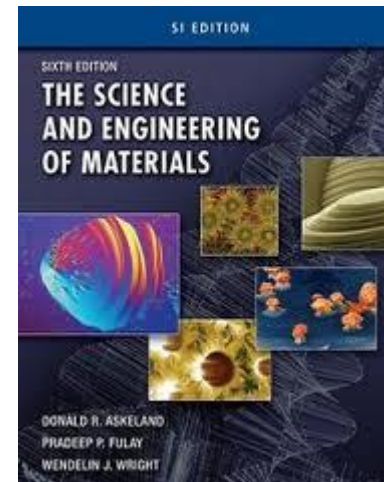
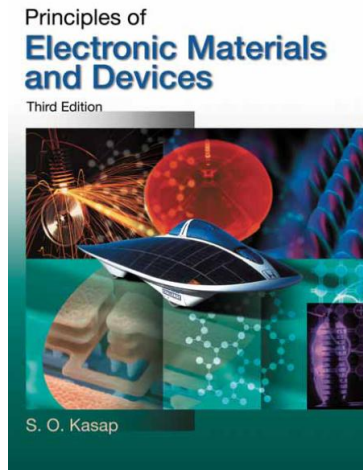


CAPÍTULO 02

MATERIAIS MAGNÉTICOS E APLICAÇÕES



MATERIAIS MAGNÉTICOS

Fundamentos iniciais

O magnetismo é um fenômeno pelo qual alguns materiais impõem uma força ou influência de atração ou de repulsão sobre outros materiais.

As propriedades magnéticas são muito importantes para diversas aplicações que nos cercam.

- **Geradores;**
- **Motores;**
- **Transformadores;**
- **Componentes eletrônicos;**

A habilidade de certos materiais - notadamente o ferro, o níquel, o cobalto e algumas de suas ligas e compostos - de adquirir um alto e permanente momento magnético, é de grande importância para a engenharia elétrica.

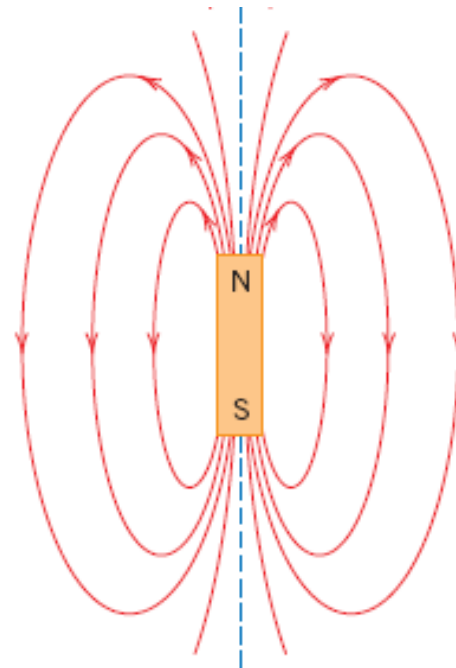
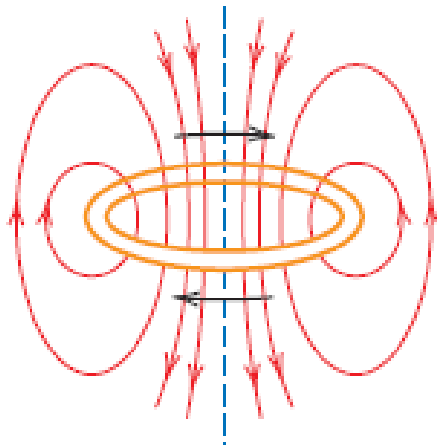
As aplicações de materiais magnéticos são muitas e fazem uso de quase todos os aspectos do comportamento magnético.

Existe uma variedade extremamente grande de diferentes tipos de materiais magnéticos e é importante saber primeiro porque estes e somente estes materiais possuem propriedades magnéticas e em seguida saber o que leva a comportamento diferentes nestes materiais, por exemplo porque um material carrega um momento permanente enquanto outros não.

As pesquisas por materiais magnéticos com melhores características são motivadas pela possibilidade de redução nas dimensões dos equipamentos e diminuição de limitações no desempenho devido à saturação e perdas.

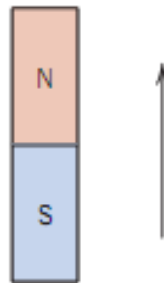
Dipolos magnéticos

As forças magnéticas são geradas mediante o movimento de partículas eletricamente carregadas, elas existem juntamente com as forças eletrostáticas as quais quase sempre são maiores. Muitas vezes é conveniente pensar nas forças magnéticas em termos de campos, podem ser desenhadas linhas imaginárias de força para indicar a direção da força nas proximidades da fonte do campo.

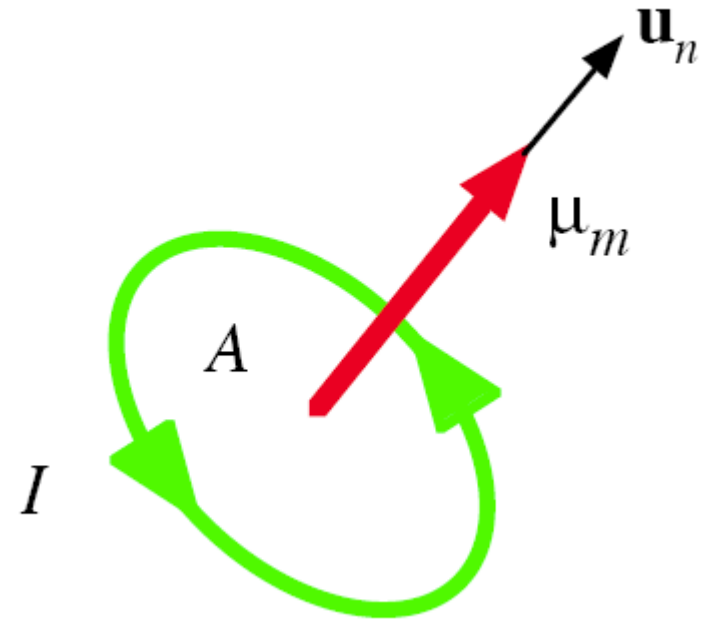


Os dipolos magnéticos podem ser considerados como pequenos ímãs compostos por um pólo norte e um pólo sul.

Associado ao dipolo magnético está o *momento de dipolo magnético* (*grandeza vetorial*) que é representado por uma seta.



Momento dipolar magnético



$$\boldsymbol{\mu}_m = I A \mathbf{u}_n$$

Momento magnetico corrente Area da superficie Vetor unitario normal a superficie

Vetores de campo magnético

O comportamento do magnetismo pode ser descrito através de varios vetores de campo.

O campo magnético aplicado é chamado de Intensidade de campo magnético (H), as unidades são ampere/metro, a indução magnética ou densidade de fluxo magnético (B) representa a magnitude da intensidade do campo magnético dentro de um material na presença de um campo H, as unidades de B são Wb/m² ou Tesla. A intensidade de campo e a densidade estão relacionadas através de,

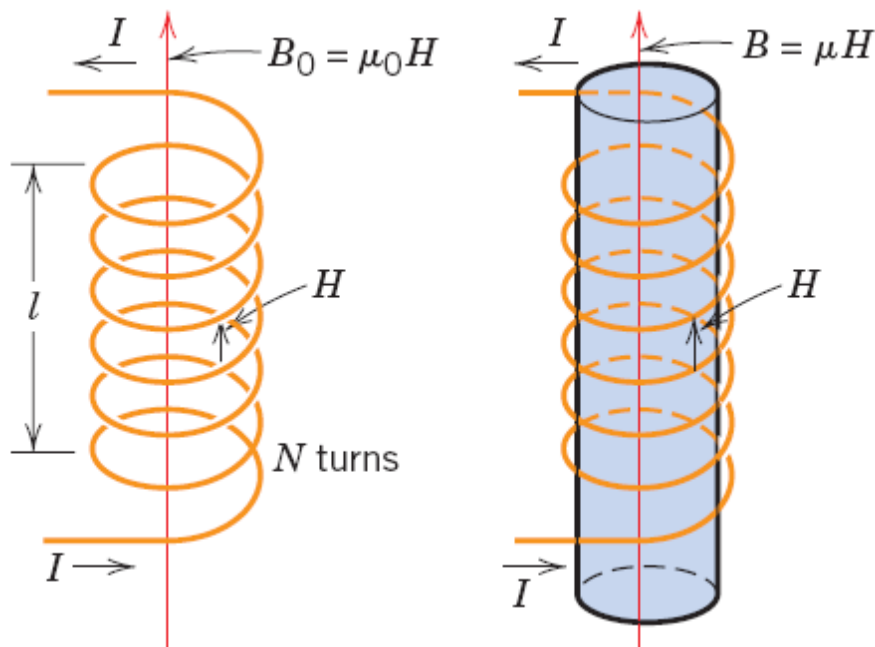
$$B = \mu H$$

O parâmetro μ denomina-se permabilidade e é uma propriedade específica do meio através do qual o campo H passa e no qual B é medido, tem as dimensões H/m ou Wb/A-m.

No espaço livre $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m

Vetores de campo magnético

Relação entre B e H.



Vetores de campo magnético

Outros parâmetros podem ser utilizados e um deles é a relação entre a permeabilidade de um material e a permeabilidade no espaço livre,

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Onde μ_r denomina-se permeabilidade relativa e não tem unidades. A permeabilidade ou a permeabilidade relativa de uma material é uma medida de como um material pode ser magnetizado. i.e. a facilidade de induzir um campo B na presença de uma campo aplicado H.

Outra variável vetorial, M, chamada magnetização do sólido, define-se como,

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

Vetores de campo magnético

Na presença de uma campo H , os momentos magnéticos dentro do material tendem a se alinhar com o campo e o reforçam, o termo $\mu_0 M$ é uma medida desta contribuição.

De outro lado M é proporcional ao campo aplicado da forma,

$$M = \chi_m H$$

Onde χ_m é a susceptibilidade magnética, adimensional, a susceptibilidade magnética e a permeabilidade relativa estão relacionadas por

$$\chi_m = \mu_r - 1$$

Table 20.1 Magnetic Units and Conversion Factors for the SI and cgs–emu Systems

<i>Quantity</i>	<i>Symbol</i>	<i>SI Units</i>		<i>cgs–emu Unit</i>	<i>Conversion</i>
		<i>Derived</i>	<i>Primary</i>		
Magnetic induction (flux density)	B	tesla (Wb/m ²) ^a	kg/s-C	gauss	1 Wb/m ² = 10 ⁴ gauss
Magnetic field strength	H	amp-turn/m	C/m-s	oersted	1 amp-turn/m = 4π × 10 ⁻³ oersted
Magnetization	M (SI) I (cgs–emu)	amp-turn/m	C/m-s	maxwell/cm ²	1 amp-turn/m = 10 ⁻³ maxwell/cm ²
Permeability of a vacuum	μ_0	henry/m ^b	kg-m/C ²	Unitless (emu)	4π × 10 ⁻⁷ henry/m = 1 emu
Relative permeability	μ_r (SI) μ' (cgs–emu)	Unitless	Unitless	Unitless	$\mu_r = \mu'$
Susceptibility	χ_m (SI) χ'_m (cgs–emu)	Unitless	Unitless	Unitless	$\chi_m = 4\pi\chi'_m$

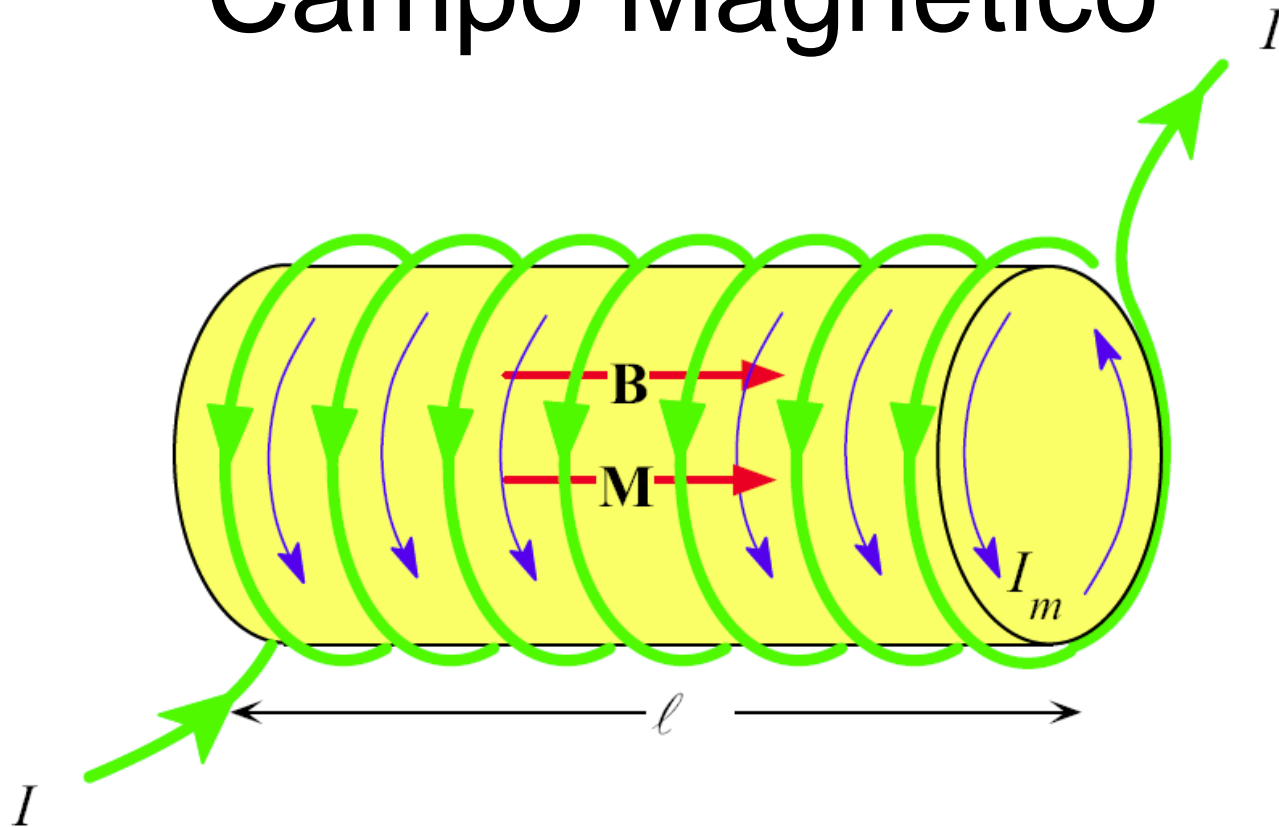
^a Units of the weber (Wb) are volt-seconds.

^b Units of the henry are webers per ampere.

Table 8.1 Magnetic quantities and their units

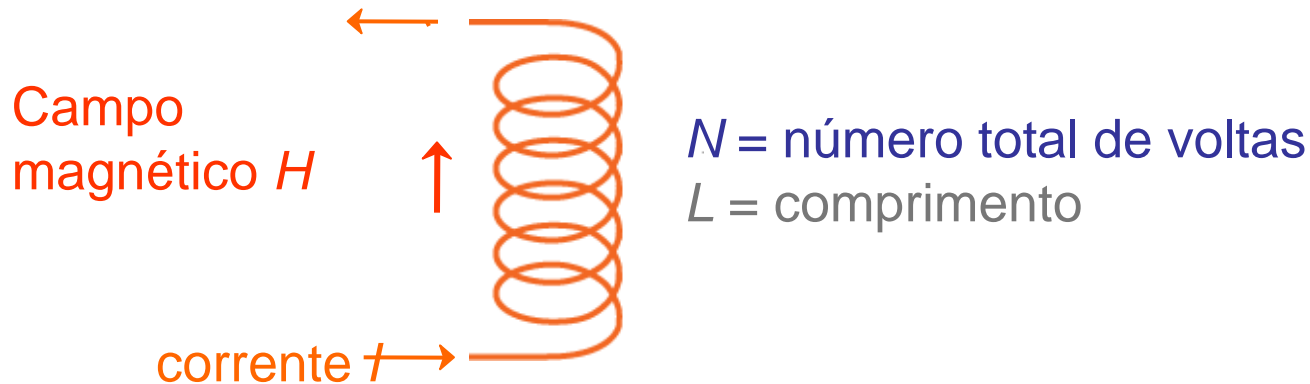
Magnetic Quantity	Symbol	Definition	Units	Comment
Magnetic field; magnetic induction	B	$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$	T = tesla = webers m^{-2}	Produced by moving charges or currents, acts on moving charges or currents.
Magnetic flux	Φ	$\Delta\Phi = B_{\text{normal}} \Delta A$	Wb = weber	$\Delta\Phi$ is flux through ΔA and B_{normal} is normal to ΔA . Total flux through any closed surface is zero.
Magnetic dipole moment	μ_m	$\mu_m = IA$	A m^2	Experiences a torque in B and a net force in a nonuniform B .
Bohr magneton	β	$\beta = e\hbar/2m_e$	A m^2 or J T^{-1}	Magnetic moment due to the spin of the electron. $\beta = 9.27 \times 10^{-24} \text{ A m}^2$
Magnetization vector	M	Magnetic moment per unit volume	A m^{-1}	Net magnetic moment in a material per unit volume.
Magnetizing field; magnetic field intensity	H	$\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu_0 - \mathbf{M}$	A m^{-1}	H is due to external conduction currents only and is the cause of B in a material.
Magnetic susceptibility	χ_m	$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$	None	Relates the magnetization of a material to the magnetizing field H .
Absolute permeability	μ_0	$c = [\epsilon_0 \mu_0]^{-1/2}$	$\text{H m}^{-1} =$ $\text{Wb m}^{-1} \text{ A}^{-1}$	A fundamental constant in magnetism. In free space, $\mu_0 = B/H$.
Relative permeability	μ_r	$\mu_r = B/\mu_0 H$	None	
Magnetic permeability	μ	$\mu = \mu_0 \mu_r$	H m^{-1}	Not to be confused with magnetic moment.
Inductance	<i>L</i>	$L = \Phi_{\text{total}}/I$	H (henries)	Total flux threaded per unit current.
Magnetostatic energy density	E_{vol}	$dE_{\text{vol}} = H dB$	J m^{-3}	dE_{vol} is the energy required per unit volume in changing <i>B</i> by <i>dB</i> .

Campo Magnético



Campo Magnético

- Criado através da passagem de corrente numa bobina:



- Relação do campo magnético, H :

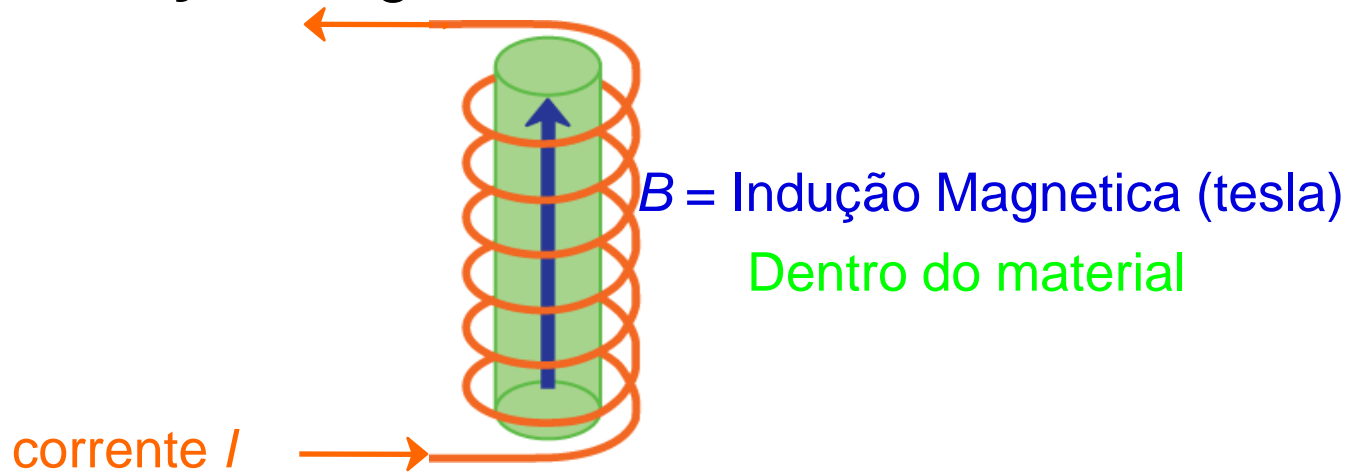
$$H = \frac{NI}{L}$$

Campo magnético
units = (ampere-turns/m)

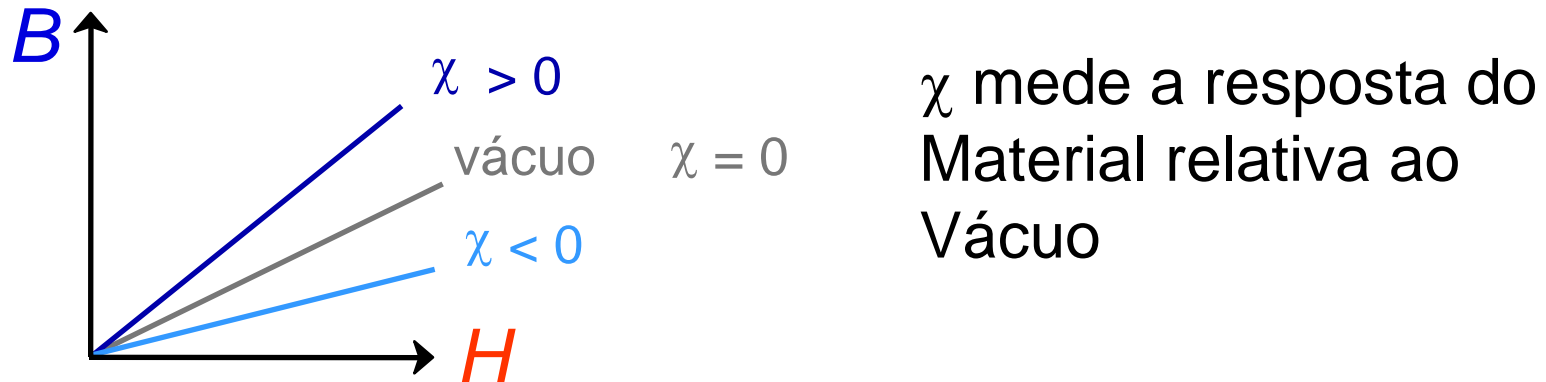
corrente

Resposta a um campo magnético

- Indução Magnética no material



- Suceptibilidade Magnética, χ (sem dimensões)



EXERCÍCIO

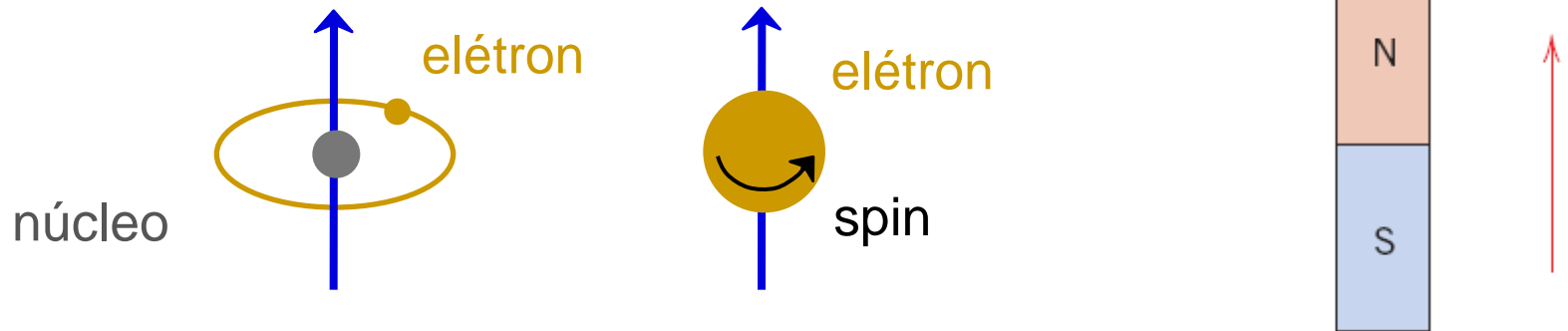
Uma bobina de arame com 0,25m de comprimento e que possui 400 voltas carrega uma corrente de 15A.

- (a) Qual a magnitude da força do campo magnético H ?
- (b) Calcule a densidade do fluxo, B , se a bobina encontra-se no vácuo.
- (c) Calcule a densidade de fluxo dentro de uma barra de cromo que está posicionada no interior da bobina. A susceptibilidade do cromo é $3,13 \times 10^{-4}$.
- (d) Calcule a magnitude de magnetização, M .

Susceptibilidade Magnética

- Mede a resposta dos elétrons ao campo magnético.
- Elétrons produzem momentos magnéticos

Origem dos Momentos magnéticos



Magnétons de Bohr – Momento magnético mais fundamental, para cada elétron em um átomo o momento magnético de spin é de $\pm \mu_B$.

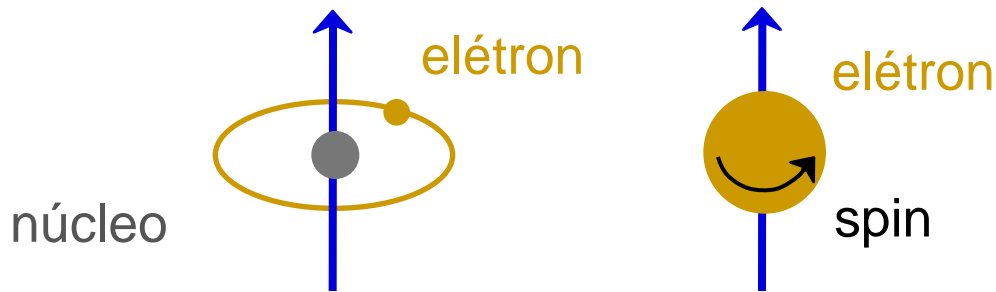
$$9.27 \times 10^{-24} \text{ A}\cdot\text{m}^2$$

- Momento magnético neto: soma dos momentos de todos os elétrons.
- varios tipos de resposta...

Origem dos Momentos magnéticos

Devido à rotação em torno do núcleo, caso em que se comporta como um pequeno circuito por onde circula corrente elétrica. O campo magnético gerado possui um momento magnético orientado ao longo do eixo de rotação.

Cada elétron pode ser considerado como estivesse girando ao redor de um eixo. O momento magnético tem sua origem nesse movimento de rotação e está direcionado ao longo do eixo de rotação



O que acontece então no átomo?

Em cada átomo individual os momentos orbitais de alguns pares de elétrons se cancelam mutuamente. Isto é válido também para os momentos de spin.

O momento magnético resultante de um átomo é o somatório dos momentos magnéticos (orbital + spin) de cada elétron que constitui o átomo

TABLE 19-1 ■ *The electron spins in the 3d energy level in transition metals, with arrows indicating the direction of spin*

Metal	3d					4s
Sc	↑					↑↓
Ti	↑	↑				↑↓
V	↑	↑	↑			↑↓
Cr	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Mn	↑	↑	↑	↑	↑	↑↓
Fe	↑↓	↑	↑	↑	↑	↑↓
Co	↑↓	↑↓	↑	↑	↑	↑↓
Ni	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	↑↓
Cu	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑

Tipos de magnetismo

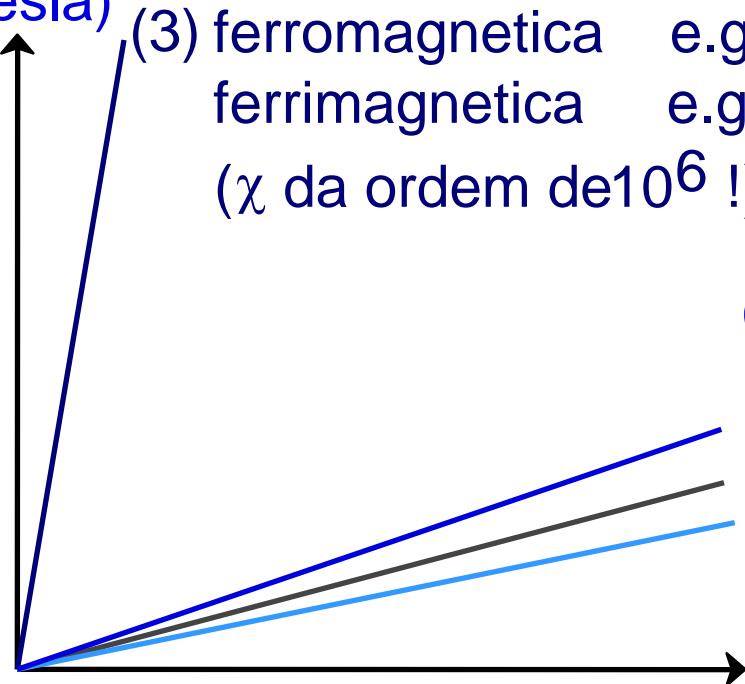
$$B = (1 + \chi) \mu_0 H$$

permeabilidade do vácuo:
(1.26×10^{-6} Henries/m)

$4\pi \times 10^{-7}$ (1.257×10^{-6}) H/m

Indução Magnética

B (tesla)



Campo magnético aplicado (H)
(ampere-volta/m)

Classificação:

- ✓ Diamagnetismo
- ✓ Paramagnetismo
- ✓ Ferromagnetismo
- ✓ Ferrimagnetismo
- ✓ Antiferromagnetismo
- ✓ Helimagnetism

Diamagnetismo

Diamagnetismo em geral corresponde ao tipo mais fraco de resposta magnética de um sistema, caracterizado por susceptibilidade negativa e da ordem de $\chi_m \sim 10^{-5}$ (SI) (o fato deste valor ser negativo é justificado pela Lei de Lenz: esta é uma lei que diz que um circuito submetido a um campo magnético externo variável, cria um campo contrário opondo-se a variação deste campo externo). O seu efeito é diminuir o módulo campo no interior do material. Está presente em todos os materiais, ou seja, todo material é diamagnético, mas isto só é observado quando não existem outros tipos de comportamento magnéticos superpostos.

MATERIAIS MAGNÉTICOS

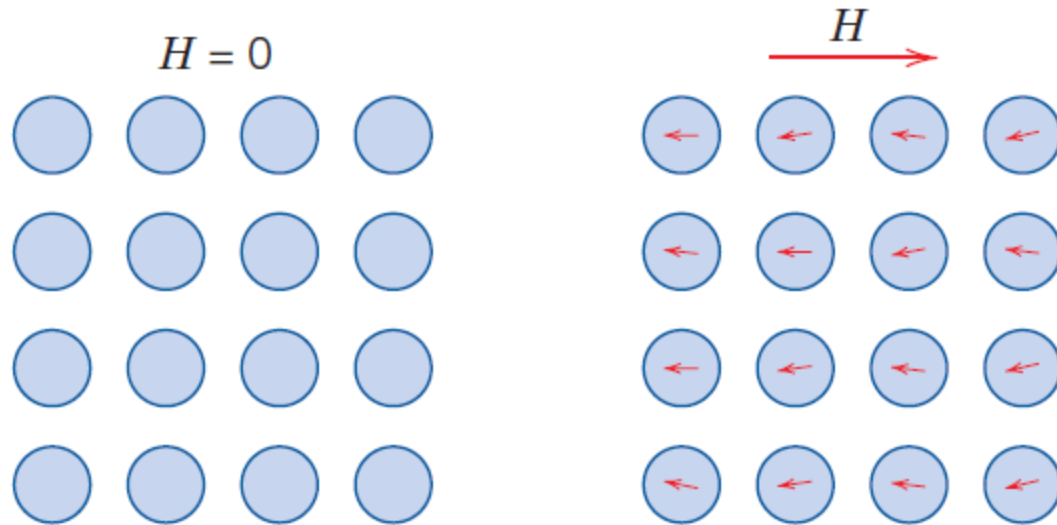
DIAMAGNETISMO

É uma forma muito fraca de magnetismo que não é permanente e que persiste apenas enquanto um campo externo é aplicado.

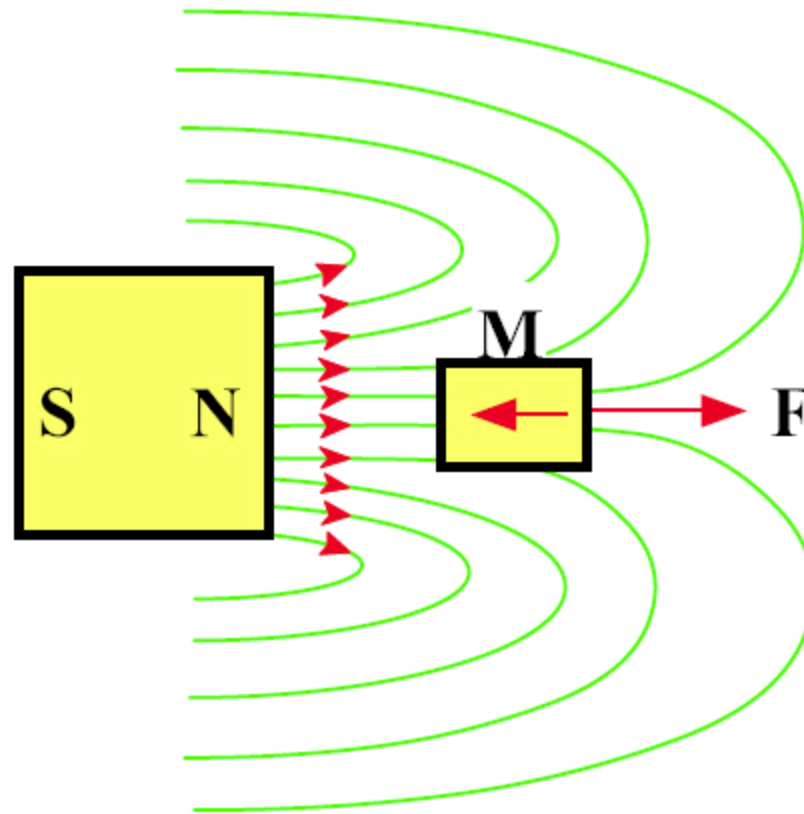
Ele é induzido por uma mudança no movimento orbital dos elétrons causada pela aplicação do campo externo aplicado. **O campo induzido se opõe ao campo externo aplicado.**

➤ **FORMA DE MAGNETISMO QUE NÃO APRESENTA IMPORTÂNCIA PRÁTICA.**

Diamagnetismo



Materiais Diamagneticos



Um material diamagnético colocado num campo magnético não uniforme experimenta forças dirigidas na região de campos menores. Ou seja o material diamagnético é expelido para longe do ímã permanente

Paramagnetismo

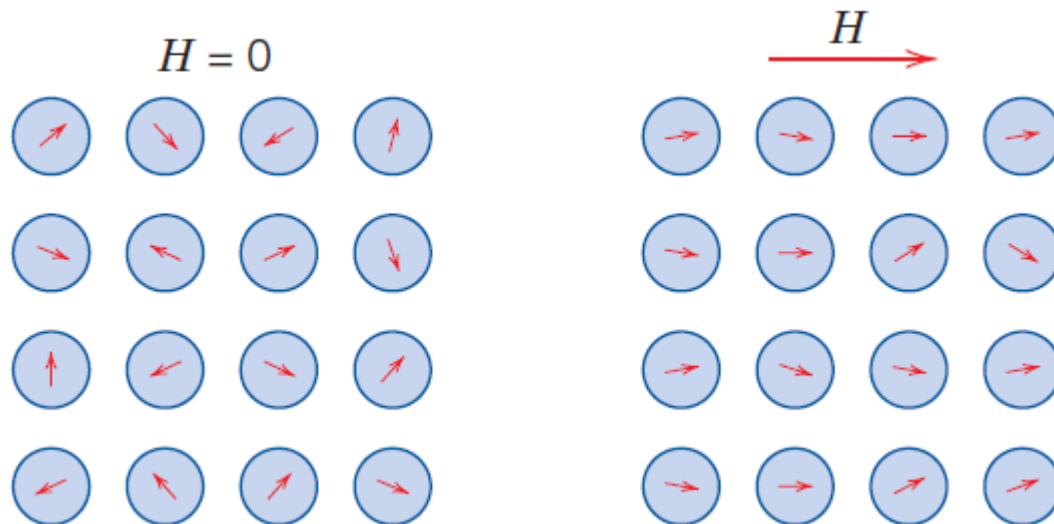
Paramagnetismo é o fenômeno que ocorre em materiais que possuem momentos magnéticos intrínsecos não interagentes entre si. Na ausência de campo magnético nestes materiais a magnetização é nula. A aplicação de um campo externo \vec{H} tenderá a alinhar os dipólos na direção do campo magnético, pois esta configuração é energeticamente favorecida (o mínimo de energia é quando \vec{M} e \vec{H} estão alinhados,

Por isso, os materiais paramagnéticos têm susceptibilidade magnética positiva, com ordem de grandeza entre 10^{-5} e 10^{-3} (SI).

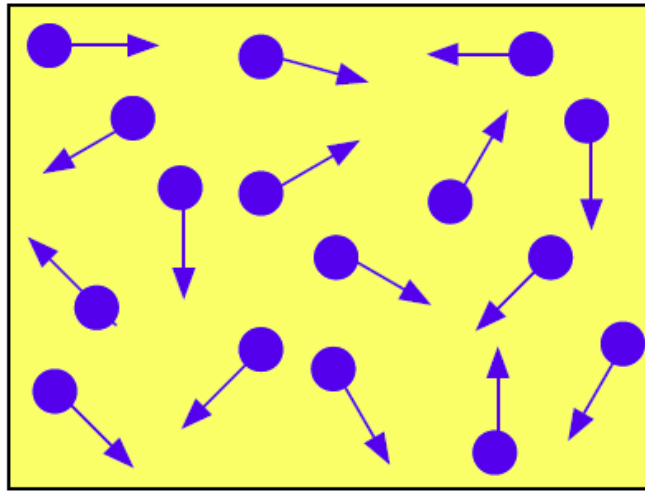
A tendência ao alinhamento encontra oposição na agitação térmica, assim a susceptibilidade paramagnética deve depender da temperatura (T), diminuindo quando esta aumenta.

Paramagnetismo

Alguns materiais paramagnéticos são os metais de elementos não magnéticos, isolantes, os materiais que contém átomos livres ou íons de elementos dos actínídeos, entre outros.

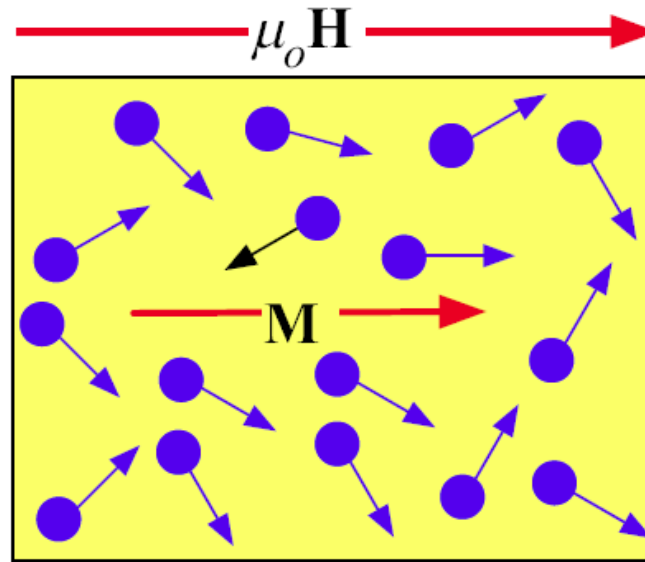


Paramagnetic Materials



$$\mu_{\text{av}} = 0 \text{ and } \mathbf{M} = 0$$

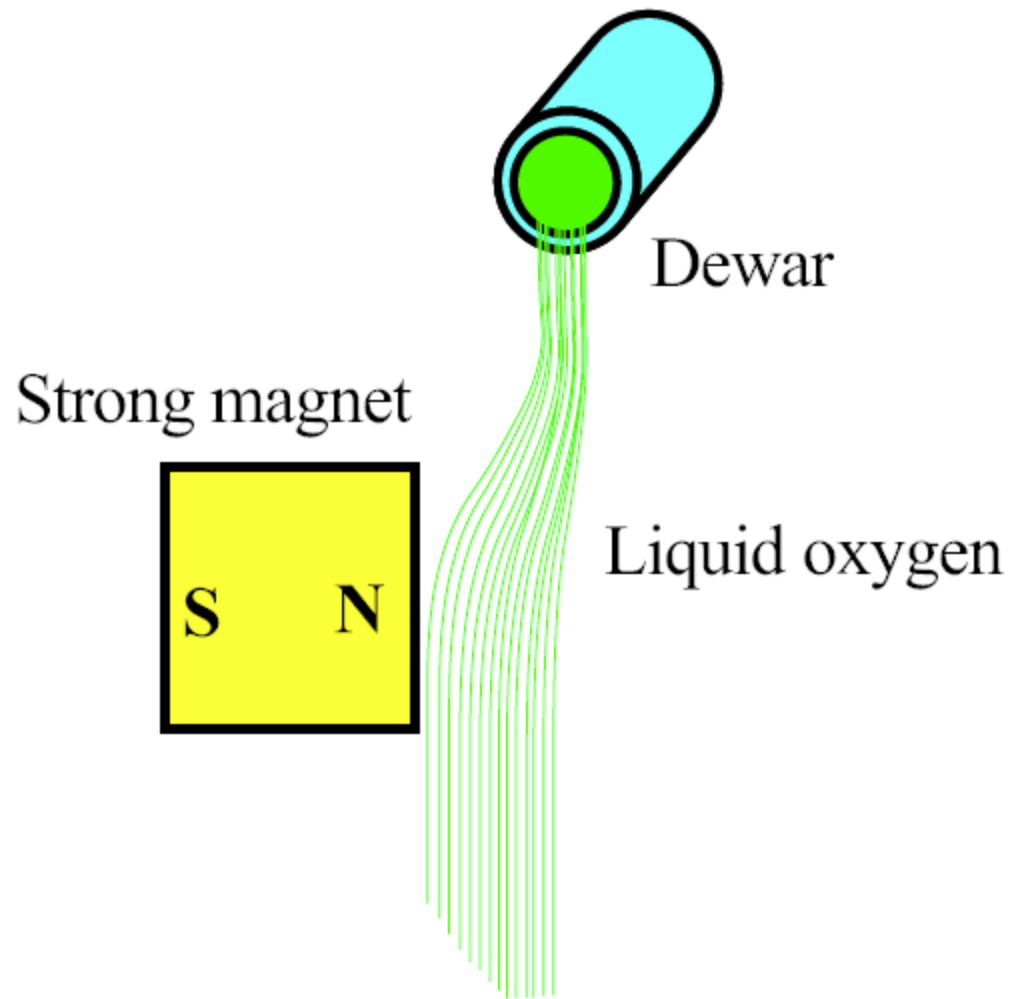
(a)



$$\mu_{\text{av}} \neq 0 \text{ and } \mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$$

(b)

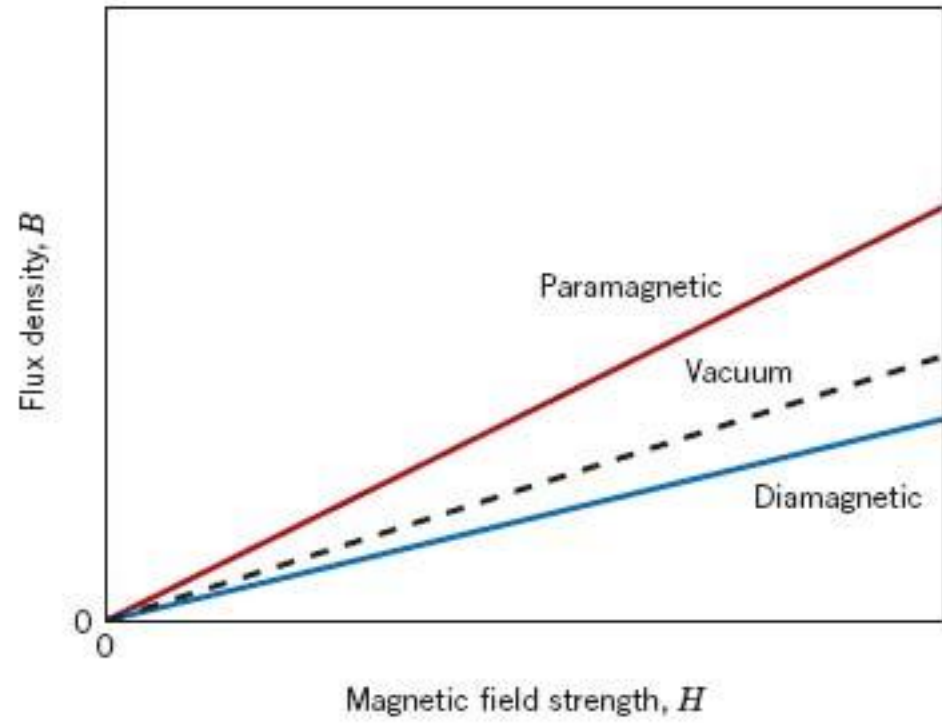
- (a) In a paramagnetic material each individual atom possesses a permanent magnetic moment
due to thermal agitation there is no average moment per atom and $M = 0$.
- (b) In the presence of an applied field, individual magnetic moments take alignments along the applied field and M is finite and along B .



Um material paramagnético colocado num campo magnética não uniforme será afectado por uma força na direção de campos maiores

Table 20.2 Room-Temperature Magnetic Susceptibilities for Diamagnetic and Paramagnetic Materials

<i>Diamagnetics</i>		<i>Paramagnetics</i>	
<i>Material</i>	<i>Susceptibility</i> χ_m (volume) (SI units)	<i>Material</i>	<i>Susceptibility</i> χ_m (volume) (SI units)
Aluminum oxide	-1.81×10^{-5}	Aluminum	2.07×10^{-5}
Copper	-0.96×10^{-5}	Chromium	3.13×10^{-4}
Gold	-3.44×10^{-5}	Chromium chloride	1.51×10^{-3}
Mercury	-2.85×10^{-5}	Manganese sulfate	3.70×10^{-3}
Silicon	-0.41×10^{-5}	Molybdenum	1.19×10^{-4}
Silver	-2.38×10^{-5}	Sodium	8.48×10^{-6}
Sodium chloride	-1.41×10^{-5}	Titanium	1.81×10^{-4}
Zinc	-1.56×10^{-5}	Zirconium	1.09×10^{-4}

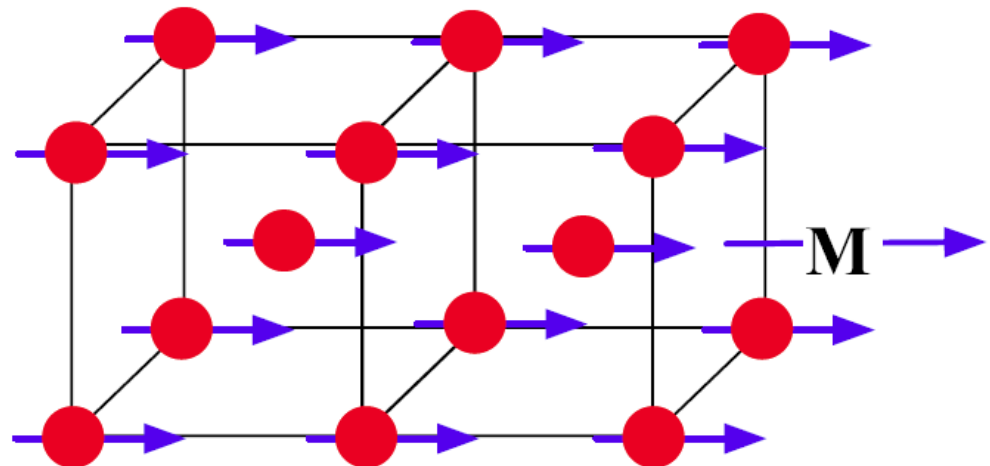
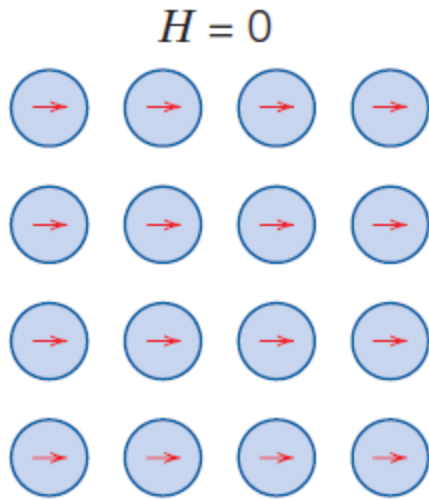


Ferromagnetismo

Alguns elementos do grupo de transição, como o ferro, níquel e cobalto puros ou em ligas com outros elementos, apresentam uma alta magnetização espontânea abaixo da temperatura de Curie (T_C). Essa alta magnetização nos materiais ferromagnéticos está relacionada ao fato destes possuírem momentos de dipolo magnético intrínsecos altamente interagentes que se alinham paralelamente entre si.

Ferromagnetismo

Exemplos de elementos ferromagnéticos são o Ferro (número atômico 26), Cobalto (27), Níquel (28), Gadolínio (64), Térbio (65), Dyprósio (66), Hólmio (67), Érbio (68), Túlio (69).



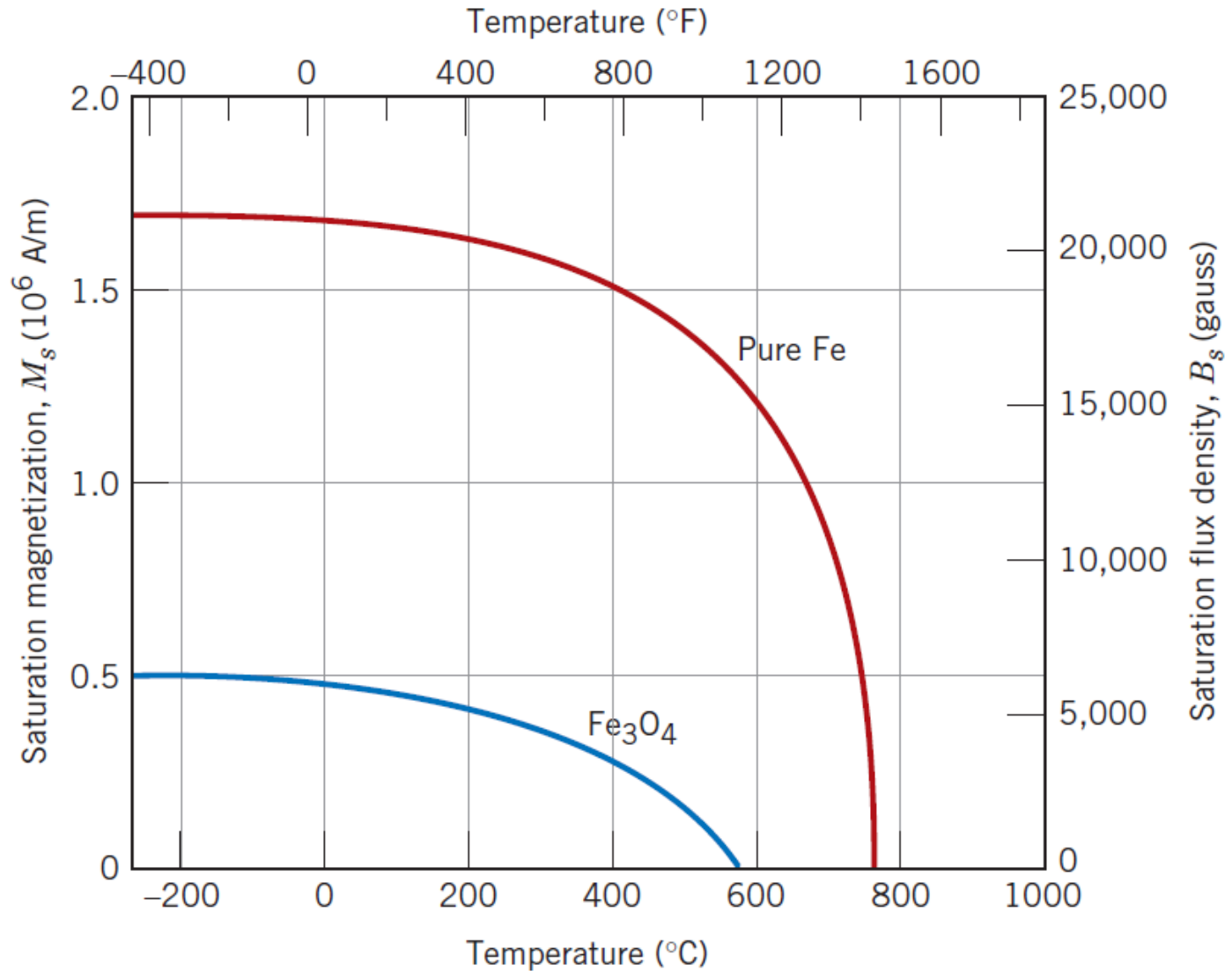
Ferromagnetismo

O módulo da magnetização em materiais ferromagnéticos é várias ordens de grandeza maior do que

em materiais paramagnéticos e diamagnéticos, e a sua relação com o campo \vec{H} é não linear.

A curva de magnetização não depende somente do material, mas do tratamento (térmico, magnético) a que este foi submetido, ou seja, de sua história anterior. Por isso, costumam-se dizer que os materiais ferromagnéticos possuem memória ou uma função memória $\chi(H)$.

Temperatura de Curie (Perda da magnetização)



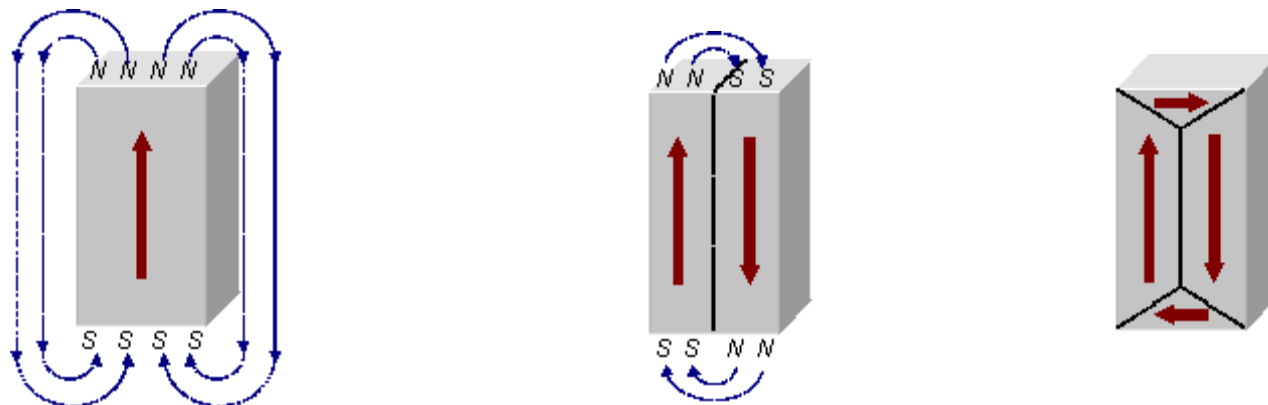
Temperatura de Curie (Perda da magnetização)

TABLE 19-3 ■ *Curie temperatures for selected materials*

Material	Curie Temperature (°C)
Gadolinium	16
Nd ₂ Fe ₁₂ B	312
Nickel	358
BaO · 6Fe ₂ O ₃	469
Co ₅ Sm	747
Iron	771
Alnico 1	780
Cunico	855
Alnico 5	900
Cobalt	1117

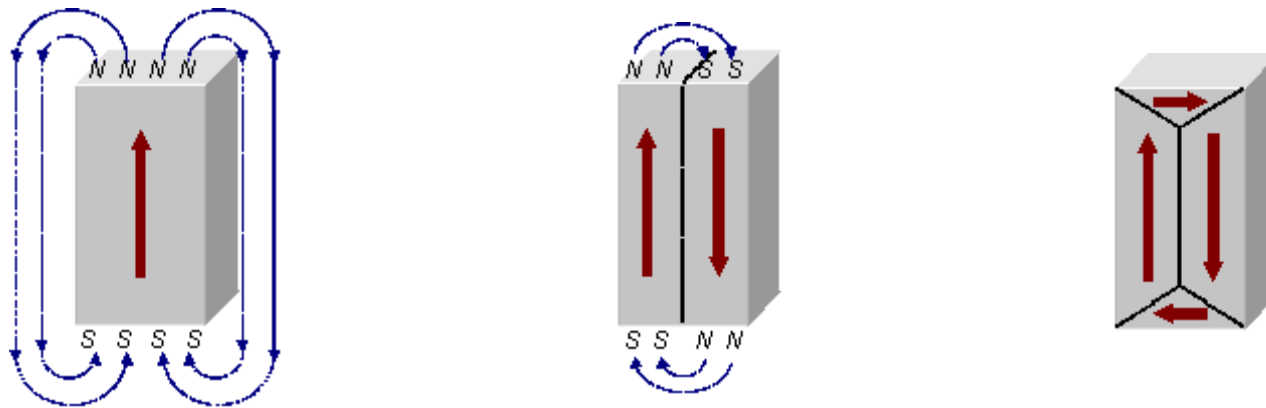
Domínios Magnéticos

Em um material ferromagnético a uma temperatura bem abaixo da temperatura de Curie, os momentos magnéticos tendem a se alinhar, mesmo na ausência de campo externo. Se este alinhamento ocorrer em todo material, a magnetização será uniforme, como na Fig. (6-a). Neste caso é criado um campo macroscópico externo, cuja energia magnética necessária para mantê-lo em todo o volume V é dada por:



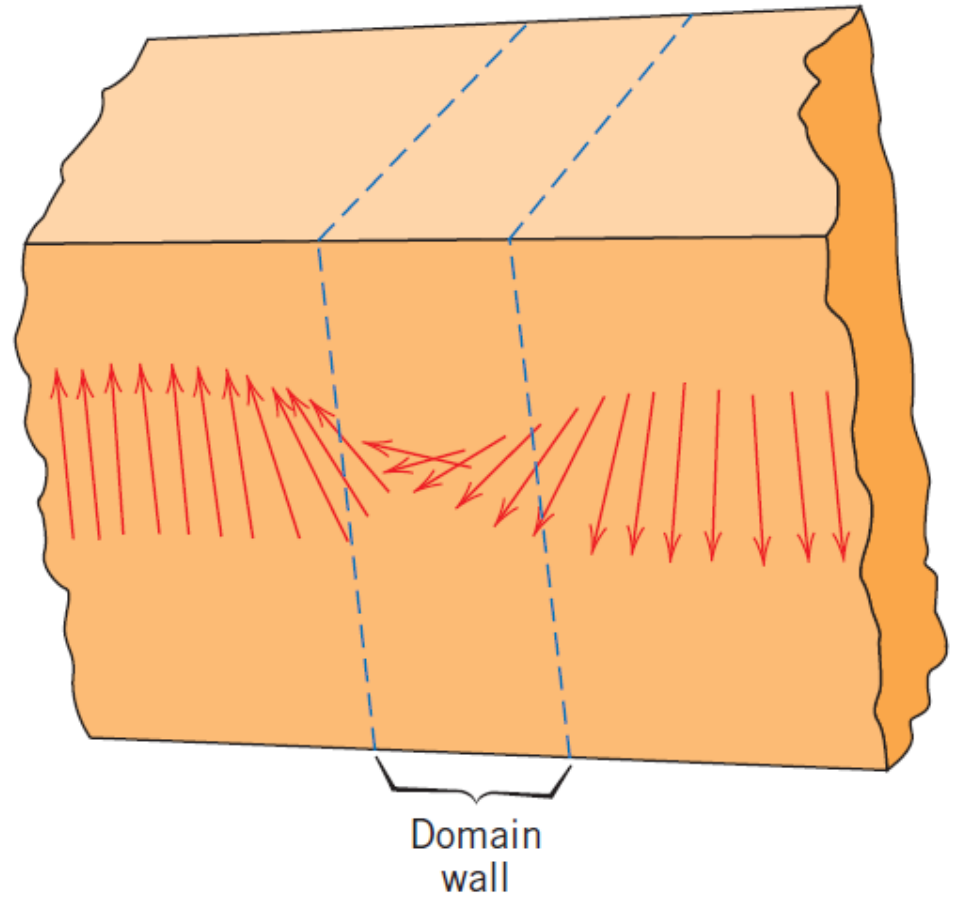
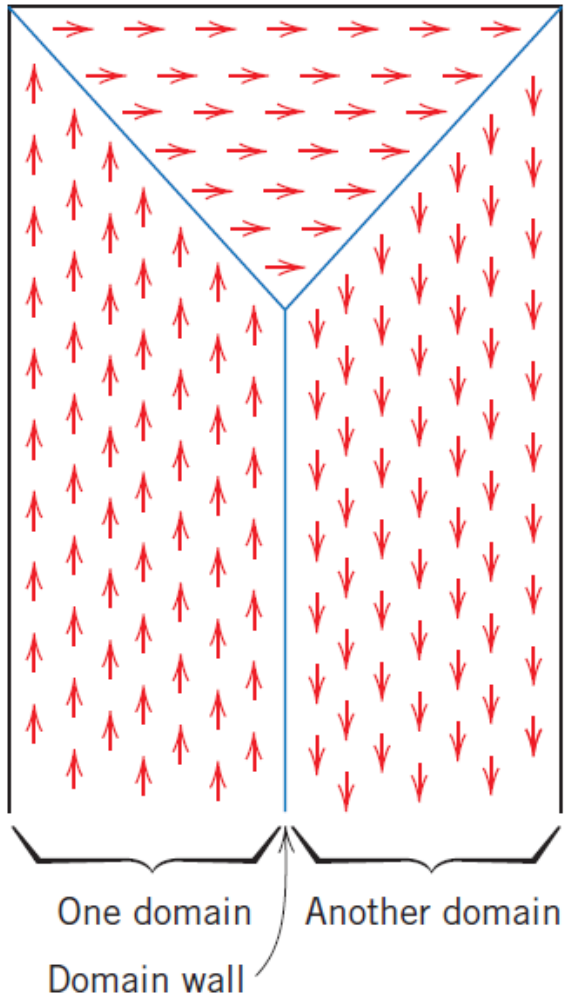
Domínios Magnéticos

$$E_m = \int \int \int \frac{\mu_0}{2} H^2 dv$$



que é uma quantidade de energia relativamente grande se comparada a outras configurações possíveis, de um modo geral é uma configuração instável. Se metade da amostra possuir magnetização num sentido e metade na outra, como na Fig. (6-b), essa energia também deve ser reduzida. No caso da Fig. (6-c) a magnetização total é nula, ou seja, não existe campo magnético no exterior do material.

Domínios Magnéticos



Domínios Magnéticos: Visualização

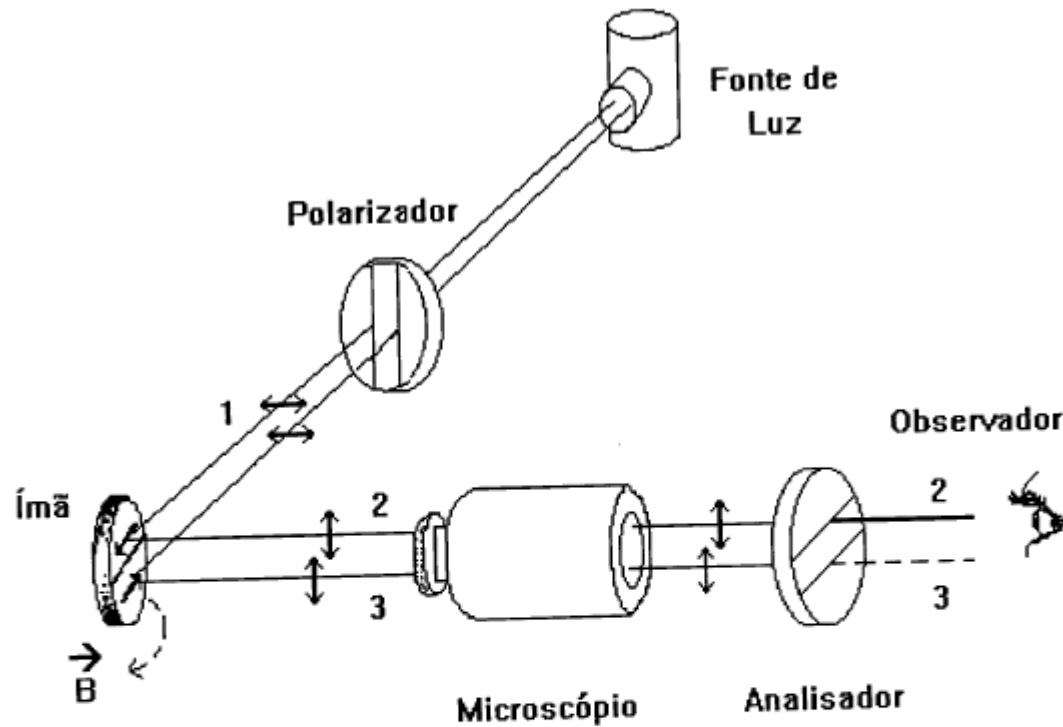
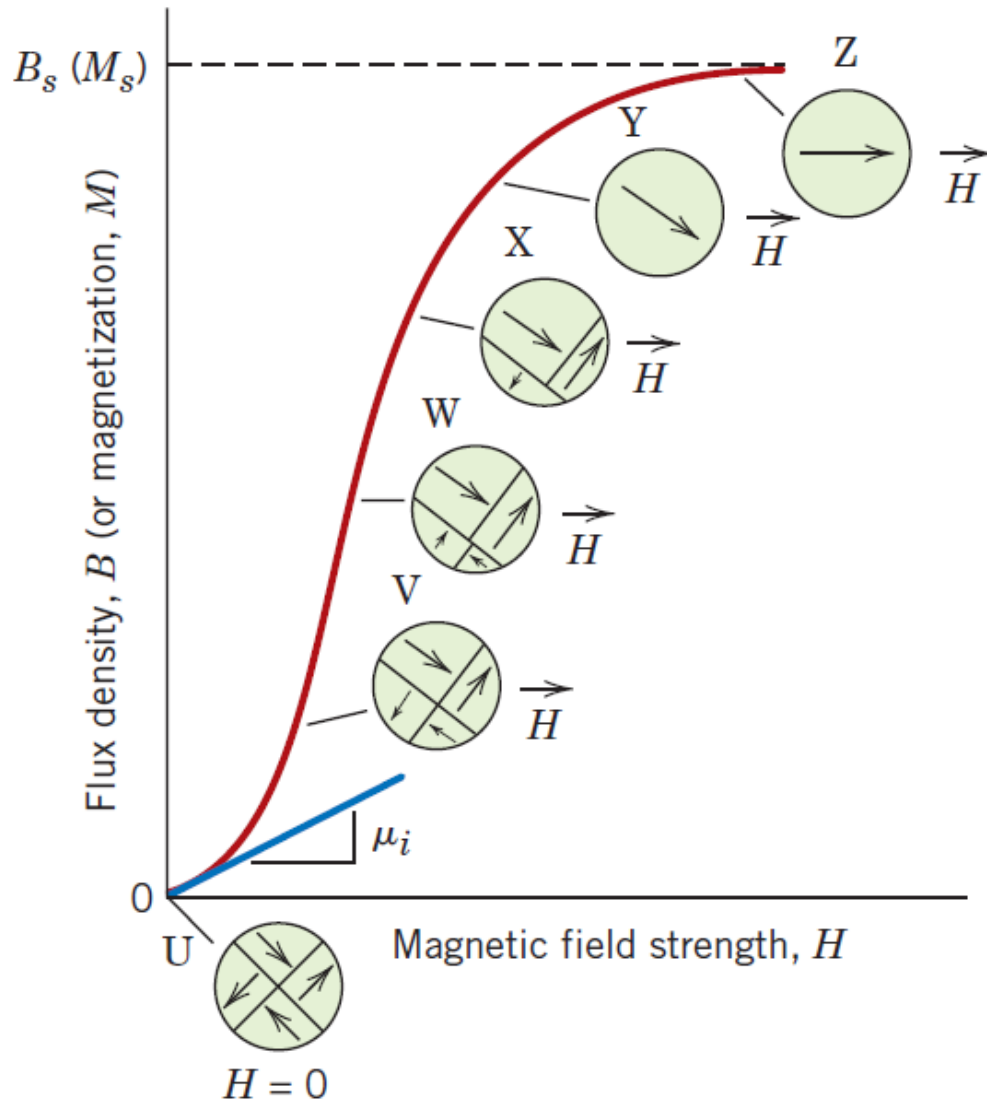


Figura 2 - Ilustração esquemática da montagem experimental para a visualização dos domínios por efeito Kerr. O feixe polarizado (1) incide sobre os domínios com alinhamentos distintos dividindo o feixe em (2) e (3). Ao encontrar o cristal analisador, este permitirá somente a completa transparência a um certo ângulo de polarização (2), reduzindo a intensidade do outro (3).

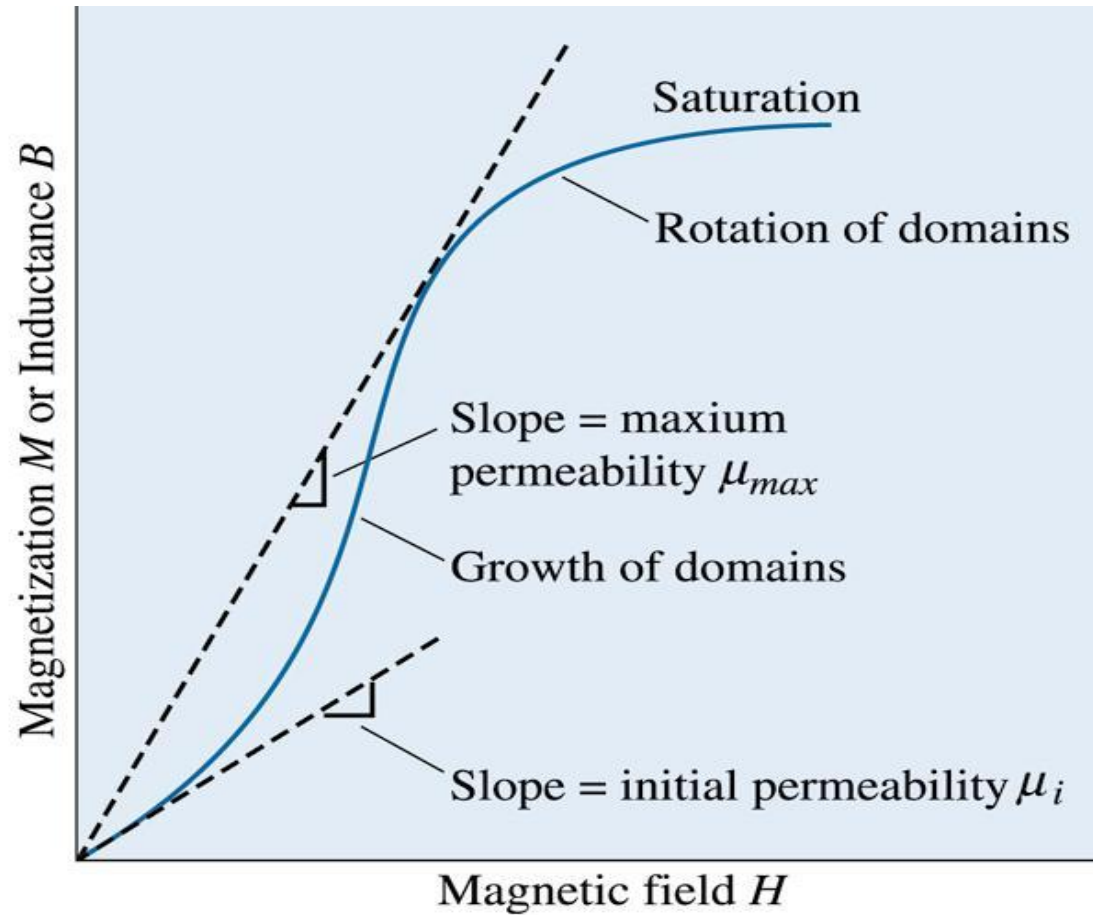
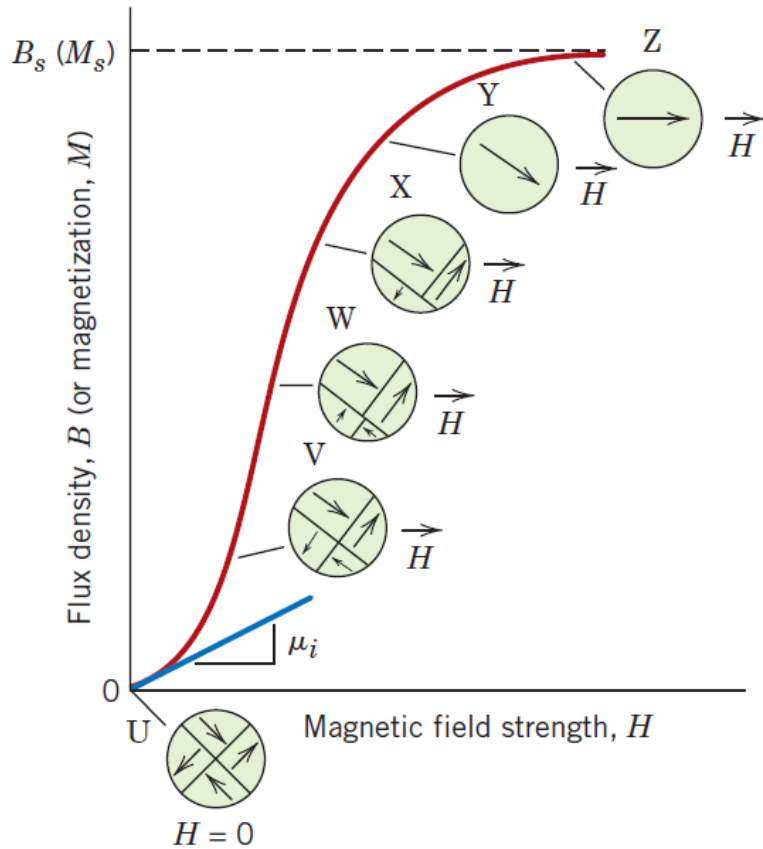
Domínios Magnéticos



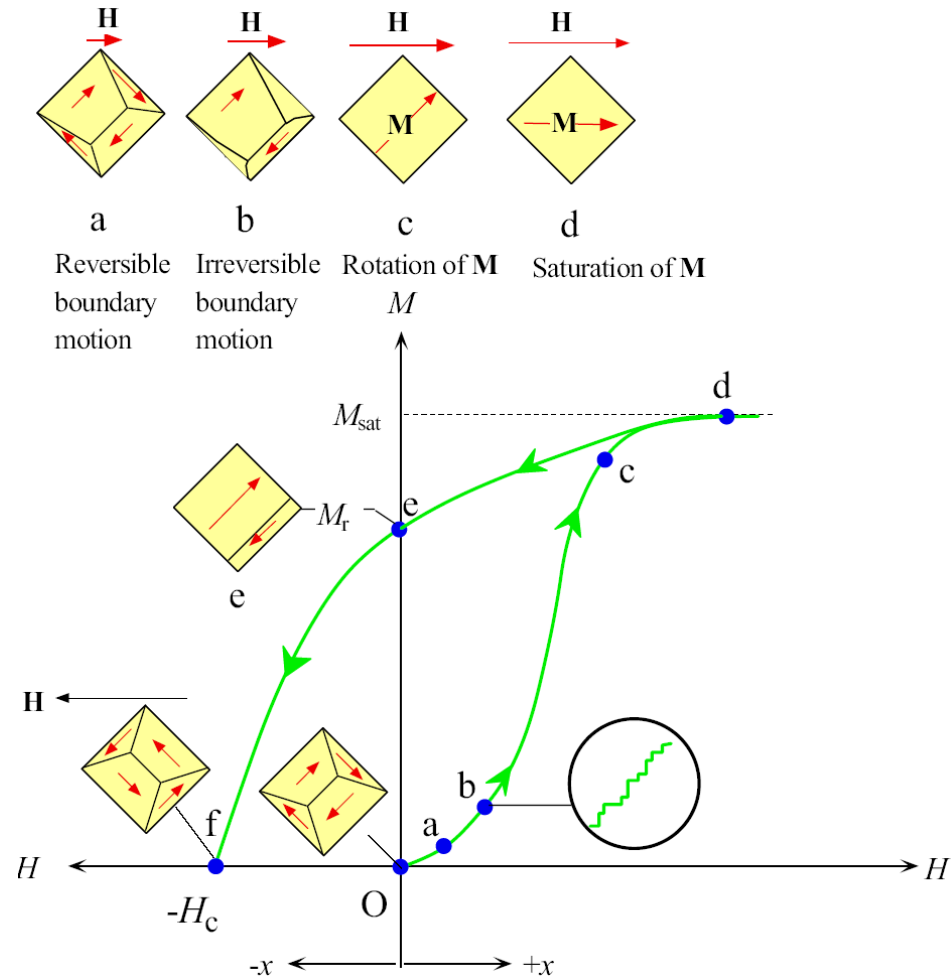
material ferromagnético para diferentes valores de campo externo aplicado.

Considere que o material está inicialmente não desmagnetizado:

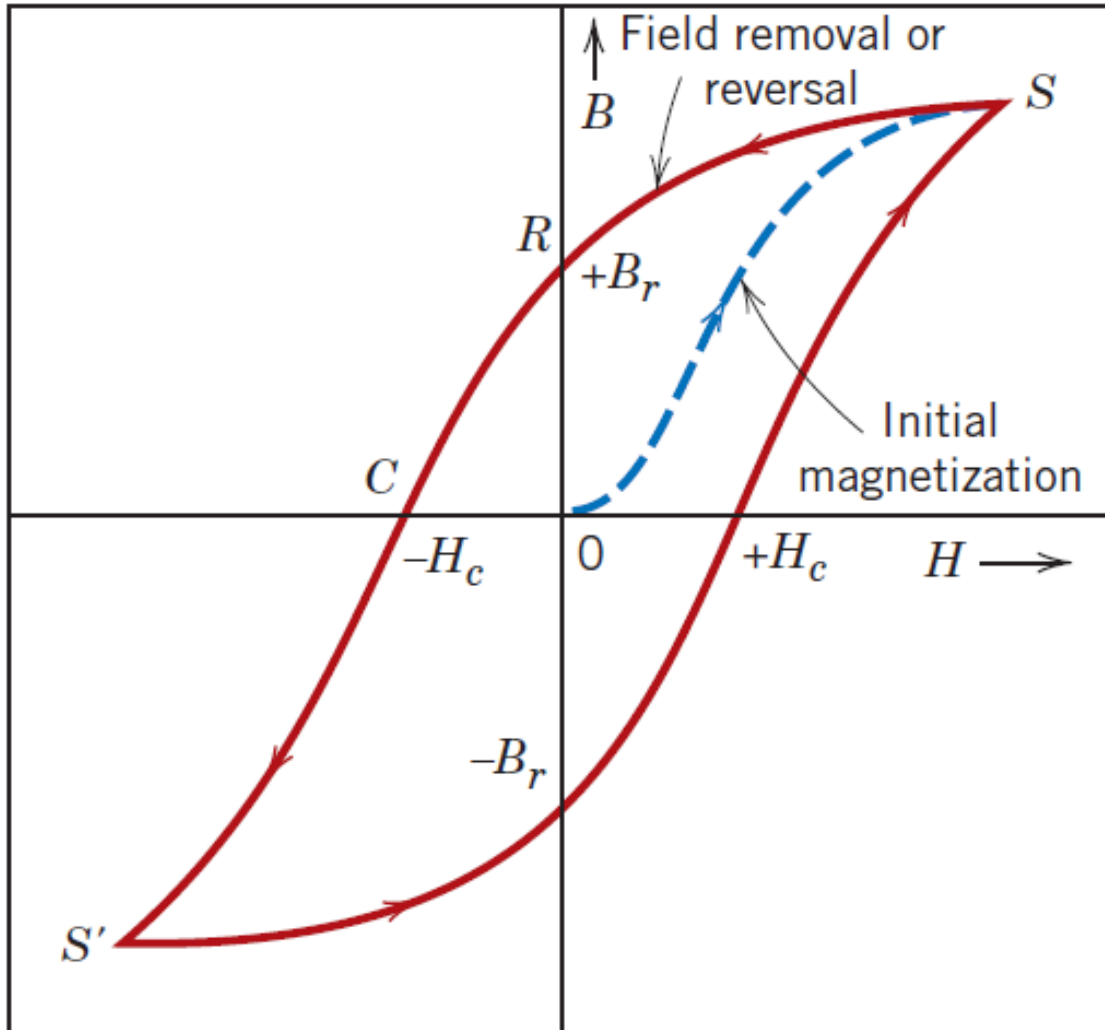
Domínios Magnéticos: Permeabilidade



Domínios Magnéticos: Histerese



Domínios Magnéticos: Histerese



MATERIAIS MAGNÉTICOS

DOMÍNIOS E HISTERESE

Como a permeabilidade é a inclinação da curva de B em função de H, pode ser observado com base na figura anterior que esta é variável e dependente do valor de H.

A inclinação de B em função de H no ponto $H=0$ é especificada como uma propriedade do material denominada de *permeabilidade inicial* μ_i .

O que acontece se a direção do campo externo aplicado for invertida? Isto é uma característica de campo alternado produzido por corrente alternada.

Quando um material ferromagnético for submetido a um campo alternado irá aparecer um fenômeno denominado de *histerese*.

MATERIAIS MAGNÉTICOS

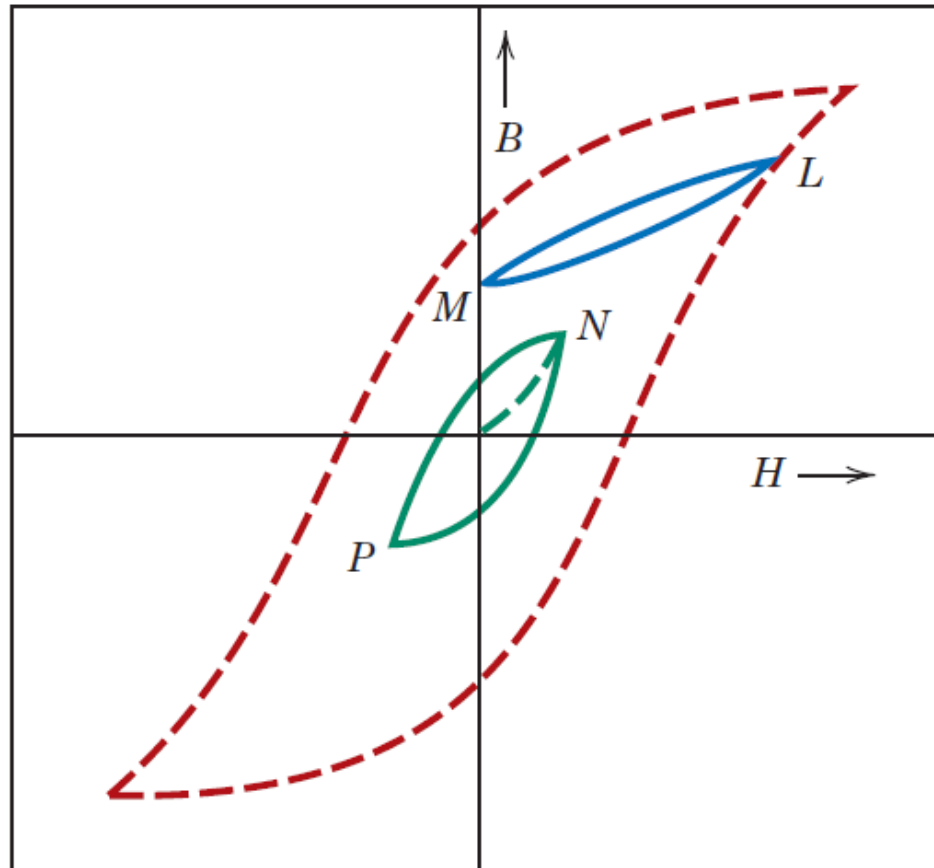
DOMÍNIOS E HISTERESE

- O comportamento da histerese e da magnetização pode ser explicado pelo movimento das paredes dos domínios.
- Quando um campo é aplicado, os domínios mudam de forma e tamanho. No ponto de saturação, a amostra do material se torna um único domínio.
- Quando o campo H é invertido, inicialmente o único domínio é invertido. Depois são formados domínios magnéticos na direção do novo campo.
- Entretanto, existe uma resistência ao movimento por parte das paredes dos domínios que ocorre em resposta ao aumento do campo H aplicado na direção oposta.

MATERIAIS MAGNÉTICOS

DOMÍNIOS E HISTERESE

É possível obter outros ciclos de histerese sem que necessariamente o material atinja a saturação.

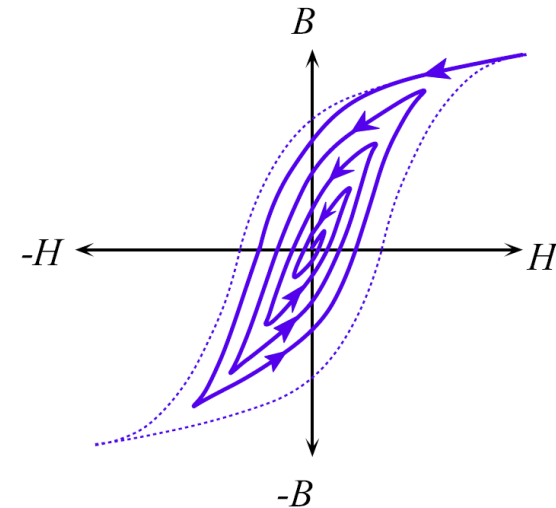
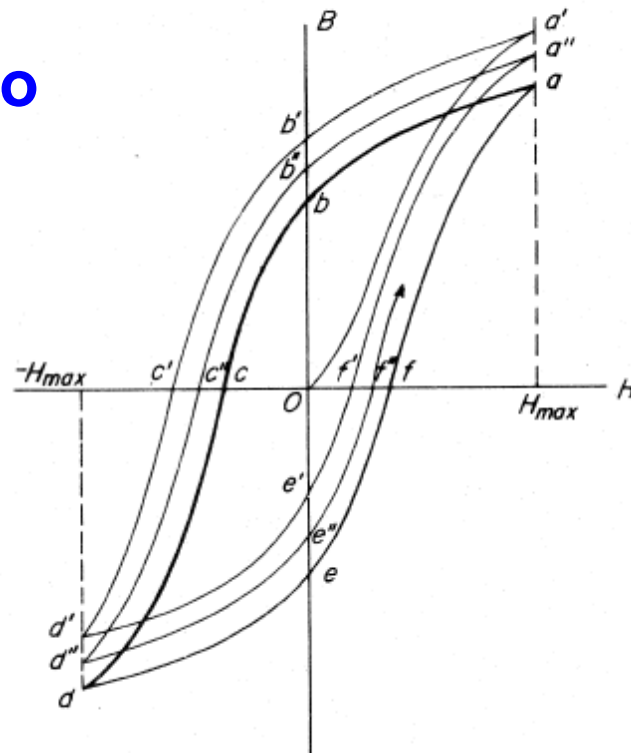


Sua obtenção é feita da seguinte forma: Para um material inicialmente não magnetizado, ao aumentar progressivamente a força magnetizante de 0 até H_{max} na Fig. 2.5, obtém-se o ramo $0a'$. Reduzindo-se em seguida H de H_{max} até zero, tem-se o ramo $a'b'$. Quando $H = 0$, $B = 0b'$. Para reduzir B a zero, é necessário aumenta H em sentido contrário até $0c'$, obtendo-se o ramo $b'c'$ da curva.

Continuando-se a fazer variar H até $-H_{max}$ tem-se o ramo $c'd'$. Fazendo-se variar H de $-H_{max}$ até zero, em seguida até H_{max} e continuando deste modo, obtém-se sucessivamente os pontos $e'-f'-a''-b''-c''-d''-e''-f''-...$

$0a'$ é a curva de magnetização crescente.

Demagnetização



Anisotropy Magnética

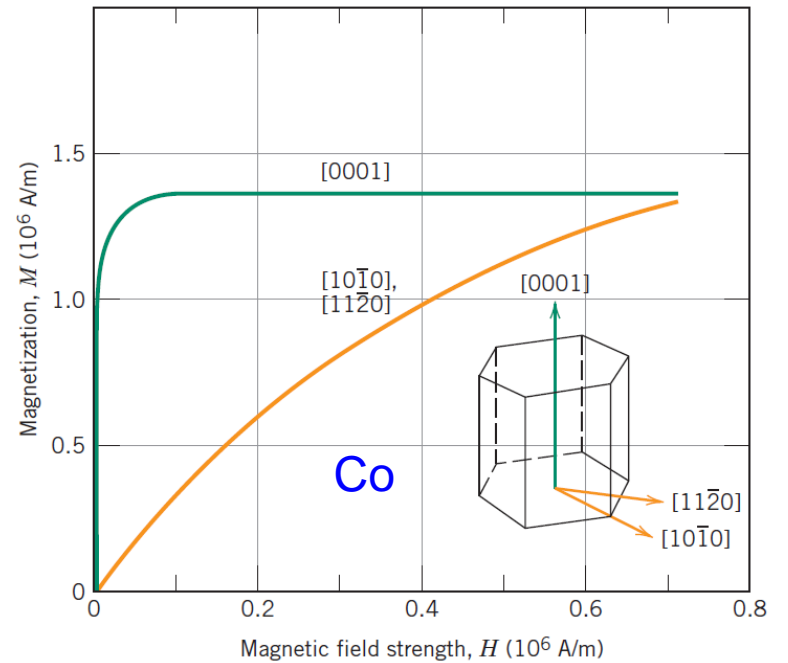
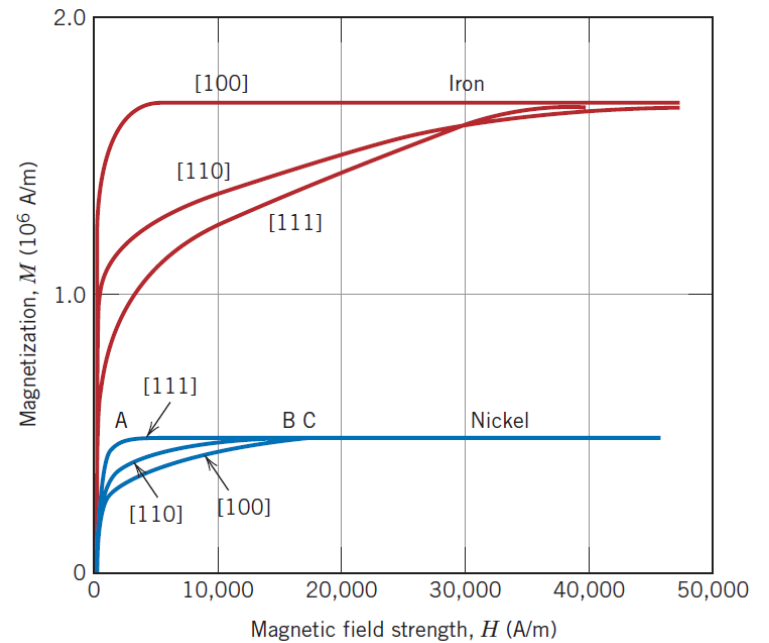
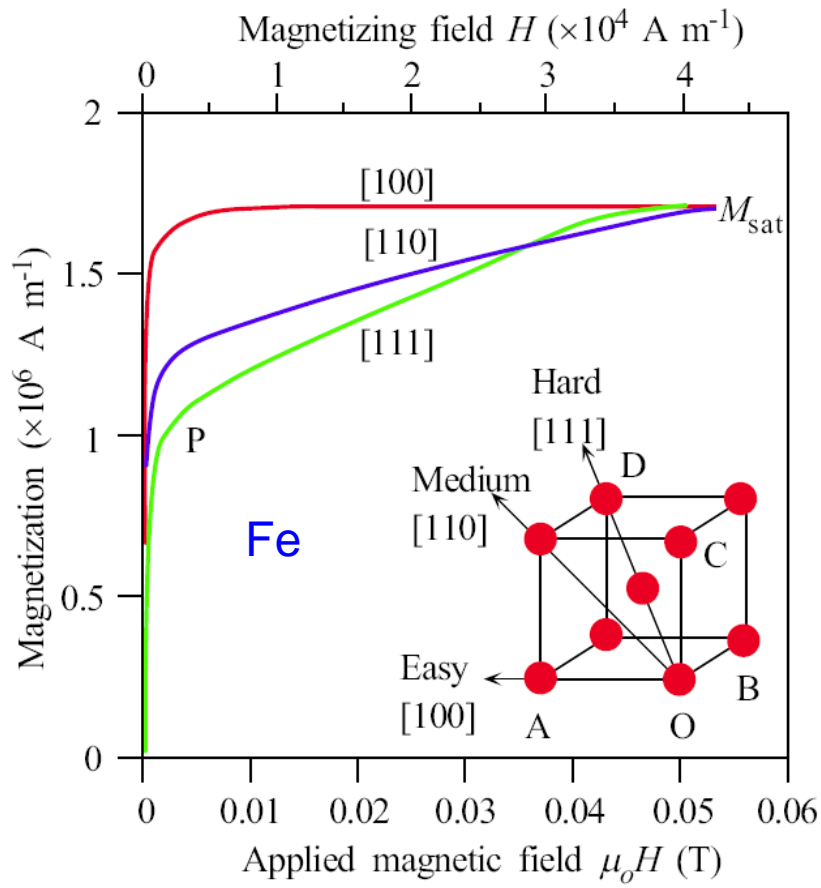
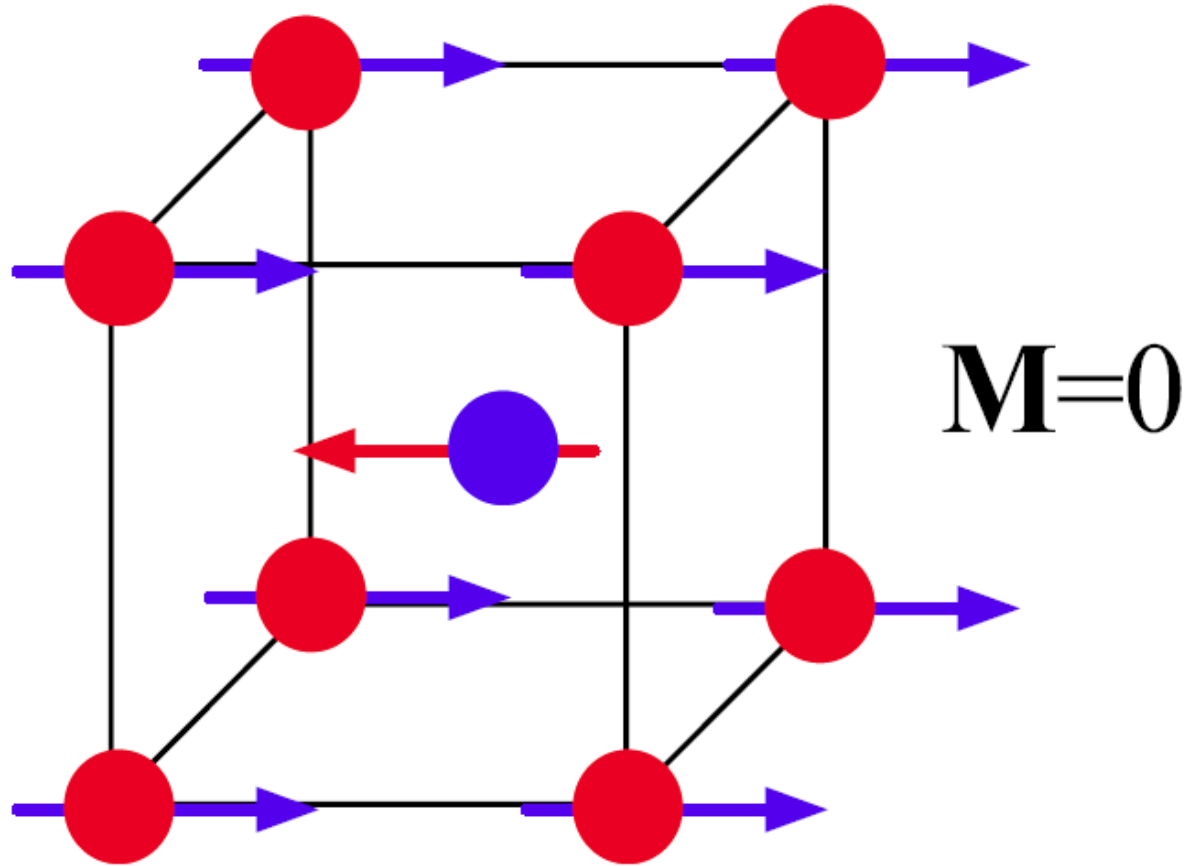


Table 8.4

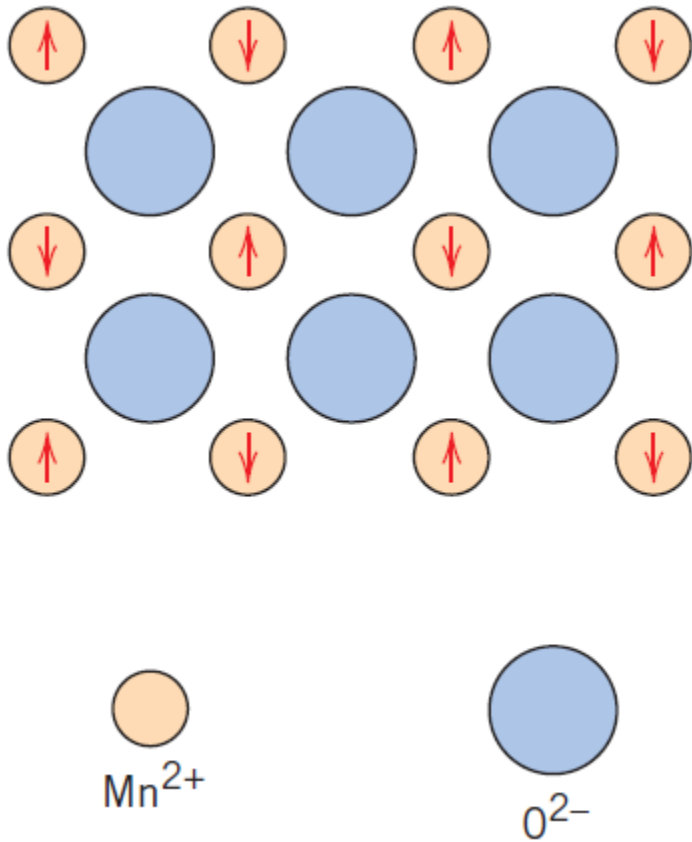
Exchange interaction, magnetocrystalline anisotropy energy K , and saturation magnetostriction coefficient λ_{sat}

Material	Crystal	$E_{\text{ex}} \approx kT_c$ (meV)	Easy	Hard	K (mJ cm ⁻³)	λ_{sat} ($\times 10^{-6}$)
Fe	BCC	90	<100>; cube edge	<111>; cube diagonal	48	20 [100]
						-20 [111]
Co	HCP	120	// to c axis	\perp to c axis	450	
Ni	FCC	50	<111>; cube diagonal	<100>; cube edge	5	-46 [100]
						-24 [111]

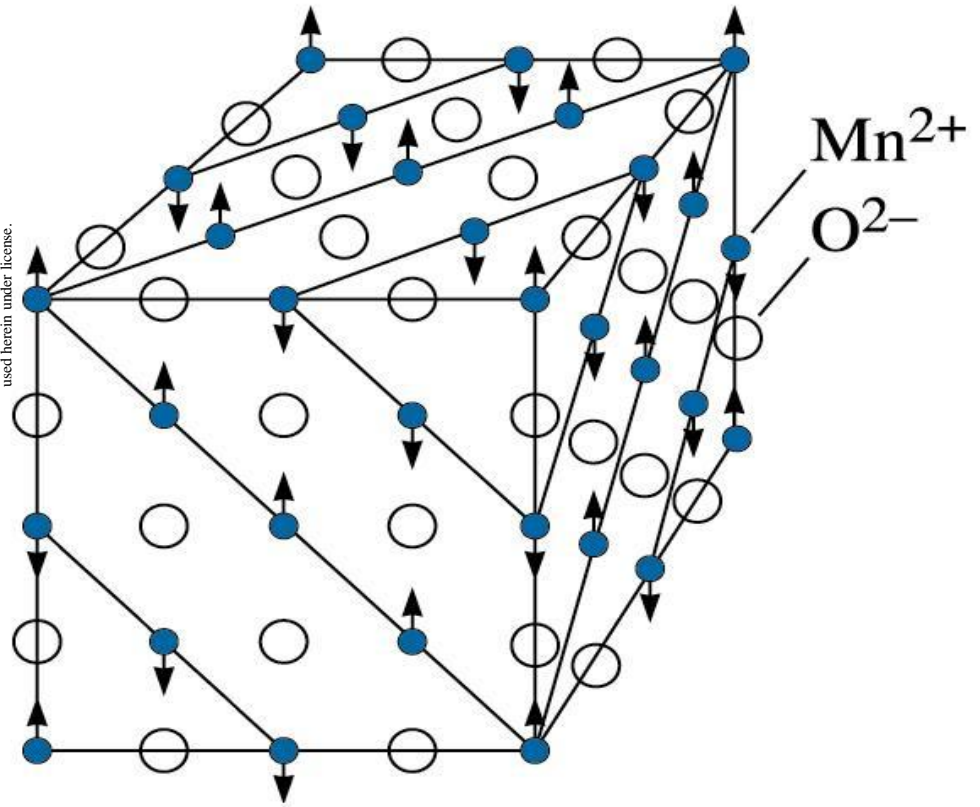
AntiFerromagnetismo



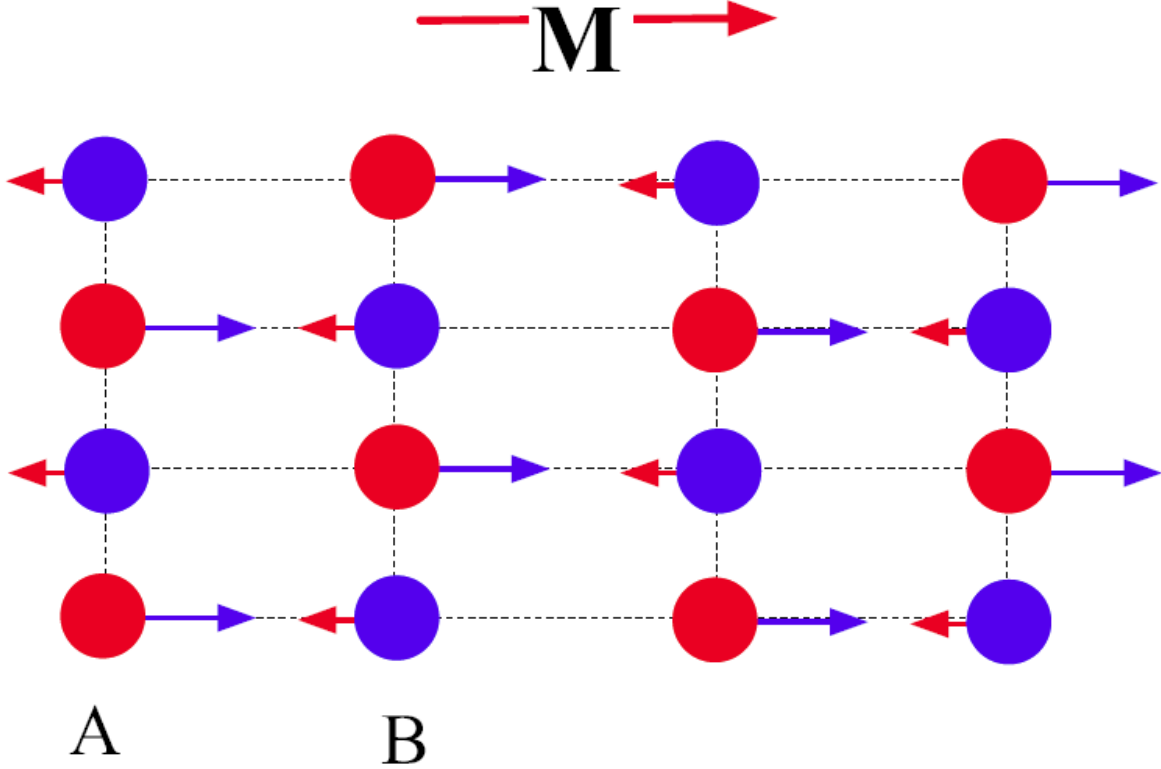
AntiFerromagnetismo



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning[®] is a trademark used herein under license.



Ferrimagnetismo



Magnetização de Saturação M_s

É a máxima magnetização possível em materiais ferromagnéticos e resulta quando todos os dipolos magnéticos estão mutuamente alinhados com o campo externo.

Existindo também um densidade do fluxo de saturação B_s , correspondente.

A Magnetização de Saturação pode ser calculada como o produto do momento magnético líquido para cada átomo pelo número de átomos presentes.

Para o Fe, Co e Ni os momentos magnéticos líquidos são de 2,22, 1,72 e 0,60 magnétons de Bohr, respectivamente.

Table 8.3 Properties of the ferromagnets Fe, Co, Ni, and Gd

	Fe	Co	Ni	Gd
Crystal structure	BCC	HCP	FCC	HCP
Bohr magnetons per atom	2.22	1.72	0.60	7.1
$M_{\text{sat}}(0)$ (MA m ⁻¹)	1.75	1.45	0.50	2.0
$B_{\text{sat}} = \mu_0 M_{\text{sat}}(\text{T})$	2.2	1.82	0.64	2.5
T_C	770 °C 1043 K	1127 °C 1400 K	358 °C 631 K	16 °C 289 K

Exemplo

Calcular:

(a) A magnetização de saturação e

(b) A densidade de fluxo de saturação do Ni cuja densidade é $8,90 \text{ b/cm}^3$

$$M_s = 0,60\mu_B N$$

$$N = \frac{\rho N_A}{A_{Ni}}$$

$$N = \frac{8,9 \times 10^6 \text{ g} / \text{m}^3 (6,023 \times 10^{23} \text{ at} / \text{mol})}{58,71 \text{ g} / \text{mol}} = 9,13 \times 10^{28} \text{ at} / \text{m}^3$$

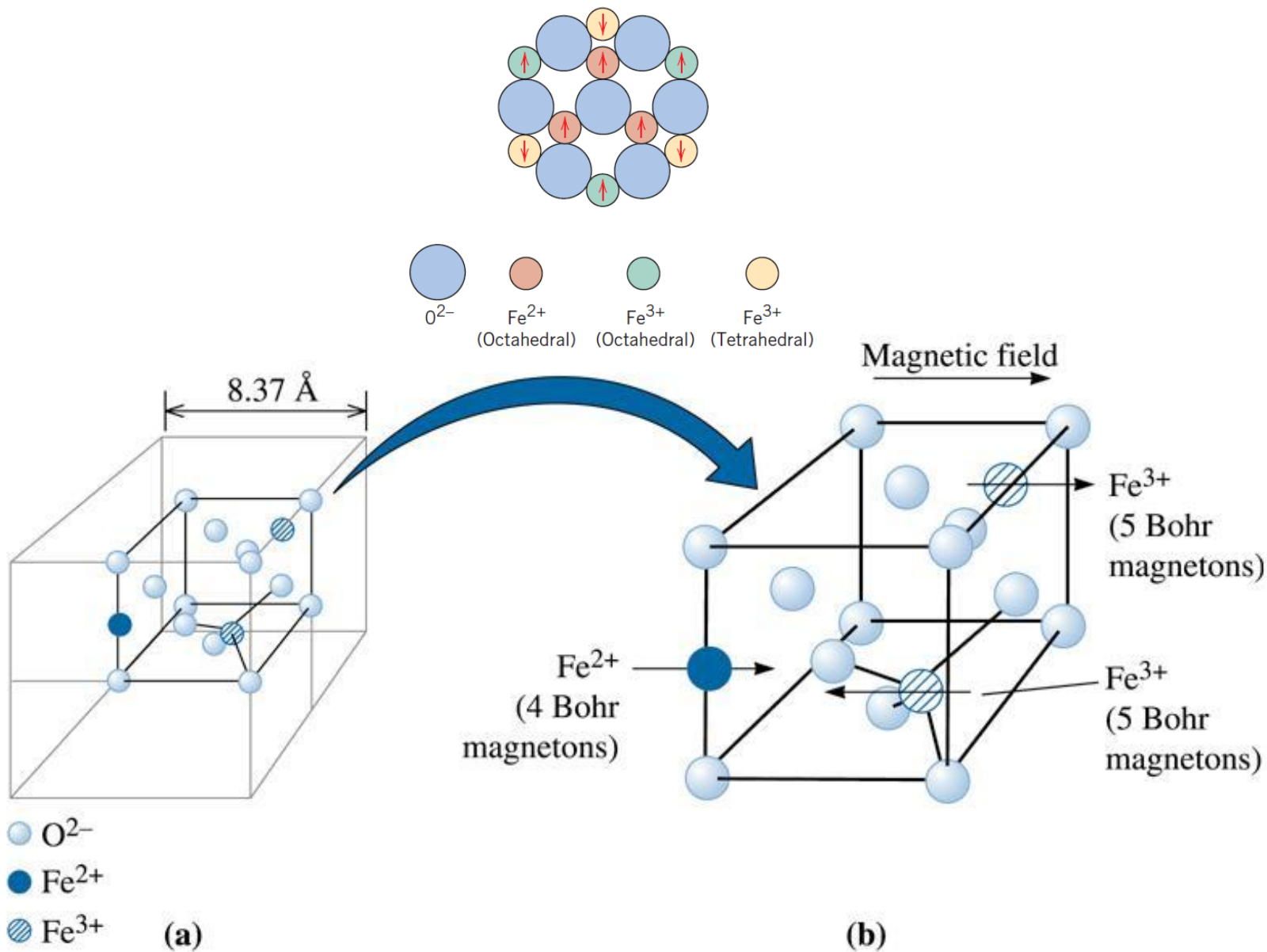
Solução

$$M_s = 0,6 \text{MagnetonBohr} / \text{at} \times (9.27 \times 10^{-24} \text{Am}^2 / \text{MagnetondeBohr}) (9.13 \times 10^{28} \text{at} / \text{m}^3)$$

$$M_s = 5,1 \times 10^5 \text{A} / \text{m}$$

$$B_s = \mu_0 M_s$$

$$B_s = 4\pi \times 10^{-7} \times 5,1 \times 10^5 = 0,64 \text{T}$$

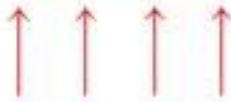
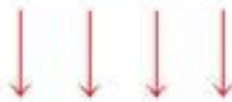

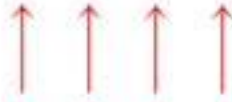


©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning[™] is a trademark used herein under license.

Figure 19.15 (a) Estrutura da Magnetita, Fe_3O_4 . (b) A sub-celula. Os momentos magnéticos tem orientações opostas.

Ferrimagnetismo

Table 20.3 The Distribution of Spin Magnetic Moments for Fe^{2+} and Fe^{3+} Ions in a Unit Cell Fe_3O_4 ^a

<i>Cation</i>	<i>Octahedral Lattice Site</i>	<i>Tetrahedral Lattice Site</i>	<i>Net Magnetic Moment</i>
Fe^{3+}			Complete cancellation
Fe^{2+}		—	
			

^a Each arrow represents the magnetic moment orientation for one of the cations.

Exemplo

Magnetização na Magnetita (Fe_3O_4)

Calcular o valor total dos momentos magnéticos por centímetro cúbico na magnetita

Calcular o valor do (B_{sat})

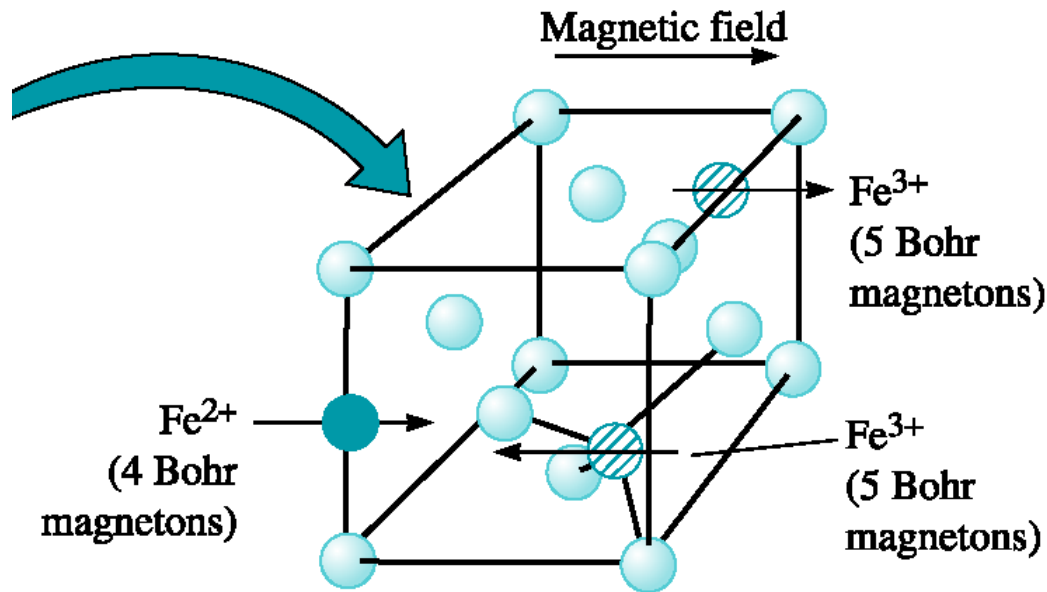


Figure 19.15 (b) 1/8 da célula unitária.

(b)

Example 19.7 SOLUTION

São oito sub-células, então existem 32 magnetons de Bohr por célula, com parâmetro de rede of 8.37×10^{-8} cm, is:

$$V_{\text{cell}} = (8.37 \times 10^{-8})^3 = 5.86 \times 10^{-22} \text{ cm}^3$$

Os momentos magnéticos por cm^3 :

$$\begin{aligned} \text{Total moment} &= \frac{32 \text{ Bohr magnetons/cell}}{5.86 \times 10^{-22} \text{ cm}^3/\text{cell}} = 5.46 \times 10^{22} \text{ magnetons/cm}^3 \\ &= (5.46 \times 10^{22})(9.27 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{magneton}) \\ &= 0.51 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{cm}^3 = 5.1 \times 10^5 \text{ A/m}^2/\text{m}^3 = 5.1 \times 10^5 \text{ A/m} \end{aligned}$$

Magnetização de saturação (M_{sat}). O valor de $B_{\text{sat}} \cong \mu_0 M_{\text{sat}}$ será
 $= (4 \times 10^{-7})(5.1 \times 10^5) = 0.64$ Tesla.

TABLE 19-7 ■ *Magnetic moments for ions in the spinel structure*

Ion	Bohr Magnetons
Fe ³⁺	5
Mn ²⁺	5
Fe ²⁺	4
Co ²⁺	3
Ni ²⁺	2
Cu ²⁺	1
Zn ²⁺	0

Exemplo

Projeto de materiais magnéticos

Projete uma ferrita com magnetização de saturação de 5.5×10^5 A/m.

TABLE 19-7 ■ *Magnetic moments for ions in the spinel structure*

Ion	Bohr Magnetons
Fe ³⁺	5
Mn ²⁺	5
Fe ²⁺	4
Co ²⁺	3
Ni ²⁺	2
Cu ²⁺	1
Zn ²⁺	0

Solução

Considerando que a adição de ions de Mn não altera o paraâmetro de rede:

$$V_{\text{cell}} = 5.86 \times 10^{-22} \text{ cm}^3 = 5.86 \times 10^{-28} \text{ m}^3$$

seja x a fração de ions Mn^{2+} que são substituidos por ions de Fe^{2+} os quais serão $1 - x$. O momento magnético total será

Total moment

$$\begin{aligned} &= \frac{(8 \text{ subcells})[(x)(5 \text{ magnetons}) + (1 - x)(4 \text{ magnetons})](9.27 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2)}{5.86 \times 10^{-28} \text{ m}^3} \\ &= \frac{(8)(5x + 4 - 4x)(9.27 \times 10^{-24})}{5.86 \times 10^{-28}} = 5.5 \times 10^5 \end{aligned}$$

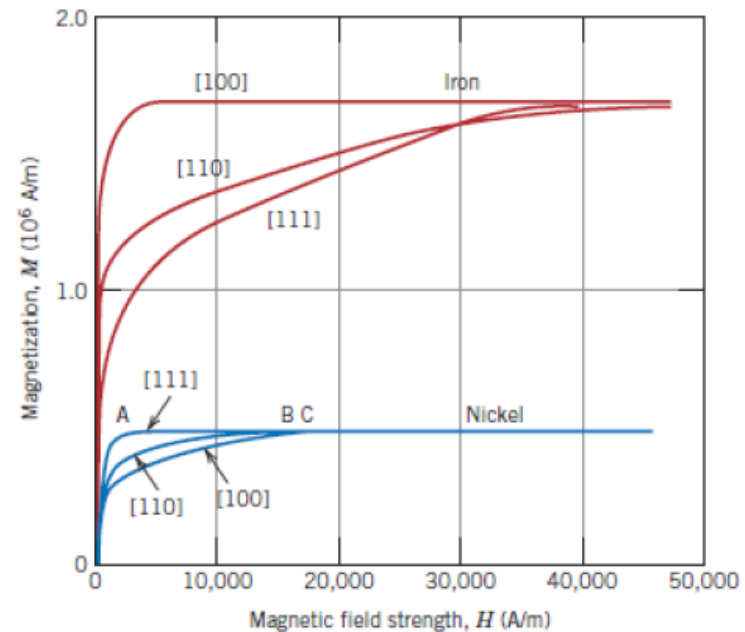
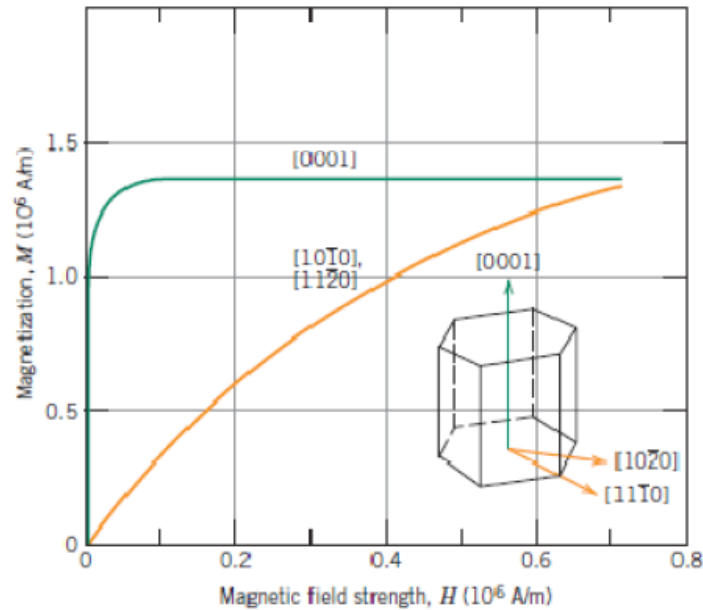
$$x = -4 + 4.346 = 0.346$$

Devem ser substituidos 34.6 at% de ions Fe^{2+} por ions Mn^{2+}

Proposto 1

Projetar uma liga de CoFe, substituindo átomos de Fe por Co, que apresente uma magnetização de saturação 5% menor do que o valor de magnetização do ferro puro. Considere que a estrutura cristalina da liga continuará sendo CCC com as mesmas dimensões. **Qual é a fração em peso de Co na liga?**

Dados do Co: $A = 58,93 \text{ g/mol}$, $\rho = 8,90 \text{ g/cm}^3$, $r = 0.125 \text{ nm}$, estrutura HCP e Dados do Fe: $A = 55,85 \text{ g/mol}$, $\rho = 7,86 \text{ g/cm}^3$, $r = 0.124 \text{ nm}$ e estrutura CCC.



S. Kaya, "On the Magnetization of Single Crystals of Cobalt," *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, **17**, 1157 (1928).

K. Honda and S. Kaya, "On the Magnetization of Single Crystals of Iron," *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, **15**, 721 (1926).

S. Kaya, "On the Magnetization of Single Crystals of Nickel," *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, **17**, 639 (1928).

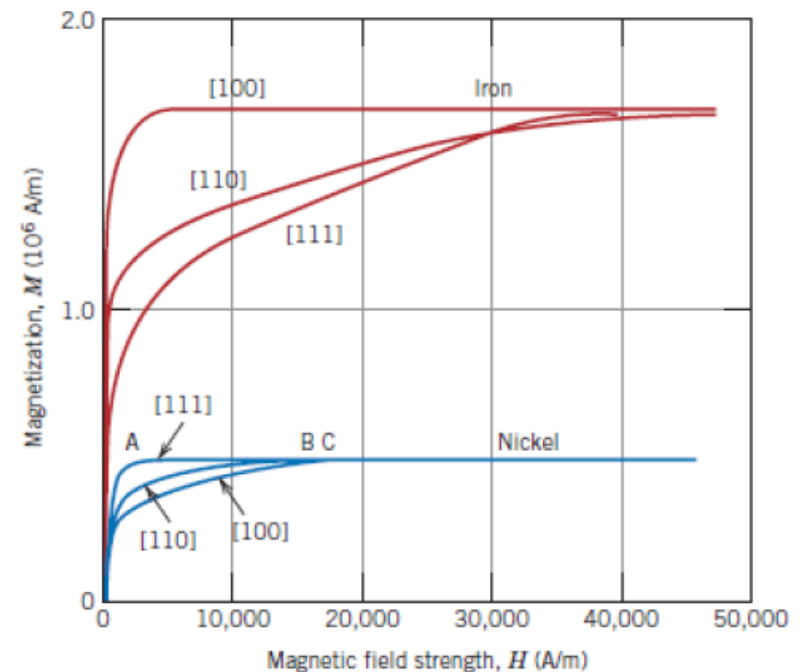
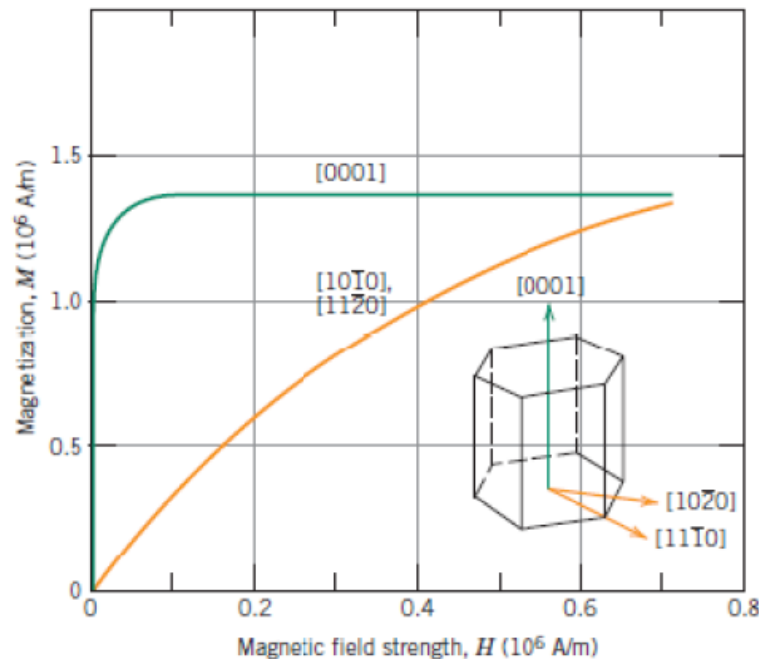
Proposto 2

Determinar a magnetização de saturação de uma liga de $\text{Co}_{0,95}\text{Ni}_{0,03}\text{Fe}_{0,02}$ (composição em peso)

Dados do Co: $A = 58,93 \text{ g/mol}$, $\rho = 8,90 \text{ g/cm}^3$, $r = 0,125 \text{ nm}$, estrutura HCP,

Dados do Fe: $A = 55,85 \text{ g/mol}$, $\rho = 7,86 \text{ g/cm}^3$, $r = 0,124 \text{ nm}$ e estrutura CCC e.

Dados do Ni: $A = 58,69 \text{ g/mol}$, $\rho = 8,90 \text{ g/cm}^3$, $r = 0,124 \text{ nm}$, estrutura CFC



S. Kaya, "On the Magnetization of Single Crystals of Cobalt," *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, **17**, 1157 (1928).

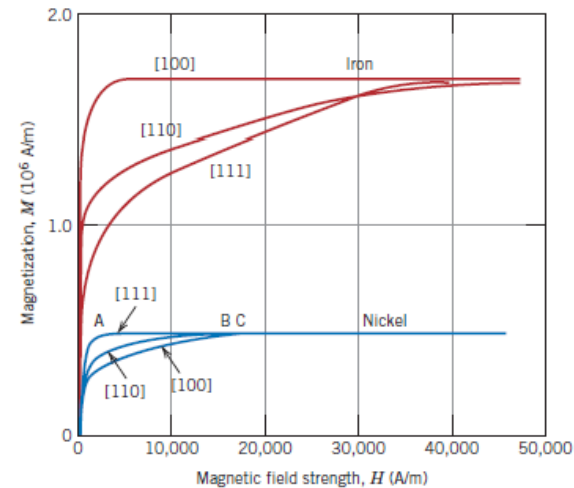
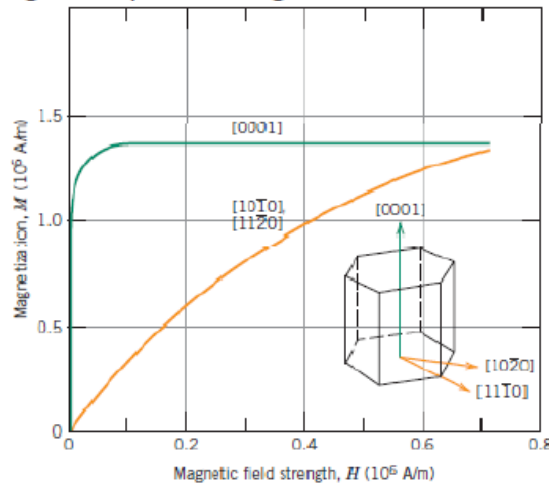
K. Honda and S. Kaya, "On the Magnetization of Single Crystals of Iron," *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, **15**, 721 (1926).

S. Kaya, "On the Magnetization of Single Crystals of Nickel," *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, **17**, 639 (1928).

Proposto 3

Projetar uma liga de CoFe, substituindo átomos de Fe por Co, que apresente uma magnetização de saturação 2,5% menor do que o valor de magnetização do ferro puro. Considere que a estrutura cristalina da liga continuará sendo CCC com as mesmas dimensões. **Qual é a fração em peso de Co na liga?**

Dados do Co: $A = 58,93 \text{ g/mol}$, $\rho = 8,90 \text{ g/cm}^3$, $r = 0.125 \text{ nm}$, estrutura HCP e,
Dados do Fe: $A = 55,85 \text{ g/mol}$, $\rho = 7,86 \text{ g/cm}^3$, $r = 0.124 \text{ nm}$ e estrutura CCC.



S. Kaya, "On the Magnetization of Single Crystals of Cobalt," *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, **17**, 1157 (1928).

K. Honda and S. Kaya, "On the Magnetization of Single Crystals of Iron," *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, **15**, 721 (1926).

S. Kaya, "On the Magnetization of Single Crystals of Nickel," *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, **17**, 639 (1928).

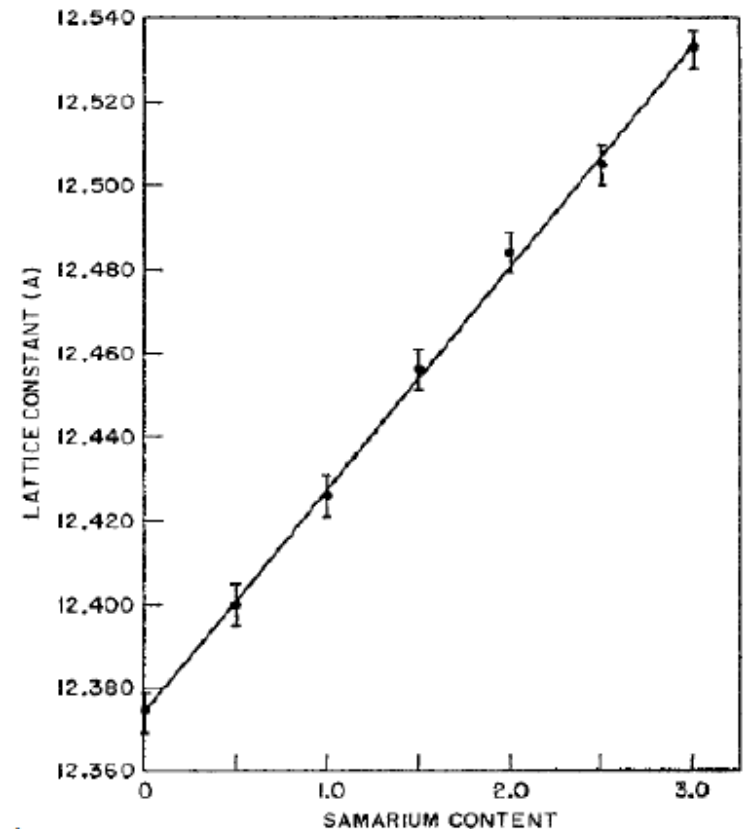
Proposto 4

A fórmula química para a granada de ferro de samário ($\text{Sm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) pode ser escrita na forma $\text{Sm}_3^c\text{Fe}_2^a\text{Fe}_3^d\text{O}_{12}$ onde os índices sobre-escritos **a**, **c** e **d** representam diferentes posições onde os íons Sm^{3+} e Fe^{3+} estão localizados. Os momentos magnéticos de spin para os íons Sm^{3+} e Fe^{3+} nas posições **a** e **c** são orientados paralelamente uns aos outros, e antiparalelamente aos íons Fe^{3+} nas posições **d**. Sabe-se que cada célula unitária cúbica consiste em oito unidades da fórmula ($\text{Sm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$); a magnetização de saturação para este material é de $1,35 \times 10^5$ A/m e existem 5 magnétons de Bohr associados com cada íon Fe^{3+} .

A granada de ferro de ítrio ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$)₈ tem características similares com a granada de ferro de samário ($\text{Sm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$)₈ com magnetização de saturação de $1,0 \times 10^4$ A/m.

O gráfico ao lado representa valores experimentais do parâmetro de rede da célula unitária cúbica (em Å) em função do conteúdo de samário em número de íons, de 0 a 3, que corresponde a 0% e 100% de Sm (ou 100%-0% de Y), respectivamente. A linha contínua representa a regressão linear dos dados experimentais.

Determine a magnetização de saturação de uma granada mista de ferro samário-ítrio se a fração em peso de Y na granada é 16%. Dados: $A_Y = 88,91$ g/mol, $A_{\text{Sm}} = 150,40$ g/mol, $A_{\text{Fe}} = 55,85$ g/mol, $A_{\text{O}} = 15,99$ g/mol



J. R. Cunningham et al, Samarium Substitutions in Yttrium Iron Garnet, *Journal of Applied Physics*, vol. 31, no. 5, pp. 45-46, maio 1960.

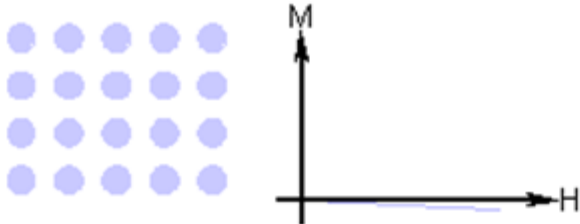
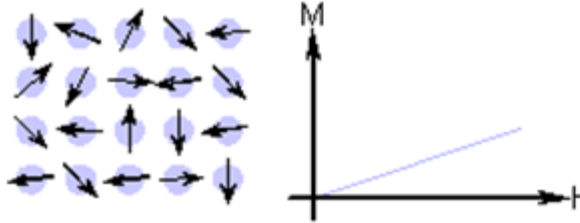
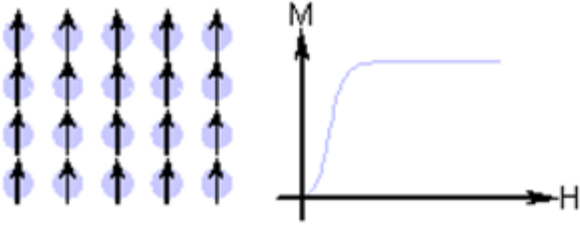
TABLE 19-1 ■ *The electron spins in the 3d energy level in transition metals, with arrows indicating the direction of spin*

Metal	3d					4s
Sc	↑					↑↓
Ti	↑	↑				↑↓
V	↑	↑	↑			↑↓
Cr	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Mn	↑	↑	↑	↑	↑	↑↓
Fe	↑↓	↑	↑	↑	↑	↑↓
Co	↑↓	↑↓	↑	↑	↑	↑↓
Ni	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	↑↓
Cu	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑

Ferrimagnetismo

Table 20.4 Net Magnetic Moments for Six Cations

<i>Cation</i>	<i>Net Spin Magnetic Moment (Bohr magnetons)</i>
Fe^{3+}	5
Fe^{2+}	4
Mn^{2+}	5
Co^{2+}	3
Ni^{2+}	2
Cu^{2+}	1

Type of Magnetism	Susceptibility	Atomic / Magnetic Behaviour	Example / Susceptibility
Diamagnetism	Small & negative.	Atoms have no magnetic moment 	Au -2.74×10^{-6} Cu -0.77×10^{-6}
Paramagnetism	Small & positive.	Atoms have randomly oriented magnetic moments 	β -Sn 0.19×10^{-6} Pt 21.04×10^{-6} Mn 66.10×10^{-6}
Ferromagnetism	Large & positive, function of applied field, microstructure dependent.	Atoms have parallel aligned magnetic moments 	Fe $\sim 100,000$

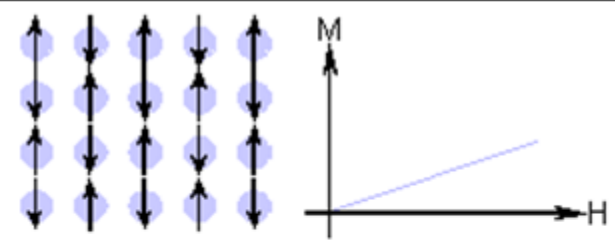
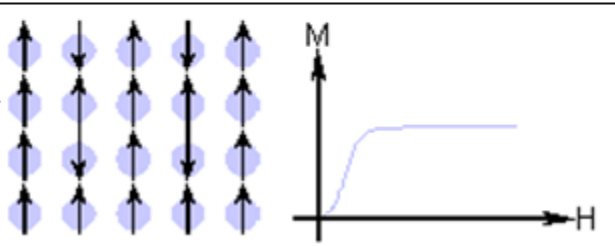
Type of Magnetism	Susceptibility	Atomic / Magnetic Behaviour	Example / Susceptibility
Antiferromagnetism	Small & positive.	<p>Atoms have mixed parallel and anti-parallel aligned magnetic moments</p> 	Cr 3.6×10^{-6}
Ferrimagnetism	Large & positive, function of applied field, microstructure dependent	<p>Atoms have anti-parallel aligned magnetic moments</p> 	Ba ferrite ~ 3

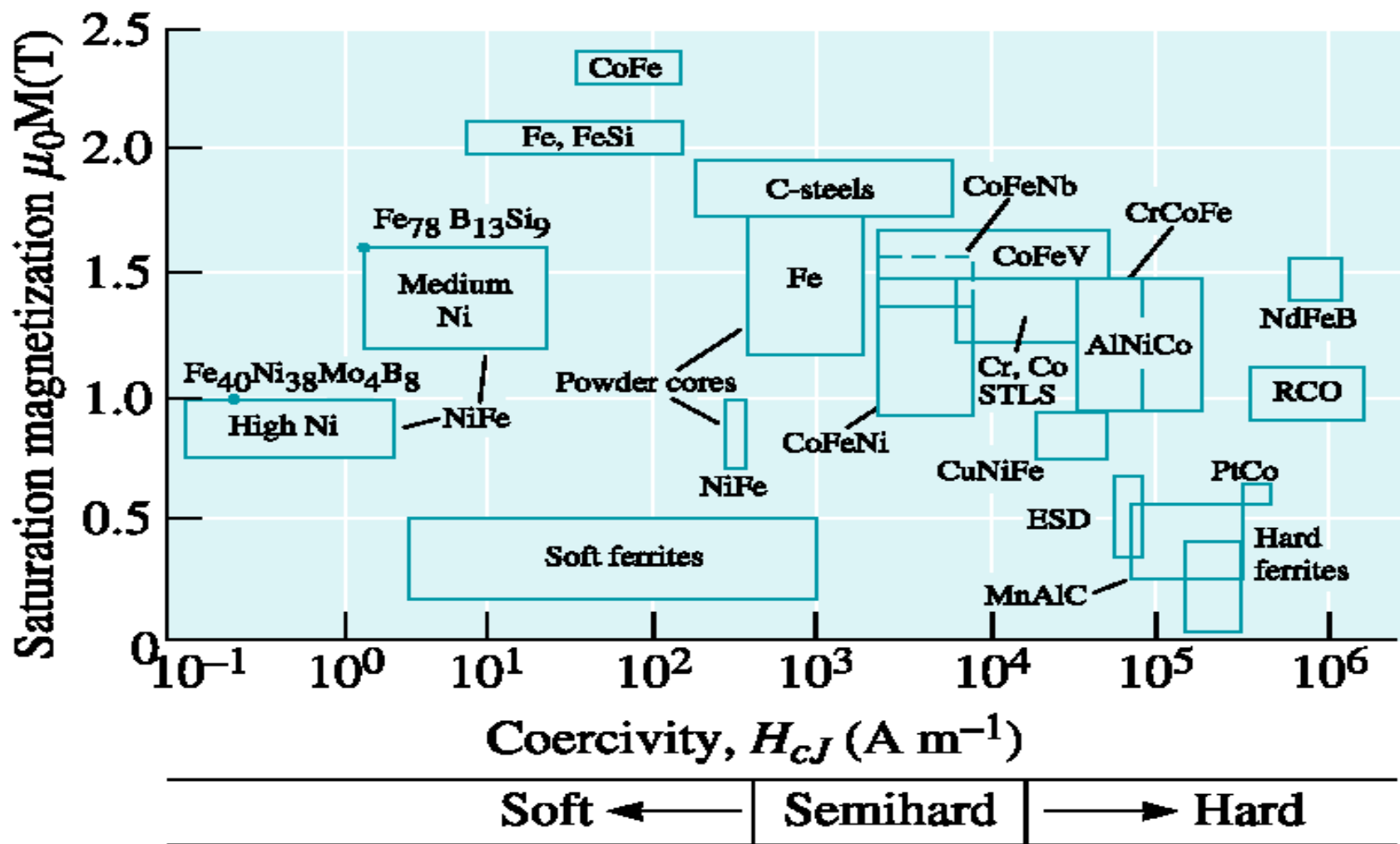
Table 8.2 Classification of magnetic materials

Type	χ_m (typical values)	χ_m versus T	Comments and Examples
Diamagnetic	Negative and small (-10^{-6})	T independent	Atoms of the material have closed shells. Organic materials, <i>e.g.</i> , many polymers; covalent solids, <i>e.g.</i> , Si, Ge, diamond; some ionic solids, <i>e.g.</i> , alkali halides; some metals, <i>e.g.</i> , Cu, Ag, Au.
Paramagnetic	Negative and large (-1)	Below a critical temperature	Superconductors
	Positive and small (10^{-5} – 10^{-4})	Independent of T	Due to the alignment of spins of conduction electrons. Alkali and transition metals.
	Positive and small (10^{-5})	Curie or Curie–Weiss law, $\chi_m = C/(T - T_C)$	Materials in which the constituent atoms have a permanent magnetic moment, <i>e.g.</i> , gaseous and liquid oxygen; ferromagnets (Fe), antiferromagnets (Cr), and ferrimagnets (Fe_3O_4) at high temperatures.
Ferromagnetic	Positive and very large	Ferromagnetic below and paramagnetic above the Curie temperature	May possess a large permanent magnetization even in the absence of an applied field. Some transition and rare earth metals, Fe, Co, Ni, Gd, Dy.
Antiferromagnetic	Positive and small	Antiferromagnetic below and paramagnetic above the Néel temperature	Mainly salts and oxides of transition metals, <i>e.g.</i> , MnO, NiO, MnF_2 , and some transition metals, α -Cr, Mn.
Ferrimagnetic	Positive and very large	Ferrimagnetic below and paramagnetic above the Curie temperature	May possess a large permanent magnetization even in the absence of an applied field. Ferrites.

Classificação das ligas magnéticas

- A classificação é feita de acordo com a forma da curva de histerese.
 - O nome está relacionado com as propriedades mecânicas/metalúrgicas da liga

- **Ligas Magnéticas Duras**
- **Ligas Magnéticas Macias**



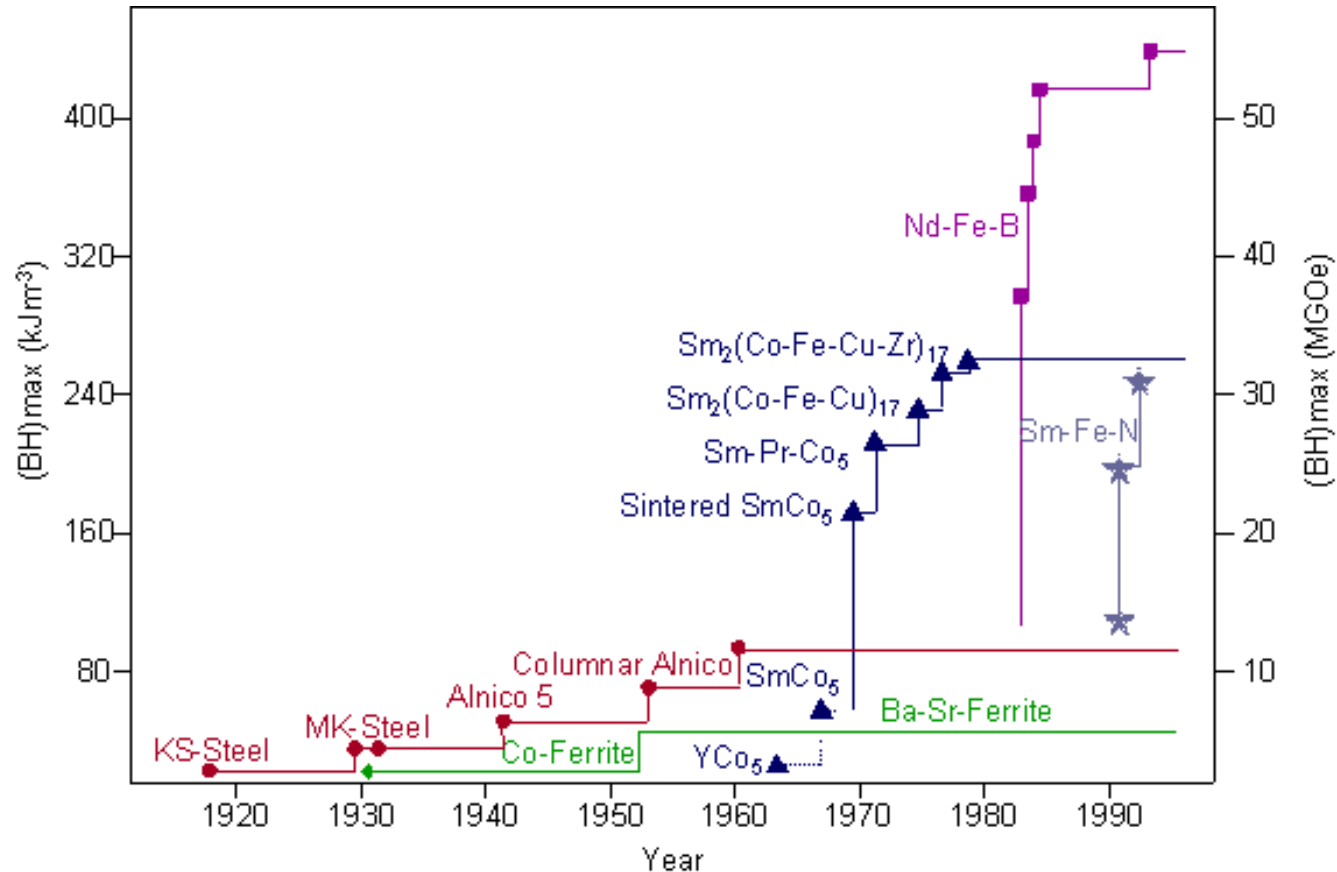
(b)

Ligas magnéticas duras

- Se caracterizam pelo grande valor de H_c
- São ligas endurecidas com estruturas desequilibradas, dispersas
- São utilizadas na fabricação de ímãs permanentes

Ligas magnéticas moles

- Apresentam H_c de baixo valor e pequenas perdas de histerese.
- São ligas organizadas. Geralmente metais puros com boa qualidade estrutural.
- São empregadas como ligas a serem submetidas à magnetização alternada (núcleos de transformadores)



Desenvolvimento de ímãs permanentes no século 20. BH tem sido melhorado exponencialmente, dobrando a cada 12 anos.

TABLE 19-6 ■ Selected properties of hard, permanent, or magnetic materials

Material	Common Name	$\mu_0 M_r$ (T)	$\mu_0 H_c$ (T)	$(BH)_{\max}$ (kJ · m ⁻³)	T_c (°C)
Fe-Co	Co-steel	1.07	0.02	6	887
Fe-Co-Al-Ni	Alnico-5	1.05	0.06	44	880
BaFe ₁₂ O ₁₉	Ferrite	0.42	0.31	34	469
SmCo ₅	Sm-Co	0.87	0.80	144	723
Nd ₂ Fe ₁₄ B	Nd-Fe-B	1.23	1.21	290–445	312

(Source: Adapted from Permanent Magnetism, by R. Skomski and J.M.D. Coey, p. 23, Table 1-2. Edited by J.M.D. Coey and D.R. Tilley. Copyright © 1999 Institute of Physics Publishing. Adapted by permission.)

Table 8.6 Hard magnetic materials and typical values

Magnetic Material	$\mu_0 H_c$ (T)	B_r (T)	$(BH)_{\max}$ (kJ m ⁻³)	Examples and Uses
Ideal hard	Large	Large	Large	Permanent magnets in various applications.
Alnico (Fe–Al–Ni–Co–Cu)	0.19	0.9	50	Wide range of permanent magnet applications.
Alnico (Columnar)	0.075	1.35	60	
Strontium ferrite (anisotropic)	0.3–0.4	0.36–0.43	24–34	Starter motors, dc motors, loudspeakers, telephone receivers, various toys.
Rare earth cobalt, <i>e.g.</i> , Sm ₂ Co ₁₇ (sintered)	0.62–1.1	1.1	150–240	Servo motors, stepper motors, couplings, clutches, quality audio headphones.
NdFeB magnets	0.9–1.0	1.0–1.2	200–275	Wide range of applications, small motors (<i>e.g.</i> , in hand tools), walkman equipment, CD motors, MRI body scanners, computer applications.
Hard particles, γ -Fe ₂ O ₃	0.03	0.2		Audio and video tapes, floppy disks.

CURVA HISTERÉTICA PARA LIGAS MAG. DURAS E MOLES

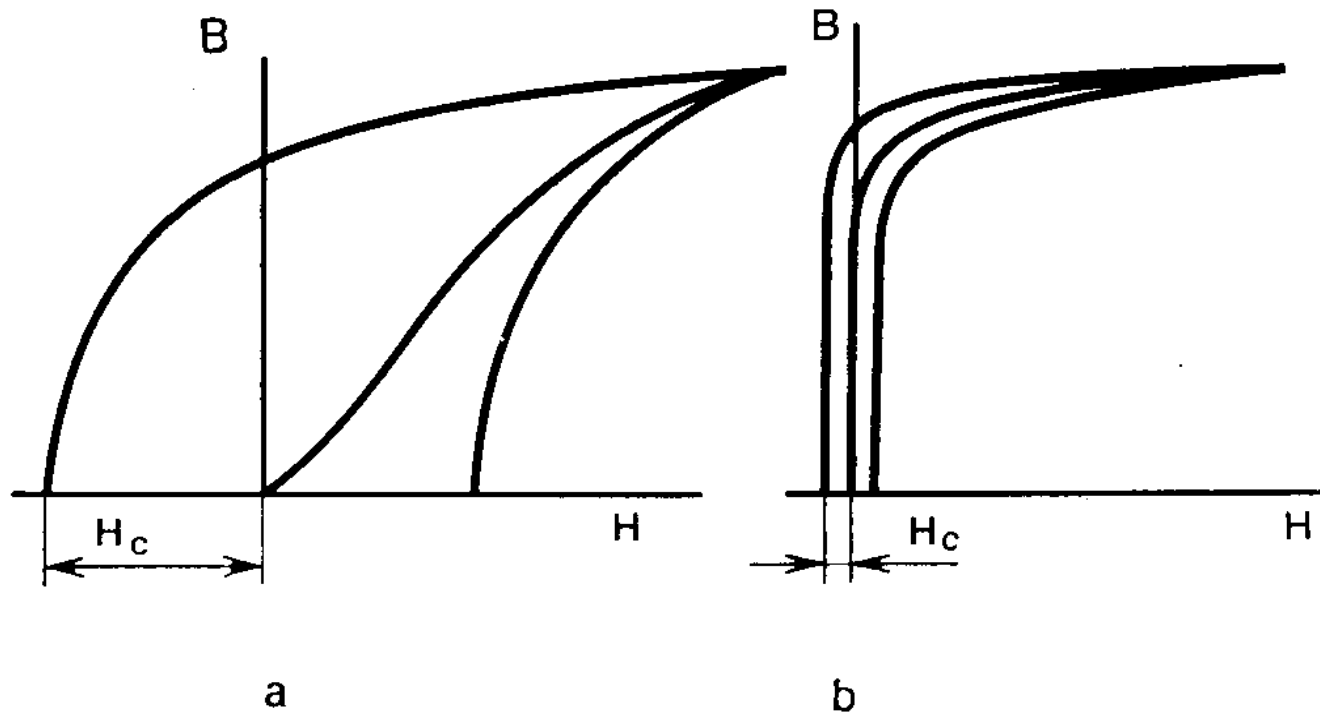


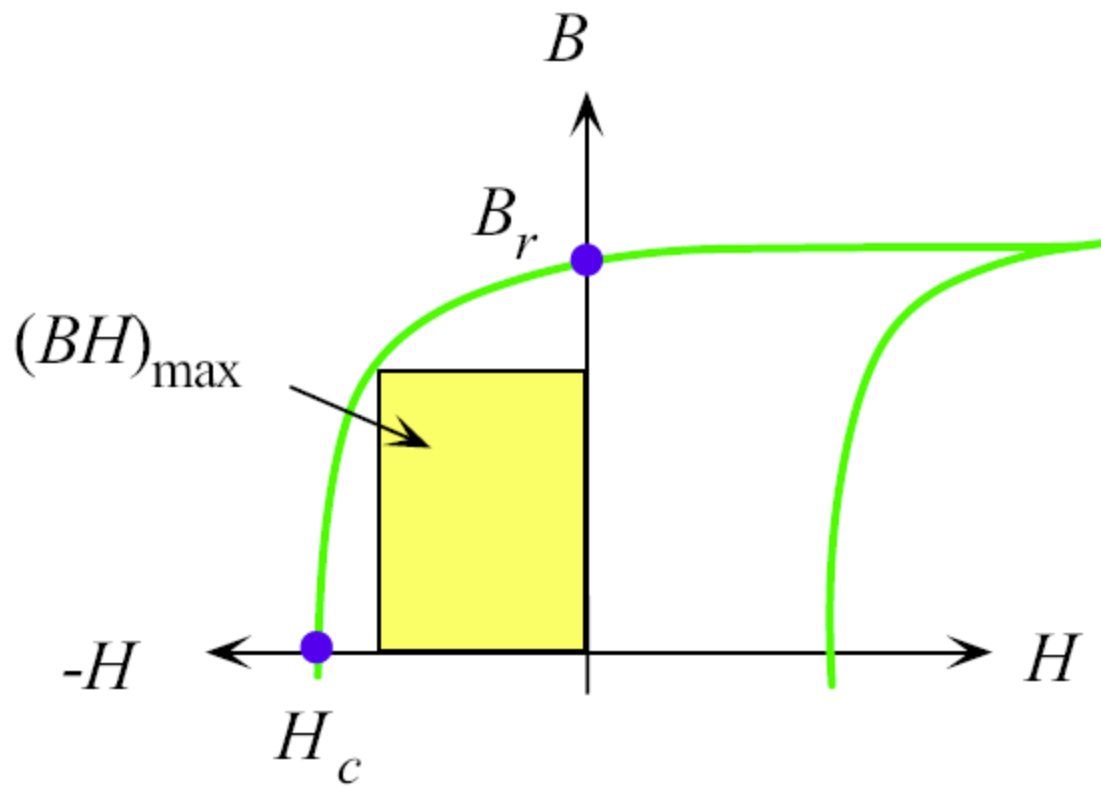
Fig. 128. Curva histerética para as ligas magnéticas dura (a) e macia (b)

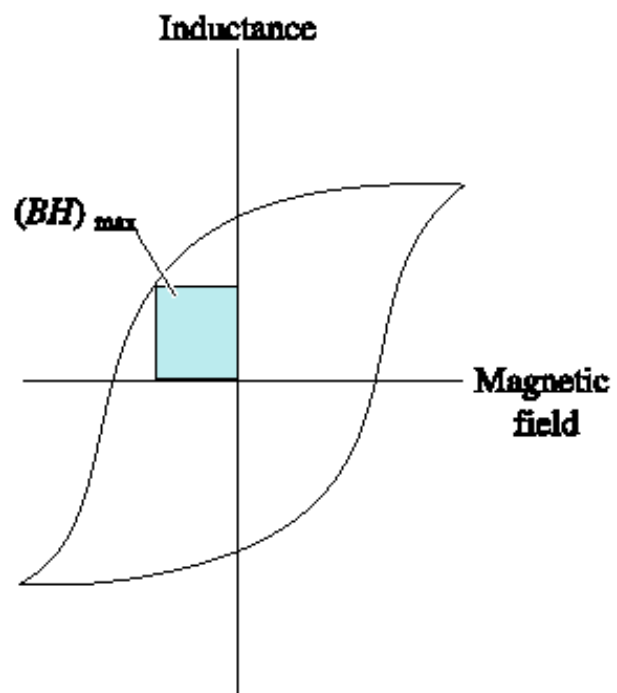
Existe, no mercado mundial, um leque de opções de materiais com diferentes níveis de qualidade e preço

Aços e Ligas para imãs permanentes (ligas magnéticas duras)

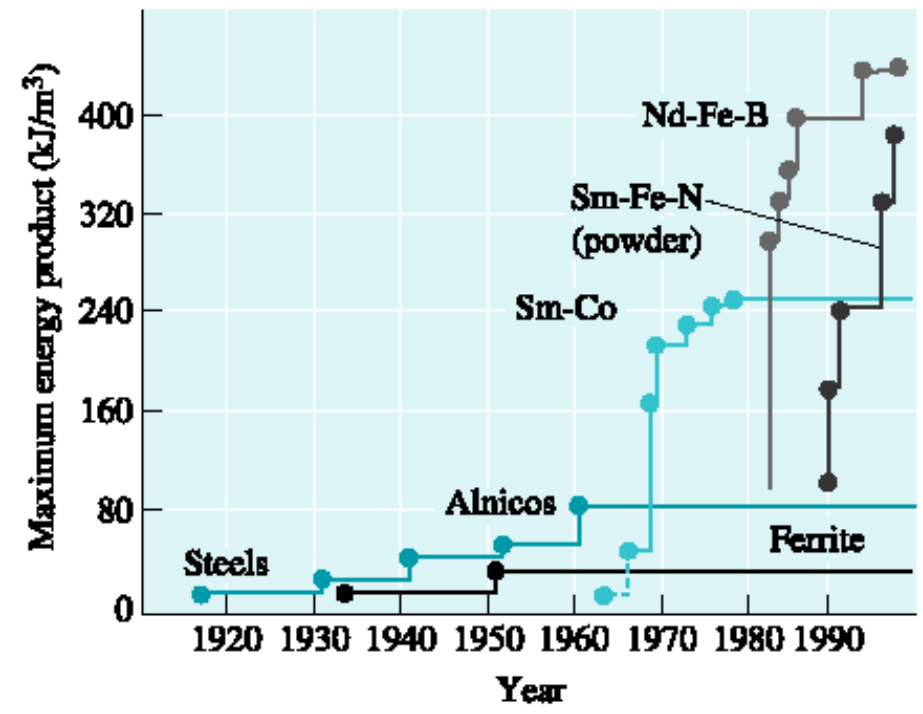
- **Propriedades do material:**

- elevado H_c
- elevado B_r (indução residual)
- estabilidade das propriedades com o tempo



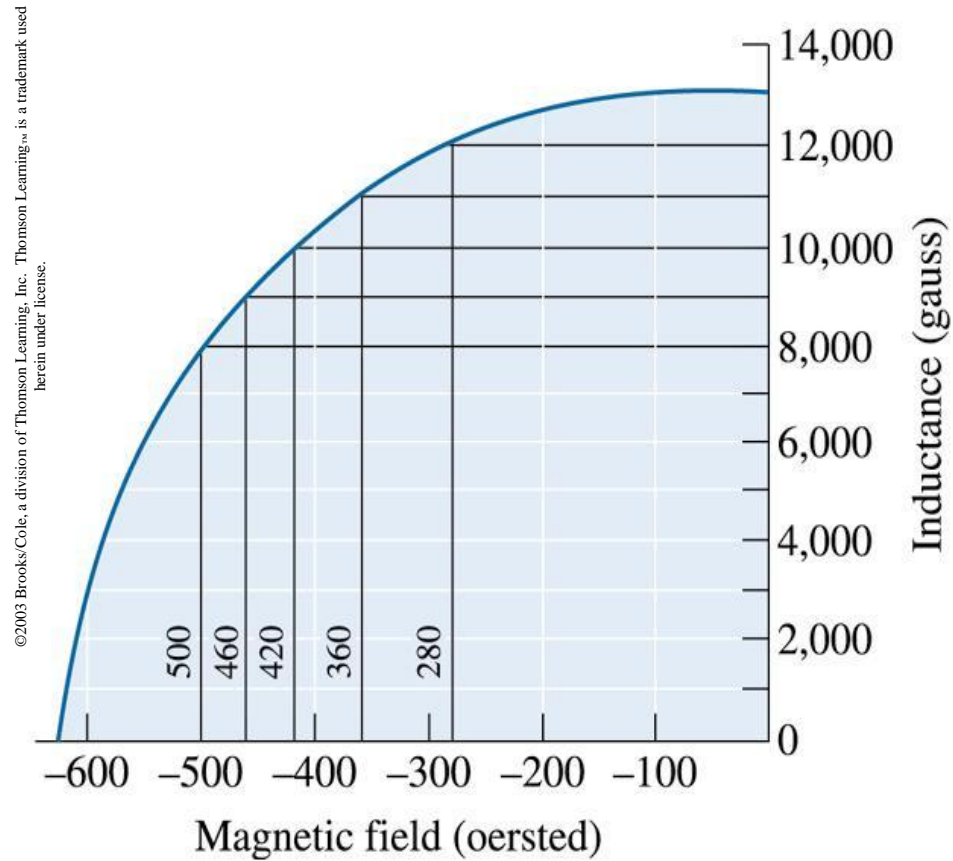


(a)



(b)

Determinar o valor de BH_{max} para o material magnético com o comportamento apresentado na figura



Example 19.4 SOLUÇÃO

Varios retangulos tem sido desenhados no segundo quadrante na curva $B-H$. Para cada um deles o produto BH é:

$$BH_1 = (12,000)(280) = 3.4 \times 10^6 \text{ gauss} \cdot \text{oersted}$$

$$BH_2 = (11,000)(360) = 4.0 \times 10^6 \text{ gauss} \cdot \text{oersted}$$

$$BH_3 = (10,000)(420) = 4.2 \times 10^6 \text{ gauss} \cdot \text{oersted} = \text{maximum}$$

$$BH_4 = (9,000)(460) = 4.1 \times 10^6 \text{ gauss} \cdot \text{oersted}$$

$$BH_5 = (8,000)(500) = 4.0 \times 10^6 \text{ gauss} \cdot \text{oersted}$$

Então a potência é 4.2×10^6 gauss . oersted.

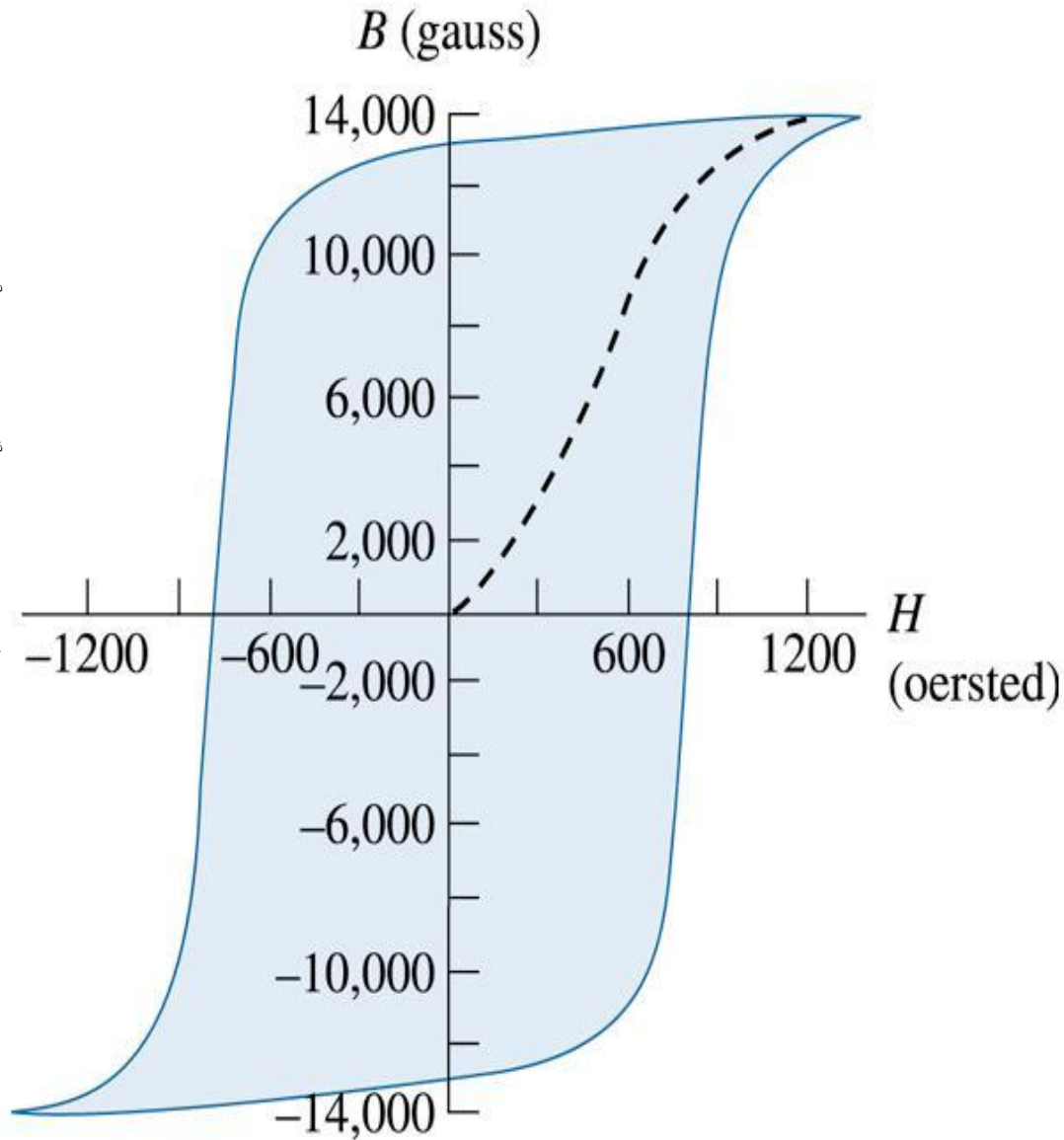
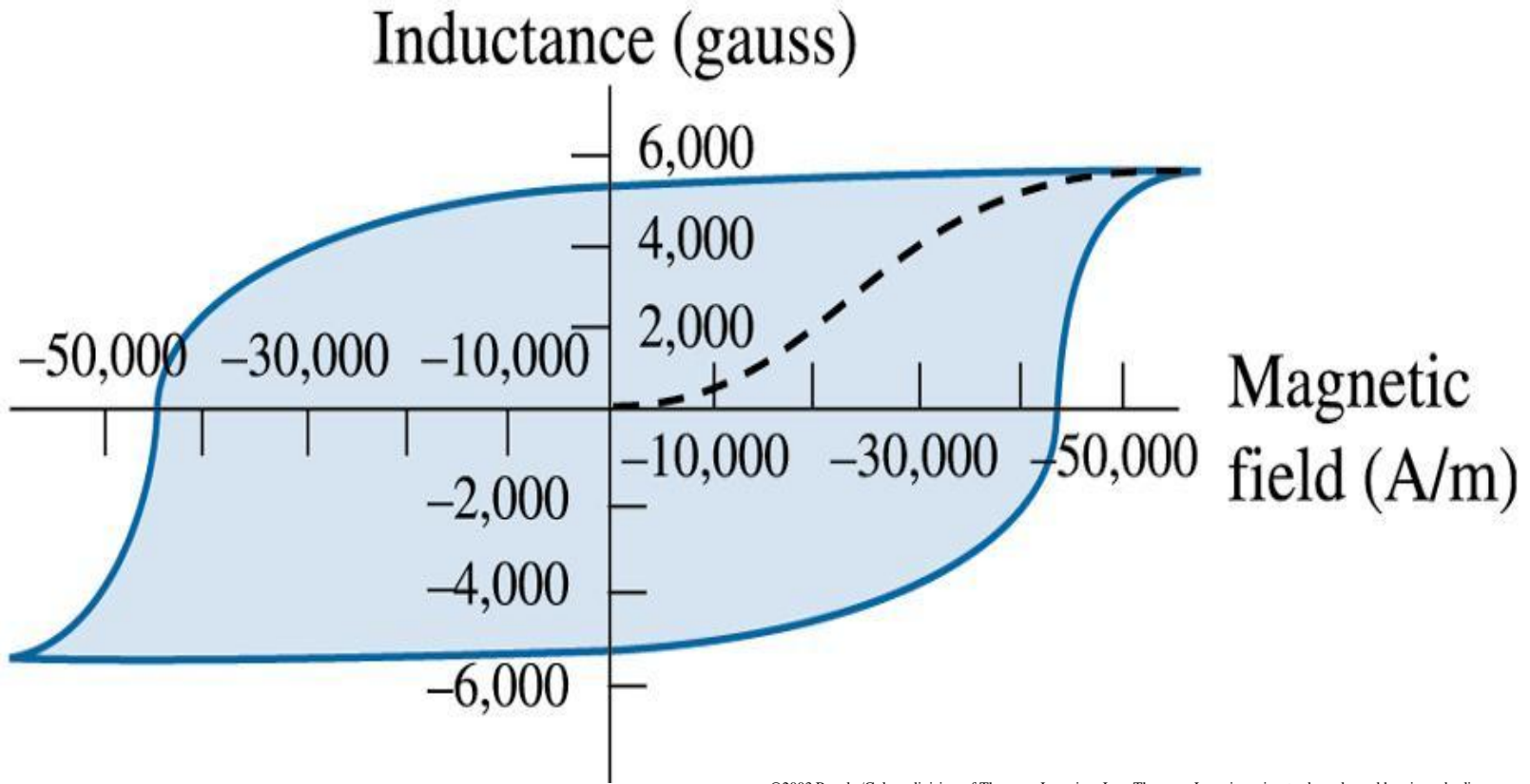


Figure 19.16
Hysteresis curve for a
hard magnetic material
(for Problem 19.19).



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Figure 19.17 Hysteresis curve for a hard magnetic material (for Problem 19.30).

Papel dos elementos de liga

- **Aumentam a força coercitiva ou “dureza” magnética**
- **Diminuem o tamanho de grão**
- A formação de uma segunda fase, pela adição de elementos de liga (acima do limite de solubilidade), contribui para o aumento do H_c . Quanto mais elevada a dispersão da segunda fase maior o H_c .
- O endurecimento causado pela transformações de fase ou pela diminuição do tamanho de grão aumentam o H_c , porque evitam a redistribuição ao acaso dos domínios magnéticos.

Aços e Ligas para imãs permanentes (ligas magnéticas duras)

1- Aço-Carbono

2- Aço-Cromo

3- Aço-Cobalto

4- Ligas Alnico

5- Outras ligas (cunifo, cunife, Fe-Mo, Fe-v-Co, Fe-Mo-Co)

1- Aço-Carbono

- **Aços martensíticos com 1% de Carbono**
- Imãs de tamanho grande
- $H_c = 60-65 \text{ Oe}$ (após têmpera)
- $Br = 8000-8500 \text{ Gauss}$

2- Aço-Cromo

(1% C e 1,5-3% de Cr)

- Imãs de tamanho grande.
- Tem elevada susceptibilidade de se temperarem

3- Aço-Cobalto

(C, Cr e 5-15 % de Co)

- Aços de boa temperabilidade Magnética
- Possui boas propriedades magnéticas.
- Utilizado para aplicações em Imãs pequenos
- $H_c = 100-150$ Oe
- $B_r = 8000-8500$ Gauss
- Desmagnetiza a 100°C

Problema: escassez do Cobalto

Tratamento térmico dos aços para ímãs permanentes

- *Objetivo: obter boas propriedades magnéticas*
 - **Tem que ter baixa austenita residual que é paramagnética**

Tratamento térmico dos aços para ímãs permanentes

- **Normalização** (têmpera ao ar - varia conforme o aço de 1050-1230 °C)- ***para dissolver as inclusões de carbonetos***
- **Têmpera em água ou óleo** (a partir da temperatura ordinária)
- **Revenimento a baixas temperaturas $\approx 100^{\circ}\text{C}$ = *serve para estabilizar o Hc*** (sendo desejável o tratamento prévio a **temperaturas negativas**, para eliminar a austenita residual)

4- Ligas Alnico

(Fe-Ni-Al)

11-14% de Al e 22-34% de Ni

- Tem ótimas propriedades magnéticas

Ímãs de alta permeabilidade magnética

- $H_c = 400-500$ Oe

$B_r = 6000-7000$ Gauss

Desmagnetiza a 300°C

São usados para a fabricação de ímãs potentes e pequenos



Elementos de liga dos alnicos

Adição de Co. (15-24%)

- • O Cobalto aumenta o Hc e o Br.
- • Aumenta também a temperatura de Curie, o que facilita o tratamento termomagnético.

Adição de Si (1-2%)

- Aumenta o Hc
- Baixa a velocidade crítica de resfriamento.

Adição de Cobre (até 6%)

- Substitui o Ní que é caro

PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DOS ALNICOS

—

Os ímãs de alnico são fabricados por fundição ou por metalurgia do pó

Tratamento térmico dos alnicos

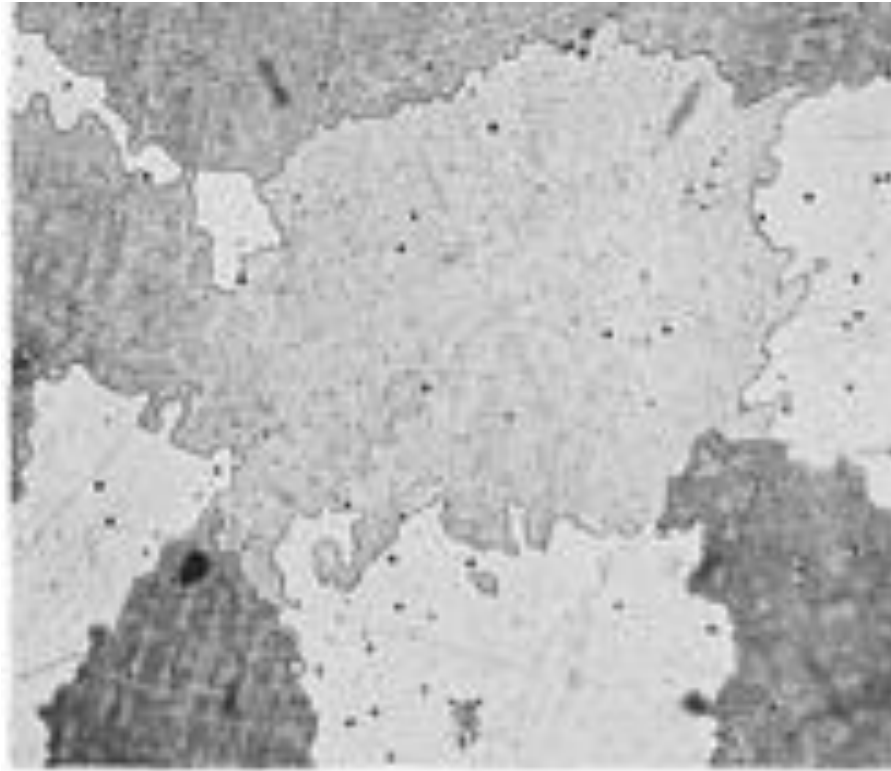
- A maioria das ligas atingem o valor máximo de H_c no estado fundido ou entre 1000°C e o PF.
- **A têmpera brusca gera um H_c baixo (porque não desintegra a fase β que é paramagnética)**
- **Há uma velocidade crítica de resfriamento, que fornece valores máximos de H_c .**

Tratamento térmico dos alnicos

- Essa veloc. crítica corresponde à desintegração da solução sólida monofásica (fase β) dando fases ferromagnéticas dispersas (fases β_1 e β_2). Estas fases tem estrutura cristalina regulada e possuem alto H_c .
- As fases β_1 e β_2 dão origem à tensões, distorções na rede e divisão dos grãos.

Alnico recozido

30x



Tratamento térmico dos alnicos

- O tratamento térmico tem de ser escalonado:
 - Tratamento prévio para facilitar a desintegração 800-900°C
 - A 600-700°C ocorre a desintegração por precipitação.

Outras ligas:

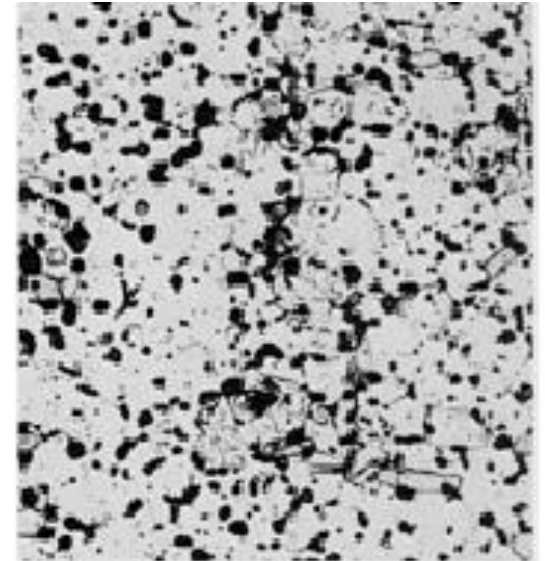
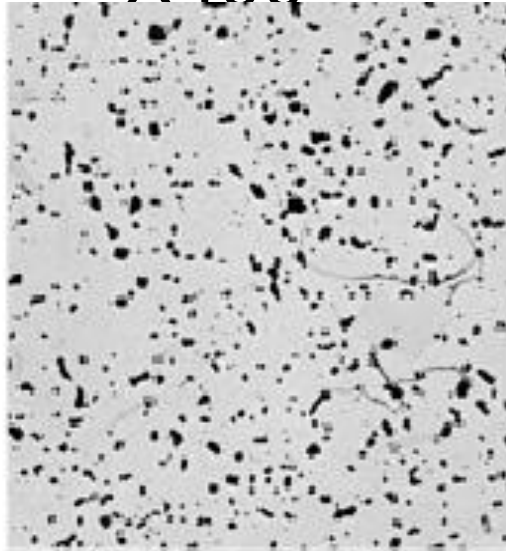
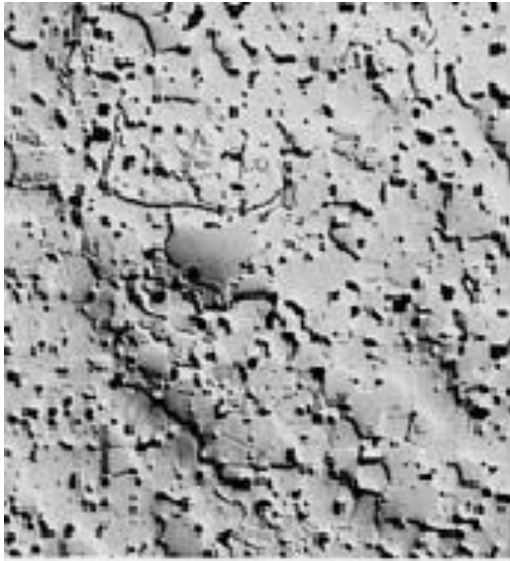
- ***cunico*** (Cu, Ni, Co)
- ***cunife*** (Cu, Ni, Fe)= são de custo elevado
 - Fe-Mo, Fe-v-Co, Fe-Mo-Co = não são econômicas
 - Ligas Sm-Co
 - Nd-Fe-B



- Foram comercializados a partir da década de 70

Microestrutura das ligas SmCo_5

X400

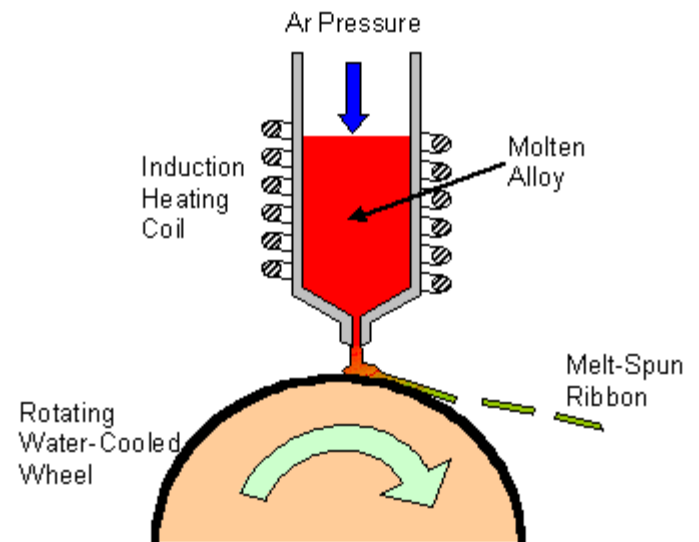
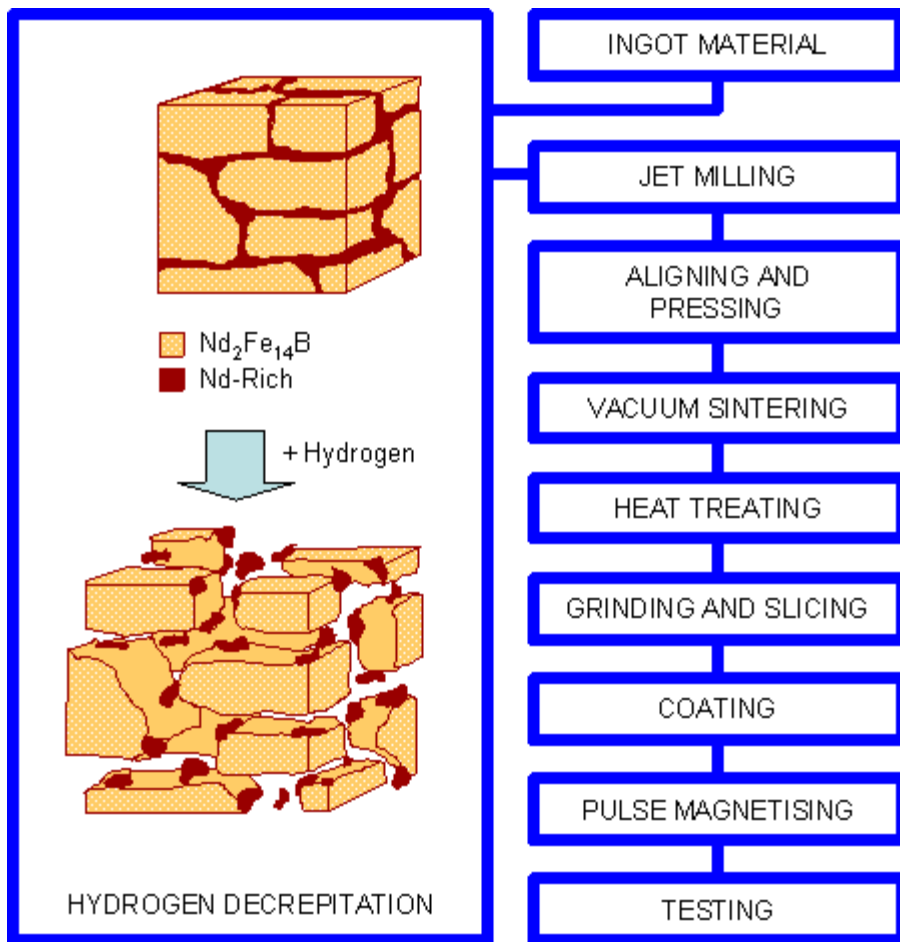


NdFeB

- Conhecidos como "neo" magnets
- Estão disponíveis comercialmente a partir da década de 80
- Usados nos motores de HD
- Fabricados pela metalurgia do pó



NdFeB

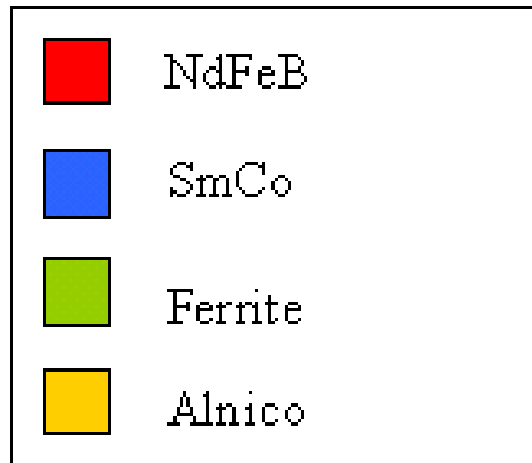


Propriedades magnéticas típicas:

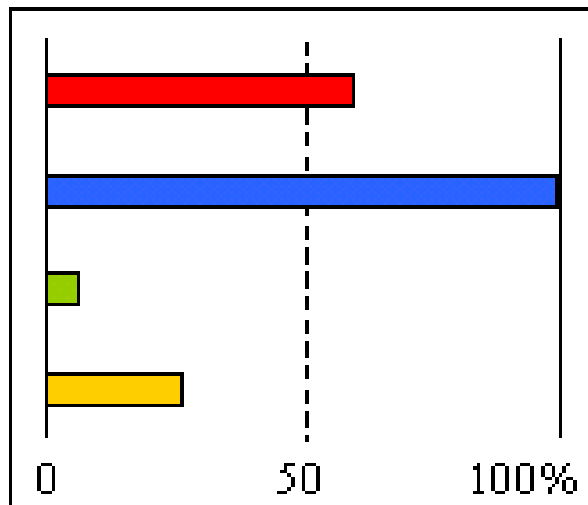
PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

Material	Br	Hc	Hci	Bhmáx	Tmáx(° C)
NdFeB	12100	11600	17000	42	100
SmCo	10300	8000	18000	23	250
Ferrite	3600	2900	3000	3.2	350
Alnico	12600	630	n/a	5.3	550

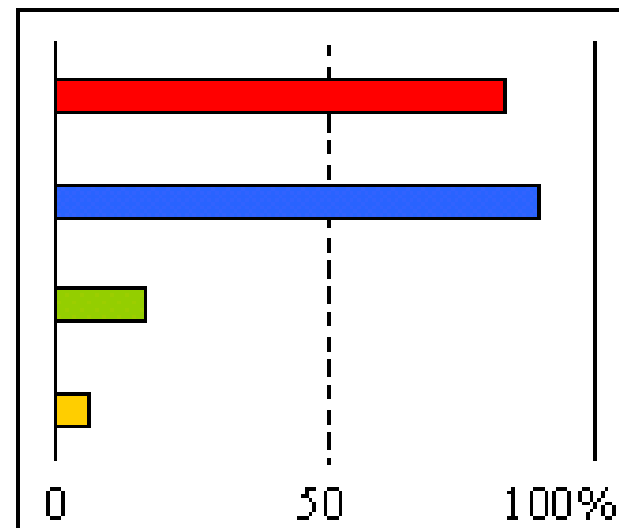
Quadros comparativo:

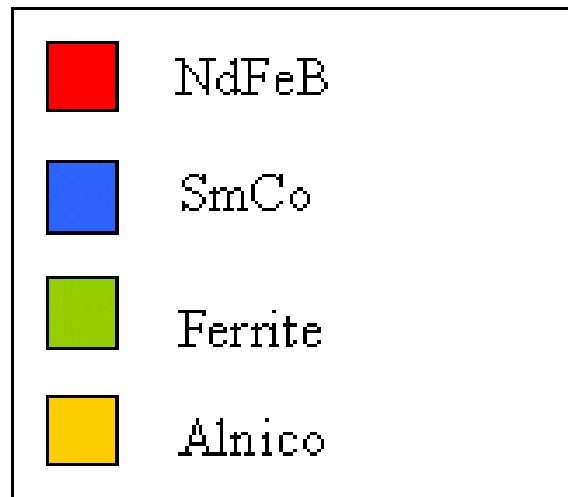


Custo relativo

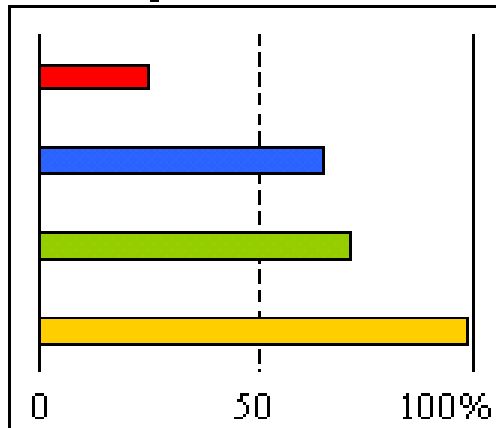


Coercitividade

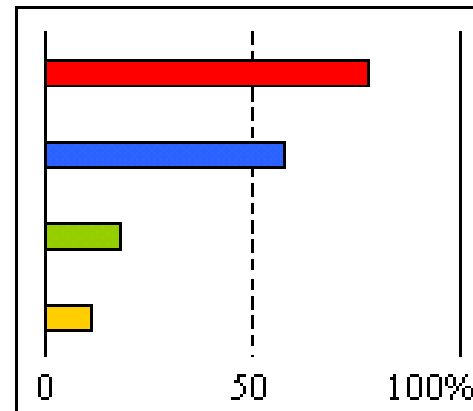




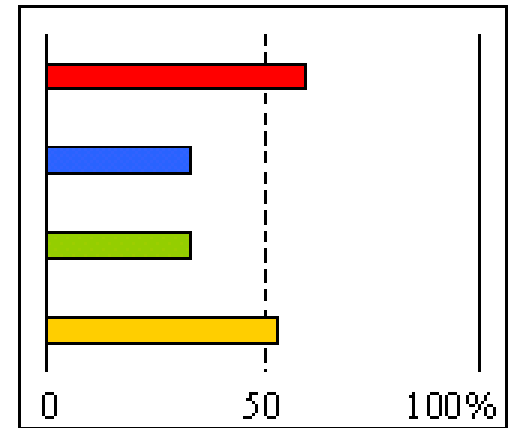
Máx. temp. trabalho °C



Máx. Produto de Energia



Usinabilidade



Imãs flexíveis

base: polímero+ferrite



Ligas magnéticas macias

- *Os materiais mais adequados são os puros e com boa qualidade estrutural.*
- Propriedades dos materiais:
 - baixo H_c
 - alta permeabilidade magnética
 - alto ponto de saturação

Ligas magnéticas macias

- **1- Ferro puro**
- **2- Aço elétrico (É uma liga ferrítica de Ferro e Silício (3- 4,5%))**
- **3- Ligas de Ferro-Níquel (Hipernick e Permalloy)**
- **4- Alsifer (sistema Al-Si-Fe)**
- **5- Perminvar (Ni, Co, Fe)**
- **6- Hiperco**
- **7- Permendur**
- **8- Termalloy e Calmalloy**

Table 8.5 Selected soft magnetic materials and some typical values and applications

Magnetic Material	$\mu_0 H_c$ (T)	B_{sat} (T)	B_r (T)	μ_{ri}	$\mu_{r,\text{max}}$	W_h	Typical Applications
Ideal soft	0	Large	0	Large	Large	0	Transformer cores, inductors, electric machines, electromagnet cores, relays, magnetic recording heads.
Iron (commercial grade, 0.2% impurities)	$<10^{-4}$	2.2	<0.1	150	10^4	250	Large eddy current losses. Generally not preferred in electric machinery except in some specific applications (e.g., some electromagnets and relays).
Silicon iron (Fe: 2–4% Si)	$<10^{-4}$	2.0	0.5–1	10^3	10^4 – 4×10^5	30–100	Higher resistivity and hence lower eddy current losses. Wide range of electric machinery (e.g., transformers).
Supermalloy (79% Ni–15.5% Fe–5% Mo–0.5% Mn)	2×10^{-7}	0.7–0.8	<0.1	10^5	10^6	<0.5	High permeability, low-loss electric devices, e.g., specialty transformers, magnetic amplifiers.
78 Permalloy (78.5% Ni–21.5% Fe)	5×10^{-6}	0.86	<0.1	8×10^3	10^5	<0.1	Low-loss electric devices, audio transformers, HF transformers, recording heads, filters.
Glassy metals, Fe–Si–B	2×10^{-6}	1.6	$<10^{-6}$	—	10^5	20	Low-loss transformer cores.
Ferrites, Mn–Zn ferrite	10^{-5}	0.4	<0.01	2×10^3	5×10^3	<0.01	HF low-loss applications. Low conductivity ensures negligible eddy current losses. HF transformers, inductors (e.g., pot cores, E and U cores), recording heads.

TABLE 19-4 ■ Soft magnetic materials

Name	Composition	Permeability (μ_r)		Coercivity (H_c) ($A \cdot m^{-1}$)	Retentivity (B_r) (T)	B_{max} (T)	Resistivity ($\mu\Omega \cdot m$)
		Initial	Maximum				
Ingot Iron	99.8% Fe	150	5000	80	0.77	2.14	0.10
Low-carbon steel	99.5% Fe	200	4000	100		2.14	1.12
Silicon iron, unoriented	Fe-3% Si	270	8000	60		2.01	0.47
Silicon iron, grain-oriented	Fe-3% Si	1400	50,000	7	1.20	2.01	0.50
4750 alloy	Fe-48% Ni	11,000	80,000	2		1.55	0.48
4-79 permalloy	Fe-4% Mo-79% Ni	40,000	200,000	1		0.80	0.58
Superalloy	Fe-5% Mo-80% Ni	80,000	450,000	0.4		0.78	0.65
2V-Permendur	Fe-2% V-49% Co	800	450,000	0.4		0.78	0.65
Supermendur	Fe-2% V-49% Co		100,000	16	2.00	2.30	0.40
Metglas ^a 2650SC	Fe ₈₁ B _{13.5} Si _{3.5} C ₂		300,000	3	1.46	1.61	1.35
Metglas ^a 2650S-2	Be ₇₈ B ₁₃ S ₉		600,000	2	1.35	1.56	1.37
MnZn Ferrite	H5C2 ^b	10,000		7	0.09	0.40	1.5×10^5
MnZn Ferrite	H5E ^b	18,000		3	0.12	0.44	5×10^4
NiZn Ferrite	K5 ^b	290		80	0.25	0.33	2×10^{12}

^a Allied Corporation trademark

^b TDK ferrite code

(Source: Adapted from "Magnetic Materials: An Overview, Basic Concepts, Magnetic Measurements, Magnetostrictive Materials," by G.Y. Chin et al. In R. Bloor, M. Flemings, and S. Mahajan (Eds.), Encyclopedia of Advanced Materials, Vol. 1, 1994, p. 1424, Table 1. Copyright © 1994 Pergamon Press. Reprinted with permission of the editor.)

1- Ferro puro

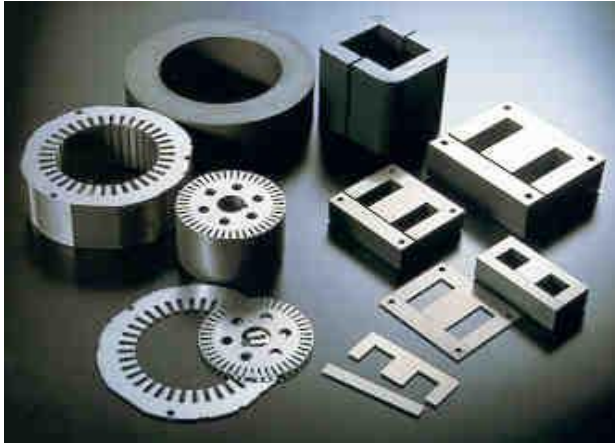
Hc → 0.8-1.2 Oe

**Permeabilidade magnética → 3500 -
4500 Gauss/Oe**

- aumento do tamanho de grão melhora as propriedades magnéticas
- Ferro industrial tem Hc de 1Oe
- Ferro puro de grão grande apresenta Hc de 0.01Oe

1- Aplicação do Ferro puro

- O Ferro puro é empregado na fabricação de núcleos, relés e imãs de corrente elétrica contínua, de pantalhas magnéticas, pólos de máquinas elétricas, etc.*



2- Aço elétrico

- **É uma liga ferrítica de Ferro e Silício**
- Os aços elétricos são os materiais magnéticos utilizados em maior volume no país e no mundo. O Brasil produz anualmente 335.000 t de aços para fins elétricos

2- Aço elétrico

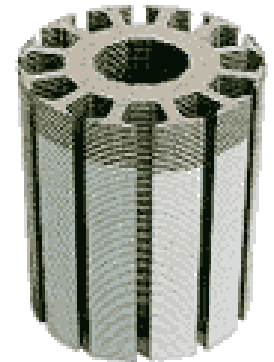
- É uma liga ferrítica de Ferro e Silício (3-4,5%)
- Devido as distorções na rede provocadas pelo Silício, esta liga apresenta H_c maior que o ferro puro, mas pode-se **obter um tamanho de grão grande e com textura orientada**.
- O aço elétrico é fabricado na forma de chapas finas (obtidas por laminação) que são utilizadas na **fabricação de núcleos de transformadores, nos circuitos magnéticos de máquinas elétricas e em aparelhos de corrente contínua e alternada**.
- **Hipersil: Fe-Si (3,5%).**

Aços ao silício

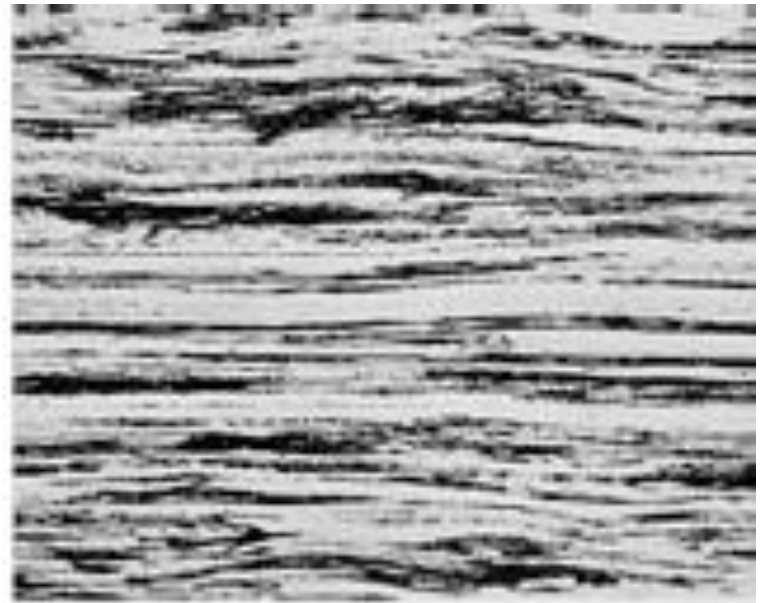
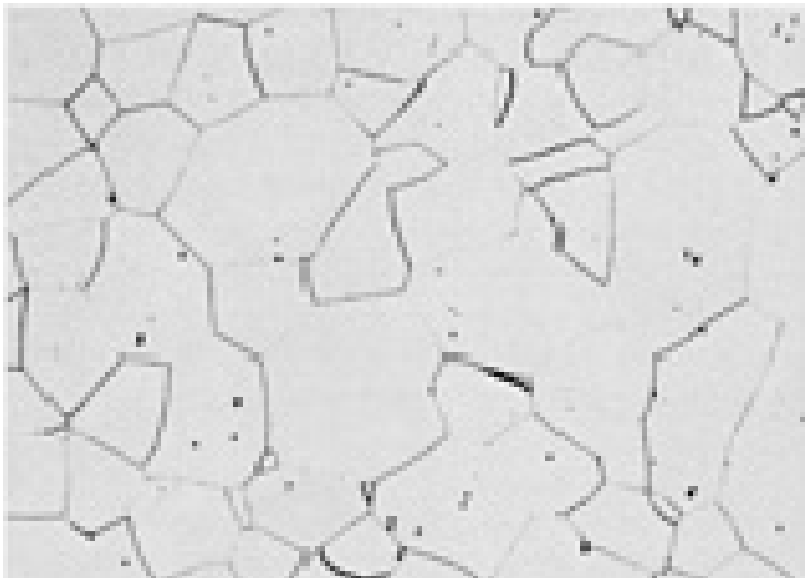
Os aços planos siliciosos de Grão Orientado (GO) e de Grão Não Orientado (GNO) são aços ligados ao silício para aplicações elétricas.

O silício GO possui as propriedades magnéticas otimizadas na direção de sua laminação, enquanto o GNO apresenta boas propriedades em qualquer direção considerada.

O aço ao silício GO (grão orientado) é usado em transformadores de potência e de distribuição de energia elétrica e o GNO (grão não-orientado) é aplicado, principalmente, em geradores de usinas hidrelétricas, motores elétricos, reatores de lâmpadas fluorescentes e compressores herméticos para geladeiras, freezers e ar-condicionado.



Aços ao silício
GNO E GO
100x



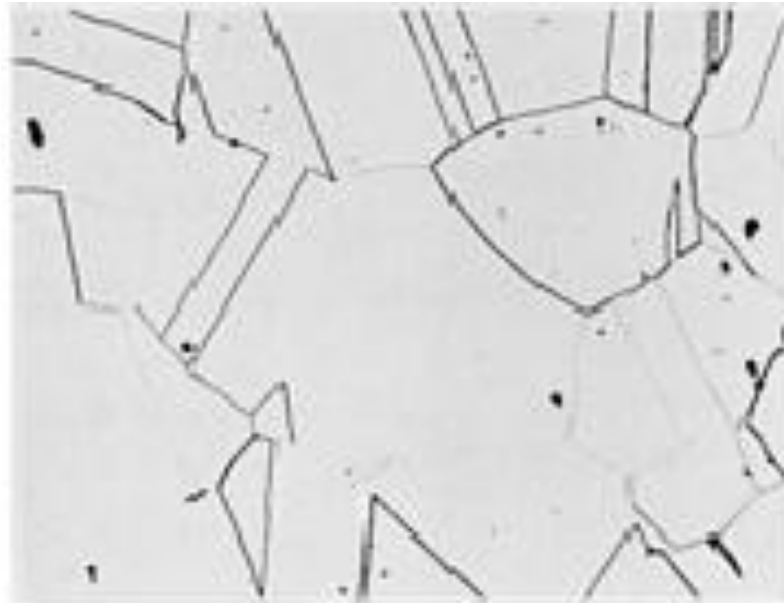
3- Ligas de Ferro-Níquel

- Hipernick: 50% de Ni.
- Permalloy: 78,5% de Ni.
 - Possui elevada permeabilidade magnética (10.000 Gauss/Oe).
- É importante para aparelhos que trabalham nos ***campos de baixa intensidade (rádios, telefones, telégrafo)***
 - As propriedades do permalloy dependem fortemente do tratamento térmico

Ligas de Ferro-Níquel

Hipernick: 50% de Ni

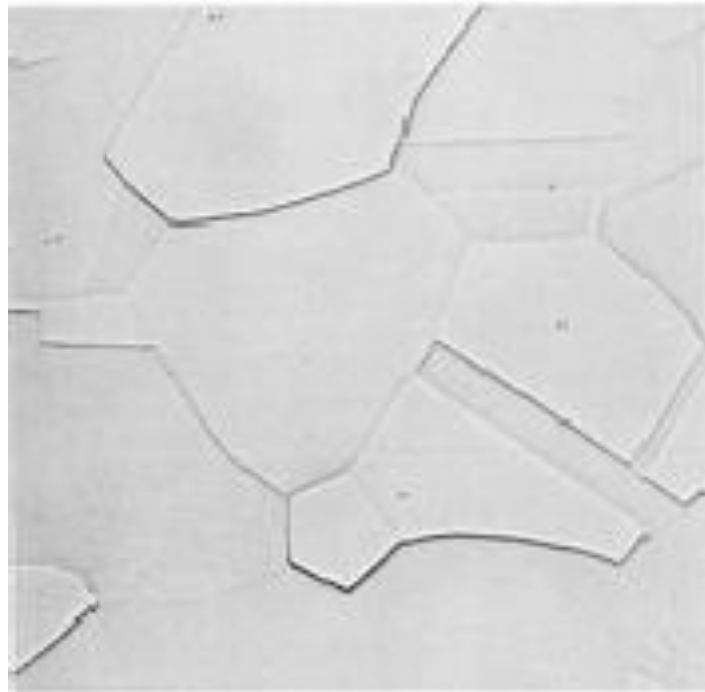
100x



Ligas de Ferro-Níquel

Permalloy: 79% de Ni 4% Mo

100x



3- Ligas de Ferro-Níquel

- *A adição de Cu, Si, Mo, Mg contribuem para:*
 - - *o aumento da resistência elétrica*
 - - *diminuir a susceptibilidade ao endurecimento (Mo)*
 - - *aumentar a estabilidade das características (influência do Cu)*

4- Alsifer (sistema Al-Si-Fe)

- **Al → 5,4%**
- **Si → 9,6%**
- **Fe → 85%**
 - • Possui elevada permeabilidade magnética ($\mu_0=35.000$ Gs/Oe e $\mu_{max}= 120.000$ Gs/Oe).
 - • Esta liga pode substituir a permalloy, cuja produção é mais dispendiosa.
 - • Como a liga alsifer é muito frágil, é impossível a fabricação em chapas, por isso são utilizadas na forma de pó (para fabricar dielétricos magnéticos)

5- Perminvar (Ni, Co, Fe)

- 45% Ni - 25%Co - Fe
- 45% Ni - 25%Co - 7.5%Mo - Fe
- 70% Ni - 7%Co - Fe
- Possuem permeabilidade magnética constante para campos de **0 a 80-160 A/m**, o que é interessante para algumas aplicações.

6- Hiperco

(Co, C e Fe)

- 26.5-28% de Co e 0.5% C-Fe.
- Esta liga tem alta saturação magnética (924.000 Gauss).

7- Permendur

(Co, V, Fe)

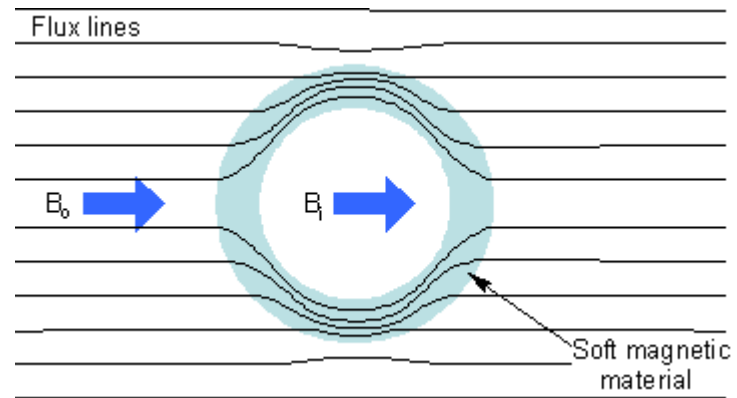
- **50%Co - 1.8%V - Fe.**
- Tem elevada indução de saturação.
- É utilizada na fabricação de instrumentos e ***aparelhos que necessitam concentrar, num espaço reduzido, um intenso fluxo de linhas de força magnética.***

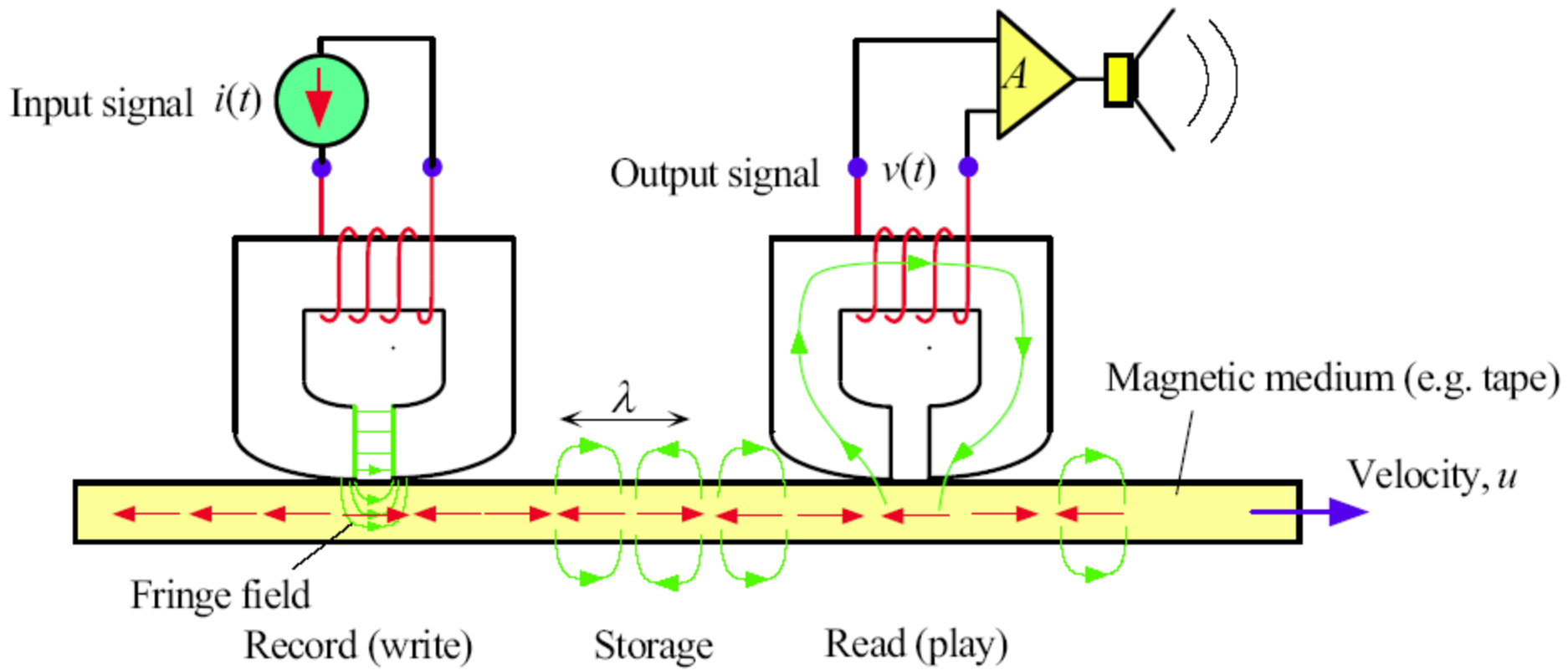
8- Termalloy (30%Ni-Fe) e Calmalloy (30%Cu-Fe)

- Nestas ligas a indução sofre uma notável variação na faixa de - 60 a + 50°C.
- São empregadas para a correção de erros dos instrumentos magnetoelétricos.
- As propriedades não dependem do tratamento térmico e sim da composição da liga.

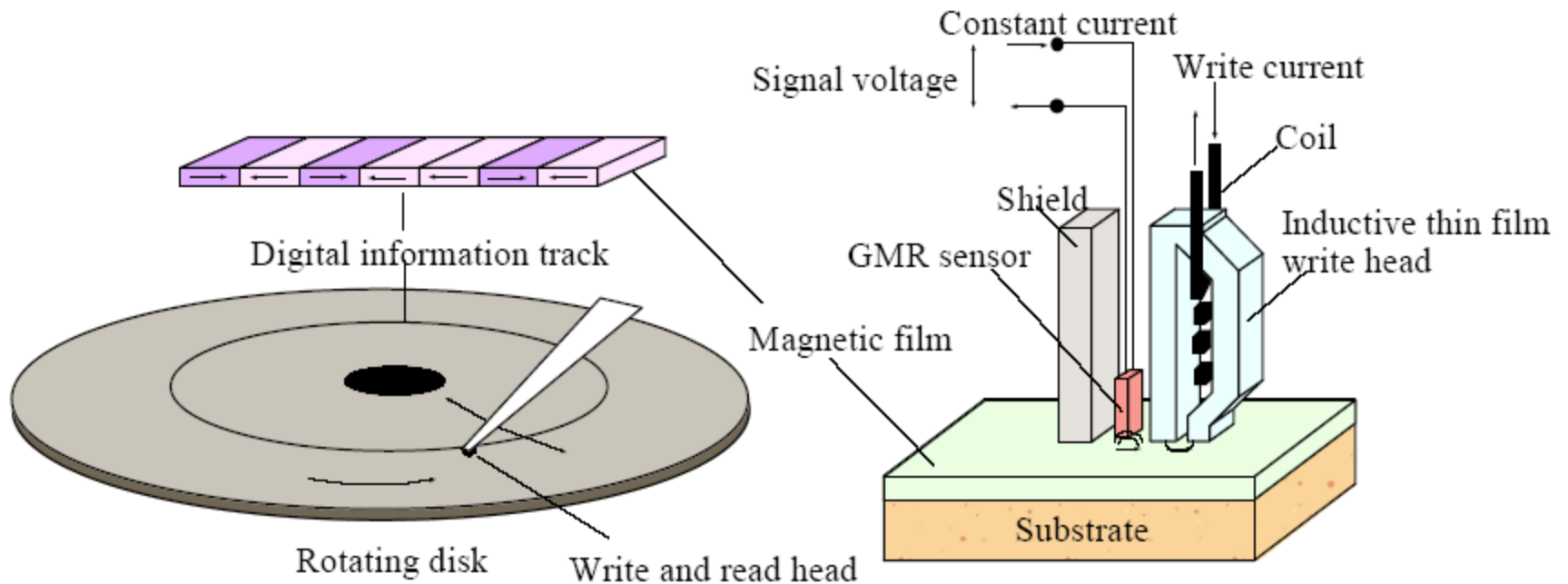
Unidade	Símbolo	CGS	SI
Fluxo	\emptyset	Maxwell	Weber
Remanência	B	Gauss	Tesla
Coercividade	H	Oersted	Ampere.turn/m
Comprimento	L	Cm	M
Permeabilidade	μ	1	$0,4\pi \times 10$

Blindagem Magnética



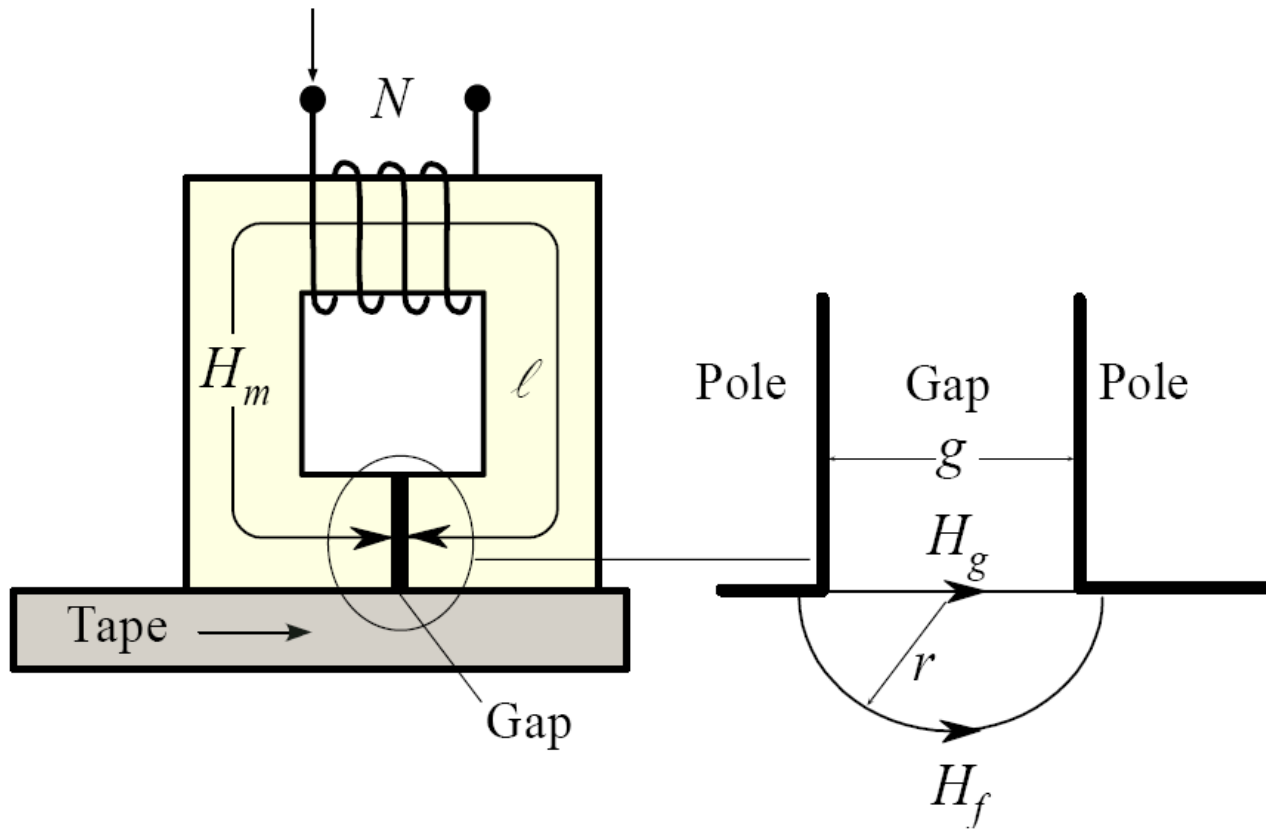


The principle of longitudinal magnetic recording on a flexible medium, e.g. magnetic tape in an audio cassette



The principle of the hard disk drive magnetic recording. The write inductive head and GMR read sensor have been integrated into a single tiny read/write head.

Fig 8.62



The gap of a recording head and the fringing field for magnetizing the tape
(Highly simplified)

TABLE 19-5 ■ Typical magnetic recording materials[16]

	Particle Length μm	Aspect Ratio	Magnetization (B_r)		Coercivity (H_c)		Surface Area m^2/g	Curie temp. (T_c) $^\circ\text{C}$
			Wb/m^2	emu/cc	kA/m	Oe		
$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	0.20	5:1	0.44	350	22–34	420	15–30	600
Co- $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	0.20	6:1	0.48	380	30–75	940	20–35	700
CrO_2	0.20	10:1	0.50	400	30–75	950	18–55	125
Fe	0.15	10:1	1.40 ^a	1100 ^a	56–176	2200	20–60	770
Barium Ferrite	0.05	0.02 μm thick	0.40	320	56–240	3000	20–25	350

^aFor overcoated, stable particles use only 50 to 80% of these values due to reduced magnetic particle volume

(Source: From The Complete Handbook of Magnetic Recording, Fourth Edition, by F. Jorgensen, p. 324, Table 11-1. Copyright © 1996 Reprinted by permission of The McGraw-Hill Companies.)

TABLE 19-4 ■ Soft magnetic materials

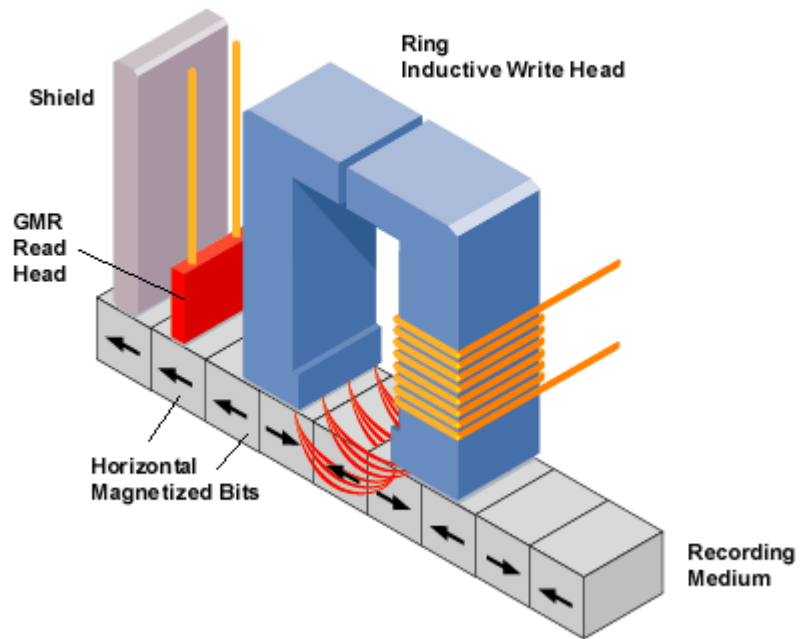
Name	Composition	Permeability (μ_r)		Coercivity (H_c) ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)	Retentivity (B_r) (T)	B_{max} (T)	Resistivity ($\mu\Omega \cdot \text{m}$)
		Initial	Maximum				
MnZn Ferrite	H5C2 ^b	10,000		7	0.09	0.40	1.5×10^5
MnZn Ferrite	H5E ^b	18,000		3	0.12	0.44	5×10^4
NiZn Ferrite	K5 ^b	290		80	0.25	0.33	2×10^{12}

^aAllied Corporation trademark

^bTDK ferrite code

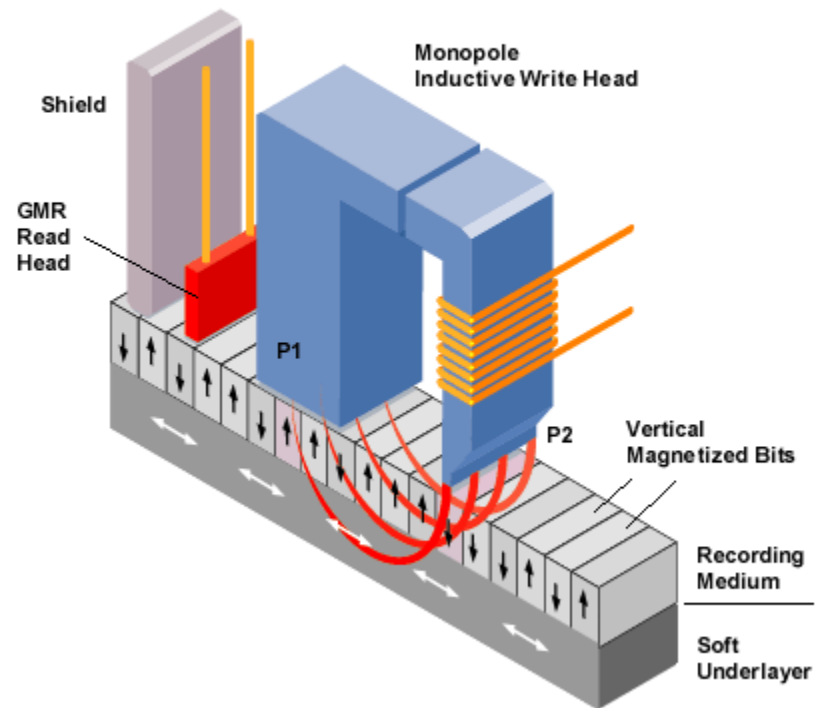
(Source: Adapted from "Magnetic Materials: An Overview, Basic Concepts, Magnetic Measurements, Magnetostrictive Materials," by G.Y. Chin et al. In R. Bloor, M. Flemings, and S. Mahajan (Eds.), Encyclopedia of Advanced Materials, Vol. 1, 1994, p. 1424, Table 1. Copyright © 1994 Pergamon Press. Reprinted with permission of the editor.)

From Computer Desktop Encyclopedia
© 2006 The Computer Language Company Inc.



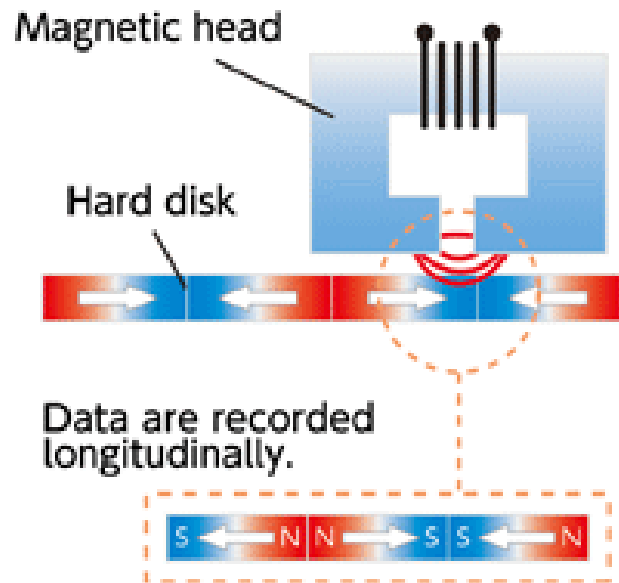
Longitudinal

From Computer Desktop Encyclopedia
© 2006 The Computer Language Company Inc.



Perpendicular

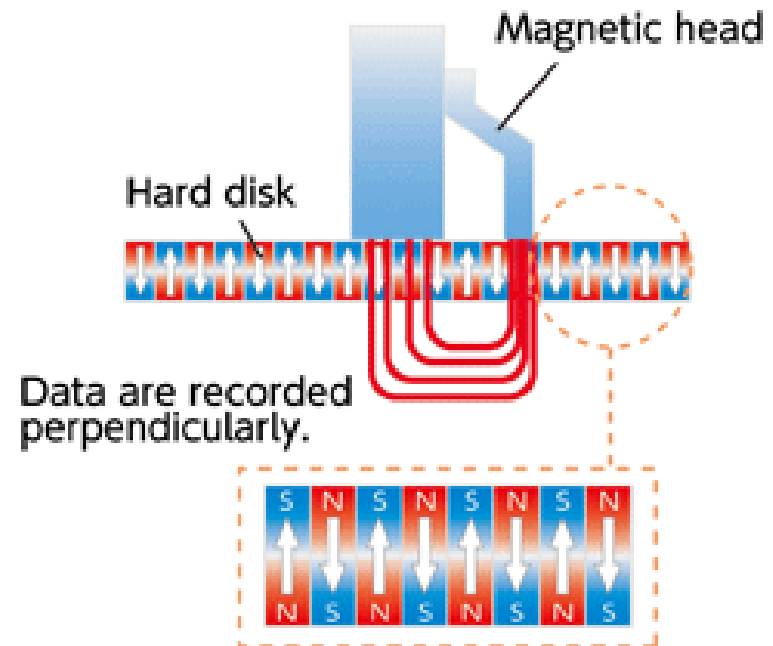
Longitudinal magnetic recording



This method is not appropriate for high-density recording because the magnetization directions face each other, weakening their magnetism.

Longitudinal

Perpendicular magnetic recording



The interaction of neighboring magnetic fields is weak, realizing high-density recording with high data storing capacity.

Perpendicular

PROPOSTA DE TEMA PARA SEMINÁRIO

1. MAGNETORESISTÊNCIA GIGANTE E APLICAÇÕES

2. GRAFENO E APLICAÇÕES

3. POLÍMEROS CONDUTORES E APLICAÇÕES