Propriedades Magnéticas dos Materiais

Prof. Isaac N L Silva
Web: www.em.pucrs.br/~isaac
E-mail: isaac@em.pucrs.br

Fonte: Callister

Objetivos do estudo

1. Determinar a magnetização dados X_m e H
2. Explicar as 2 fontes de momento magnéticos
3. Explicar o diamagnetismo, paramagnetismo e o ferromagnetismo
4. Explicar o ferrimagnetismo para ferritas cúbicas
5. Descrever a histerese; explicar por que ferro e ferrimagneticos podem se tornar imãs permanentes
6. Citar materiais magnéticos moles e duros
7. Descrever a supercondutividade

Outros tópicos vistos

- Circuitos Magnéticos
  - Intensidade de Campo Magnético, densidade de fluxo, permeabilidade relativa e relutância
  - curvas B-H
- Materiais Magnéticos
- Eletromagnetismo
  - Campos Magnético produzido por condutor
  - Leis de Faraday e Lenz
- Efeitos Eletromagnéticos
  - Histereses
  - Eddy currents (correntes parasitas)
  - Indutância

UNIDADES IMPORTANTES

	Symbol	*Represents…*	*Units*
Força Magneto-Motriz.....	MMF	Magneto-motive force	Amp-turns (A)
Campo Magnético.....	H	Magnetic field strength	Amp-turns per metre (A/m)
Fluxo Magnético.....	Φ	Magnetic flux	Weber (Wb)
Densidade deFluxo Magnético...	B	Magnetic flux density	Tesla (T)
Permeabilidade Mag. Vácuo.....	μ_o	Permeability of free space	Henries per metre (H/m)
Permeabilidade Relativa.....	μ_r	Relative permeability	n/a
Número de voltas em bobina.....	N	Number of turns/loops	n/a
Indutância.....	L	Self-inductance	Henries (H)
Indutância Mutua.....	M	Mutual inductance	Henries (H)

Introdução

O magnetismo é o fenômeno pelo qual materiais se atraem ou se repelem.

É um fenômeno conhecido há milhares de anos, mas suas explicações são muito complexas

Aplicações estão presentes no dia-a-dia: transformadores elétricos, motores elétricos, rádios, TVs, telefones, PCs, sistemas de som, etc.

Materiais: Ferro, aços, Magnetita, etc.

No entanto: todos os materiais são influenciados, em maior ou menor grau.

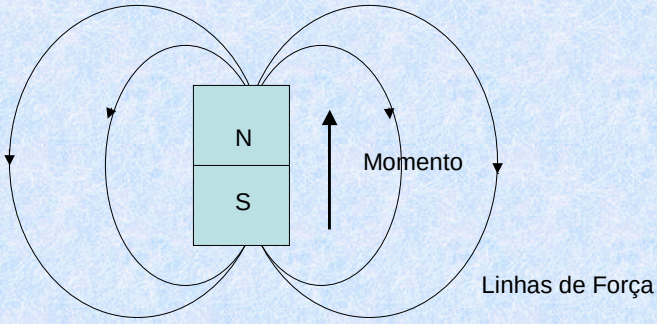
Conceitos

Os dipolos magnéticos são encontrados nos materiais magnéticos.

Eles são como pequenos imãs, com pólos N e S.

Os dipolos são influenciados por campos magnéticos.

Exemplo: Bússola



Vetores de Campo Magnético

É designado por H

Se for gerado por uma bobina cilíndrica,

$$H = \frac{NI}{l}$$ (ampère-volta/metro)

A indutância magnética, ou densidade de fluxo magnético, é indicada por B:

$$B = \mu H$$ (Wb/m^2,ou tesla)

μ em (Wb/A-m,ou Henries/metro)

No vácuo

$$B_0 = \mu_0 H$$ μ_o =4.¶ x 10^{-7} H/m

Outra grandeza vetorial, M, é a magnetização:

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M$$

M é proporcional ao campo aplicado:

$$M = \chi_m H$$

Onde **Xm** é a susceptibilidade magnética (adimensional):

$$\chi_m = \mu_r - 1$$

Conversões de unidades do SI para o cgs:

Tabela 21.1 Unidades Magnéticas e Fatores de Conversão para os Sistemas SI e cgs-uem

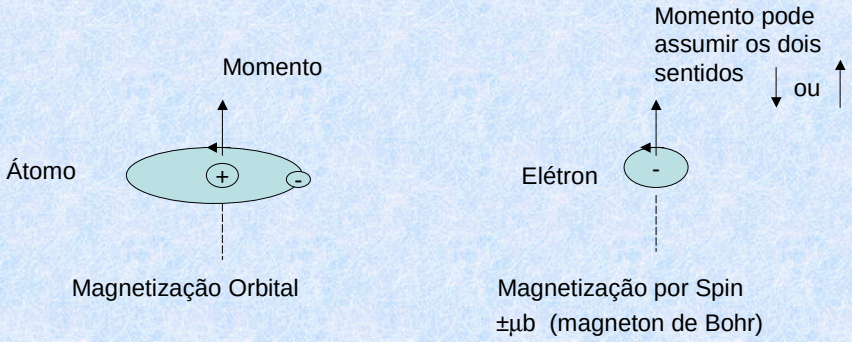
Grandeza	*Símbolo*	*Unidades SI*		*Unidade cgs-uem*	*Conversão*
		Derivada	*Primária*		
Indução magnética (densidade do fluxo)	B	tesla (Wb/m^2)[a]	kg/s-C	gauss	1 $Wb/m^2 = 10^4$ gauss
Força do campo magnético	H	amp-volta/m	C/m-s	oersted	1 amp-volta/m = $4\pi \times 10^{-3}$ oersted
Magnetização	M (SI) I (cgs-uem)	amp-volta/m	C/m-s	$maxwell/cm^2$	1 amp-volta/m = 10^{-3} $maxwell/cm^2$
Permeabilidade do vácuo	μ_0	henry/m[b]	kg-m/C^2	Adimensional (uem)	$4\pi \times 10^{-7}$ henry/m = 1 uem
Permeabilidade relativa	μ_r (SI) μ' (cgs-uem)	Adimensional	Adimensional	Adimensional	$\mu_r = \mu'$
Susceptibilidade	χ_m (SI) χ'_m (cgs-uem)	Adimensional	Adimensional	Adimensional	$\chi_m = 4\pi\chi'_m$

[a]As unidades do weber (Wb) são volt-segundo.
[b]As unidades do henry são weber por ampère.

Origem dos momentos magnéticos:

As propriedades macroscópicas são conseqüência dos momentos magnéticos. A explicação dada aqui é simplificada e não envolve os princípios da mecânica quântica, como deveria.

Uma das fontes de momento é a movimentação dos elétrons em torno do núcleo (orbital), a outra é o movimento de rotação em torno do seu eixo (spin).



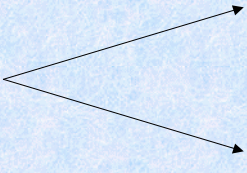
O momento magnético líquido é a soma dos momentos orbitais e de spin

Em átomos que possuem camadas eletrônicas preenchidas, há o cancelamento de momentos. Estes átomos não são capazes de serem magnetizados permanentemente.

Ex: Gases inertes (He, Ne, Ar, etc)
Alguns materiais iônicos

Outros tipos de magnetismo são

- Diamagnetismo
- Paramagnetismo
- Ferromagnetismo



Antiferromagnetismo

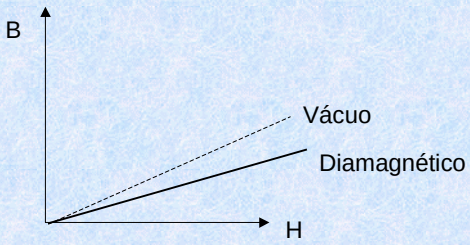
Ferrimagnetismo

Diamagnetismo

Forma muito fraca de magnetismo não permanente.

É causada pela aplicação de um H que altera a movimentação orbital dos elétrons.

A magnitude é pequena e em direção oposta a H. Para esses materiais, $\mu_r < 1$ e $X_m < 0$ (da ordem de –10-5). B no interior do material é < B0.



O diamagnetismo é encontrado em todos os materiais. Como é muito fraco, só é observado quando não há outro tipo de magnetismo.

Paramagnetismo

Para outros materiais sólidos, há um momento dipolo permanente, em virtude do cancelamento incompleto dos momentos. O material não apresenta qualquer magnetização líquida macroscópica. Na presença de H os dipolos giram, alinhando-se com H, aumentando o efeito do campo externo. $\mu r>1$ e $Xm>0$ (da ordem de 10^{-5} a 10^{-2})

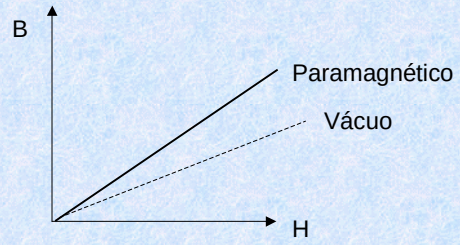


Tabela 21.2 Susceptibilidades Magnéticas à Temperatura Ambiente para Materiais Diamagnéticos e Paramagnéticos

Diamagnéticos		*Paramagnéticos*	
Material	*Susceptibilidade χ_m (volumétrica) (unidades SI)*	*Material*	*Susceptibilidade χ_m (volumétrica) (unidades SI)*
Cloreto de sódio	$-1{,}41 \times 10^{-5}$	Alumínio	$2{,}07 \times 10^{-5}$
Cobre	$-0{,}96 \times 10^{-5}$	Cloreto de cromo	$1{,}51 \times 10^{-3}$
Mercúrio	$-2{,}85 \times 10^{-5}$	Cromo	$3{,}13 \times 10^{-4}$
Ouro	$-3{,}44 \times 10^{-5}$	Molibdênio	$1{,}19 \times 10^{-4}$
Óxido de alumínio	$-1{,}81 \times 10^{-5}$	Sódio	$8{,}48 \times 10^{-6}$
Prata	$-2{,}38 \times 10^{-5}$	Sulfato de manganês	$3{,}70 \times 10^{-3}$
Silício	$-0{,}41 \times 10^{-5}$	Titânio	$1{,}81 \times 10^{-4}$
Zinco	$-1{,}56 \times 10^{-5}$	Zircônio	$1{,}09 \times 10^{-4}$

Ferromagnetismo

Certos materiais possuem momentos magnéticos permanentes e manifestam uma magnetização muito forte e permanente.

Exemplos: Metais de transição ferro (Ferrita α BCC)
Cobalto
Níquel
Alguns metais terras-raras (Gadolínio-Gd)

Para estes materiais Xm é da ordem de $10^{6,}$ conseqüentemente H<<M:

$$B \cong \mu_0 M$$

Os momentos permanentes resultam do spin dos elétrons, na maior parte. Esses momentos podem se alinhar mutuamente, formando regiões conhecidas como domínios.

Quando submetidos a H, os materiais podem apresentar uma magnetização de saturação Ms e uma densidade de fluxo de saturação Bs.

Exemplos:

Ferro	momento magnético líquido = 2,22μb
Cobalto	momento magnético líquido = 1,72μb
Níquel	momento magnético líquido = 0,60μb

Antiferromagnetismo

O fenômeno de pareamento dos momentos magnéticos de átomos ou íons adjacentes, em materiais que normalmente não são ferromagnéticos, resultando em alinhamento antiparalelo (direções exatamente opostas), é chamado de antiferromagnetismo. Exemplo: óxido de manganês (MnO).

Como os momentos opostos se cancelam, o sólido como um todo não apresenta momento magnético líquido.

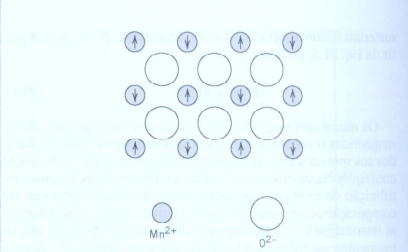


Fig. 21.8 Representação esquemática do alinhamento antiparalelo de momentos magnéticos de *spin* para o óxido de manganês antiferromagnético.

Ferrimagnetismo

Algumas cerâmicas apresentam magnetização permanente. Este fenômeno é conhecido como ferrimagnetismo. As características macroscópicas são semelhantes ao ferromagnetismo, exceto pela fonte dos momentos magnéticos líquidos.

Exemplo: Ferrita Cúbica (X Fe_2O_4, X=elemento metálico)
A Ferrita é o Fe_3O_4 (magnetita mineral, ou pedra-imã)

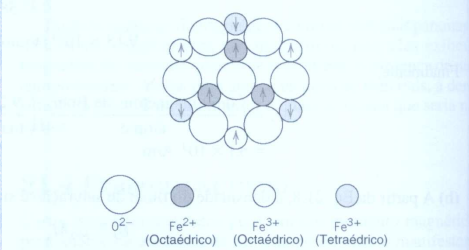


Fig. 21.9 Diagrama esquemático mostrando a configuração do momento magnético de *spin* para os íons Fe^{2+} e Fe^{3+} no Fe_3O_4. (De Richard A. Flinn e Paul K. Trojan, *Engineering Materials and Their Applications*, 4th edition. Copyright © 1990 por John Wiley & Sons, Inc. Adaptado sob permissão de John Wiley & Sons, Inc.)

Influência da Temperatura sobre o Comportamento Magnético

O aumento da temperatura de sólidos resulta uma aumento das vibrações térmicas dos átomos, com isso, os momentos ficam livres para girar, tendendo a tornar aleatórias as direções dos momentos.

Para materiais ferromagnéticos, ferrimagnéticos, e antiferromagnéticos, os movimentos térmicos tendem a diminuir as forças de pareamento dos momentos.

Na temperatura de Curie Tc, a magnetização de saturação cai abruptamente para zero.

Domínio e Histerese

Os materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos, em temperaturas < Tc, são formados por domínios magnéticos.

Os domínios adjacentes estão separados por contornos de domínio. Normalmente os domínios são microscópicos. No caso de uma amostra não magnetizada, a soma das magnetizações de todos os domínios é zero.

Se o material estiver inicialmente não magnetizado, B varia em função de H.

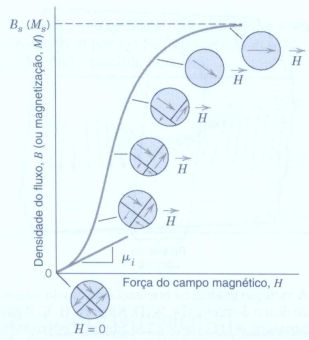


Fig. 21.13 O comportamento de B em função de H para um material ferromagnético ou ferrimagnético que se encontrava inicialmente não-magnetizado. Estão representadas as configurações dos domínios durante vários estágios da magnetização. A densidade do fluxo da saturação, B_s, a magnetização, M_s, e a permeabilidade inicial, μ_i, também estão indicadas. (Adaptado de O. H. Wyatt e D. Dew-Hughes, *Metals, Ceramics and Polymers*, Cambridge University Press, 1974.)

A saturação é atingida quando os domínios ficam alinhados com o campo.

A partir da saturação, à medida em que H é reduzido, por reversão da direção, a curva não retorna segundo a trajetória original. Produz-se um efeito de histerese.

No ponto H=0, existe um campo residual B que é chamado de remanescente.

Para reduzir B a zero, deve-se aplicar um campo –Hc, chamado de coercibilidade, ou força coercitiva.

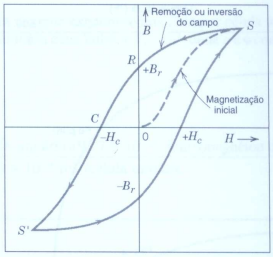


Fig. 21.14 Densidade do fluxo magnético em função da força do campo magnético para um material ferromagnético que está sujeito a saturações avante e reversa (pontos S e S'). O ciclo da histerese está representado pela curva contínua; a curva tracejada indica a magnetização inicial. A remanência, B_r, e a força coercitiva, H_c, também estão mostradas.

Materiais Magnéticos Moles

O tamanho e a forma da curva de histerese para materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos determina se são materiais magnéticos moles ou duros.

Os materiais moles são usados onde se tem campos magnéticos alternados e as perdas de energias têm que ser mínimas.

Os materiais magnéticos moles tem que ter uma permeabilidade inicial alta e uma coercibilidade baixa.

Exemplo: núcleo de transformadores.

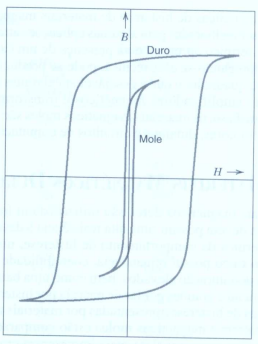


Fig. 21.16 Curvas esquemáticas de magnetização para um material magnético mole e um duro. (De K. M. Ralls, T. H. Courtney e J. Wulff, *Introduction to Materials Science and Engineering*, Copyright © 1976 por John Wiley & Sons, New York. Reimpresso sob permissão de John Wiley & Sons, Inc.)

Tabela 21.5 Propriedades Típicas para Vários Materiais Magnéticos Moles

Material	*Composição (%p)*	*Permeabilidade Relativa Inicial, μ_i*	*Densidade do Fluxo de Saturação, B_s [tesla (gauss)]*	*Perda por Histerese/Ciclo [J/m³ (erg/cm³)]*	*Resistividade, ρ (Ω-m)*
Lingote de ferro comercial	99,95Fe	150	2,14 (21.400)	270 (2700)	$1,0 \times 10^{-7}$
Ferro-silício (orientado)	97Fe, 3Si	1400	2,01 (20.100)	40 (400)	$4,7 \times 10^{-7}$
Permalloy 45	55Fe, 45Ni	2500	1,60 (16.000)	120 (1200)	$4,5 \times 10^{-7}$
Supermalloy	79Ni, 15Fe, 5Mo, 0,5Mn	75.000	0,80 (8000)	—	$6,0 \times 10^{-7}$
Ferroxcube A	$48MnFe_2O_4$, $52ZnFe_2O_4$	1400	0,33 (3300)	~40 (~400)	2000
Ferroxcube B	$36NiFe_2O_4$, $64ZnFe_2O_4$	650	0,36 (3600)	~35 (~350)	10^7

Fonte: Adaptado de *Metals Handbook: Properties and Selection: Stainless Steels, Tool Materials and Special-Purpose Metals*, vol. 3, 9th edition, D. Benjamin, Senior Editor, American Society for Metals, 1980.

Materiais Magnéticos Duros

Os materiais magnéticos duros são usados em imãs permanentes, que devem possuir uma alta resistência a desmagnetização.

Um material duro deve ter uma permeabilidade inicial baixa, e altas remanescência, coercibilidade e perdas de energia por histerese.

Quanto maior a força para desmagnetizar um imã permanente (BH max), mais duro é o material.

Tabela 21.6 Propriedades Típicas para Vários Materiais Magnéticos Duros

Material	*Composição (%p)*	*Remanência, B_r [tesla (gauss)]*	*Coercibilidade, H_c [amp-volta/m (Oe)]*	*$(BH)_{máx}$ [kJ/m³ (MGOe)]*	*Temperatura Curie, T_c [°C (°F)]*	*Resistividade, ρ (Ω-m)*
Aço tungstênio	92,8 Fe, 6 W, 0,5 Cr, 0,7 C	0,95 (9500)	5900 (74)	2,6 (0,33)	760 (1400)	$3,0 \times 10^{-7}$
Cunife	20 Fe, 20 Ni, 60 Cu	0,54 (5400)	44.000 (550)	12 (1,5)	410 (770)	$1,8 \times 10^{-7}$
Alnico 8 sinterizado	34 Fe, 7 Al, 15 Ni, 35 Co, 4 Cu, 5 Ti	0,76 (7600)	125.000 (1550)	36 (4,5)	860 (1580)	—
Ferrita 3 sinterizada	$BaO\text{-}6Fe_2O_3$	0,32 (3200)	240.000 (3000)	20 (2,5)	450 (840)	$\sim 10^4$
Terra-rara de cobalto 1	$SmCo_5$	0,92 (9200)	720.000 (9.000)	170 (21)	725 (1340)	$5,0 \times 10^{-7}$
Neodímio-ferro-boro sinterizado	$Nd_2Fe_{14}B$	1,16 (11.600)	848.000 (10.600)	255 (32)	310 (590)	$1,6 \times 10^{-6}$

Fonte: Adaptado de *ASM Handbook*, vol. 2, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. Copyright © 1990 por ASM International. Reimpresso sob permissão da ASM International, Materials Park, OH.

Supercondutividade

É um fenômeno elétrico com implicações magnéticas.

Aplicações: imãs fortes empregados em equipamentos de ressonância magnética, etc.

Exemplos de Materiais: Nióbio-Zircônio (Nb-Zr), ligas Nióbio-Titânio (Nb-Ti), Nióbio-Estanho (Nb_3Sn).

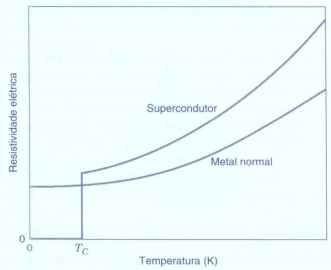


Fig. 21.21 Dependência da resistividade elétrica em relação à temperatura para materiais normalmente condutores e supercondutores, na vizinhança de 0 K.

Circuitos Magnéticos

Sempre que um fluxo magnético (Φ) existir num corpo ou componente, é devido a presença de um campo magnético H, dado por:

$$H = MMF / l$$

onde l é o comprimento do componente e MMF é a força magneto-motriz

A densidade de fluxo magnético resultante (B) é dada por:

$$B = \Phi / A$$

onde A é a área da seção transversal do componente.

Relutância

O fluxo magnético (Φ) e a força magneto-motriz (MMF) estão relacionados pela relutância (ℜ) do circuito magnético, dado por:

$$MMF = \Phi \, \Re$$

or

$$H \, l = B \, A \, \Re$$

Esta relação é análoga a relação voltagem/corrente para resistores em um circuito elétrico :

$$V = i \, R$$

Relutância

Então, como determinar a relutância?

A relutância (ℜ) é definida em termos da permeabilidade magnética (μ):

$$\Re = l / (\mu . A)$$

Magnetic quantities

Symbol	Represents…	Units
MMF	Magneto-motive force	Amp-turns (A)
H	Magnetic field intensity	Amp-turns per metre (A/m)
Φ	Magnetic flux	Webers (Wb)
B	Magnetic flux density	Telsa (T) or Webers per square meter (Wb/m^2)
$\Re$	Reluctance	1/ Henries (H^{-1})
μ	Permeability	Henries per metre (H/m)

Electrical analogies

Symbol	Represents…	Units
V or EMF	Voltage or Electro-motive-force	Volts (V)
E	Electric field intensity	Volts per metre (V/m)
I	Current	Amps (A)
J	Current density	Amps per square meter (A/m^2)
R	Resistance	Ohms (Ω)
σ	Conductivity	1 / Ohm-metres ($\Omega^{-1}m^{-1}$)

Circuitos Magnéticos : Curvas B-H

Não é necessário se conhecer todas as quantidades magnéticas para, mesmo assim, se tirar proveito delas!

Felizmente, materiais magnéticos e circuitos podem ser descritos bem mais facilmente em termos das curvas B – H :

$B = \mu H$

Curva B-H do Vácuo

A densidade de fluxo magnético no vácuo é diretamente proporcional a intensidade de campo magnético:

$$B = \mu_o H$$

onde μ_o = permeabilidade constante
$= 4\pi \times 10\text{-}7$ H/m

Materiais não-magnéticos como o cobre, papel, borracha e ar têm curvas B-H quase idênticas à do vácuo. Estes materiais nunca saturam!

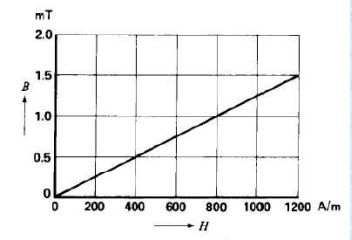


Figure 2.25
B-H curve of vacuum and of nonmagnetic materials.

Fonte: T. Wildi, *Electrical Machines, Drives and Power Systems*, 5th Edition, Prentice-Hall, 2002

Curva B-H dos Materiais Magnéticos

A densidade de fluxo magnético em materiais magnéticos também dependem da intensidade do campo magnético:

$$B = \mu_r \mu_o H$$

onde μ_r = permeabilidade relativa do material magnético

Contudo, permeabilidade relativa **não é constante** e varia com a densidade do fluxo no material. Conseqüentemente, a relação B-H para materiais magnéticos é não-linear e é explicada pelas curvas B-H, que são muito úteis para o magnetismo.

Este fenômeno magnético não-linear é conhecido como ***saturação***

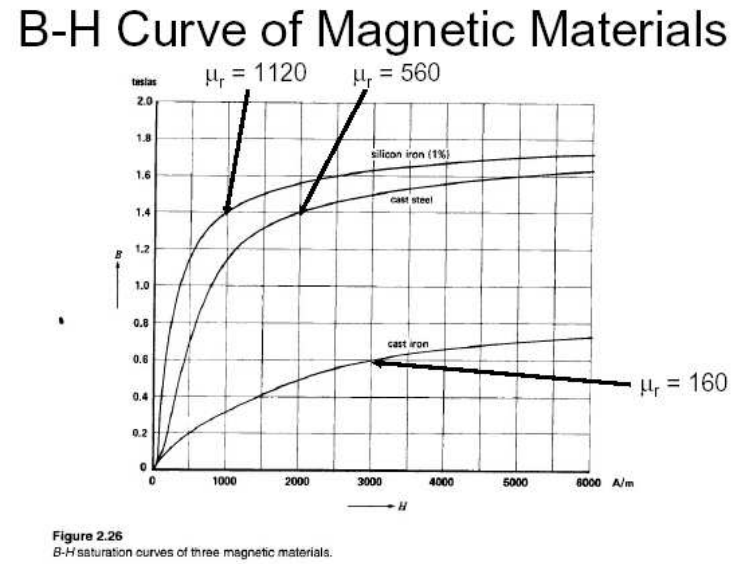


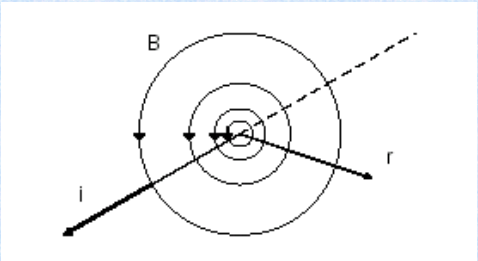
Figure 2.26
B-H saturation curves of three magnetic materials.

Eletromagnetismo

O campo magnético produzido por um condutor:

$$B = \mu\, i / (2\, \pi\, r)$$

Vale aqui a regra da mão direita:

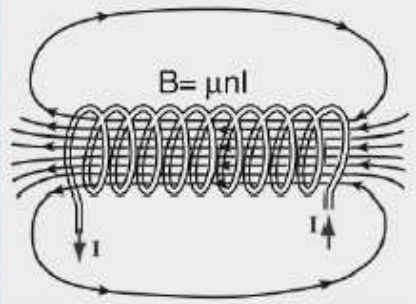


Eletromagnetismo

O campo magnético produzido por um solenóide:

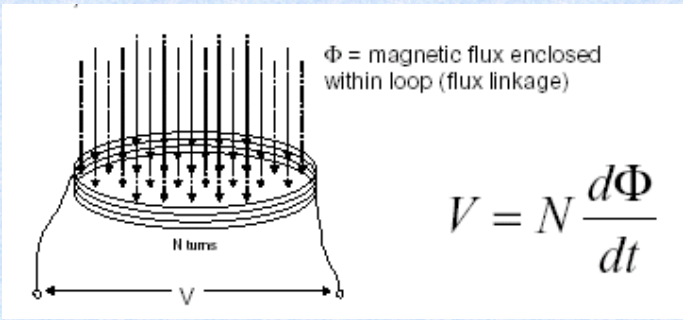
$$B = (\mu N i) / l$$

$$= \mu n i$$



Indução Eletromagnética

A voltagem induzida em um loop de condutor por um campo magnético variável (Lei de Faraday):



Indução Eletromagnética

Dois casos especiais da Lei de Faraday precisam ser considerados:

1. Quando um indutor está parado e o fluxo através dele varia com o tempo (produzido por uma corrente AC). Isto produz uma equação para a voltagem induzida (V) chamada ***equação da fuga de fluxo*** (importante em transformadores)*:*

$$V = 4.44\ Bp\ A\ N\ f$$

onde:

Bp é o pico da densidade de fluxo que emana do indutor
A é a área da seção transversal do indutor
N é o número de voltas do indutor
f é a freqüência (Hz)

2. Quando o fluxo não muda com o tempo mas um condutor se move através do campo magnético. Isto produz uma equação para a voltagem induzida (V) chamada de ***equação do fluxo de corte*** (importante em motores elétricos e geradores):

$$V = B\ L\ v$$

onde:

L é o comprimento (ativo) do condutor no campo magnético
v é a velocidade do condutor

A velocidade v na equação acima é a velocidade relativa. O campo magnético pode variar (mover) e/ou o condutor pode mover.

Indução Eletromagnética

A Lei de Lenz é usada em conjunto com a Lei de Faraday para definir a direção da voltagem induzida:

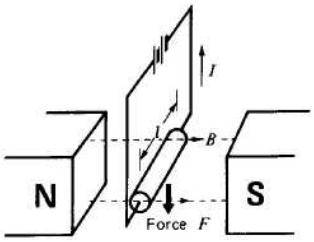
"A direção da voltagem induzida num material é tal que as correntes geradas como uma conseqüência desta voltagem produzem um fluxo que se opõe ao fluxo original "

Força Eletromagnética

A força de Lorentz em um condutor:

Regra da mão direita aberta

$$F = Bil$$



Força Eletromagnética

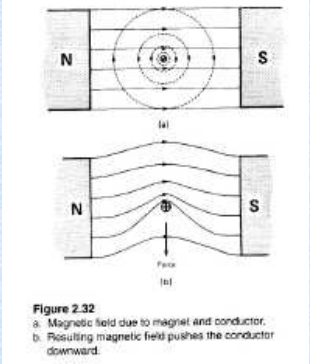


Figure 2.32
a. Magnetic field due to magnet and conductor.
b. Resulting magnetic field pushes the conductor downward.

Efeitos Eletromagnéticos

Em uma máquina elétrica rotacional, a força eletromagnética é usada para criar torque.

Em transformadores elétricos, moto-geradores, existem três tipos de perdas que podem ser atribuídas aos efeitos eletromagnéticos:

- Histerese
- Eddy currents (correntes parasitas)
- “Magnetostriction”

Eletromagnetismo também dá origem a propriedade da indutância.

Correntes Parasitas

- As correntes parasitas ocorrem quando voltagens AC são induzidas em um condutor, pela variação do campo magnético.

- Correntes parasitas dissipam potência como perda resistiva em um condutor
- Para reduzir as perdas, materiais magnéticos são laminados

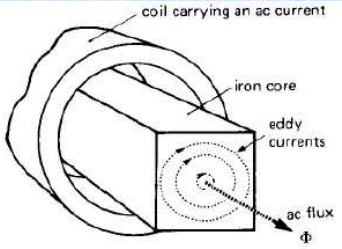


Figure 2.39a
Solid iron core carrying an ac flux.

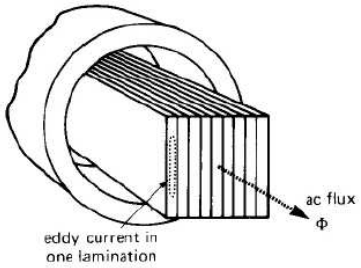


Figure 2.39c
Core built up of thin, insulated laminations.

Indutância

A indutância é a razão da mudança do fluxo de fuga de um indutor pela corrente através desse indutor.

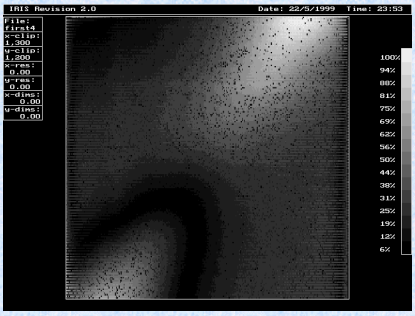
Para um circuito magnético linear (permeabilidade constante) a indutância é constante mas para um material ferromagnético (não-linear devido a mudanças na permeabilidade relativa) a indutância cai quando o material atinge saturação.

Magnetostriction

Quando um campo magnético é estabelecido em um material ferromagnético, as dimensões da estrutura cristalina mudam – o espaçamento entre átomos na direção do campo aumenta e para as direções perpendiculares ao campo, essas diminuem.

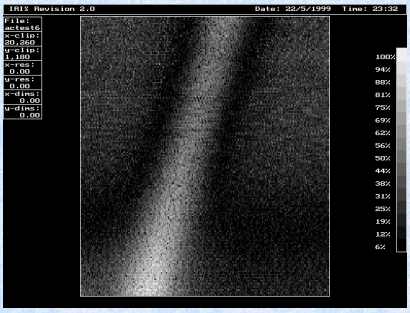
Exemplo prático:

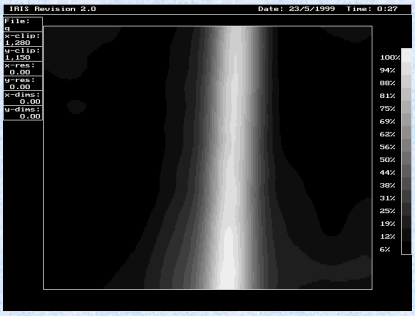
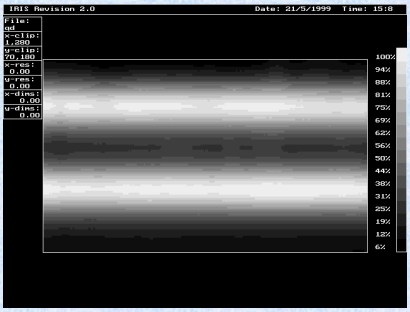
Construir um sensor indutivo que, pela excitação de uma amostra metálica, receba o campo objeto induzido e a partir dele gere imagens do objeto.



Excitação DC
Barra age como imã, com pólos

Excitação AC





Imagens processadas