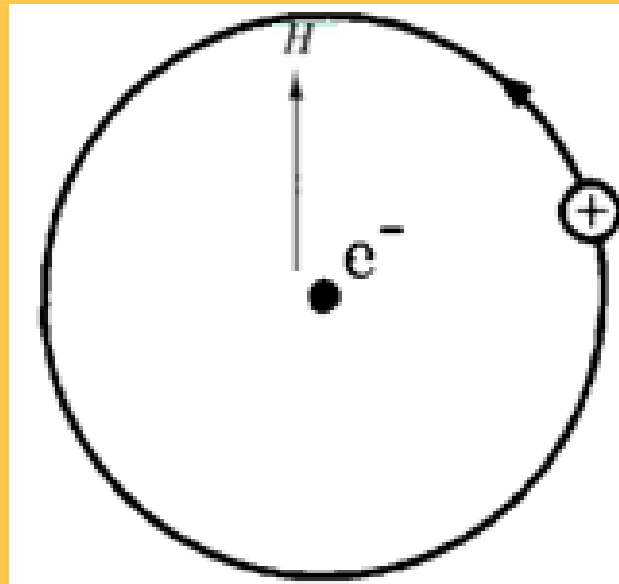




EFEITOS MAGNETOELÁSTICOS

REVISÃO

INTERAÇÃO SPIN-ÓRBITA



- Campo gerado por momento orbital + spin
- Spin “preso” ao orbital

CAMPO CRISTALINO

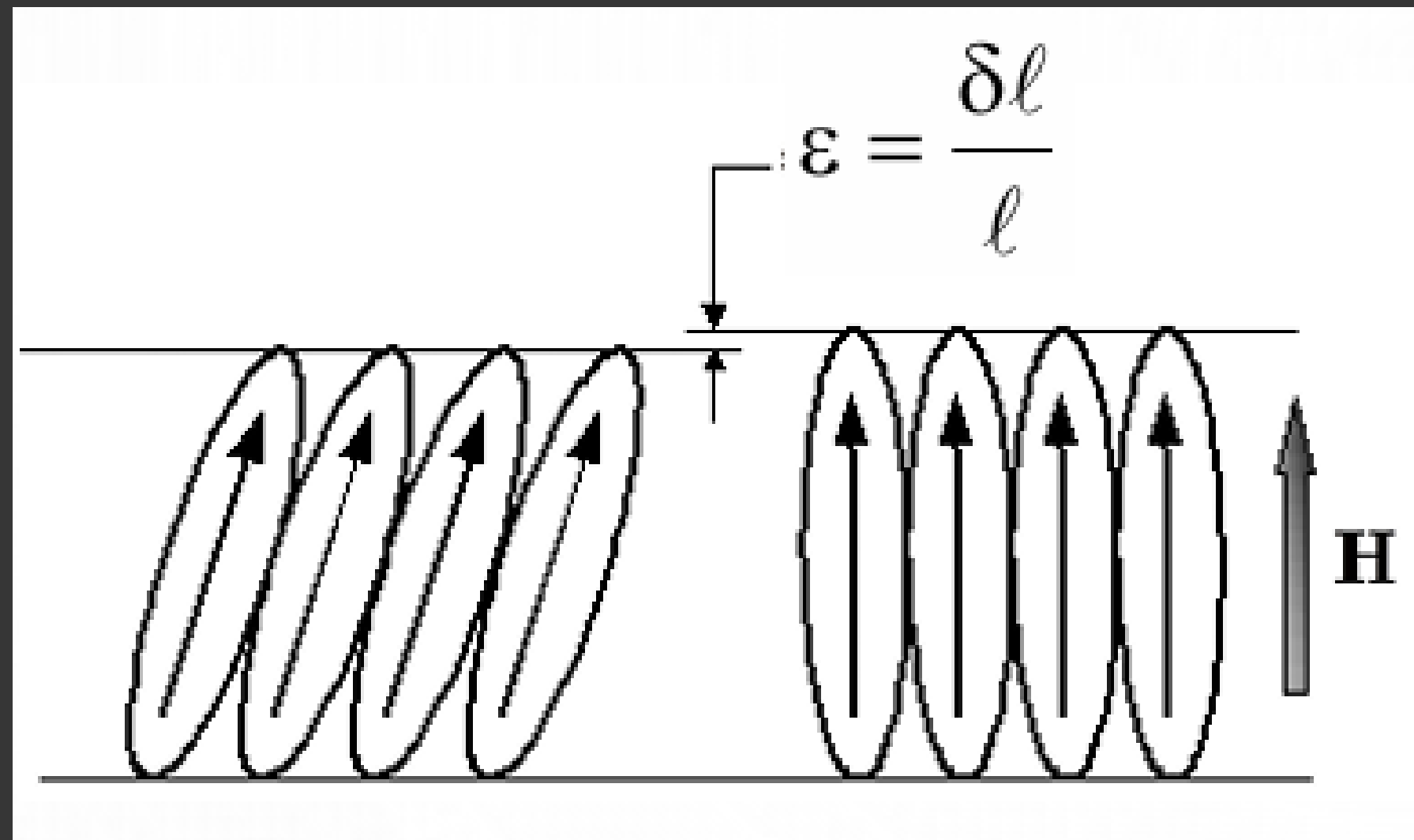
- Ligações atômicas direcionais
- Queda na simetria da estrutura cristalina
- Orientações preferenciais dos orbitais
- Orientações preferenciais do spin

COMO ESSAS INTERAÇÕES AFETAM OS ORBITAIS E A REDE CRISTALINA?

- 1 Magnetostricção
- 2 Efeito Wiedermann
- 3 Efeito INVAR
- 4 Piezomagnetismo

MAGNETOSTRICÇÃO

- Dilatação ou contração causada por aplicação de campo magnético
- Torque gerado nos orbitais pela rotação do spin
- Surge a interação de troca e spin-órbita e do campo cristalino
- $\lambda = \varepsilon = \Delta l / l$ (adimensional)



MAGNETOSTRICÇÃO

Isotrópica

Anisotrópica

$$e_{\mu} = -\frac{1}{c_{\mu}} \sum_{i,j} \frac{\partial \mathbf{J}_{ij}}{\partial e_{\mu}} \langle \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j \rangle - \frac{1}{c_{\mu}} \sum_{i,j} \frac{\partial \mathbf{J}_{ij}}{\partial e_{\mu}} \langle \mathbf{S}_i^z \mathbf{S}_j^z \rangle$$
$$- \frac{1}{c_{\mu}} \sum_i \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial e_{\mu}} \langle \mathbf{S}_i^2 \rangle - \frac{1}{c_{\mu}} \sum_{i,j} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial e_{\mu}} \langle (\mathbf{S}_i^z)^2 \rangle$$

Interação de troca

Campo cristalino

Magst. Volumétrica

- Independe de H
- Constante

Magst. De Joule

- Depende de H
- Variável

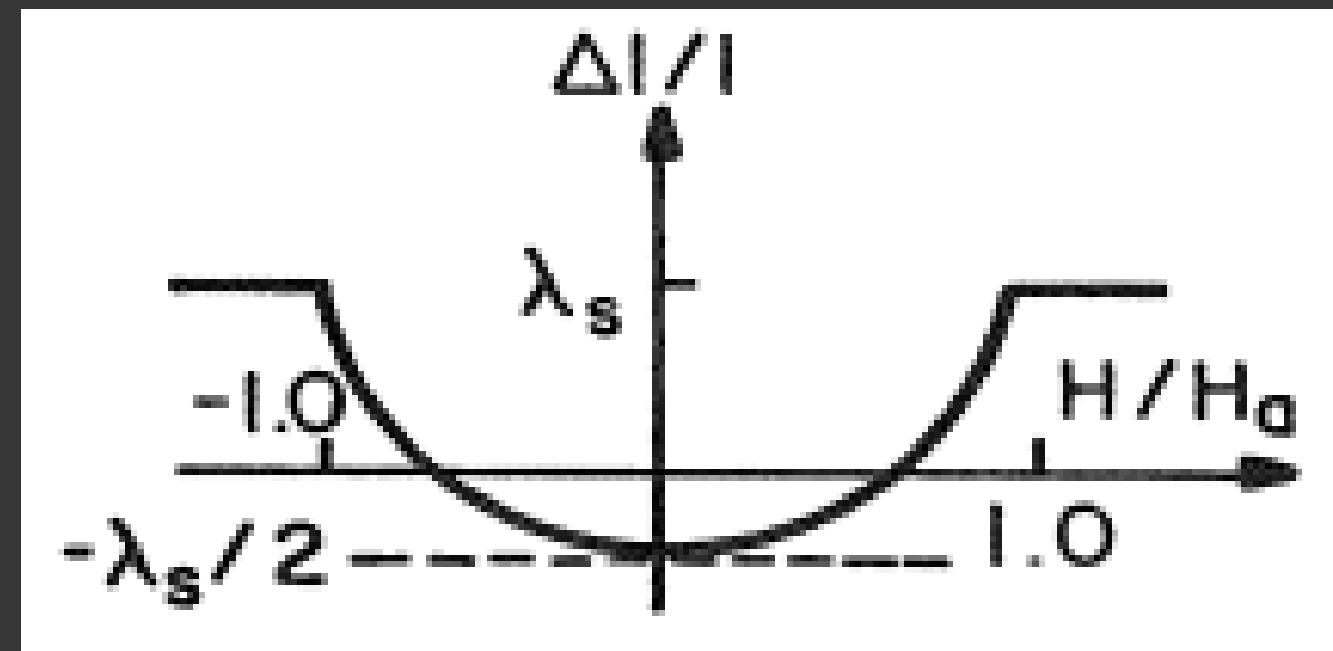
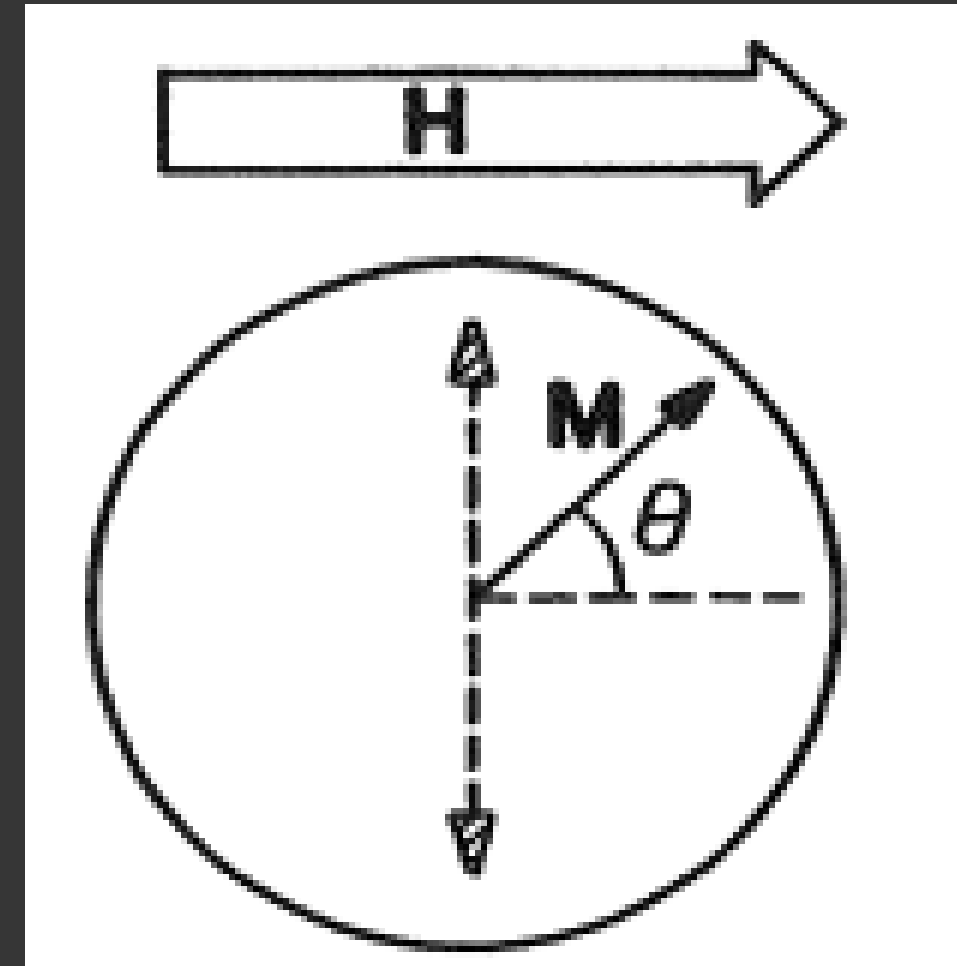
MAGNETOSTRICÇÃO MICROSCÓPICA ISOTRÓPICA

Cenário com baixa ou nula anisotropia magnetocristalina:

- Não há direções de fácil e difícil magnetização
- Efeito simétrico em relação a H
- Magnitude depende apenas da interação de troca anisotrópica

Fórmula geral: $\lambda_{\theta} = (3/2) \cdot \lambda_{\max} \cdot (\cos^2 \theta - 1/3)$

Com $\cos \theta = H/H_a = M/M_0$



MAGNETOSTRICÇÃO MICROSCÓPICA ISOTRÓPICA

Válidas apenas
para material
desmagnetizado

{

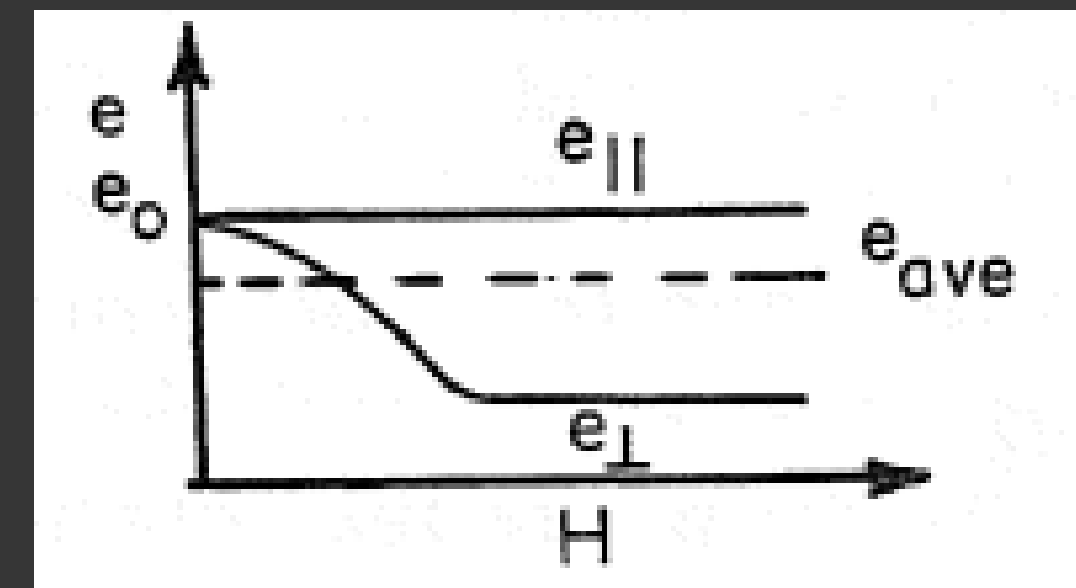
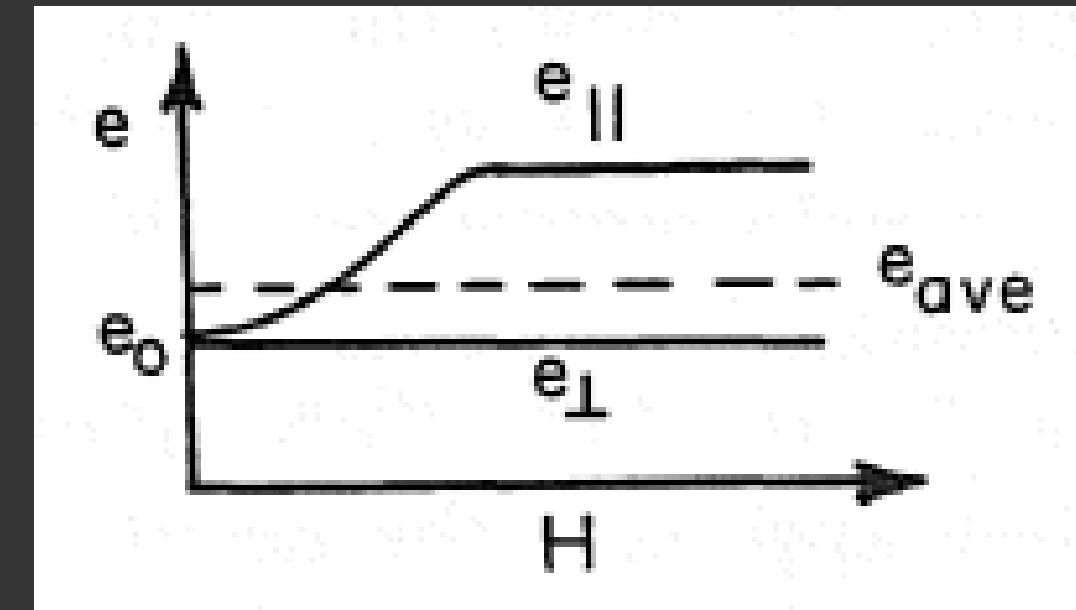
$$\text{Se } \lambda_{100} = \lambda_0 = \lambda_{\max}$$

$$\lambda_{111} \sim \lambda_{55} \sim 0. \lambda_{\max}$$

$$\lambda_{90} \sim -0,5. \lambda_{\max}$$

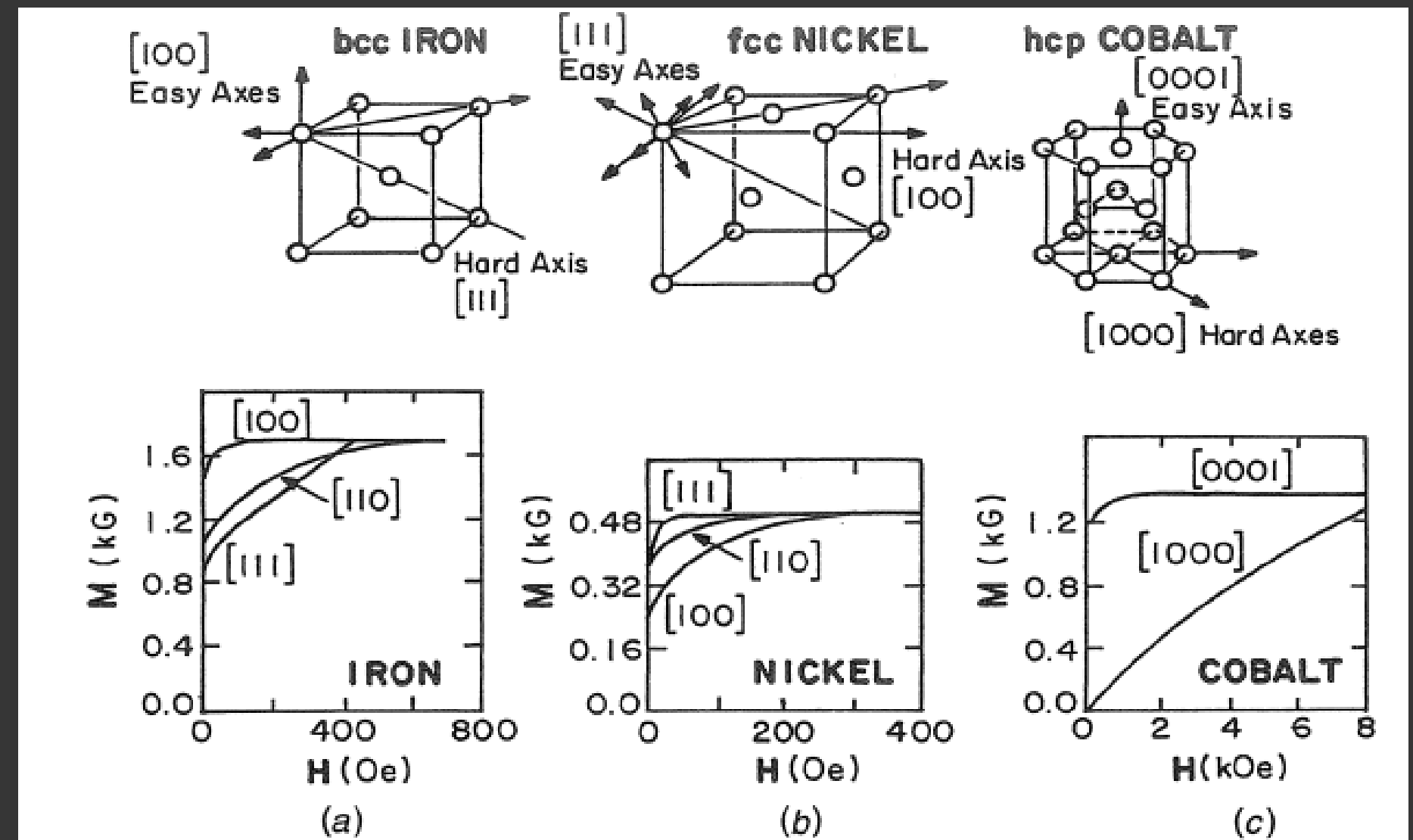
Válida para
qualquer cenário
inicial

$$\lambda_0 - \lambda_{90} = 1,5. \lambda_{\max}$$



MAGNETOSTRICÇÃO MICROSCÓPICA ANISOTRÓPICA

- Na maioria dos materiais magnéticos, há uma anisotropia significativa
- $\lambda_{\max}$ varia em função da direção
- Não há uma equação bem definida



$$K_1 > 0$$

$$K_1 < 0$$

$$K_1 > 0$$

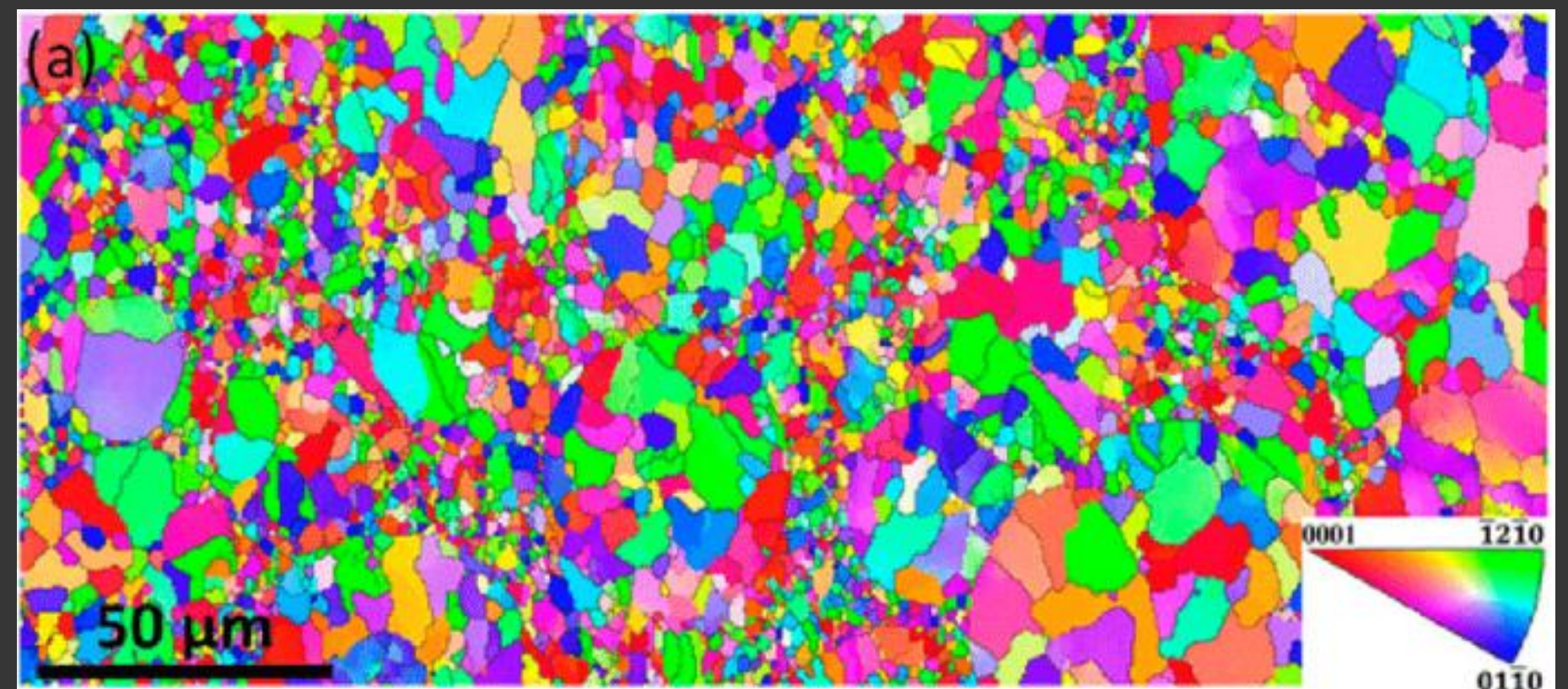
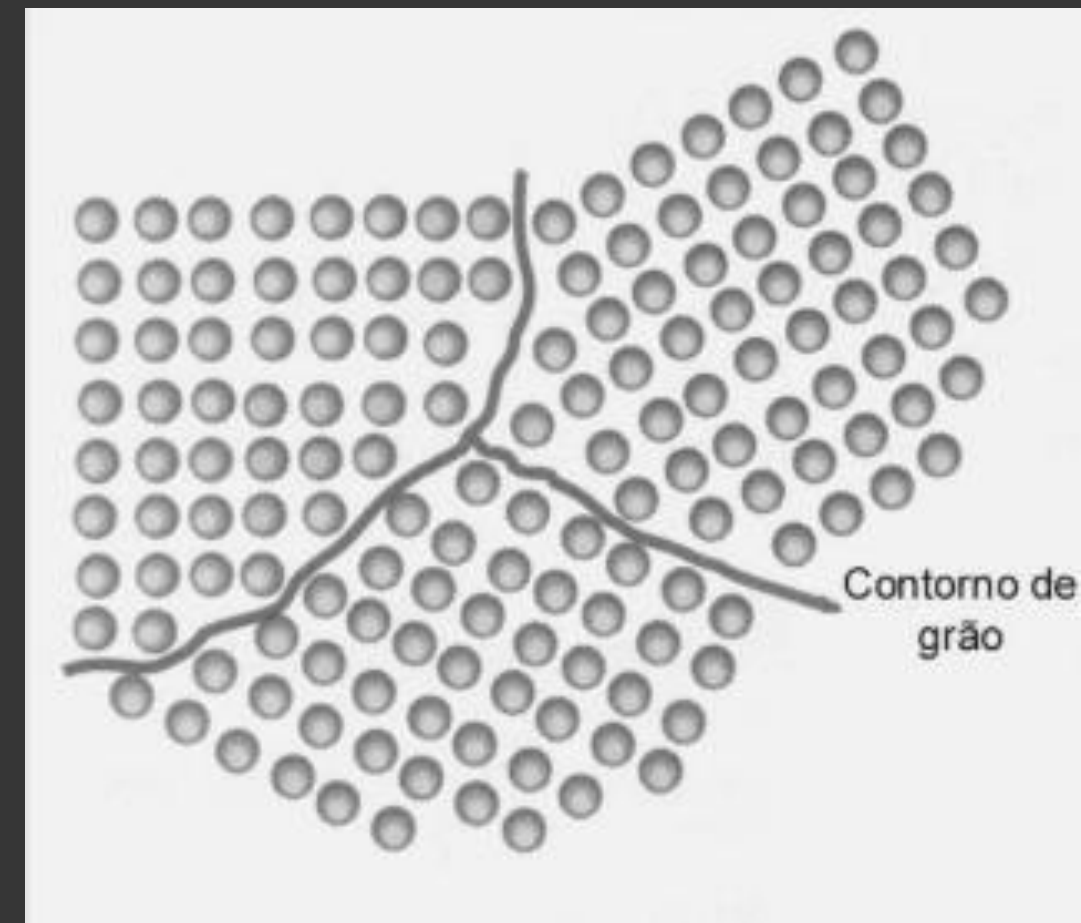
MAGNETOSTRICÇÃO MICROSCÓPICA ANISOTRÓPICA

Material	$\lambda_{100} (\times 10^{-6})$	$\lambda_{111} (\times 10^{-6})$	Policristal ($\times 10^{-6}$)
Fe (ccc)	21	-21	7
Co (hp)	-140	50	-62
Ni (cfc)	-46	50	-34
Fe-Co (ccc)	140	30	--
Fe-Ga (GALFENOL)	375	~ 0	90
Fe-Al (ALFENOL)	185	~ 0	40
Gd	-10	0	--
Tb	--	30	--
TbFe ₂ (TERFENOL)		2600	1750
Tb _{0,3} Dy _{0,7} Fe ₂ (TERFENOL D)		1600	1200
Fe ₃ O ₄ (FERRITA)	-15	56	40
MnFe ₂ O ₄	-54	10	--
CoFe ₂ O ₄	-670	120	-110

MAGNETOSTRICÇÃO MACROSCÓPICA ISOTRÓPICA

Materials policristalinos
isotrópicos:

- Orientações aleatoriamente distribuídas -> igualmente representadas
- Magnetostricção resultante é uma média ao longo das direções



MAGNETOSTRIÇÃO MACROSCÓPICA ISOTRÓPICA

Comportamento equivalente ao
microscópico isotrópico

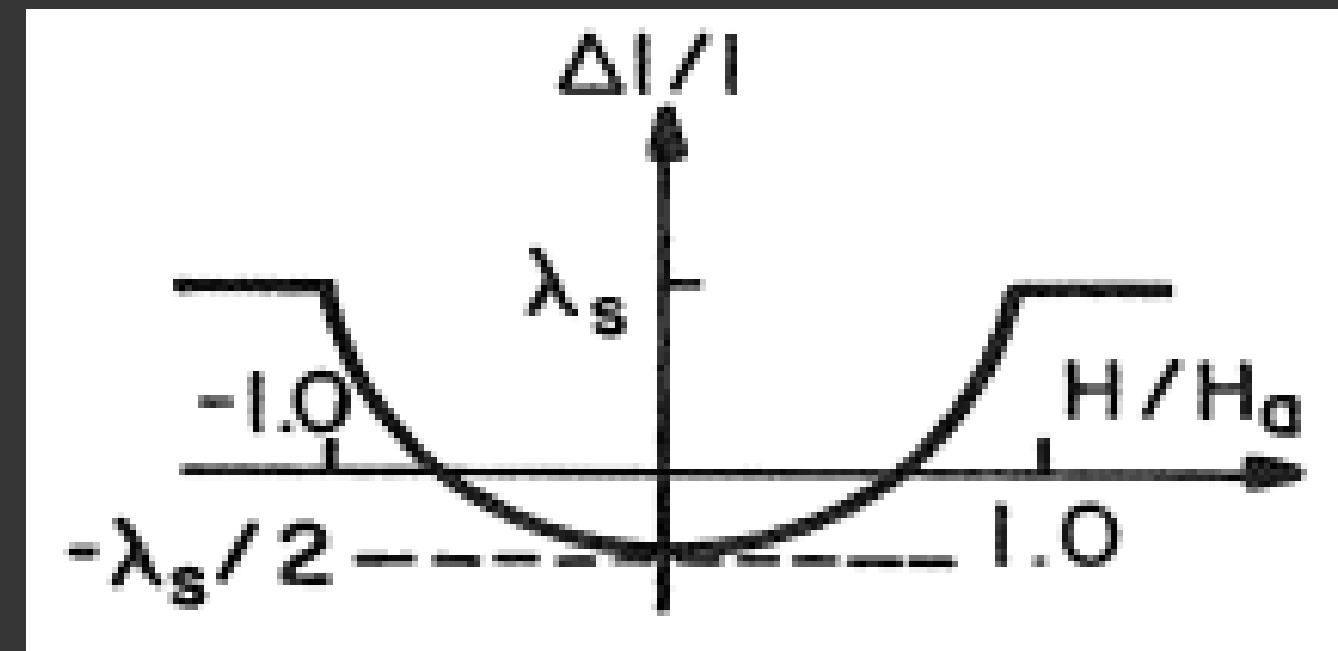
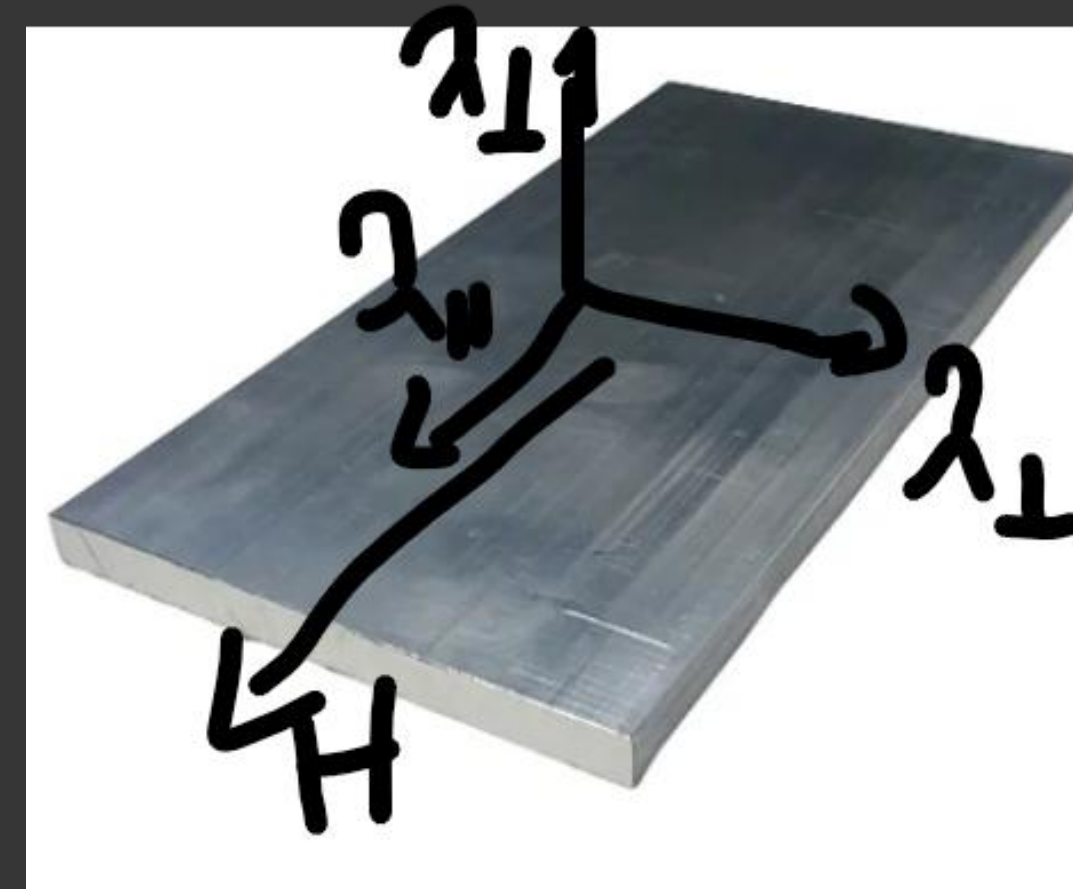
Fórmula geral: $\lambda_\theta = (3/2) \cdot \lambda_s \cdot (\cos^2\theta - 1/3)$

Com $\cos\theta = H/H_a = M/M_0$

$$\lambda_{II} = \lambda_{\text{longitudinal}} = \lambda_{\text{long}} = \lambda(\theta=0) = \lambda_s$$

$$\lambda_{\perp} = \lambda_{\text{transversal}} = \lambda_{\text{trans}} = \lambda(\theta=90) = -\lambda_s/2$$

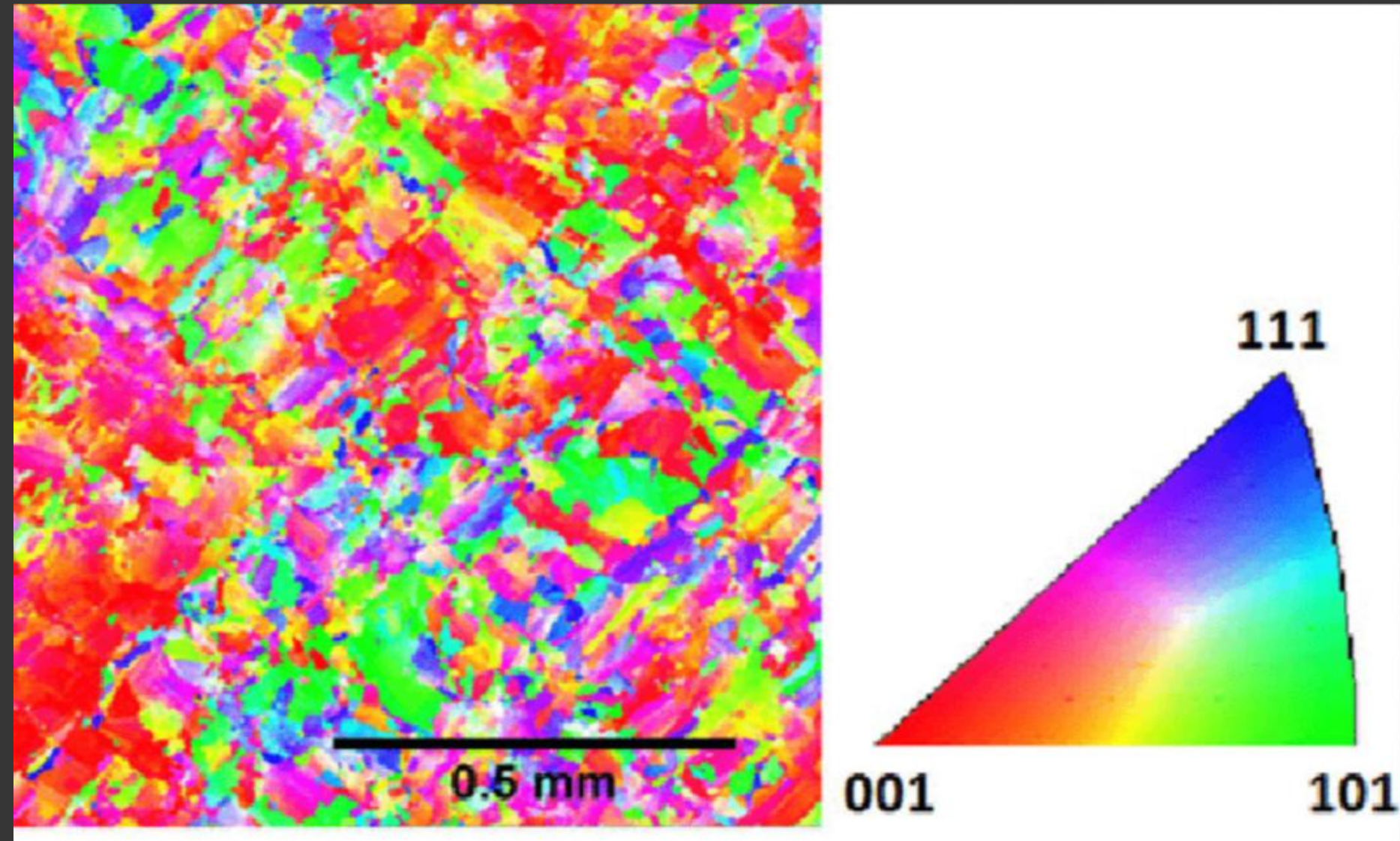
$$\lambda_{\text{long}} - \lambda_{\text{trans}} = 3\lambda_s/2$$



MAGNETOSTRICÇÃO MACROSCÓPICA ANISOTRÓPICA

Materiais policristalinos anisotrópicos:

- Há orientações de grão preferenciais
- Magnetostricções diferentes para diferentes direções
- $\lambda_{\text{long}} \neq -2\lambda_{\text{trans}}$

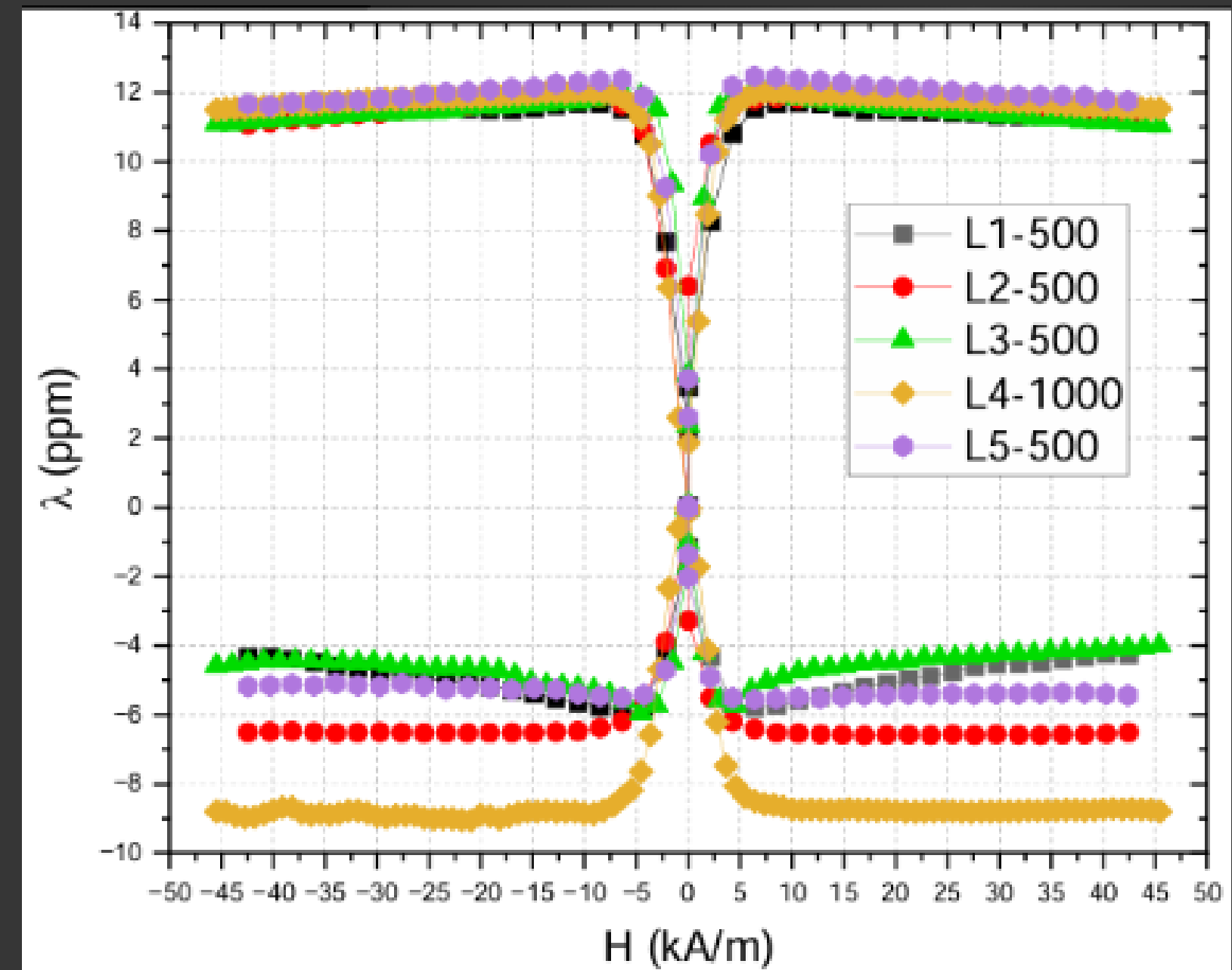


MAGNETOSTRICÇÃO MACROSCÓPICA ANISOTRÓPICA

- Ainda vale, após saturação, que:

$$\lambda_{\text{long}} - \lambda_{\text{trans}} = 3\lambda_s/2$$

- Portanto, a anisotropia da magnetostricção está associada à anisotropia induzida
- Controle da magnetostricção no processo produtivo



INTERAÇÃO SPIN ÓRBITA X CAMPO CRISTALINO

Para campo cristalino forte em relação à interação spin-órbita ($D > S.L$):

- Movimento dos orbitais é altamente restrito -> magnetostricção baixa
- Caso dos metais de transição em geral, nas subcamadas 3d
- Magnetostricções (em módulo) entre 0 e 100 ppm no geral, alguns indo até perto de 500 ppm

Para campo cristalino fraco em relação à interação spin-órbita ($D < S.L$):

- Movimento dos orbitais relativamente livre para acompanhar os spins -> magnetostricção alta
- Presente em terras raras principalmente, nas subcamadas 4f
- Campo cristalino relativamente anulado pela presença de camadas mais externas com 5p e 6s
- Magnetostricções (em módulo) entre 100 e 2500 ppm

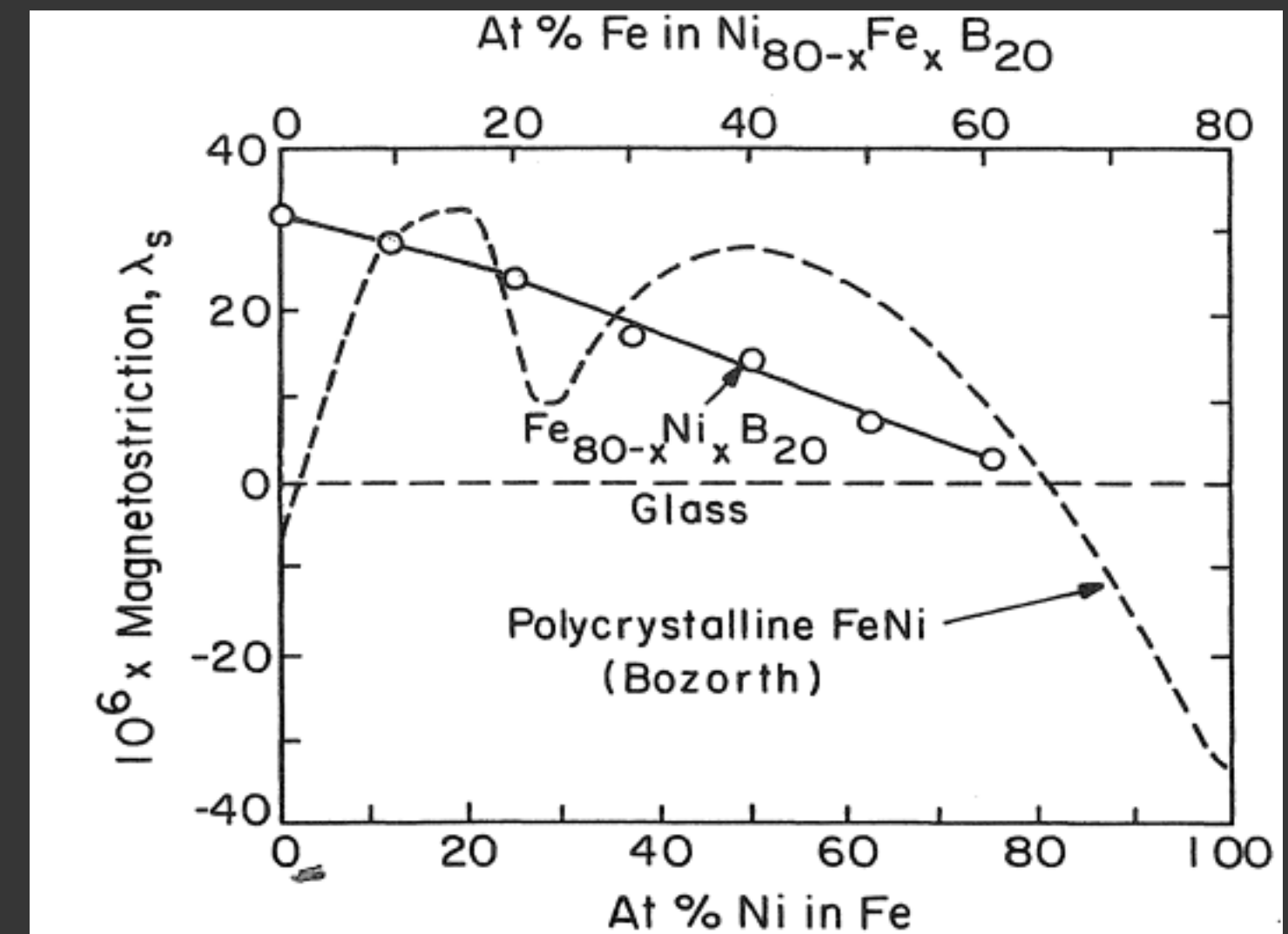
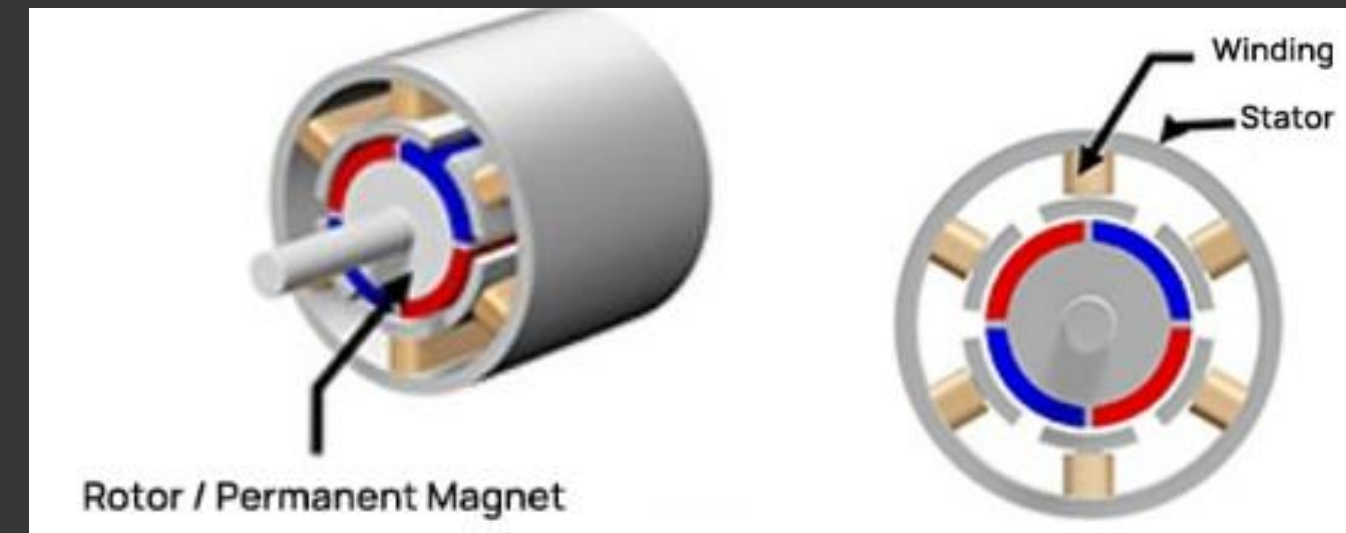
RUÍDO

Em aplicações com campos alternados (motores):

- ciclos rápidos de magnetização ->
- ciclos rápidos de magnetostricção ->
- vibrações mecânicas rápidas -> ruído

Assim, deseja-se tipicamente minimizar a magnetostricção:

- Ligas de components com λ opostos
- Adição de elementos de liga
- Ligas de alta entropia
- Anisotropia induzida (textura)



ESCALA DE MAGNETOSTRICÇÃO

0 ppm

10 ppm

100 ppm

500 ppm

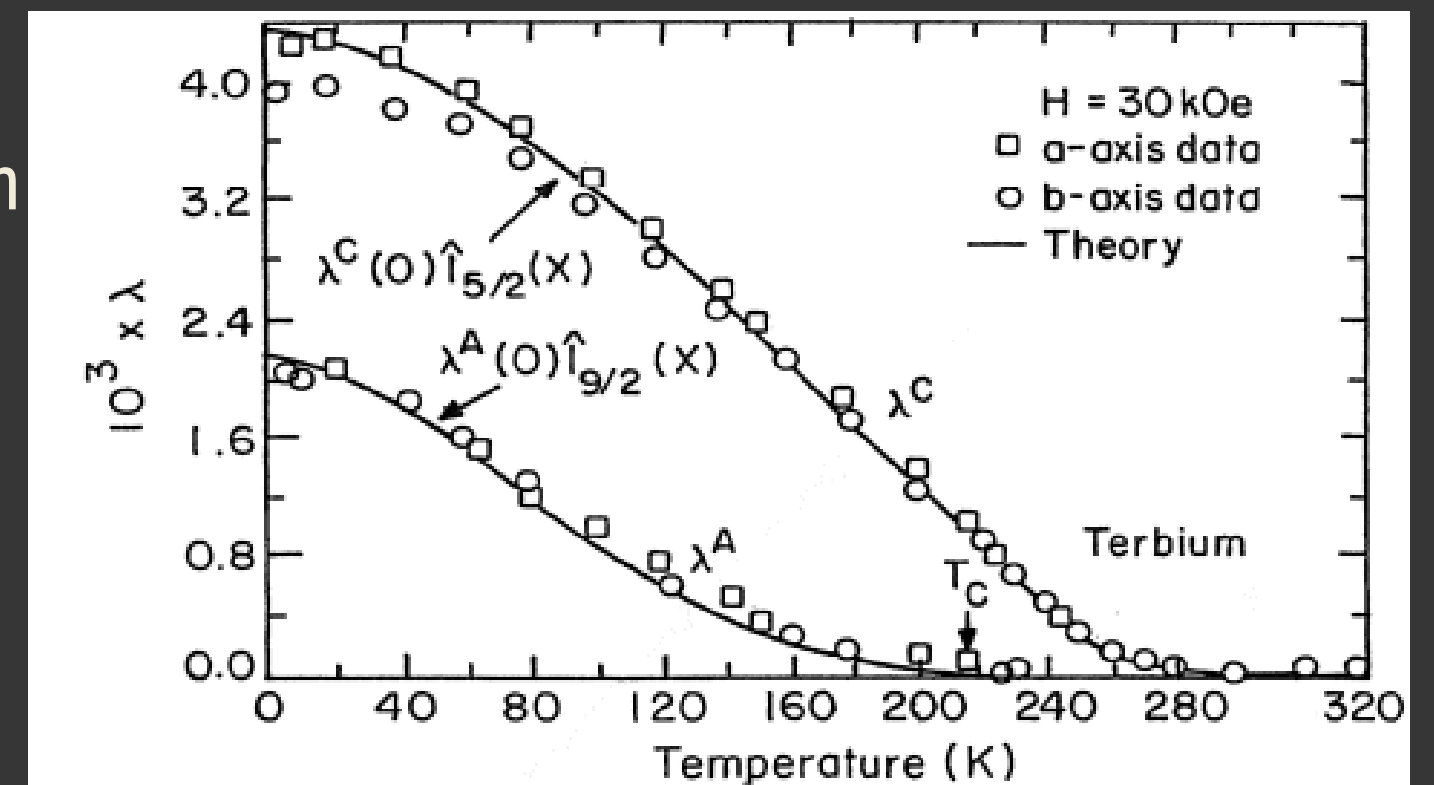
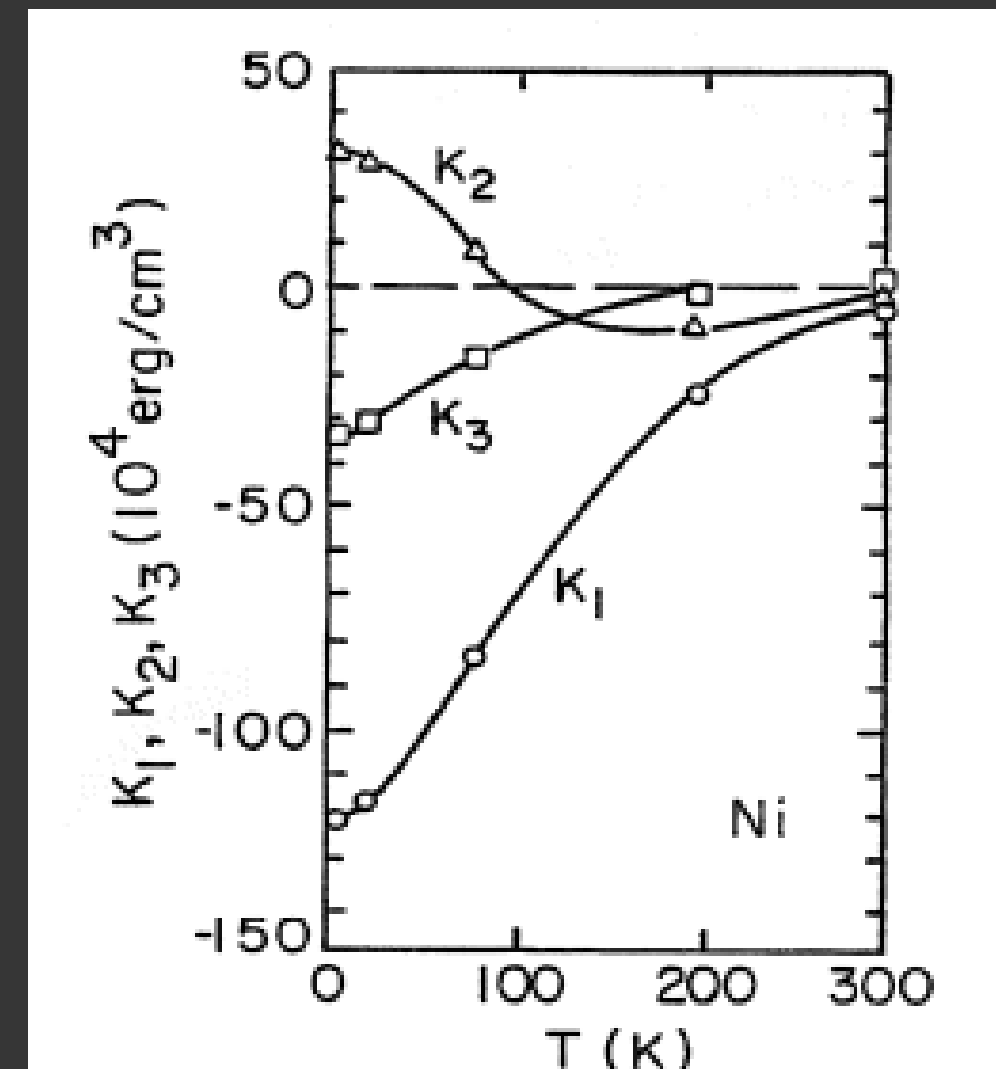
- | | | | |
|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| - Materiais “supersilenciosos” | - Baixa magnetostricção | - Média magnetostricção | - Alta magnetostricção |
| - Praticamente nenhum ruído | - Ruído aceitável ocasionalmente | - Ruído alto | - Ruído altíssimo |
| - Materiais engenheirados | - Metais de transição | - Fortes efeitos magnetostrictivos | - Fortes efeitos magnetostrictivos |
| - Metais de transição | - Ligas de alta entropia | - Metais de transição | - Terras raras |
| - Ligas de alta entropia | | - Terras raras | |

← Deseja-se reduzir a magnetostricção

Deseja-se aumentar a magnetostricção →

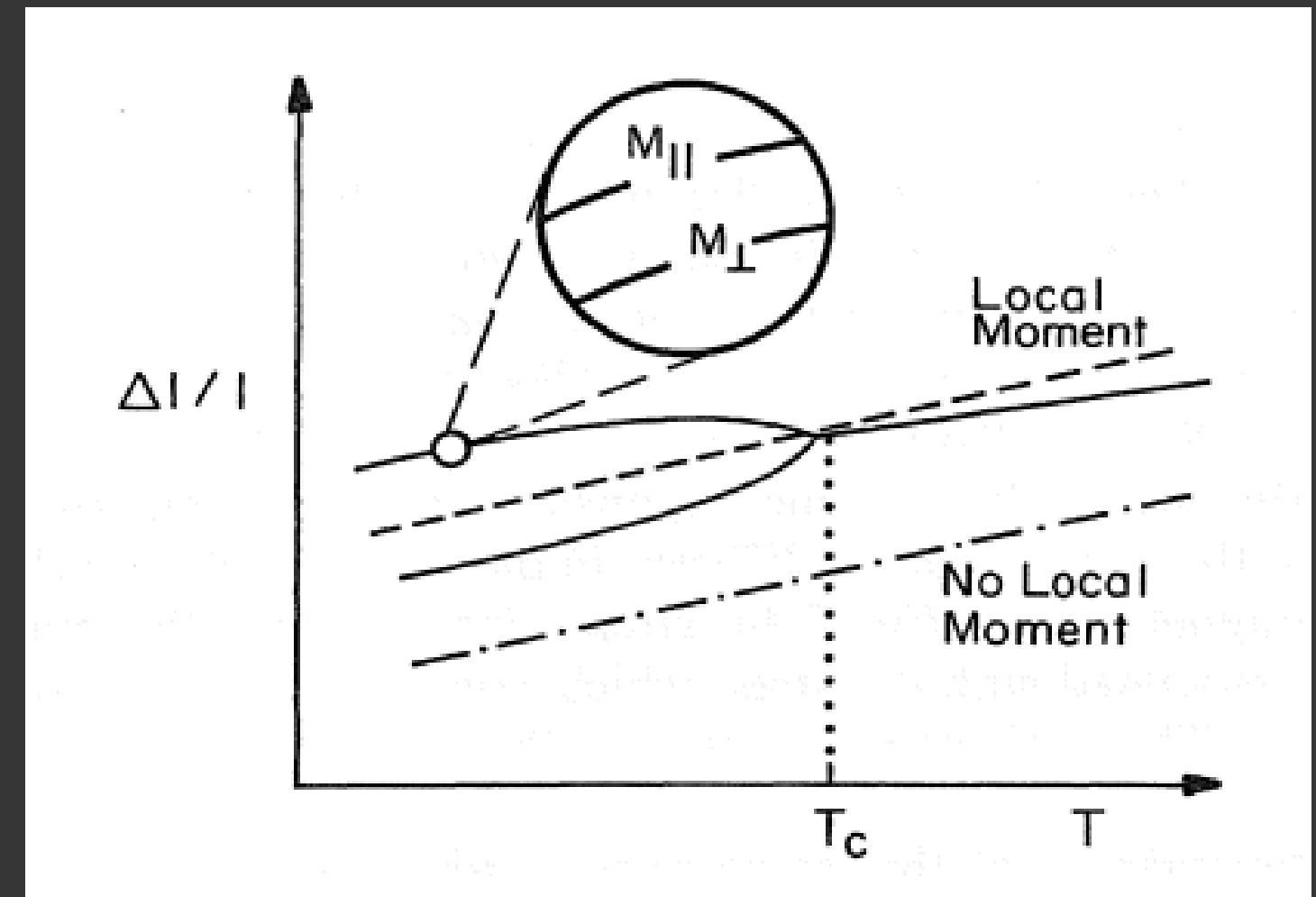
MAGNETOSTRICÇÃO X TEMPERATURA

- Anisotropia magnetocristalina reduz rapidamente com a temperatura e some na fase paramagnética
- Magnetostricção de Joule não existe na fase paramagnética
- Há excessões, principalmente em terras raras, em magnetizações remanescentes dos domínios



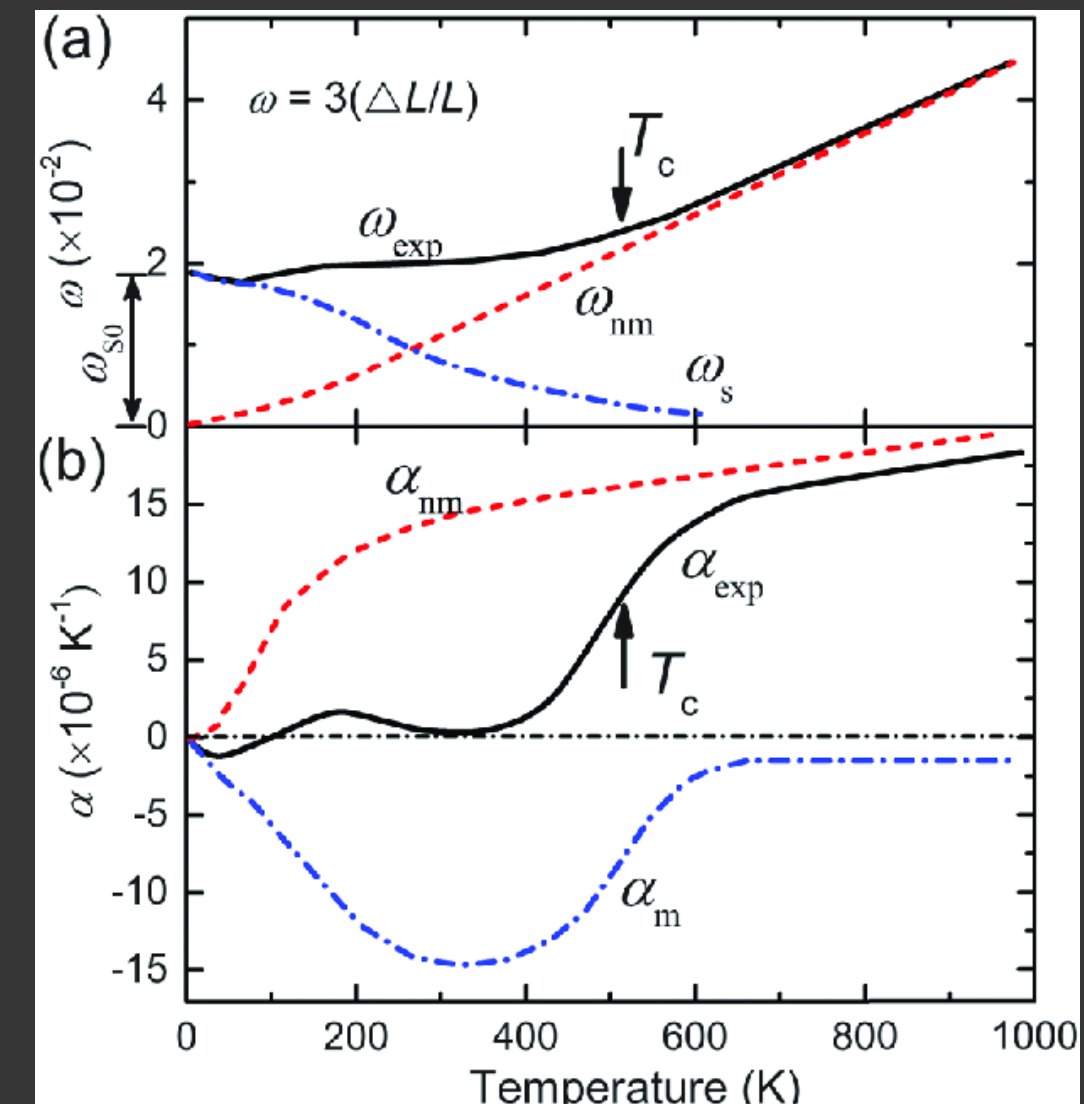
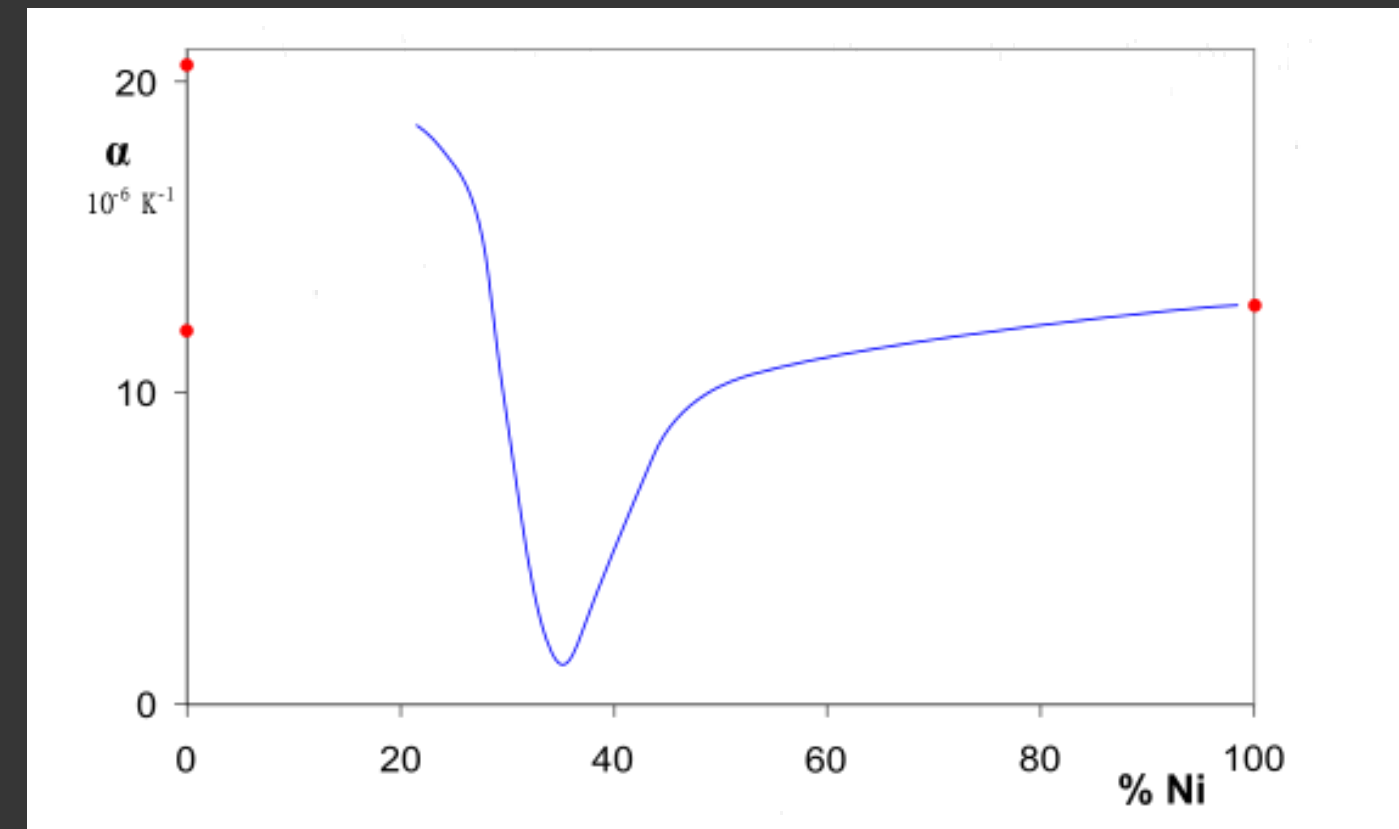
MAGNETOSTRICÇÃO VOLUMÉTRICA

- Efeito aproximadamente isotrópico -> afeta o volume do material
- Pode ser negativa ou positiva
- Magnetostricção dos domínios magnéticos
- Varia significativamente com T apenas na formação dos domínios (paramag. -> ferromag.)



EFEITO INVAR

- Efeito de invariância volumétrica em relação à temperatura
- Costuma iniciar próximo a transições de fases magnéticas
- Descoberto em Fe65Ni35
- Presente em outras ligas, como FeNiCo, FePt, CrTiNb, assim como em certas ligas amorfas (BMG)
- Pode resultar em outras propriedades invariantes (Elinvar – FeNiCr)



Efeito INVAR - Teorias

Teoria geral (mais aceita):

- Acoplamento spin-fônon (magnetismo + temperatura) durante a transição de fase
- Transição incompleta de fase
- Presença de 2 estados simultâneos (1 ferromag. + 1 paramag. / antiferromag.) em equilíbrio relativamente instável
- Variações subsequentes da temperatura alteram o equilíbrio das fases
- Cada estado possui volumes diferentes -> em proporções certas, a alteração do equilíbrio contrabalanceia a contração térmica

Efeito INVAR - Teorias

Teoria específica para FeNi e similares (ferromag. + paramag.):

- Estado de low spin do ferro: 0,8 a 1,5 magnetons de Bohr
Célula unitária menor
- Estado de high spin do ferro: 2,2 a 2,5 magnetons de Bohr
Célula unitária maior

Teoria para FePt e similares (ferromag. + antiferromag.):

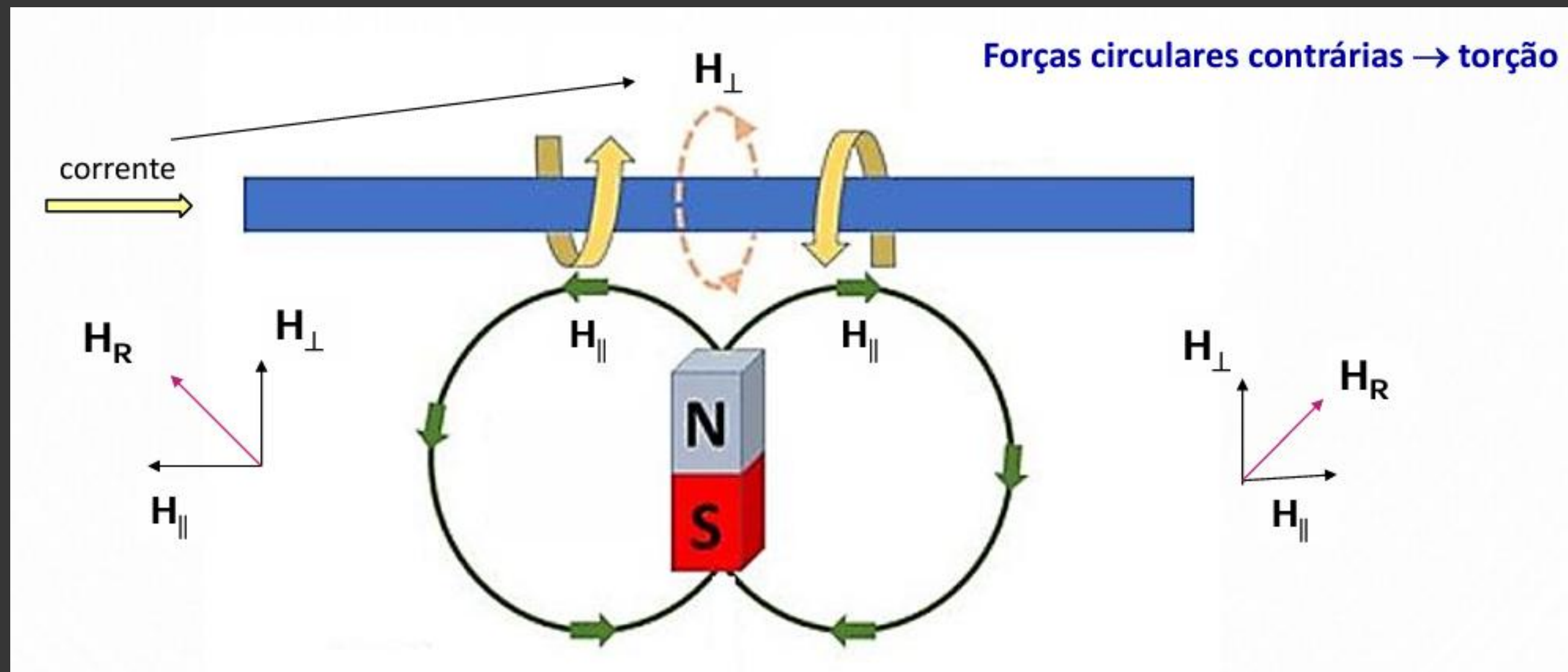
- Spin flipping converte estado antiferromag. em ferromag.

Teoria para ligas amorfas (BMG):

- Presença de regiões de ordenamento e desordenamento atômico e magnético
- Variação em T -> variação no ordenamento magnético -> variação no ordenamento atômico

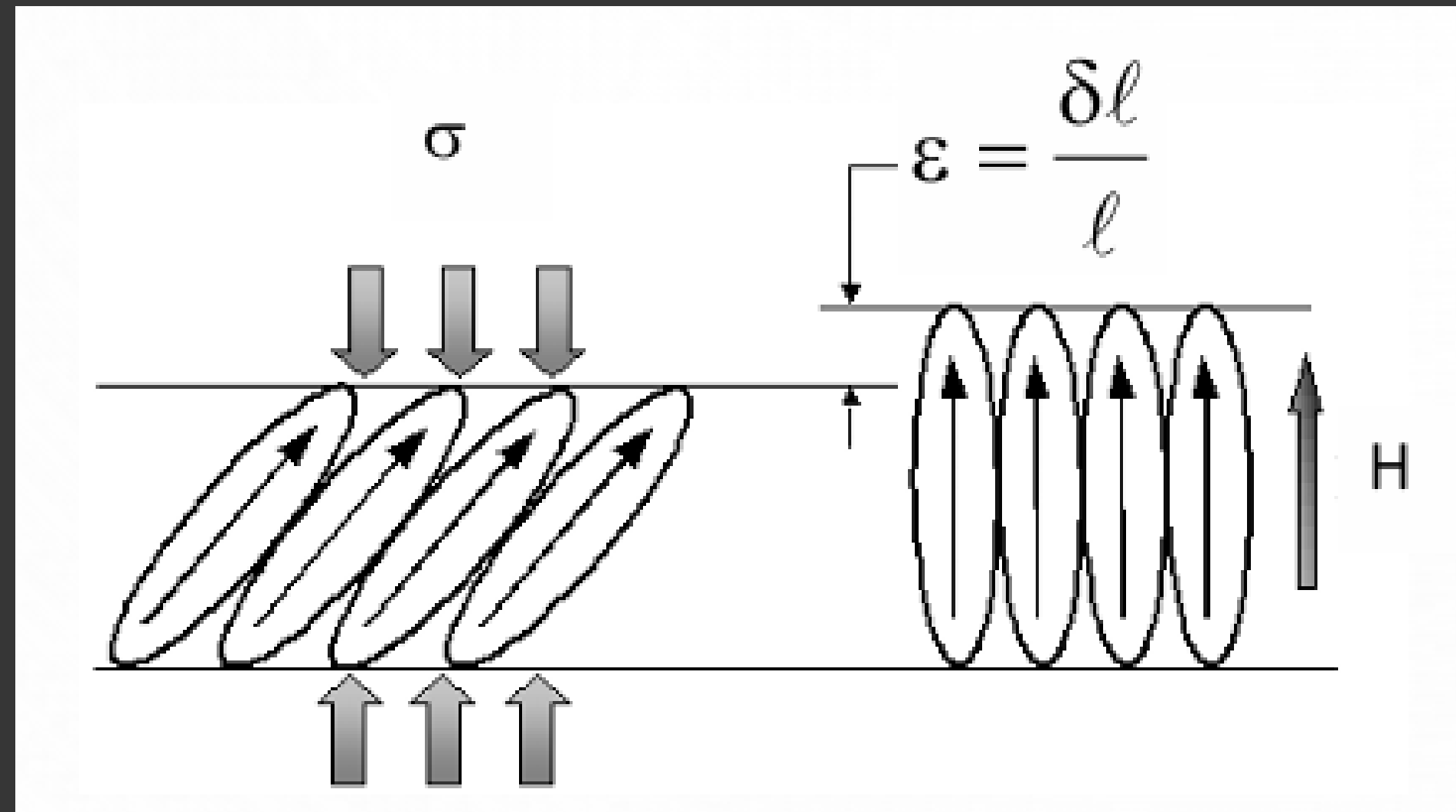
EFEITO WIEDEMANN E EFEITO MATTEUCCI

- Campo magnético longitudinal (ímã) + Campo magnético circular (corrente longitudinal) = Torção
- Torção = alteração helicoidal na susceptibilidade / magnetização



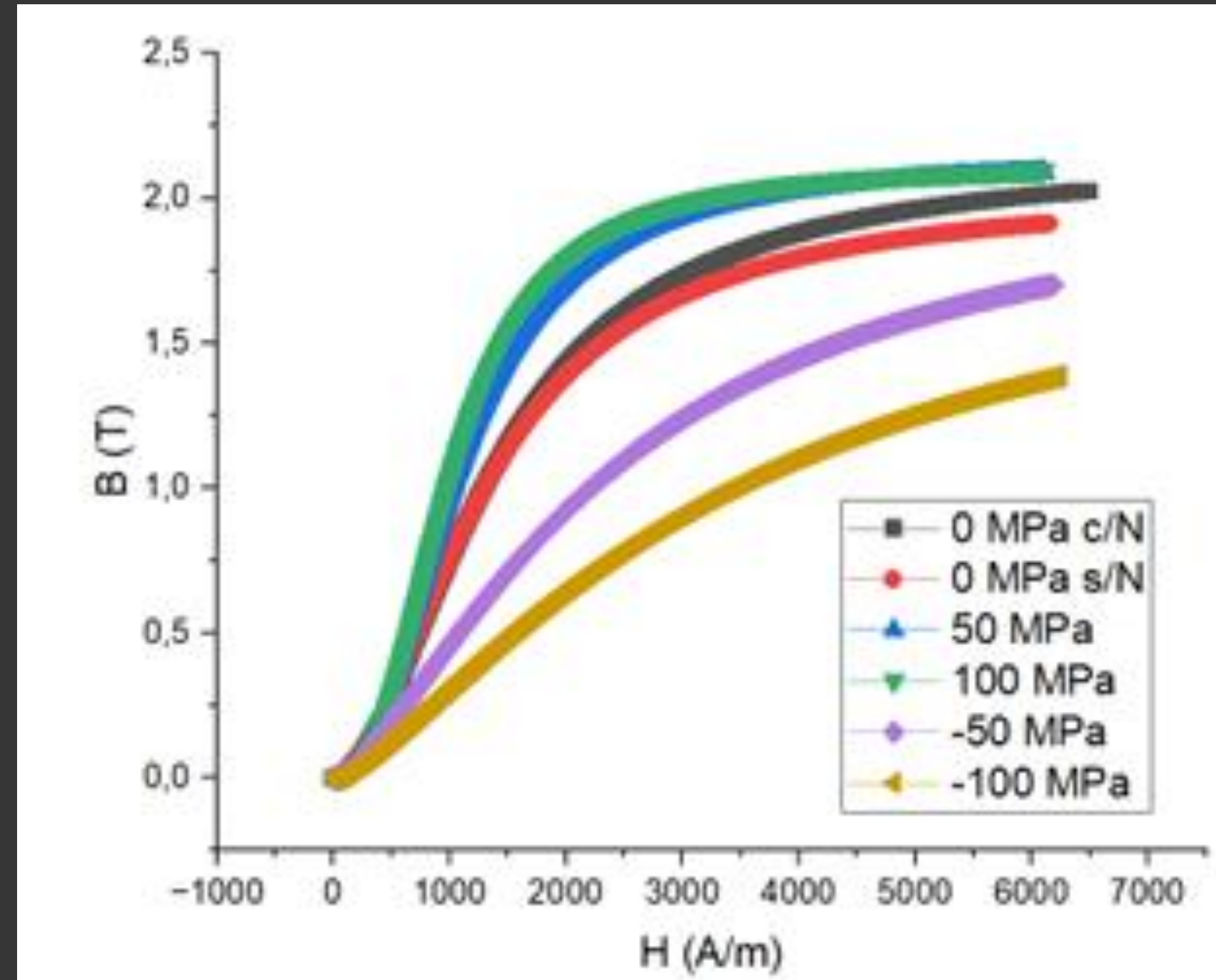
EFEITO PIEZOMAGNÉTICO

- Efeito Villari, Efeito Joule inverso
- Alteração na susceptibilidade / permeabilidade por aplicação de tensão
- Ocorre tanto para tração ($\sigma > 0$) quanto compressão ($\sigma < 0$)



ANISOTROPIA INDUZIDA POR PRESSÃO

- Tensão aplicada distorce as células e ligações (D)
- Alteração das energias anisotrópicas de cada direção (K_1 , K_2)
- Alteração na “facilidade” de magnetização em cada direção
- Deslocamento das curvas



EFEITO POSITIVO E NEGATIVO

EFEITO POSITIVO

$$\lambda.\sigma > 0$$

- Em direção com magnetostricção positiva, tração facilita / aumenta a magnetização
- Em direção com magnetostricção negativa, compressão facilita / aumenta a magnetização
- $\lambda.\sigma > 0 \rightarrow \chi, M$ aumentam

Efeito negativo

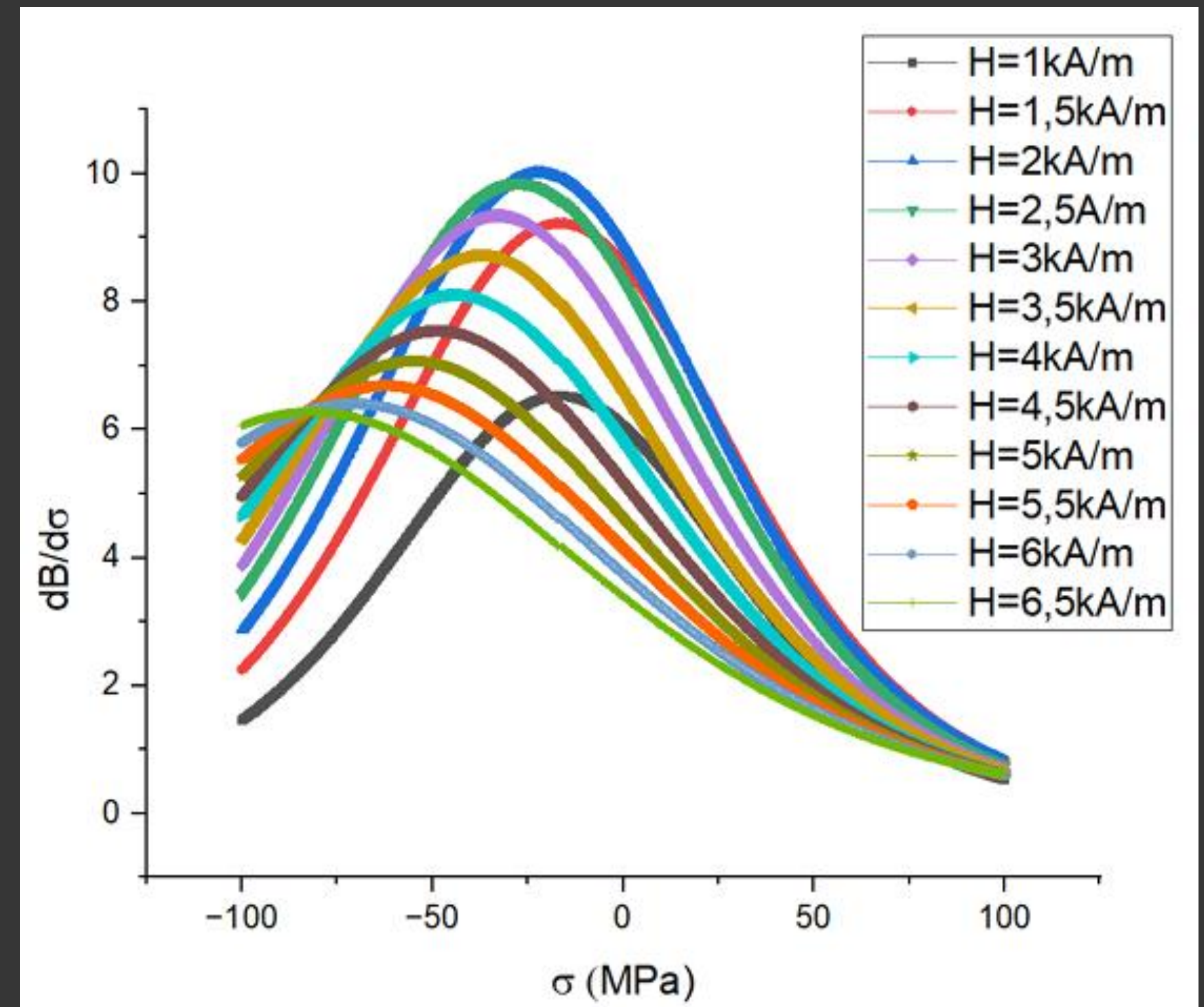
$$\lambda.\sigma < 0$$

- Em direção com magnetostricção positiva, compressão facilita / aumenta a magnetização
- Em direção com magnetostricção negativa, tração facilita / aumenta a magnetização
- $\lambda.\sigma < 0 \rightarrow \chi, M$ diminuem

COEFICIENTES PIEZOMAGNÉTICOS

$$d_{33} = \frac{dB}{d\sigma}|_H$$

- Coeficiente característico do efeito piezomagnético
- Para aplicações, deseja-se coeficiente maior que 1 mT/MPa



COEFICIENTES PIEZOMAGNÉTICOS

Alteração em K1, K2 ->
Alteração em λ_s

$$\left. \frac{d\lambda}{dH} \right|_{\sigma} = d_{33}^* \quad [\text{nm/A}]$$

