

# Eletromagnetismo

## Aula 08 – Curva BH e materiais duros

---

Prof. Acélio Luna Mesquita

Universidade Federal do Ceará – Campus Sobral

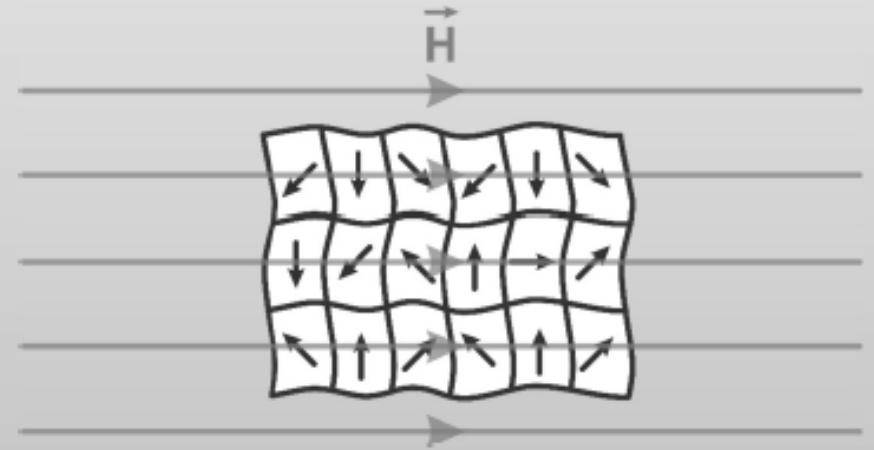
# Campo magnético vs matéria

---

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \equiv \mu_r \cdot \mu_o \cdot \vec{H} \therefore \mu_r = \frac{\mu}{\mu_o}$$

vácuo:  $\vec{m}_a = 0 \rightarrow \mu_r = 1$

matéria:  $\vec{m}_a \neq 0 \rightarrow \mu_r \neq 1$



# Campo magnético vs matéria

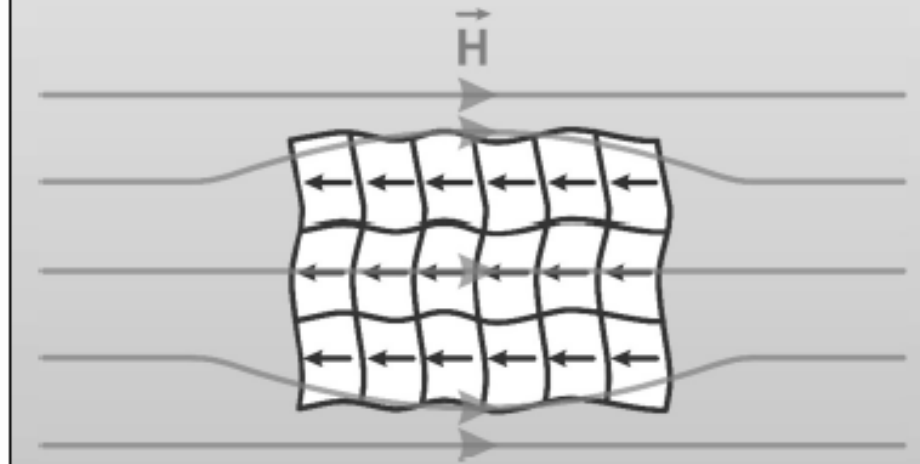
---

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \equiv \mu_r \cdot \mu_o \cdot \vec{H} \therefore \mu_r = \frac{\mu}{\mu_o}$$

vácuo:  $\vec{m}_a = 0 \rightarrow \mu_r = 1$

matéria:  $\vec{m}_a \neq 0 \rightarrow \mu_r \neq 1$

\* antiparalelismo: subtração  $\rightarrow 0 < \mu_r < 1$



# Campo magnético vs matéria

---

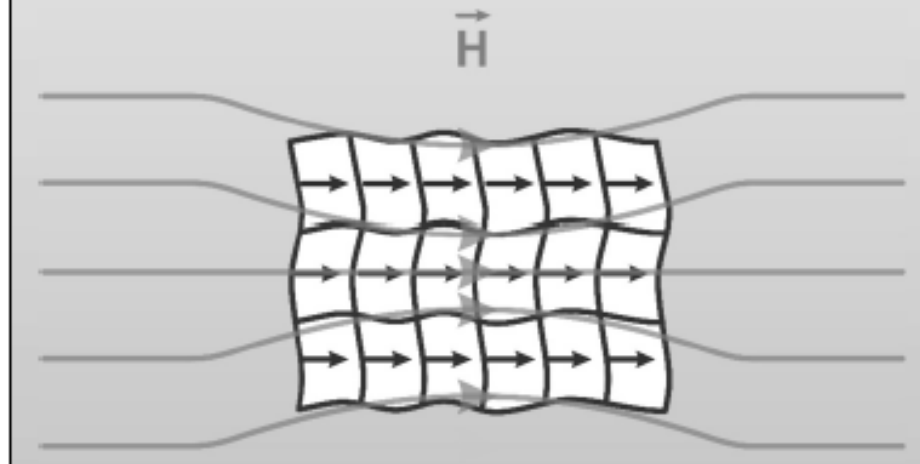
$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \equiv \mu_r \cdot \mu_o \cdot \vec{H} \therefore \mu_r = \frac{\mu}{\mu_o}$$

vácuo:  $\vec{m}_a = 0 \rightarrow \mu_r = 1$

matéria:  $\vec{m}_a \neq 0 \rightarrow \mu_r \neq 1$

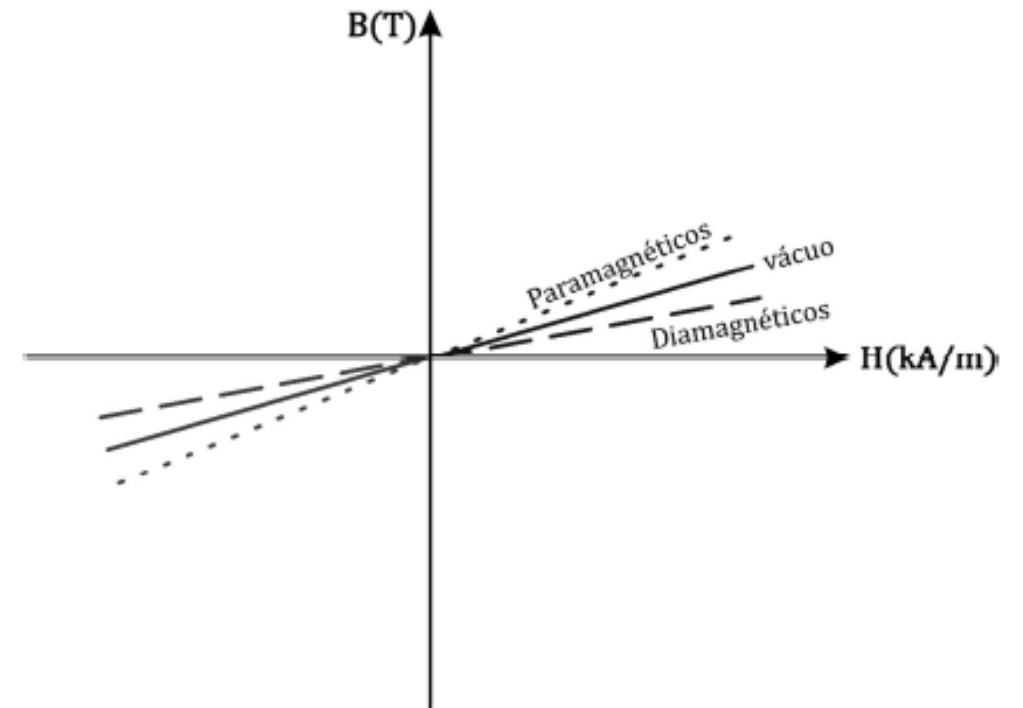
\* antiparalelismo: subtração  $\rightarrow 0 < \mu_r < 1$

\* paralelismo: adição  $\rightarrow \mu_r > 1$



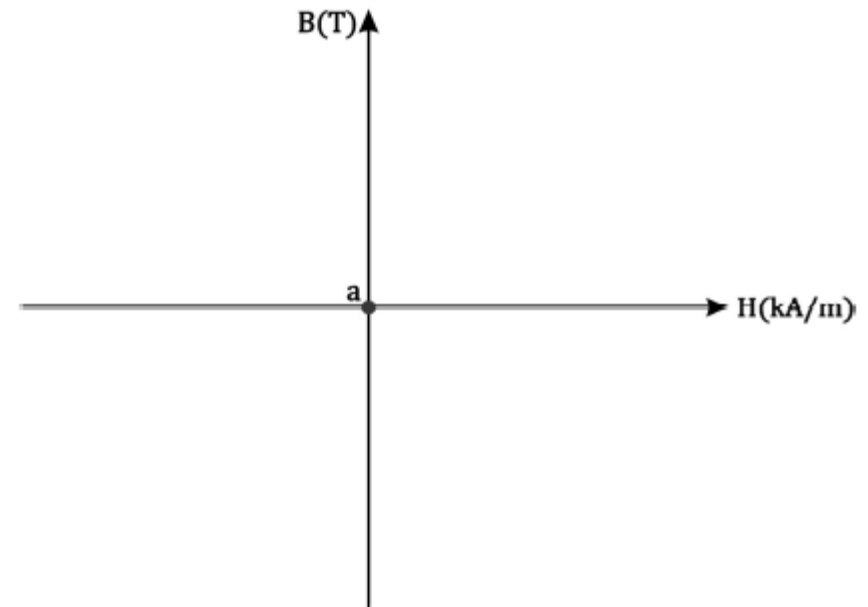
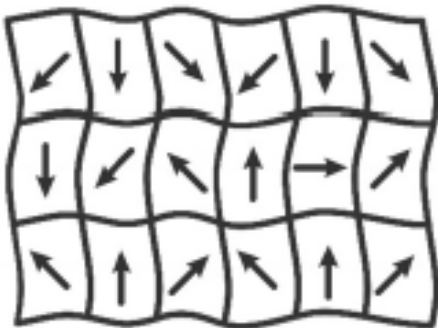
# Curva BxH: materiais não-magnéticos

- Materiais não-magnéticos:
  - Diamagnéticos:  $\mu \approx \mu_0 \gg \mu_r < 1$ ;
  - Paramagnéticos:  $\mu \approx \mu_0 \gg \mu_r > 1$ ;
  - Antiferromagnéticos:  $\mu \approx \mu_0 \gg \mu_r \approx 1$ ;



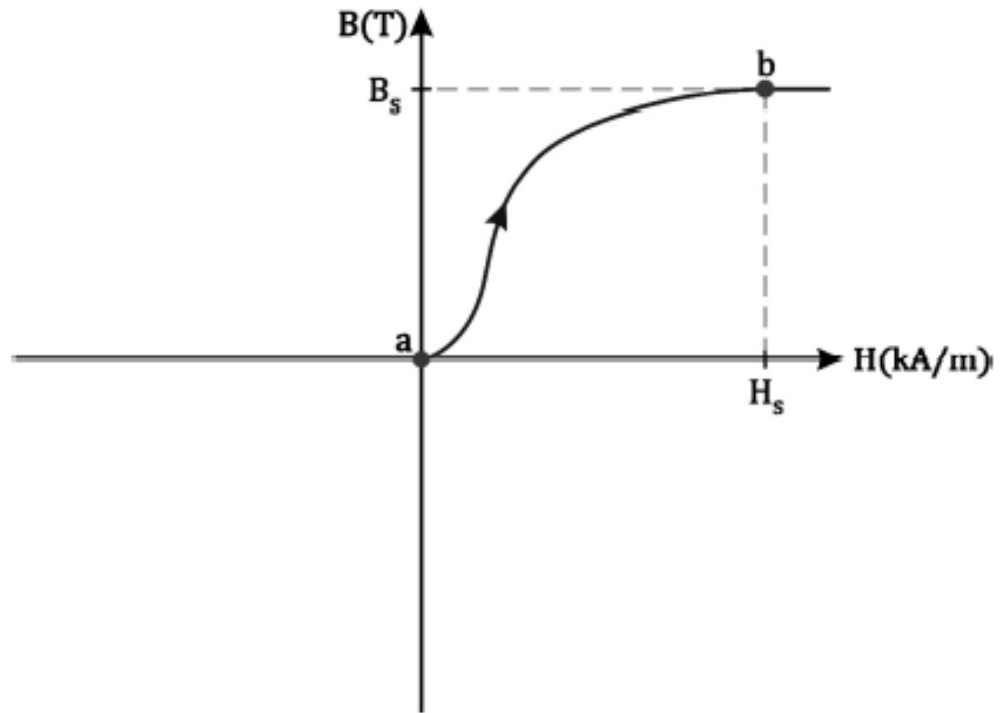
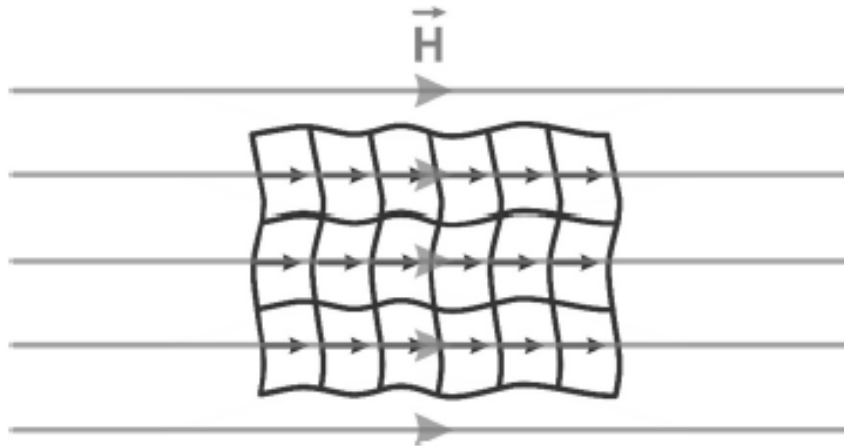
# Curva BxH: materiais magnéticos

- Materiais magnéticos:
  - Ferromagnéticos:  $\mu \neq \mu_0 \gg \mu_r \gg 1$ ;
  - Ferrimagnéticos:  $\mu \neq \mu_0 \gg \mu_r \gg 1$ ;
- Desmagnetizado: a;



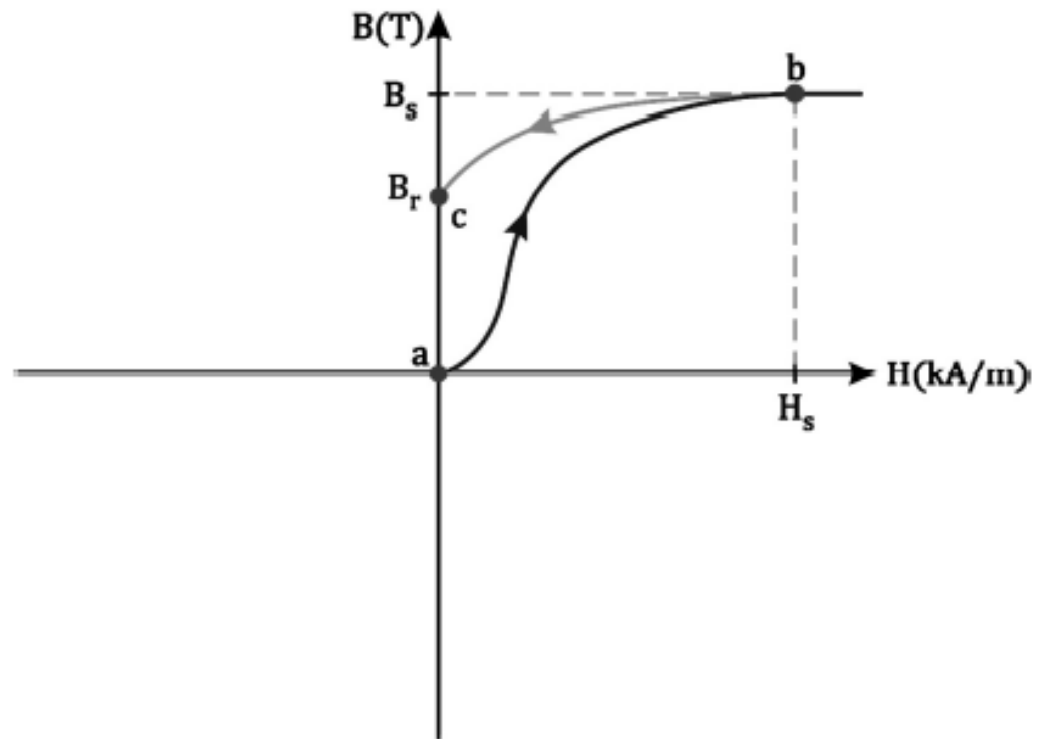
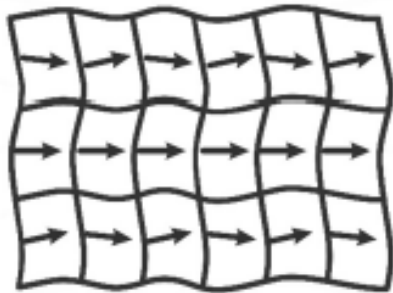
# Curva BxH: materiais magnéticos

- Materiais magnéticos:
  - Ferromagnéticos:  $\mu \neq \mu_0 \gg \mu_r \gg 1$ ;
  - Ferrimagnéticos:  $\mu \neq \mu_0 \gg \mu_r \gg 1$ ;
- Desmagnetizado: a;
- Primeira Magnetização: a-b;
  - Não-linearidade: saturação ( $B_s$ );



# Curva BxH: materiais magnéticos

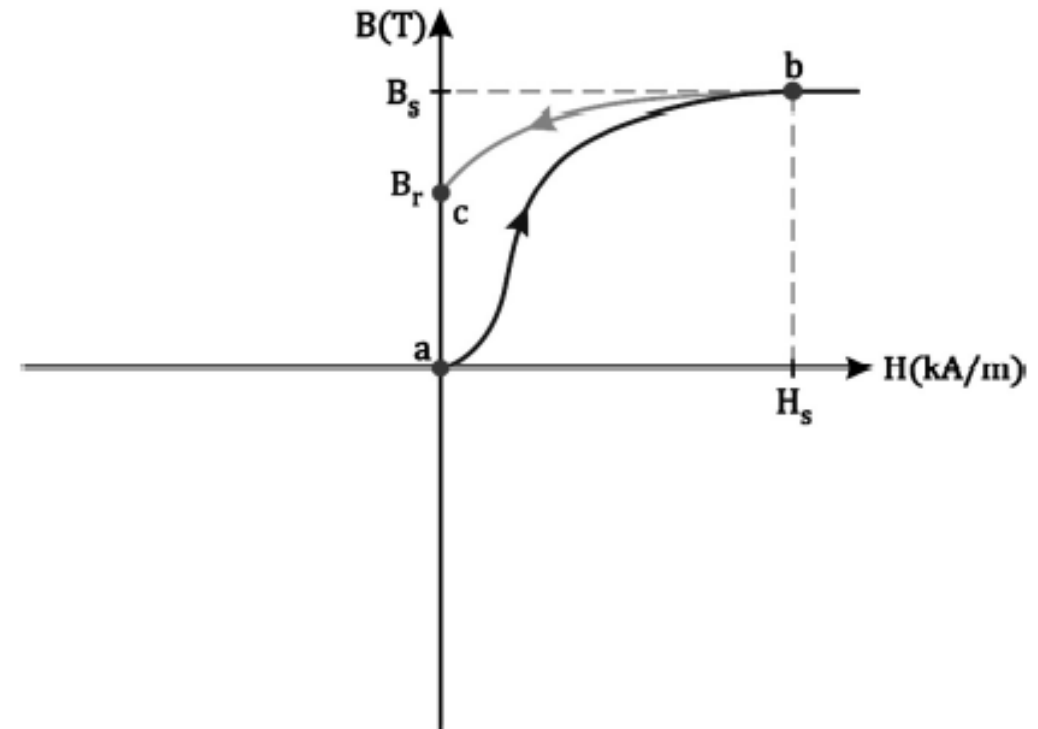
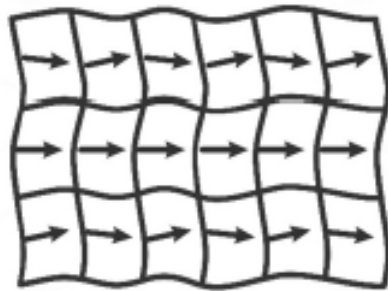
- Materiais magnéticos:
  - Ferromagnéticos:  $\mu \neq \mu_0 \gg \mu_r \gg 1$ ;
  - Ferrimagnéticos:  $\mu \neq \mu_0 \gg \mu_r \gg 1$ ;
- Desmagnetizado: a;
- Primeira Magnetização: a-b;
  - Não-linearidade: saturação ( $B_s$ );
- Desmagnetização parcial: b-c;
  - Histerese: Densidade de Campo Residual ( $B_r$ );





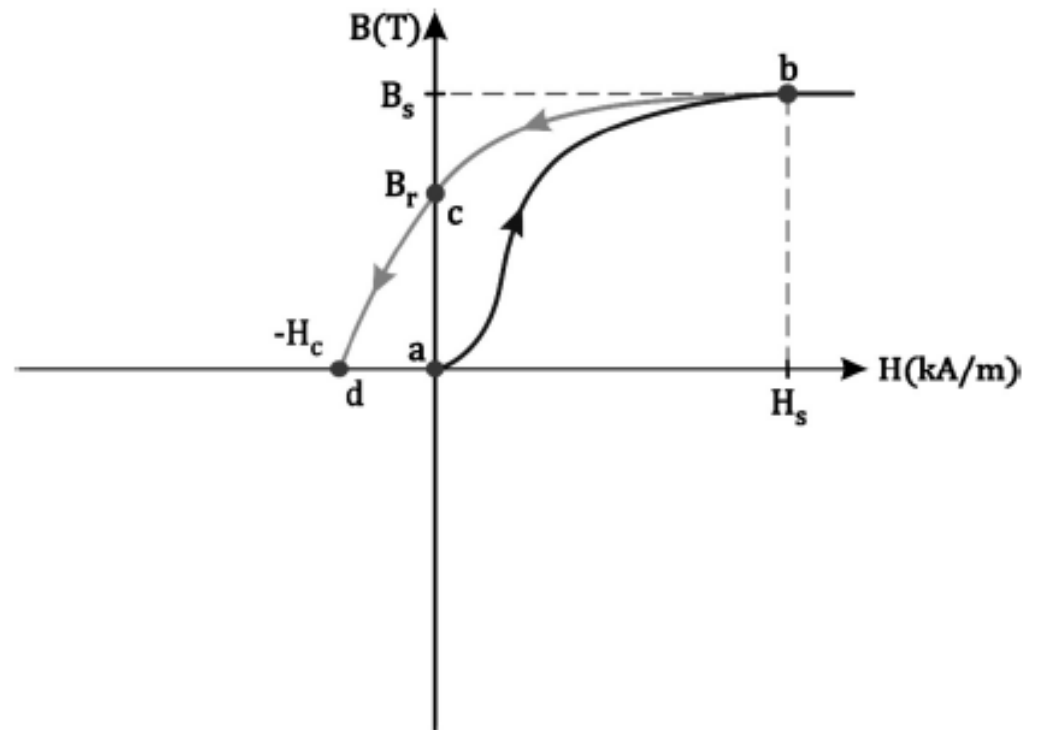
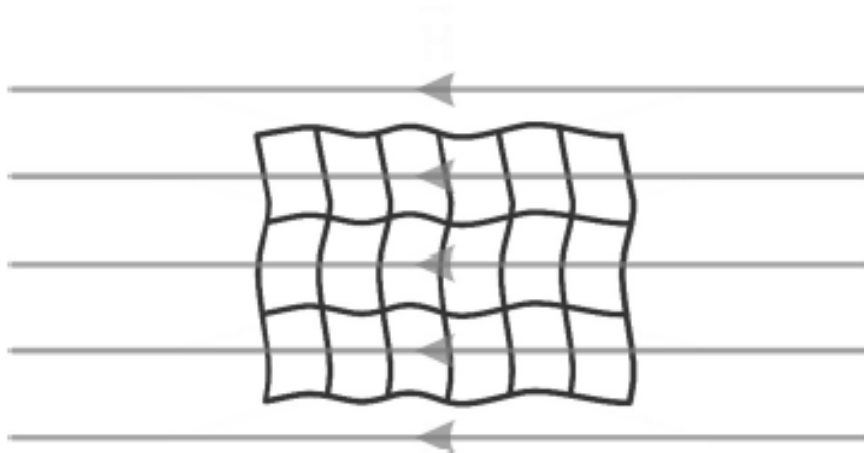
# Curva BxH: materiais magnéticos

- Materiais magnéticos:
  - Ferromagnéticos:  $\mu \neq \mu_0 \gg \mu_r \gg 1$ ;
  - Ferrimagnéticos:  $\mu \neq \mu_0 \gg \mu_r \gg 1$ ;
- Desmagnetizado: a;
- Primeira Magnetização: a-b;
  - Não-linearidade: saturação ( $B_s$ );
- Desmagnetização parcial: b-c;
  - Histerese: Densidade de Campo Residual ( $B_r$ );



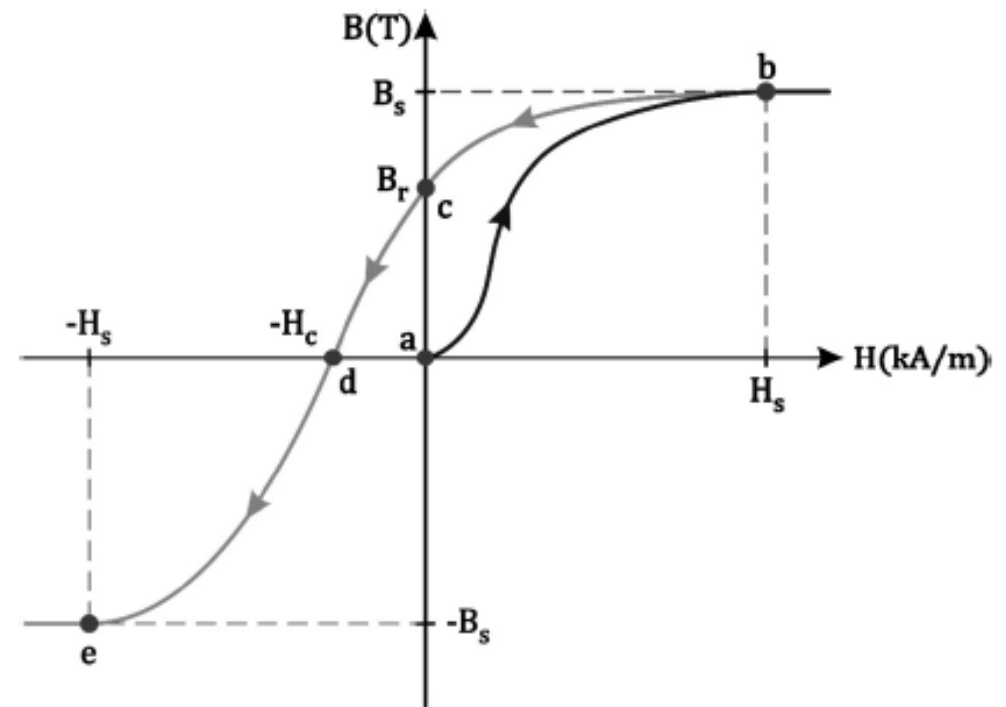
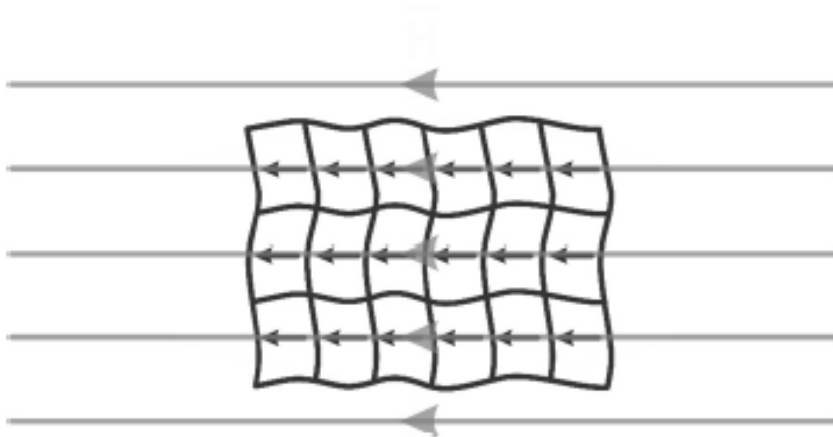
# Curva BxH: materiais magnéticos

- Completa desmagnetização: c-d;
  - Campo magnético coercitivo ( $-H_c$ );



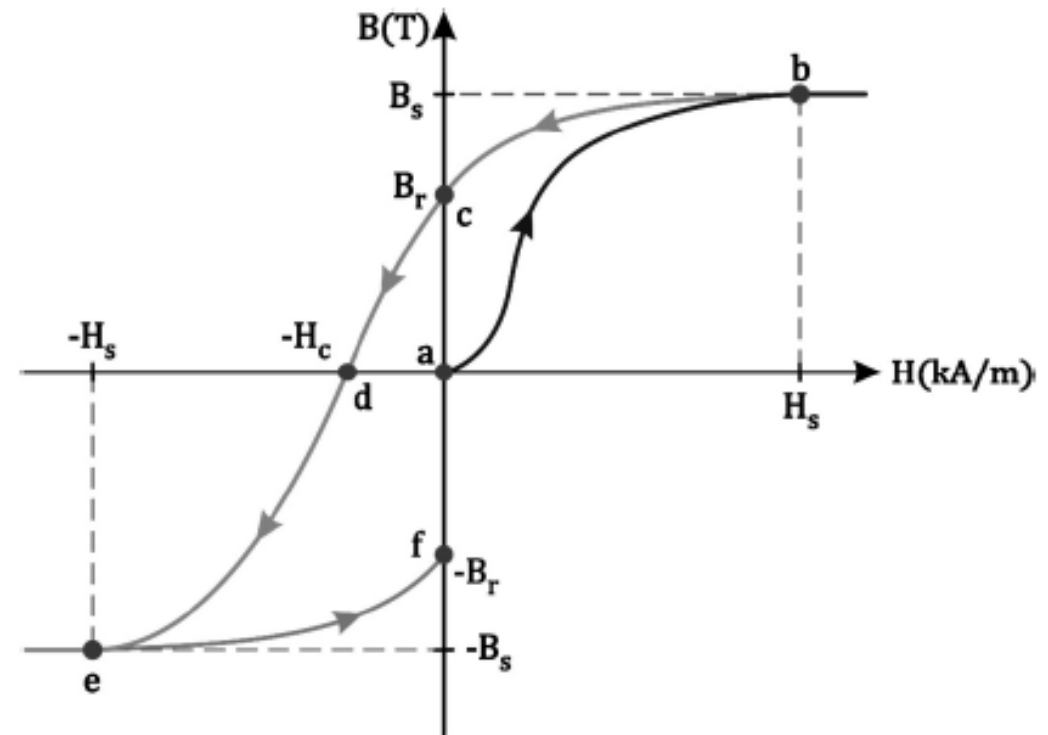
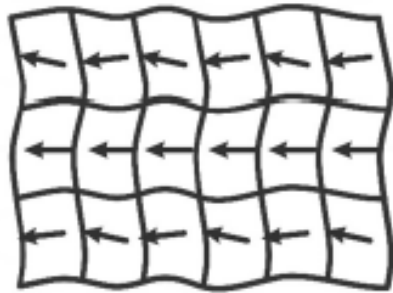
# Curva BxH: materiais magnéticos

- *Completa desmagnetização: c-d;*
  - Campo magnético coercitivo ( $H_c$ );
- *Magnetização no sentido oposto: d-e;*
  - Saturação negativa ( $-B_s$ );



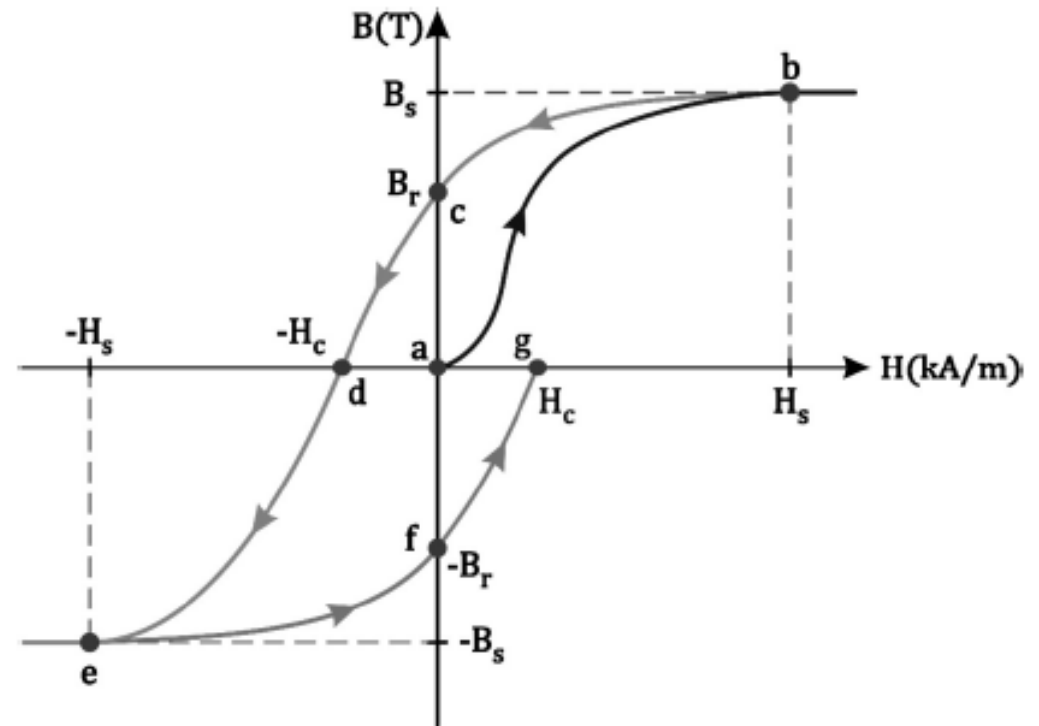
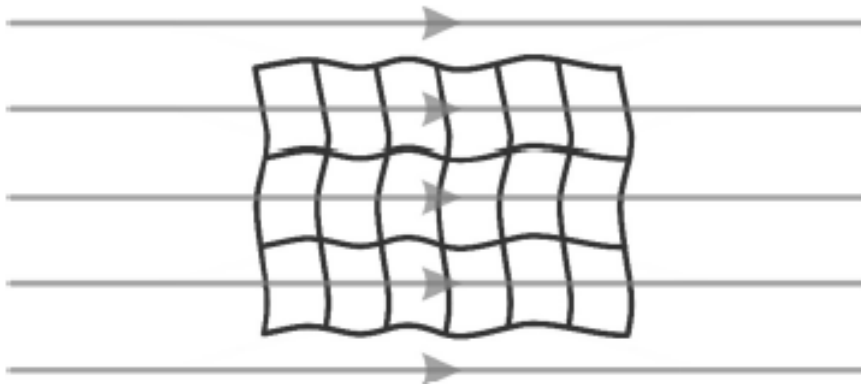
# Curva BxH: materiais magnéticos

- *Completa desmagnetização: c-d;*
  - Campo magnético coercitivo ( $H_c$ );
- *Magnetização no sentido oposto: d-e;*
  - Saturação negativa ( $-B_s$ );
- *Desmagnetização parcial: e-f;*
  - Densidade de Campo Residual ( $-B_r$ );



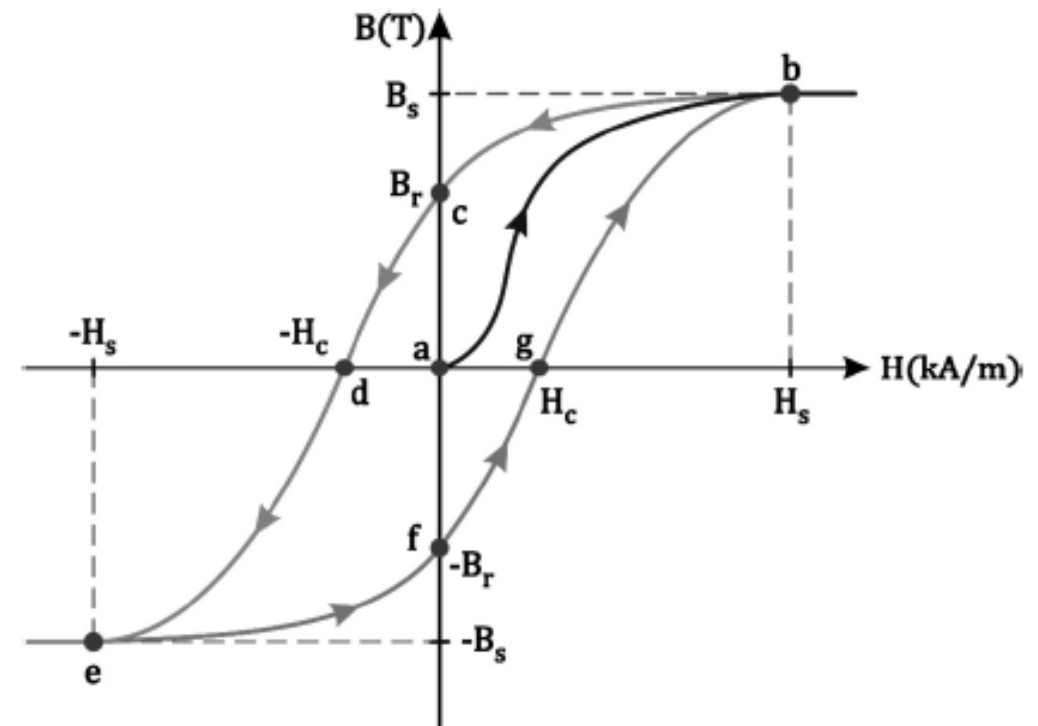
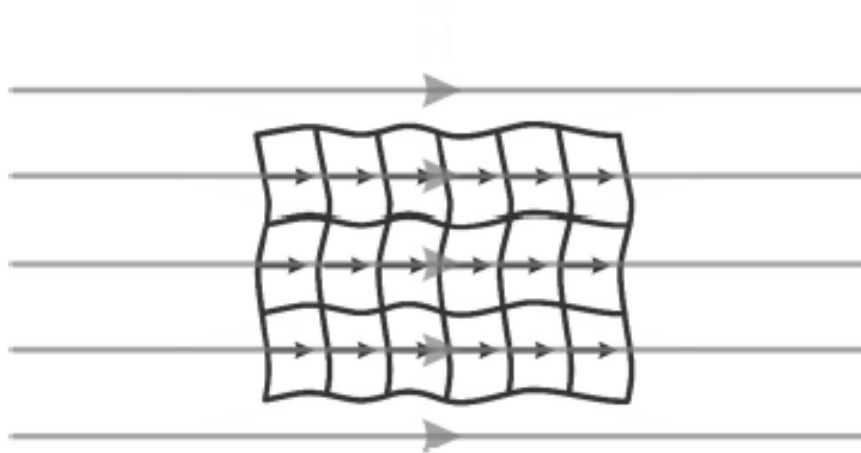
# Curva BxH: materiais magnéticos

- *Completa desmagnetização: c-d;*
  - Campo magnético coercitivo ( $H_c$ );
- *Magnetização no sentido oposto: d-e;*
  - Saturação negativa ( $-B_s$ );
- *Desmagnetização parcial: e-f;*
  - Densidade de Campo Residual ( $-B_r$ );
- *Completa desmagnetização: f-g;*
  - Campo magnético coercitivo ( $H_c$ );



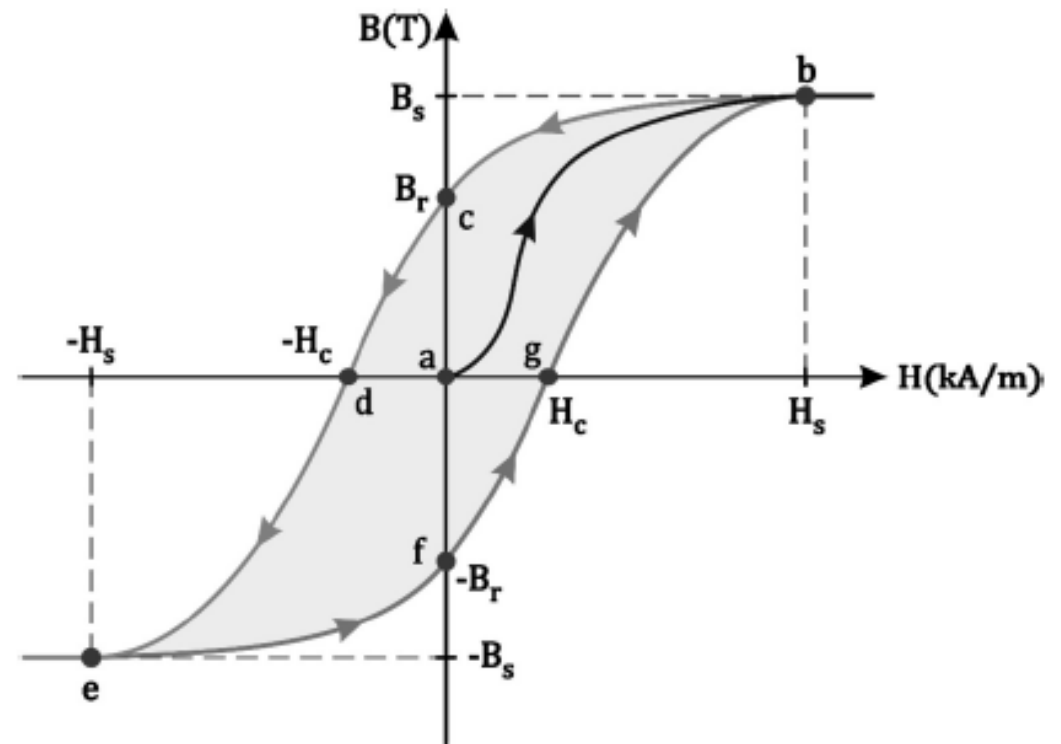
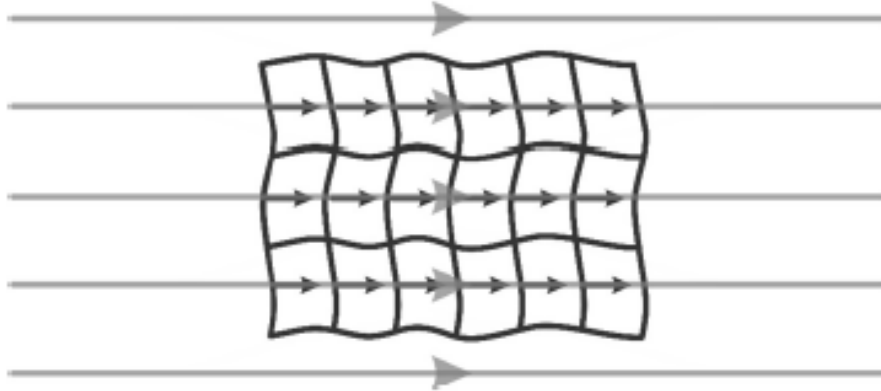
# Curva BxH: materiais magnéticos

- Remagnetização positiva: g-b;



# Curva BxH: materiais magnéticos

- Remagnetização positiva: g-b;
- Histerese: 2ª não linearidade;
  - Densidade magnética de campo residual/remanescente;
  - Campo magnético coercitivo;
  - Dissipação de energia a cada ciclo;
- Completa desmagnetização:
  - temperatura de Curie;
  - Paramagnético até resfriar;



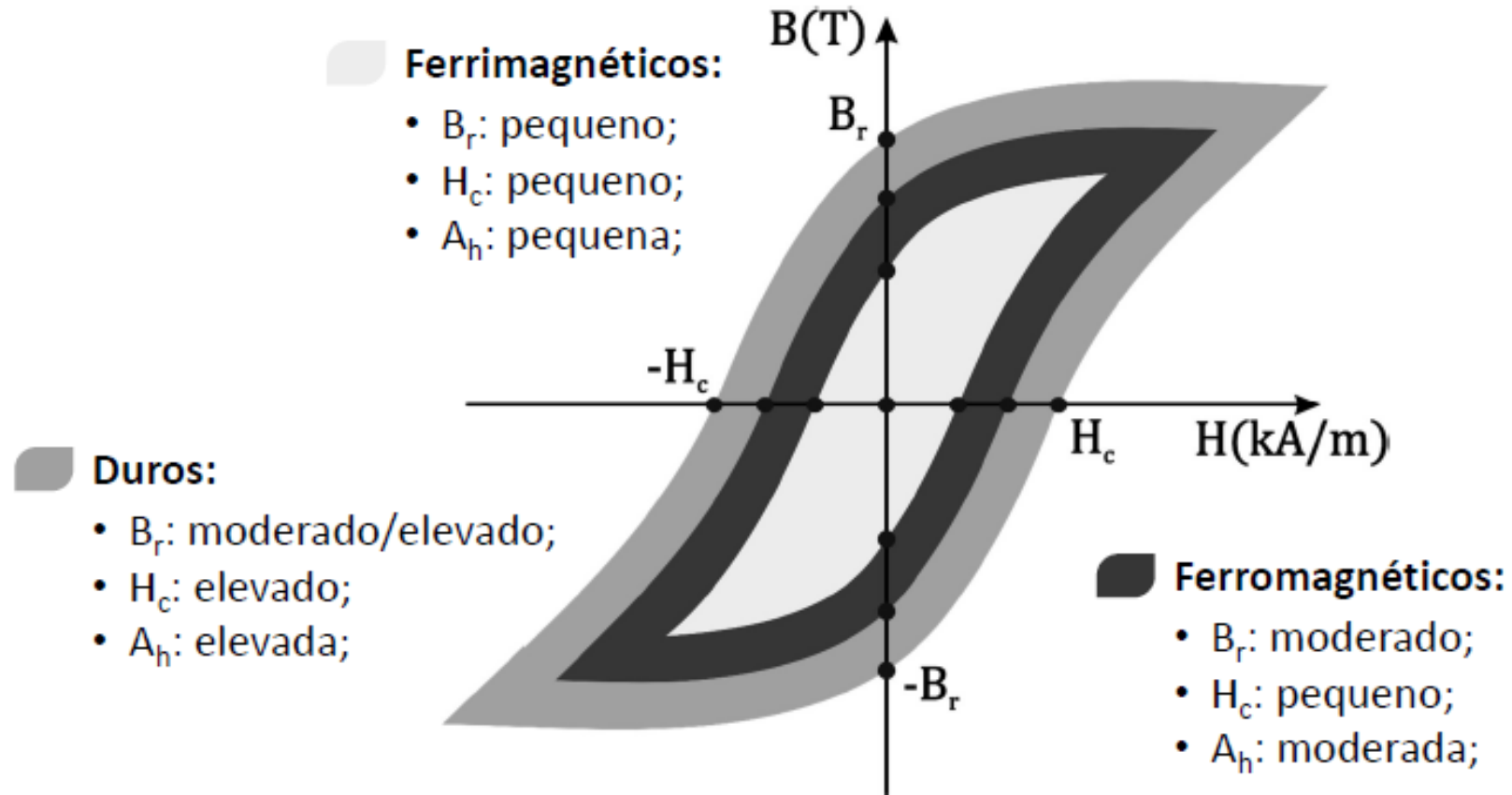
# Curva BxH: materiais magnéticos

---

Material	Tipo	T. de Curie (°C)
Ferrite de Manganês ( $\text{MnOFe}_2\text{O}$ )	Mole (ferrimagnético)	300
Magnetita ( $\text{FeOFe}_2\text{O}_3$ )	Mole (ferrimagnético)	585
Óxido de Ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	Mole (ferrimagnético)	675
Níquel (Ni)	Mole (ferromagnético)	354
Ferro (Fe)	Mole (ferromagnético)	770
Cobalto (Co)	Mole (ferromagnético)	1127
Ímã AlNiCo	Duro (ferromagnético)	700
Ímã Samário	Duro (ferromagnético)	720
Ímã Neodímio	Duro (ferromagnético)	310



# Curva BxH: materiais magnéticos



# Aplicações da histerese

---

- A alta ou baixa histerese dos materiais determina seu uso em diferentes tecnologias. O aço temperado é utilizado na fabricação de ímãs artificiais permanentes por apresentar histerese muito alta, ou seja, o material não pode ser desmagnetizado facilmente após ser imantado. O chamado ferro doce apresenta histerese baixa, portanto, sua desmagnetização é fácil. Esse material é utilizado na composição de eletroímãs, que devem apresentar-se totalmente desmagnetizados quando são desligados.

# Os ímãs permanentes

---

- Os cinco tipos de materiais apresentados até agora são denominados “moles”, pois só apresentam momento magnético significativo quando estão sob ação de um campo magnético.
- No entanto, existe uma classe de materiais, denominados de duros, que são capazes de gerar campo magnético significativo de forma autônoma. Do ponto de vista atômico, os materiais duros são similares aos materiais ferromagnéticos, ou seja, apresentam pressão similares aos materiais ferromagnéticos, ou seja apresentam predominância de momento magnético de spin não compensado , ou seja, agrupados em domínios.
- Mas, ao contrario dos materiais ferromagnéticos, os domínios dos materiais duros depois de alinhados não se desalinham com a remoção (dos materiais) do campo magnético externo. Somente um campo magnético contrario suficientemente intenso ou uma temperatura bastante elevada para desmagnetiza-lo.

# Os ímãs permanentes

---

Os ímãs permanentes são caracterizados por dois grandes parâmetros:

- Campo magnético coercitivo ( $H_c$ )
  - A intensidade do campo magnético externo que deve ser aplicada contra um ímã permanente para que ele se desmagnetize.
- Indução magnética permanente ( $B_r$ )
  - Intensidade de densidade magnética permanente associada ao ímã.

# Principais tipos de ímãs permanentes

---

- Ímãs AlNiCo:
  - Compostos por um substrato de ferro ao qual são adicionados Alumínio (Al), Níquel (Ni) e Cobalto (Co);
  - $B_r \approx 1T$ ;
  - $H_c > 50kA/m$ ;
  - $T_c \approx 700^\circ C$ ;
  - Boa condutividade elétrica;
- O primeiro ímã sintético de alto desempenho surgiu em 1940 tendo como base o ferro, ao qual foram misturados os alumínio (Al), o níquel (Ni) e o cobalto (Co).
- Uma outra característica importante desse ímã é sua elevada estabilidade térmica.

# Principais tipos de ímãs permanentes

---

Em 1947 surgem os ímãs baseados em óxidos de ferro cujas ligas são feitas utilizando estrôncio ou bário.

- Ímãs de óxido de ferro:
  - Compostos por um substrato de óxido de ferro ao qual são adicionados Estrôncio ( $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) ou Bário ( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ );
  - $B_r \approx 0,4\text{T}$ ;
  - $H_c > 100\text{kA/m}$ ;
  - $T_c \approx 450^\circ\text{C}$ ;
  - Baixíssima condutividade elétrica;
  - Tecnologia mais barata;

Vantagens:

- Maior campo coercitivo  $H_c$ ;
- Menor custo;
- Boa estabilidade térmica;
- São bons isolantes elétricos.

# Principais tipos de ímãs permanentes

---

Somente em 1983, a partir da mistura de ferro com neodímio e boro se obteve um ímã de altíssimo desempenho, boa estabilidade térmica e custo aceitável.

- Ímãs de terras raras:
  - O de maior desempenho é composto por um substrato de ferro ao qual são adicionados Neodímio e Boro ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ );
  - $B_r > 1\text{T}$ ;
  - $H_c > 600\text{kA/m}$ ;
  - $T_c \approx 300\text{-}700^\circ\text{C}$ ;
  - Boa condutividade elétrica;
  - Tecnologia mais cara;



# UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ CAMPUS SOBRAL

Perguntas?

[acelioucolie@alu.ufc.br](mailto:acelioucolie@alu.ufc.br)

Na base da página, há uma barra decorativa composta por duas faixas horizontais: a superior é de cor azul escura e a inferior é de cor azul mais clara.