensidade do campo H observamos que quando a curva toca o eixo das ordenadas a magnetização do material não é nula. O que se explica pelo fato de um grande número de domínios estarem ainda alinhados. Diz-se que nesse ponto a amostra possui uma magnetização remanente. Se invertemos o sinal do campo externo, os domínios se reorientam até que a amostra fique desmagnetizada no ponto H_c ; onde a magnetização é zero. Esta propriedade, onde a magnetização é zero e o campo aplicado é diferente de zero chamamos de coercividade do material. O campo coercivo H_c é o campo necessário para que a magnetização atinja o valor zero depois de magnetizada. Continuando a aumentar negativamente o campo aplicado, observamos que o material fica com a magnetização na direção oposta devido a mudança de sentido do campo externo, só que agora como podemos verificar na figura 5 a magnetização de saturação esta no sentido oposto. Depois de saturado no sentido inverso ao inicial, aumentando o campo aplicado aumentamos a magnetização até atingir o valor de saturação positiva, obtendo então a curva total apresentada na figura 5, denominada curva de magnetização que apresenta histerese. O fenômeno de histerese é muito comum em alguns materiais e, conseqüentemente, permite a magnetização permanente [11].

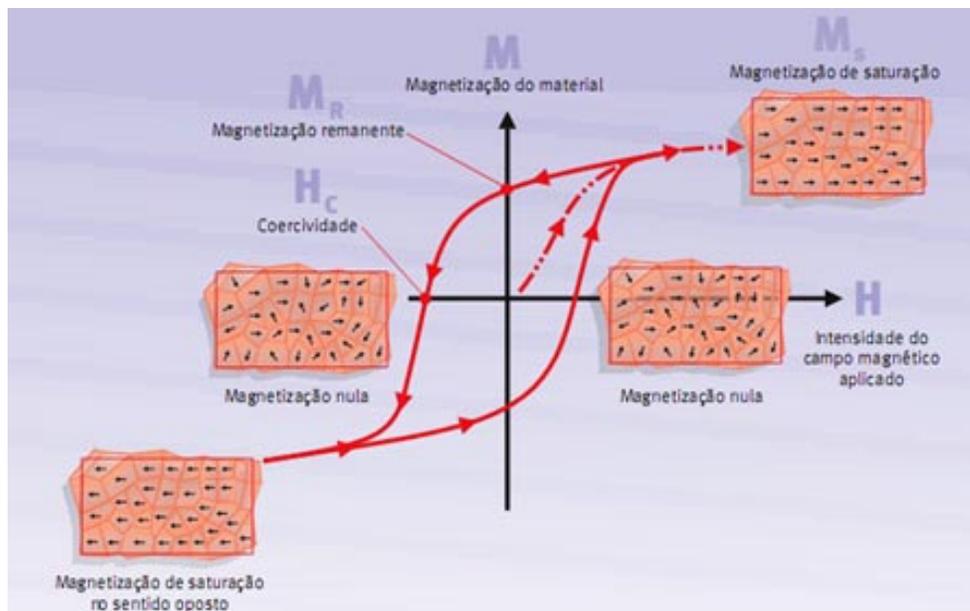


Figura 5: Ilustração da curva de histerese magnética [12].

1.6.

Superparamagnetismo

Em partículas magnéticas muito pequenas (aproximadamente 10 nm para alguns materiais) a direção de magnetização muda por agitação térmica, apresentado então um comportamento dito superparamagnético. Esta denominação é dada pelo fato destes sistemas apresentarem propriedades análogas aos paramagnéticos [13] só que com momento magnético muito maior. Quando as dimensões do material magnético diminuem para um tamanho crítico D_c , neste caso a região do domínio diminui. Como consequência, apenas um monodomínio é formado, ocorrendo então a magnetização espontânea em toda a partícula. O material magnético permanece espontaneamente magnetizado em uma só direção, o que leva à formação de um momento magnético gigante. Com o tamanho da partícula magnética em torno deste valor D_c (figura 6) a coercividade alcança um valor máximo. Em partículas com o tamanho inferior a D_c , o momento magnético torna-se muito influenciado pela flutuação térmica. Para partículas magnéticas abaixo do tamanho D_{sp} , o efeito da flutuação térmica é tão forte que desmagnetiza espontaneamente a partícula, sendo a sua coercividade zero. Estas partículas são chamadas de superparamagnéticas [14].

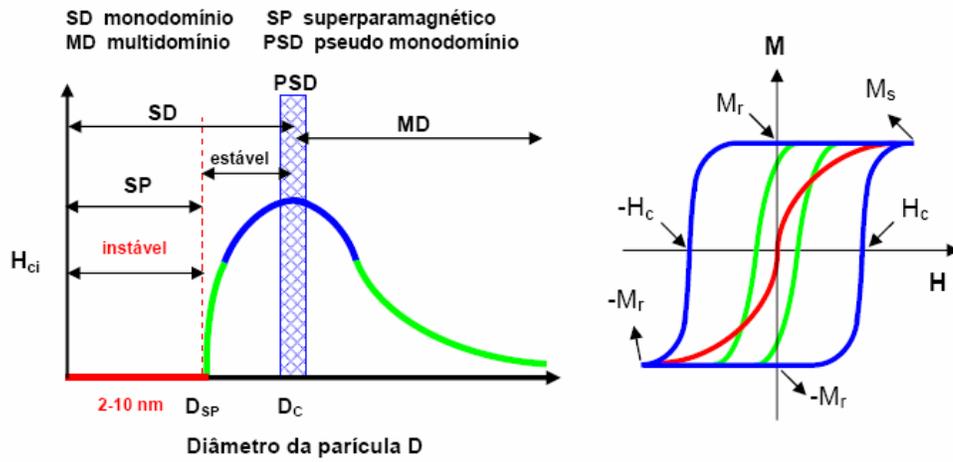


Figura 6: Variação da coercividade intrínseca com o diâmetro das partículas e, as curvas de histerese correspondente [14].