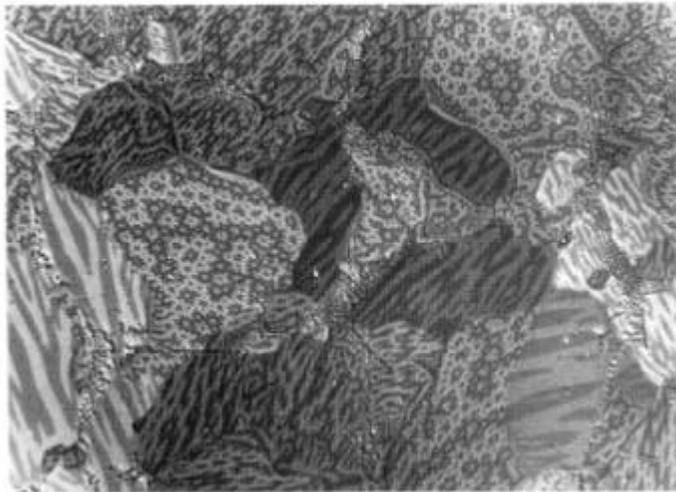


O FERROMAGNETISMO E O PROCESSO DE MAGNETIZAÇÃO



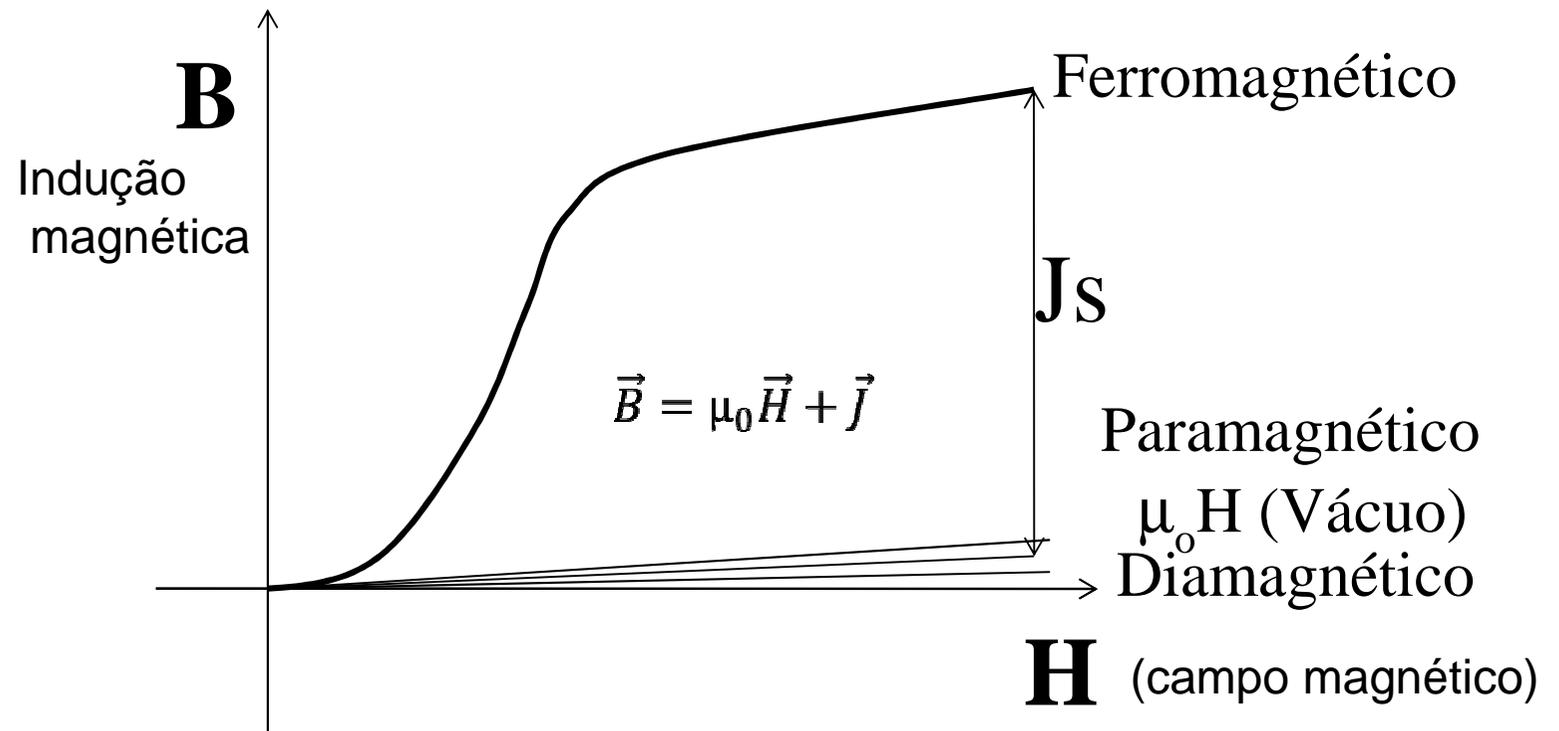
*Tópico 8 de PMT 3200
preparada por
Fernando JG Landgraf
Versão 2007 (rev. 2010,2011)*

Objetivo e programa

- Objetivo: Buscar os fundamentos da relação entre propriedades magnéticas e microestrutura
- Programa
 - Revisão de magnetismo
 - As cinco energias magnéticas
 - Domínios e magnetização
 - Perdas magnéticas em aços
 - Ímãs

Curvas de magnetização

- Curva de Magnetização de materiais



1873 - Rowland

A quantificação do magnetismo

Todos os materiais reagem a exposição a um campo magnético

–Alguns são muito atraídos pelo campo de uma bobina: **os ferromagnéticos**

–Alguns são fracamente atraídos: **paramagnéticos**

–Alguns são fracamente repelidos: **diamagnéticos**

Origem do ferromagnetismo

- Elétrons girando em torno do núcleo em suas órbitas criam um “momento magnético” m (Am^2)
- Elétrons “girando” em torno de si mesmos (spin) também “criam” momento magnético.
- A soma dos momentos magnéticos de todos os átomos por unidade de volume é a magnetização M

$$M = \Sigma m / V \text{ (Am}^2/\text{m}^3 = \text{A/m)}$$

Lembrar que a polarização elétrica $P = \Sigma p / V$

Energias envolvidas no fenômeno da magnetização

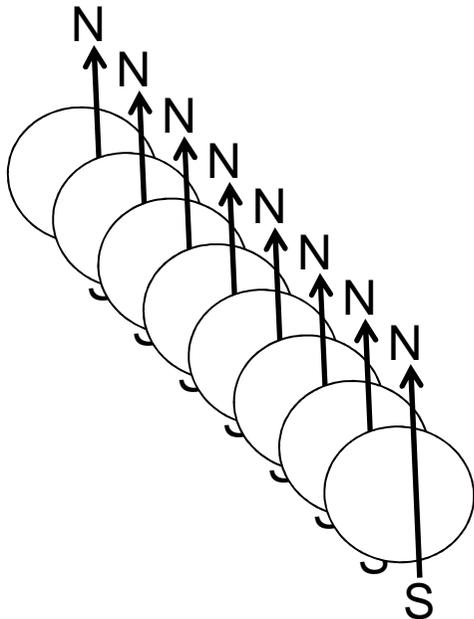
A estrutura de domínios, a cada instante, depende do equilíbrio de 5 parcelas:

1. Energia de troca
2. Energia da anisotropia magnetocristalina
3. Energia magnetostática do campo externo
4. En. Magnetostática do campo desmagnetizante
5. Energia magnetoelástica

$$E = E_{\text{troca}} + E_{\text{anis}} + E_{\text{ms ext}} + E_{\text{ms dmag}} + E_{\text{mag elast}}$$

Energia de Troca

• Cada átomo de Fe é um “nanoímã”

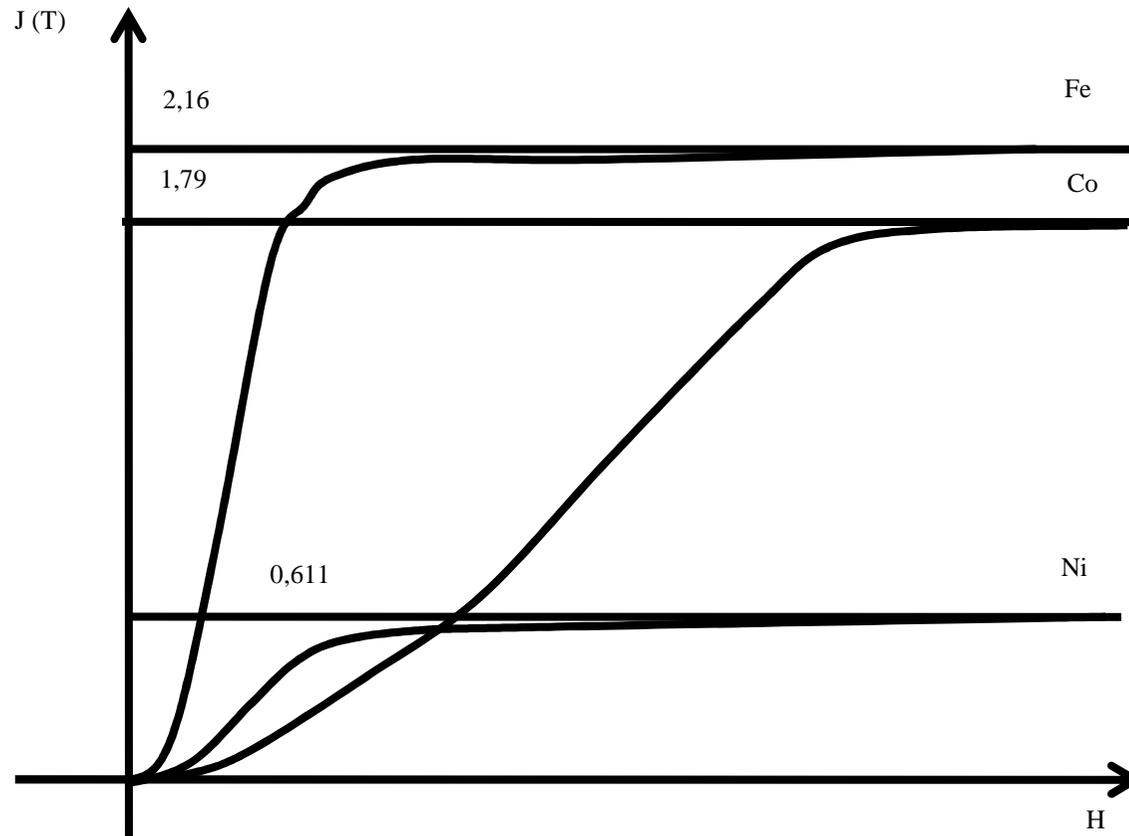


Os Momentos magnéticos alinham-se paralelamente

- É uma energia eletrostática de origem quântica.
- É a parcela que força ao paralelismo os momentos magnéticos atômicos, nos materiais ferromagnéticos.
- Muitos elementos tem momentos magnéticos atômicos, mas poucos (Fe, Co, Ni, Gd) alinham-se paralelamente.
- No ferro, é da ordem de 400MJ/m^3

É isotrópica

Relação entre J_s e momento magnético atômico



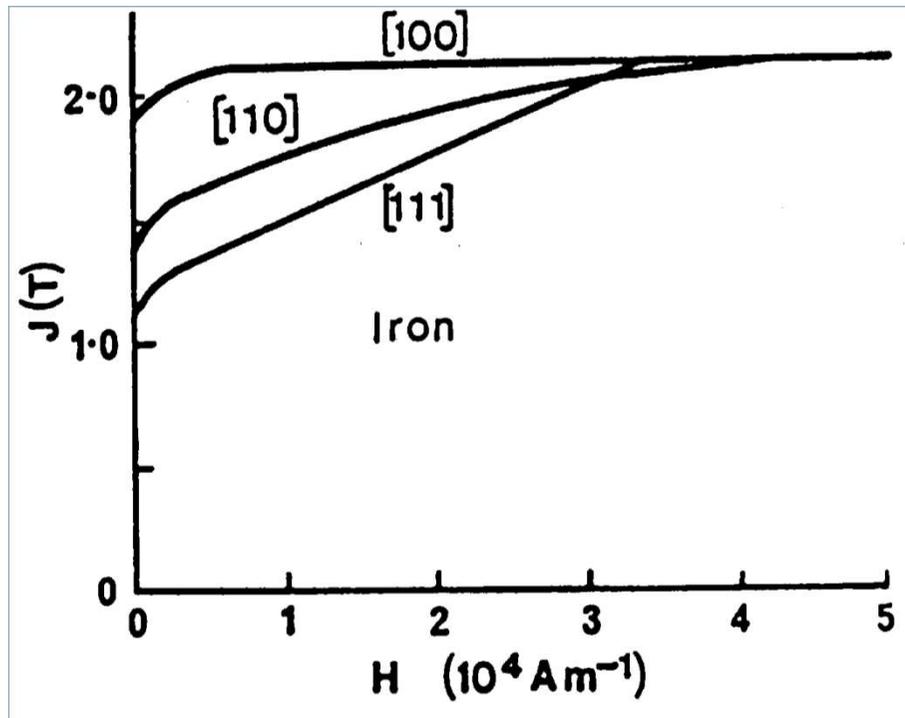
A máxima magnetização M_s E, portanto a máxima polarização $J_s = \mu_0 M_s$ Vem do máximo alinhamento dos momentos magnéticos atômicos: quando todos estão alinhados, J não aumenta mais.

Exercício

Sabendo que o momento magnético de cada átomo de ferro é de $2.0394 \times 10^{-23} \text{ Am}^2$, calcule a polarização magnética de saturação do ferro na estrutura cúbica de corpo centrado, lembrando que seu parâmetro de rede mede $0,287 \text{ nm}$.

Lembrar que $J = \mu_0 M$, onde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ henry/m}$

Energia de anisotropia magnetocristalina



- Para alinhar a polarização numa direção fora da direção espontânea [100], material acumula energia:

$$E = K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2$$

- onde K_1 e K_2 são constantes de anisotropia.

$\forall \alpha_1, \alpha_2$ e α_3 são os cossenos diretores entre a direção da magnetização gerada pelo campo aplicado e os 3 eixos cristalográficos.

É muito mais fácil magnetizar um monocristal de ferro na direção [100]. Os momentos magnéticos atômicos alinham-se espontaneamente nessa direção.

Porque a polarização rotacionou?

- Pela mesma razão que a agulha de uma bússola gira:

Para minimizar a **energia magnetostática**

$$E_{ms} = - \mu_0 \mathbf{H} \cdot \mathbf{M} V \cos\theta$$

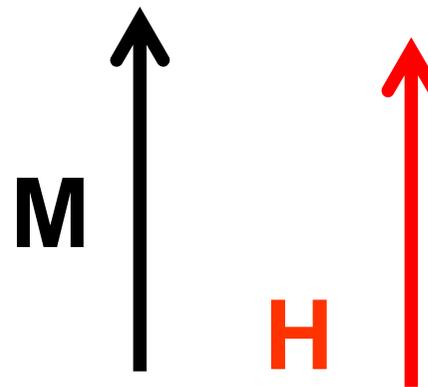
Ou pode-se dizer que surgiu um torque

$$\boldsymbol{\tau} = (\mathbf{M} \times \mu_0 \mathbf{H}) V$$

(produto vetorial)

- O sistema busca espontaneamente diminuir o torque, alinhando $\mathbf{M} // \mathbf{H}$

E_{ms} é mínima
quando \mathbf{H} e \mathbf{M} são paralelos



E_{ms} é máxima
Quando são “antiparalelos”

O equilíbrio de energia

- A polarização rotacionou para minimizar E_{ms}
- Mas aumentou E_a
- M rotaciona até o equilíbrio onde

$$E_{ms} = E_a$$

E_{ms} depende do cosseno do ângulo entre H e M

E_a depende do cosseno do ângulo entre M e as direções $\langle 100 \rangle$, chamados α_1 , α_2 and α_3

$$E = K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2$$

K_1 é a principal
propriedade intrínseca (do material) para E_a

Exercício

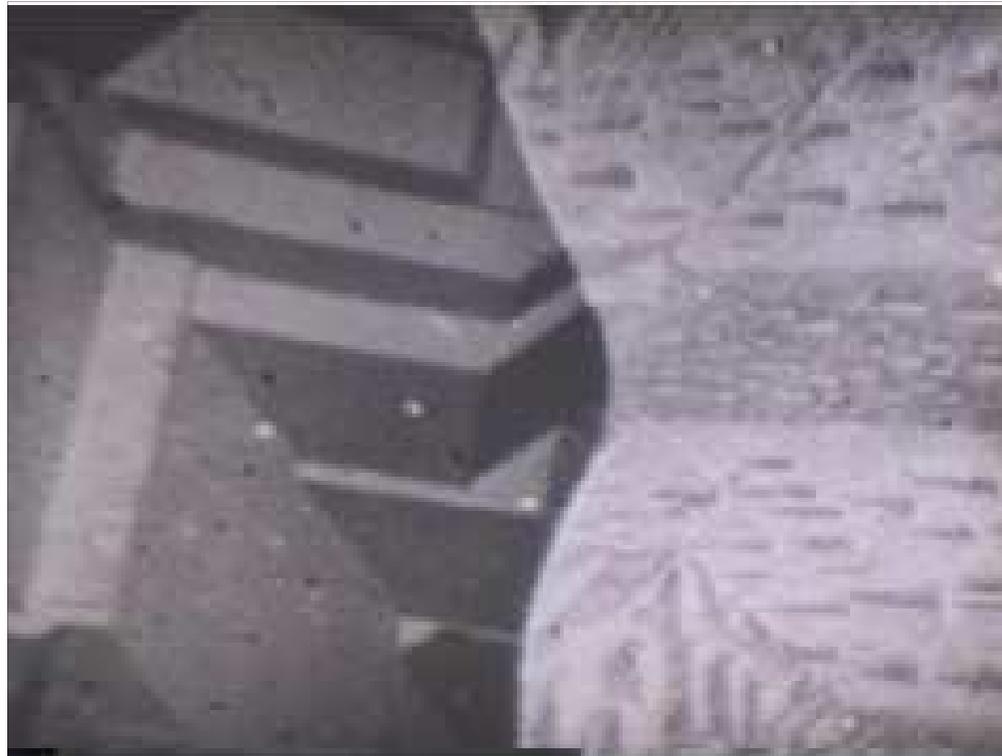
- Calcule a energia magnetocristalina associada à magnetização do ferro até saturação na direção $\langle 110 \rangle$, sabendo que
 - $K_1 = 48.000 \text{ J/m}^3$ e
 - $K_2 = 5.000 \text{ J/m}^3$.

As três energias, até agora

- Energia de troca E_{exc}
 - momentos atômicos devem ser paralelos
 - No ferro, E_{exc} maximo = 400 MJ/m³
- Energia anisotropia magnetocristalina E_a
 - momentos atômicos devem estar em $\langle 100 \rangle$
 - No ferro, Maxima $E_a = 48.000 \text{ J/m}^3$
- Energia magnetostática E_{ms}
 - J deve ser paralelo a H
 - No ferro, quando $H = 5.000 \text{ A/m}$ max $E_{ms} = 10.800 \text{ J/m}^3$

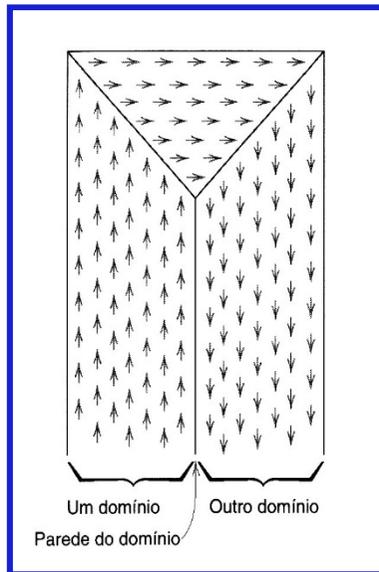
Domínios Magnéticos

O comportamento magnético dos materiais ferri e ferromagnéticos está associado ao comportamento dos domínios magnéticos sob a ação de campos magnéticos .



Fotografia da estrutura de domínios magnéticos em chapa de aço
Com dois grãos. Imagem mede 100 μ m de largura.

DOMÍNIOS MAGNÉTICOS e PAREDES DE DOMÍNIO

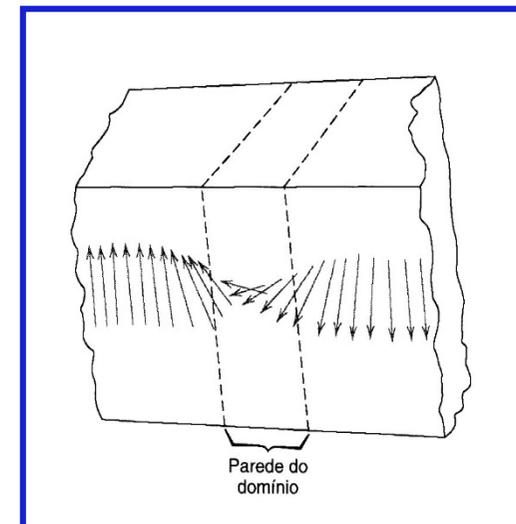


• **DOMÍNIOS** são regiões volumétricas microscópicas onde todos os momentos magnéticos atômicos estão alinhados, tendo mesma direção e sentido

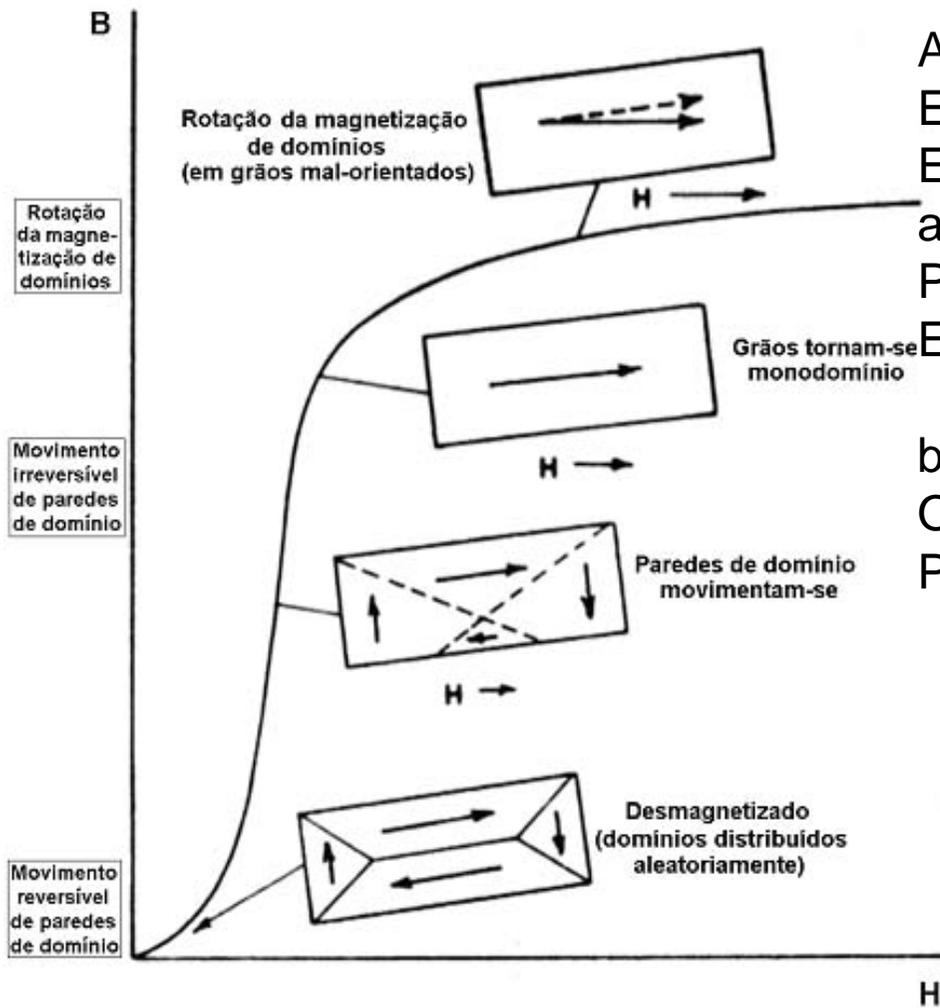
Dentro de cada domínio está magneticamente saturado, ou seja, sua magnetização está no valor máximo possível.

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 **PAREDES DE DOMÍNIO**, através dos quais a direção da magnetização varia gradualmente



Domínios e magnetização



A aplicação de H aumenta E_{ms}
Em vários domínios.

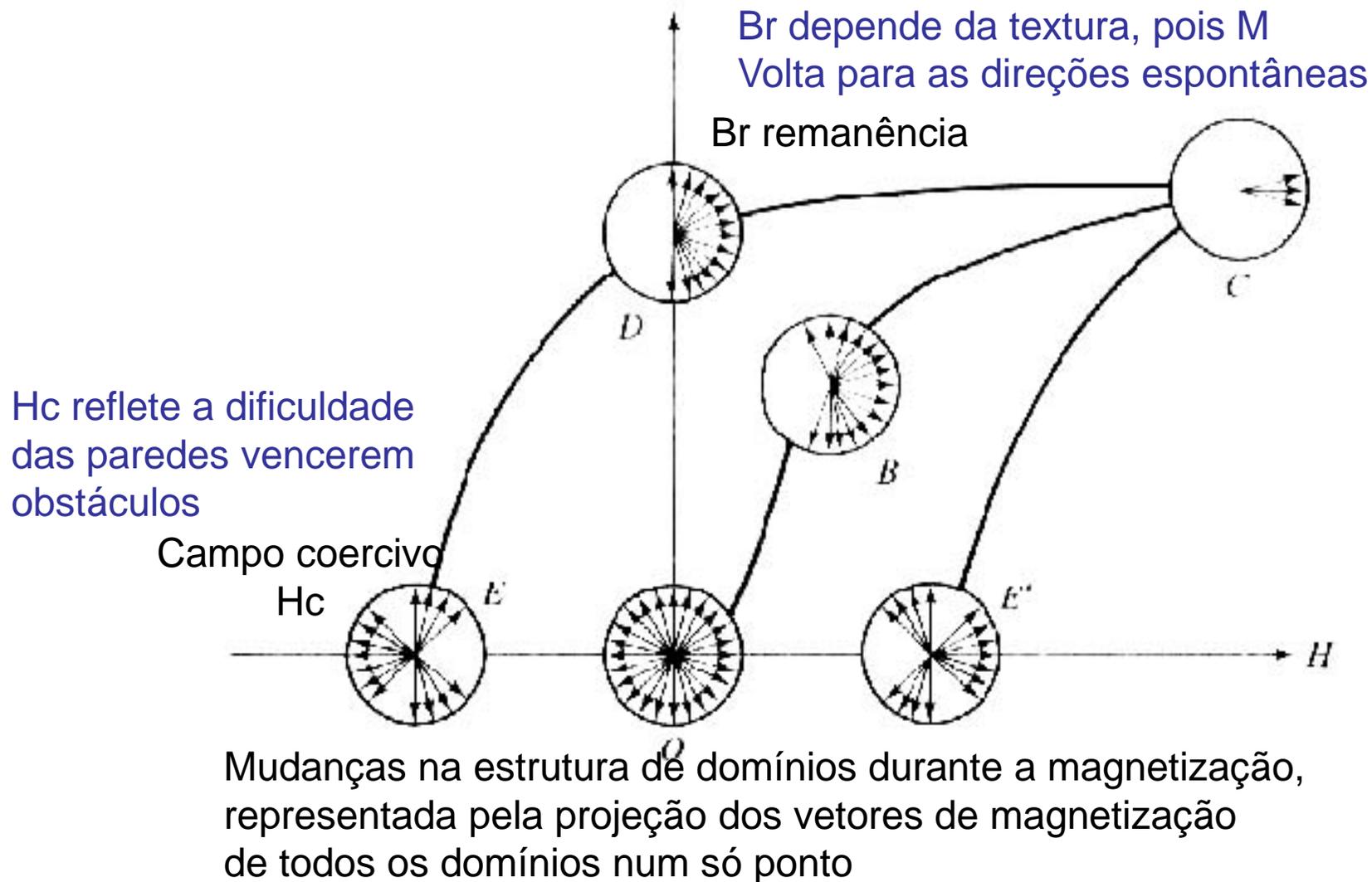
Existem dois mecanismos de magnetização

a. O movimento das paredes de domínio
Permite aumentar domínios de baixa E_{ms}
E diminuir os de alta E_{ms} .

b. Acima do joelho da curva,
Ocorre "rotação de domínios",
Para atingir saturação.

Littmann, 1971

Magnetização e estrutura de domínios



Fim da 1^a aula

x

Como vencer obstáculos?

Mecanismo de Kersten

- PD estão ancoradas em defeitos.
- Aumentar campo causa arqueamento das PD.
- Num campo crítico, PD livram-se dos ancoradouros.
- Campo crítico depende da distancia **d** entre ancoradouros e de **γ** , a energia da PD.

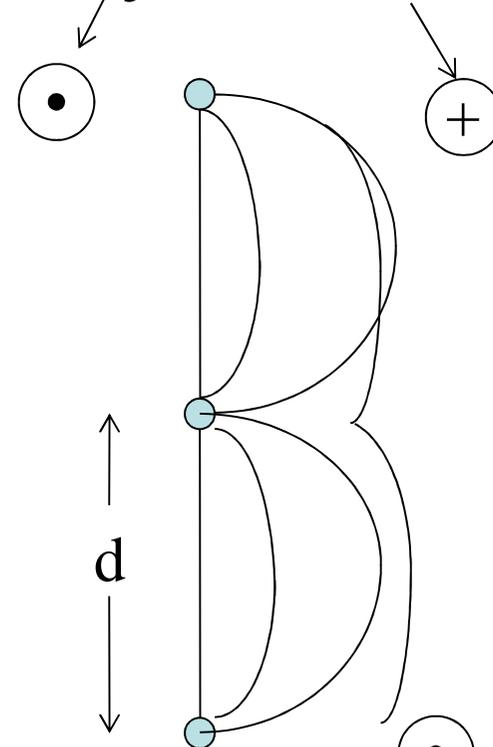
$$H_{\text{crítico}} = 3 \gamma / (J_s * d)$$

Hcritico corresponde ao campo coercivo.

A energia da parede γ é proporcional a raiz de K1

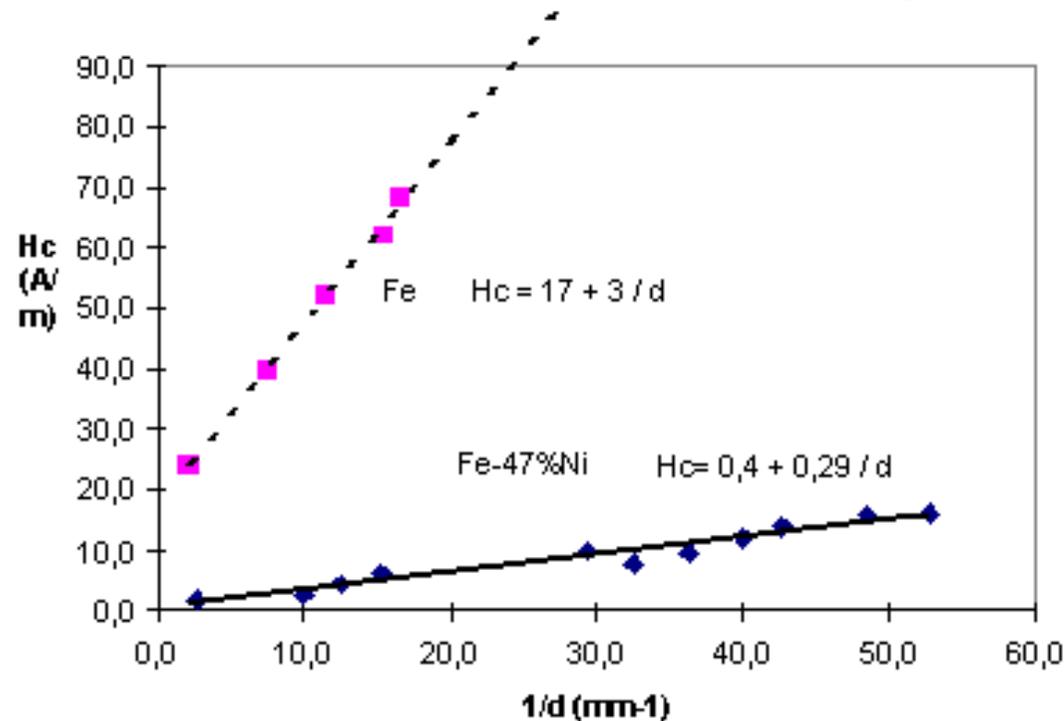
$$H_c = \text{constante} * \frac{\sqrt{K_1}}{d}$$

Direção dos domínios



- Campo crescente
- Campo aplicado
- Sem campo

Efeito do Tamanho de grão no Hc



Contorno de grão também ancora paredes de domínio

O campo coercivo também varia com 1/tamanho de grão d

$$H_{\text{crítico}} = 3 \gamma / (J_s * d)$$

Figura mostra a importância do K_1 (constante de anisotropia)

Fe $K_1=48.000\text{J/m}^3$ Fe47%Ni $K_1= 800 \text{J/m}^3$

Movimentação das paredes de domínio

Filme feito usando observação de domínios Por efeito Kerr.

Estrutura de domínios em dois grãos vizinhos.

Notar acoplamento entre Domínios em grãos vizinhos

Notar que parede move-se aos saltos: Ruídos de Barkhausen

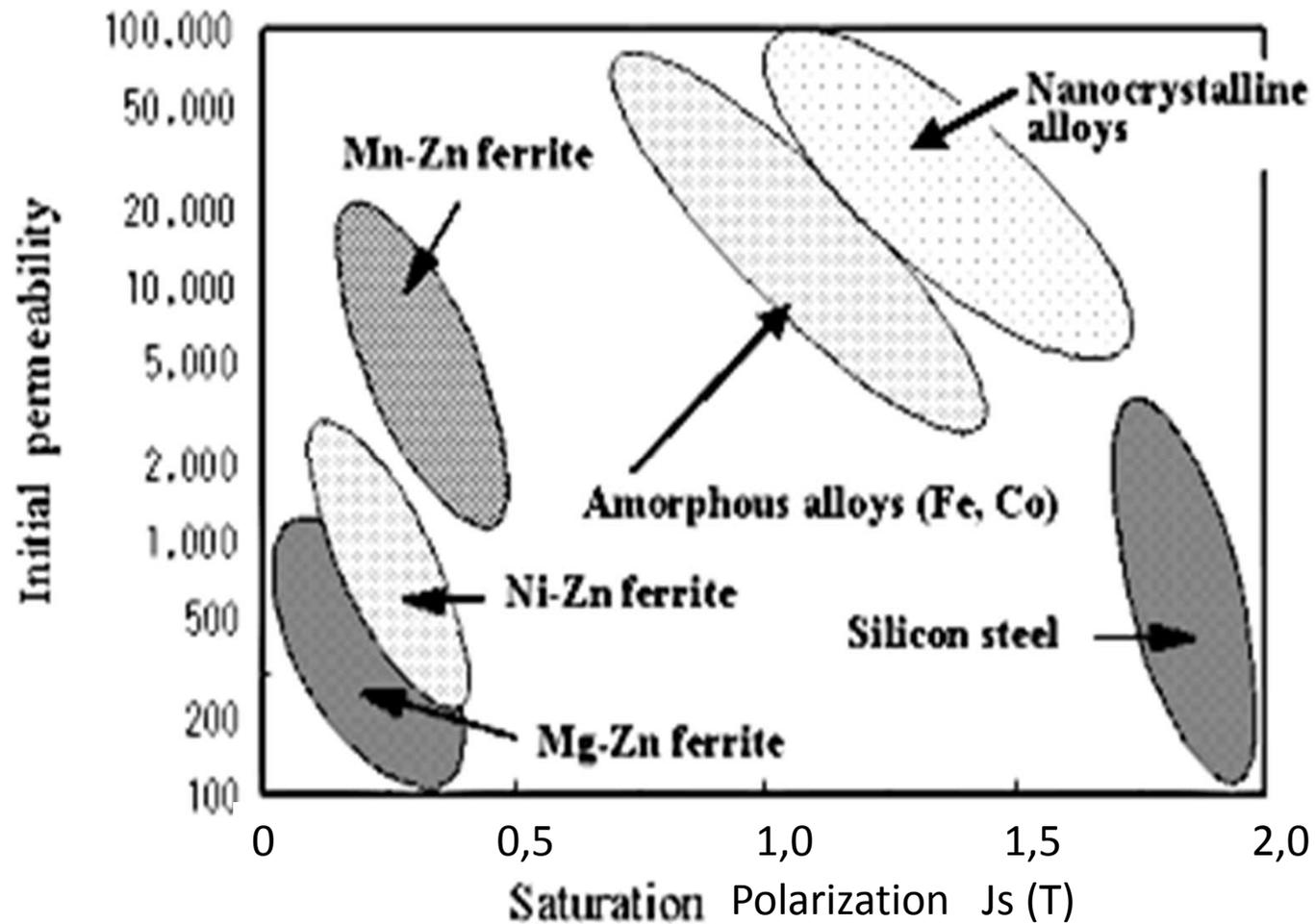


Filme (e não animação!) do movimento das paredes em ferro-3%Si, quando campo É alternado na direção horizontal

Materiais magneticamente moles

- Aços para fins eletromagnéticos
- Ferritas de manganês zinco
(Mn,Zn)O.Fe₂O₃.
- Ligas FeNi
- Ligas FeCo
- Metais amorfos (vidros metálicos)
- Ligas nanocristalinas

Materials Magnetically Moles



Como o aço se comporta no motor

- A principal função do aço é a amplificação do campo magnético criado pela corrente elétrica no enrolamento:
 - Um campo de 500A/m induz uma magnetização de $1.300.000\text{ A/m}$
- Infelizmente tem efeitos colaterais
 - Em corrente alternada, ocorre dissipação de energia: a área de histerese é a energia dissipada, “Perdas no ferro”

Demanda de Perda magnética de potência

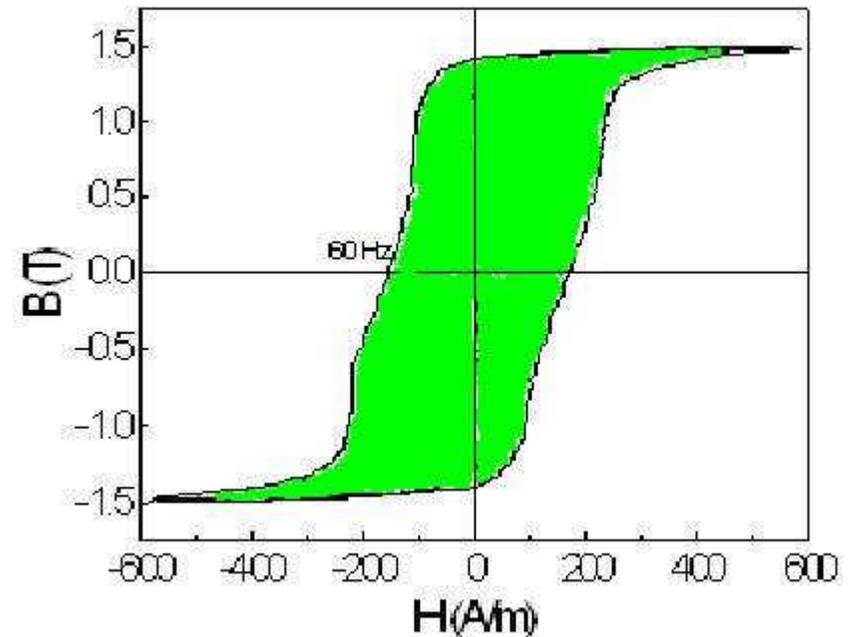
Power loss P em W/kg

$$P = W * f / \text{densidade}$$

W é a área da histerese na frequência f

W é dado em J/m^3

$$W = B * H = Vs/m^2 * A/m$$

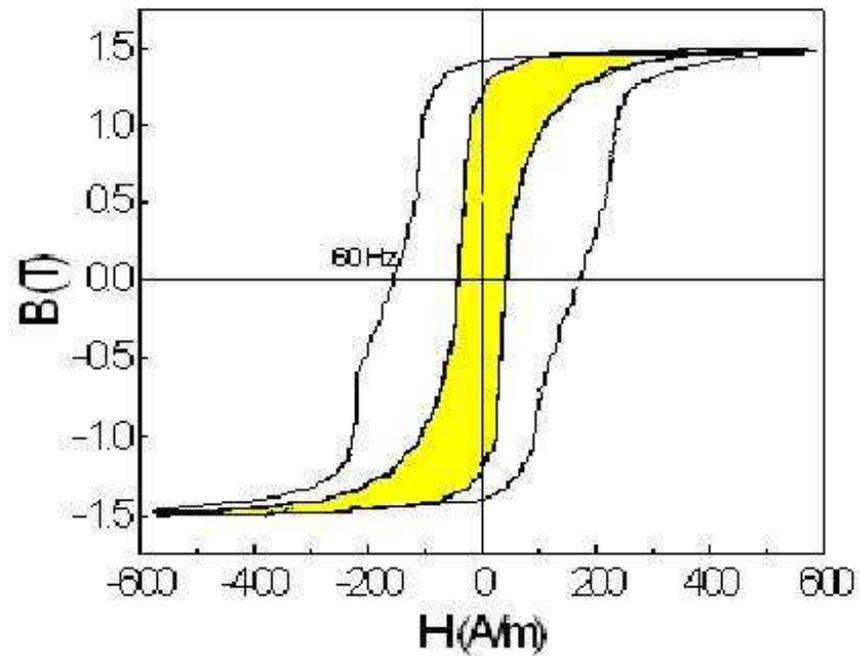


3 parcelas das perdas

- Perdas histeréticas = $A_h * f$ / densidade
 - Depende da microestrutura
- Perdas parasitas
 - Depende da resistividade elétrica do material e da espessura
- Perdas de excesso
 - Depende da microestrutura e da resistividade.

Perda histerética

Área da histerese quase-estática, em frequência de 0,01 Hz (área amarela)

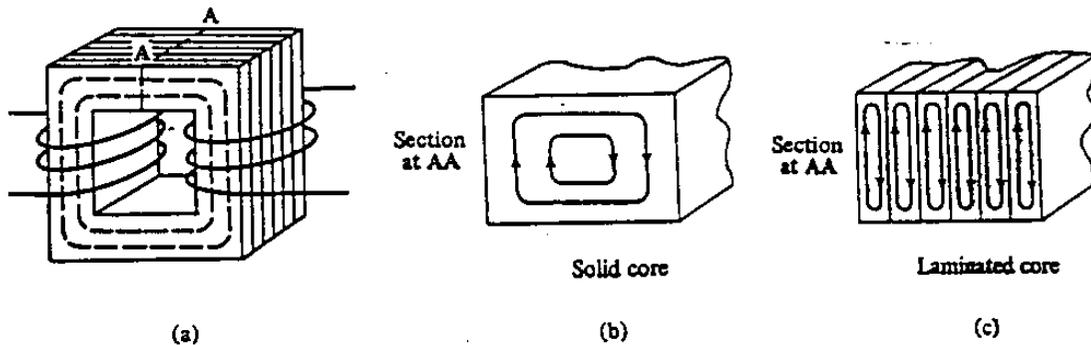


Perdas parasitas

MECANISMO:

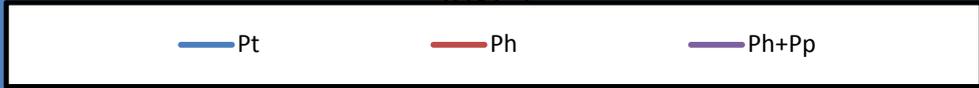
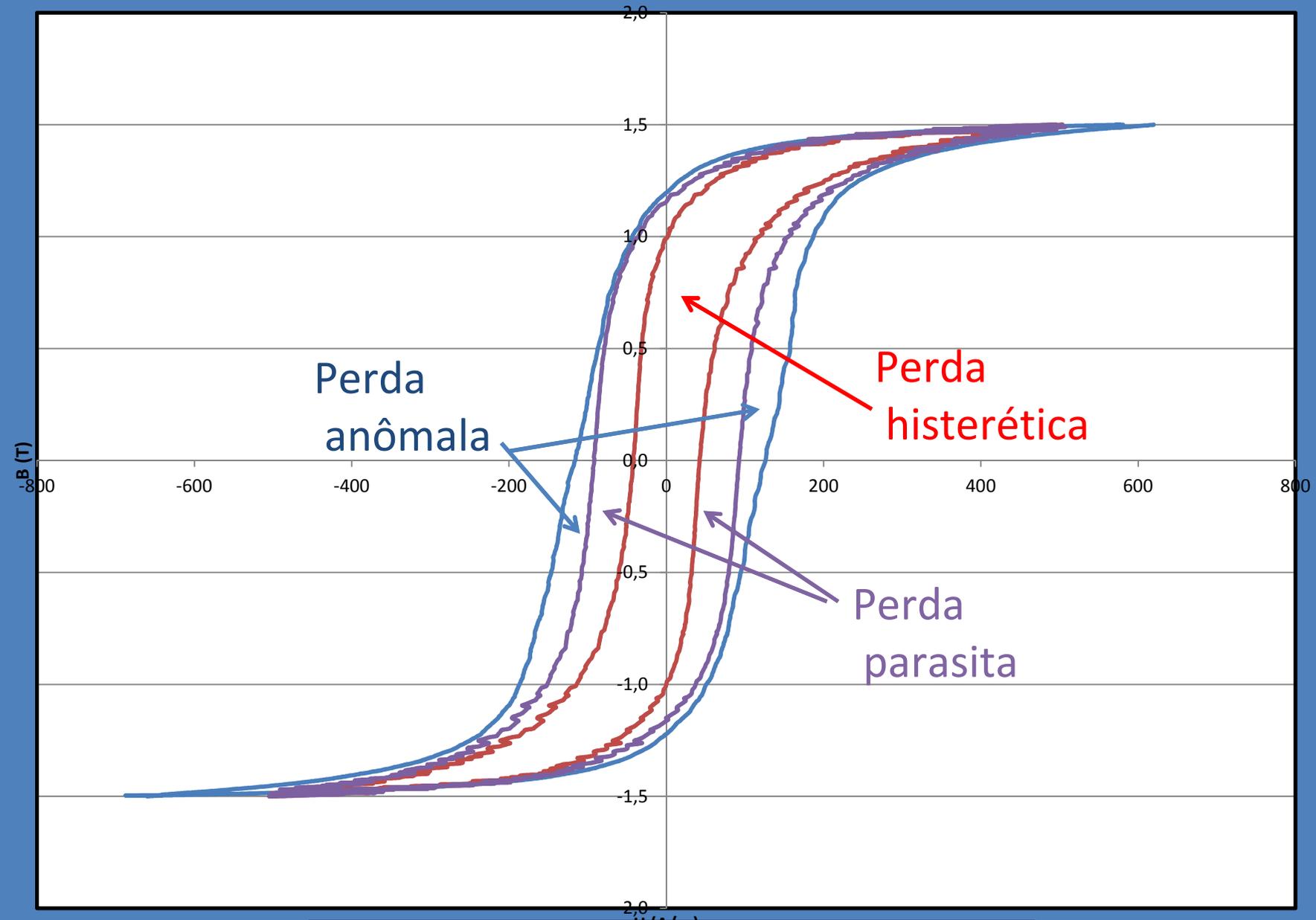
Circulação de macrocorrentes elétricas induzidas pela variação de B num material condutor.

$$P_p = \frac{(\pi * B * f * e)^2}{6 * d * \rho}$$



B indução máxima, T
F é freqüência, Hz
e é espessura, m
d é densidade, kg/m³
 ρ é resistividade, em Ωm

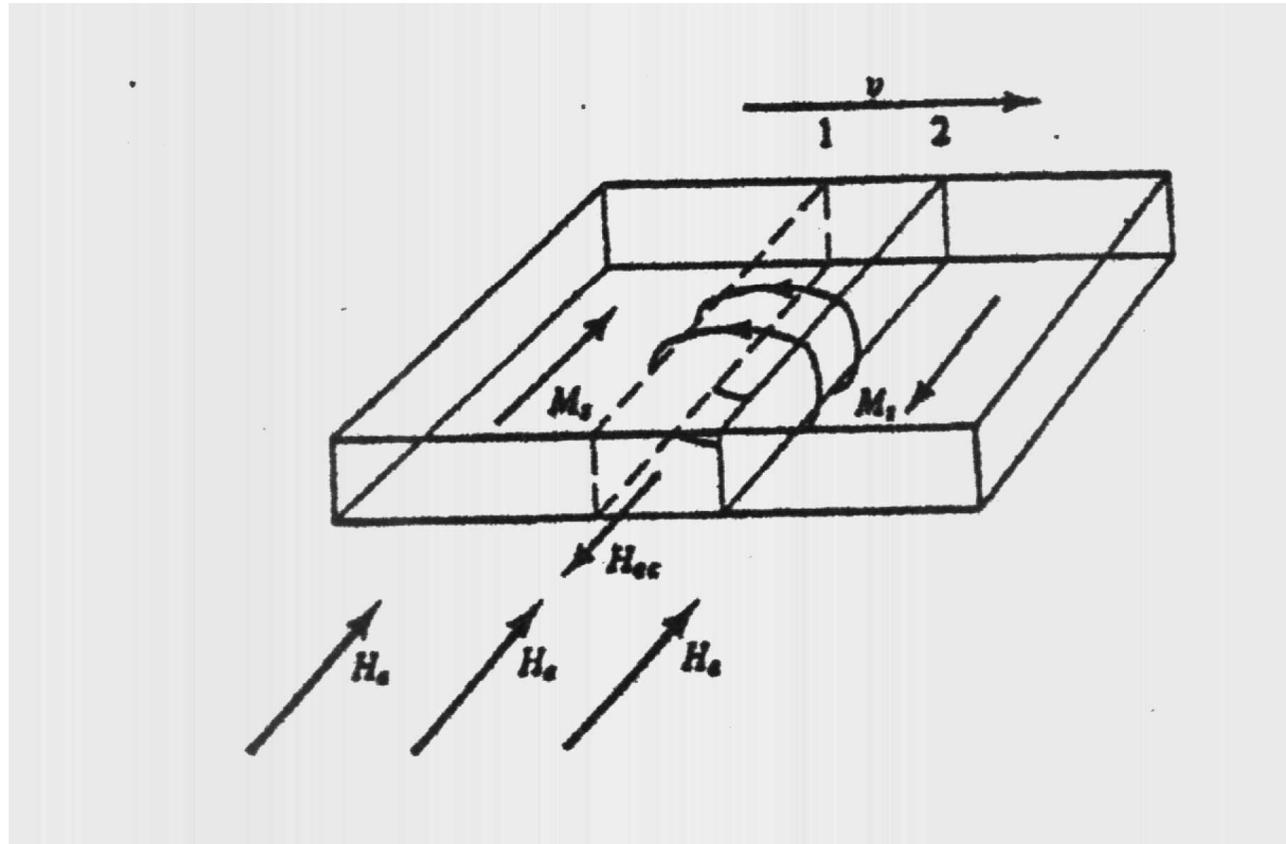
Principal efeito da adição de silício aos aços é aumentar a resistividade elétrica E, com isso, reduzir as perdas parasitas.



Mecanismos de dissipação de energia na histerese

- Circulação de microcorrentes elétricas na movimentação das paredes de domínio.
 - Paredes de 90° ,
 - paredes de 180° .
- Nucleação e aniquilação de domínios
- Emissão de ruído magnetoacústico.

Microcorrentes em torno da parede em movimento

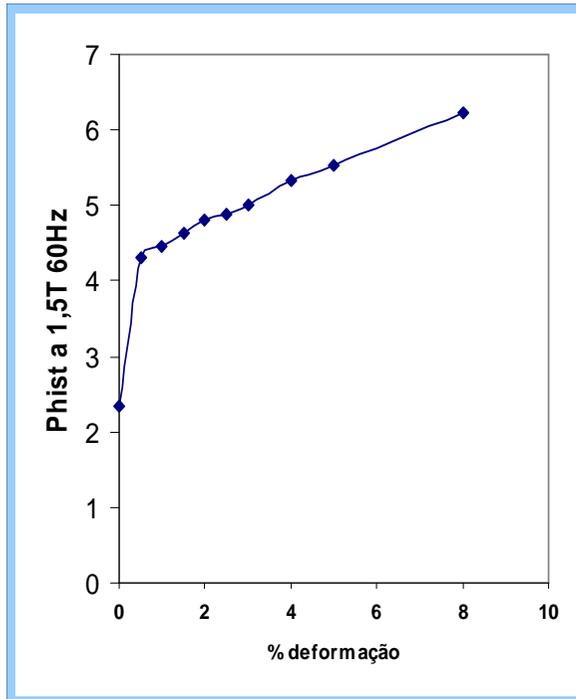


Esse mecanismo é um dos mecanismos da perda histerética
E é o principal das perdas de excesso
Circula corrente pois surge $V \propto dB/dt$ (lei de Faraday)

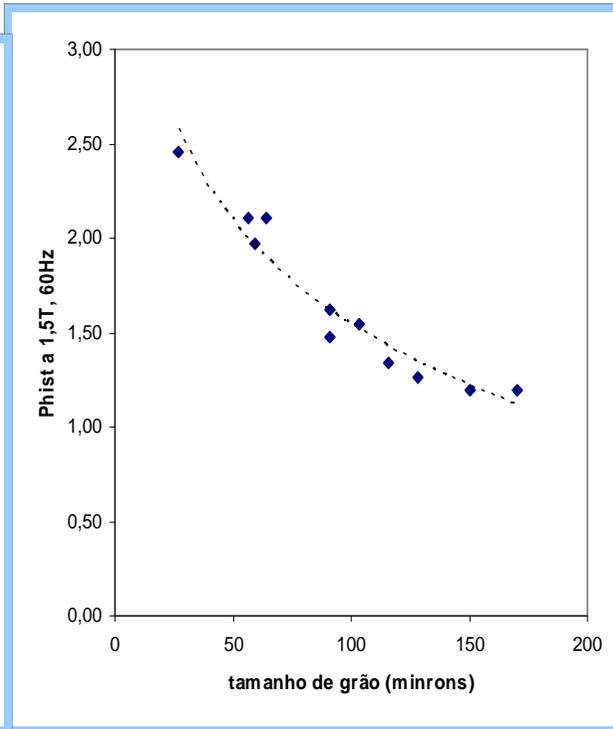
Exercício

- Supondo que as perdas de excesso sejam desprezíveis, e que as perdas histeréticas possam ser aproximadas para um retângulo, calcular as perdas de potência totais em W/kg a 1,5T, 60Hz, de um motor fabricado com lâminas de 0,5mm, de aço contendo 3%Si ($\rho=50 \mu\Omega\text{cm}$), supondo $H_c=30\text{A/m}$.
- Densidade = 7600kg/m^3 .

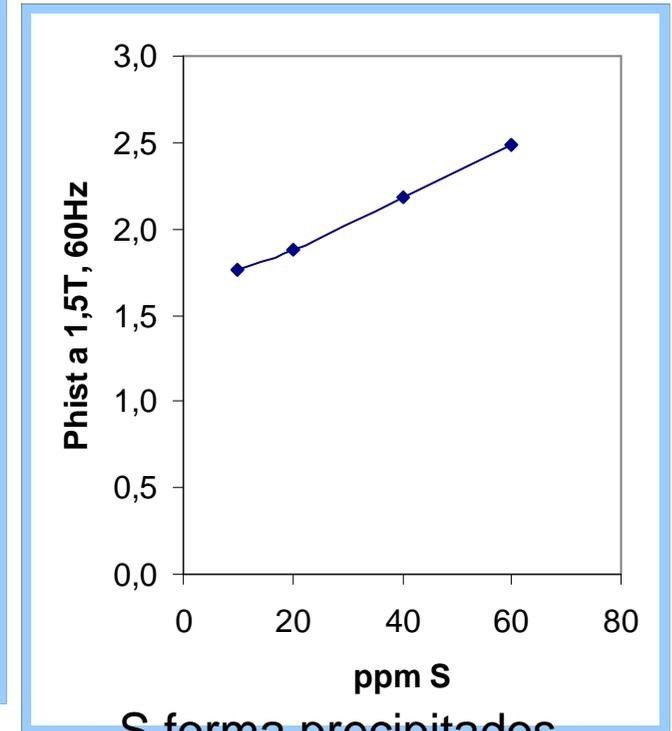
Perdas histeréticas



Deformação plástica
Aumenta perdas



↑ TG ↓ perdas



S forma precipitados
não magnéticos de MnS
↑MnS ↓ distancia : ↑Hc
↑Area histerese ↑perdas

Efeito da textura é mais difícil de descrever

Os ímãs

- Aços temperados
- Ferritas de bário ou estrôncio ($\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$)
- Alnico (Ligas metálicas FeNiCoAl).
- Superímãs de terras raras
 - Samário cobalto (SmCo_5)
 - Neodímio ferro boro ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)

A curva de histerese do ímã anisotrópico ideal

- A força de um ímã é proporcional à área da curva de histerese!

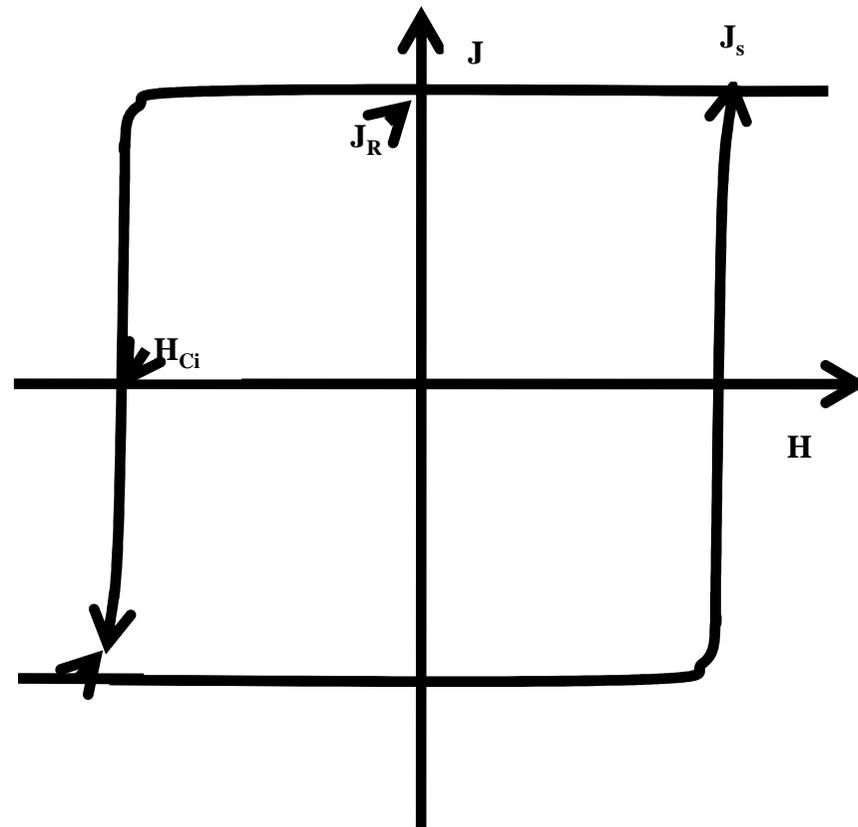
- Um ímã ideal tem J_s alto.

- Um ímã ideal tem

$$J_R = J_s$$

- O segundo quadrante é retangular, ficando J constante até atingir H_{ci} .

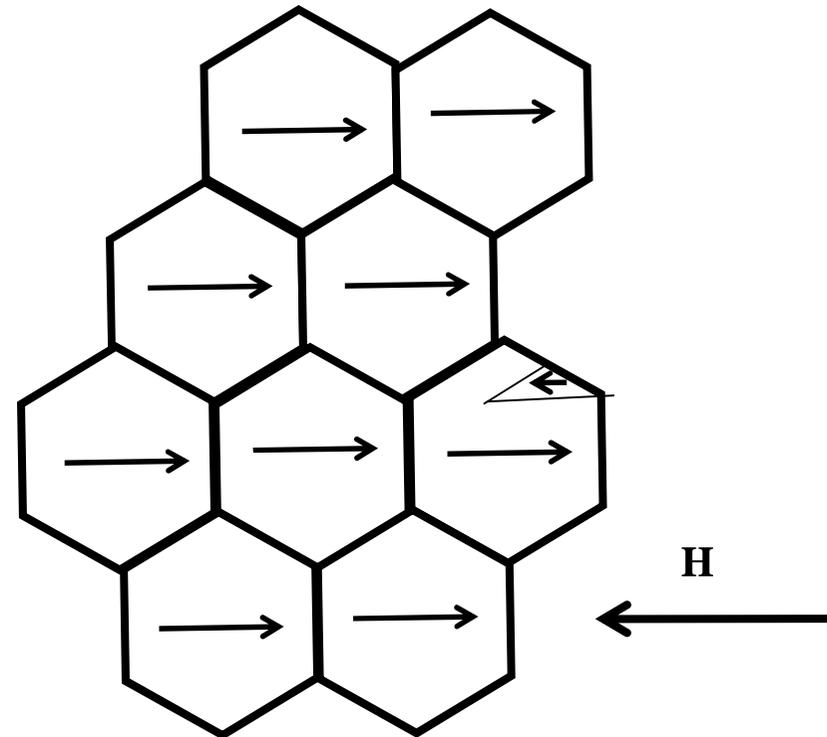
- O H_{ci} deve ser alto e depende de K_1 .



A nucleação dos domínios contrários e o campo coercivo

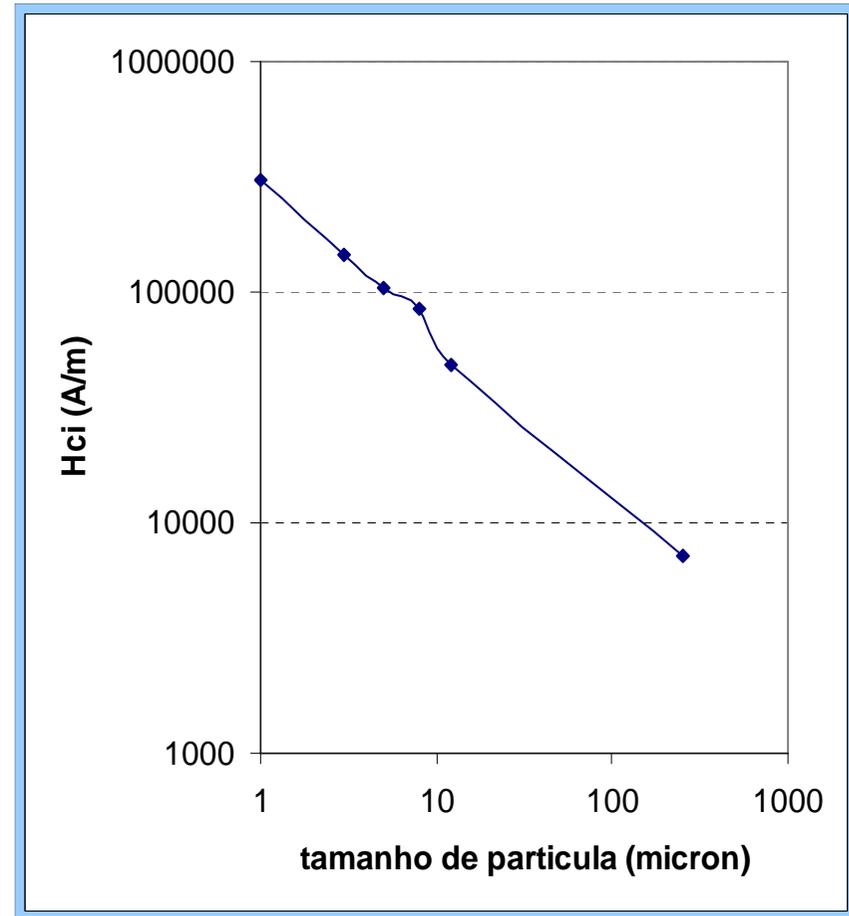
- A inversão da magnetização ocorre não por rotação irreversível no grão inteiro, mas por nucleação de domínios contrários e movimento de paredes.

- Essa nucleação ocorre numa região com algum Defeito cristalino, onde possivelmente K_1 seja menor

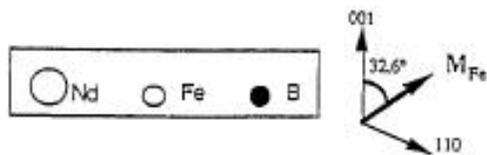
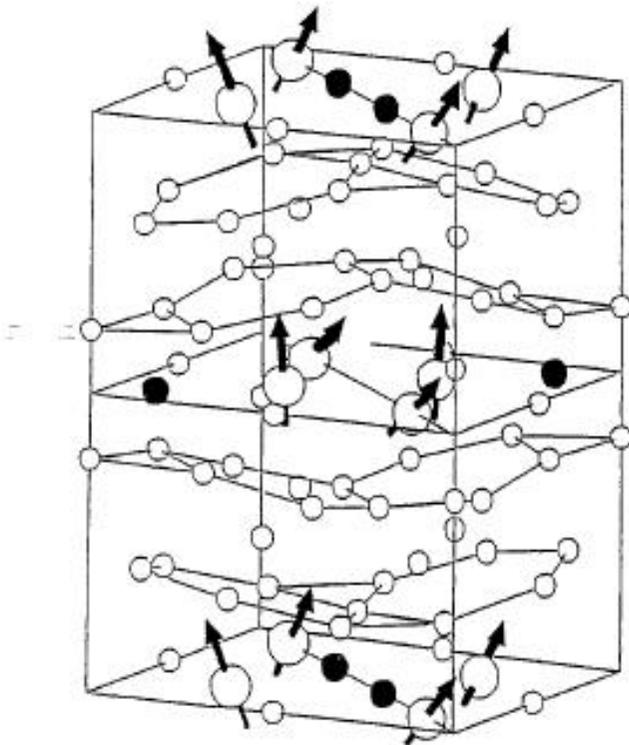


Efeito do tamanho de grão no campo coercivo

- O efeito do tamanho de grão é explicado afirmando que quanto menor o tamanho de grão, menor a probabilidade de ter uma região de baixo K_1 no contorno de grão



Superímã de terras raras é baseado na substância $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$



K_1 é grande quando estrutura cristalina é complexa.

Estrutura cristalina: tetragonal

$$a_0 = 0.8770 \text{ nm}$$

$$c_0 = 1.2016 \text{ nm}$$

O átomo de Nd tb tem momento magnético atômico, mas é pequeno. mas K_1 alto devido a seus elétrons f.

$$\text{Remanência} = 1,3\text{T}$$

$$\text{Coercividade} = 990 \text{ kA/m}$$

$$\text{Temp. Curie} = 320^\circ\text{C}$$

$$K_1 = 4,2 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \text{ (compare com o Fe, que é } 48.000\text{J/m}^3\text{)}$$

Refs.:

-V. M. Arzhavitin, Powder Metall. Metal Ceramics, v. 44 (2005) 171-180.

-P. Wolfers et al. J. Alloy Comp. 242 (1996) 74-79.

Processo de fabricação de ímas

Etapas:

Moagem para obter grão pequeno e alto H_{ci}

Orientação: para aumentar B_r

Compactação: para dar resistência “a verde”

Sinterização: para densificar e aumentar B_r

Magnetização

referências

- Texto “ferromagnetismo e o processo de magnetização”, disponível no moodle.
- Capítulo 21 do Callister