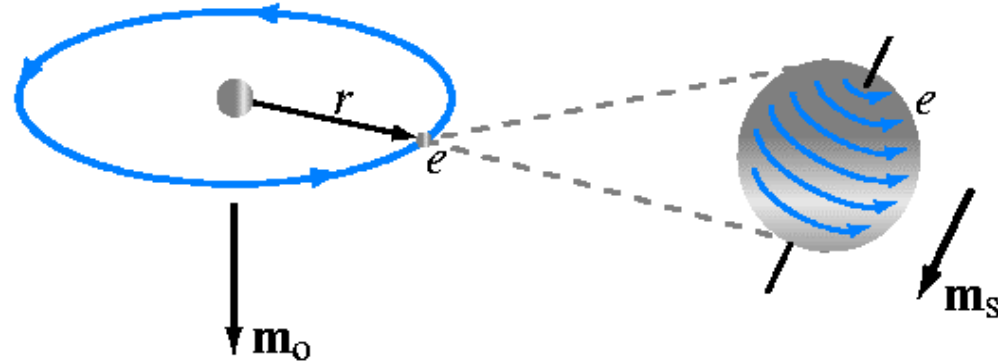


# Origem Microscópica Propriedades Magnéticas da Matéria

- ▣ Presença de momentos de dipolos magnéticos nos átomos **devido aos elétrons em movimento**



$m_o$  = momento de dipolo magnético orbital

$m_s$  = momento de dipolo de spin

$$[m] = [A \cdot m^2]$$

**Momentos de dipolo são micro-campos magnéticos gerados por cada elétron.**

# Classificação dos Tipos de Propriedades Magnéticas da Matéria quanto á Intensidade

## Fracas

(baixos valores de magnetização)

- Paramagnetismo
- Diamagnetismo
- Antiferromagnetismo

## Fortes

(altos valores de magnetização)

- Ferromagnetismo
- Ferrimagnetismo

# Classificação dos Tipos de Propriedades Magnéticas da Matéria quanto à Interação entre Momentos Magnéticos

## Não interagentes

- Paramagnetismo
- Diamagnetismo

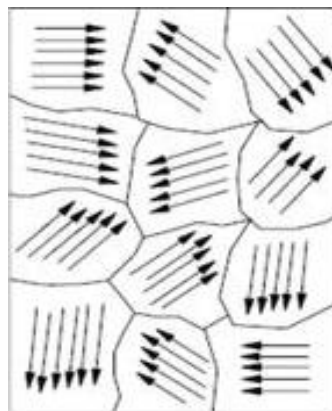
## Interagentes

- Ferromagnetismo
- Ferrimagnetismo
- Antiferromagnetismo

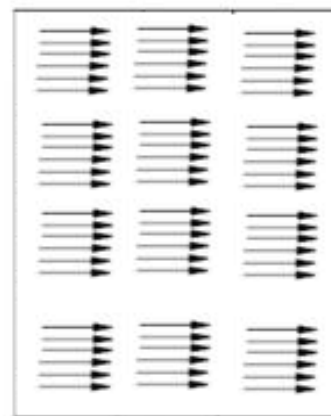
# Comportamento Ferromagnético

- **Magnetização de saturação –  $M_s$** 
  - $M_s$  é o valor máximo possível da magnetização
  - ( todos os momentos estão alinhados na mesma direção)

H=0



H>>0



$M_s =$  densidade de átomos  $\times$   $n^\circ$ . líquido de momentos  $\times \mu_B$

- **Fe  $\rightarrow$  2,22  $\mu_B$     Co  $\rightarrow$  1,72  $\mu_B$     Ni  $\rightarrow$  0,60  $\mu_B$**

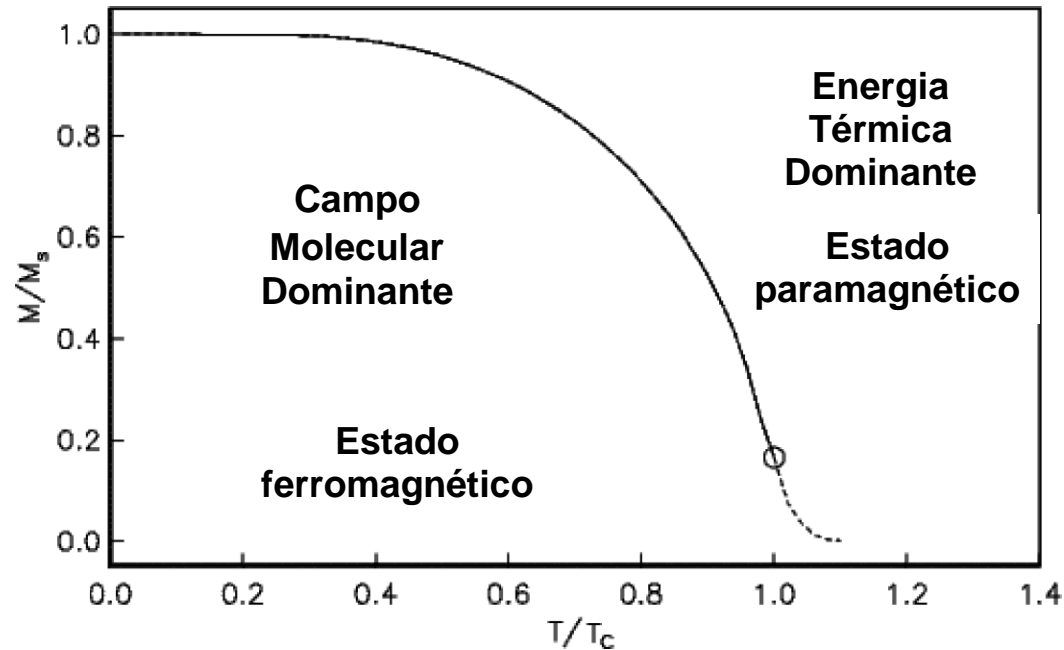
Um **magnéton de Bohr** é o menor valor permitido (não nulo) do momento magnético. É o quantum do momento magnético.

$$1\mu_B = \frac{e h}{4\pi m} = 9,27 \times 10^{-24} \text{ A.m}^2 \text{ (J/T)}$$

# **Materiais Magnéticos Utilizáveis**

**Ferromagnéticos  
e  
Ferrimagnéticos**

# INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO MAGNÉTICO



$$T_c = \frac{N_m \mu_m \mu_0 \lambda}{3k}$$

$N_m$  – no. de dipolos magn./unid.de vol.

$\mu_m$  – momento magnético

$\lambda$  - constante de Weiss

$k$  – constante de Boltzmann

$\mu_0$  – permeabilidade magnética no vácuo

$M_s$  – magnetização de saturação

$T_c$  – Temperatura de Curie

$$T_c^{\text{Fe}} = 768 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_c^{\text{Co}} = 1120 \text{ } ^\circ\text{C}$$

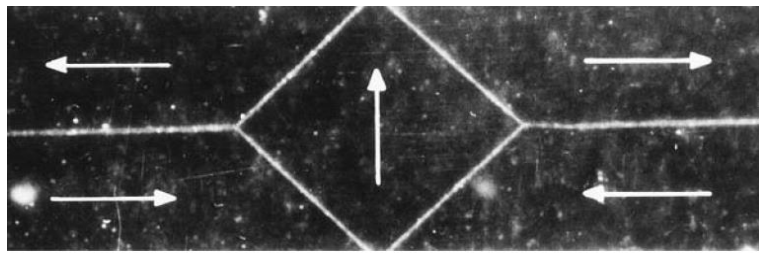
$$T_c^{\text{Ni}} = 335 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_c^{\text{Fe}_3\text{O}_4} = 585 \text{ } ^\circ\text{C}$$

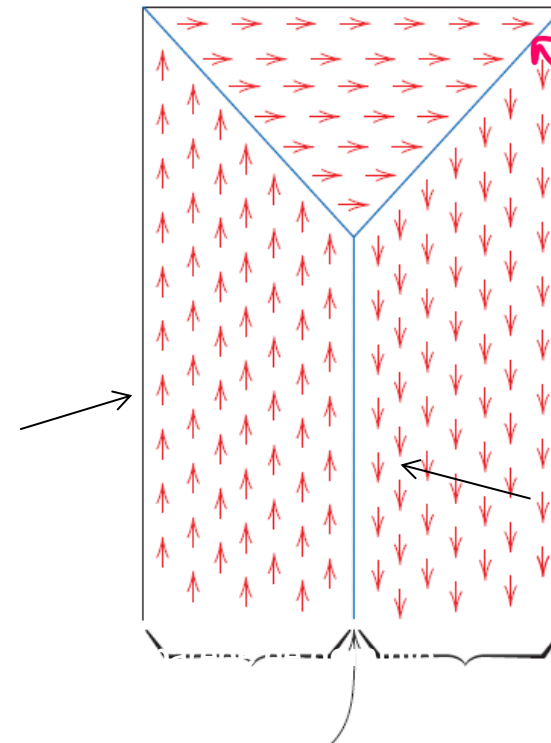
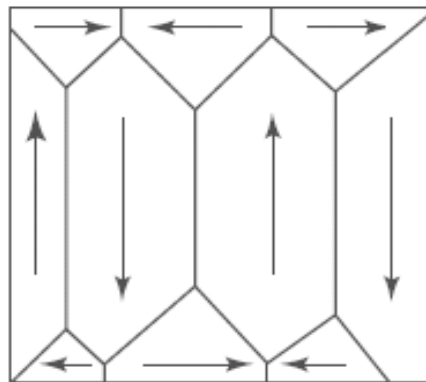
# DOMÍNIOS MAGNÉTICOS

# Porque o ferro, antes de estar sujeito a um campo magnético, não apresenta comportamento magnético forte se tem uma alta magnetização de saturação?

- Domínios: são regiões em que o material ferromagnético (ferri) se subdivide, de forma que dentro de cada domínio a magnetização de saturação é máxima.
- A somatória das magnetizações dos domínio é nula.



H = 0 Fe



A região entre os domínios é chamada de parede de domínio.



# Porque há formação de domínios?

A formação de domínios se dá para que se atinja a situação de menor energia.

O alinhamento total dos momentos magnéticos produz altos campos magnéticos e portanto alta concentração de energia nas imediações do material ( $E = \mu_0 H.M.\cos\theta$ ). A subdivisão reduz esta energia.

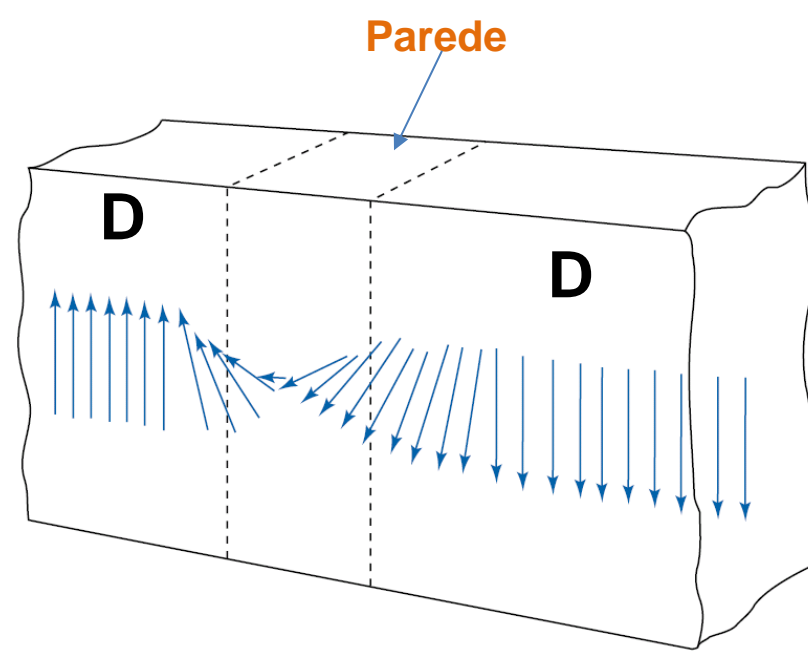
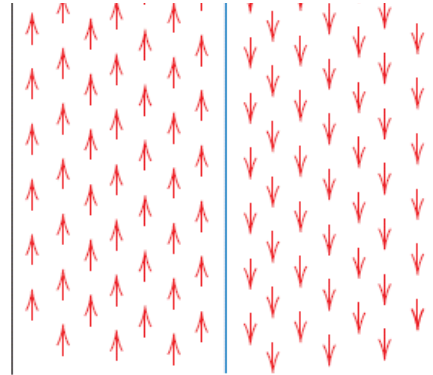
**Quando a divisão em domínios cessa?**

Energia para criar as paredes entre os domínios (desalinhar os momentos)

**É IGUAL A**

Energia externa devido ao alinhamento dos momentos

# Parede de domínio



**Momento magnético: módulo constante, muda a direção (rotação)**

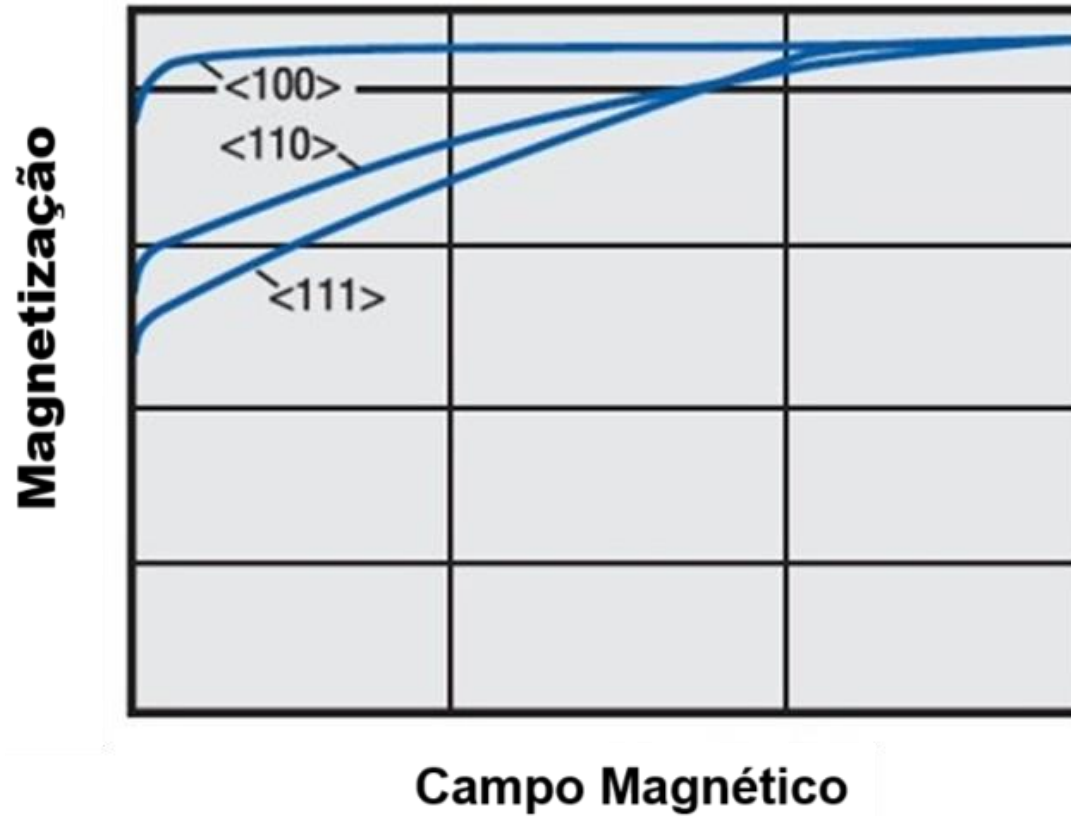
**Desalinhamento é causado por uma competição entre a energia de troca ( $\uparrow\uparrow$ ) e a energia de anisotropia magnetocristalina (que falaremos à frente).**

**Baixa anisotropia: paredes largas  $\sim 10 \mu\text{m}$**

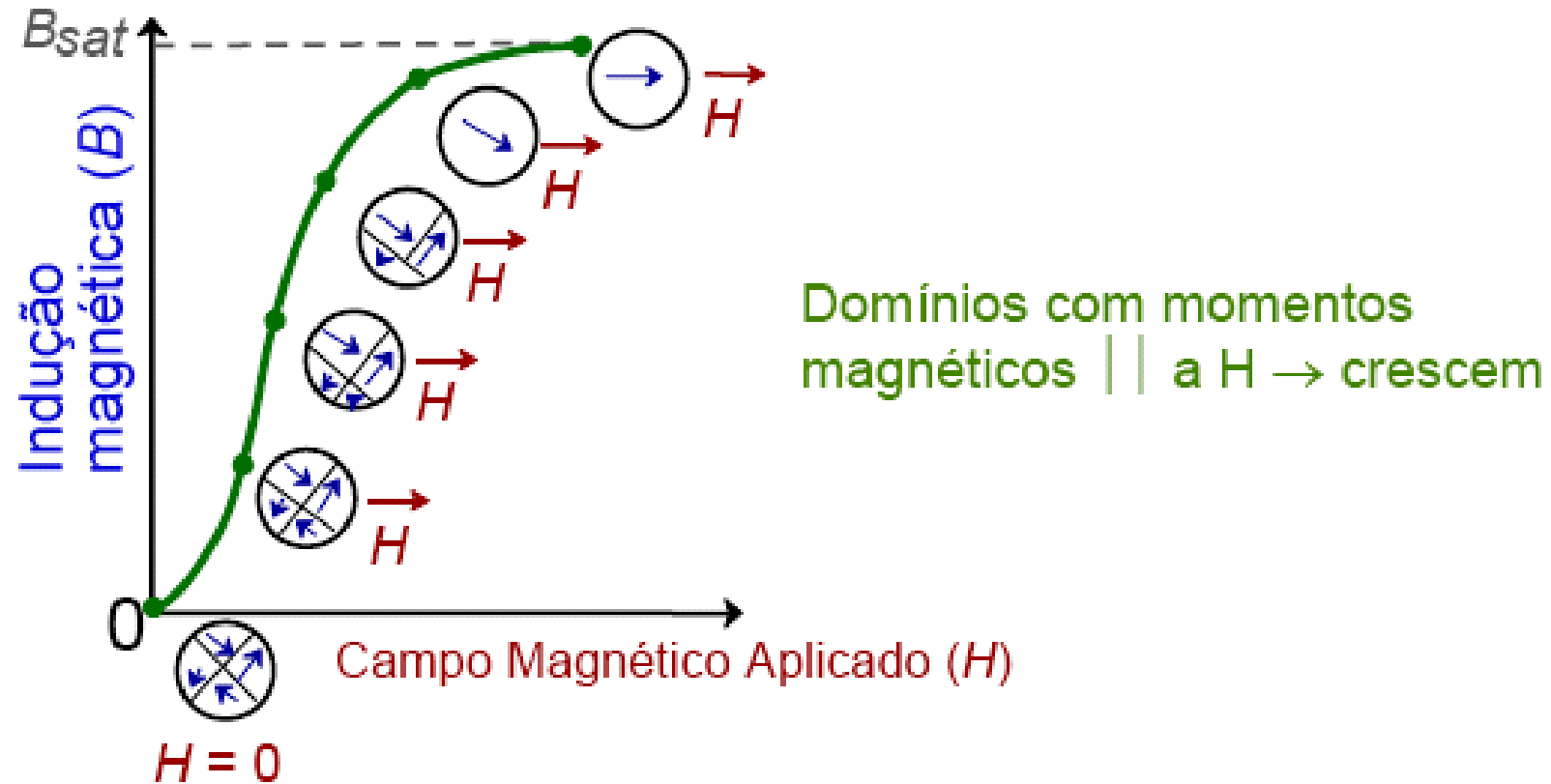
**Alta anisotropia: parede estreita  $\sim 0,3 \mu\text{m}$**

# Anisotropia Magnetocristalina

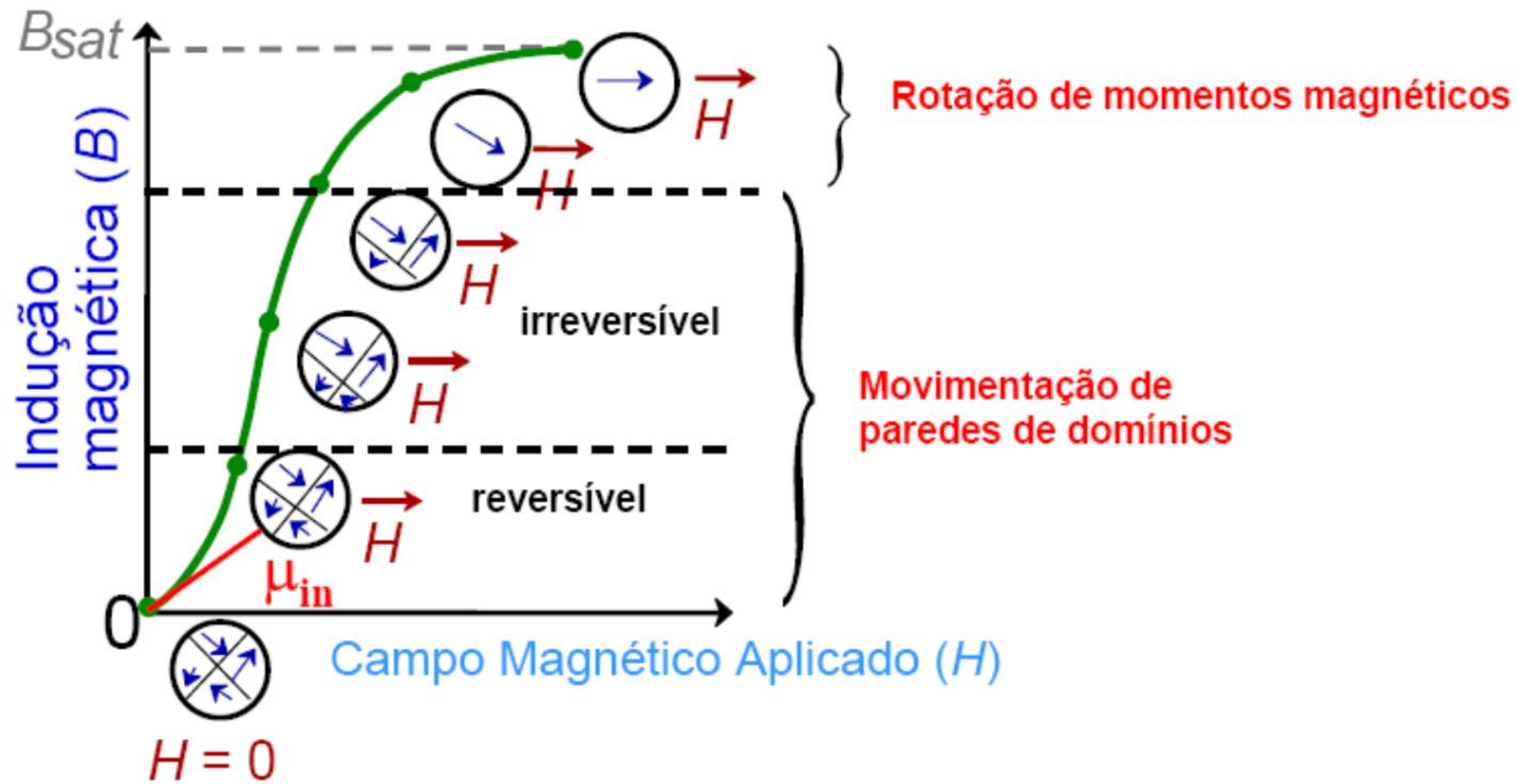
Fe puro



# Evolução dos domínios - Magnetização Inicial



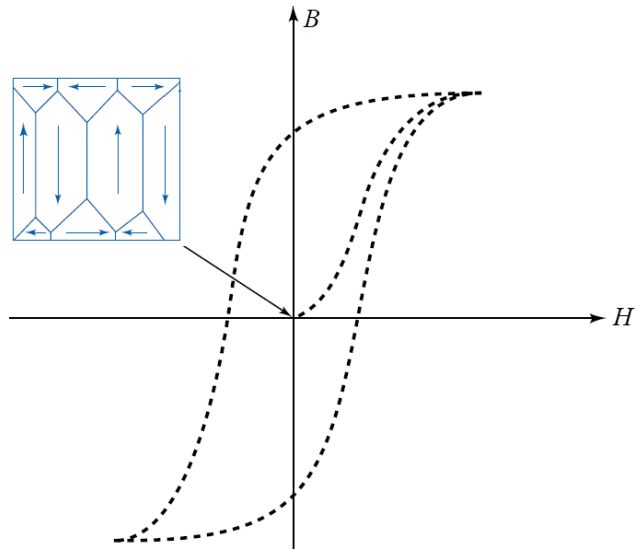
Domínios com momentos magnéticos desalinhados com H → diminuem.



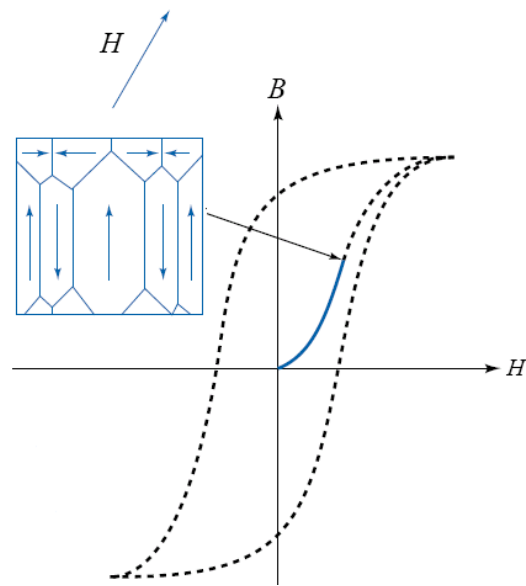
Permeabilidade Inicial  $\frac{dB}{dH} \Big|_{H=0} = \mu_{in} \longrightarrow$  Propriedade intrínseca do material

# HISTERESE

DEVIDO À IRREVERSIBILIDADE NA VOLTA DOS  
MOMENTOS MAGNÉTICOS À POSIÇÃO INICIAL

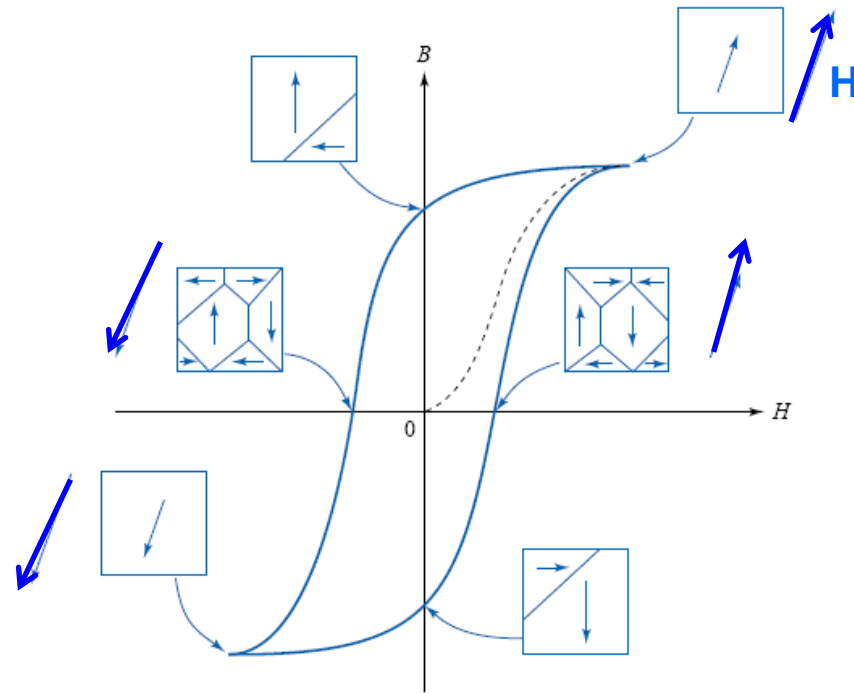


$M=0, H=0$



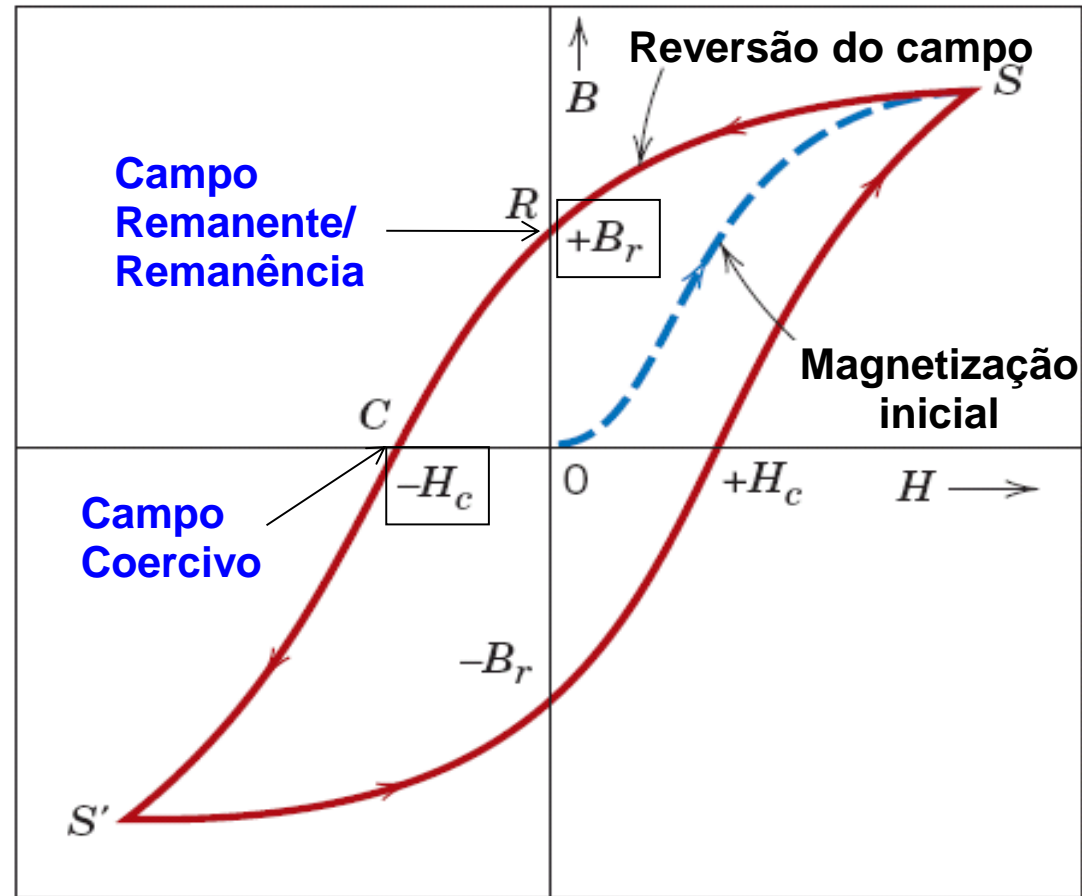
Magnetização inicial

Reversão do campo:  
a partir da saturação

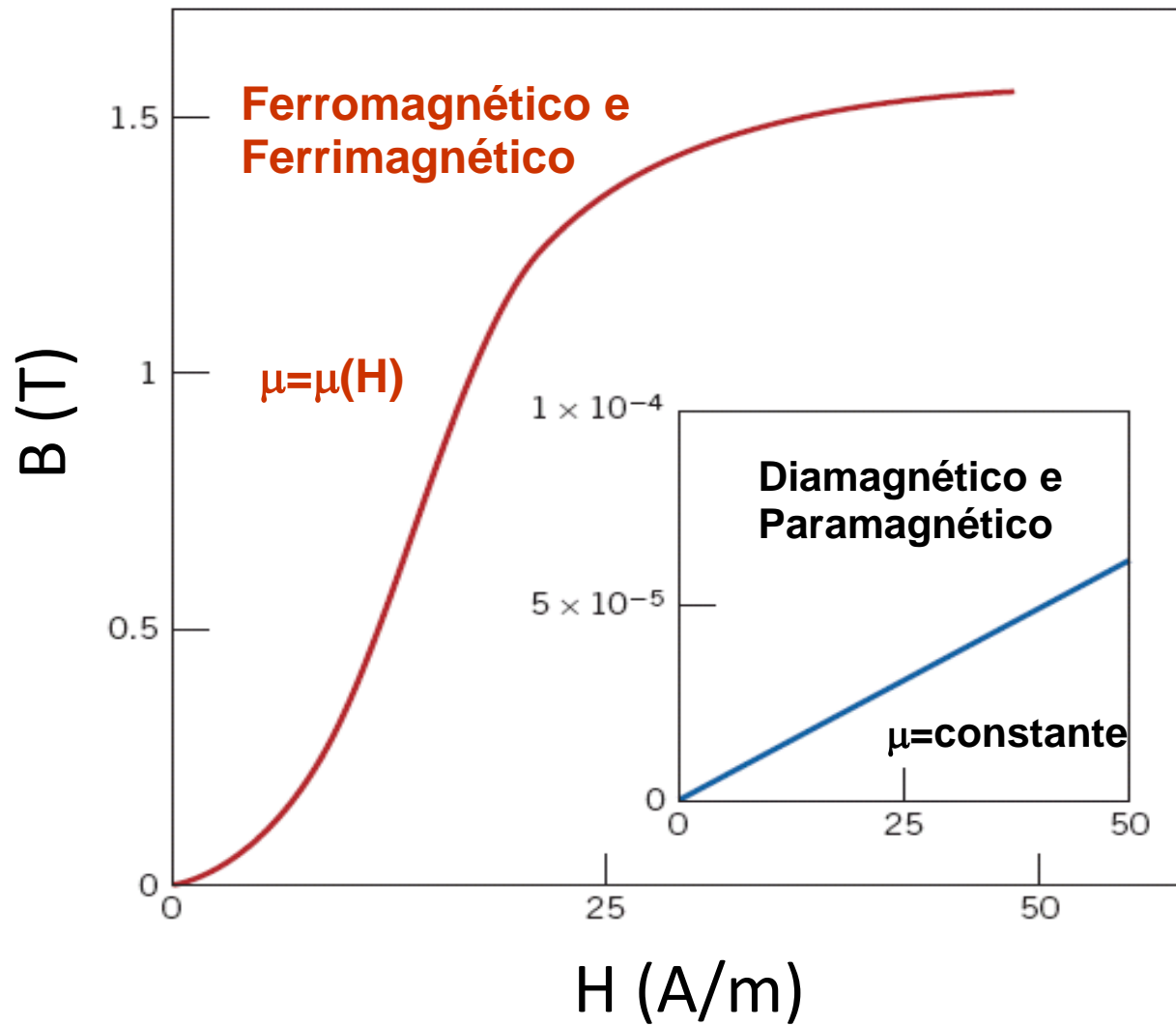


Histerese

# Parâmetros da Histerese







$$\frac{dB}{dH} = \mu$$

A blue ribbon graphic with a folded end on the left side, containing the text "DUREZA MAGNÉTICA" in white, bold, uppercase letters.

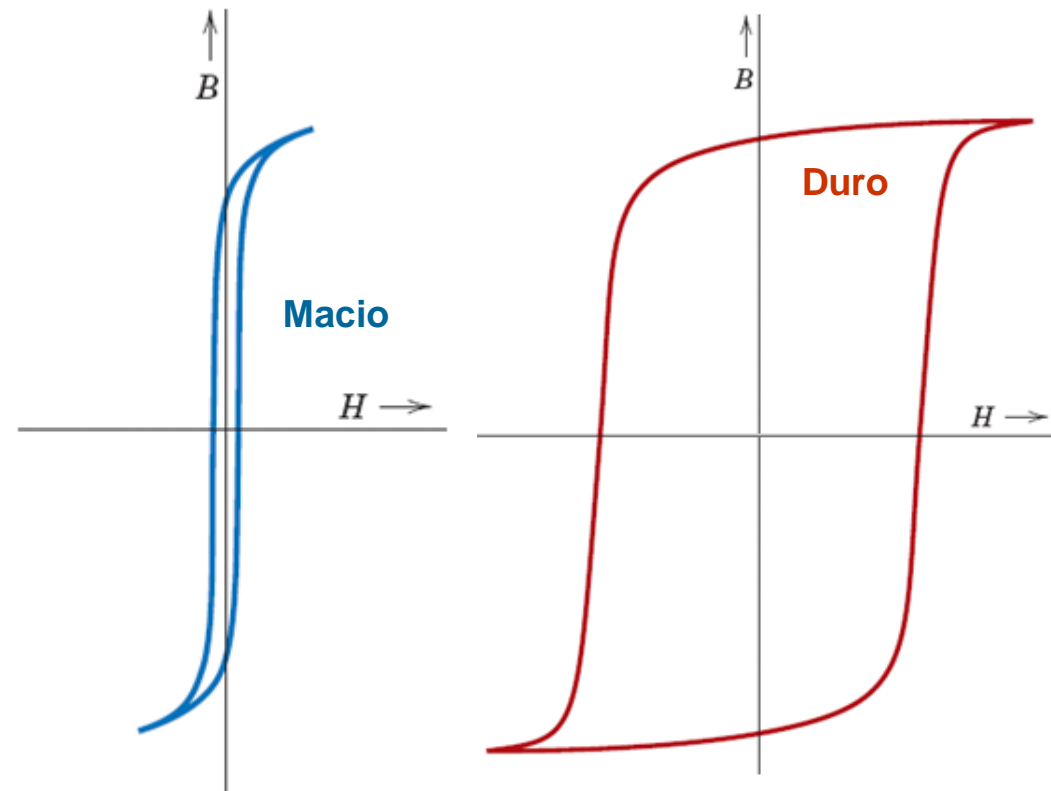
**DUREZA MAGNÉTICA**

# Classificação de Materiais Magnéticos

A forma e o tamanho da curva de histerese são importantes em aplicações práticas de materiais.

A área interior ao laço de histerese representa a perda de energia magnética por unidade de volume do material no processo em cada ciclo de magnetização/desmagnetização.

Esta perda de energia se manifesta através do aquecimento do material e é capaz de aumentar a temperatura do mesmo.



# Materiais Magnéticos Macios (Doces)

São usados em campos magnéticos alternados → perda de energia baixa (núcleos de transformadores)



- Saturação em campos baixos (facilmente magnetizado e desmagnetizado) com baixa perda de energia
- Área do laço de histerese pequena → laço estreito e alongado alta permeabilidade ( $\mu$ ) e baixa coercividade (campo coercivo -  $H_c$ )

Campo magnético externo pequeno

# **Materiais Magnéticos Macios (Doces)**

**Baixos valores de  $H_c$  → fácil movimentação das paredes de domínios com mudança de intensidade e direção do campo magnético.**

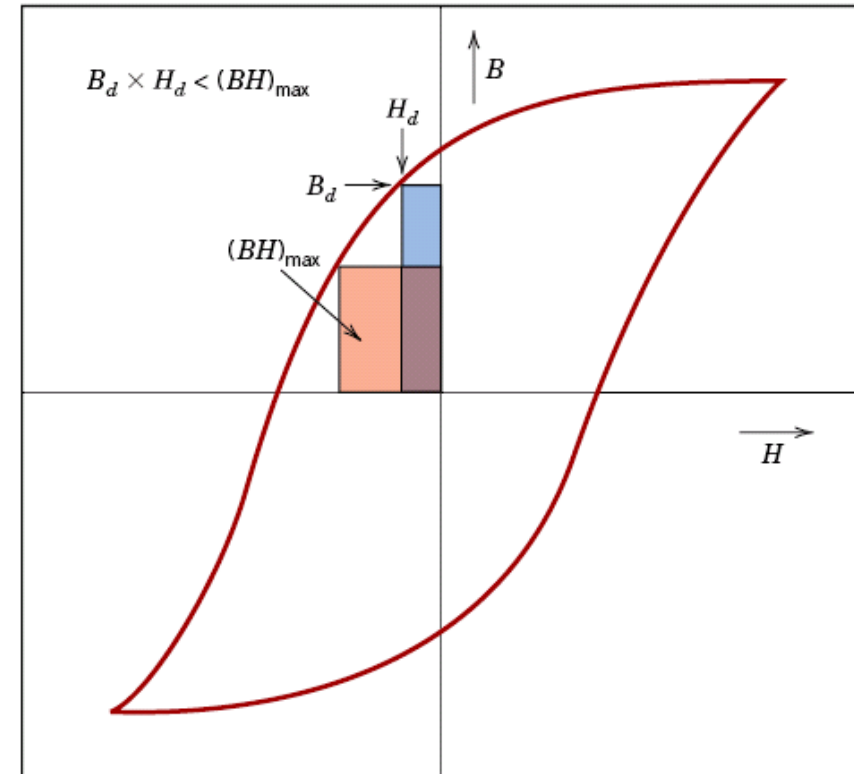
**Defeitos estruturais (discordâncias, vazios e partículas não magnéticas) → aprisionam as paredes de domínio → aumentam  $H_c$ .**

**MATERIAL MAGNETICAMENTE MACIO DEVE SER LIVRE  
DESTE TIPO DE DEFEITOS.**

<b>Material Magnético Macio</b>	$\mu_0 H_c$ (T)	$B_{sat}$ (T)	$B_r$ (T)	$\mu_{ri}$	$\mu_{r max}$	$W_h$ (J/m <sup>3</sup> )	<b>Aplicações típicas</b>
<b>MACIO IDEAL</b>	0	Alto valor	0	Alto valor	Alto valor	0	Núcleos de transformadores, indutores, núcleos de eletroímãs, máquinas elétricas, relês, cabeça de gravação magnética.
<b>Ferro comercial (2% de impurezas)</b>	$< 10^{-4}$	2,2	$< 0,1$	150	$10^4$	250	Altas perdas por corrente parasita. Geralmente usado somente eletroímãs e relês.
<b>Aço elétrico (Fe-2-4%Si)</b>	$< 10^{-4}$	2,0	$< 0,1$	$10^3$	$10^4 - 4 \times 10^5$	30 - 100	Maior resistividade e menor perda por corrente parasita; Transformadores (GO) e máquinas elétricas (GNO)
<b>Supermalloy (79%Ni – 15,5% Fe-5% Mo – 0,5% Mn)</b>	$2 \times 10^{-7}$	0,7 - 0,8	$< 0,1$	$10^5$	$10^6$	$< 0,5$	Alta permeabilidade, Dispositivos que demandem baixas perdas elétricas como: transformadores especiais e amplificadores magnéticos.
<b>Permalloy 78 (78,5%Ni – 21,5% Fe)</b>	$5 \times 10^{-6}$	0,86	$< 0,1$	$8 \times 10^3$	$10^5$	$< 0,1$	Dispositivos que demandem baixas perdas elétricas, transformadores de áudio, transformadores de radio frequência, cabeças de gravação, filtros
<b>Ligas amorfas Fe-Si-B</b>	$2 \times 10^{-6}$	1,6	$< 10^{-6}$	-	$10^5$	20	Núcleos de transformadores de baixa perda
<b>Ferritas (Mn-Zn)</b>	$10^{-5}$	0,4	$< 0,01$	$2 \times 10^3$	$5 \times 10^3$	$< 0,01$	Aplicações em alta frequência, (correntes parasitas $\sim 0$ ), núcleos E e U, indutores.
<b>Ligas Fe-Co</b>	$10^{-5}$	2,45	$\sim 0,3$	500	800	200	Motores de alta performance - Aviões

# Materiais Magnéticos Duros

- Alto valor de remanência ( $M_r$ ,  $B_r$ ),
- Alta coercividade ( $H_c$ ),
- Alta magnetização de saturação ( $M_s$ )  
(desejável)
- Baixa permeabilidade inicial ( $\mu_i$ ),
- Alta energia histerética  $(BH)_{\max}$  em  $\text{kJ/m}^3$ .



# Materiais Magnéticos Duros

O comportamento histerético está relacionado à dificuldade de se movimentar as paredes de domínio.

Impedindo-se a movimentação das paredes →  
↑ coercividade ( $H_c$ ) e ↓ susceptibilidade inicial ( $\chi_i, \mu_{pi}$ )



Altos valores de campo para desmagnetizar o material



# Materiais Magnéticos Duros – São os ímãs permanentes

<i>Material Magnético</i>	<i>Composição</i>	$B_r$ (T)	$\mu_0 H_c$ (T) (A/m)	$(BH)_{max}$ (kJ/m <sup>3</sup> )	$T_C$ (°C)	<i>Resistividade</i> ( $\Omega m$ )
<i>Aço ao tungstênio</i>	92,8Fe, 6W, 0,5Cr, 0,7 C	0,95	$7,4 \times 10^{-3}$ 5900	2,6	760	$3,0 \times 10^{-7}$
<i>Cunife</i>	20Fe, 20 Ni, 60 Cu	0,54	$5,5 \times 10^{-2}$ 44.000	12	410	$1,8 \times 10^{-7}$
<i>Alnico 8 (sinterizado)</i>	34 Fe, 7 Al, 15 Ni, 35 Co, 4 Cu, 5 Ti	0,76	0,16 125.000	36	860	-
<i>Ferrita 3 (sinterizada)</i>	BaO-6Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,32	0,30 240.000	20	450	$\sim 10^4$
<i>Cobalto + terra rara 1</i>	SmCo <sub>5</sub>	0,92	0,90 720.000	170	725	$5,0 \times 10^{-7}$
<i>Neodímio-ferro-boro (sinterizado)</i>	Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	1,16	1,07 848.000	255	310	$1,6 \times 10^{-6}$

<b>Material Magnético Macio</b>	$\mu_0 H_c$ (T)
<b>MACIO IDEAL</b>	0
<b>Ferro comercial (2% de impurezas)</b>	$< 10^{-4}$
<b>Aço elétrico (Fe-2-4%Si)</b>	$< 10^{-4}$
<b>Supermalloy (79%Ni – 15,5% Fe-5% Mo – 0,5% Mn)</b>	$2 \times 10^{-7}$
<b>Permalloy 78 (78,5%Ni – 21,5% Fe)</b>	$5 \times 10^{-6}$
<b>Ligas amorfas Fe-Si-B</b>	$2 \times 10^{-6}$
<b>Ferritas (Mn-Zn)</b>	$10^{-5}$

<b>Material Magnético</b>	$\mu_0 H_c$ (T)
<i>Aço ao tungstênio</i>	$7,4 \times 10^{-3}$
<i>Cunife</i>	$5,5 \times 10^{-2}$
<i>Alnico 8 (sinterizado)</i>	0,16
<i>Ferrita 3 (sinterizada)</i>	0,30
<i>Cobalto + terra rara 1</i>	0,90
<i>Neodímio-ferro-boro (sinterizado)</i>	1,07

<b>Material Magnético Macio</b>	<b><math>B_r</math> (T)</b>
<b>MACIO IDEAL</b>	<b>0</b>
<b>Ferro comercial (2% de impurezas)</b>	<b>&lt; 0,1</b>
<b>Aço elétrico (Fe-2-4%Si)</b>	<b>&lt; 0,1</b>
<b>Supermalloy (79%Ni – 15,5% Fe-5% Mo – 0,5% Mn)</b>	<b>&lt; 0,1</b>
<b>Permalloy 78 (78,5%Ni – 21,5% Fe)</b>	<b>&lt; 0,1</b>
<b>Ligas amorfas Fe-Si-B</b>	<b>&lt; 10<sup>-6</sup></b>
<b>Ferritas (Mn-Zn)</b>	<b>&lt; 0,01</b>

<b><i>Material Magnético</i></b>	<b><i><math>B_r</math> (T)</i></b>
<b><i>Aço ao tungstênio</i></b>	<b>0,95</b>
<b><i>Cunife</i></b>	<b>0,54</b>
<b><i>Alnico 8 (sinterizado)</i></b>	<b>0,76</b>
<b><i>Ferrita 3 (sinterizada)</i></b>	<b>0,32</b>
<b><i>Cobalto + terra rara 1</i></b>	<b>0,92</b>
<b><i>Neodímio-ferro-boro (sinterizado)</i></b>	<b>1,16</b>