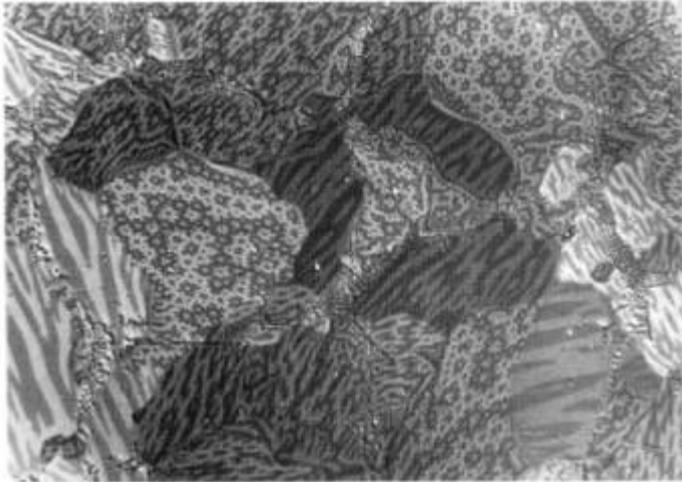


O FERROMAGNETISMO E O PROCESSO DE MAGNETIZAÇÃO



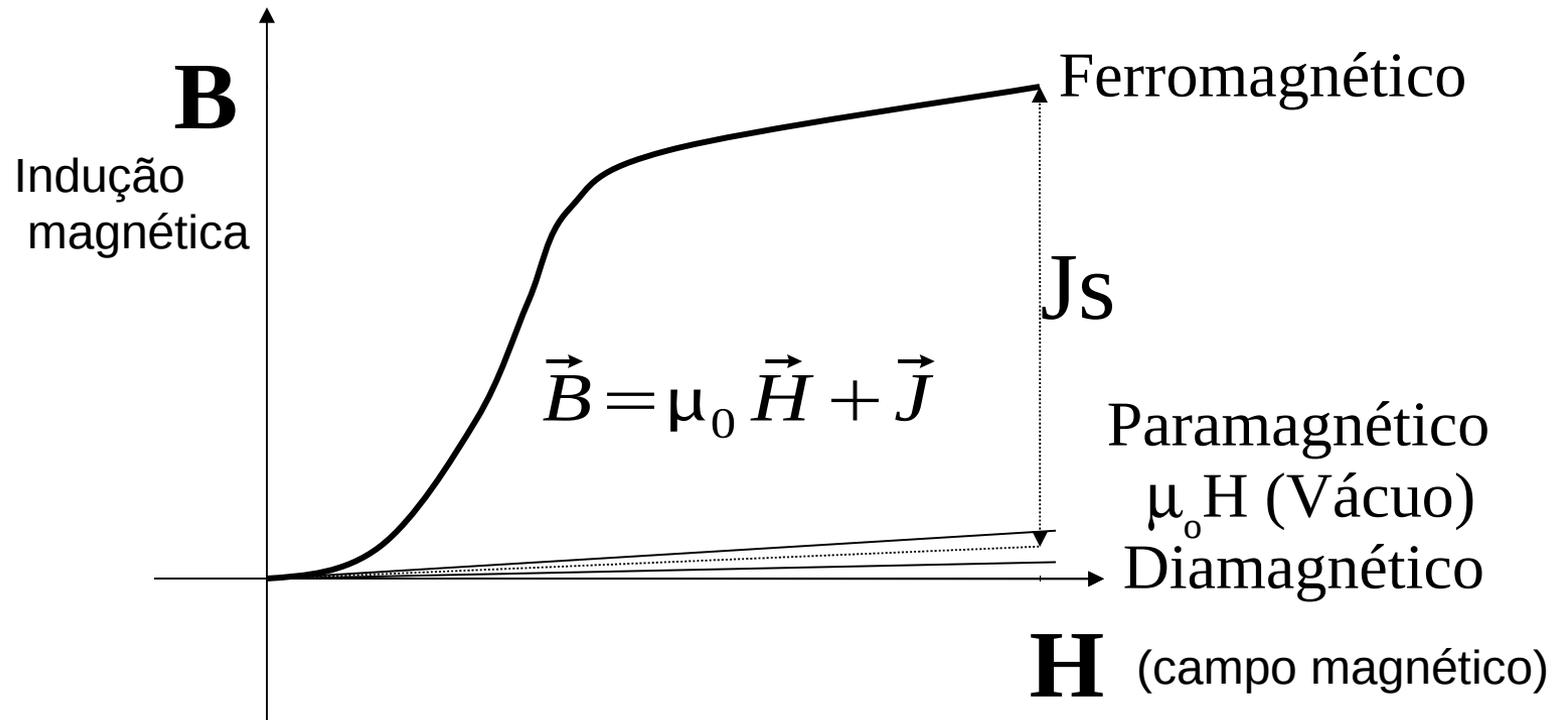
*Tópico 8 de PMT 2200
preparada por
Fernando JG Landgraf
Versão 2007 (rev. 2010,2011)*

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) \rightarrow número quântico l
- Elétrons “girando” em torno de si mesmos (spin) também “criam” momento magnético \rightarrow número quântico s .
- 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

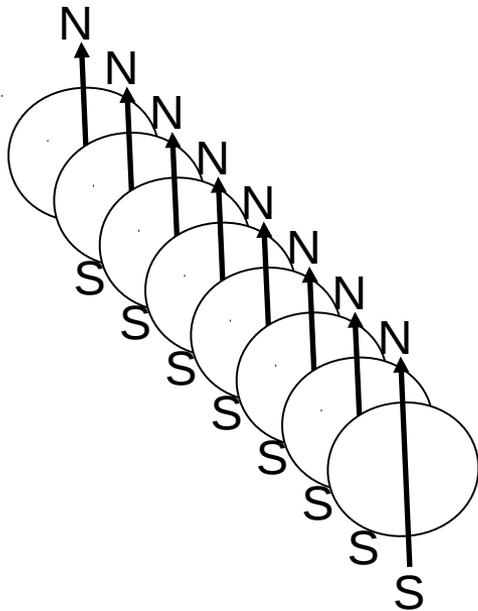
A estrutura de domínios, a cada instante, depende do equilíbrio de 5 parcelas:

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

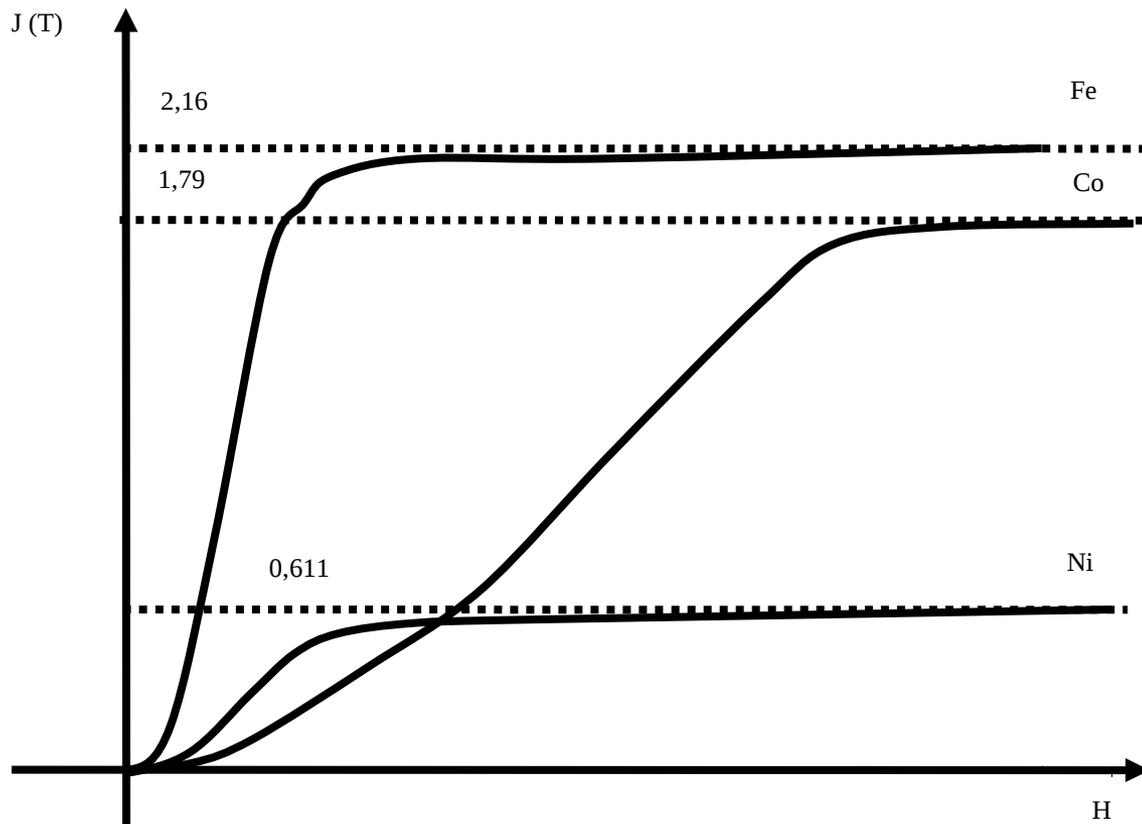
- Cada átomo de Fe é um “nanoímã”
- É uma energia eletrostática de origem quântica.
- É a parcela que força ao paralelismo os momentos magnéticos atômicos, nos materiais ferromagnéticos.
- Muitos elementos tem momentos magnéticos atômicos, mas poucos (Fe, Co, Ni, Gd) alinham-se paralelamente.
- No ferro,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



Os Momentos magnéticos alinham-se paralelamente

É isotrópica

Relação entre J_s e momento magnético atômico



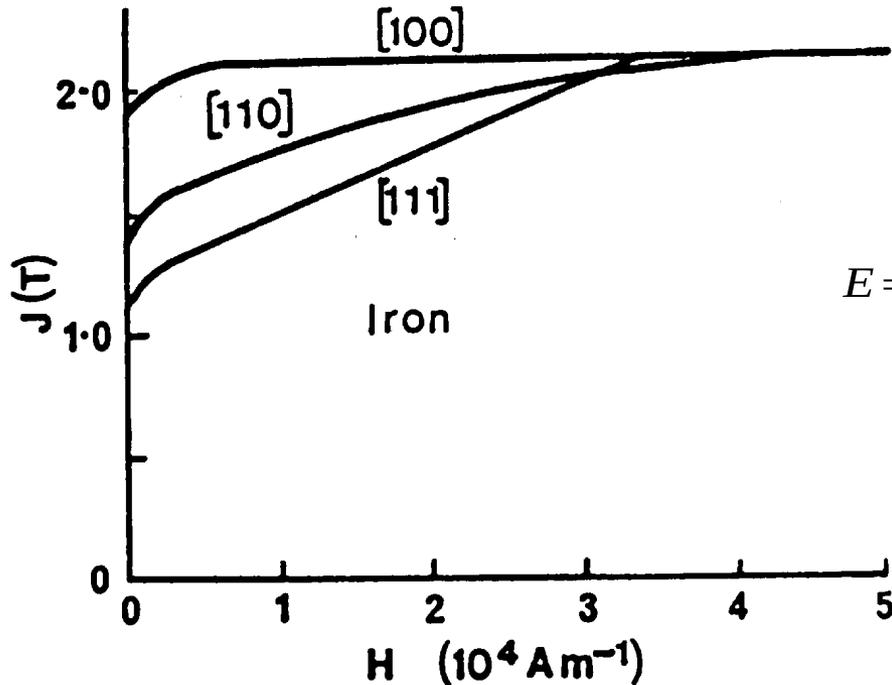
A máxima magnetização M_s E, portanto a máxima polarização $J_s = \mu_0 M_s$ Vem do máximo alinhamento dos momentos magnéticos atômicos: quando todos estão alinhados, J não aumenta mais.

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



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

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

$$E = K_0 + K_1 (\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2) + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2$$

- onde K_1 e K_2 são constantes de anisotropia.
- ▽ α_1 , α_2 e α_3 são os cossenos diretores entre a direção da magnetização gerada pelo campo aplicado e os 3 eixos cristalográficos.

Porque a polarização rotacionou?

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

Para minimizar a **energia magnetostática**

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

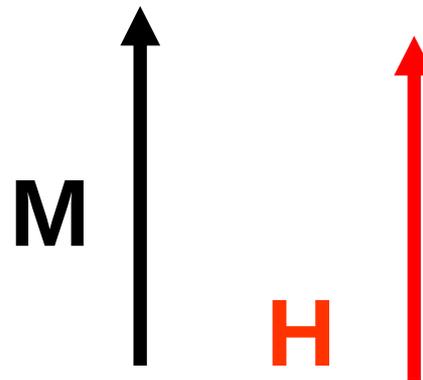
Ou pode-se dizer que surgiu um torque

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

(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 anti paralelos

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 ângulo entre H e M

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

$$E = K_0 + K_1 \left(\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2 \right) + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2$$

K_1 é a principal propriedade intrínseca para E_a

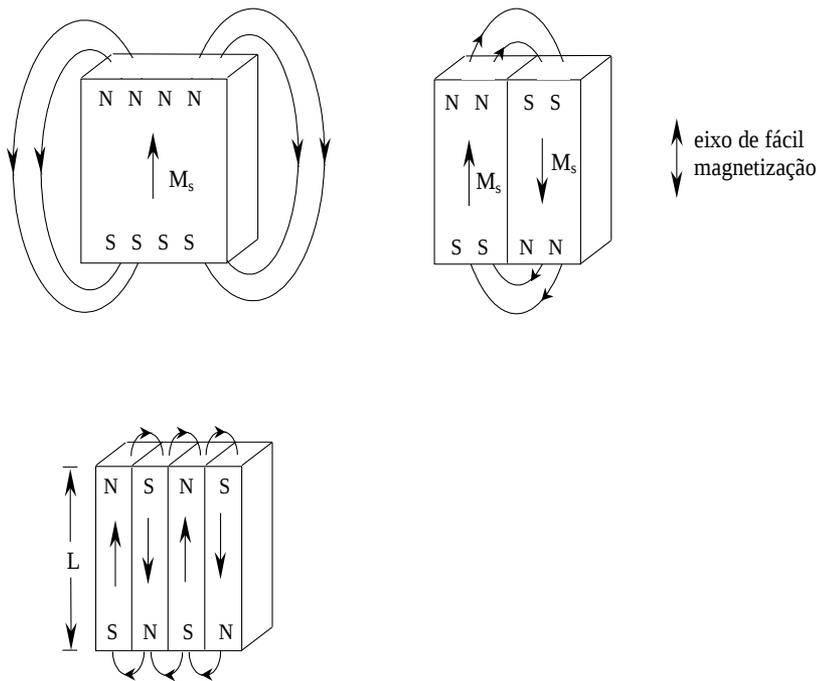
Exercício

- Calcule a energia magnetocristalina associada à magnetização do ferro até saturação na direção $\langle 110 \rangle$.

As três energias, até agora

- Energia de troca E_{exc}
 - momentos atômicos devem ser paralelos
 - No ferro, E_{exc} maximo = 400MJ/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 $E_{ms} = 10.800 \text{ J/m}^3$

Energia magnetostática do campo desmagnetizante



Por que todo monocristal de ferro não é um ímã permanente?

Um monocristal de ferro que tivesse apenas um domínio seria um ímã.

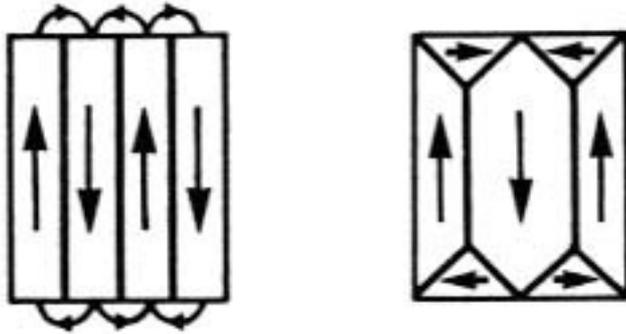
O ímã cria em si mesmo um **campo desmagnetizante**, que aumenta sua energia magnetostática.

Subdividindo em vários domínios é possível reduzir a energia magnetostática.

Os ímãs são materiais que resistem a essa subdivisão em vários domínios.

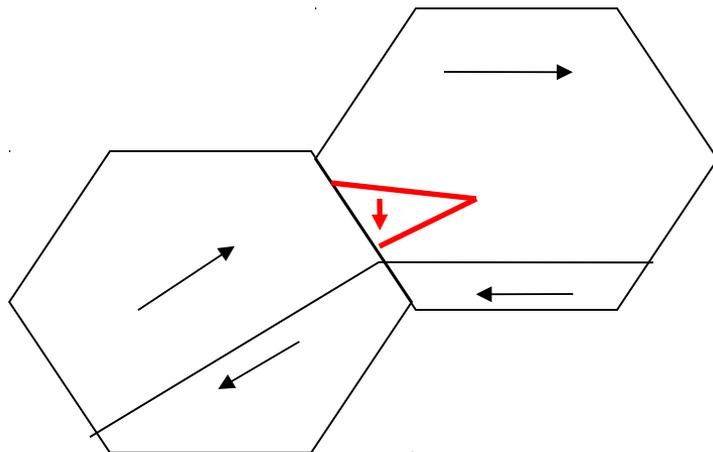
Lembrar que dentro de cada domínio o material está no estado de saturação magnética.

Domínios de fechamento



Para reduzir a energia magnetostática do campo desmagnetizante, formam-se “domínios de fechamento”

- na superfície do material,
- Em contornos de grão

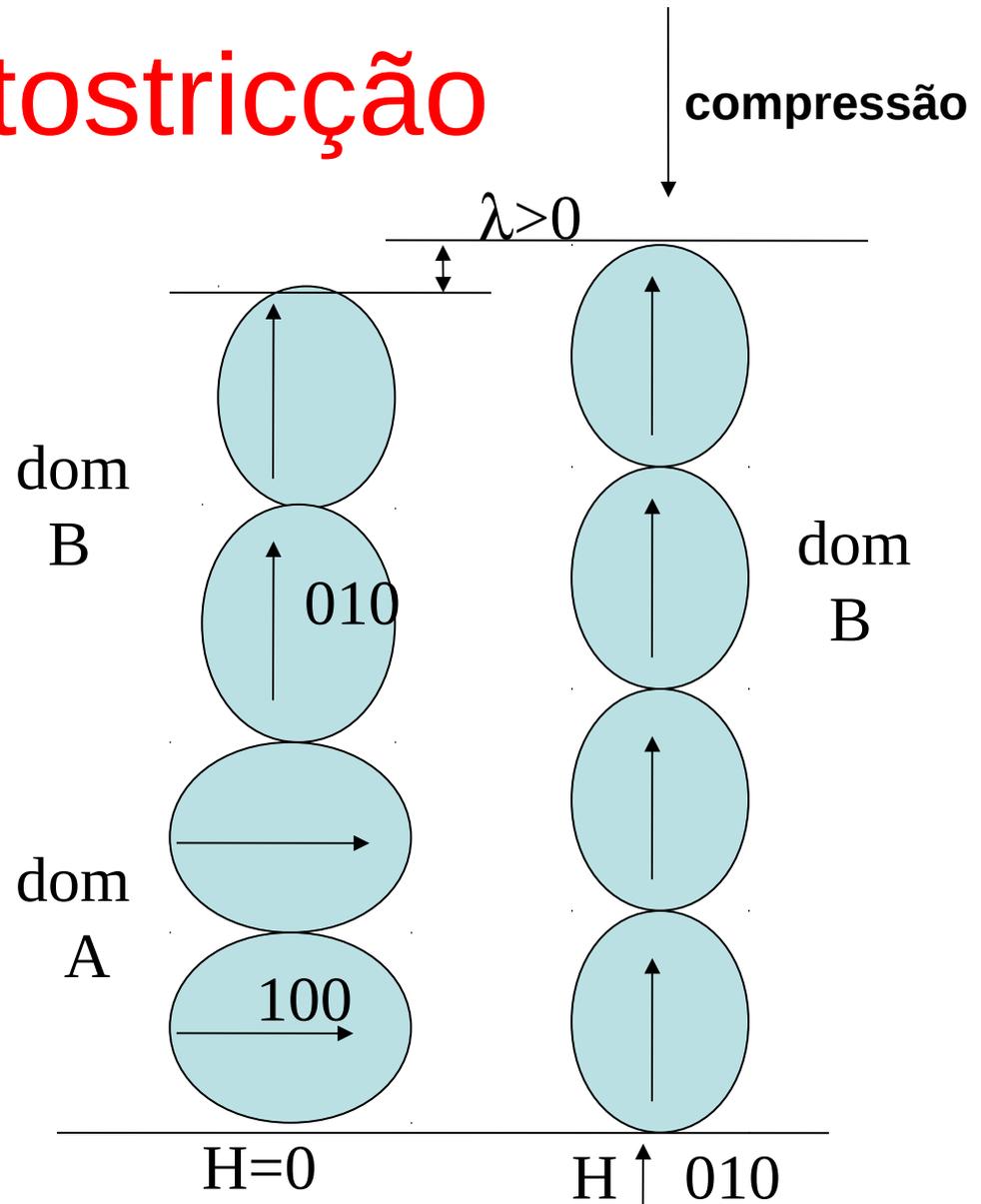


Nucleação de um domínio:
Reduz a energia magnetostática,
Mas acrescenta a energia da Parede de Domínio (PD).

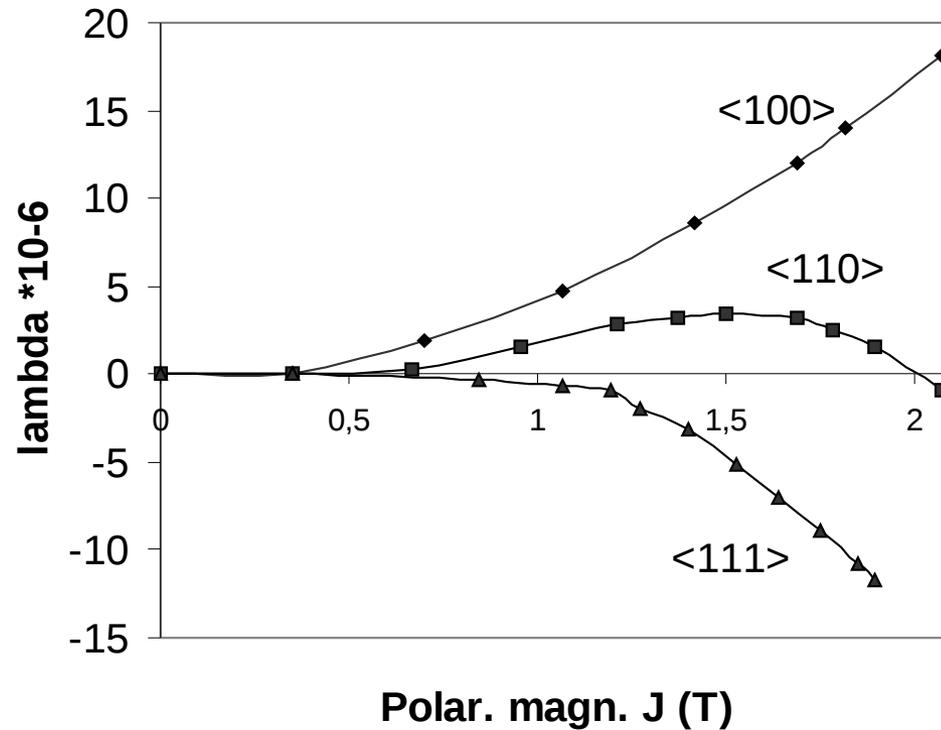
$$\gamma_{PD} = k \frac{\sqrt{K_1}}{J_s}$$

Magnetostricção

- Ferro não é CCC!
- Podemos supor que o átomo de Fe é um elipsóide, e não esférico.
- Estrutura fica tetragonal,
- Mas é apenas 1,00001 maior na direção de magnetização.
- Quando magnetizado, aumenta de comprimento na direção do campo.
- Só alteração de domínios a 90° causa magnetostricção
- É reversível: aplicação de tensão altera magnetização!



Magnetostricção é anisotrópica



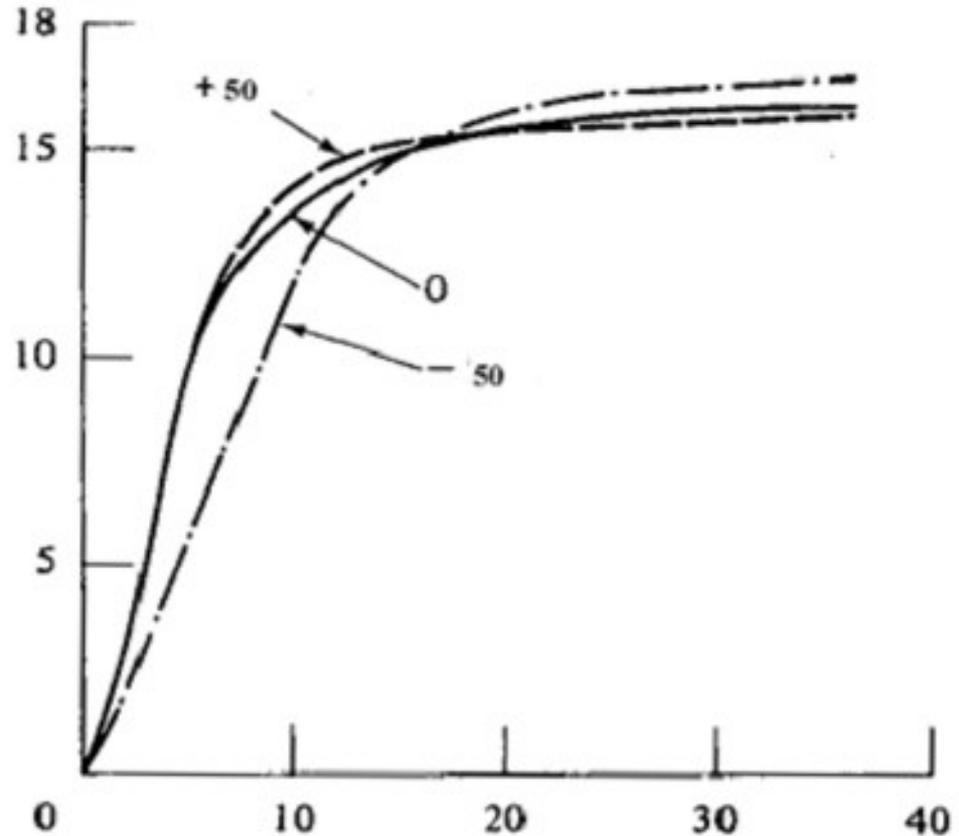
Num monocristal, magnetostricção varia com a direção.
Num policristal, dependerá da textura do material, e induz tensões.

Efeito magnetoelástico

Em materiais policristalinos, O efeito de tensões elásticas é complexo e depende da textura do material.

Na figura, tração aumenta a permeabilidade entre 1,1 e 1,5T, mas é desfavorável acima de 1,5T.

Efeito da compressão é inverso mas não simétrico em intensidade.



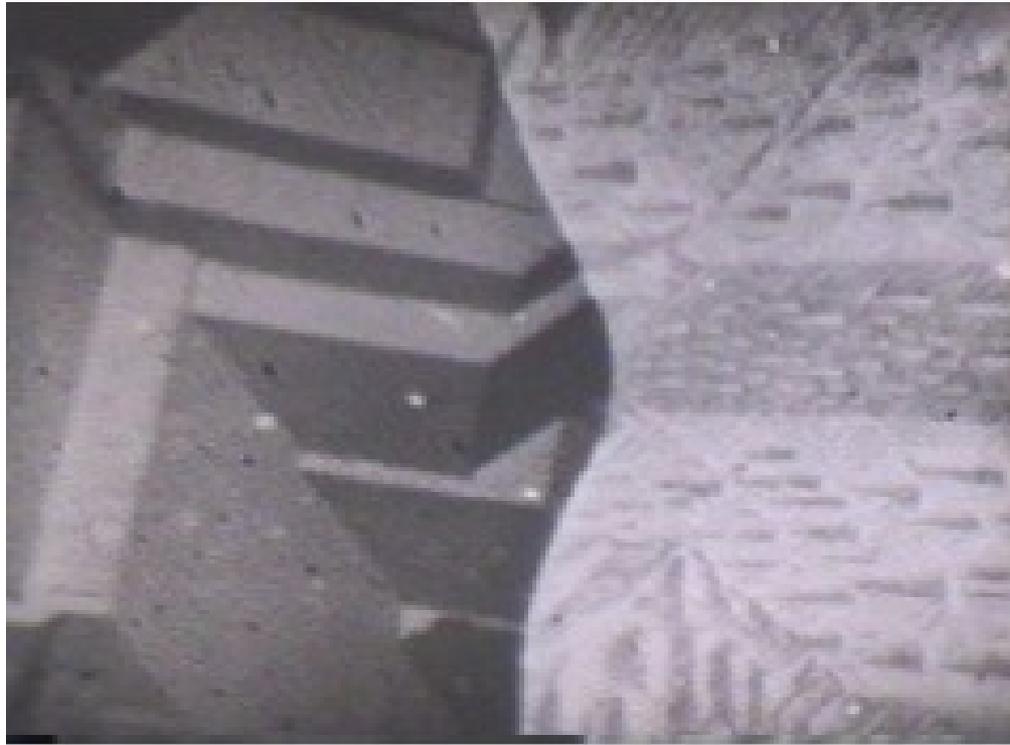
Numa situação simplificada, com lambda isotrópico, a energia é

$$E_{\sigma} = -\frac{3}{2} \lambda \sigma \cos^2 \phi$$

Onde ϕ é o ângulo entre σ e H.

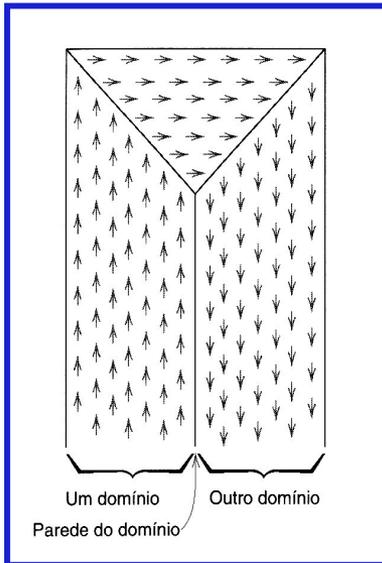
Domínios Magnéticos

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

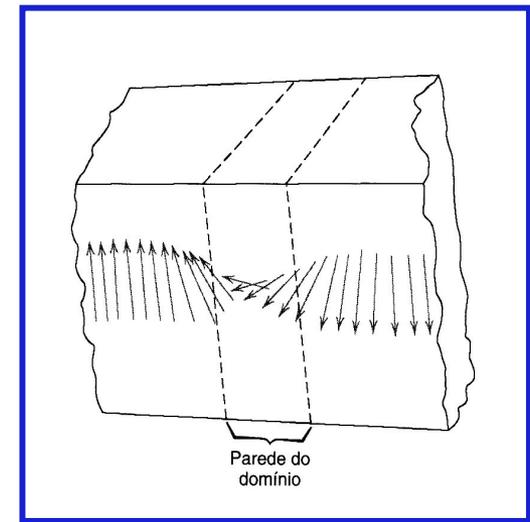


- **DOMÍNIOS** são regiões volumétricas microscópicas onde todos os momentos magnéticos atômicos estão alinhados, tendo mesma direção e sentido

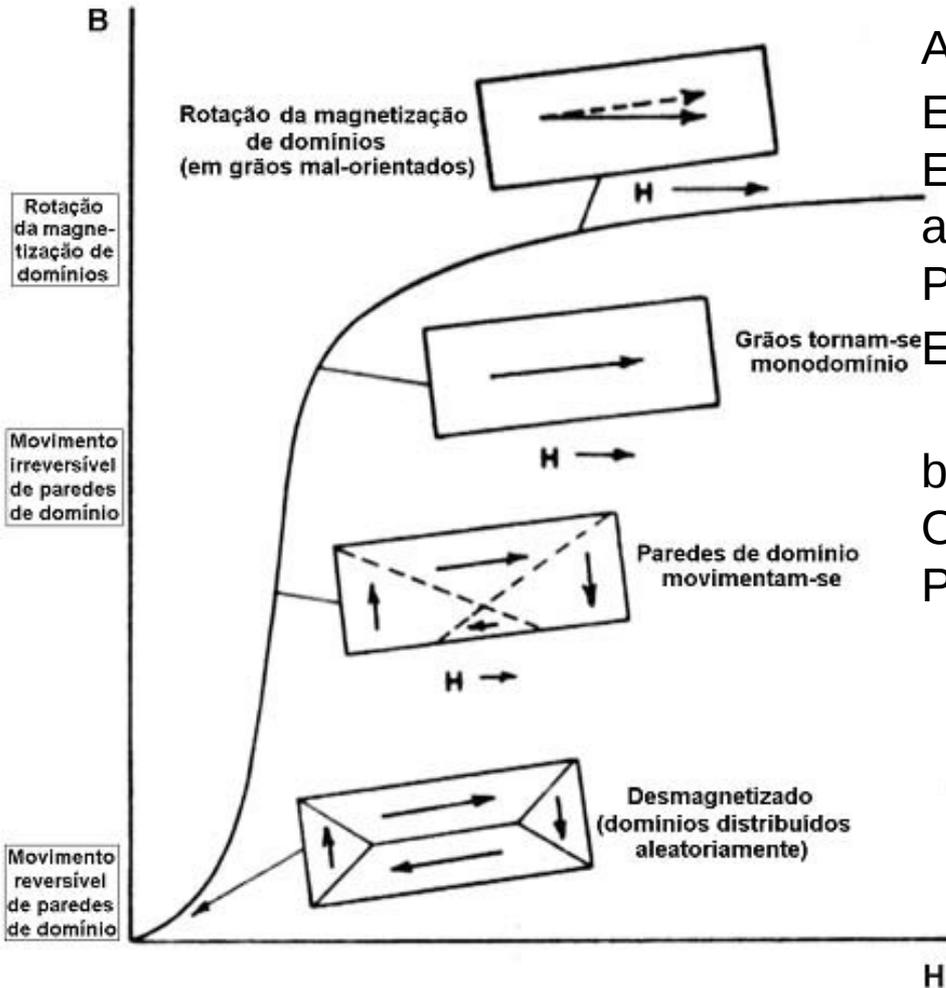
Dentro de cada domínio está magneticamente saturado, ou seja, sua magnetização está no valor máximo possível.

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



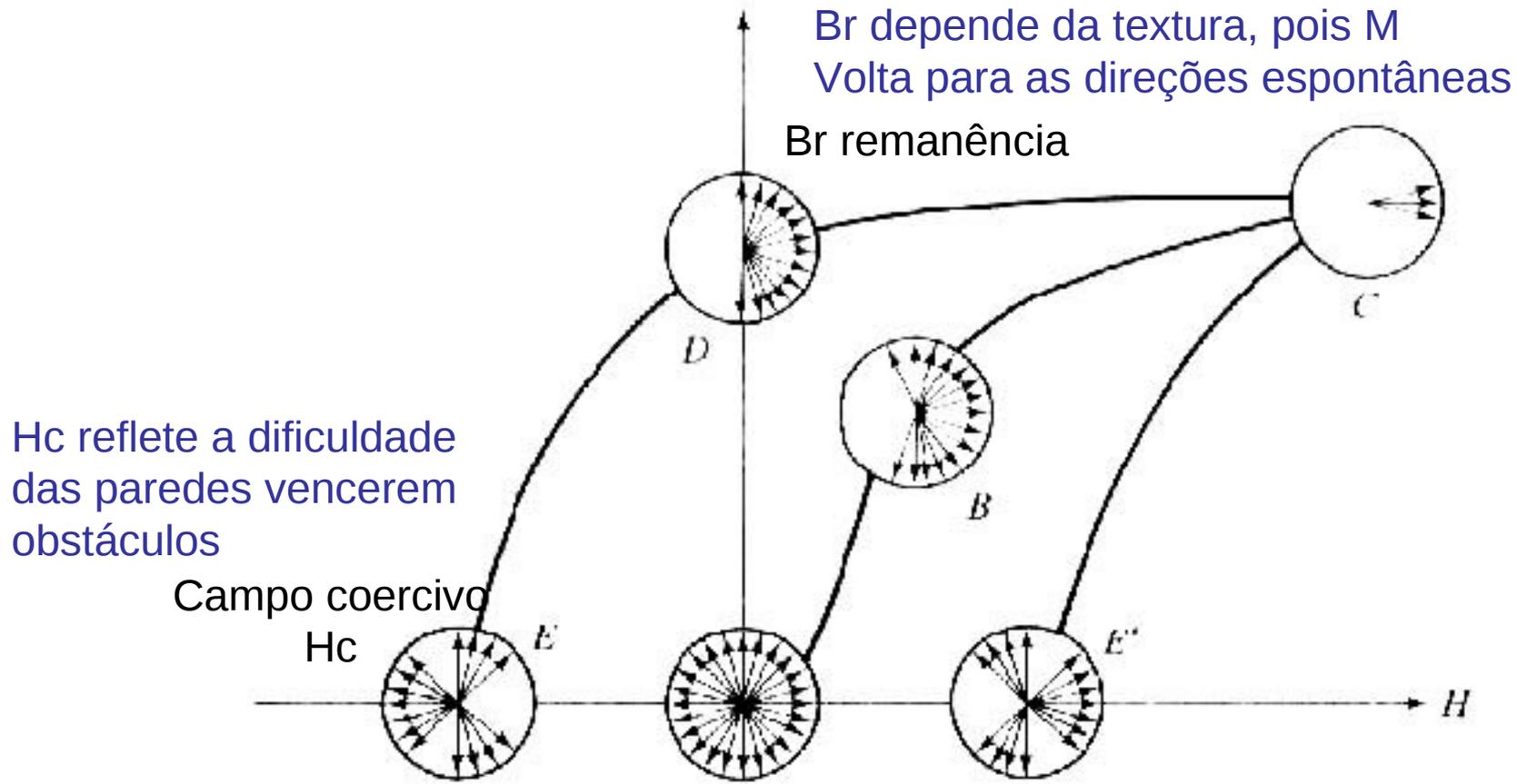
A aplicação de H aumenta E_{ms}
Em vários domínios.

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.

Magnetização e estrutura de domínios



Mudanças na estrutura de domínios durante a magnetização, representada pela projeção dos vetores de magnetização de todos os domínios num só ponto

Fim da 1^a aula

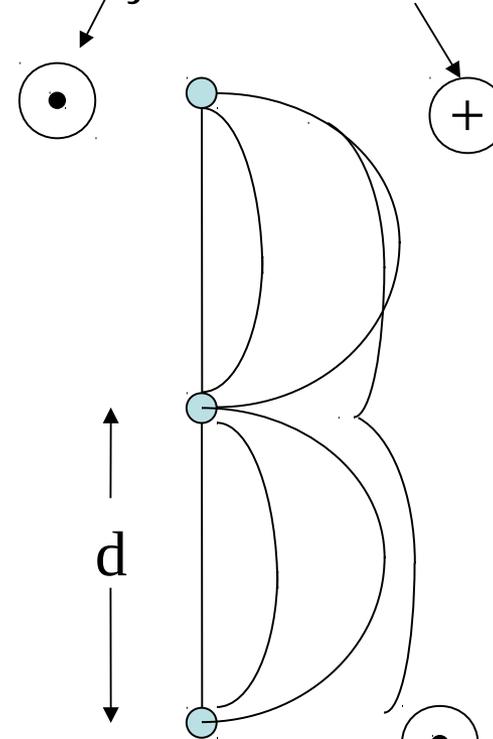
Teste será liberado no dia 10/5 ficando ativo até o dia 14
Gabarito será publicado após o fechamento do teste 8

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.

Direção dos domínios



● Campo crescente

● Campo aplicado

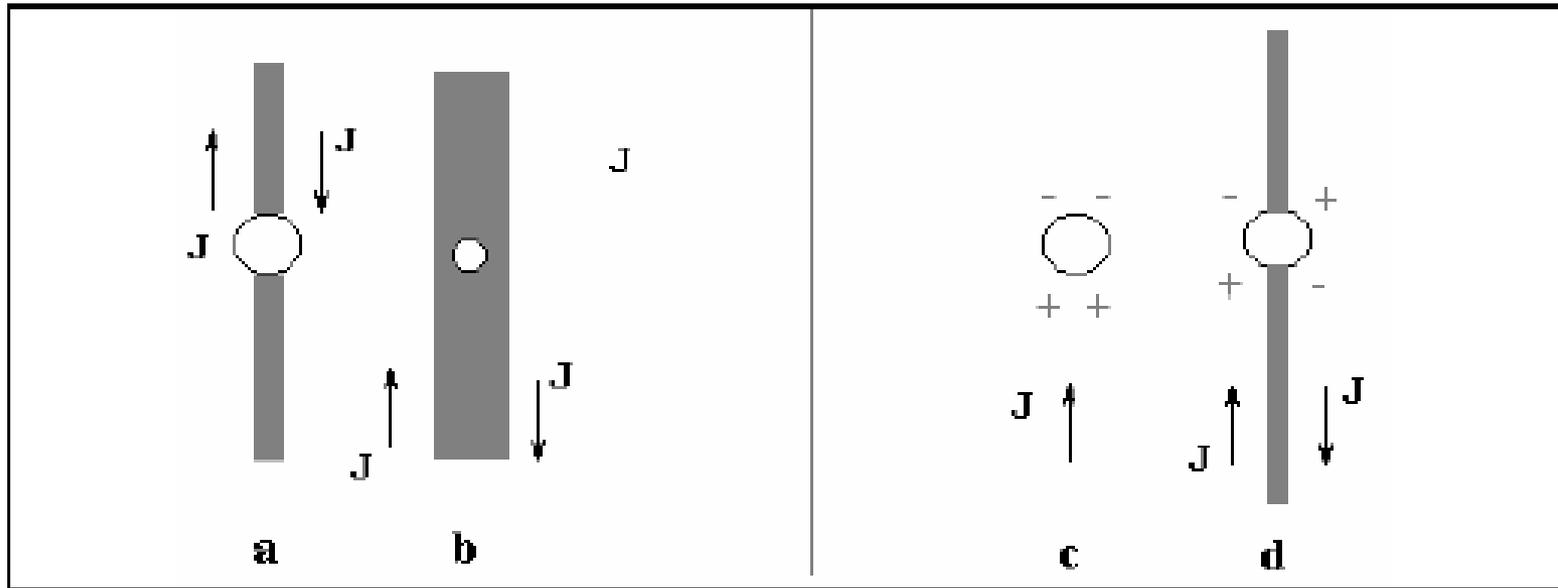
Sem campo

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

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

Ancoramento de PD

- A situação mais simples é o ancoramento por segundas fases (inclusões, carbetos)



Inclusões menores que a espessura da PD reduzem a energia da PD

Inclusões maiores que a espessura da PD reduzem a energia magnetostática do sistema inclusão-matriz

Efeito do Tamanho de grão no Hc

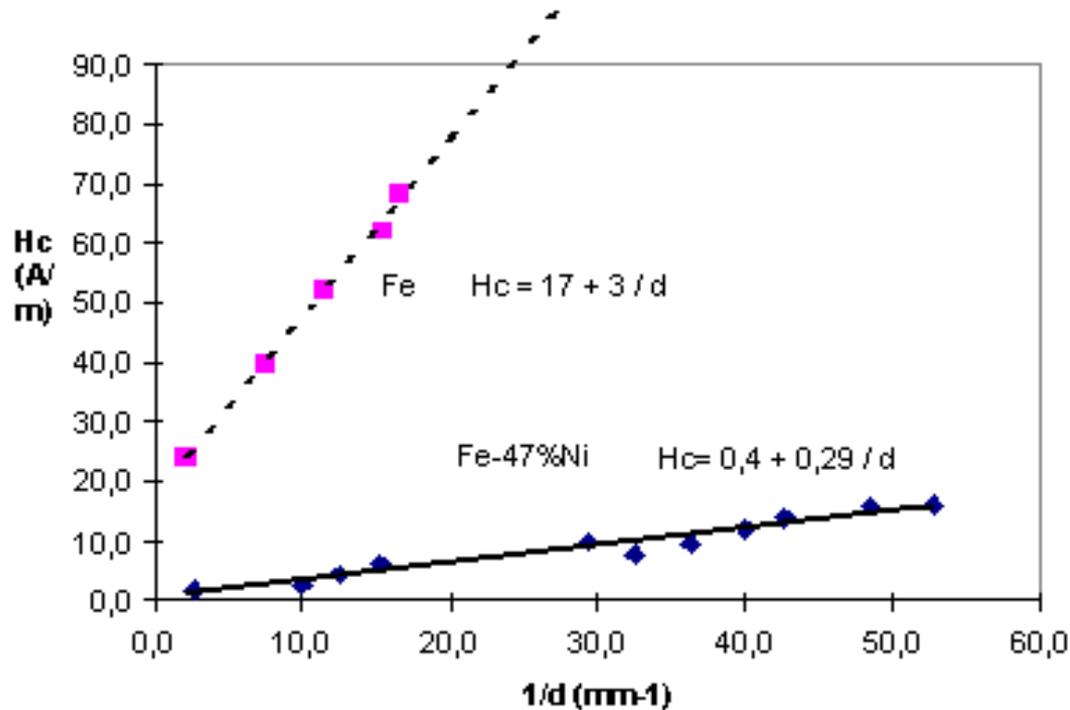


Figura mostra a importância do K_1 (constante de anisotropia)

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

$$H_c = \text{constante} * \frac{\sqrt{K_1}}{d} \quad \frac{H_c^{Fe}}{H_c^{FeNi}} = \sqrt{\frac{K_1^{Fe}}{K_1^{FeNi}}} = \sqrt{\frac{48.000}{800}} = 7,7$$

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

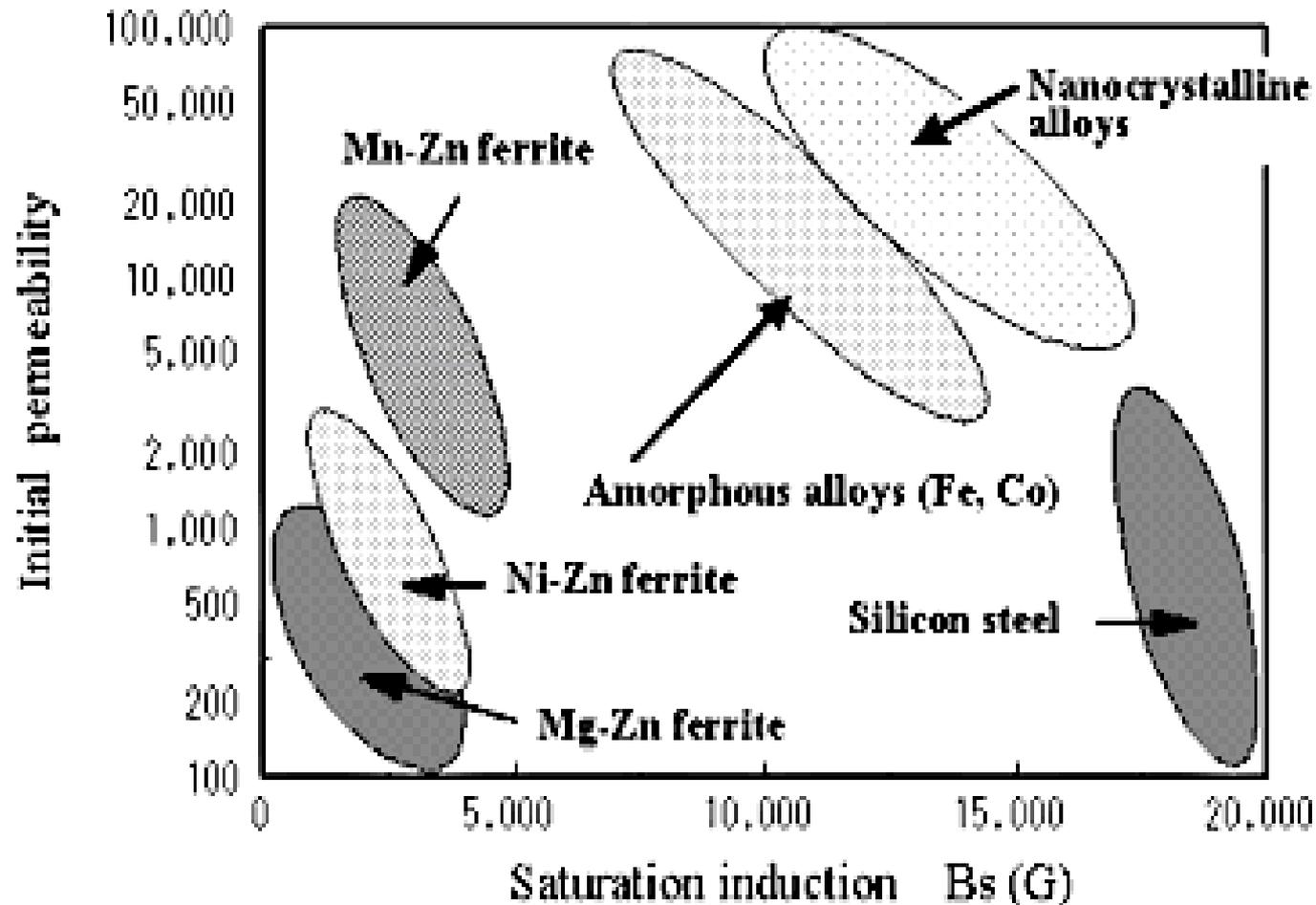
Notar que parede move-se
aos saltos: Ruídos de Barkhausen

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

Materiais magneticamente moles

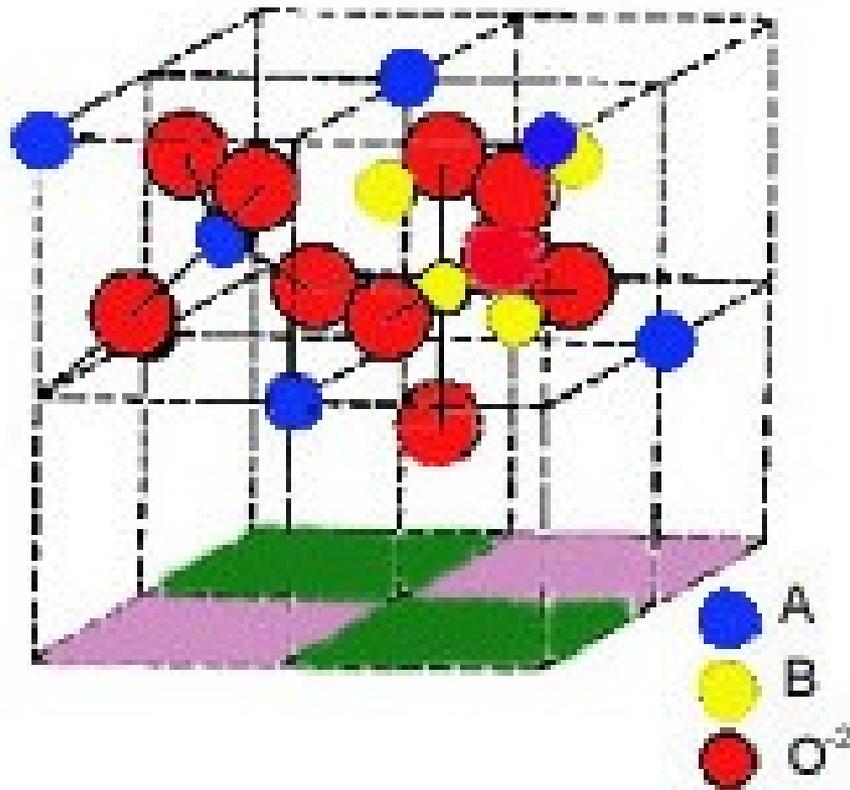
- Aços para fins eletromagnéticos
- Ferritas de manganês zinco
(Mn,Zn)O.Fe₂O₃.
- Ligas FeNi
- Ligas FeCo
- Metais amorfos (vidros metálicos)
- Ligas nanocristalinas

Materials Magnetically Moles



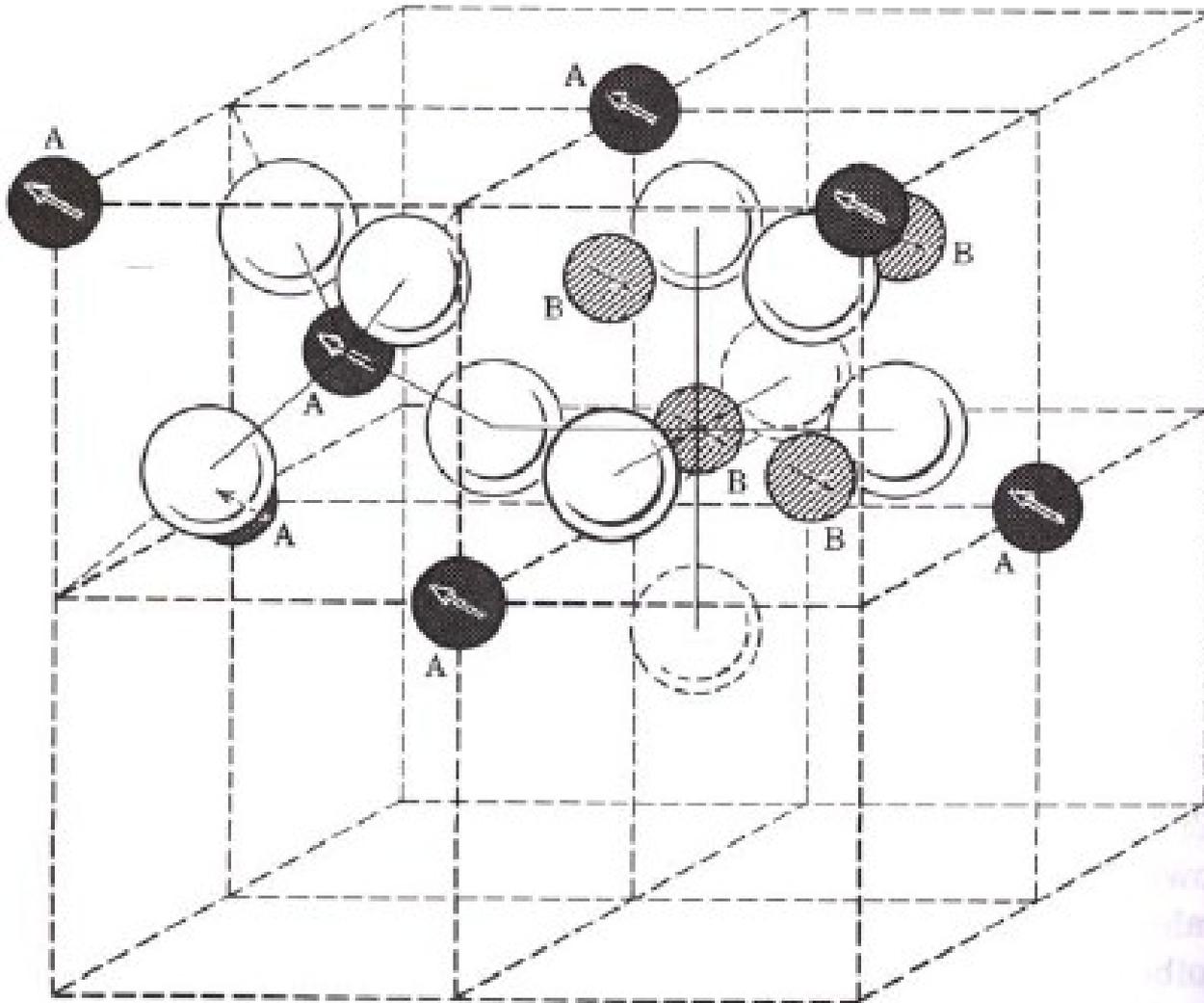
Origem do magnetismo das ferritas

■ Estrutura Cristalina das Ferritas



- ✓ Estrutura cúbica de face centrada;
- ✓ Tipo espinélio;
- ✓ Fórmula geral AB_2O_4 ;
- ✓ Oito fórmulas unitárias por célula unitária;
- ✓ Sítio tetraédrico e octaédrico.

Estrutura do $(\text{MnZn})\text{Fe}_{2+x}\text{O}_4$

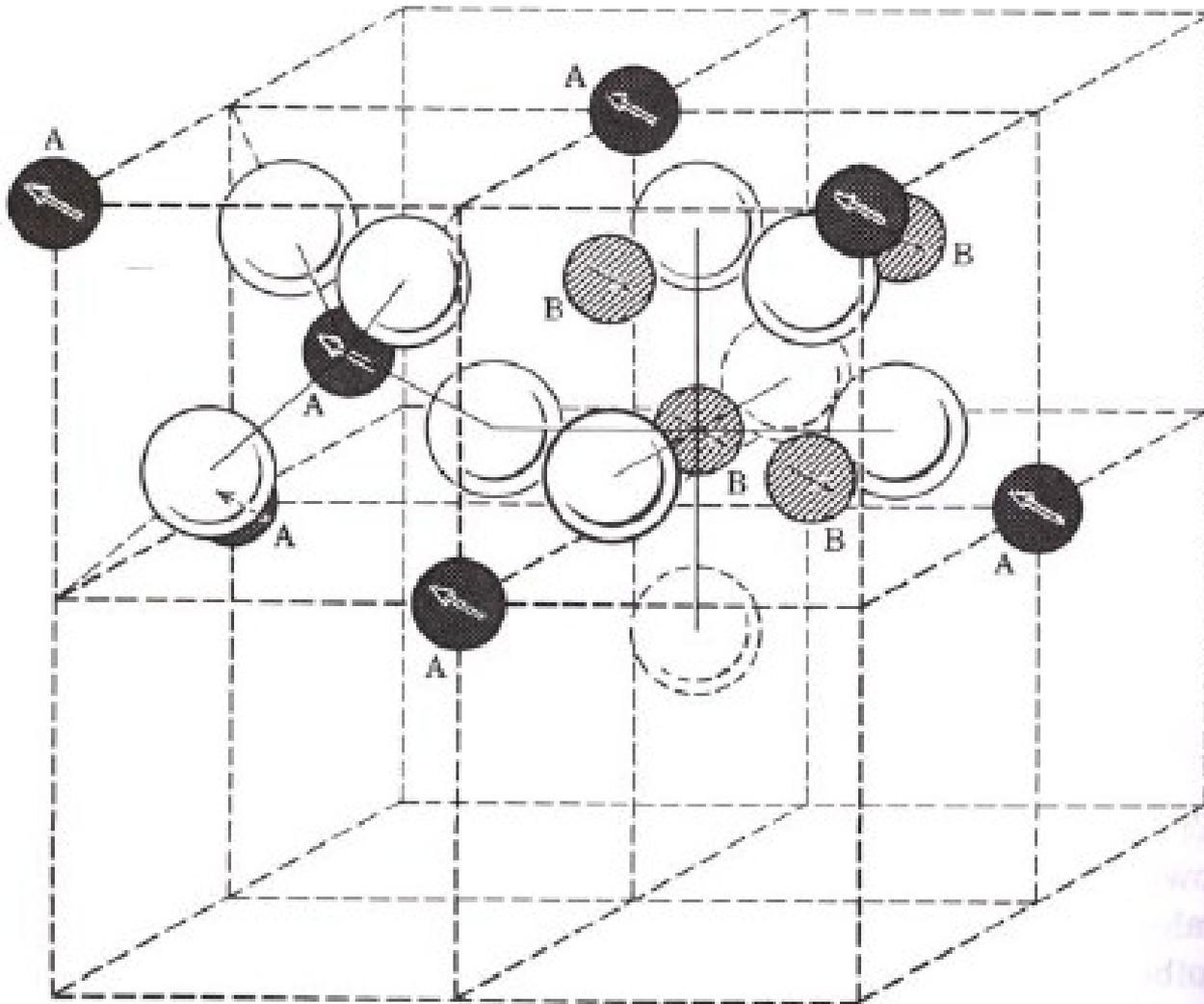


Espinélio normal

A: sítio tetraédrico
Valência 2+
1at / form unit

B: sítio octaédrico
Valência 3+
2 at / form unit

Estrutura magnética



Ferrimagnetismo

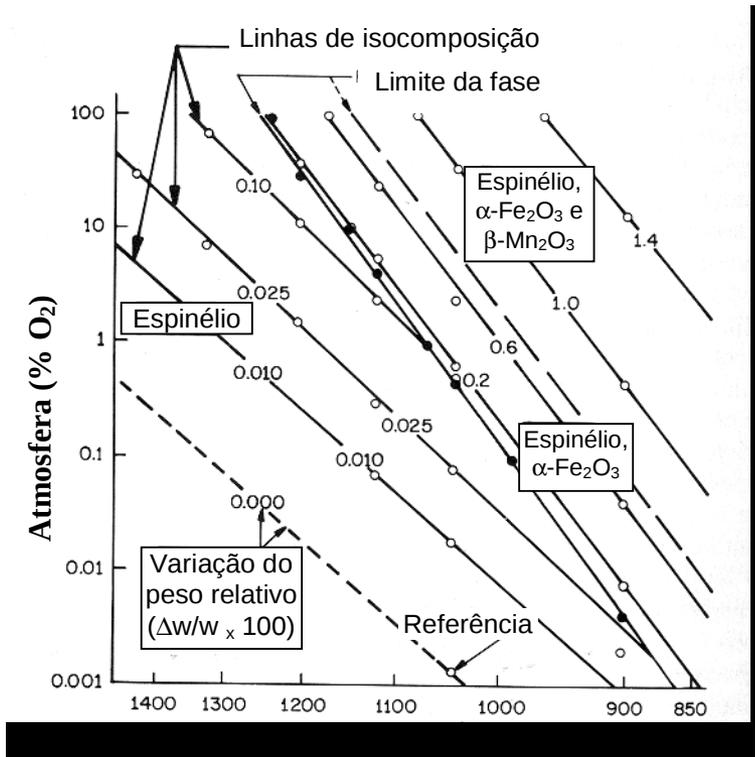
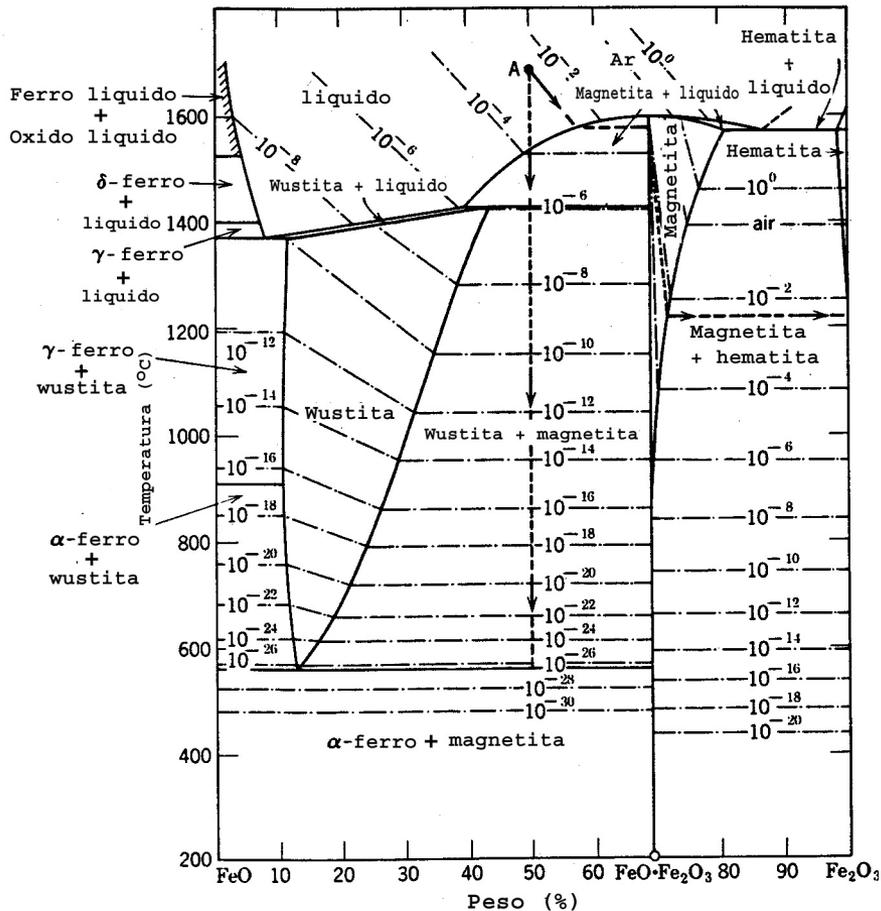
Direção de magnetização espontânea: $\langle 111 \rangle$

Sítios A ↓

Sítios B ↑↑

■ Efeito da Atmosfera de Sinterização

✓ Ar é redutor para hematita, 1400°C.



- ✓ Ar é redutor para fase espinélio, 1200°C;
- ✓ Excesso de hematita é reduzido → introdução de íons Fe^{2+} ;
- ✓ Espinélio é hiper estequiométrico em oxigênio → introdução de Fe^{3+} .

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”

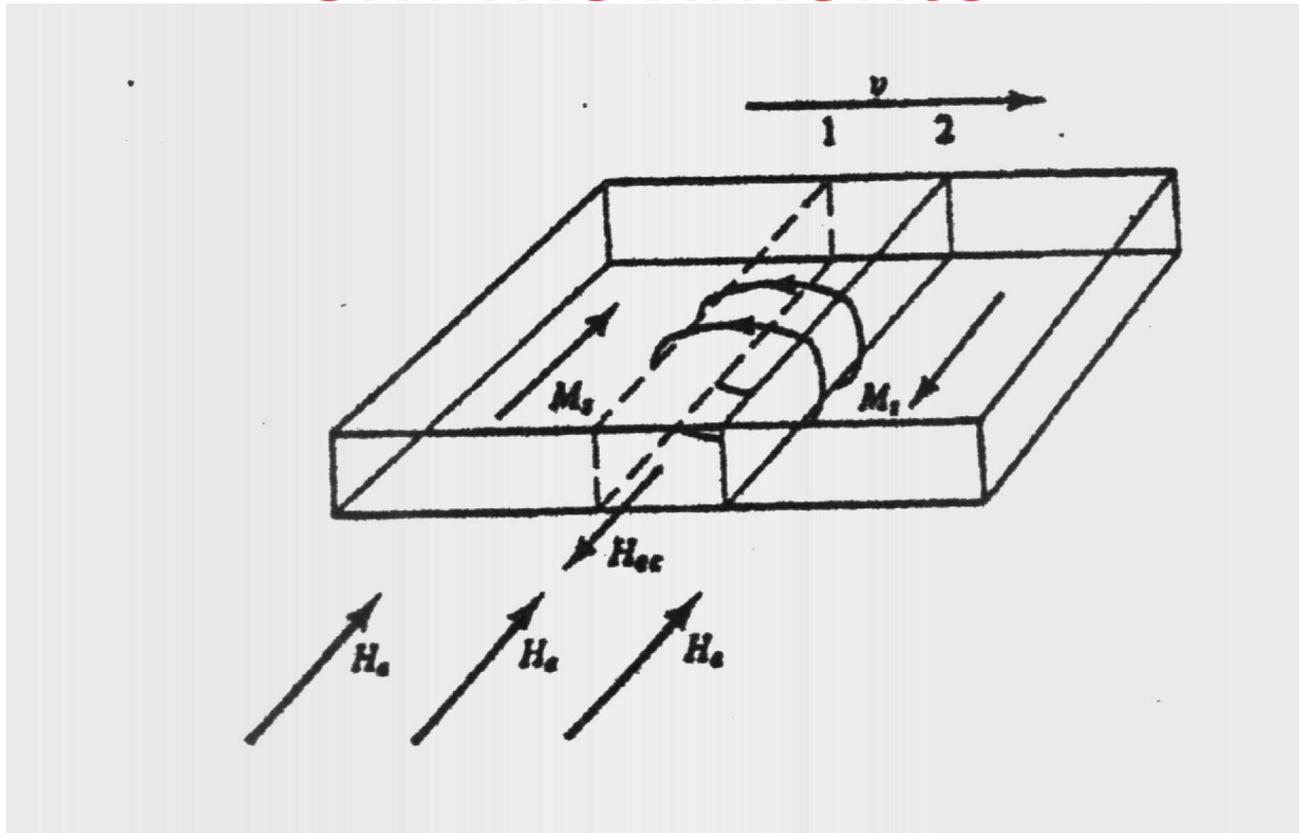
3 parcelas das perdas

- Perdas histeréticas
 - Depende da microestrutura
- Perdas parasitas
 - Depende da resistividade elétrica do material e da espessura
- Perdas de excesso
 - Depende da microestrutura e da resistividade.

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



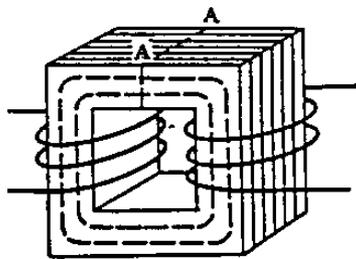
Esse mecanismo é um dos mecanismos da perda histerética
E é o principal das perdas de excesso
Circula corrente pois surge $V \propto dB/dt$ (lei de Faraday)

Perdas parasitas

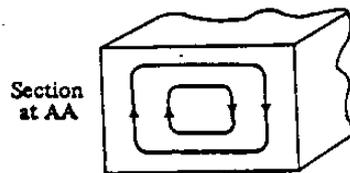
MECANISMO:

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

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

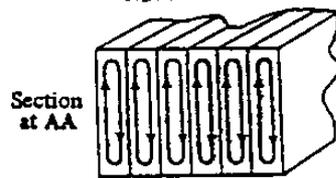


(a)



Solid core

(b)



Laminated core

(c)

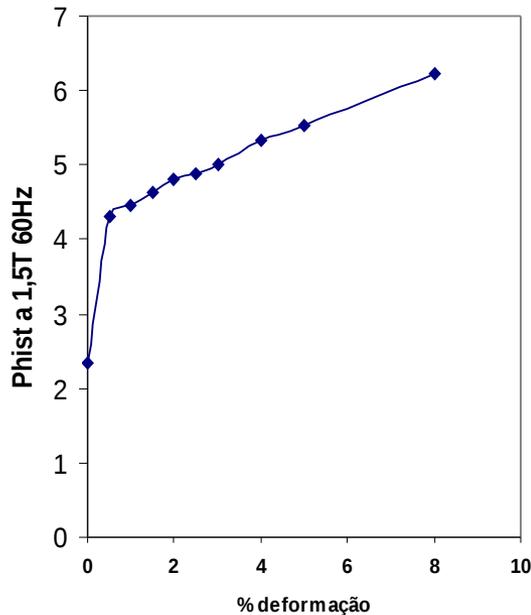
B indução máxima, T
F é frequência, Hz
e é espessura, m
d é densidade, kg/m³
 ρ é resistividade, em Ωm

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

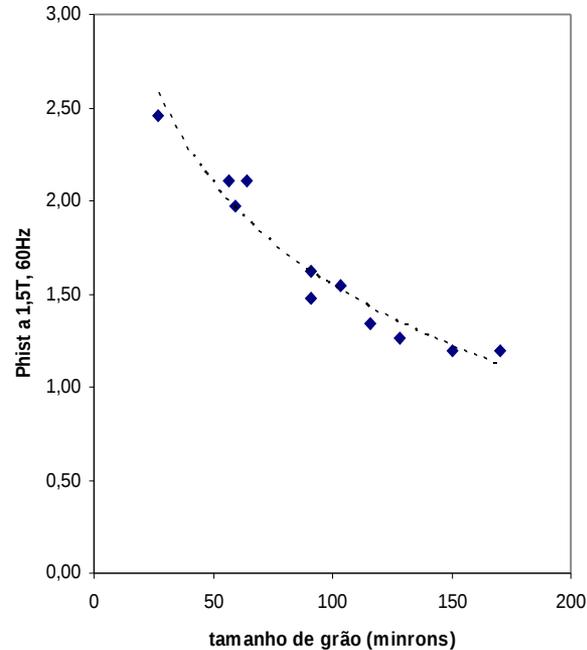
Exercício

- 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/m³.

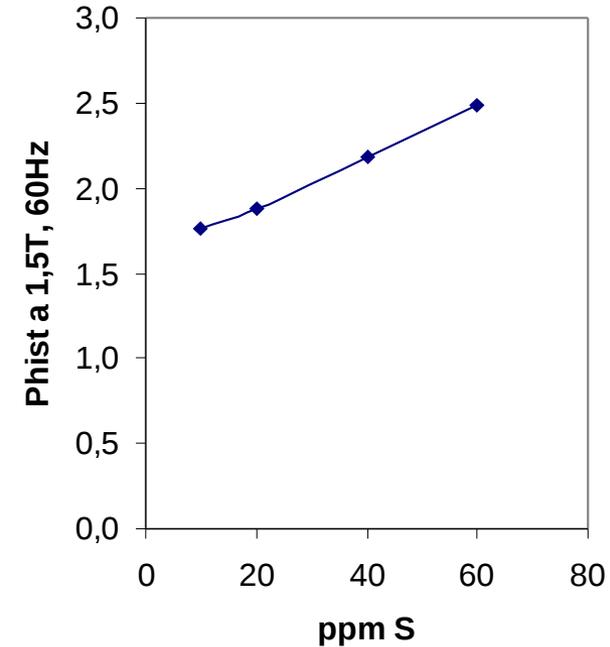
Perdas histeréticas



Deformação plástica
Aumenta perdas



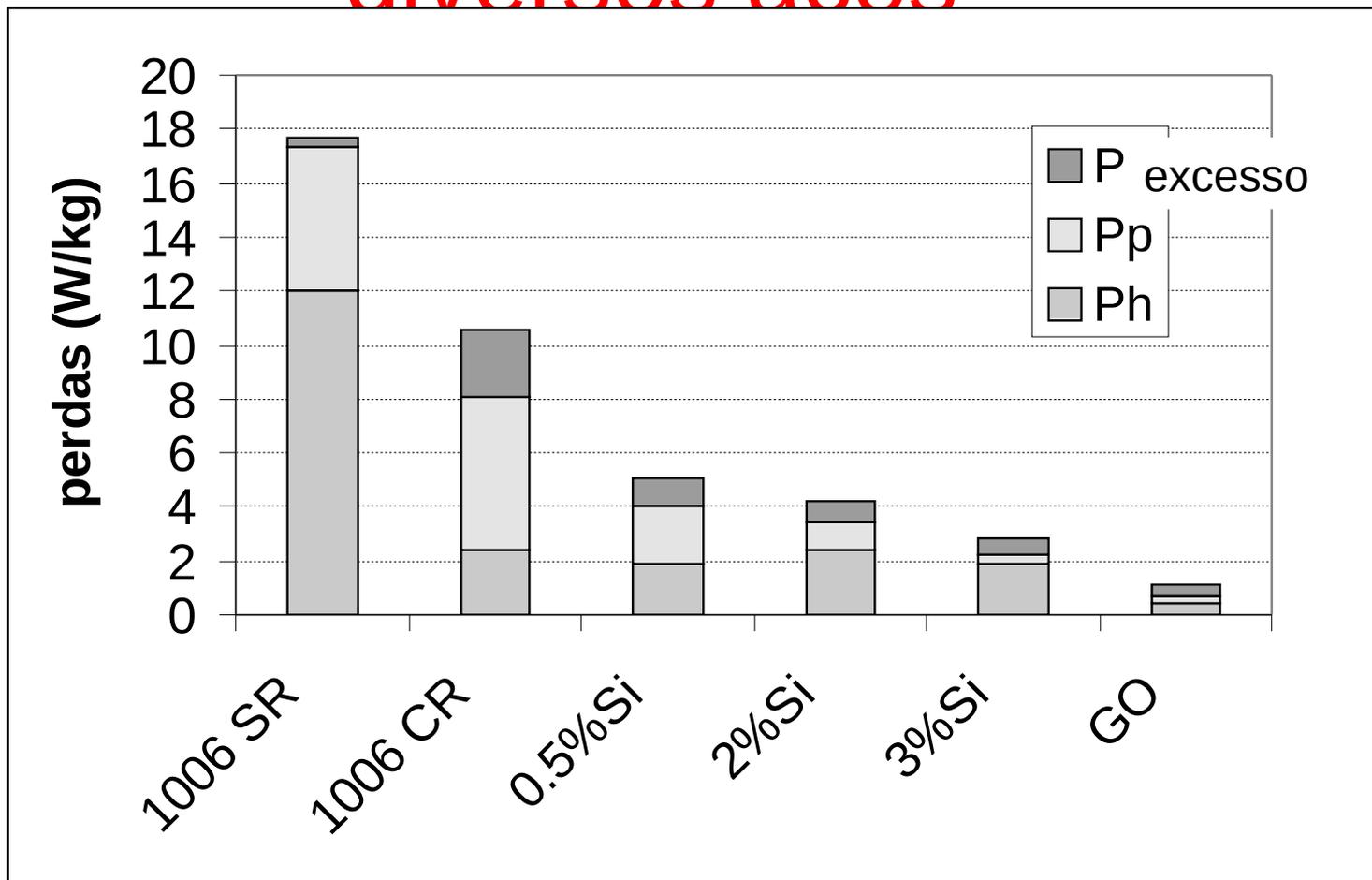
↑ TG ↓ perdas



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

Efeito da textura é mais difícil de descrever

Comparação de perdas em diversos aços



Perdas a 1,5T, 60Hz, espessura 0,5mm

SR: sem recoz.

CR com recoz.

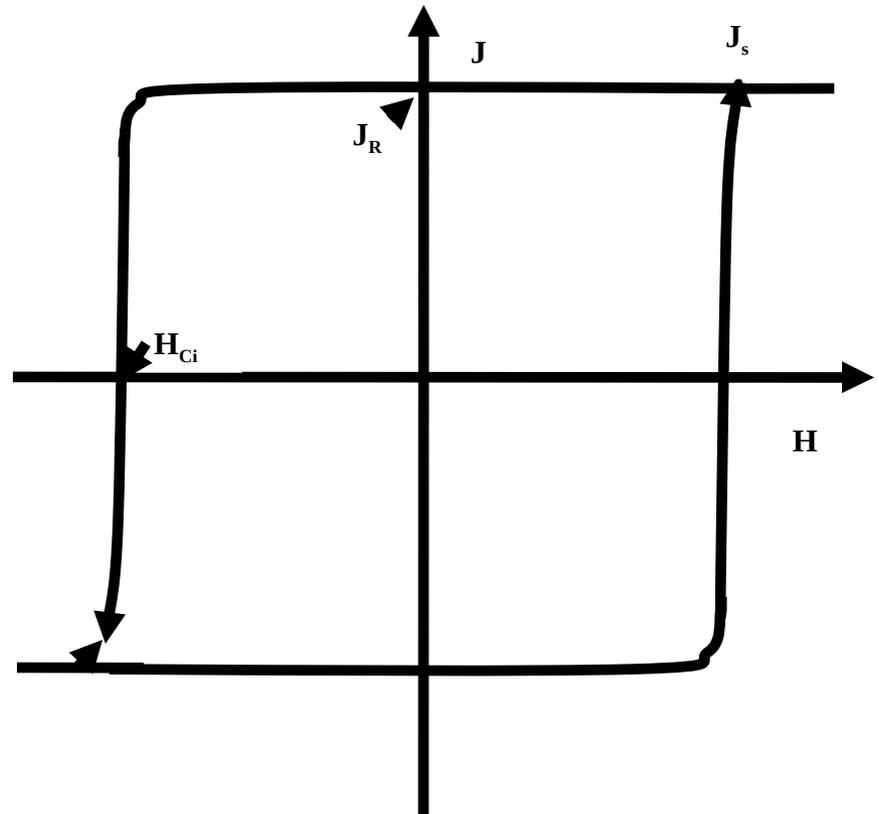
GO: Grão orientado

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 ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)

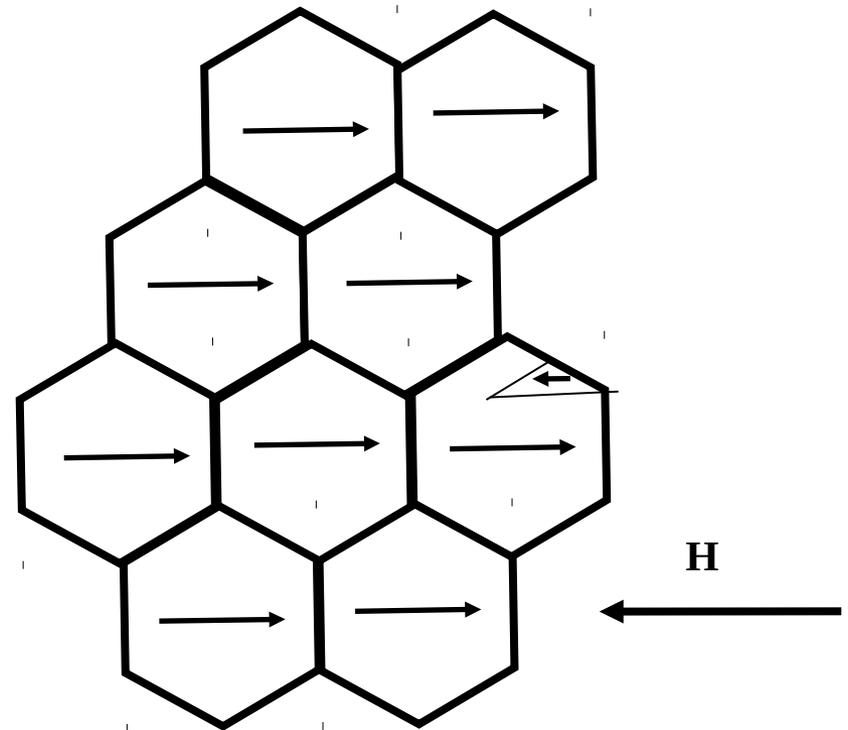
A curva de histerese do ímã anisotrópico ideal

- 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.



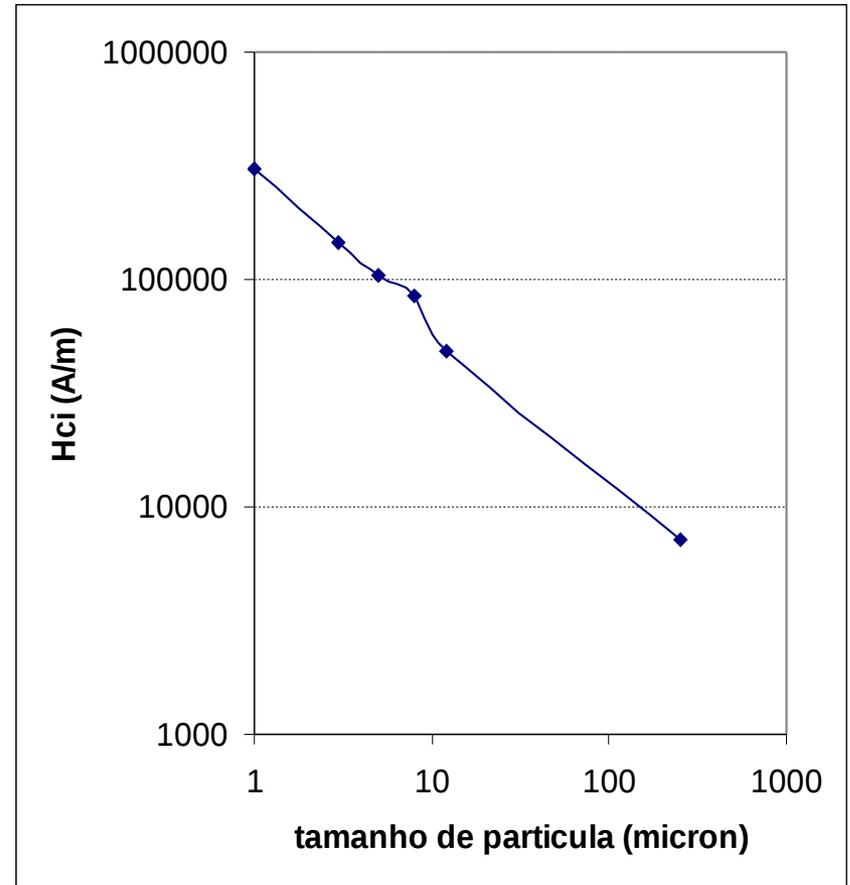
A nucleação dos domínios contrários e o campo coercivo

- 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, onde possivelmente K_1 seja menor

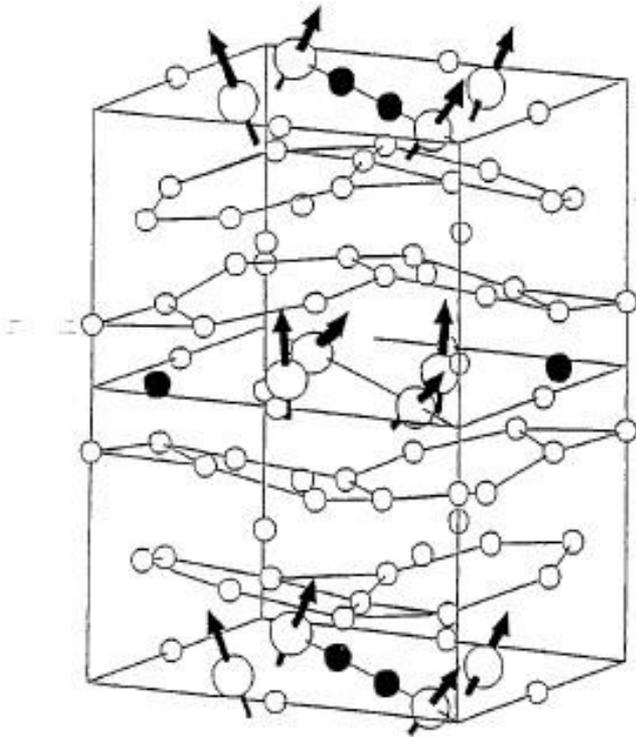


Efeito do tamanho de grão no campo coercivo

- 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



Nd₂Fe₁₄B



Estrutura cristalina: tetragonal

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

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

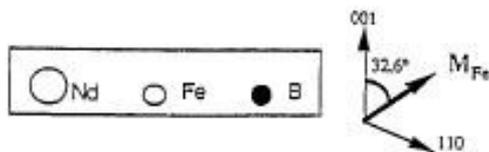
Momento do Nd muito baixo, mas K_1 alto devido aos elétrons f.

Remanência = 1 a 1,3T

Coercividade = 875 a 990 kA/m

Temp. Curie = 320°C

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



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 Hci

Orientação: para aumentar Br

Compactação: para dar resistência “a verde”

Sinterização: para densificar e aumentar Br

Magnetização

referências

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