

**Uniube**

UNIUBE – CAMPUS VIA CENTRO – Uberlândia/MG

Cursos de Engenharia Elétrica

Disciplina: Materiais Elétricos

Aula 3

Materiais Elétricos e Aplicações

Revisão 1, de 08/04/2024

Prof. João Paulo Seno

joao.seno@uniube.br

1

**Uniube**

Referência para esta aula

- Capítulo 3, “Materiais Magnéticos e Aplicações”, páginas 51 a 62, do livro ROCHA, M.F. et al. Materiais Elétricos. Porto Alegre: SAGAH, 2018. Disponível na Biblioteca A, acessível via AVA.

2

Introdução

- Os materiais magnéticos são utilizados em alto-falantes, motores e geradores elétricos, e outros equipamentos. Utiliza-se o Ferro, pois este material pode ser magnetizado em temperatura ambiente;
- Existem vários outros materiais além do Ferro, cujas propriedades permitem a magnetização e a desmagnetização rápida (exemplo: os materiais utilizados na fabricação de discos rígidos – *hard disks* – fitas magnéticas, cartões de banco,...)
- Há ainda materiais que mantêm sua magnetização somente durante a presença de um campo magnético externo.

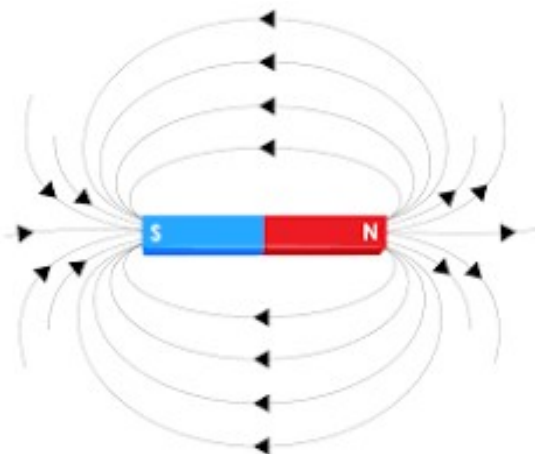
3

Características magnéticas dos materiais

- Não podemos simplesmente dizer que a propriedade dos materiais de atrair ou repelir outros materiais está associada ao fenômeno magnético, pois esta não é uma propriedade apenas dos materiais magnéticos, que também pode ser de origem eletrostática!
- O fenômeno do magnetismo é causado por átomos e elétrons em movimento, que nesta condição, são capazes de gerar um campo magnético;
- Além disso, as propriedades magnéticas dos materiais podem ser causadas pelos momentos dipolares magnéticos. O momento magnético de um corpo é o resultado da contribuição dos momentos individuais de cada dipolo elementar.
- O fenômeno magnético é bipolar, ou seja, sempre haverá dois polos magnéticos, separados por uma distância finita, e chamados de Norte e Sul. Há também o centro, região de equilíbrio.
- Por convenção, as linhas do campo magnético vão do NORTE para o SUL.

4

Linhas de campo magnético



5

Indução eletromagnética

Um solenoide percorrido por uma corrente gera um campo magnético externo com uma determinada intensidade. Se, em seguida, colocarmos em seu interior uma barra de ferro desmagnetizada, o campo magnético externo torna-se mais forte por causa dessa barra. Ou seja, a composição do campo gerado pelo solenoide com o campo associado à barra intensifica o campo magnético externo percebido. Esse fenômeno é chamado de Indução Magnética ou Densidade de Fluxo Magnético e é denominado pela letra **B**. Ou seja, a Densidade de Fluxo Magnético vai ser a soma do campo magnético gerado pelo solenoide **H** mais o campo gerado pela magnetização da barra.

Por outro lado, a Magnetização ou Intensidade de Magnetização (**M**) será o momento magnético induzido. Assim,

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

Onde μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo e é igual a $4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$ (Tesla vezes metros por Ampère). A unidade da indução magnética (**B**) é dada por Wb/m^2 (Weber por metro ao quadrado) ou T (Tesla), e as do campo aplicado (**H**) e da magnetização (**M**), por A/m (Ampère por metro).

6

Permeabilidade magnética

Quando a intensidade do campo magnético aumenta devido a um material colocado em um campo magnético, esse acréscimo pode ser encontrado pela razão entre a indução magnética e o campo aplicado, chamada de permeabilidade magnética, ou seja:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2)$$

Costuma-se, também, definir uma permeabilidade magnética relativa, que é dada por:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{B}{B_{\text{ext}}} \quad (3)$$

Pela definição, verificamos que a permeabilidade magnética relativa é adimensional.

As permeabilidades μ e μ_r expressam a facilidade com que um campo magnético externo H induz um campo magnético B em um determinado material.

7

Susceptibilidade magnética

Quando um material é magnetizado, a intensidade de magnetização é proporcional ao campo aplicado. Assim, é comum definir-se uma susceptibilidade magnética como a razão entre o momento dipolar magnético e a intensidade de campo magnético:

$$\chi_m = \frac{M}{H} \quad (4)$$

A susceptibilidade magnética é adimensional. Normalmente utiliza-se na quantificação em materiais com respostas magnéticas fracas.

8

Características magnéticas dos materiais

- Quando havíamos estudado os efeitos do Campo Elétrico sobre os materiais, identificamos comportamentos que os classificaram em: condutores e isolantes ou dielétricos.
- Da mesma forma, podemos identificar comportamentos diferentes dos materiais quando submetidos a campos magnéticos. Diferentes propriedades magnéticas vão classificar os materiais de forma diferente.
- Tais propriedades são:
 - Diamagnetismo;
 - Paramagnetismo;
 - Ferromagnetismo;
 - Antiferromagnetismo;
 - Ferrimagnetismo.

9

Diamagnetismo

O diamagnetismo é um fenômeno resultante da reação dos elétrons de um material a um campo magnético externo. Quando o campo magnético externo é retirado, ele desaparece. Isso acontece em todos os materiais; porém, normalmente é muito fraco e, se esse material possuir qualquer uma das outras características, não será possível observá-lo. O diamagnetismo é um efeito de reação que acontece quando um campo magnético externo age sobre os elétrons de um determinado material, criando desequilíbrios que permitem a formação de pequenos dipolos em seu interior, em oposição ao campo externo atuante. Essa reação cria uma susceptibilidade negativa diminuta de aproximadamente -10^{-6} . Os materiais que não possuem as outras características e somente o diamagnetismo são chamados materiais diamagnéticos.

10

Paramagnetismo

O paramagnetismo é um efeito que acontece somente nos materiais que possuem baixa susceptibilidade magnética positiva quando submetidos a um campo magnético. Esses materiais são chamados de materiais paramagnéticos. Da mesma forma que o diamagnetismo, o paramagnetismo desaparece quando o campo magnético é retirado. O magnetismo nos materiais paramagnéticos é muito fraco e a susceptibilidade magnética neles varia entre 10^{-6} a 10^{-2} (SMITH; HASHEMI, 2012, p. 607). A Tabela 1 mostra as susceptibilidades de alguns materiais à temperatura de 20 °C.

11

Paramagnetismo

Tabela 1. Susceptibilidades magnéticas de alguns elementos

Elemento Diamagnético	Susceptibilidade Magnética (x 10⁻⁹)	Elemento Paramagnético	Susceptibilidade Magnética (x 10⁻⁶)
Cádmio	- 0,18	Alumínio	+ 0,65
Cobre	-0,086	Cálcio	+ 1,10
Prata	- 0,20	Oxigênio	+ 106,2
Estanho	- 0,25	Platina	+ 1,10
Zinco	-0,157	Titânio	+ 1,25

Fonte: Adaptada de Smith e Hashemi (2012, p. 607).

12

Paramagnetismo

Nos materiais paramagnéticos, os momentos dipolares magnéticos totais existentes são diferentes de zero; entretanto, suas orientações aleatórias fazem com que o campo magnético resultante seja zero. Quando um campo externo é aplicado, ele pode alinhar alguns dipolos e fazer com que o material apresente um campo magnético diferente de zero, que desaparece quando o campo externo é retirado, orientado no mesmo sentido do campo externo. Como esse efeito depende do alinhamento de dipolos que estão alinhados aleatoriamente, o aumento de temperatura causa uma diminuição desse efeito.

13

Ferromagnetismo

Existem materiais, principalmente os metálicos, que possuem momentos magnéticos mesmo na ausência de campos externos. O ferromagnetismo pode aparecer, também, quando o material é exposto a um campo magnético externo e, ao contrário dos materiais diamagnéticos e paramagnéticos, ao se retirar o campo magnético externo, a magnetização permanece. Esses materiais, quando expostos a um campo externo, podem produzir fortes campos magnéticos, com susceptibilidades bastante altas, da ordem de 10^6 , no mesmo sentido do campo externo. Materiais como o ferro, o cobalto, o níquel, o disprosio e o gadolínio são exemplos de ferromagnéticos ou magnéticos.

14

Antiferromagnetismo

Existem materiais cujos dipolos magnéticos, quando expostos a um campo magnético, se alinham na direção contrária ao campo externo. Esses materiais são chamados de antiferromagnéticos. Exemplos desses materiais são o cromo e o manganês sólidos, na temperatura ambiente. A susceptibilidade desses materiais é da mesma ordem de valores dos materiais paramagnéticos.

15

Ferrimagnetismo

Alguns materiais possuem magnitudes diferentes de seus momentos magnéticos. Esses momentos podem se alinhar de maneira antiparalela, como mostrado na Figura 1, letra c. Quando isso acontece, ocorre um momento resultante em uma determinada direção e a magnetização é permanente. Alguns materiais cerâmicos apresentam essa propriedade e são chamados de materiais ferrimagnéticos, como, por exemplo, as ferritas. Uma das ferritas mais conhecidas é a magnetita (Fe_3O_4), chamada de pedra imã.

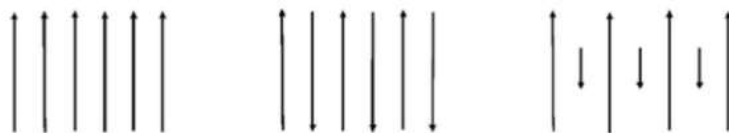


Figura 1. Alinhamento dos dipolos magnéticos para (a) ferromagnetismo, (b) antiferromagnetismo e (c) ferrimagnetismo.

Fonte: Smith e Hashemi (2012, p. 611).

16

Ferromagnetismo x Ferrimagnetismo

As propriedades magnéticas do ferrimagnetismo e do ferromagnetismo são semelhantes. O que os diferencia é a origem do fenômeno magnético. A susceptibilidade dos materiais ferrimagnéticos é da mesma ordem de valores dos materiais ferromagnéticos.

17

Efeito da temperatura nos materiais magnéticos

Nesta seção vamos examinar a sensibilidade dos materiais magnéticos à temperatura. Os materiais diamagnéticos não apresentam temperatura crítica, ou seja, uma temperatura em que deixem de ser diamagnéticos.

Com relação aos materiais paramagnéticos, a lei de Curie estabelece que a magnetização é inversamente proporcional à temperatura e diretamente proporcional ao módulo do campo magnético externo:

$$M = C \frac{B_{ext}}{T} \quad (5)$$

Onde M é a intensidade de magnetização, C é a constante de Curie, B_{ext} é o módulo da indução magnética causada pelo campo externo e T , a temperatura em Kelvins.

18



Uniube

Efeito da temperatura nos materiais magnéticos

Essa lei é experimental e aproximada. Vale para valores pequenos de $\frac{B_{ext}}{T}$. Mas, intuitivamente, vemos que, quando o campo externo aumenta o

alinhamento dos momentos dipolares, a magnetização aumenta, e, quando a temperatura aumenta, a magnetização cai.

Nos materiais ferromagnéticos, qualquer temperatura acima de $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, ou zero Kelvin, faz com que os seus dipolos magnéticos se desalinhem e os momentos magnéticos se tornam aleatórios, diminuindo sua capacidade de magnetização. Desse modo, acima de uma determinada temperatura, temperatura de Curie, o ferromagnetismo some completamente e o material fica somente com a propriedade paramagnética. Excedida essa temperatura, se o material for resfriado para uma temperatura abaixo da temperatura Curie, as propriedades ferromagnéticas voltam. A Tabela 2 mostra a temperatura de Curie para alguns materiais ferromagnéticos.

19



Uniube

Efeito da temperatura nos materiais magnéticos

Tabela 2. Temperatura de Curie de alguns materiais ferromagnéticos

Material	Temperatura de Curie
Ferro (Fe)	770 °C
Cobre (Co)	1.123 °C
Níquel (Ni)	358 °C

Fonte: Adaptada de Smith e Hashemi (2012, p. 611).

20

**Uniube**

Efeito da temperatura nos materiais magnéticos

Os materiais ferrimagnéticos também possuem a magnetização reduzida com a temperatura, de uma forma semelhante à redução dos ferromagnéticos, e possuem uma temperatura crítica (temperatura de Curie).

Os materiais antiferromagnéticos também possuem as propriedades magnéticas reduzidas com o aumento da temperatura e possuem uma temperatura crítica, chamada de temperatura de Néel.

21

**Uniube**

Aplicações dos materiais magnéticos

Ao analisar as aplicações dos materiais magnéticos, existem dois conceitos que são muito importantes. São os conceitos de materiais magnéticos moles e duros. O termo mole significa que o material se magnetiza ou desmagnetiza facilmente. O termo duro significa que suas propriedades permanecem, ou seja, seu magnetismo é permanente.

22



Aplicações dos materiais magnéticos

Os materiais magnéticos moles reagem à presença de campos magnéticos. Eles são altamente magnetizados na presença de pequenos campos magnéticos. Da mesma forma, sua desmagnetização exige, também, pequenos campos.

Esse comportamento permite sua utilização em aplicações envolvendo variações contínuas na direção da magnetização, como por exemplo, em transformadores, geradores e motores. Por isso, é comum encontrar, nesses elementos, ferro puro, ferritas, aço, etc.

23



Aplicações dos materiais magnéticos

Os materiais magnéticos duros são magnetizados durante a sua fabricação, e o magnetismo deve ser mantido mesmo depois que o campo de magnetização, que deve ser forte, for retirado. A resistência à desmagnetização é muito grande. Essa propriedade permite sua utilização em aplicações tais como fones de ouvido, alto-falantes e refrigeradores.

24

Aplicações dos materiais magnéticos

A Figura 2 mostra uma comparação entre as curvas de magnetização dos materiais magnéticos duros e moles ou macios. Pode-se notar que a área do ciclo de histerese do material mole é pequena e que o laço de histerese é estreito e alongado. Isso mostra que o material possui alta permeabilidade e exige um campo de baixa intensidade para sua magnetização, e que a perda de energia por ciclo é baixa. Já os materiais magnéticos duros possuem um ciclo de histerese grande, baixa permeabilidade inicial, alta perda de energia histerética e sua resistência à desmagnetização é muito grande, exigindo altos valores de campo magnético para sua desmagnetização.

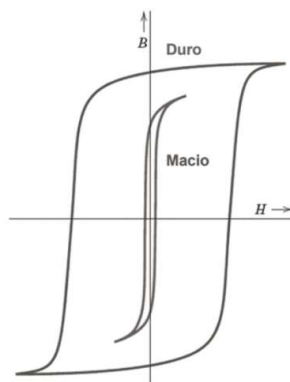
25

Aplicações dos materiais magnéticos

A área no interior do laço de histerese pode ser interpretada como a perda de energia magnética por unidade de volume do material, em cada ciclo de magnetização ou desmagnetização, durante um determinado processo. Ao perder energia, o material esquenta e a sua temperatura também pode aumentar.

Figura 2. Curvas de magnetização para os materiais magnéticos macios e duros.

Fonte: Adaptada de Propriedades... ([201-?]).



26

Aplicações dos materiais magnéticos

Mole	Ferro	Carcas e peças polares de máquinas elétricas. Rotores de geradores elétricos. Embreagens eletromagnéticas
	Ferro-Silício	Motores, geradores e alternadores de rendimento médio. Pequenos e médios transformadores.
	Ferro-Níquel	Transformadores especiais e de instrumentos de medida. Bobinas para filtros. Cabos submarinos. Relés de ação rápida e armaduras de instrumentos de medida. Retificadores por contato mecânico, geradores magnéticos de impulsos, amplificadores e memórias magnéticas. Equipamentos de comunicações de alta sensibilidade
	Ferro-cobalto	Diafragmas de telefones. Motores para o setor aeroespacial.
	Metais amorfos	Transformadores de potência. Aplicações eletrônicas, principalmente em altas frequências. Sensores magnéticos e cabeças de gravação.
	Ferrites macias	Núcleo de transformadores para altas frequências. Gravação magnética, audiovisuais e cabeças de gravação.

Duro	Alnico	Instrumentos e dispositivos que exigem alta estabilidade térmica (sensores, medidores de energia e motores).
	Neodímio-Ferro-Boro	Motores de tração de veículos híbridos e elétricos. Compressores de ar-condicionado. Motores de arranque de automóveis.
	Samário-Cobalto	Dispositivos médicos (pequenos motores de bombas e válvulas implantadas). Relógios de pulso eletrônicos. Motores de corrente contínua e síncronos muito pequenos.
	Ferrites Duras	Geradores, relés e motores. Alto-falantes, discos e receptores de telefones. Fechaduras e trincos de portas. Brinquedos.

27

Histerese

A palavra histerese significa atraso. Os materiais magnéticos, ao se imantarem, quando cessa a atuação do campo que induziu a magnetização, não se desmagnetizam totalmente nem instantaneamente, e fica uma magnetização residual. A esse fenômeno chamamos de histerese. Isso pode ser verificado ao levantarem-se as curvas de magnetização, por exemplo, dos materiais ferromagnéticos. As curvas não se repetem quando se aumenta e depois se diminui o campo magnético externo.

28

Exercícios

1. As ferrites duras podem ser utilizadas na seguinte aplicação:
 - a) Transformadores.
 - b) Cabos submarinos.
 - c) Memórias de computadores.
 - d) Fitas Magnéticas.
 - e) Alto-falante
2. Considere um solenoide longo com 12 voltas por centímetro e um núcleo de ferro macio. Quando a corrente é 0,5 A, o campo magnético no interior do núcleo de ferro é 1,36 T. Se o campo gerado por um solenoide é dado por $H = \mu_0 n I$, onde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$, n é o número de espiras por metro e I a corrente, a permeabilidade magnética será igual a.
 - a) $1,8 \times 10^{-3}$.
 - b) 18×10^{-3} .
 - c) $0,18 \times 10^3$.
 - d) $1,8 \times 10^3$.
 - e) 18×10^3 .
3. Considere um solenoide longo com um núcleo de ferro macio em seu interior. Quando a corrente é 0,5 A, o campo magnético no interior do núcleo de ferro é 1,36 T. Se o campo gerado por esse solenoide é igual a $7,54 \times 10^{-4} \text{ T}$ e a permeabilidade no vácuo é igual a $4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$, a magnetização M será igual a
 - a) $0,10 \times 10^6 \text{ A/m}$.
 - b) $0,108 \times 10^6 \text{ A/m}$.
 - c) $1,08 \times 10^6 \text{ A/m}$.
 - d) $10,8 \times 10^6 \text{ A/m}$.
 - e) $108 \times 10^6 \text{ A/m}$.
4. Os materiais cujos dipolos magnéticos, quando expostos a um campo magnético, se alinham na direção contrária ao campo externo, são chamados de:
 - a) Paramagnéticos.
 - b) Diamagnéticos.
 - c) Ferromagnéticos.
 - d) Ferrimagnéticos.
 - e) Antiferromagnéticos.
5. Os materiais que não apresentam temperatura crítica são os:
 - a) Diamagnéticos.
 - b) Paramagnéticos.
 - c) Ferromagnéticos.
 - d) Ferrimagnéticos.
 - e) Antiferromagnéticos.

29

Fim

30