

Interação Spin-Órbita (SO) e Anisotropia Magnética (AM)

Interação Spin-Órbita (SO)

Acoplamento ou Interação Spin-Órbita (Russel-Saunders)

- Interações entre momentos orbital e spin

$$-\lambda. \vec{l}_i \cdot \vec{s}_j$$

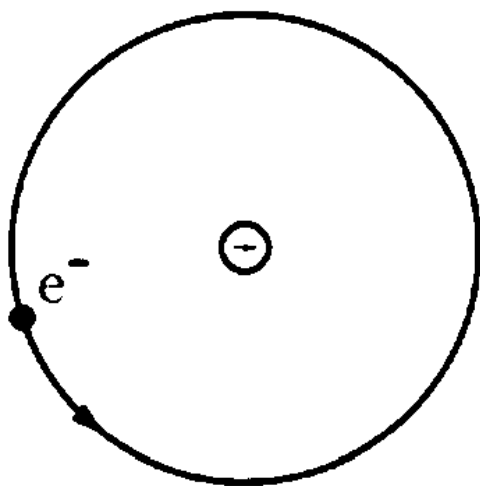
A interação é importante em um mesmo átomo: $i=j$

Em um único átomo de muitos elétrons ...

- **L interage com S**
- A energia de interação $H_{SO} = -\lambda \cdot \vec{L} \cdot \vec{S}$
 - $\lambda < 0$, se a camada for preenchida menos que a metade.
 - $\lambda > 0$, se a camada for preenchida mais que a metade

Origem da Interação SO

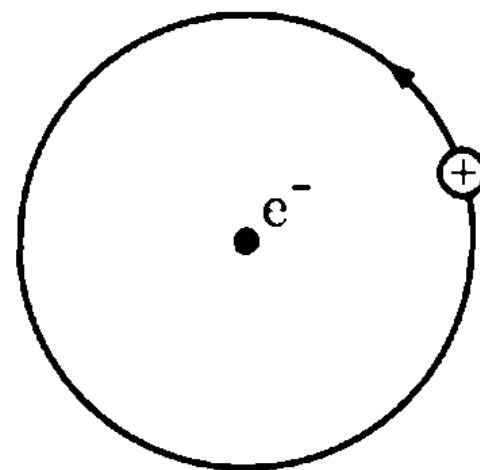
- Considere um elétron orbitando ao redor de um átomo.



- Referencial do núcleo

O átomo é mostrado em um quadro inercial com o elétron em repouso no qual o núcleo parece estar orbitando ao redor do elétron

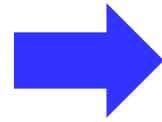
ou



- Referencial do elétron

- O núcleo em órbita constitui uma corrente que dá origem a um campo magnético igual a:

$$\mathbf{B} = \frac{\boldsymbol{\varepsilon} \times \mathbf{v}}{c^2}$$



Esta equação vem da transformação de campos elétricos e magnéticos em relatividade especial.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = -\nabla V(r) = -\frac{\mathbf{r}}{r} \frac{dV(r)}{dr}$$

ε é o campo elétrico no elétron devido ao núcleo; e $V(r)$ é a energia potencial correspondente.

- Este campo magnético interage com o spin do elétron para dar um termo no Hamiltoniano

$$H_{so} = -\frac{1}{2} \mathbf{m} \cdot \mathbf{B}$$

$$\hbar \mathbf{L} = m_e \mathbf{r} \times \mathbf{v}$$

$$\mathbf{m} = (ge\hbar/2m_e) \mathbf{S}$$

$$H_{so} = \frac{e\hbar^2}{2m_e c^2 r} \frac{dV(r)}{dr} \mathbf{S} \cdot \mathbf{L}$$

Depende da magnitude do campo elétrico entre o núcleo e o elétron e é inversamente à distância

Interação spin-órbita intrínseca, uma interação entre o spin e a parte orbital da função de onda de um elétron em um átomo.

Anisotropia Magnética

(AM)

Anisotropia em sólidos

A propriedade física do material é
função da direção

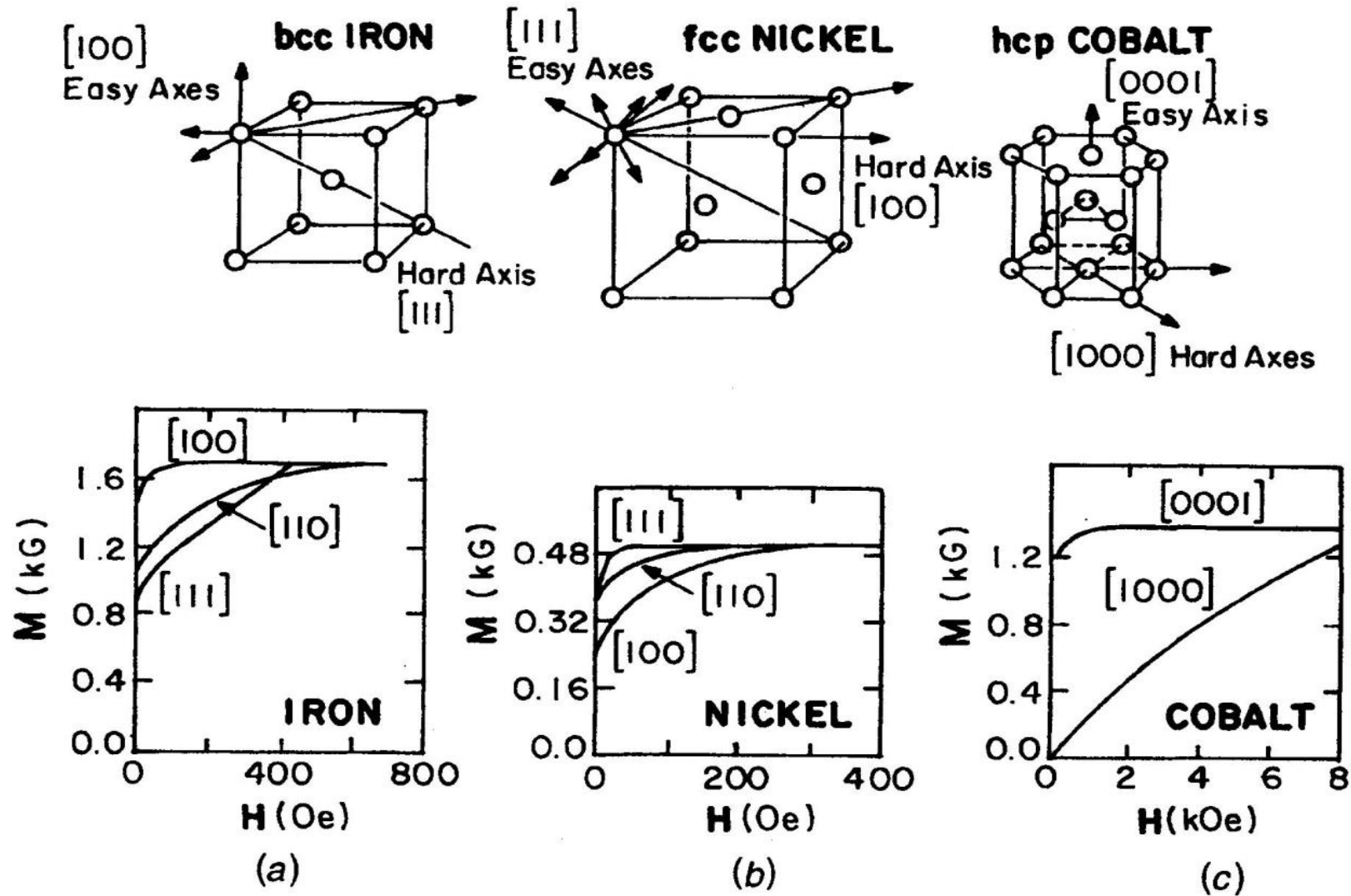
Anisotropia_Magnetocristalina

- Os momentos magnéticos se alinham preferencialmente em uma dada direção da rede cristalina:
 - **direção de fácil magnetização**

Origem da AM

- **Anisotropia Magnetocristalina (AMC) – Intrínseca**
 - Simetria Cristalina e Ordenamento de Pares Atômicos
- **Anisotropia Extrínseca**
 - Forma da amostra (anisotropia de forma - AF)
 - Tensões Internas e Externas (anisotropia induzida/construída - AI)
- **AM se manifesta em χ (susceptibilidade magnética) ou μ (permeabilidade magnética)**

Anisotropy Magnetocristalina - monocristais

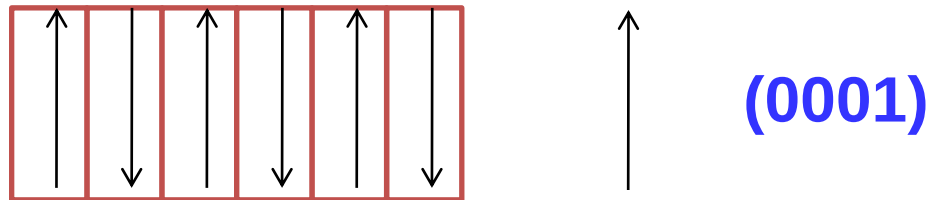


Anisotropia Magnetocristalina

Domínios

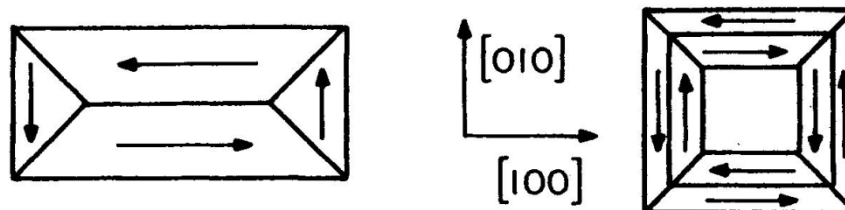
- 1) Anisotropia Uniaxial – Co

- Preferência de magnetização em uma só direção em dois sentidos .



- 2) Anisotropia Cúbica - Fe e Ni

- Preferência de magnetização em 3 direções em 6 sentidos .



Origem da Anisotropia Magnetocristalina

Como os momentos magnéticos locais distinguem entre direções cristalográficas diferentes?

Ou em outras palavras

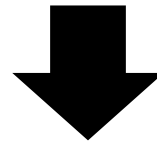
Como o momento magnético se acopla à rede?

Interação Spin-Órbita (spin acoplado à forma e orientação do orbital)

+

Ligações Químicas e meio externo (campo cristalino)

Se o campo cristalino é de baixa simetria e se os elétrons da ligação entre átomos têm distribuição de carga assimétrica ($L_z \neq 0$)



- Os orbitais atômicos interagem com o campo cristalino de baixa simetria criando uma anisotropia nos orbitais.**
 - A anisotropia dos orbitais causará uma anisotropia na distribuição do spin que acompanham a órbita.**
-
- Ou seja, certas orientações dos orbitais moleculares ou da distribuição de carga dos elétrons ligantes são energeticamente favoráveis**

Anist Magnetocristalina + Aplicação de Campo (H)

- O campo H causará um torque em μ_s , mas S continuará acoplado a L. Há duas energias envolvidas:
 - A energia do campo cristalino (D): que acopla L à rede
 - Interação Spin-Órbita: $\lambda L.S$

Caso 1) $D > \xi L.S$ – metais de transição e ligas metálicas

μ_s “sentirá” influência de H, enquanto que μ_L é praticamente “quenched”, isto é, preso a uma dada direção do campo cristalino ($L=0$).

Caso 2) $\lambda L.S > D$ – terras raras

$\mu_J = \mu_s + \mu_L$ acoplados “sentem” a influência de H, pois L não é tão fortemente ligado ao campo cristalino.

Anisotropia Uniaxial

- Outros materiais além do Co: $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}_1$, ferritas de Bário, etc.
- Para um material uniaxial:

$$E = K_0 + K_1 \sin^2\theta + K_2 \sin^4\theta + \dots$$

– Onde θ é o ângulo entre a magnetização e a direção de fácil magn.

- Se M é paralelo a o eixo c: $\theta = 0^\circ$ e $\rightarrow E = K_0$
- Se M está no plano basal: $\theta = 90^\circ$ e $\rightarrow E = K_0 + K_1 + K_2 + \dots$
- Para o cobalto:

$$K_1 = 4,1 \times 10^5 \text{ J/m}^3 \text{ e } K_2 = 1,5 \times 10^5 \text{ J/m}^3$$

Anisotropia Cúbica

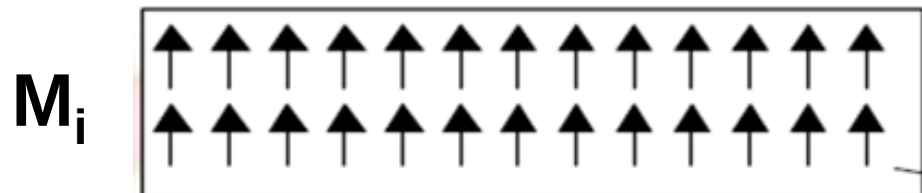
$$E = K_0 + K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_1^2\alpha_3^2) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2 \dots$$

- $K_1 = 5 \times 10^4 \text{ J/m}^3$ e $K_2 \ll K_1$ para o Fe.
- dependem dos cossenos diretores da magnetização α_1 (x), α_2 (y) e α_3 (z).

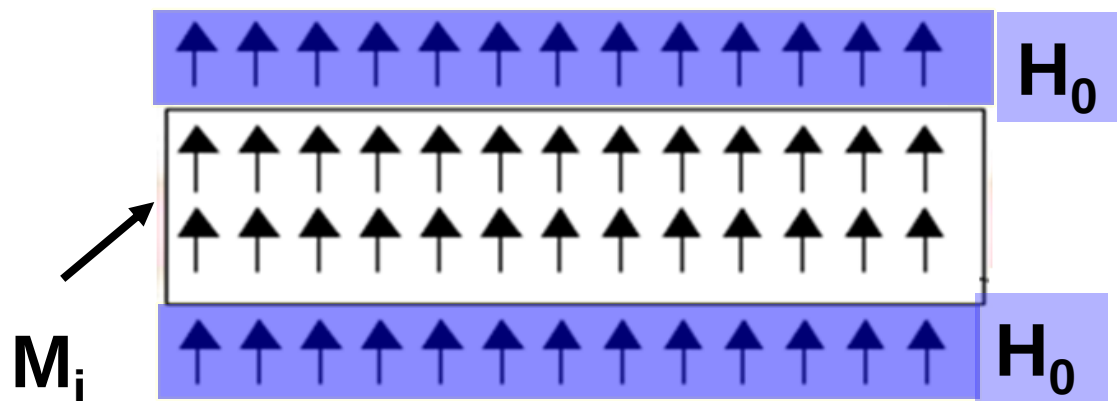
Anisotropia de Forma

- Um material policristalino sem orientação preferencial dos grãos, a anisotropia magnetocristalina resultante pode ser considerada ≈ 0 .
- No entanto, somente se a amostra for esférica, o campo irá magnetizar a amostra da mesma maneira em todas as direções.
- Se não for esférica, será mais fácil magnetizar a amostra na direção do eixo mais longo → **anisotropia de forma**

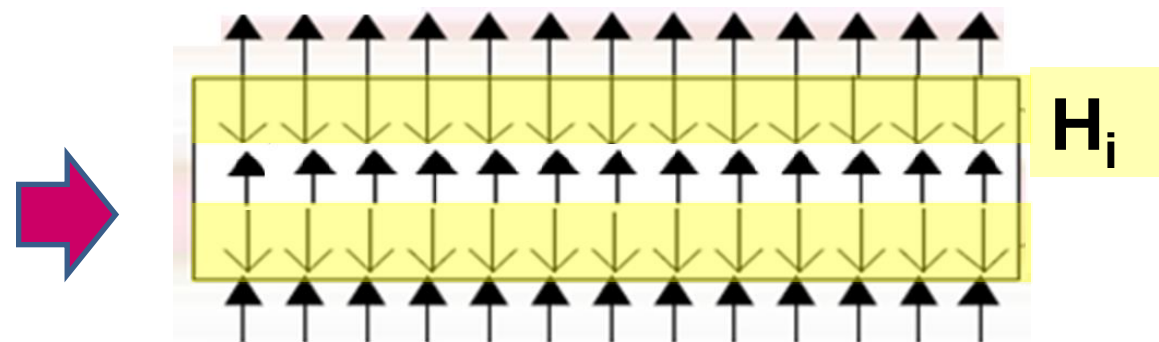
Considere um material magnetizado



Estando ele magnetizado por uma campo magnético H_0



Mas o monopolo formado na superfície não pode existir ($\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$)



Forma-se H_i , contrario a H_0 na superfície, de forma a anular o monopolo.

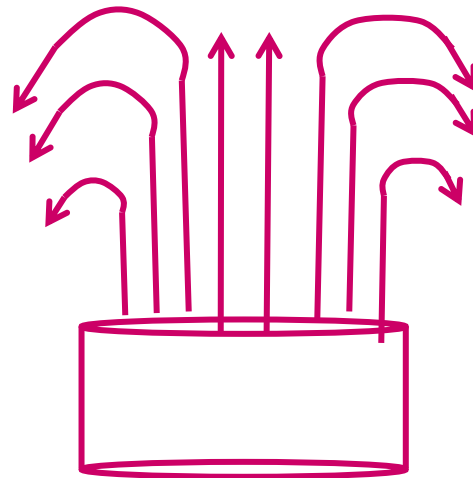
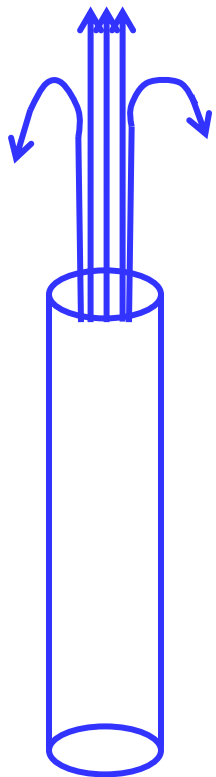
A magnetização interna M_i diminui.

Influência da forma da amostra no processo de magnetização

A razão de aspecto da amostra influencia na medida de magnetização

- ☐ O campo de desmagnetização provoca um efeito de deslocamento na curva de magnetização inicial.
- ☐ Consequentemente tem efeito sobre o valor da permeabilidade inicial ou a susceptibilidade

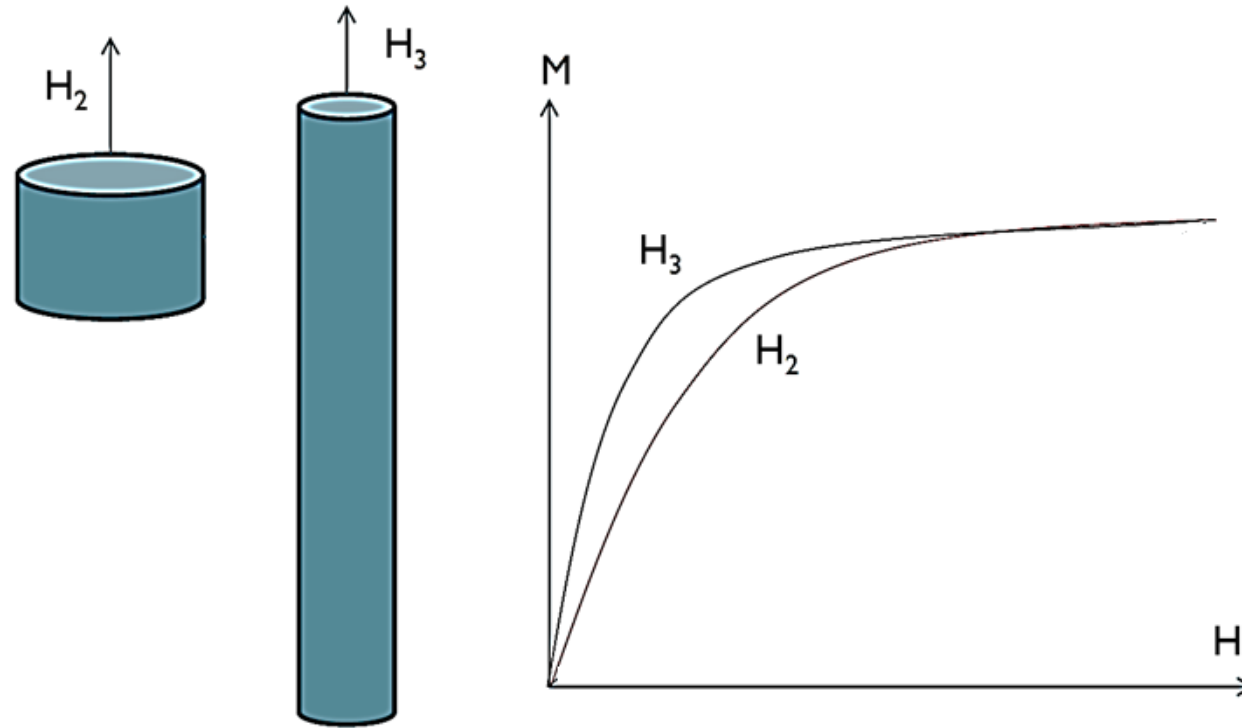
Para um objeto longo e fino, o campo de desmagnetização ao longo do eixo longo é fraco porque os polos são bem separados.



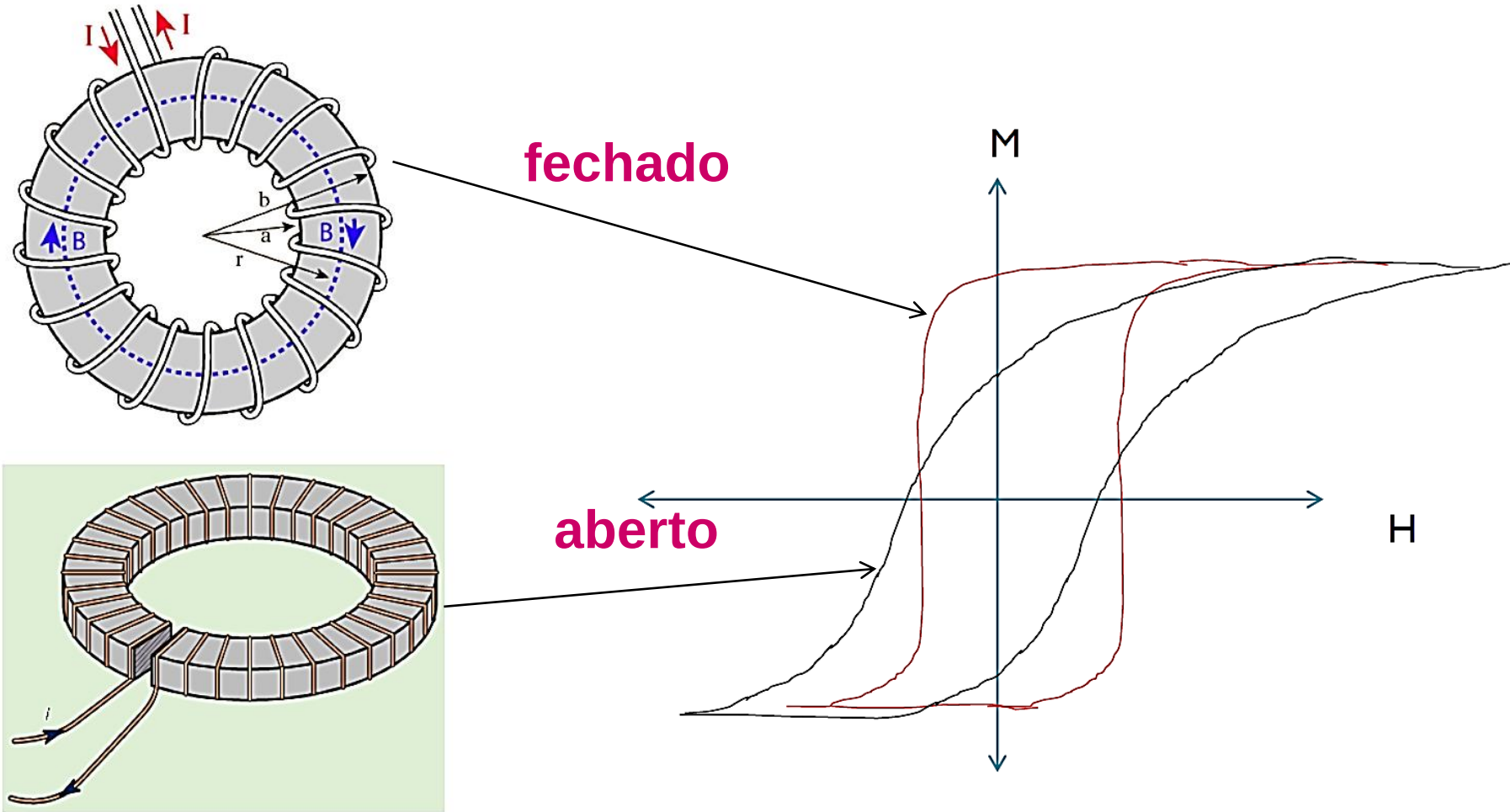
Para um objeto fino e largo, o campo de desmagnetização é grande porque os polos induzidos são próximos.

Anisotropia de Forma

Material ferromagnético



TORÓIDE de um material ferromagnético



Anisotropia de Forma

Campo de desmagnetização

Magnetização - M

Campo de desmagnetização - H_d

$$\vec{H}_d = N_d \vec{M} \Rightarrow \vec{H}_i = \vec{H}_{ef} = \vec{H}_{ap} - N_d \vec{M}$$

H_i = campo interno ou campo efetivo H_{ef}

N ou N_d = fator de desmagnetização; depende da geometria da amostra

Fatores de Desmagnetização - Barras cilíndricas e quadradas

Barra quadrada

Razão de aspecto n	N_d
0.1	0.833333
0.2	0.714286
0.3	0.625000
0.5	0.500000
0.7	0.416667
1	0.333333
2	0.200000
3	0.142857
5	0.090909
7	0.066667
10	0.047619
12	0.040000
15	0.032258
20	0.024390
30	0.016393
50	0.009901
70	0.007092
100	0.004975

Barra redonda

Razão de aspecto n	N_d
0.1	0.815876
0.2	0.689013
0.3	0.596293
0.5	0.469841
0.7	0.387637
1	0.307054
2	0.181372
3	0.128696
5	0.081408
7	0.059533
10	0.042431
12	0.035611
15	0.028693
20	0.021675
30	0.014555
50	0.008784
70	0.006290
100	0.004412

↑ Razão de aspecto =

$$\frac{\text{dimensão longitudinal}}{\text{dimensão transversal}}$$



Anisotropia Induzida

Não é uma propriedade intrínseca do material.

- Produzida por processamentos que causem uma característica direcional na microestrutura → grande potencial para “engenheirar” as propriedades magnéticas.
- Interessante para materiais policristalinos.

Anisotropia Induzida

Processos

- **Solidificação direcional;**
- **Laminação seguida de recozimento de chapas;**
- **Forjamento rotativo e trefilação de fios e barras cilíndricas seguidos de tratamento térmico.**
- **Recozimento sob campo magnético**
- **Recozimento sob tensão mecânica**