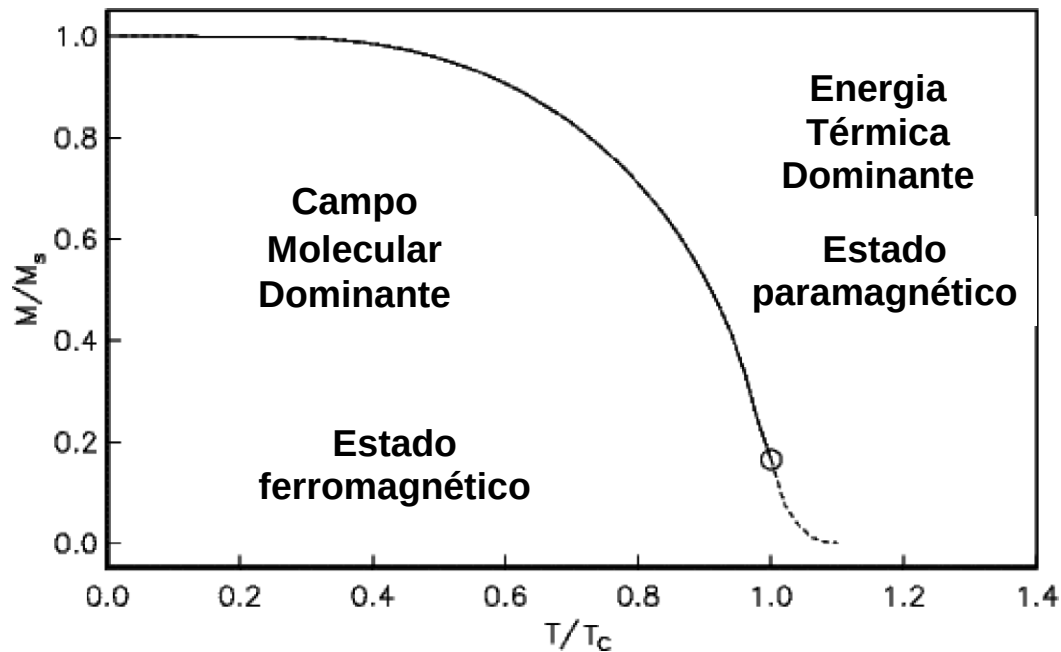


Materiais Magnéticos Utilizáveis

**Ferromagnéticos
e
Ferrimagnéticos**

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO MAGNÉTICO



M_s – magnetização de saturação

T_c – Temperatura de Curie

$T_c^{\text{Fe}} = 768 \text{ }^\circ\text{C}$
 $T_c^{\text{Co}} = 1120 \text{ }^\circ\text{C}$
 $T_c^{\text{Ni}} = 335 \text{ }^\circ\text{C}$

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

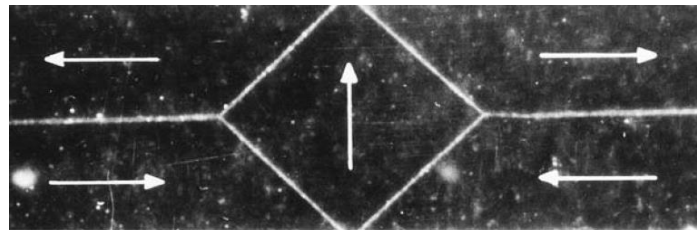
N_m – no. de dipolos magn./unid.de vol.
 μ_m – momento magnético
 λ - constante de Weiss
 k – constante de Boltzmann
 μ_0 – permeabilidade magnética no vácuo

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

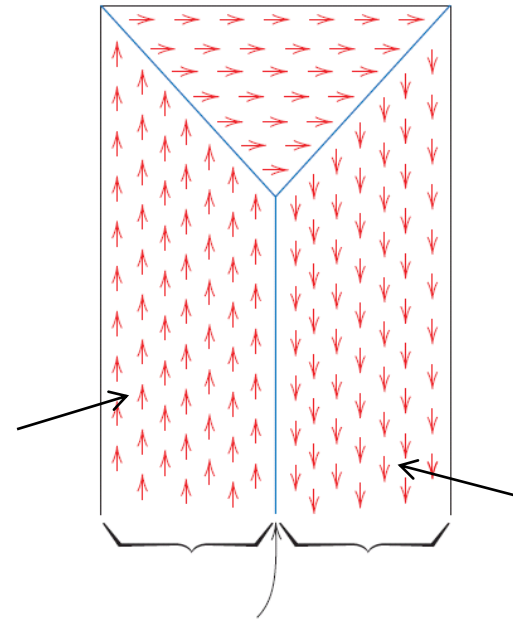
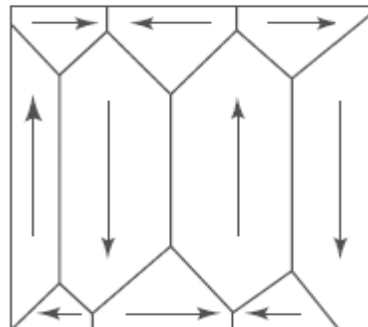
DOMÍNIOS MAGNÉTICOS

Porque o ferro, antes de estar sujeito a um campo magnético, não apresenta magnetismo?

- 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



Porque há formação de domínios?

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

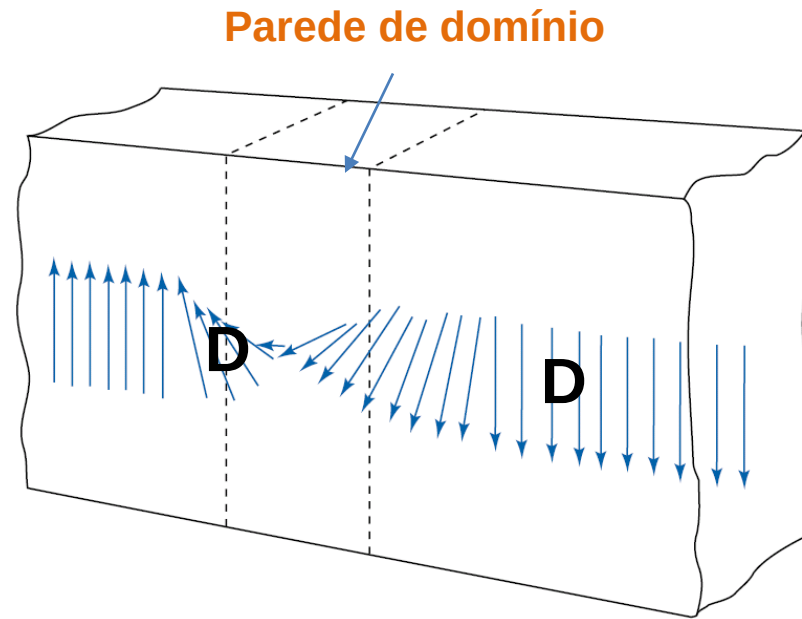
O alinhamento total dos momentos magnéticos produz altos campos magnéticos e portanto alta concentração de energia nas imediações do material. A subdivisão reduz esta energia.

Quando a divisão em domínios cessa?

Energia para criar as paredes entre os domínios

É IGUAL A

Energia externa devido ao alinhamento dos momentos



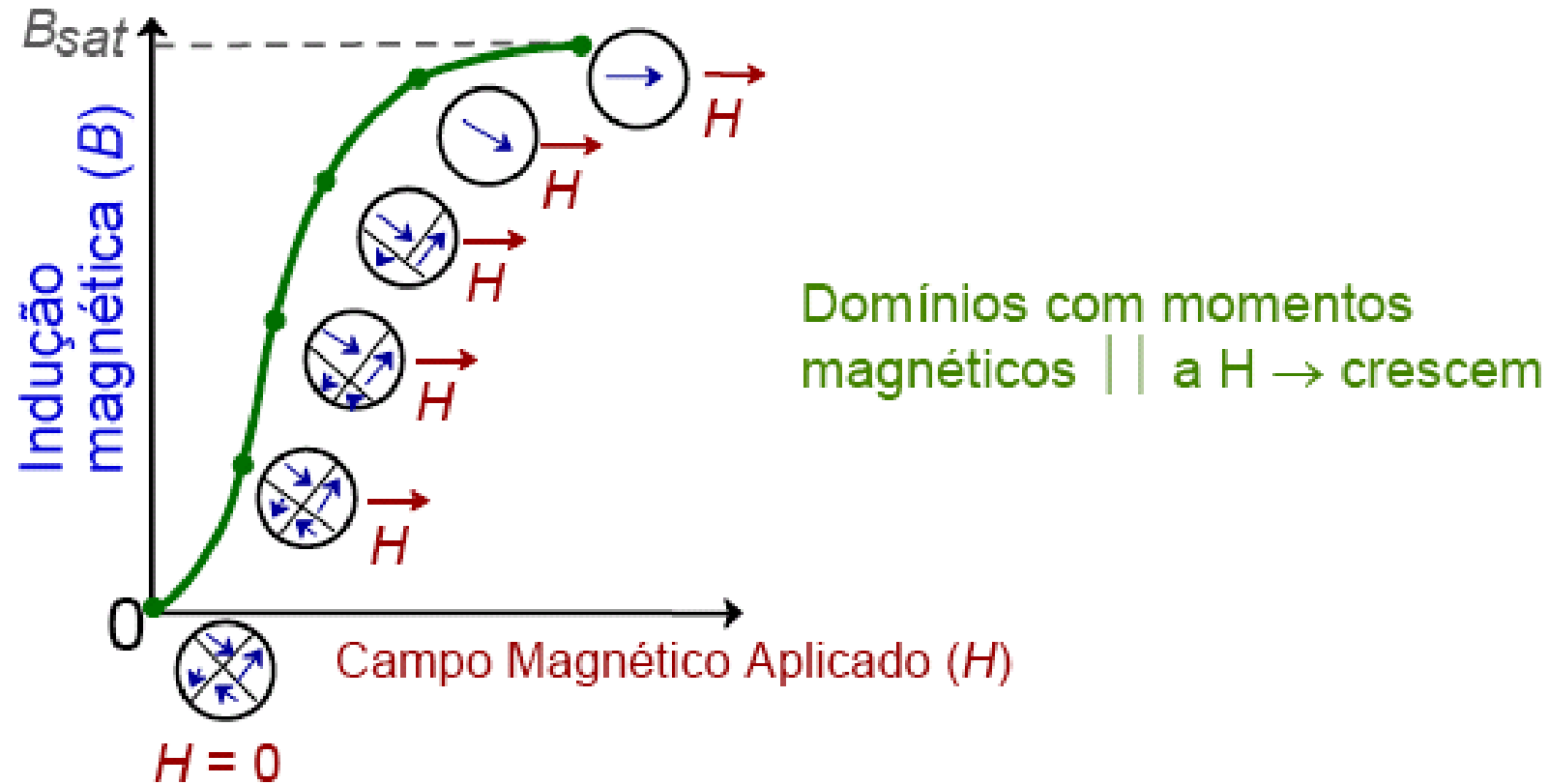
Momento magnético: módulo constante, muda a direção (rotação)

Desalinhamento é causado por uma competição entre a energia de troca (J) e a energia de anisotropia magnetocristalina.

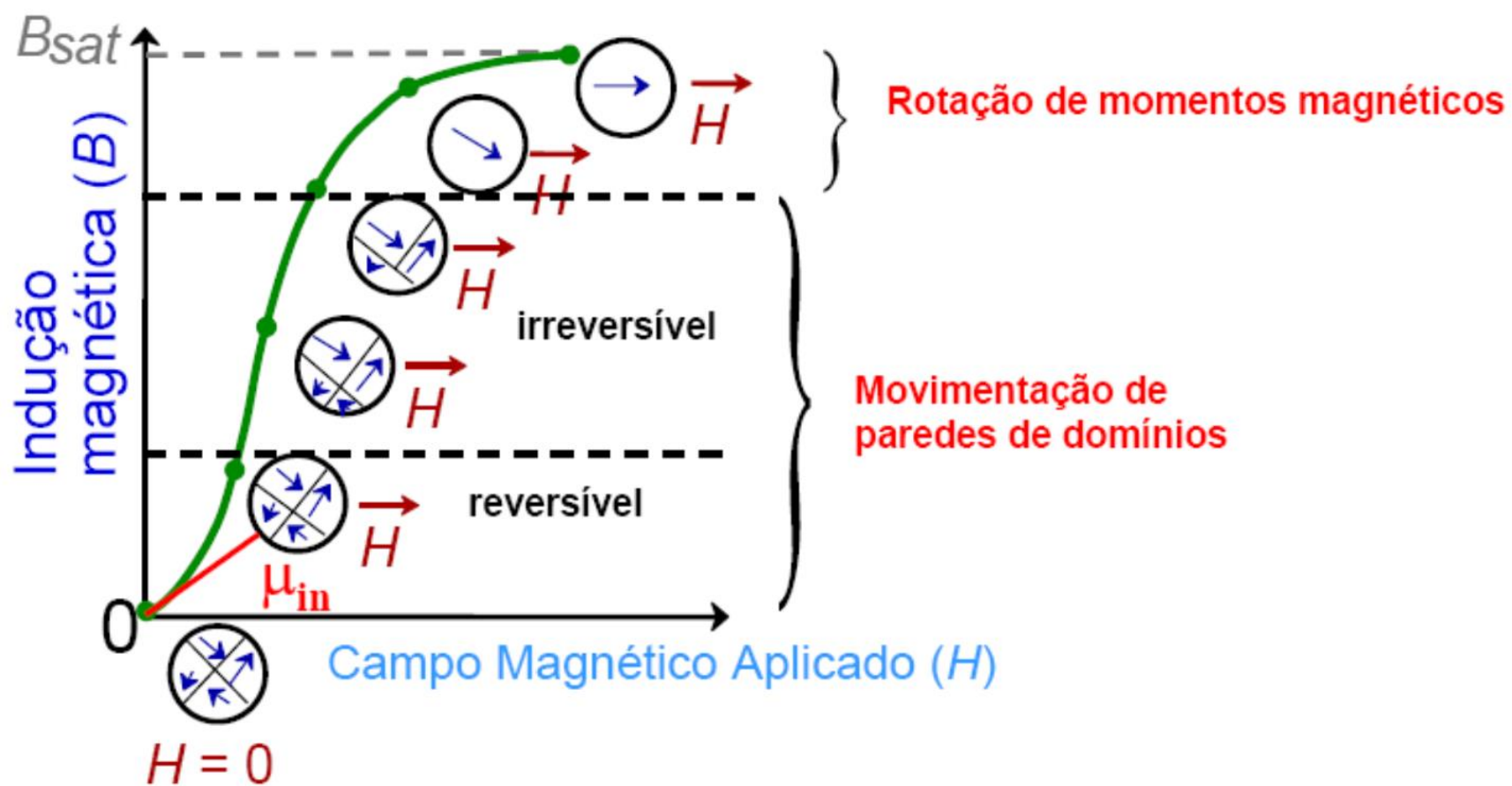
Baixa anisotropia: paredes largas $\sim 10 \mu\text{m}$

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

Evolução dos domínios - Magnetização Inicial



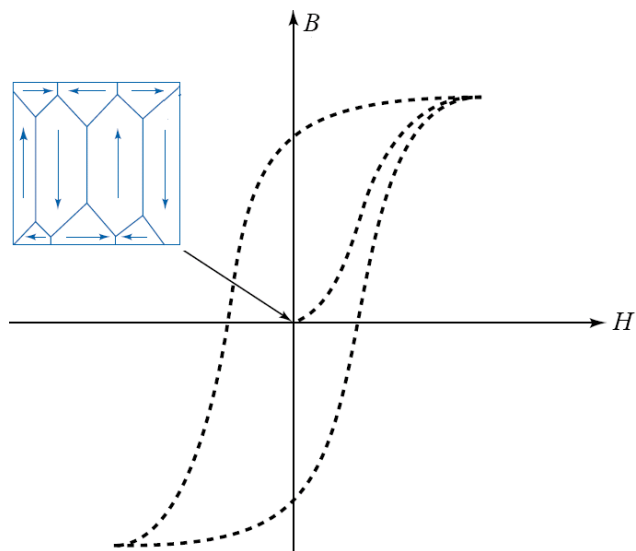
Domínios com momentos magnéticos desalinhados com $H \rightarrow$ diminuem.



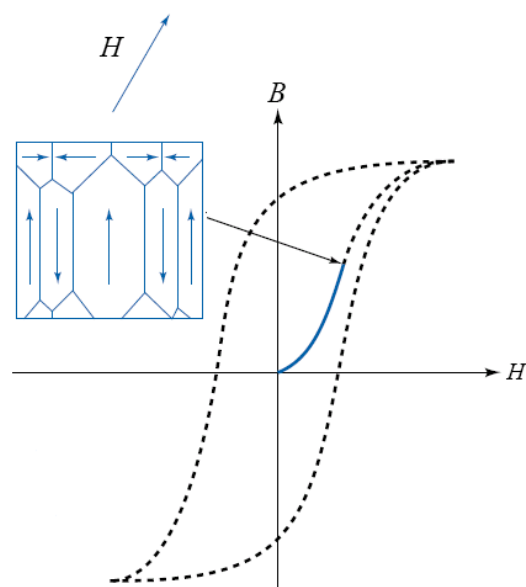
Permeabilidade inicial $\frac{dB}{dH} \Big|_{H=0} = \mu_{in} \longrightarrow$ Propriedade intrínseca do material



HISTERESE

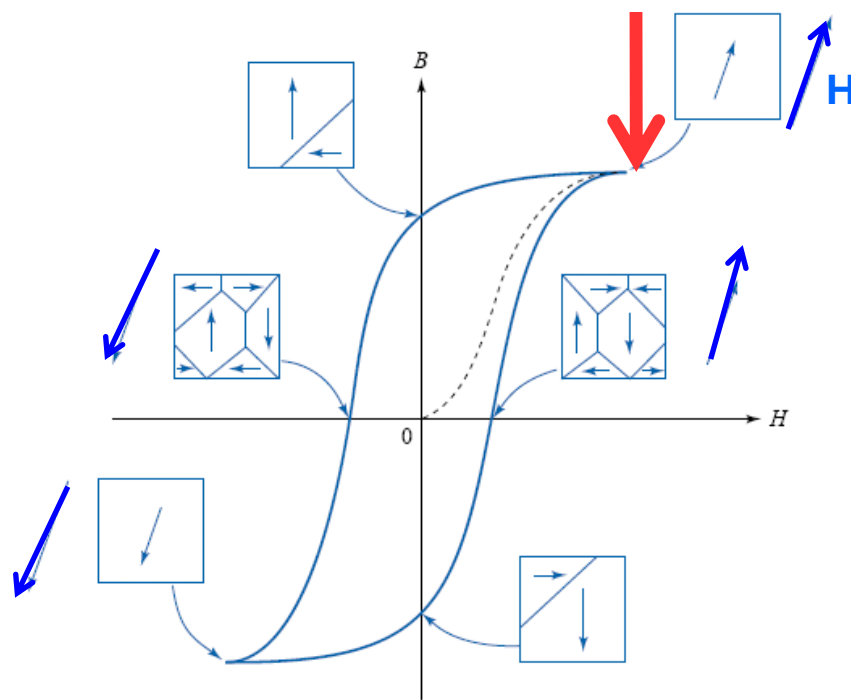


$M=0, H=0$

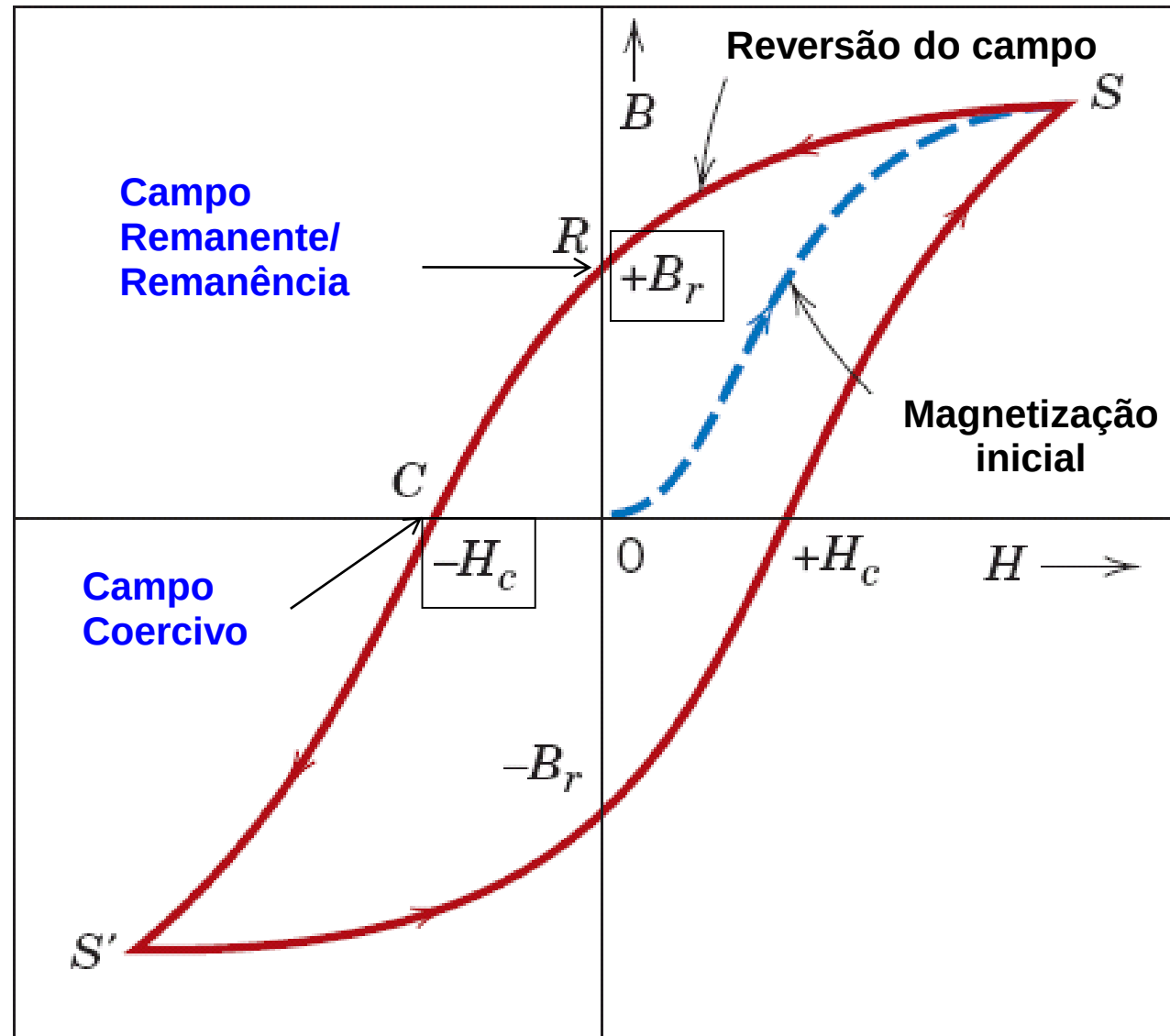


Magnetização inicial

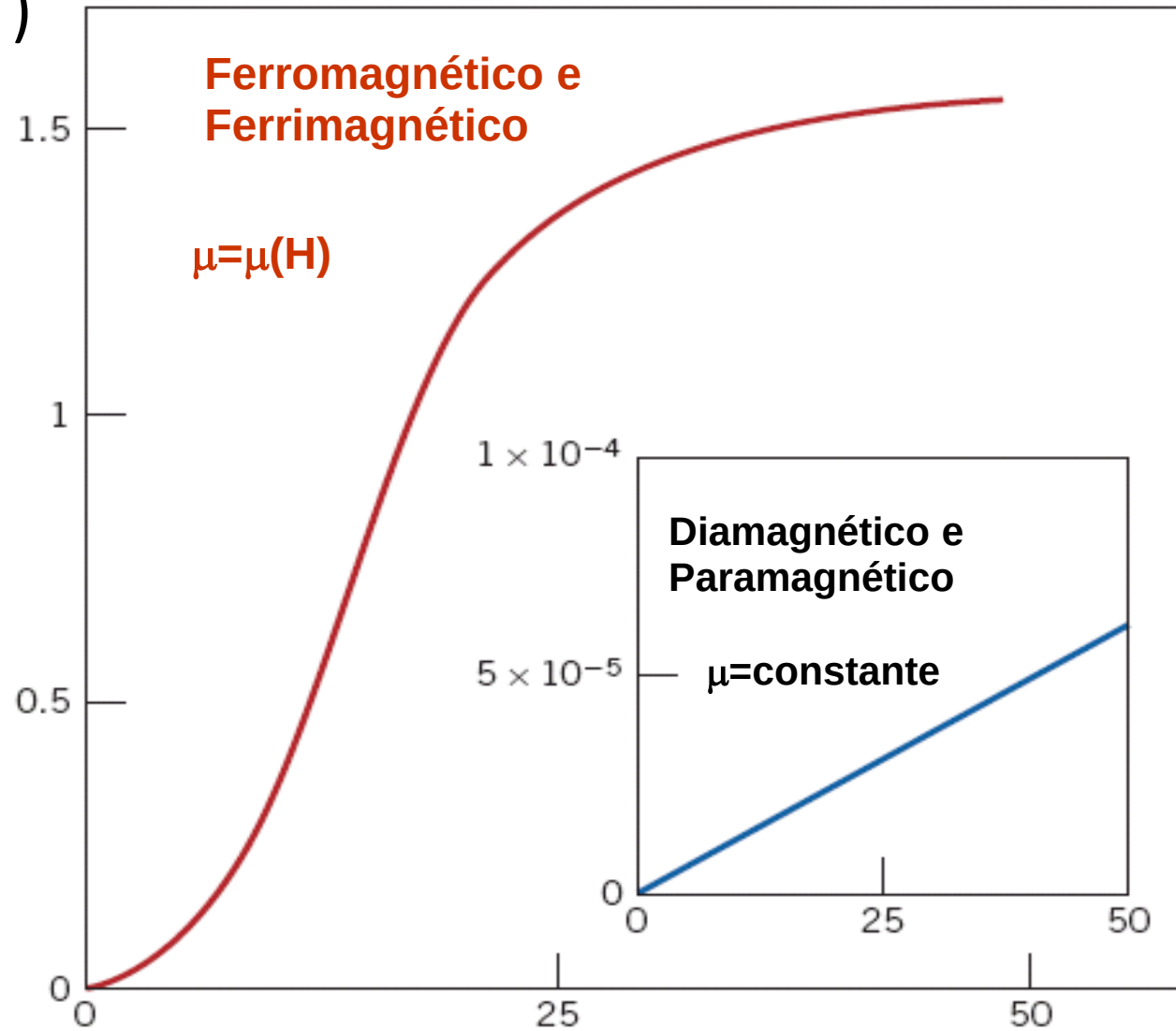
Reversão do campo:
a partir da saturação



Histerese



B (T)



H (A/m)

A blue ribbon graphic with a 3D effect, featuring a dark blue shadow on the left side. The ribbon is horizontal and slightly folded at the ends.

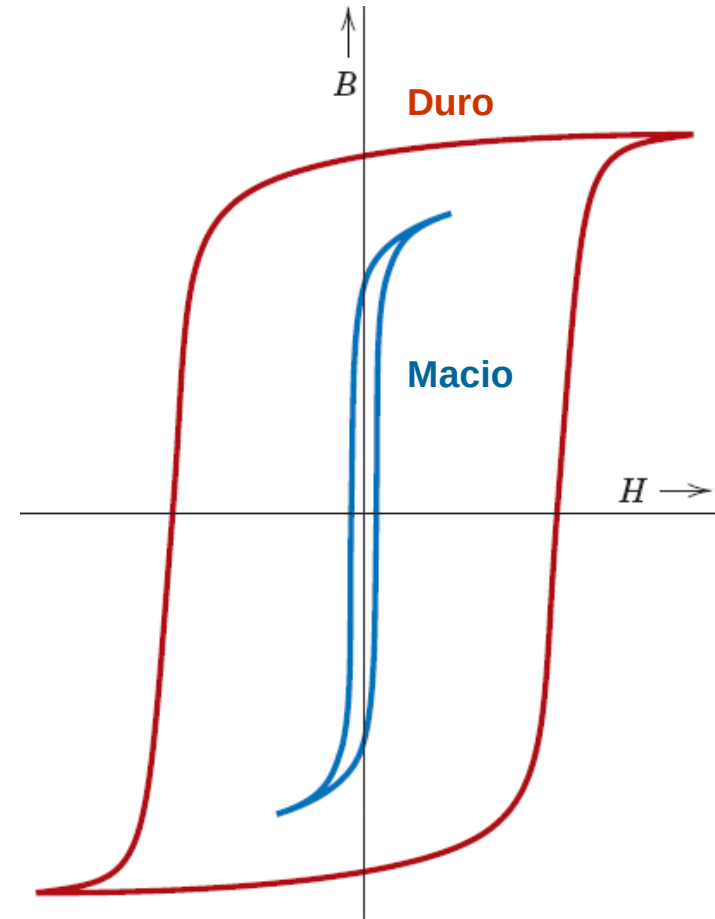
DUREZA MAGNÉTICA

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.

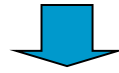
Esta perda de energia se manifesta através do aquecimento do material e é capaz de aumentar a temperatura do mesmo.



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 (μ) e baixa coercividade (campo coercivo - H_c)

Materiais Magnéticos Macios (Doces)

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

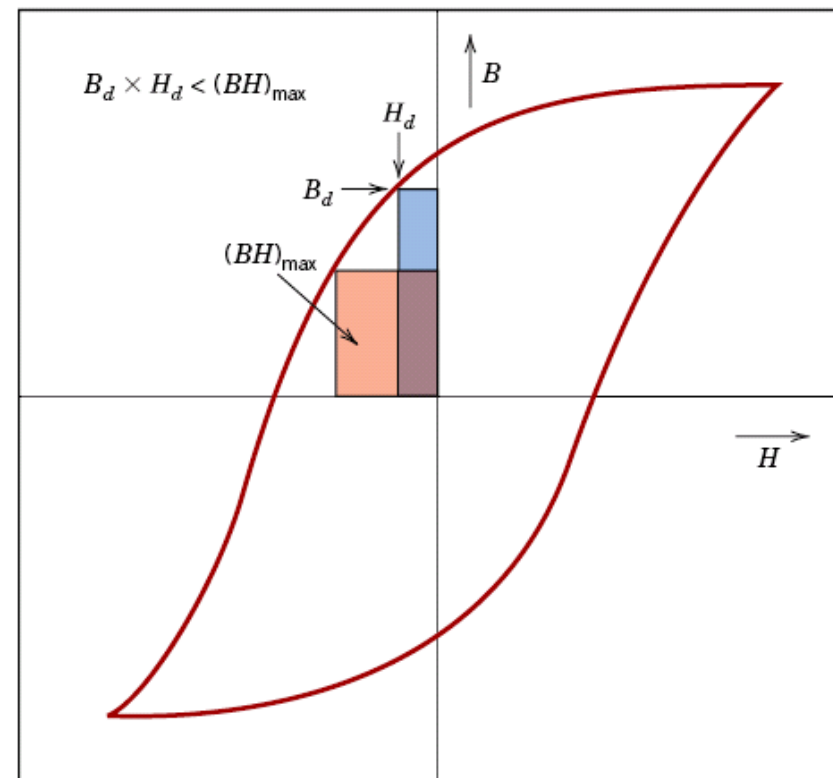
Defeitos estruturais (discordâncias, vazios e partículas não magnéticas) → aprisionam as paredes de domínio → aumentam H_c .

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

Material Magnético Macio	$\mu_0 H_c$ (T)	B_{sat} (T)	B_r (T)	μ_{ri}	$\mu_{r\ max}$	W_h (J/m ³)	Aplicações típicas
MACIO IDEAL	0	Alto valor	0	Alto valor	Alto valor	0	Núcleos de transformadores, indutores, núcleos de eletroímãs, máquinas elétricas, relês, cabeça de gravação magnética.
Ferro comercial (2% de impurezas)	$< 10^{-4}$	2,2	$< 0,1$	150	10^4	250	Altas perdas por corrente parasita. Geralmente usado somente eletroímãs e relês.
Aço elétrico (Fe-2-4%Si)	$< 10^{-4}$	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)
Supermalloy (79%Ni – 15,5% Fe-5% Mo – 0,5% Mn)	2×10^{-7}	0,7 - 0,8	$< 0,1$	10^5	10^6	$< 0,5$	Alta permeabilidade, Dispositivos que demandem baixas perdas elétricas como: transformadores especiais e amplificadores magnéticos.
Permalloy 78 (78,5%Ni – 21,5% Fe)	5×10^{-6}	0,86	$< 0,1$	8×10^3	10^5	$< 0,1$	Dispositivos que demandem baixas perdas elétricas, transformadores de áudio, transformadores de radio frequência, cabeças de gravação, filtros
Ligas amorfas Fe-Si-B	2×10^{-6}	1,6	$< 10^{-6}$	-	10^5	20	Núcleos de transformadores de baixa perda
Ferritas (Mn-Zn)	10^{-5}	0,4	$< 0,01$	2×10^3	5×10^3	$< 0,01$	Aplicações em alta frequência, (correntes parasitas ~ 0), núcleos E e U, indutores.
Ligas Fe-Co							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 (μ_i),
- Alta perda de energia histerética $(BH)_{\max}$ em 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 (χ_i, μ_{pi})



Altos valores de campo para desmagnetizar o material

Materiais Magnéticos Duros

Material Magnético	Composição	B_r (T)	$\mu_0 H_c$ (T) (A/m)	$(BH)_{max}$ (kJ/m³)	T_C (°C)	Resistividade (Ωm)
Aço ao tungstênio	92,8Fe, 6W, 0,5Cr, 0,7 C	0,95	$7,4 \times 10^{-3}$ 5900	2,6	760	$3,0 \times 10^{-7}$
Cunife	20Fe, 20 Ni, 60 Cu	0,54	$5,5 \times 10^{-2}$ 44.000	12	410	$1,8 \times 10^{-7}$
Alnico 8 (sinterizado)	34 Fe, 7 Al, 15 Ni, 35 Co, 4 Cu, 5 Ti	0,76	0,16 125.000	36	860	-
Ferrita 3 (sinterizada)	BaO-6Fe ₂ O ₃	0,32	0,30 240.000	20	450	$\sim 10^4$
Cobalto + terra rara 1	SmCo ₅	0,92	0,90 720.000	170	725	$5,0 \times 10^{-7}$
Neodímio-ferro- boro (sinterizado)	Nd ₂ Fe ₁₄ B	1,16	1,07 848.000	255	310	$1,6 \times 10^{-6}$