



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Unidade 18: PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS MATERIAIS


Fundamentos de Ciência e Engenharia dos Materiais - PMT 3100
1º semestre de 2017



O magnetismo dos materiais é abundantemente explorado em aplicações tecnológicas tanto tradicionais, como estado da arte. Sob o ponto de vista de sua essência científica e de sua manifestação física fundamental, fenômenos magnéticos transcendem a realidade cotidiana e fascinam intelectualmente já há longa data.

O campo magnético resulta do movimento acelerado de partículas que possuem carga elétrica. Dessa forma, os elétrons dos átomos geram campos magnéticos e os átomos podem ser representados por momentos de dipolo magnéticos. A principal contribuição para o momento de dipolo magnético atômico vem dos momentos angulares de spin e orbital dos elétrons. O papel dos momentos de dipolo magnético atômicos no comportamento dos materiais e suas interações com campos magnéticos externos fundamentam as propriedades magnéticas dos materiais.

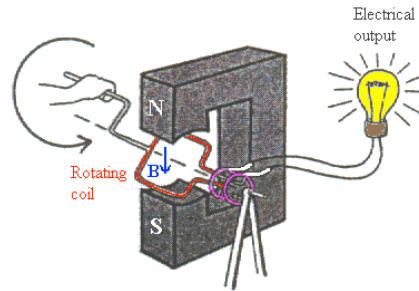
Na Unidade 18 de PMT3100 estudaremos os fundamentos das propriedades magnéticas dos materiais.

Os slides indicados com o selo  possuem conteúdos complementares, que não serão cobrados em provas.

ALGUMAS APLICAÇÕES

Muitos dos nossos dispositivos tecnológicos modernos dependem do magnetismo e dos materiais magnéticos.

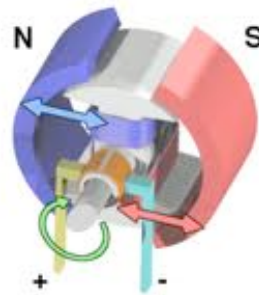
Geradores elétricos (máquinas que convertem movimento em eletricidade)



Dispositivos de armazenamento de dados (discos rígidos, fitas magnéticas etc)



Motores elétricos (máquinas que usam eletricidade para produzir movimento)



E muitos outros...



Rádios

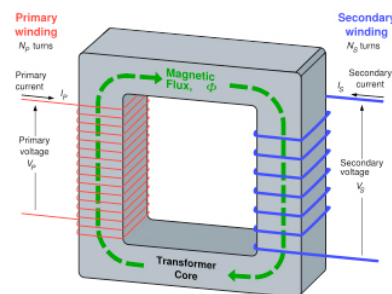


Televisões



Vídeos

Transformadores elétricos (dispositivos que mudam a voltagem e a corrente de uma fonte de eletricidade)



Telefones



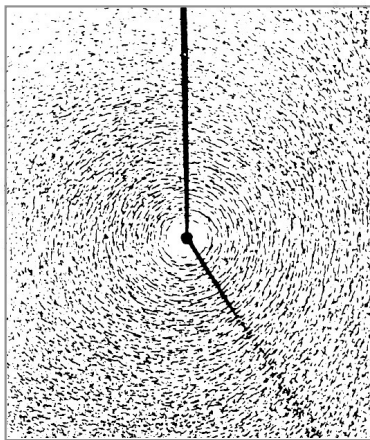
Computadores



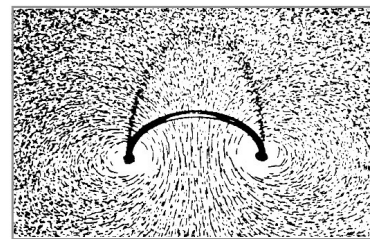
Cartões magnéticos

- **CAMPOS MAGNÉTICOS** são campos vetoriais que resultam do movimento de cargas elétricas. Assim, uma corrente elétrica em um material condutor pode gerar um campo magnético. Campos magnéticos também podem ser produzidos por magnetos permanentes (ímãs). Nesse caso, o movimento (spin e orbital) dos elétrons dos átomos que compõem o magneto é o responsável pela geração do campo magnético.
- **LINHAS DE FORÇA** podem ser utilizadas como uma representação dos campos magnéticos. Em cada ponto do espaço, a reta tangente à linha de força fornece a direção do campo. A intensidade do campo, por sua vez, se correlaciona com o número de linhas de força que atravessam uma área unitária na direção perpendicular à definida pelas linhas de força.

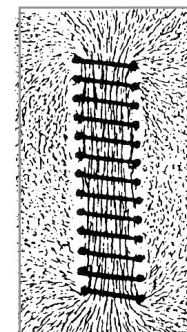
Configurações das linhas de força dos campos magnéticos, obtidas com limalha de ferro, para três geometrias diferentes de fios que conduzem corrente elétrica e para um magneto permanente.



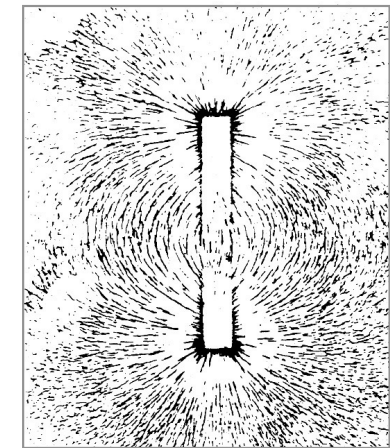
Fio retilíneo



Espira circular



Bobina



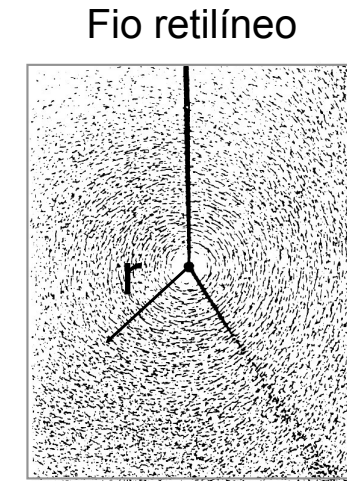
Magneto Permanente

CAMPO MAGNÉTICO H

- A intensidade do campo magnético H criado por um **FIO RETILÍNEO** longo e que conduz uma corrente elétrica I vale,

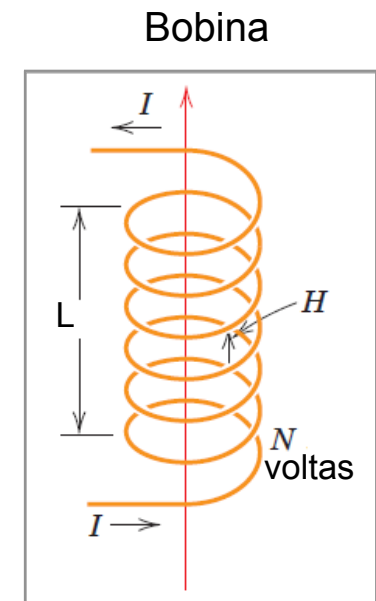
$$H = I / 2 \pi r \quad (\text{A/m})$$

onde r é a distância radial ao eixo definido pelo fio.

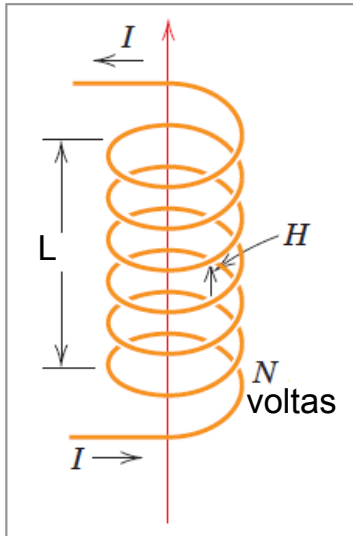


- Quando uma corrente elétrica I flui em uma **BOBINA formada por N espiras**, proximamente espaçadas, ao longo de um comprimento L, um campo magnético H, aproximadamente constante, é gerado na região central da bobina. A intensidade de H é

$$H = NI / L \quad (\text{A/m})$$



INDUÇÃO MAGNÉTICA B



- A **INDUÇÃO MAGNÉTICA** ou **DENSIDADE DO FLUXO MAGNÉTICO B** representa a intensidade do campo no interior de um material sujeito a um campo magnético externo H.
- A indução magnética no vácuo B_0 vale,

$$B_0 = \mu_0 H \quad (\text{T ou Wb/m}^2 = \text{V.s/m}^2)$$

onde μ_0 é a **PERMEABILIDADE MAGNÉTICA DO VÁCUO**;

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m (ou Wb/A.m).}$$

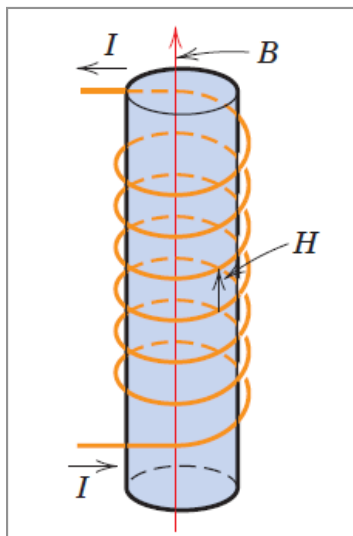
- A indução magnética **B** no interior de um material sólido vale,

$$B = \mu H \quad (1)$$

sendo μ a **PERMEABILIDADE MAGNÉTICA DO MATERIAL**.

- A **PERMEABILIDADE MAGNÉTICA RELATIVA DO MATERIAL** é definida como,

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \quad (2)$$



ALGUNS COMENTÁRIOS...

A expressão $B = \mu H$ pode ser pensada como sendo um análogo magnético da lei de Ohm da eletricidade $J = \sigma E$.

Campo magnético (H) \leftrightarrow Campo elétrico (E)

O campo magnético representa um gradiente de energia. Unidades SI: Ampère / metro.

Indução magnética (B) \leftrightarrow Densidade de corrente (J)

A indução magnética representa o número de linhas de campo magnético por unidade de área do material. Unidades SI: Tesla = Weber / metro².

Permeabilidade magnética (μ) \leftrightarrow Condutividade elétrica (σ)

A permeabilidade magnética é uma medida da facilidade com a qual B pode ser induzido em um material na presença de H.

Uma diferença importante é que, enquanto a condutividade é uma constante característica do material, a permeabilidade varia com H.

- A **MAGNETIZAÇÃO M** de um material indica como o material responde a um campo magnético externo. A magnetização é definida pela expressão,

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0 H + \text{Polarização Magnética} \quad (3)$$

M é o campo magnético que leva em conta desvios no valor da indução magnética, em relação ao seu valor no vácuo, originados pela presença de um meio material.

- A magnetização pode ser correlacionada com o campo magnético por meio da relação

$$M = \chi_m H \quad (4)$$

onde χ_m é denominada **SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA** do material.

- Combinando as equações (1) a (4) obtemos

$$\chi_m = \mu_r - 1$$

UNIDADES MAGNÉTICAS

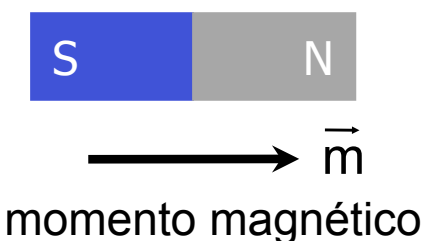
Grandeza	Símbolo	Unidade (SI)		CGS	Conversão
		derivada	primária		
Indução magnética	B	tesla (Wb/m ²)	kg / s-C	gauss	1 Wb/m ² = 10 ⁴ gauss
Campo magnético	H	amp-volta/m	C/ m-s	oersted	1 amp-volta/m = 4 π x 10 ⁻³ oersted
Magnetização	M	amp-volta/m	C/m-s	maxwell/cm ²	1 amp-volta/m = 4 π x 10 ⁻³ maxwell/cm ²
Permeabilidade magnética	μ	henry/m Wb / amp m	kg m / C ²	sem unidade	4 π x 10 ⁻⁷ henry/m = 1 emu
Permeabilidade relativa	μ_r	sem unidade	sem unidade	sem unidade	
Susceptibilidade magnética	χ	sem unidade	sem unidade	sem unidade	

DIPOLOS E MOMENTOS MAGNÉTICOS

- Uma espira de corrente pode ser representada por um **DIPOLO MAGNÉTICO**. Um dipolo magnético, por sua vez, pode ser descrito pelo vetor **MOMENTO DE DIPOLO MAGNÉTICO**.

Exemplos:

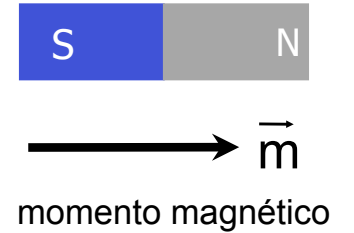
- A magnitude do momento de dipolo magnético m_e de uma espira de área A que transporta uma corrente I é $m_e = I A$.
- A magnitude do momento de dipolo magnético m_i correspondente a um ímã composto por dois polos magnéticos de intensidade p e separados por uma distância d é $m_i = p d$.
- É possível mostrar que campos magnéticos idênticos podem ser produzidos por uma espira de corrente e por um ímã. Assim, um dipolo magnético pode ser considerado como sendo um ímã.



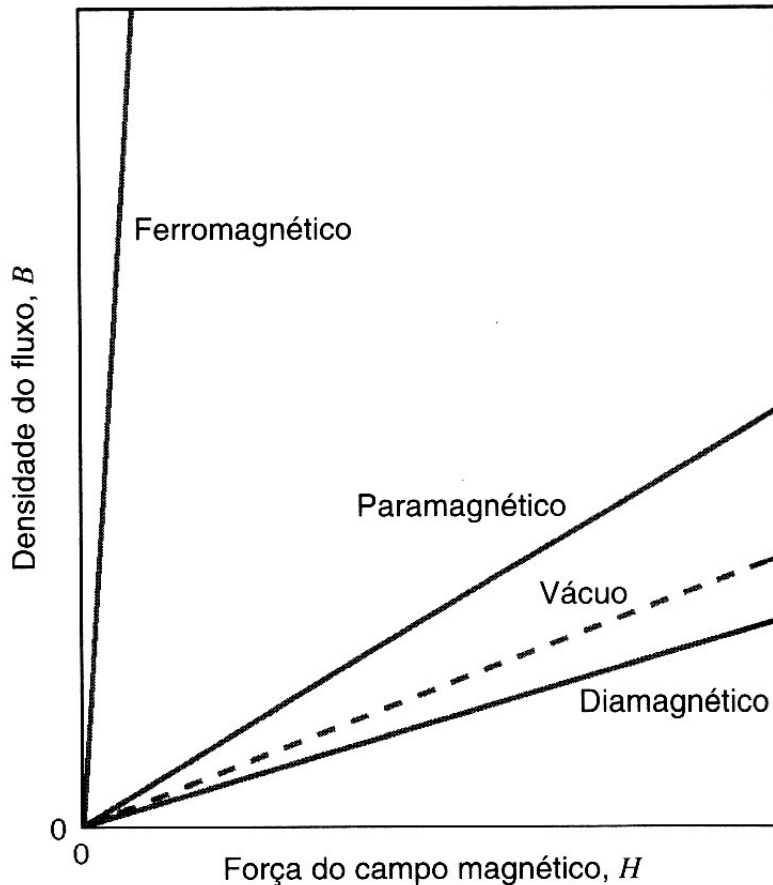
- O **TORQUE** num dipolo magnético de momento \vec{m} sob a ação de um campo magnético \vec{H} é $\vec{\tau} = \vec{m} \wedge \mu_0 \vec{H}$.
- Quando imerso em um campo magnético, um dipolo tende a se orientar na direção do campo devido à ação do torque $\vec{\tau}$.

O MAGNETISMO DOS MATERIAIS

- O momento angular (orbital e de spin) dos elétrons dos átomos origina dipolos magnéticos microscópicos. Esses dipolos permitem associar momentos magnéticos aos átomos, que podem, então, ser pensados como se fossem ímãs microscópicos.



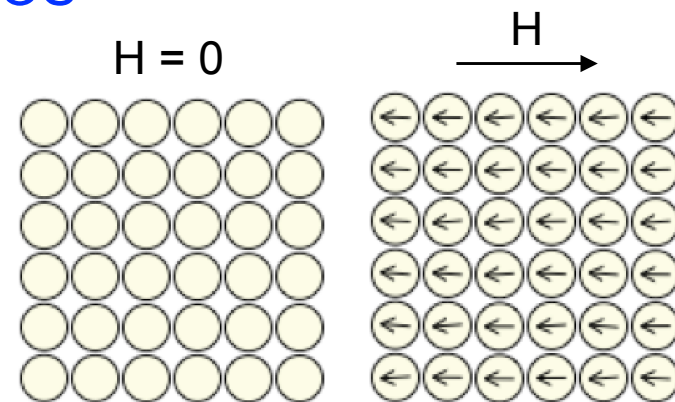
Comportamento B vs. H, para H pequeno.



- A **MAGNETIZAÇÃO** de um material é definida como sendo o momento de dipolo magnético de seus átomos por unidade de volume.
Unidades: $\text{Ampere} \cdot \text{metro}^2 / \text{metro}^3 = \text{Ampere} / \text{metro}$
- Dependendo da origem dos dipolos magnéticos e da natureza da interação entre eles, os materiais podem ser classificados em uma das seguintes categorias:
 - DIAMAGNÉTICOS
 - PARAMAGNÉTICOS
 - FERROMAGNÉTICOS
 - ANTIFERROMAGNÉTICOS
 - FERRIMAGNÉTICOS
- Nos concentraremos nesta aula no caso dos materiais ferromagnéticos.

MATERIAIS DIAMAGNÉTICOS

- Nos **MATERIAIS DIAMAGNÉTICOS** a magnetização deve-se exclusivamente ao momento angular orbital eletrônico induzido, portanto, existente apenas na presença de um campo magnético externo H .



- Esses materiais apresentam magnetização muito fraca, de mesma direção e de sentido oposto ao de H (dipolos magnéticos alinhados na mesma direção e em sentido oposto ao de H). Dessa forma, o campo magnético no interior do material é um pouco menor do que o campo magnético externo.

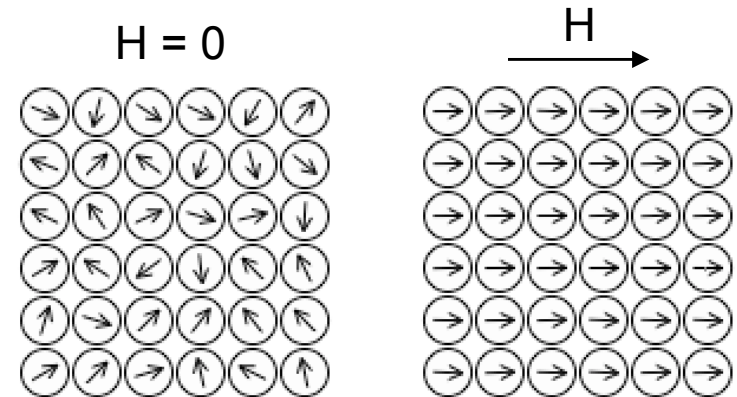
$$M = \chi_m H \Rightarrow \chi_m < 0 \text{ e muito pequeno (magnitude da ordem } 10^{-5} \text{ a } 10^{-3}).$$

$$\chi_m = \mu_r - 1 \text{ e } \chi_m < 0 \Rightarrow \mu_r = (\mu / \mu_0) < 1 \text{ e } \mu < \mu_0 .$$

- Materiais diamagnéticos são repelidos por ímãs, ou seja, quando sujeitos a campos H não uniformes são forçados a se afastar das regiões de campos mais intensos. Propriedades diamagnéticas são essencialmente independentes da temperatura do material.

- Nos **MATERIAIS PARAMAGNÉTICOS**, os átomos ou moléculas constituintes possuem momento de dipolo magnético permanente, resultante do momento angular de spin dos elétrons desemparelhados. Na ausência de H, as direções dos momentos de dipolo são aleatórias e o campo produzido pelo material é nulo. Nesses materiais, não ocorre um acoplamento magnético atômico porque a energia térmica dos átomos é mais significativa, governando o movimento local vibratório dos átomos.

- Quando um campo H é aplicado sobre um material paramagnético, os momentos de dipolo magnético dos átomos ou moléculas tendem a se alinhar por rotação na mesma direção e sentido de H. Esses materiais apresentam magnetização bastante fraca, de mesma direção e sentido de H, sendo o campo magnético no seu interior um pouco maior do que H.



$$M = \chi_m H \Rightarrow \chi_m > 0 \text{ e muito pequeno (magnitude da ordem } 10^{-5} \text{ a } 10^{-2}).$$

$$\chi_m = \mu_r - 1 \text{ e } \chi_m > 0 \Rightarrow \mu_r = (\mu / \mu_0) > 1 \text{ e } \mu > \mu_0 .$$

- O grau de alinhamento dos dipolos magnéticos com H, depende fundamentalmente da intensidade de H e da temperatura do material. Quanto mais baixa a temperatura, menor a energia térmica, e menos intenso é o campo necessário para atingir um dado grau de alinhamento. Tipicamente, $\mu_r < 2$.

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}

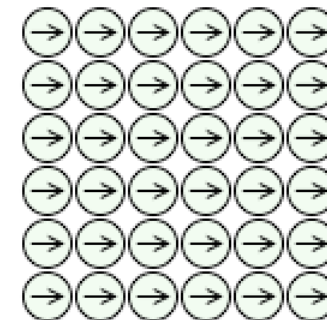
Referência: W.D. Callister e D.G. Rethwisch em “Materials Science and Engineering: An Introduction”, Wiley 8th ed, 2010, pág. 807.

MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS

- **MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS** possuem um momento de dipolo magnético permanente e manifestam magnetizações muito grandes e permanentes, mesmo na ausência de H. Suas propriedades representam o **FERROMAGNETISMO**, tendo como valores típicos:

$$10^3 \approx \chi_m \approx 10^6 \text{ e } \mu_r > 100.$$

H = 0

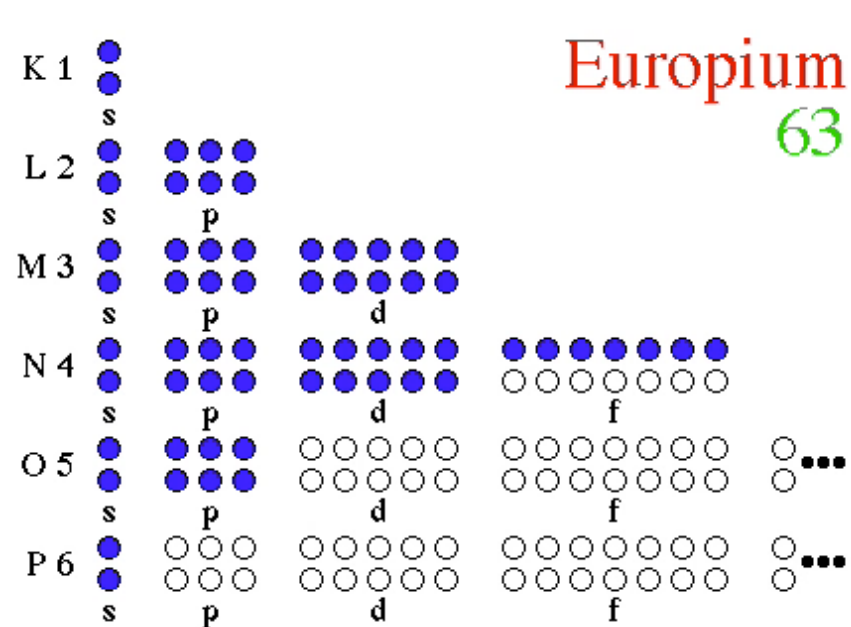
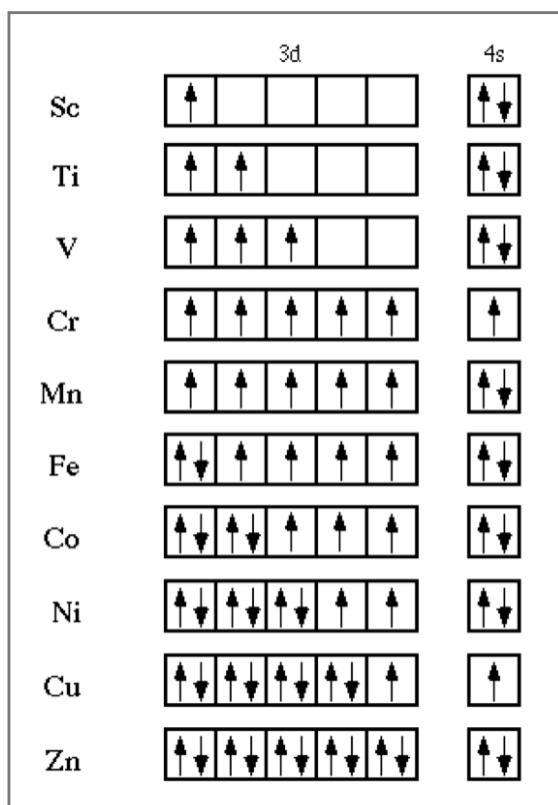


- Os momentos de dipolo magnético permanente dos átomos ou moléculas resultam do momento angular de spins não cancelados, ou seja, resultam da existência de elétrons desemparelhados. Observa-se, em escala atômica, mesmo na ausência de H, um acoplamento entre os momentos de dipolo magnético atômicos.
- Além disso, no caso de materiais que nunca foram expostos a campos magnéticos externos, observa-se, para volumes grandes em relação ao volume atômico, uma espécie de rede magnética, cujas células são denominadas **DOMÍNIOS MAGNÉTICOS**. Os domínios magnéticos se caracterizam pelo alinhamento cooperativo entre os momentos de dipolo magnético atômicos em todo seu volume (**MAGNETIZAÇÃO DE SATURAÇÃO**). Também, possuem tamanhos, formas e direções de suas respectivas magnetizações, tais que, o campo magnético produzido pelo corpo seja nulo.

MATERIAIS ANTI MAGNÉTICOS E FERRIMAGNÉTICOS

- Nos **MATERIAIS ANTIFERROMAGNÉTICOS** ocorre um acoplamento entre momentos de dipolos magnéticos atômicos de direções opostas, que leva a um cancelamento completo da magnetização do material. Exemplos: Cr, Mn, MnO, Cr₂O₃, CoO, Fe₂O₃.
- Nos **MATERIAIS FERRIMAGNÉTICOS** também ocorre um acoplamento entre momentos de dipolos magnéticos atômicos de direções opostas, mas que agora levam a um cancelamento incompleto da magnetização do material. Exemplos: ferritas cúbicas compostas de óxidos de ferro, Al, Co, Ni, Mn, Zn, algumas ferritas hexagonais.

- São materiais ferromagnéticos na forma elementar alguns **metais de transição** (orbital 3d não preenchido) e algumas **terras raras** (orbital 4f não preenchido). Ferromagnetismo também é observado em **diversos compostos** (óxidos, carbonetos, nitretos etc).

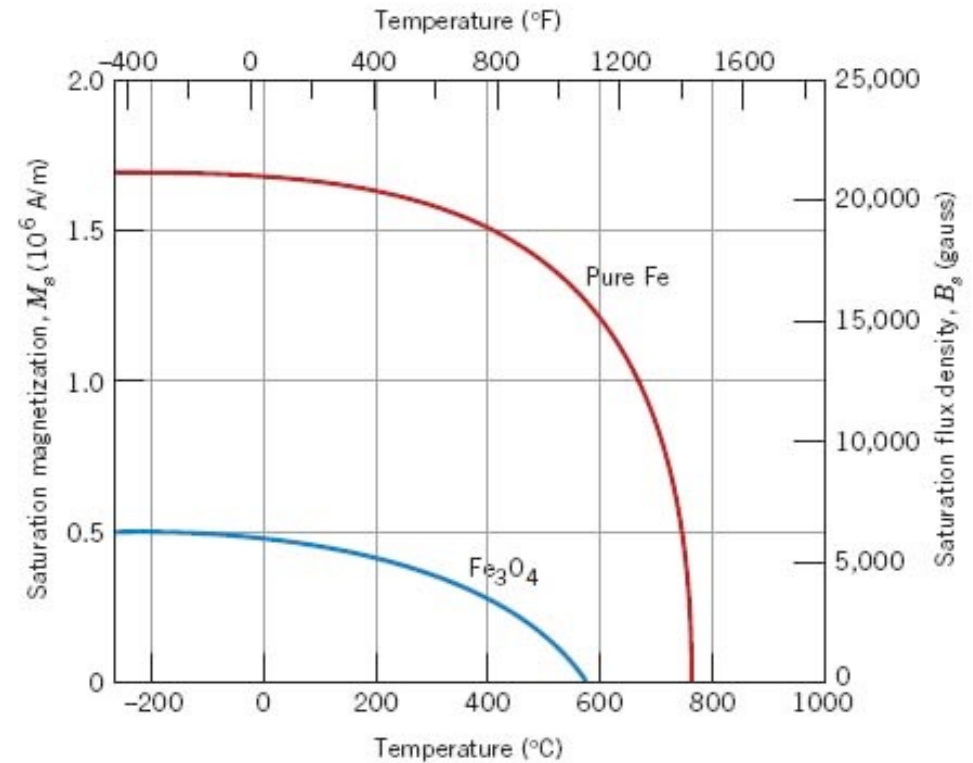


A animação "Electron_Orbitals.mov" mostra o preenchimento dos orbitais eletrônicos para os elementos da tabela periódica.

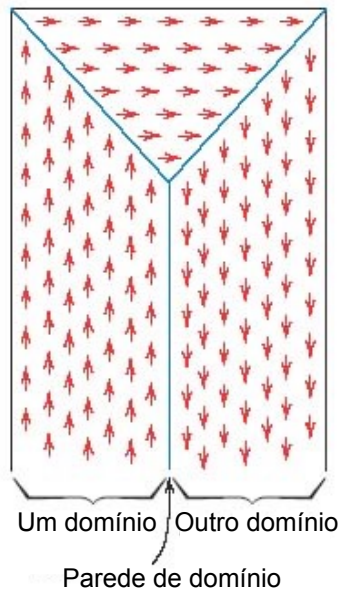
- A magnitude do momento de dipolo magnético associada ao spin de um elétron é conhecida como **MAGNETON DE BOHR** e vale $9,27 \times 10^{-24} \text{ A.m}^2$.

A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO MAGNÉTICO

- À medida que a temperatura de um material aumenta, a energia vibracional térmica associada aos seus átomos também aumenta.
- Nos materiais ferromagnéticos, as forças de acoplamento entre os momentos de dipolos magnéticos atômicos adjacentes são enfraquecidas pelo movimento vibracional térmico dos átomos, levando assim a uma diminuição na magnitude da **magnetização de saturação** com o aumento da temperatura.
- A magnetização de saturação tende a um valor máximo na temperatura 0K. Com o aumento da temperatura seu valor diminui gradualmente até que abruptamente torna-se nulo numa temperatura denominada **TEMPERATURA DE CURIE**.
- Materiais ferromagnéticos apresentam comportamento paramagnético para temperaturas acima da temperatura de Curie.

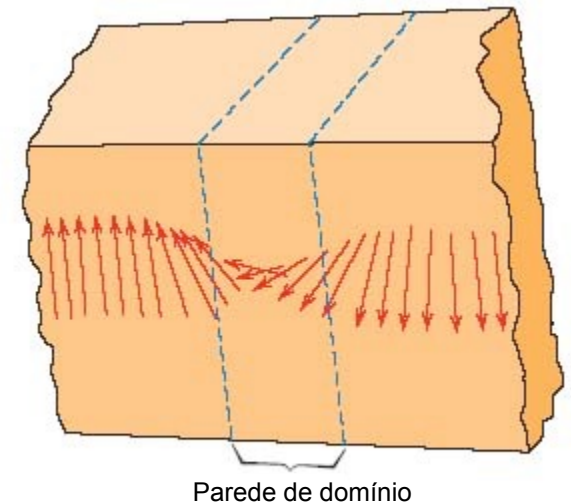


Material	Temperatura de Curie (°C)
Ferro	768
Cobalto	1120
Nickel	335
Fe_3O_4	585

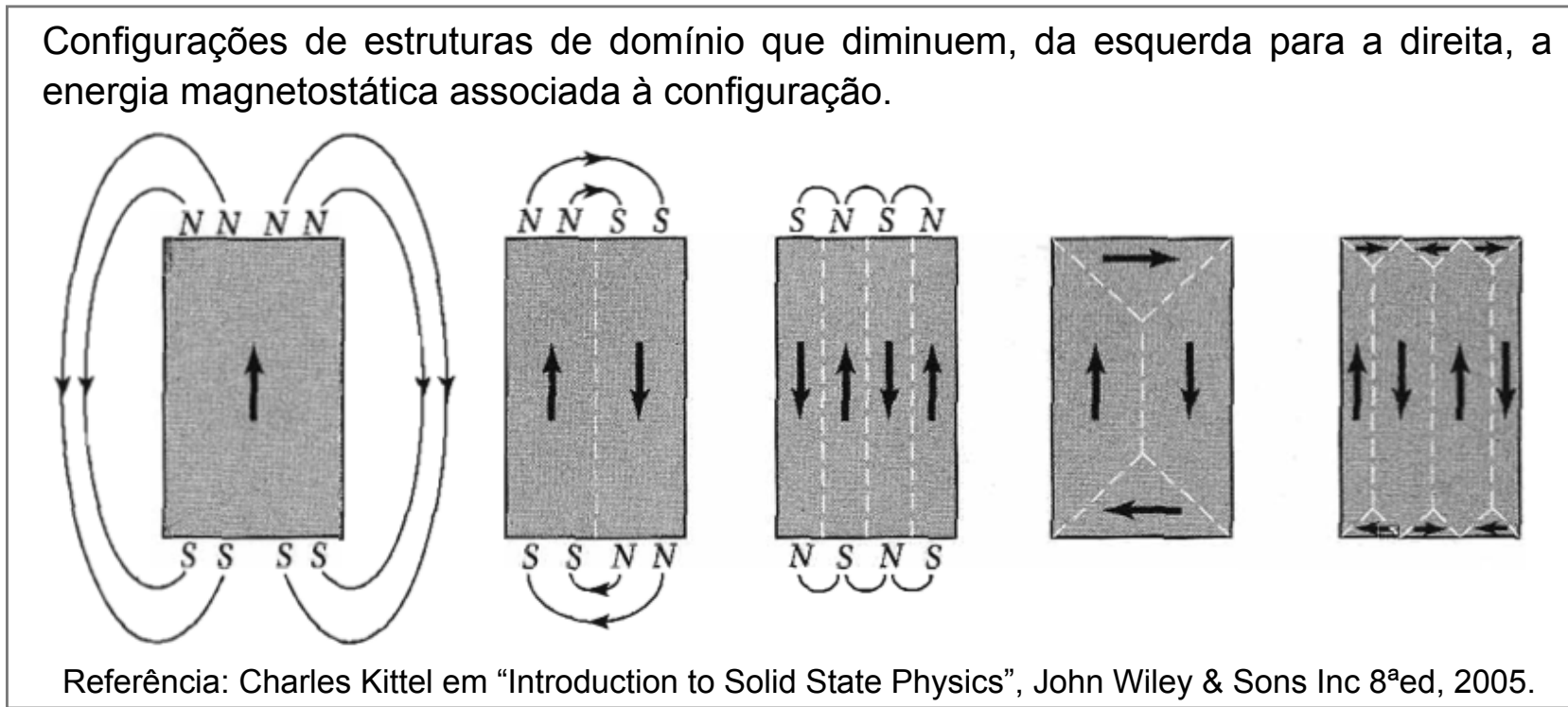


- Como consequência da interação cooperativa entre os momentos de dipolo magnético atômicos nos domínios, os momentos encontram-se alinhados uns com os outros em cada domínio. Dessa forma o material apresenta nessas regiões sua magnetização máxima, a chamada **MAGNETIZAÇÃO DE SATURAÇÃO (M_s)**.
- O tamanho e forma dos domínios depende das dimensões do corpo, de sua geometria, do material ferromagnético de que é fabricado, dentre outros. Os domínios podem ser pequenos (dimensões nanométricas), ou relativamente grandes, atingindo tamanhos sub-milimétricos (10^{17} a 10^{21} átomos ou moléculas).

- Domínios adjacentes estão separados por **PAREDES DE DOMÍNIO** (ou **CONTORNOS DE DOMÍNIO**), nos quais a direção da magnetização varia gradualmente, geralmente por 180° ou 90° . Associa-se à parede de domínio uma densidade de energia, energia por unidade de área (J/m^2).
- A magnitude do campo M gerado por um corpo sólido (como um todo) é a soma vetorial das magnetizações de todos os domínios, onde a contribuição de cada domínio é ponderada de acordo com a sua fração volumétrica no corpo. No caso de corpos, não previamente magnetizados, essa soma é nula.



- A força motriz para a formação das configurações das estruturas de domínios magnéticos (distribuição de tamanhos e formas dos domínios) resulta da tendência dos materiais a minimizarem sua ENERGIA LIVRE; uma energia magnética alta está associada a um corpo magneticamente saturado (formado por um único domínio), enquanto a formação de domínios, geralmente, leva à diminuição da energia magnética. A principal contribuição para essa energia magnética é a ENERGIA MAGNETOSTÁTICA, resultante da presença de um campo desmagnetizante ao redor do corpo em sua região externa. A ENERGIA LIVRE MÍNIMA de um corpo, não previamente magnetizado, corresponde às estruturas de domínio que anulam a energia magnetostática.

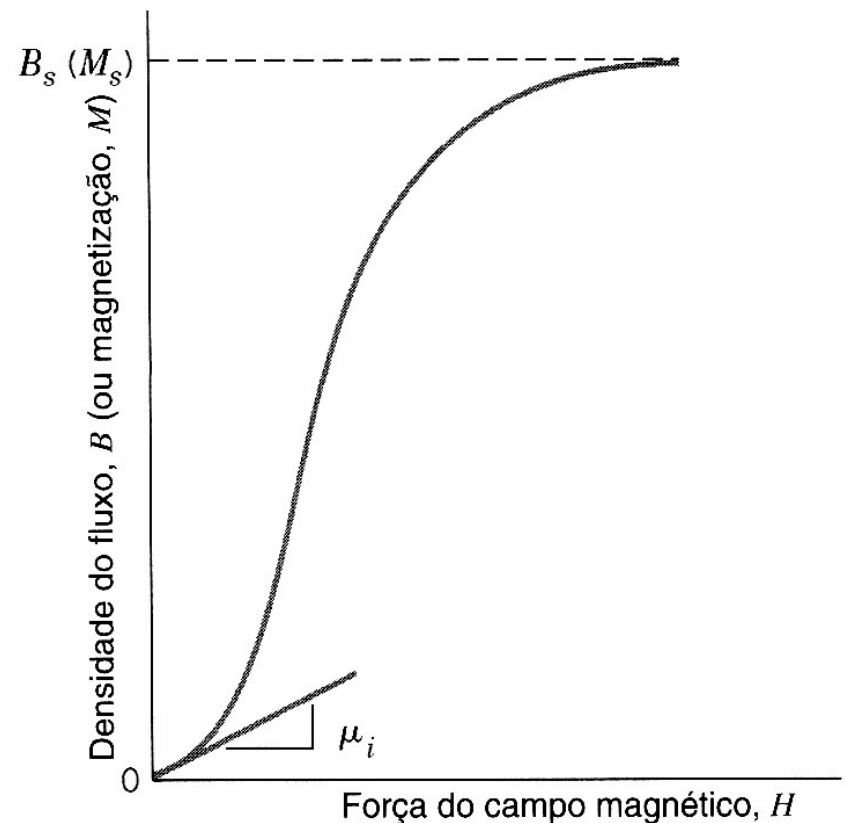


- Note que não há correlações simples entre domínios magnéticos e grãos, sendo que, em materiais policristalinos, cada grão pode conter mais que um domínio magnético.

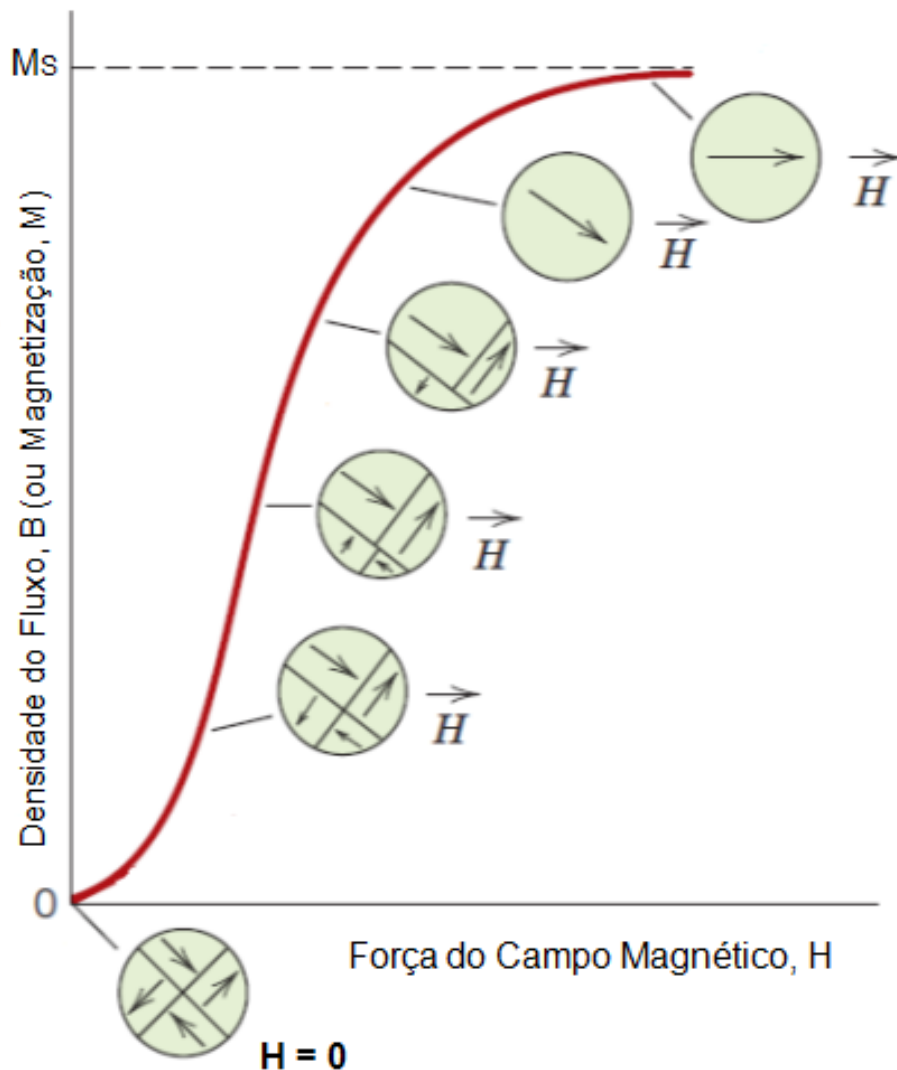
CURVA DE MAGNETIZAÇÃO INICIAL

- B e H não são linearmente proporcionais para os materiais ferromagnéticos.
- Uma vez que a permeabilidade, μ , é dada pelo coeficiente angular da curva $B = f(H)$, ou seja, $\mu = dB/dH$, pode-se observar que μ varia e é dependente do valor de H.
- Ocasionalmente, a permeabilidade inicial μ_i (dB/dH para $H = 0$) é especificada como uma propriedade do material.
- A magnetização do corpo possui um valor máximo, a chamada **MAGNETIZAÇÃO DE SATURAÇÃO (M_s)** do corpo.
- Para materiais ferromagnéticos,
 $M = \chi_m H$ e $\chi_m \gg 1 \Rightarrow M \gg H$.
Portanto, $B = \mu_0 H + \mu_0 M \Rightarrow B \approx \mu_0 M$.

Curva obtida para B (ou M) em função do campo externo H, para uma amostra, inicialmente desmagnetizada, à medida que a intensidade de H aumenta.



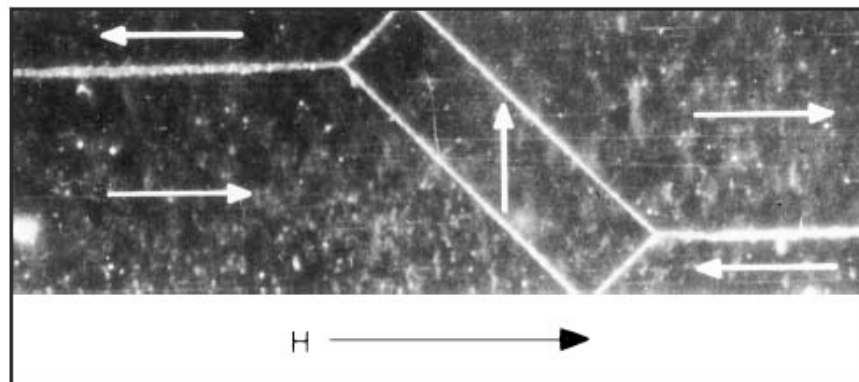
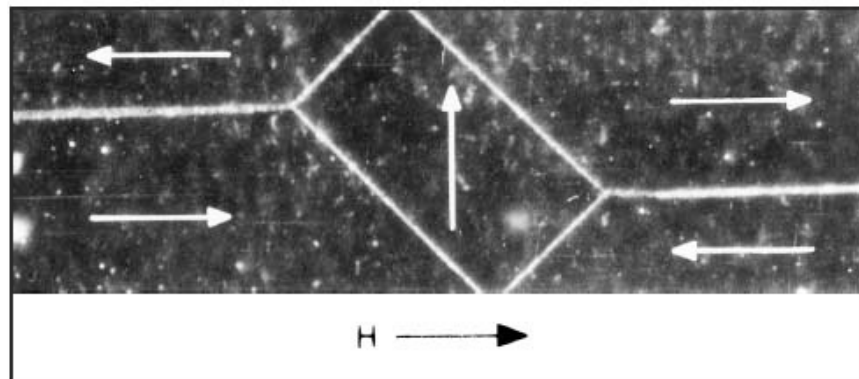
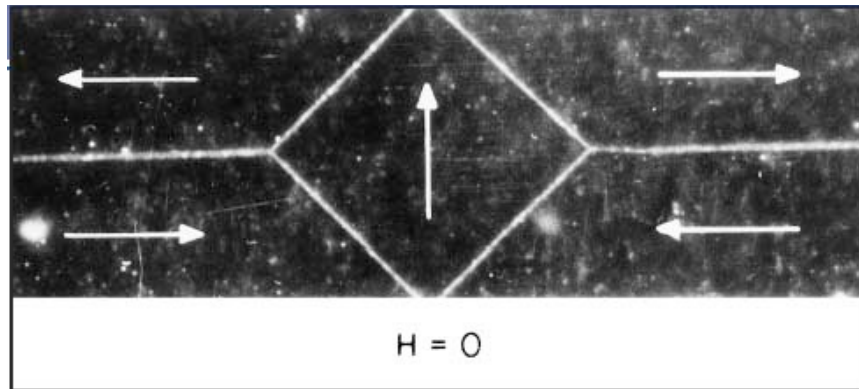
Essa última equação justifica o fato de ser habitual o uso indistinto de B e M no ferromagnetismo, apesar destes representarem grandezas físicas distintas.



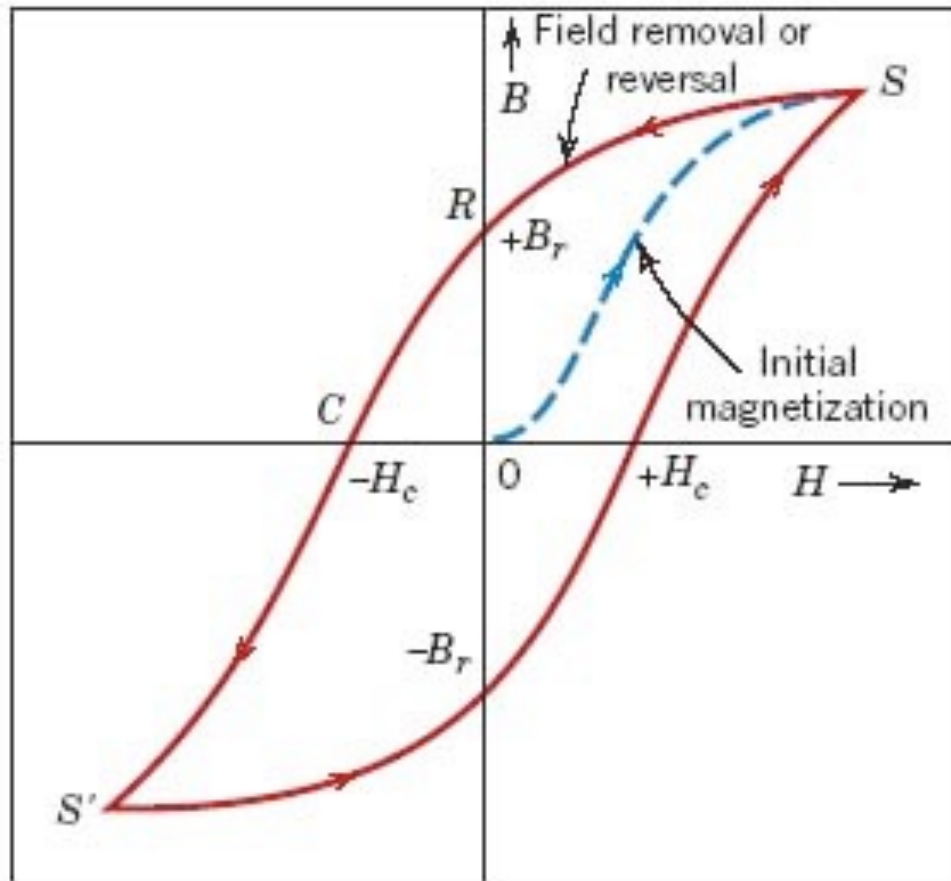
À medida que um campo externo H de magnitude crescente é aplicado, os domínios mudam de forma e de tamanho mediante o movimento das paredes de domínio.

- Inicialmente, os momentos dos domínios constituintes do corpo estão orientados de tal modo que a magnetização líquida associada ao corpo é nula.
- À medida que um campo H crescente é aplicado, os domínios que estão favoravelmente orientados em relação à direção de H crescem às custas dos domínios com orientações desfavoráveis.
- Esse processo continua com o aumento de H , até que o corpo seja constituído por um único domínio magnético (um monodomínio) e com magnetização M_s praticamente alinhada (direção e sentido) com H .
- A **SATURAÇÃO MAGNÉTICA** do corpo é atingida quando M_s , por meio de rotação, fica orientado na direção de H .

ESTRUTURA DOS DOMÍNIOS MAGNÉTICOS



- Fotomicrografias de um monocristal de ferro, mostrando os domínios magnéticos e suas alterações de forma, à medida que um campo magnético H é aplicado.
- A direção da magnetização de cada domínio está indicada por uma seta.
- Aqueles domínios que estão orientados favoravelmente em relação a H crescem à custa dos domínios que estão orientados desfavoravelmente.



Indução magnética (B) em função do campo magnético externo (H) para um material ferromagnético saturado ciclicamente em um campo H positivo e negativo (pontos S e S').

O **CICLO DE HISTERESE** é representado pela **CURVA DE HISTERESE** (linha sólida vermelha); a linha azul tracejada indica a curva de magnetização inicial.

- Se a partir da saturação inicial (ponto S) o campo H passa a ser reduzido, a curva de magnetização não retorna seguindo seu trajeto original. Produz-se um efeito de **HISTERESE**, onde B se defasa em relação a H , diminuindo a uma taxa mais baixa.
- O efeito de histerese é gerado pela **resistência à movimentação de paredes de domínio** causada pela presença de defeitos no material cristalino.
- A **REMANÊNCIA** (B_r) corresponde a indução magnética B residual na amostra após a retirada do campo H (ou seja, quando $H = 0$).
- A **COERCIVIDADE** (H_c) corresponde ao campo magnético H necessário para reduzir o campo B no interior da amostra a zero.

- A área compreendida pela **CURVA DE HISTERESE** corresponde a uma perda de **energia por unidade de volume**, por ciclo de magnetização-desmagnetização, liberada na forma de calor \Rightarrow perda por histerese.
- Materiais **MAGNETICAMENTE MOLES** **perdem pouca energia** por ciclo e são usados, por exemplo, em núcleos de transformadores.
- Materiais **MAGNETICAMENTE MOLES** apresentam **alta permeabilidade inicial μ_i** e **baixa coercividade H_c** [menor que $1 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$ ($12,5 \text{ Oe}$)].

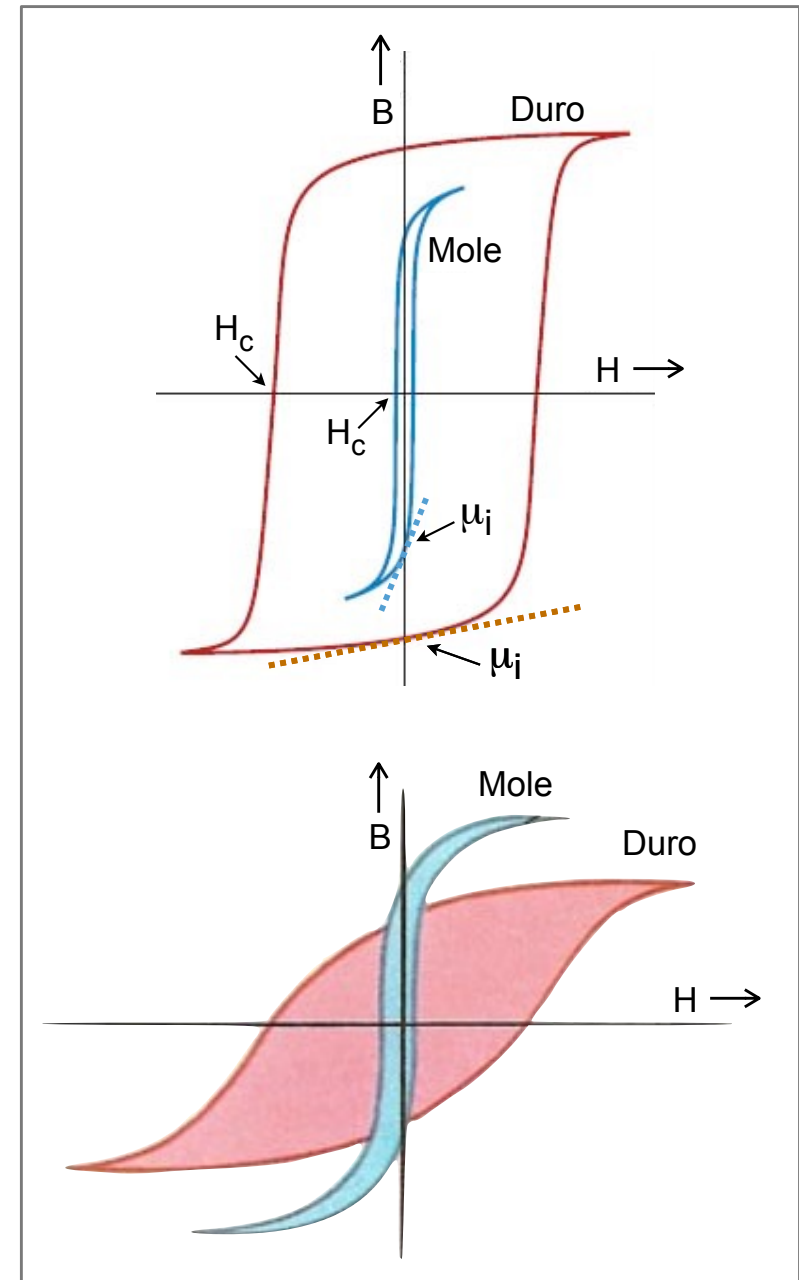


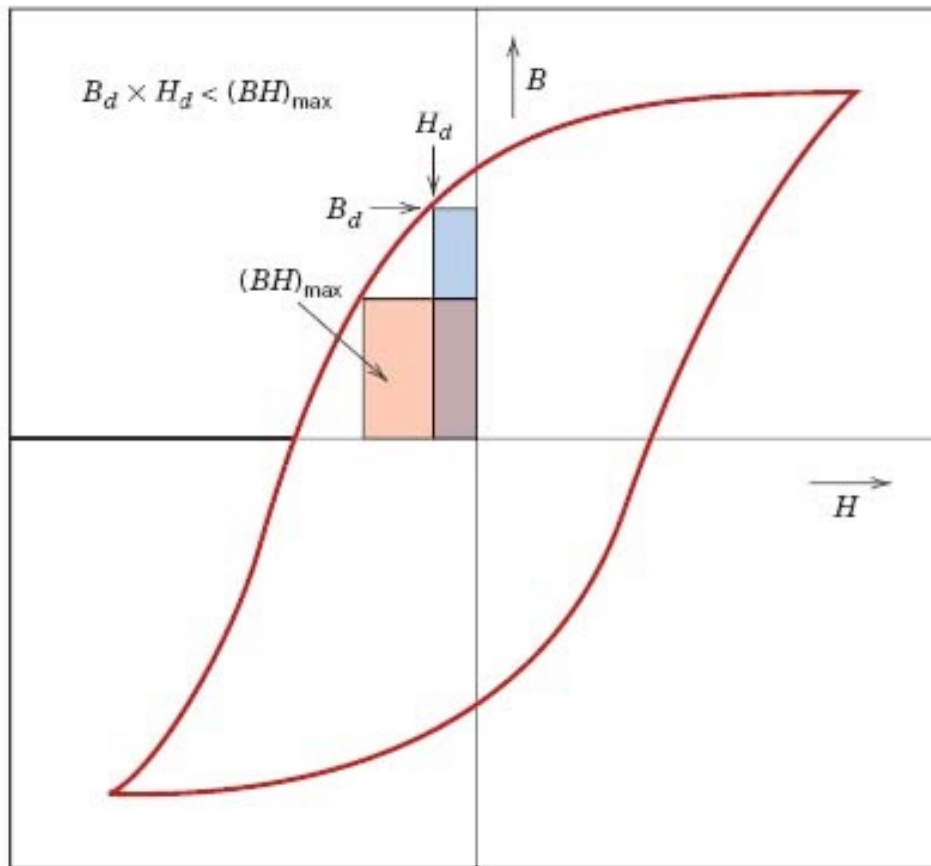
Table 20.5 Typical Properties for Several Soft Magnetic Materials

<i>Material</i>	<i>Composition (wt %)</i>	<i>Initial Relative Permeability μ_i</i>	<i>Saturation Flux Density B_s [tesla (gauss)]</i>	<i>Hysteresis Loss/Cycle [J/m^3 (erg/cm³)]</i>	<i>Resistivity ρ ($\Omega \cdot m$)</i>
Commercial iron ingot	99.95Fe	150	2.14 (21,400)	270 (2700)	1.0×10^{-7}
Silicon–iron (oriented)	97Fe, 3Si	1400	2.01 (20,100)	40 (400)	4.7×10^{-7}
45 Permalloy	55Fe, 45Ni	2500	1.60 (16,000)	120 (1200)	4.5×10^{-7}
Supermalloy	79Ni, 15Fe, 5Mo, 0.5Mn	75,000	0.80 (8000)	—	6.0×10^{-7}
Ferroxcube A	48MnFe ₂ O ₄ , 52ZnFe ₂ O ₄	1400	0.33 (3300)	~40 (~400)	2000
Ferroxcube B	36NiFe ₂ O ₄ , 64ZnFe ₂ O ₄	650	0.36 (3600)	~35 (~350)	10^7

Source: Adapted from *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.

Referência: W.D. Callister e D.G. Rethwisch em “Materials Science and Engineering: An Introduction”, Wiley 8th ed, 2010, pág. 822.

- **IMÃS PERMANENTES.**
- **Altas remanência, coercividade** [maior que $10 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$ (125 Oe)] **e indução de saturação** correspondem a altas perdas de energia por histerese.



- Uma figura de mérito útil, $(BH)_{\max}$, corresponde ao valor máximo do produto entre B e H, medido no segundo quadrante do ciclo de histerese. $(BH)_{\max}$ representa a maior área que pode ser inserida no quadrante considerado, correspondendo a um ponto de máximo na densidade de energia magnética.
- Utiliza-se $(BH)_{\max}$ como uma medida da energia necessária para desmagnetizar um ímã. Valores maiores de $(BH)_{\max}$ correspondem a energias de desmagnetização maiores.
- Note que a capacidade de controlar H_c é de importância vital para aplicações tecnológicas. Dificultar a movimentação das paredes de domínio, aumenta H_c enquanto facilitar sua movimentação, diminui H_c .

Table 20.6 Typical Properties for Several Hard Magnetic Materials

<i>Material</i>	<i>Composition (wt%)</i>	<i>Remanence B_r [tesla (gauss)]</i>	<i>Coercivity H_c [amp-turn/m (Oe)]</i>	<i>$(BH)_{max}$ [kJ/m³ (MGOe)]</i>	<i>Curie Temperature T_c [°C (°F)]</i>	<i>Resistivity ρ ($\Omega \cdot m$)</i>
Tungsten steel	92.8 Fe, 6 W, 0.5 Cr, 0.7 C	0.95 (9500)	5900 (74)	2.6 (0.33)	760 (1400)	3.0×10^{-7}
Cunife	20 Fe, 20 Ni, 60 Cu	0.54 (5400)	44,000 (550)	12 (1.5)	410 (770)	1.8×10^{-7}
Sintered alnico 8	34 Fe, 7 Al, 15 Ni, 35 Co, 4 Cu, 5 Ti	0.76 (7600)	125,000 (1550)	36 (4.5)	860 (1580)	—
Sintered ferrite 3	BaO–6Fe ₂ O ₃	0.32 (3200)	240,000 (3000)	20 (2.5)	450 (840)	$\sim 10^4$
Cobalt rare earth 1	SmCo ₅	0.92 (9200)	720,000 (9,000)	170 (21)	725 (1340)	5.0×10^{-7}
Sintered neodymium– iron–boron	Nd ₂ Fe ₁₄ B	1.16 (11,600)	848,000 (10,600)	255 (32)	310 (590)	1.6×10^{-6}

Source: Adapted from *ASM Handbook, Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. Copyright © 1990 by ASM International. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH.

Referência: W.D. Callister e D.G. Rethwisch em “Materials Science and Engineering: An Introduction”, Wiley 8th ed, 2010, pág. 824.

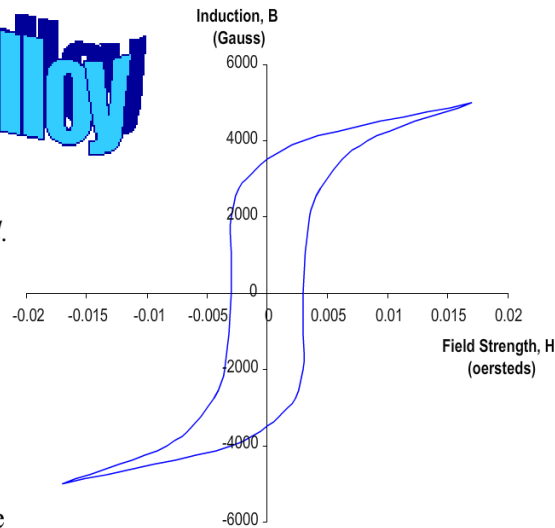
EXEMPLOS DE CURVAS DE HISTERESE

Supermalloy

Supermalloy is a *magnetically soft material*.

It has a high magnetic permeability and low coercivity.

Supermalloy is used in the manufacturing of components of radio engineering, telephony, and telemechanics instruments.

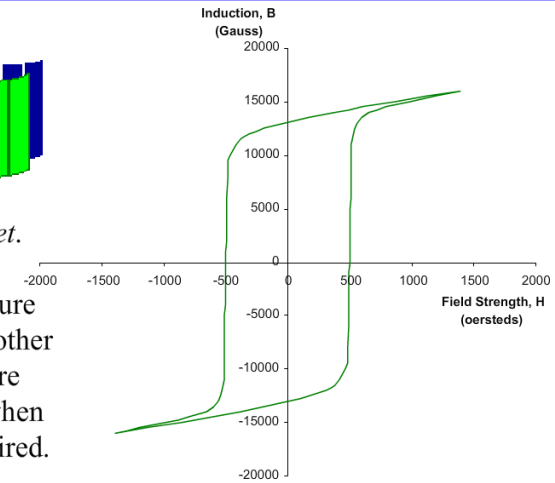


Alcomax II

Alcomax II is a *hard magnet*.

It has a very good temperature coefficient compared with other permanent magnets therefore making it an ideal choice when a temperature range is required.

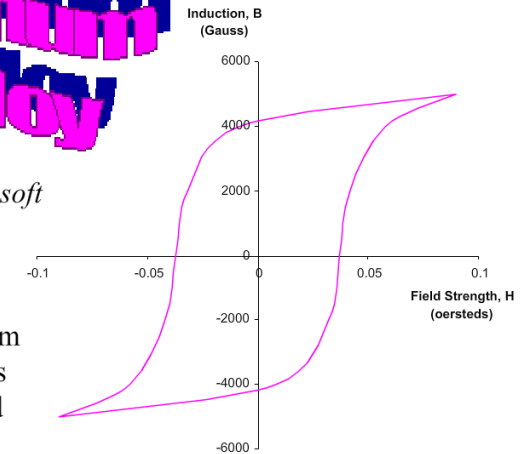
The principle applications are for triggering of proximity switches (reeds and hall sensors), horseshoe design permanent magnets for lifting, and entry door locks.

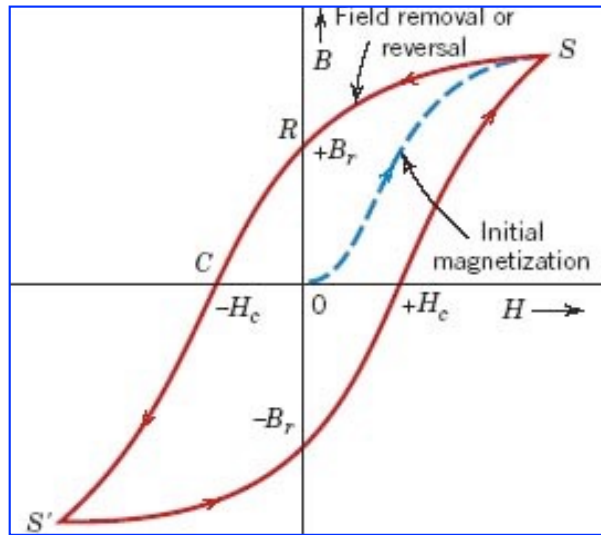


Molybdenum Permalloy

Molybdenum permalloy is a *soft magnet*.

It is an alloy of 81% nickel, 17% iron and 2% molybdenum and was invented at Bell Labs in 1940. It provides improved inductive compensation of capacitive reactance in long distance telephone lines.

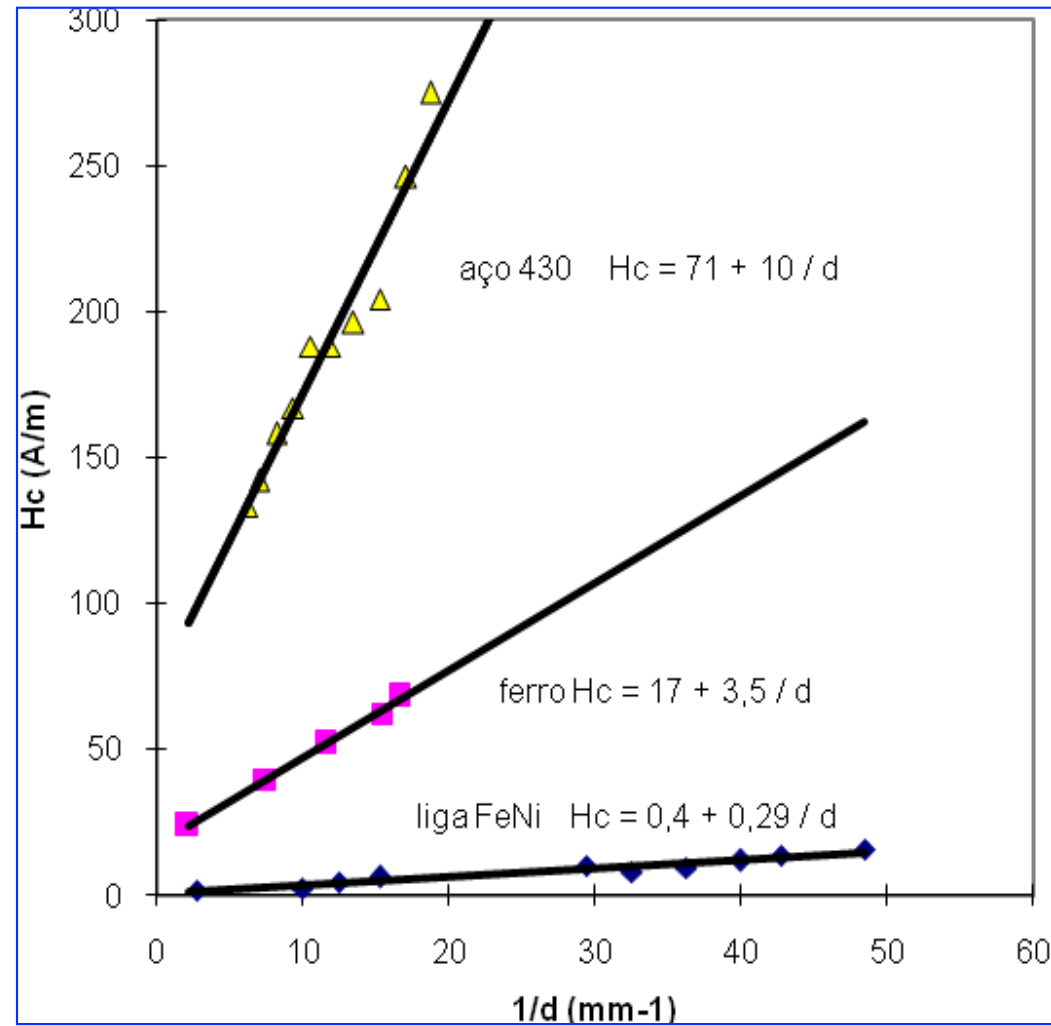




Quanto maior o tamanho de grão, menor a coercividade H_c e mais “magra” é a curva de histerese.

$$H_c = A + \frac{3\gamma}{J_s d}$$

- γ é a energia da parede de domínio
- J_s é a polarização de saturação
- d é o diâmetro médio dos grãos



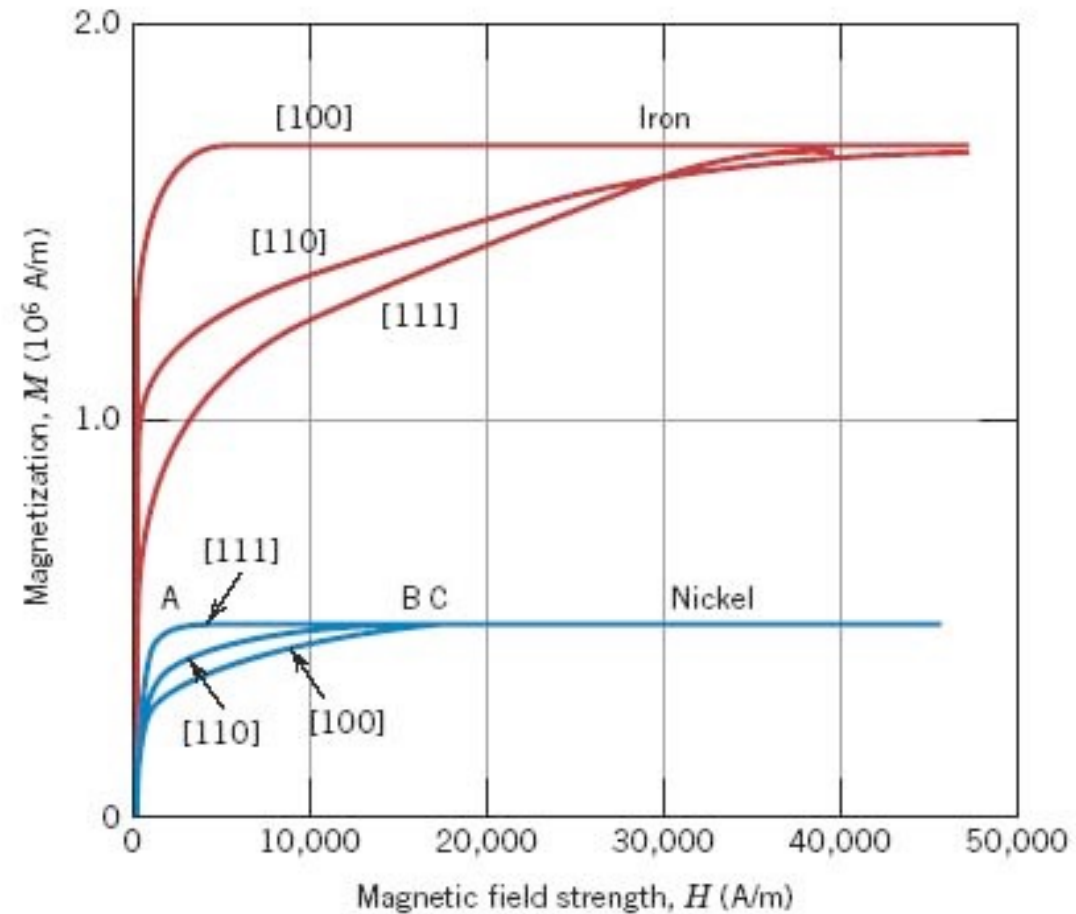
FeNi (Adler e Pfeifer, 1974)

Ferro (Yensen, 1930; Degauque e outros, 1982)

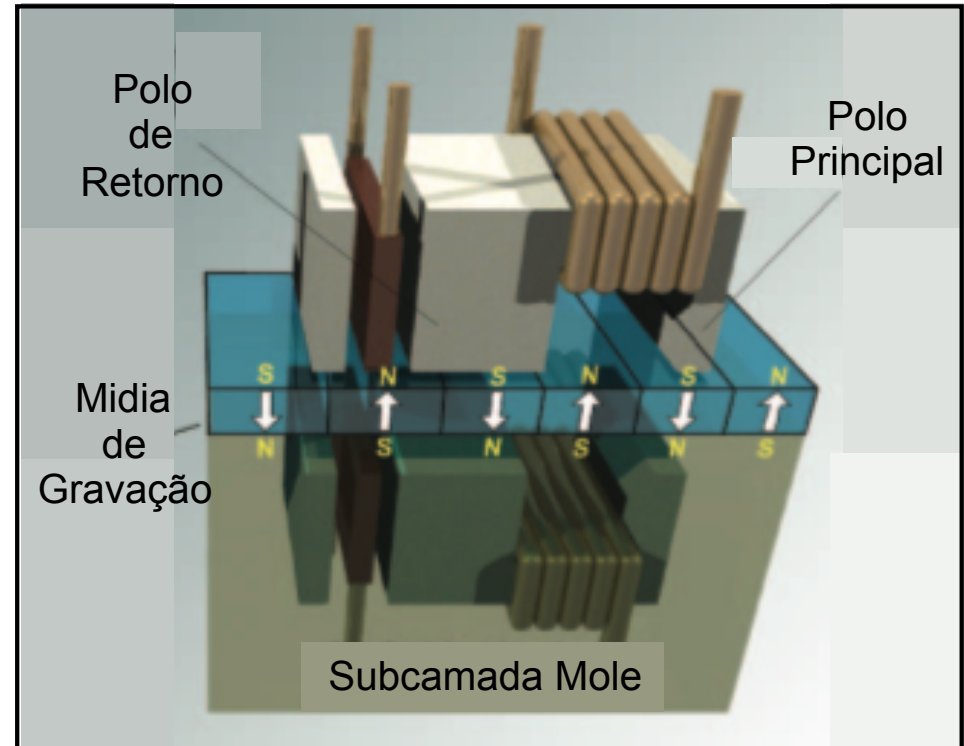
Aço inox 430 (Battistini, 1994)

ANISOTROPIA MAGNÉTICA

- Várias características dos materiais influenciam a forma das curvas de histerese. Por exemplo:
 - ✓ monocristalino ou policristalino
 - ✓ orientação preferencial dos grãos em materiais policristalinos
 - ✓ presença de poros ou de partículas de uma segunda fase
 - ✓ temperatura, tensões mecânicas
- Na figura ao lado apresentamos curvas de M em função de H para duas amostras monocristalinas de níquel (CFC) e ferro (CCC). Os índices de Miller indicados na figura representam a direção de H em relação às orientações cristalográficas das amostras.
- A influência da direção de H no comportamento de M é consequência da **ANISOTROPIA MAGNETO-CRISTALINA**.
- Os índices de Miller das **DIREÇÕES DE FÁCIL MAGNETIZAÇÃO** do níquel e do ferro são, respectivamente, $[111]$ e $[100]$.



- Uma das aplicações modernas importantes dos materiais magnéticos é no armazenamento de informações nos discos rígidos de computadores onde a gravação magnética digital é utilizada.
- Características gerais dos discos rígidos portáteis comerciais de última geração em 2010:
 - ✓ Capacidade de gravação: 1,5 TB.
 - ✓ Massa aproximada do dispositivo: 180g.
- Características gerais em 2008:
 - (1) Discos rígidos portáteis de 320GB com mídias magnéticas perpendiculares:
 - ✓ Densidade de gravação areal : 250 Gb/pol².
 - ✓ Área de um bit de informação: ~ 100nm x 20nm.
 - ✓ N° de grãos por bit de informação: ~ 50 a 100.
 - ✓ Diâmetro médio dos grãos: 8 nm.
 - (2) Densidades de gravação areal das mídias magnéticas perpendiculares:
 - ✓ Demonstrações de laboratório: entre 420 Gb/pol² e 600 Gb/pol² .
 - ✓ Limite superior previsto para a tecnologia: 1000 Gb/pol² (com grãos de áreas ligeiramente superiores a 8 nm²).



O limite inferior para o volume dos grãos na tecnologia de gravação magnética digital é definido pelo limite SUPERPARAMAGNÉTICO. Nesse limite, a energia associada ao momento magnético dos grãos se torna comparável com a energia térmica a temperatura ambiente e o armazenamento de informação não é mais confiável.

... finalizando: Propriedades Magnéticas dos Materiais

- Ao final do estudo dos conteúdos desta Unidade você deve ser capaz de:
 - compreender as correlações matemáticas entre o campo magnético H , a indução magnética B e a magnetização M ; entender o conceito de permeabilidade magnética μ e de susceptibilidade magnética χ_m .
 - compreender as diferenças físicas entre as grandezas macroscópicas H , B e M .
 - entender as origens físicas do momento de dipolo magnético, sob o ponto de vista do momento angular orbital e de spin dos elétrons;
 - saber descrever sucintamente as diferenças entre os comportamentos magnéticos dos materiais diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos; compreender o efeito da temperatura sobre a magnetização de materiais ferromagnéticos.
 - entender os conceitos de domínios magnéticos e paredes de domínio; saber sua influência na magnetização inicial de um ferromagneto; saber sua influência na curva de histerese; entender o significado físico da magnetização de saturação M_s , da remanência B_r e da coercividade H_c ; entender a origem física da energia dissipada durante um ciclo de histerese.
 - saber explicar as distintas características dos materiais magneticamente moles e duros.

REFERÊNCIAS

- **Callister, W.D.** *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 7th Ed. Wiley. 2007. Cap. 20, seções 1, 2, 4, 6, 7 a 10.
- Obs.: outras edições do livro do Callister existentes nas bibliotecas da EP, em inglês ou português, também cobrem o conteúdo apresentado nesta Unidade. *Exemplo*: Callister, 5^a ed, Capítulo 21: seções 1, 2, 4, 6, 7 a 9.
- **Ciêncianimada**, Animações “Magnetismo dos materiais” e “Curvas de magnetização inicial e de histerese”, 2011. <<http://ciencianimada.com.br>>
- **Ferromagnetic Materials**, DoITPoMS - Teaching & Learning Packages - University of Cambridge, 2008. <<https://doitpoms.admin.cam.ac.uk/tlplib/ferromagnetic/index.php>>
- **Jiles, D.** *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*. 3^a Ed., CRC., 2016.
- **Shackelford, J. F.** *Introduction to Materials Science for Engineers*. 8^a Ed, Prentice-Hall Inc., 2015. Capítulo 14.
- **Cullity, B. D. e Graham, C. D.** *Introduction to Magnetic Materials*. 2^a Ed. John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- **Faria, R. N. e Lima, L. F. C. P** *Introdução ao Magnetismo dos Materiais*. Editora Livraria da Física, 2005.