



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

PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS MATERIAIS

PMT 2100 - Introdução à Ciência dos
Materiais para Engenharia
2º semestre de 2005

ROTEIRO DA AULA

- Algumas Aplicações
- Campo Magnético
- Indução Magnética
- Magnetização
- Dipolos e Momentos Magnéticos
- O Magnetismo dos Materiais
- Ferromagnetismo
- Domínios Magnéticos e paredes de Domínio
- Curva de Magnetização Inicial
- Curva de histerese
- Materiais magnéticos moles e duros

ALGUMAS APLICAÇÕES

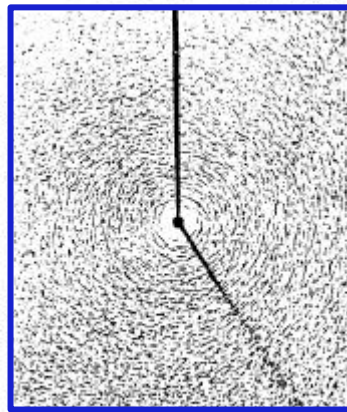
3

- Muitos dos nossos dispositivos tecnológicos modernos dependem do magnetismo e dos materiais magnéticos:
 - Geradores elétricos (máquinas que convertem movimento em eletricidade)
 - Motores elétricos (máquinas que usam eletricidade para produzir movimento)
 - Transformadores elétricos (dispositivos que mudam a voltagem e a corrente de uma fonte de eletricidade)
 - Rádios
 - Televisões
 - Vídeos
 - Telefones
 - Computadores
 - Dispositivos de armazenamento de dados (discos rígidos, fitas magnéticas etc)
 - Cartões magnéticos
 - Alto-falantes

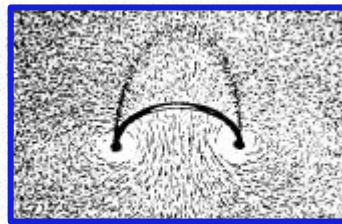
CAMPO MAGNÉTICO

4

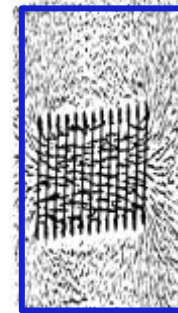
- **CAMPOS MAGNÉTICOS** são produzidos por cargas elétricas em movimento. Assim, uma corrente elétrica em um condutor gera um campo magnético. Campos magnéticos também podem ser produzidos por magnetos permanentes (ímãs). Neste caso, é o movimento dos elétrons (spin e orbital) dos átomos que compõem o magneto o responsável pelo campo magnético.
- **LINHAS DE FORÇA** são utilizadas para representar o campo magnético. Para cada ponto do espaço, a reta tangente à linha de força fornece a direção do campo naquele ponto. A intensidade do campo se correlaciona com o número de linhas de força que atravessam uma área unitária na direção perpendicular à definida pelas linhas de força.



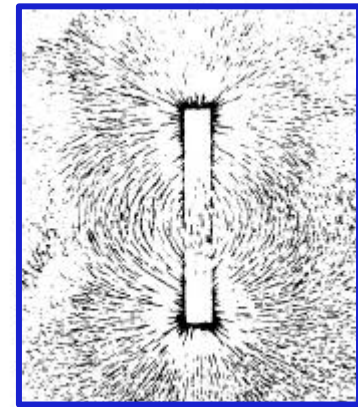
Fio retilíneo



Espira circular



Bobina



Magneto Permanente

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 (segundo D. Jiles, pág. 5).

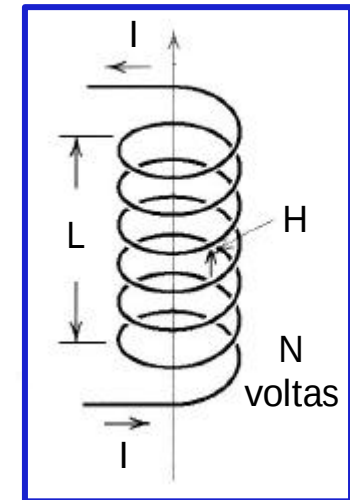
CAMPO MAGNÉTICO

5

- Quando uma corrente elétrica constante 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

$$H = N I / L$$

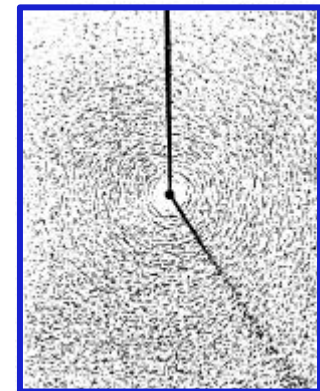
(A/m)



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

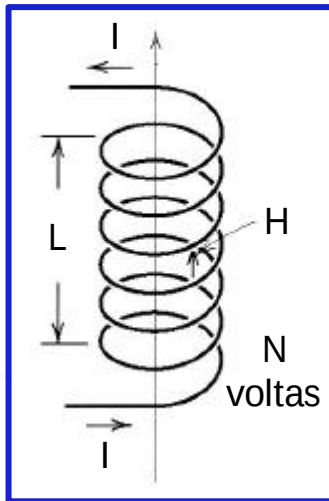
$$H = I / 2 \pi r$$

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



INDUÇÃO MAGNÉTICA

6

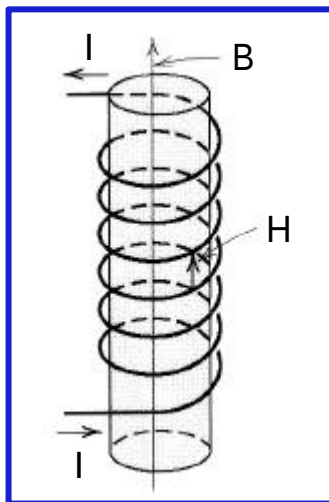


- A **INDUÇÃO MAGNÉTICA** ou **DENSIDADE DO FLUXO MAGNÉTICO** representa a intensidade do campo no interior de um material sujeito a um campo magnético externo.

- A indução magnética B_0 no vácuo é

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

onde μ_0 é a **PERMEABILIDADE MAGNÉTICA DO VÁCUO** e vale $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ (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.

- Definimos a **PERMEABILIDADE RELATIVA** como

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

ALGUNS COMENTÁRIOS

7

- A expressão $B = \mu H$ representa um análogo magnético da lei de Ohm da eletricidade $J = \sigma E$.

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

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

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

- O campo magnético (Ampère/metro) representa um gradiente de energia.
- A indução magnética (Tesla=Weber.metro²) representa o número de linhas de campo por unidade de área.
- A permeabilidade magnética é uma medida da facilidade com a qual B pode ser induzido num material na presença de H.

MAGNETIZAÇÃO

8

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

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = B_0 + \mu_0 M \quad (3)$$

Assim, 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 se correlaciona com o campo magnético por meio da relação

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

onde χ_m é a **SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA** do material.

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

$$\chi_m = \mu_r - 1$$

UNIDADES MAGNÉTICAS

9

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 = 4π x 10 ⁻³ oersted
Magnetização	M	amp-volta/m	C/m-s	maxwell/cm ²	1 amp-volta/m = 4π x 10 ⁻³ maxwell/cm ²
Permeabilidade magnética	μ	henry/m Wb / amp m	kg m / C ²	sem unidade	4π 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

10

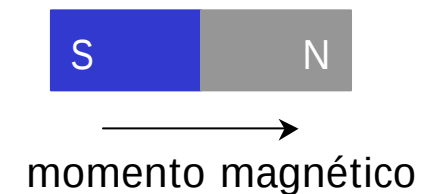
- Uma espira de corrente pode ser representada por um **DIPOLo MAGNÉTICO**. Um dipolo magnético, por sua vez, pode ser descrito pelo vetor **MOMENTO MAGNÉTICO**.

Exemplos:

A magnitude do momento magnético $m?$ de uma espira de área A que transporta uma corrente I é $m? = I A$.

A magnitude do momento magnético m_i correspondente a um imã 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 imã. Assim, um dipolo magnético pode ser considerado como sendo um imã.



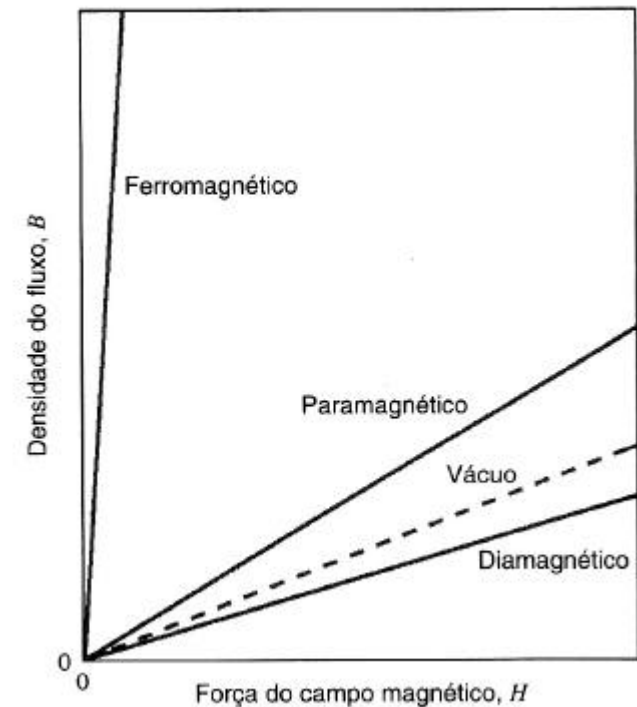
- O **TORQUE** num dipolo magnético de momento $\vec{m}$ sob a ação de uma indução magnética $\vec{B}$ é $\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B}$
- Quando imerso em um campo magnético, um dipolo tende a se orientar na direção do campo devido à ação do torque $\vec{\tau}$.

O MAGNETISMO DOS MATERIAIS

11

- O momento angular (orbital e de spin) dos elétrons, dos átomos que formam a matéria, dá origem a dipolos magnéticos microscópicos. Esses dipolos magnéticos permitem associar momentos magnéticos aos átomos. Assim, cada átomo pode ser pensado como se fosse um pequeno ímã.
- A magnetização de um material é definida como o momento magnético dos dipolos por unidade de volume.
- 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



- Consideraremos nesta aula apenas o caso dos materiais Ferromagnéticos.

FERROMAGNETISMO

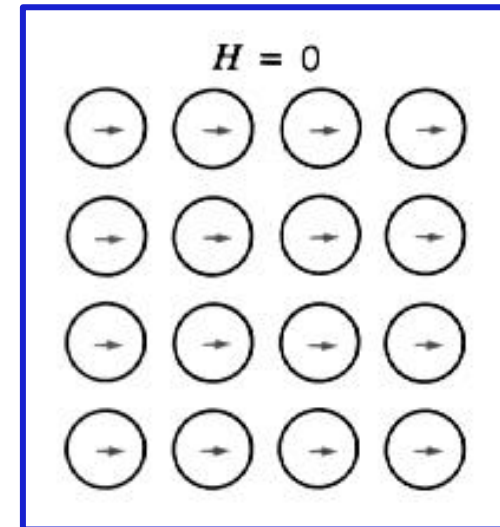
12

- Certos materiais metálicos possuem um momento magnético permanente mesmo na ausência de um campo externo e manifestam magnetizações muito grandes e permanentes. Esses materiais são denominados **FERRO-MAGNÉTICOS** e essas características representam o **FERROMAGNETISMO**.

- Fe, Co, Ni e algumas terras raras são materiais ferromagnéticos na forma elementar. Ferromagnetismo também é observado em diversos compostos (óxidos, carbonetos, nitretos etc.).

- Para materiais ferromagnéticos

$$\chi_m \approx 10^6 \Rightarrow H \ll M \Rightarrow B \approx \mu_0 M$$



- Como a suscetibilidade dos materiais ferromagnéticos é muito elevada, eles amplificam fortemente os campos magnéticos externos.

FERROMAGNETISMO

13

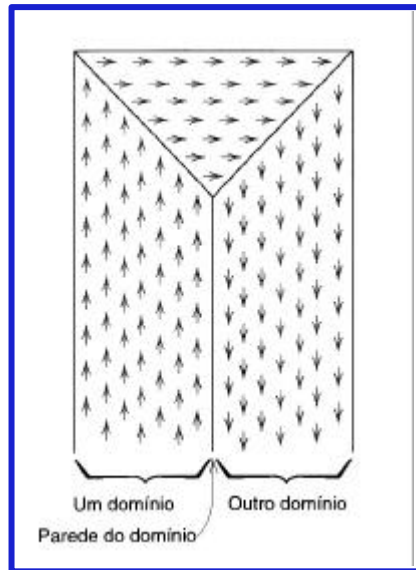
- Os momentos magnéticos permanentes dos átomos resultam do **momento angular de spin**. A magnitude do momento magnético associado ao spin de um elétron é conhecida como **MAGNETON DE BOHR** μ_b .

$$\mu_b = 9,27 \times 10^{-24} \text{ A} / \text{m}^2$$

- Os momentos magnéticos permanentes são devidos aos momentos de spin não cancelados, ou seja, somente elétrons desemparelhados contribuem para o momento magnético líquido permanente dos átomos.
- São ferromagnéticos na forma elementar alguns metais de transição (orbital 3d não preenchido) e algumas terras raras (orbital 4f não preenchido).
- Nos materiais ferromagnéticos, alinhamentos cooperativos de momentos de spin ocorrem em volumes grandes (em relação ao volume atômico) dando origem aos **domínios magnéticos**.

DOMÍNIOS MAGNÉTICOS e PAREDES DE DOMÍNIO

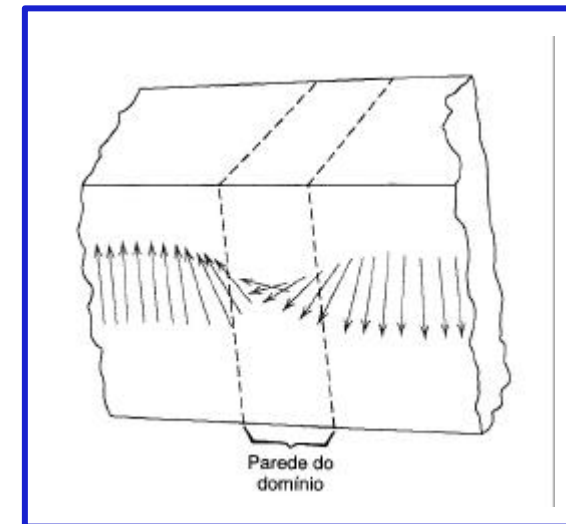
14



- Os materiais ferromagnéticos são constituídos de regiões volumétricas microscópicas onde os momentos de dipolo magnético se encontram alinhados, tendo mesma direção e sentido. Tais regiões são chamadas de **DOMÍNIOS**. Cada domínio está magnetizado até a sua magnetização de saturação.
- Geralmente, o tamanho dos domínios está na escala micrométrica e, para um material policristalino, cada grão pode conter mais de um domínio.
- Os domínios adjacentes estão separados por **CONTORNOS DE DOMÍNIO** (ou **PAREDES DE DOMÍNIO**),

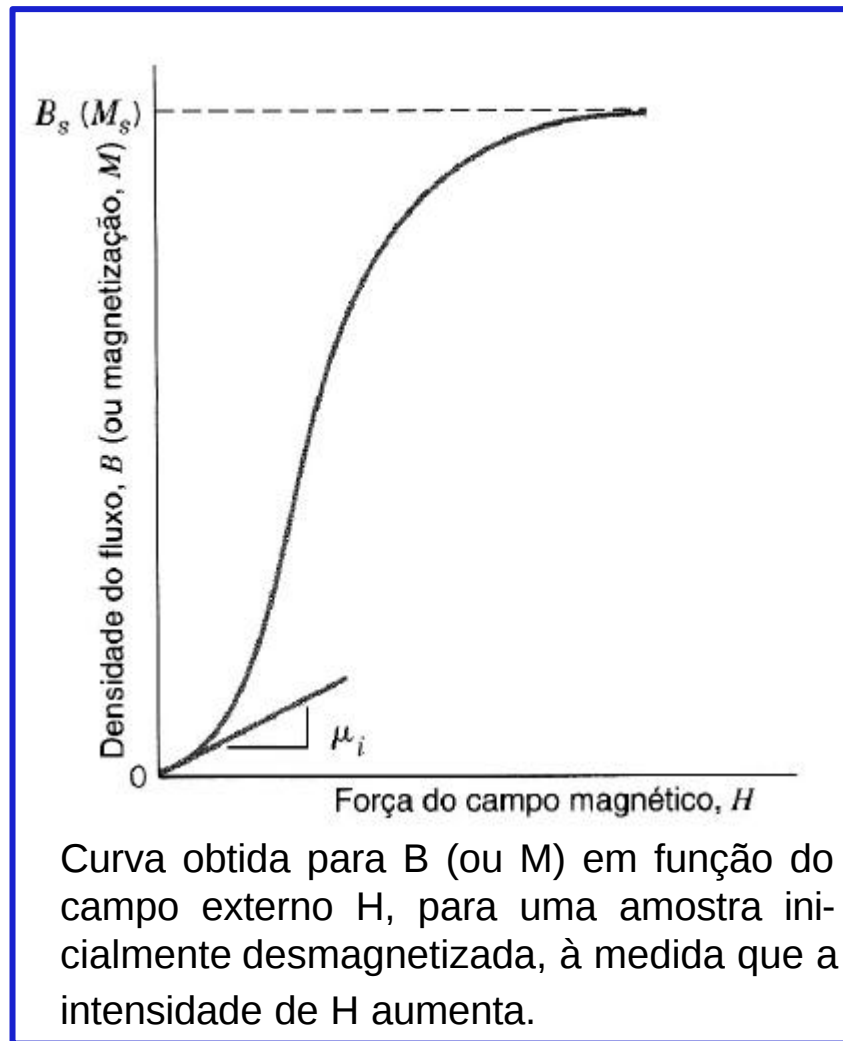
através dos quais a direção da magnetização varia gradualmente.

- A magnitude do campo M para um 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 caso de uma amostra não magnetizada, a soma vetorial apropriadamente ponderada das magnetizações de todos os domínios é igual a zero.



CURVA DE MAGNETIZAÇÃO INICIAL

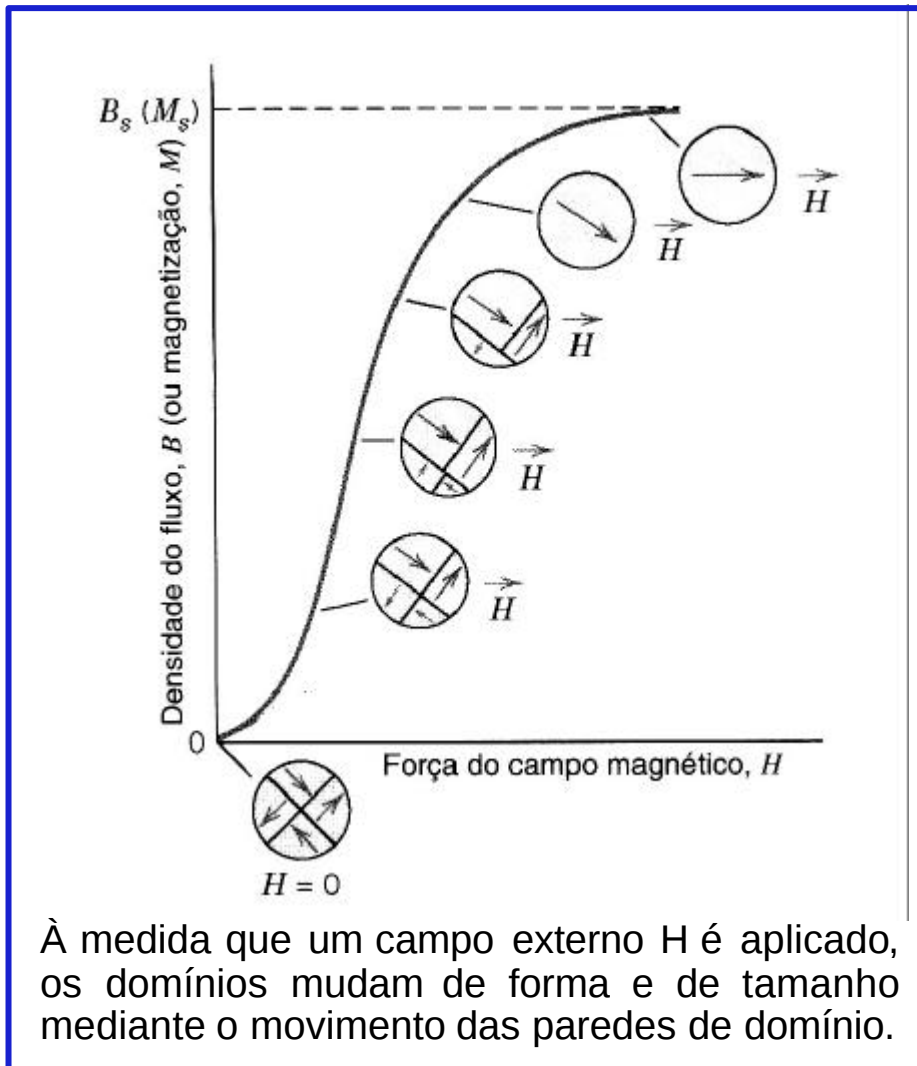
15



- B e H não são linearmente proporcionais para os materiais ferromagnéticos.
- Uma vez que a permeabilidade, μ , é a inclinação da curva B em função de H (isto é, 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.
- O valor máximo de B é denominado **INDUÇÃO DE SATURAÇÃO (B_s)** e a magnetização correspondente é a **MAGNETIZAÇÃO DE SATURAÇÃO (M_s)**.

MAGNETIZAÇÃO INICIAL e DOMÍNIOS MAGNÉTICOS

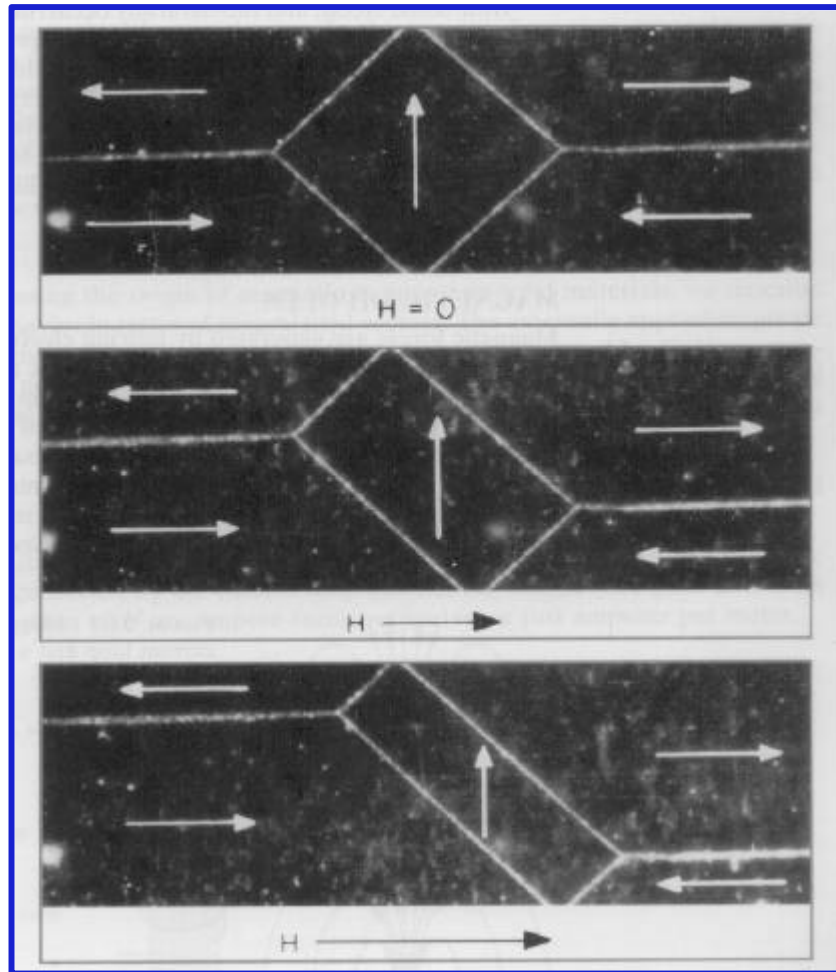
16



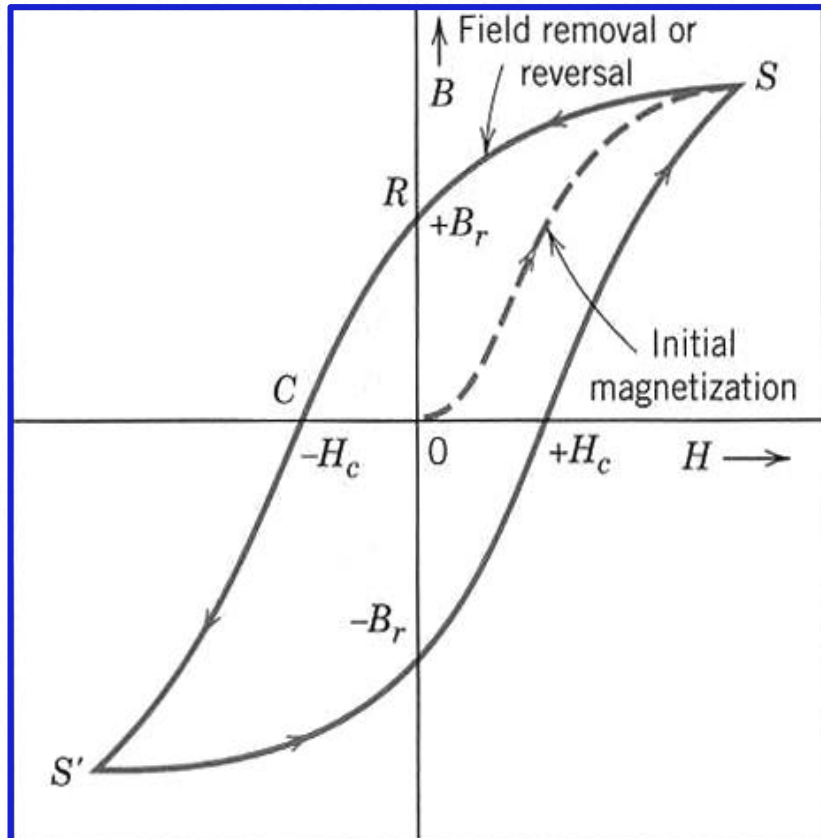
- Inicialmente, os momentos dos domínios constituintes estão orientados aleatoriamente de tal modo que não existe qualquer campo B (ou M) líquido.
- À medida que um campo H é aplicado, os domínios que estão favoravelmente orientados em relação à direção de H crescem às custas dos domínios com orientações desfavoráveis.
- Esse processo continua com o aumento de H , até que a amostra macroscópica se torne um único domínio (ou um mono-domínio), o qual se encontra praticamente alinhado com H .
- A saturação é atingida quando esse domínio, por meio de rotação, fica orientado com H .

ESTRUTURA DOS DOMÍNIOS MAGNÉTICOS

17



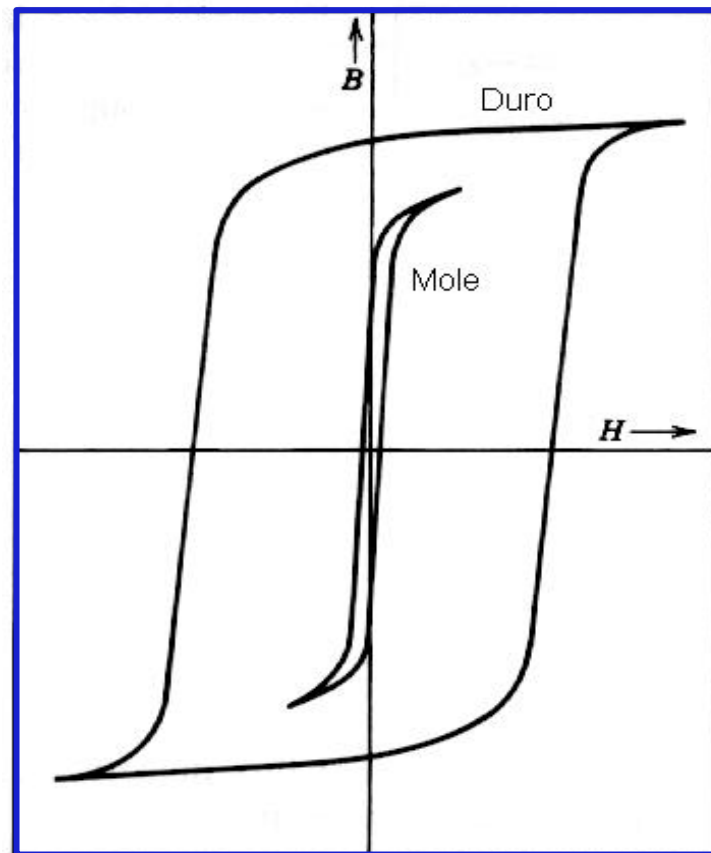
- Fotomicrografias de um monocristal de ferro, mostrando os domínios magnéticos e suas alterações de forma à medida que um campo magnético H é aplicado.
- A direção da magnetização de cada domínio está indicada por uma seta.
- Aqueles domínios que estão orientados favoravelmente em relação a H crescem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



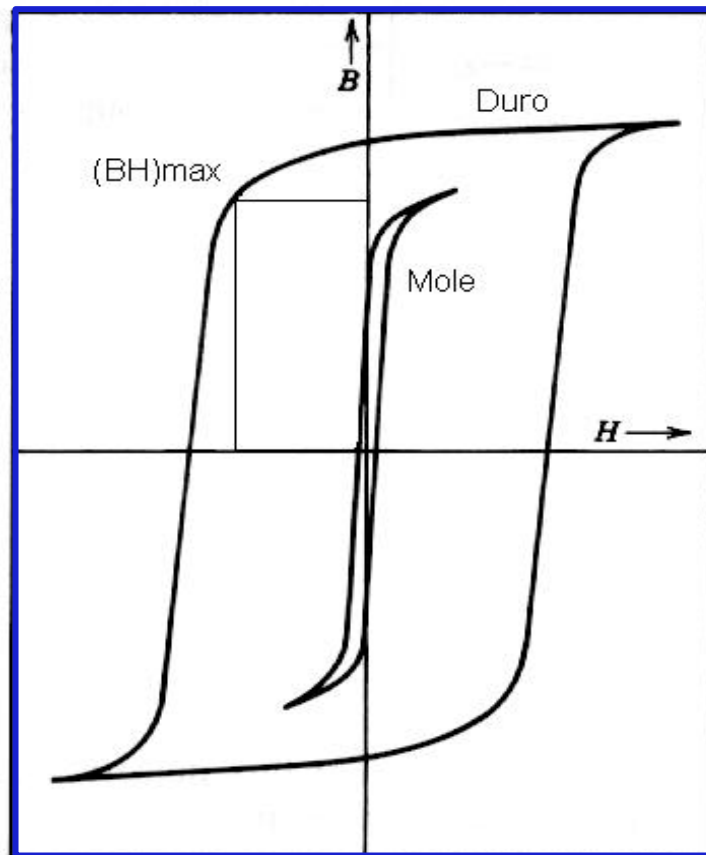
Indução magnética (B) em função do campo magnético externo (H) para um material ferromagnético saturado ciclicamente em um campo H positivo e negativo (pontos S e S').

O **CICLO DE HISTERESE** é representado pela linha sólida; a linha 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 , ou diminui a uma taxa mais baixa.
- O efeito de histerese é gerado pela resistência à movimentação de paredes de domínio.
- A **REMANÊNCIA** (B_r) corresponde ao campo 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 e são usados em núcleos de transformadores.
- Materiais **MAGNETICAMENTE MOLES** apresentam alta permeabilidade inicial e baixa coercividade.



- ÍMÃS PERMANENTES.
- Altas remanência, coercividade e indução de saturação. Altas perdas de energia por histerese.
- A energia necessária para desmagnetizar um ímã é dada pelo PRODUTO DE ENERGIA $(BH)_{max}$ medido no segundo quadrante do anel de histerese.
- Impedir a movimentação de paredes de domínio, aumenta a coercividade e a suscetibilidade.

➤ **Capítulos do Callister tratados nesta aula**

✓ **Capítulo 21**

- seções 1, 2, 4 e 7 a 9.

➤ **Outras referências importantes**

- ✓ J. F. Shackelford em “Introduction to Materials Science for Engineers”, Capítulo 11, 4ª edição, Prentice-Hall Inc., 1996.
- ✓ D. Jiles em “Introduction to Magnetism and Magnetic Materials”, 1ª edição, Editora Chapman & Hall, reimpressão 1994.
- ✓ B. D. Cullity em “Introduction to Magnetic Materials”, Editora Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1972.
- ✓ R. N. Faria e L. F. C. P Lima em “Introdução ao Magnetismo dos Materiais”, Editora Livraria da Física, 2005.