

# Anisotropia Magnética

# Anisotropia Magnética

- Anisotropia => Propriedade física do material é função da direção

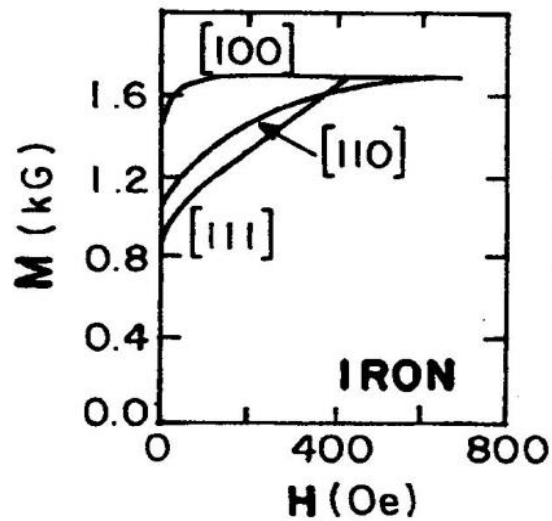
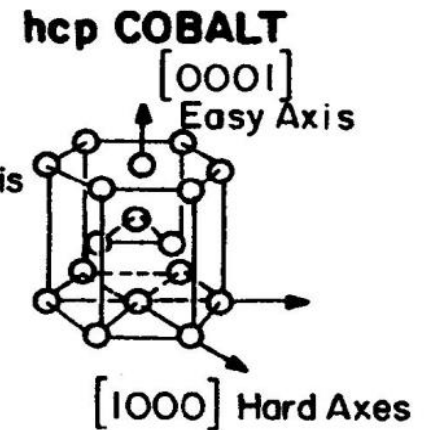
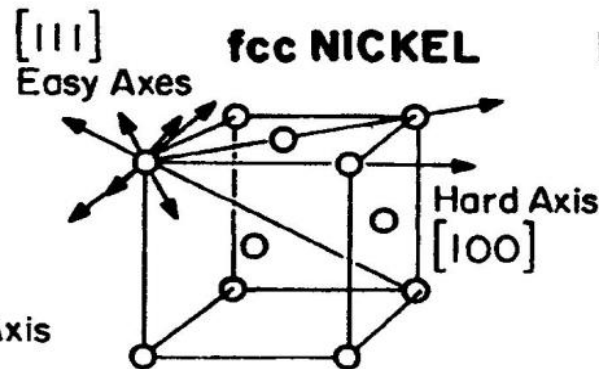
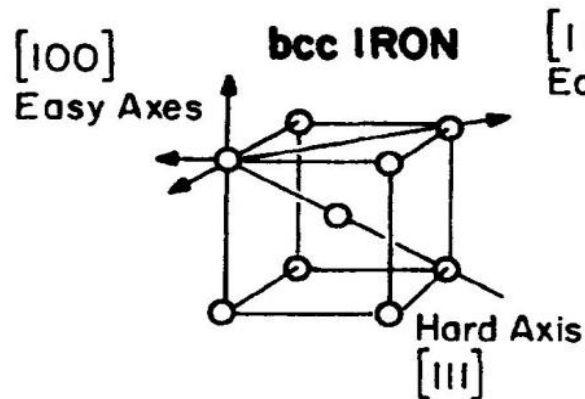
- Anisotropia Magnética

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

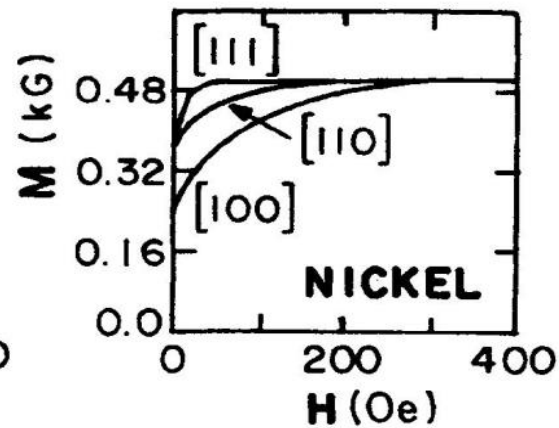
# Origem da Anisotropia Magnética

- Forma da amostra (anisotropia de forma)
  - Simetria Cristalina e Ordenamento de Pares Atômicos (anisotropia magnetocristalina)
  - Tensões Internas e Externas (anisotropia induzida/construída)
- 
- Na magnetização se manifesta através de  $\chi$  (susceptibilidade magnética) ou  $\mu$  (permeabilidade magnética)

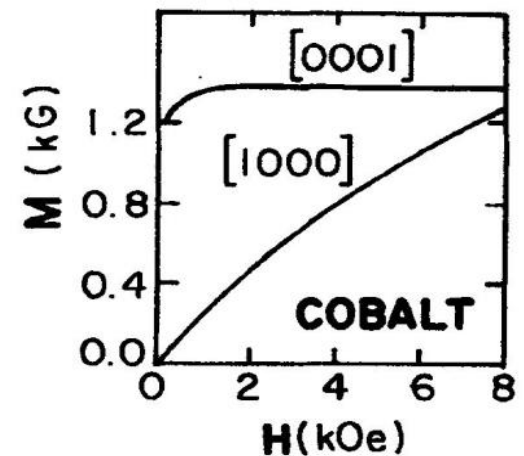
# Anisotropy Magnetocristalina



(a)



(b)

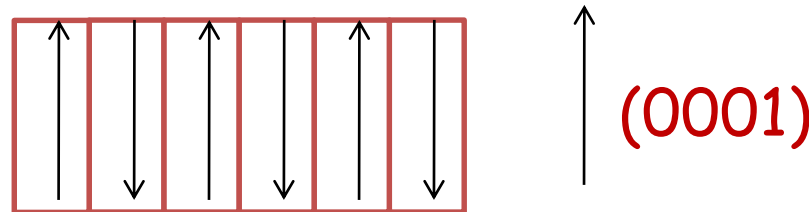


(c)

# Fenomenologia da Anisotropia

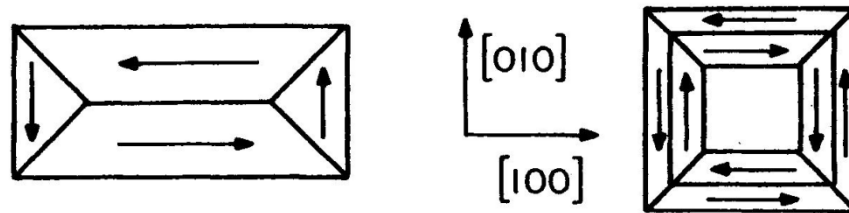
- 1) Anisotropia Uniaxial - Co

- 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  $\mu_j$  se acopla à rede?**

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

**+**

**Ligações Químicas com o 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 anisotropicamente com o campo cristalino. O acoplamento spin-órbita, causará portanto maiores distorções da rede.
  - Ou seja, certas orientações dos orbitais moleculares ou da distribuição de carga dos elétrons ligantes são energeticamente favoráveis

# Anisotropia Magnetocristalina + Aplicação de Campo (H)

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

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

$\mu_s$  "sentirá" menor influência de H, enquanto que  $\mu_L$  é praticamente "quenched", isto é, preso a uma dada direção do campo cristalino.

**Caso 2)  $\xi L.S > D$  - 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:

$$u_a = K_{u_0} + K_{u_{01}} \text{sen}^2 \theta + K_{u_{20}} \text{sen}^4 \theta + \dots$$

– Onde  $\theta$  é o ângulo entre a magnetização e a direção cristalina.

- Se  $M$  é paralelo a o eixo  $c$ :  $\theta = 0^\circ$  e  $u_a = K_{u_0}$

- Se  $M$  está no plano basal:  $\theta = 90^\circ$  e  $u_a = K_{u_0} + K_{u_{01}} + K_{u_{20}} + \dots$

- Para o cobalto:

$$K_{u_1} = 4,1 \times 10^5 \text{ J/m}^3 \quad \text{e} \quad K_{u_2} = 1,5 \times 10^5 \text{ J/m}^3$$

# Anisotropia Cúbica

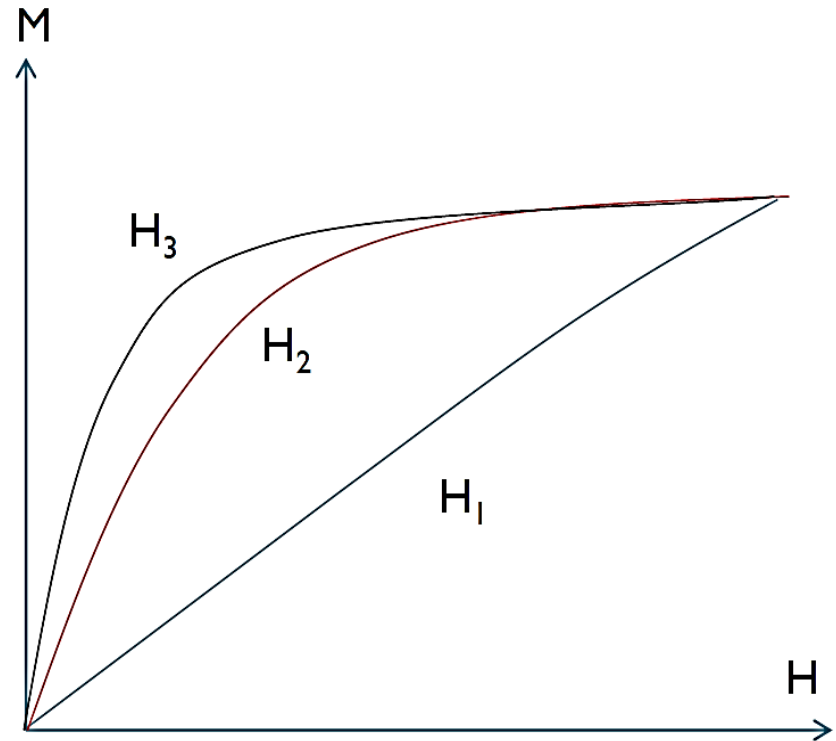
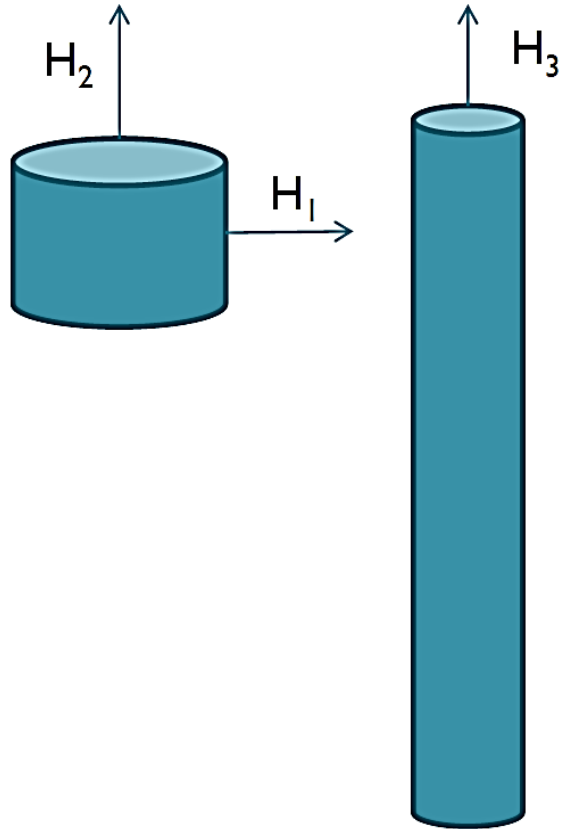
$$u_{mc} = K_0 + K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2 \dots$$

- $K_1 = 5 \times 10^4 \text{ J/m}^3$  e  $K_2 \ll K_1$  para o Fe.
- dependem dos cossenos diretores da magnetização  $\alpha_1$  (x),  $\alpha_2$  (y) e  $\alpha_3$  (z).

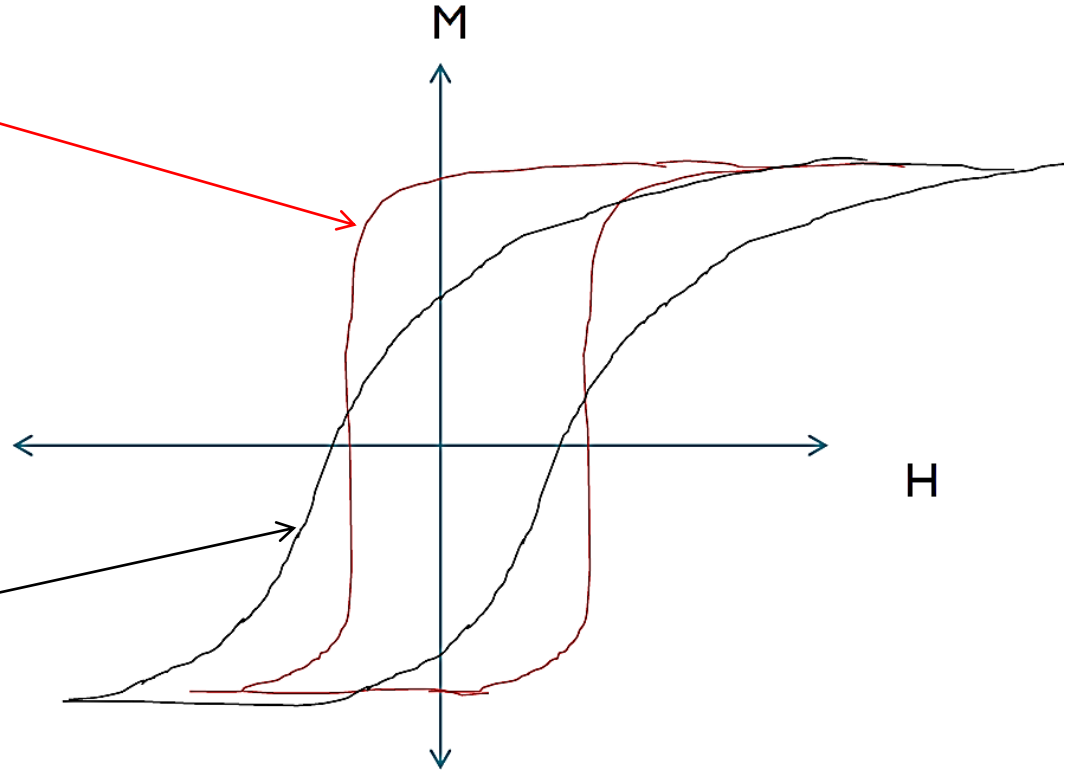
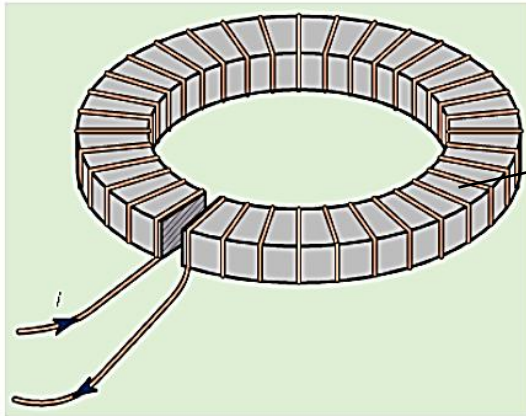
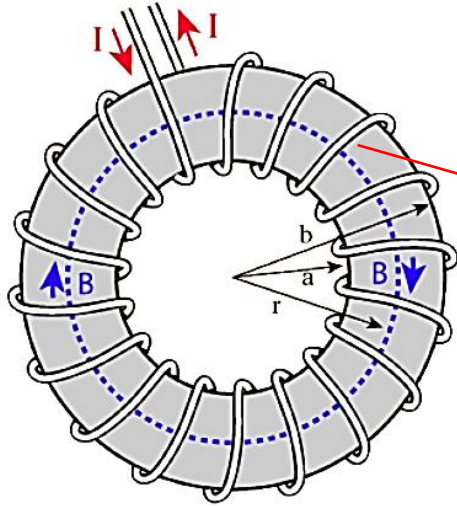
# Anisotropia de Forma

- Um material policristalino sem orientação preferencial dos grãos, a anisotropia magnetocristalina resultante pode ser considerada  $\approx 0$ .
- 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**

## Material ferromagnético

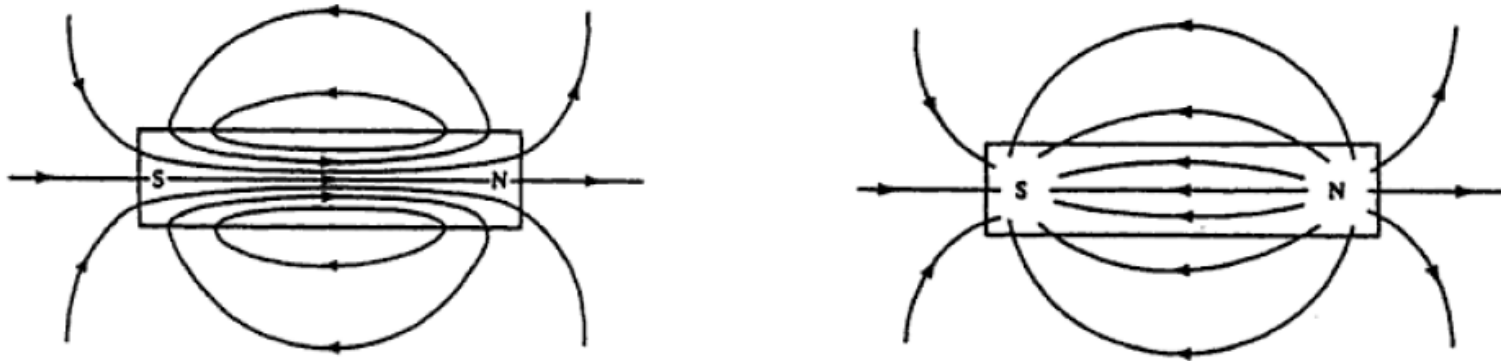


# Material ferromagnético



# Anisotropia de Forma → Campo de desmagnetização

Magnetização -  $M$       Campo de desmagnetização -  $H_d$



$$\vec{H}_d = N_d \vec{M}$$

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

$H_i$  = campo interno ou campo efetivo  $H_{ef}$

$N_d$  = 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

$N = 1/3$  para a esfera

# 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.



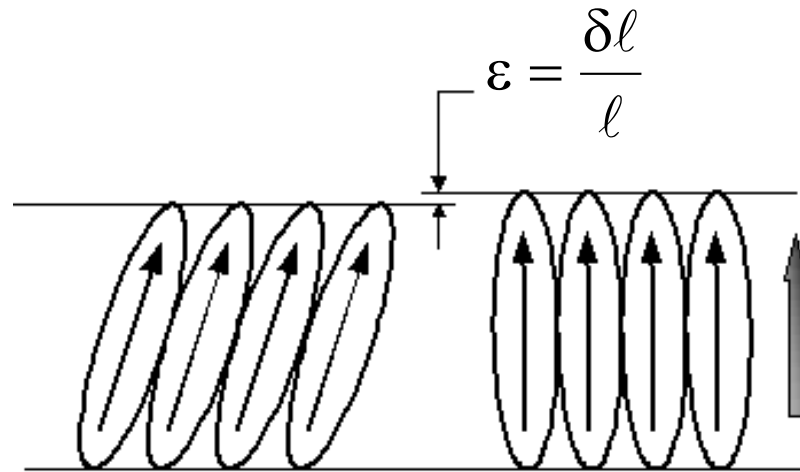
# Processos

- 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

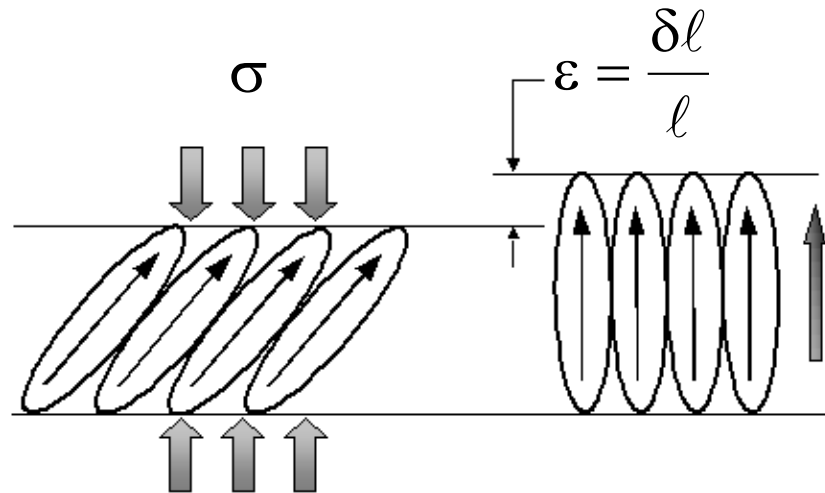
# Efeitos Magnetoelásticos

Magnetostricção  
Efeito Invar

# Magnetostricção

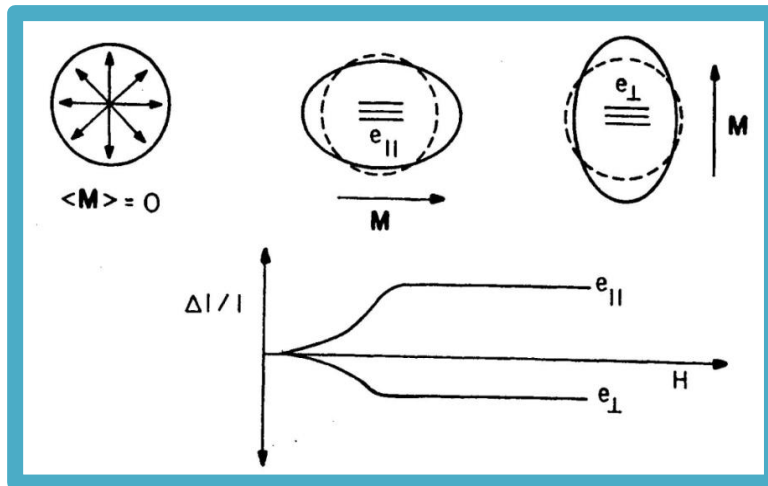


**Deformação do material por aplicação de campo magnético**



**A origem da magnetostricção é o acoplamento da anisotropia magnética com a rede cristalina (anisotropia magnetocristalina)**

# Deformações Anisotrópicas



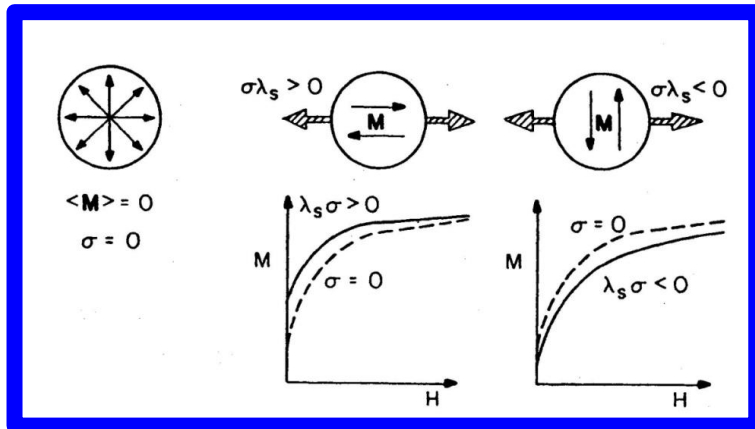
- As deformações  $\Delta l / l = \lambda$ , são chamadas de **magnetostricção de Joule ou anisotrópica**;

- Pode variar de zero ( $\lambda < 10^{-7}$ ) até  $\pm 10^{-4}$  em ligas e metais 3d; em alguns metais 4f, compostos intermetálicos e ligas  $\sim$  acima de  $\pm 10^{-3}$ .

- Material isotrópico ( $e_{\perp}$  e  $e_{||}$ , deformações para campo perpendicular e paralelo a direção da medida da deformação).
- Esta deformação anisotrópica associada com a direção da magnetização foi primeiramente observada no ferro em 1842 por Joule

# Efeito Inverso deformação causa campo

Denominado de Efeito Joule inverso ou efeito Villari, piezomagnetismo, ou mais comumente, anisotropia induzida por tensão.



- Aplicando-se tensões ou deformações a um material magnético, pode-se produzir uma mudança na sua direção de magnetização preferencial.

Se  $\lambda_s > 0$ , é mais fácil magnetizar o material na direção da tração aplicada ( $\sigma > 0$ )  $\rightarrow \lambda_s \sigma > 0$

Se  $\lambda_s < 0$ , é mais difícil magnetizar na direção da tração  $\rightarrow \lambda_s \sigma < 0$ .

(o mesmo raciocínio pode ser feito para a compressão, ou seja,  $\sigma < 0$ )

# Dependência da Magnetostricção de Joule do Campo Magnético

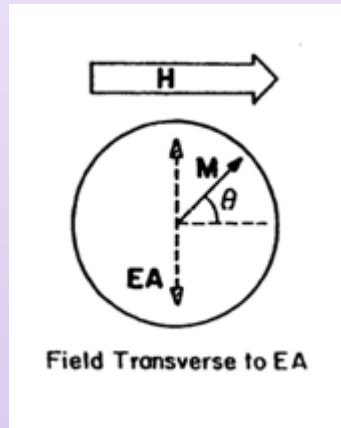
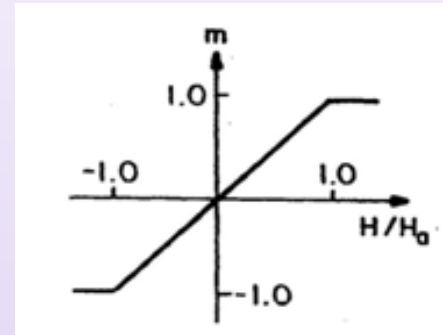
- A deformação magnetostrictiva anisotrópica, em um material isotrópico, em relação à direção da magnetização pode ser dada por:

$$e = \frac{3}{2} \lambda_s \left( \cos^2 \theta - \frac{1}{3} \right)$$

$e = \frac{\Delta l}{l}$  é a deformação medida;  $\theta$  é o ângulo relativo à magnetização de saturação;

- a deformação  $\underline{e}$  é denominada de *magnetostricção*  $\lambda$ .
- $\underline{e}$  é uma função de  $\mathbf{M}$  ou do campo aplicado, portanto não deve ser confundido com  $\lambda_s$  que é uma constante do material.

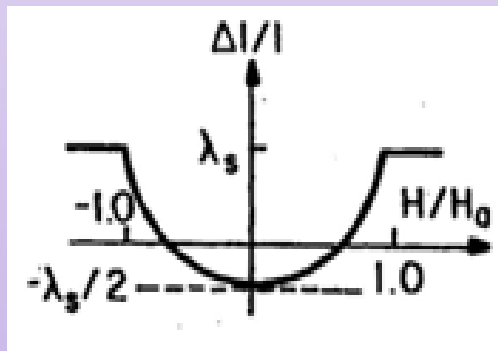
A magnetização em um material uniaxial na direção de difícil magnetização é  $M = M_s H / H_a$  ou  $m = h$ .



$$m = \cos\theta$$

$$e = \frac{3}{2} \lambda_s \left( m^2 - \frac{1}{3} \right)$$

Portanto  $e = \lambda$  é proporcional a  $H^2$   
Acima da saturação:



$$e_{\parallel} = \frac{3}{2} \lambda_s \left( 1 - \frac{1}{3} \right) = \lambda_s \qquad e_{\perp} = \frac{3}{2} \lambda_s \left( 0 - \frac{1}{3} \right) = -\frac{\lambda_s}{2}$$

Portanto, para materiais isotrópicos:

$$e_{\parallel} - e_{\perp} = \frac{3}{2} \lambda_s \quad \text{ou} \quad \lambda_s = \frac{2}{3} (e_{\parallel} - e_{\perp})$$

# Alguns dados

Para materiais que não são isotrópicos, a constante de magnetostricção pode ter valores diferentes em diferentes direções.

Por exemplo o ferro:

$$\lambda_{100} = 20.5 \times 10^{-6} \quad e \quad \lambda_{111} = -21.5 \times 10^{-6}$$

E para o níquel:

$$\lambda_{100} = -46 \times 10^{-6} \quad e \quad \lambda_{111} = -25 \times 10^{-6}$$

Magnetizar um cristal de Fe na suas direções  $\langle 100 \rangle$  causa uma alongação ao longo desta direção, mas ao magnetizá-lo nas direções  $\langle 111 \rangle$  causa contração ao longo destas direções.

O Ni contrai na direção de magnetização para qualquer direção do cristal. Lembrando-se que as direções  $\langle 100 \rangle$  são de fácil magnetização para o Fe (CCC) e as direções  $\langle 111 \rangle$  são fáceis para o Ni (CFC).

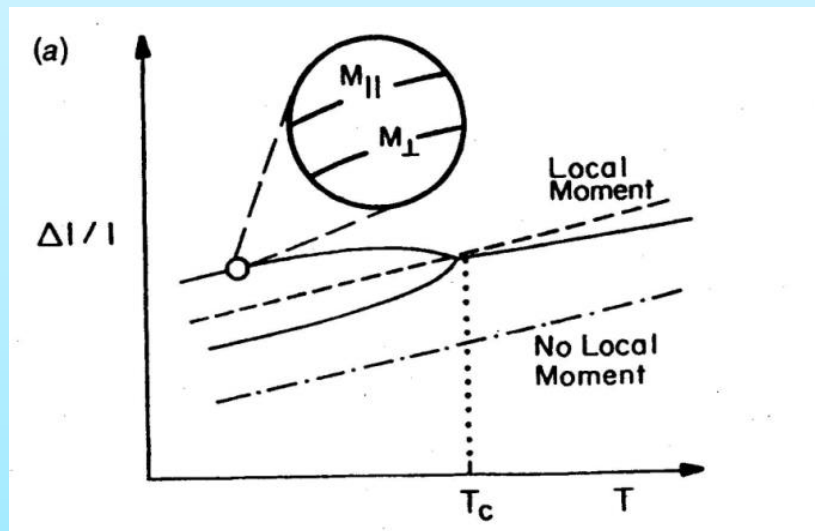


# Constantes de magnetostricção ( $\times 10^{-6}$ ) em 4.2 K e em temperatura ambiente para diversos materiais.

	$T = 4.2 \text{ K}$		Temperatura ambiente		
	$\lambda_{100}(\lambda^{r,2})$	$\lambda_{111}(\lambda^{e,2})$	$\lambda_{100}(\lambda^{r,2})$	$\lambda_{111}(\lambda^{e,2})$	Policristal, $\lambda_s$
<b>METAIS 3d</b>					
BCC-Fe	26	-30	21	-21	-7
HCP-Co <sup>u</sup>	(-150)	(45)	(-140)	(50)	(-62)
FCC-Ni	-60	-35	-46	-24	-34
BCC-FeCo	—	—	140	30	—
a-Fe <sub>80</sub> B <sub>20</sub>	48 (isotropic)	—	—	—	+32
a-Fe <sub>40</sub> Ni <sub>40</sub> B <sub>20</sub>	+20	—	—	—	+14
a-Co <sub>80</sub> B <sub>20</sub>	-4	—	—	—	-4
<b>METAIS/ LIGAS 4f</b>					
Gd <sup>u</sup>	(-175)	(105)	(-10)	0	—
Tb <sup>u</sup>	—	(8700)	—	(30)	—
TbFe <sub>2</sub>	—	4400	—	2600	1753
Tb <sub>0.3</sub> Dy <sub>0.7</sub> Fe <sub>2</sub>	—	—	—	1600	1200
<b>FERRITAS Spinel</b>					
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0	50	-15	56	+40
MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> <sup>u</sup>	—	—	(-54)	(10)	—
CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	—	—	-670	120	-110
<b>Garnets</b>					
YIG	-0.6	-2.5	-1.4	-1.6	-2
<b>IMÃS PERMANENTES</b>					
Fe <sub>14</sub> Nd <sub>2</sub> B <sup>u</sup>	—	—	—	—	—
BaO·6Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> <sup>u</sup>	—	—	(13)	—	—

# Dilatação Térmica

As linhas sólidas mostram a forma da expansão térmica para um material ferromagnético acima e abaixo de  $T_c$ .



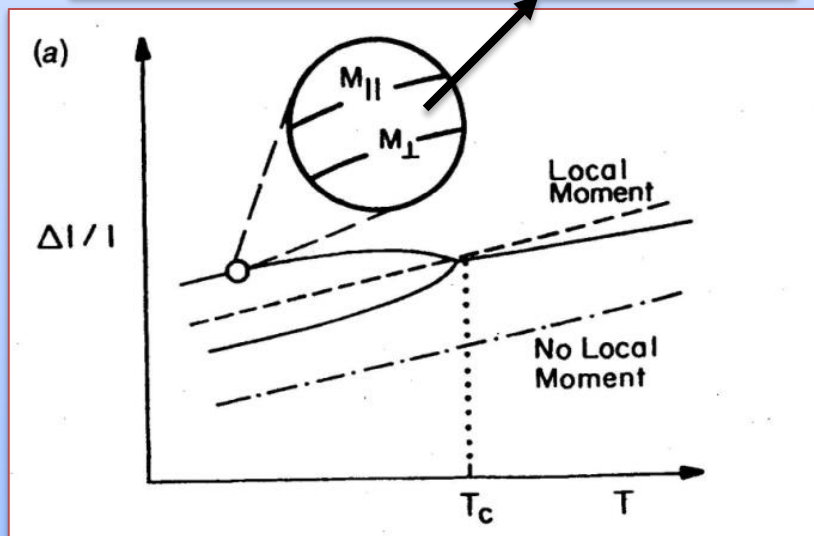
$T < T_c$ , efeitos adicionais magnetos-volumétricos devido ao ordenamento magnético de longo-alcance são consolidados.

$T > T_c$ , os momentos perdem sua interação de longo alcance, mas não instantaneamente. A pressão interna associada a eles não desaparece completamente acima de  $T_c$ .

# Dilatação Térmica - continuação

O ordenamento magnético poderá se adicionar ou subtrair a expansão do volume.

Deformações anisotrópicas



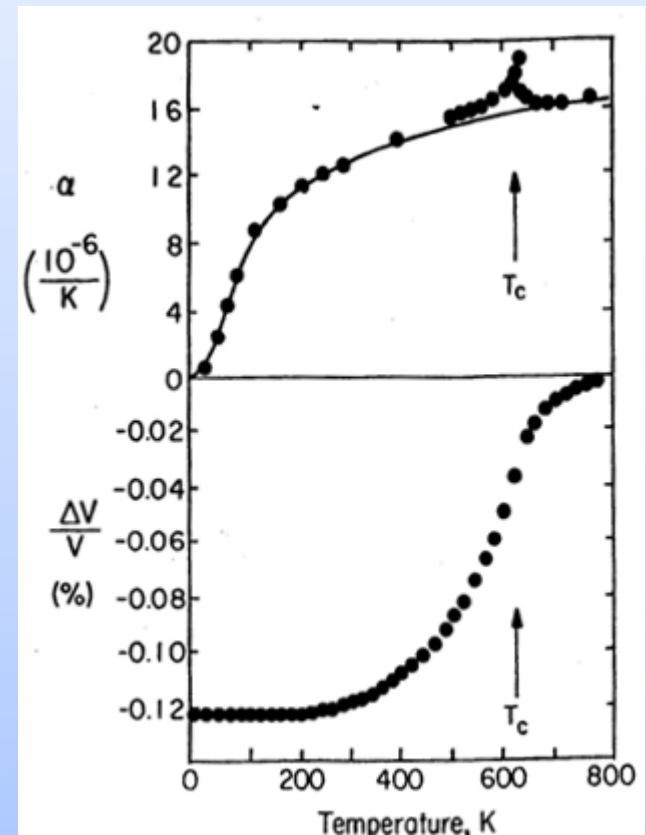
O sinal da inclinação destas curvas sólidas (coeficiente de expansão térmica  $\alpha$ ) pode ser, portanto positivo ou negativo.

Todos estes efeitos são isotrópicos

# Dilatação Linear e Volumétrica - Ni

- Expansão volumétrica,  $\omega = \Delta V/V$
- Coeficiente linear de expansão térmica,  $\alpha = d(\Delta l/l)/dT$

A diminuição relativa do volume é da ordem de 0,12%, relativamente ao valor do volume extrapolado para  $T \gg T_c$



# Efeito Invar

dimensões do material são invariantes com a temperatura.

- Ocorre para algumas ligas ferromagnéticas com  $T_c \geq T_{\text{ambiente}}$ ; um exemplo típico é a liga  $\text{Fe}_{70}\text{Ni}_{30}$
- O efeito magneto-volumétrico devido ao ordenamento ferromagnético é positivo abaixo de  $T_c$  (material dilata)
- Abaixando-se a temperatura o material contrai devido unicamente ao efeito térmico.
- Ao variar a temperatura perto de  $T_c$ , os efeitos magneto-volumétrico e puramente térmico são opostos o que resulta em um material com contração/expansão térmica muito baixa nesta faixa de temperatura. Estas ligas são chamadas de ligas INVAR.