



## Assuntos abordados

- Campo Magnético vs. Matéria;
- A curva  $B \times H$ : materiais não-magnéticos;
- A curva  $B \times H$ : materiais magnéticos;
  - Saturação;
  - Histerese;
  - Perdas por Histerese;
  - Desmagnetização por temperatura;
- Ímãs Permanentes (materiais duros);

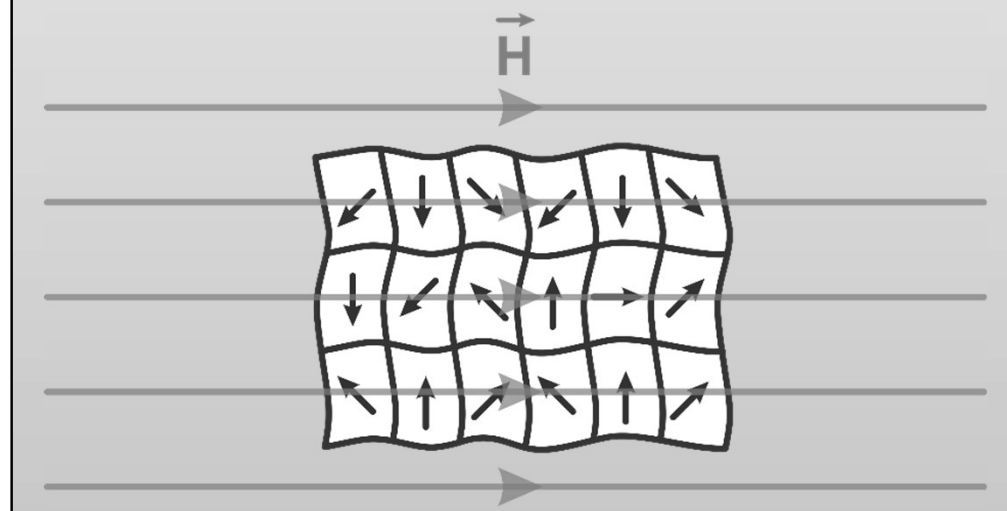


## Campo Magnético vs. Matéria

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

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

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





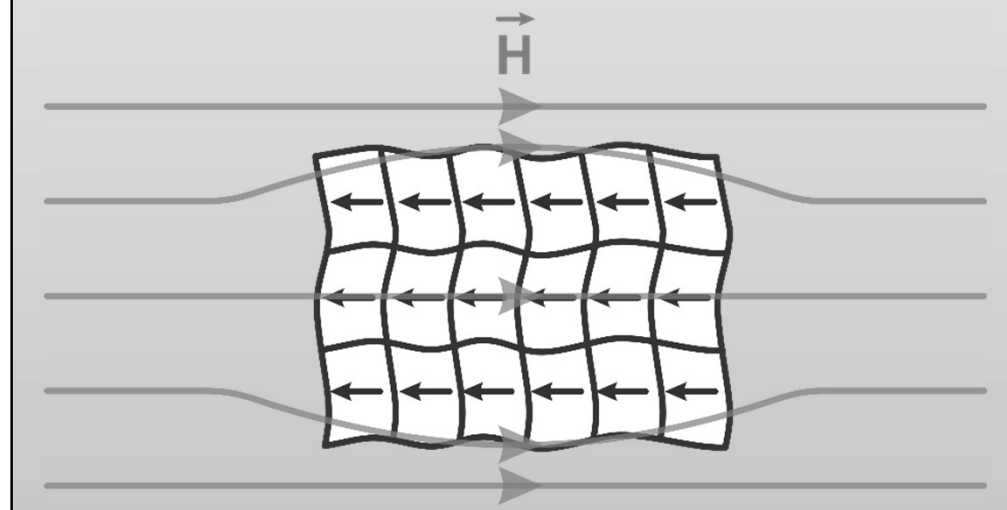
## Campo Magnético vs. Matéria

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

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

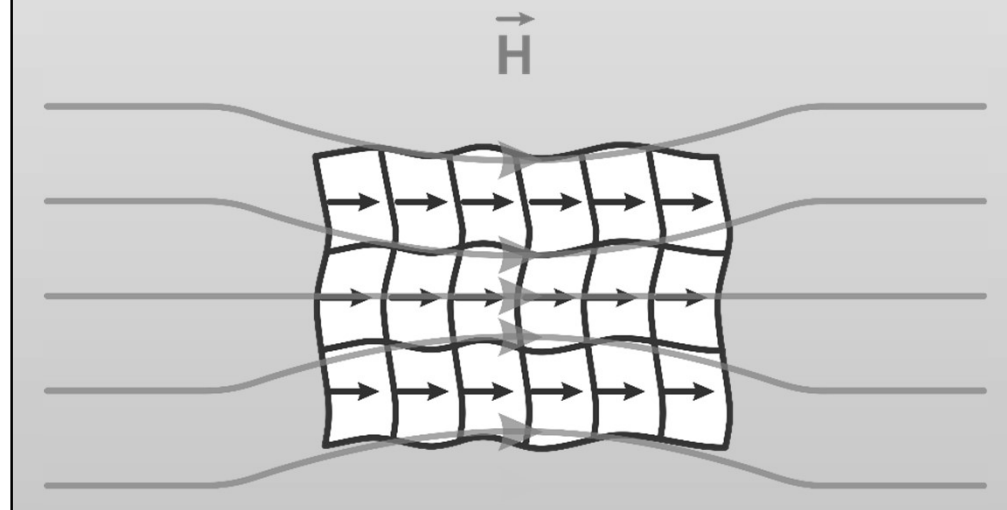
$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \equiv \mu_r \cdot \mu_o \cdot \vec{H} \therefore \mu_r = \frac{\mu}{\mu_o}$$

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*  $\rightarrow \mu_r > 1$

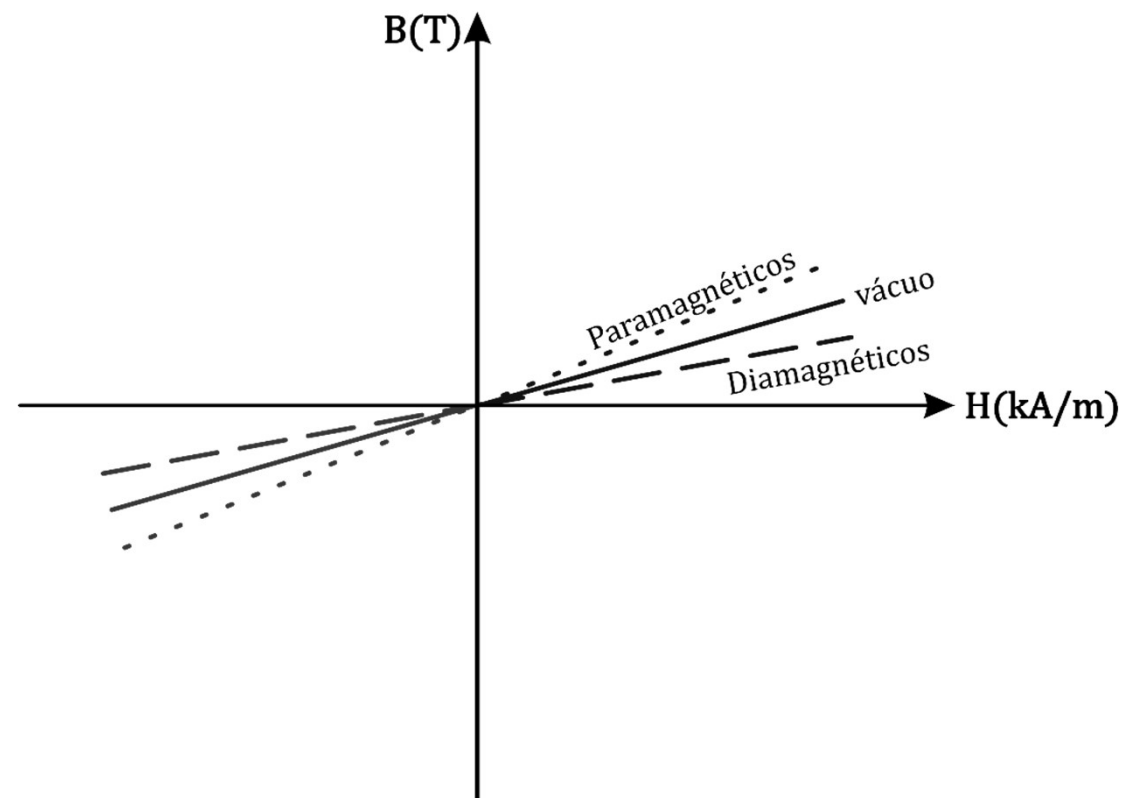




## Curva B x H: materiais não-magnéticos

- Materiais não-magnéticos:

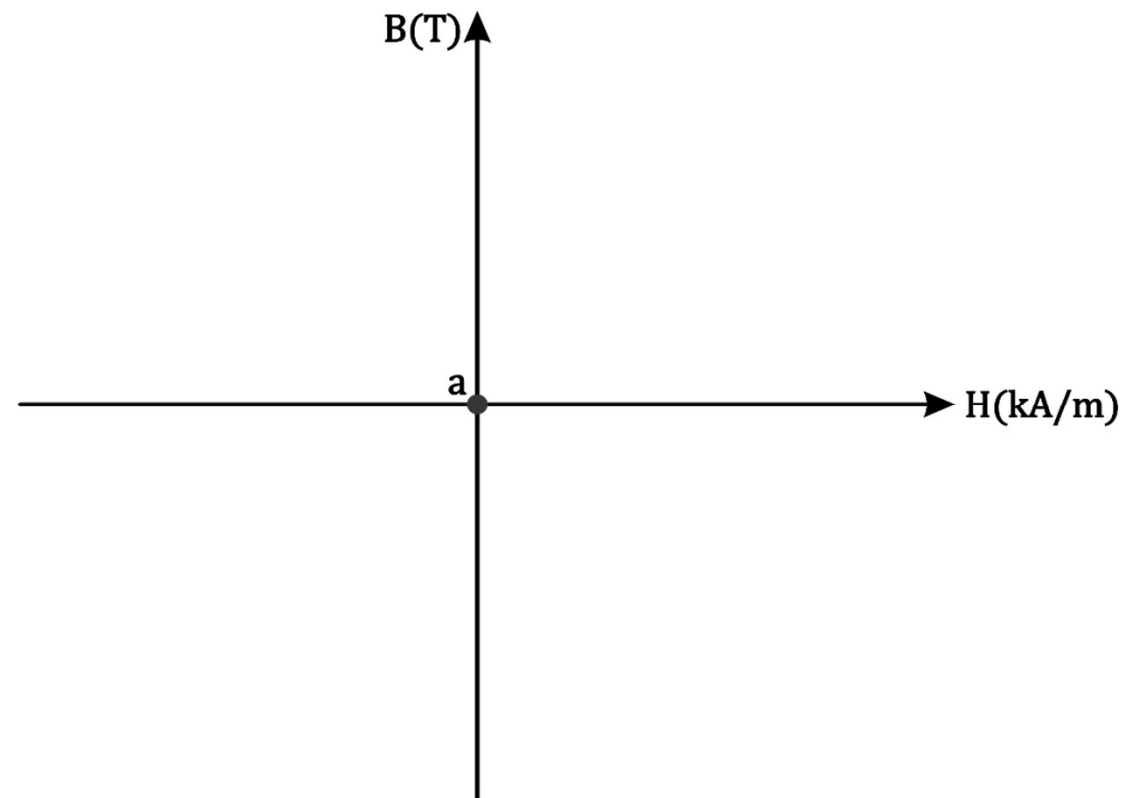
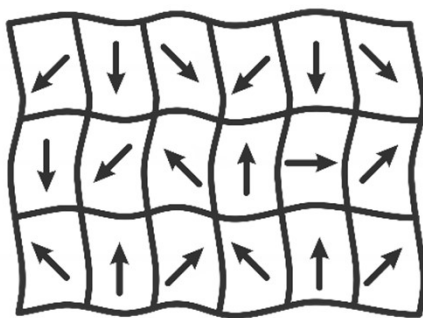
- Diamagnéticos:  $\mu \approx \mu_0 \gg \mu_r < 1$ ;
- Paramagnéticos:  $\mu \approx \mu_0 \gg \mu_r > 1$ ;
- Antiferromagnéticos:  $\mu \approx \mu_0 \gg \mu_r \approx 1$ ;





## Curva B x H: materiais magnéticos

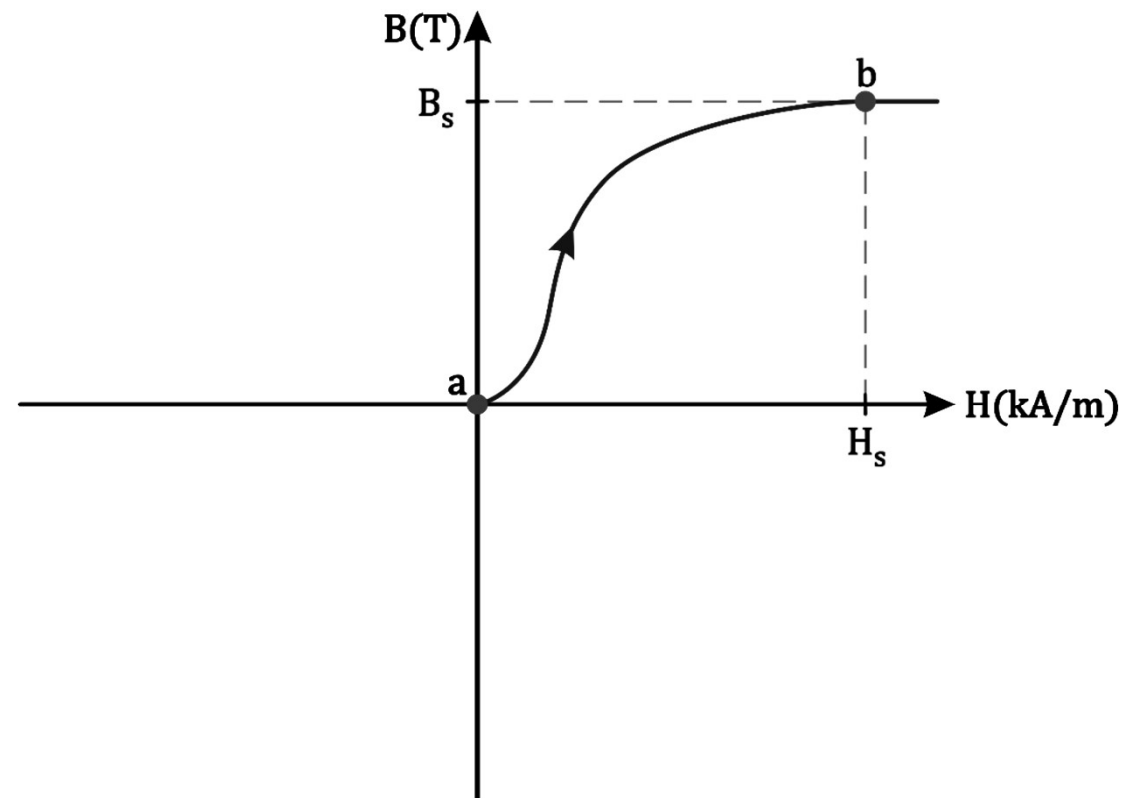
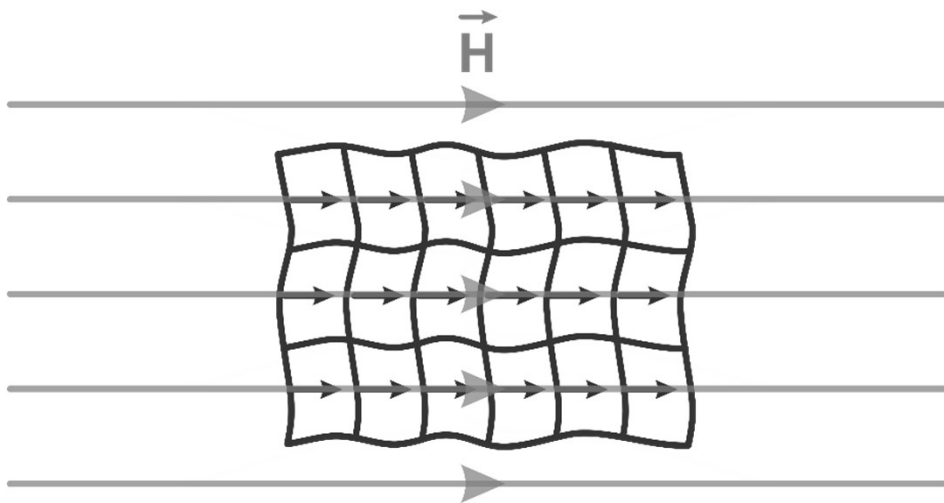
- Materiais magnéticos:
  - Ferromagnéticos:  $\mu \neq \mu_0 \gg \mu_r \gg 1$ ;
  - Ferrimagnéticos:  $\mu \neq \mu_0 \gg \mu_r \gg 1$ ;
- Desmagnetizado: a;





## Curva B x H: materiais magnéticos

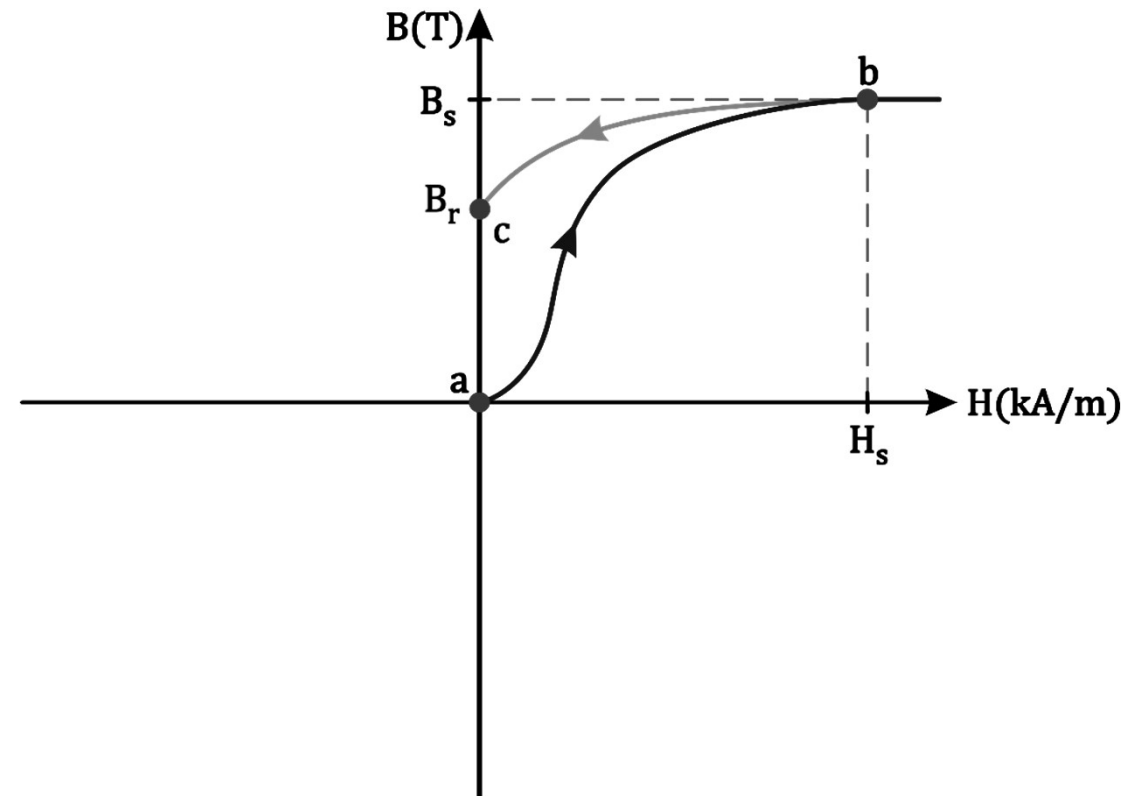
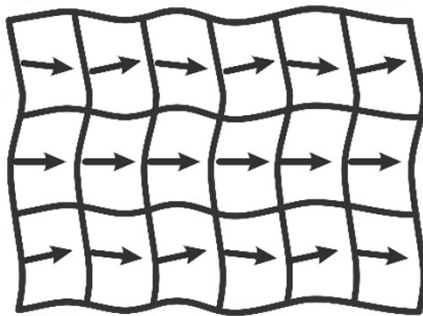
- Materiais magnéticos:
  - Ferromagnéticos:  $\mu \neq \mu_0 \gg \mu_r \gg 1$ ;
  - Ferrimagnéticos:  $\mu \neq \mu_0 \gg \mu_r \gg 1$ ;
- Desmagnetizado: a;
- Primeira Magnetização: a-b;
  - Não-linearidade: saturação ( $B_s$ );





## Curva B x H: 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 ( $B_r$ );

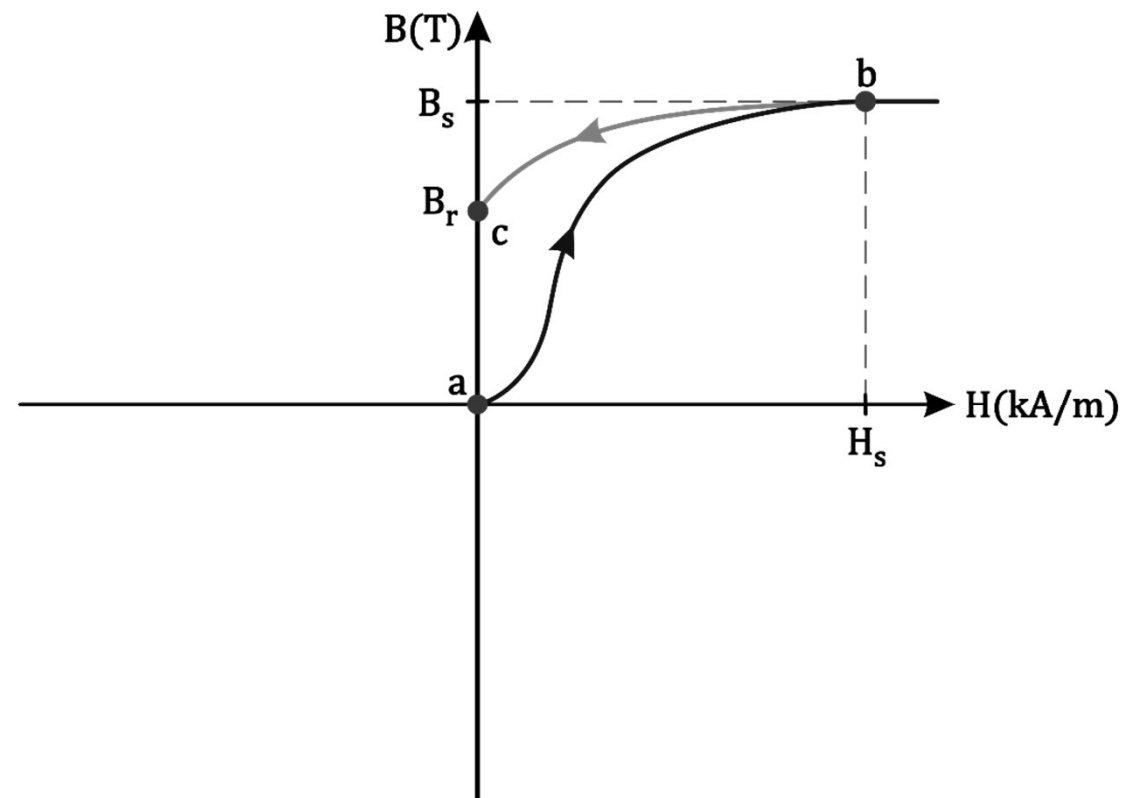
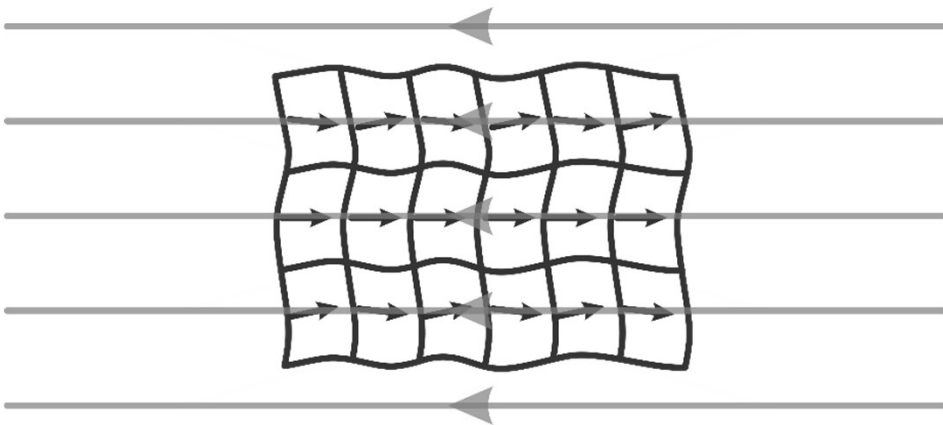






## Curva B x H: materiais magnéticos

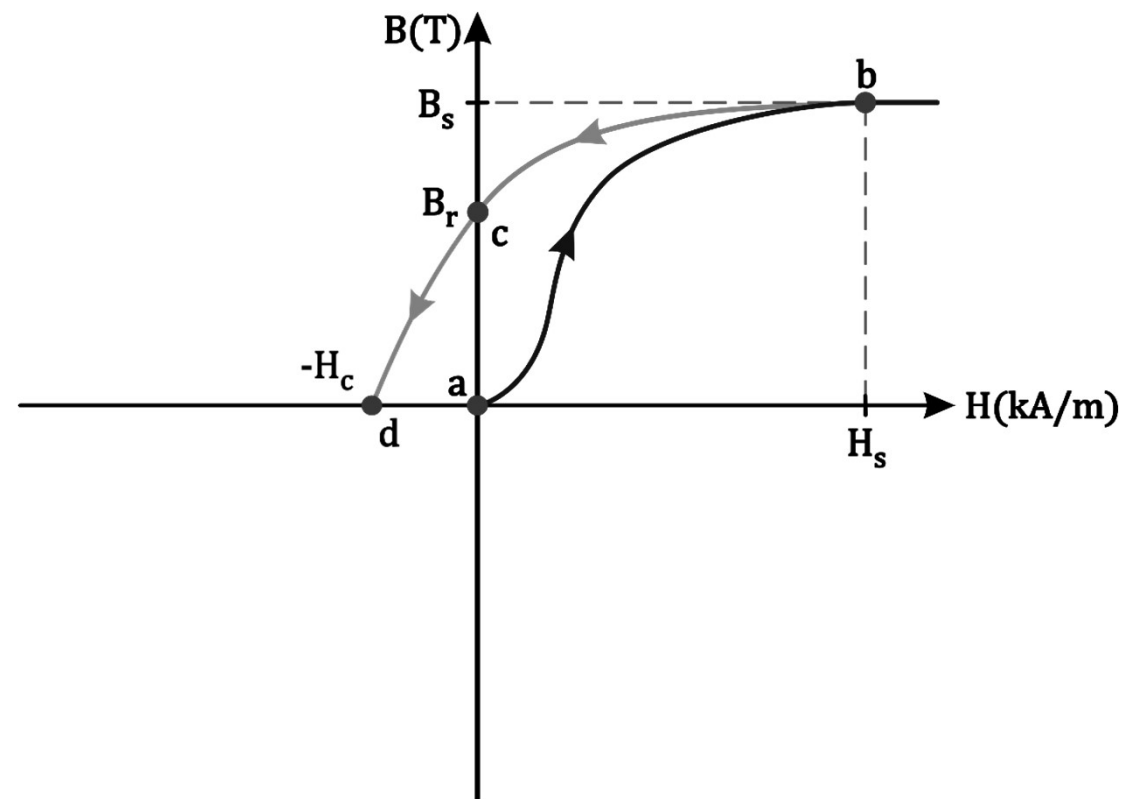
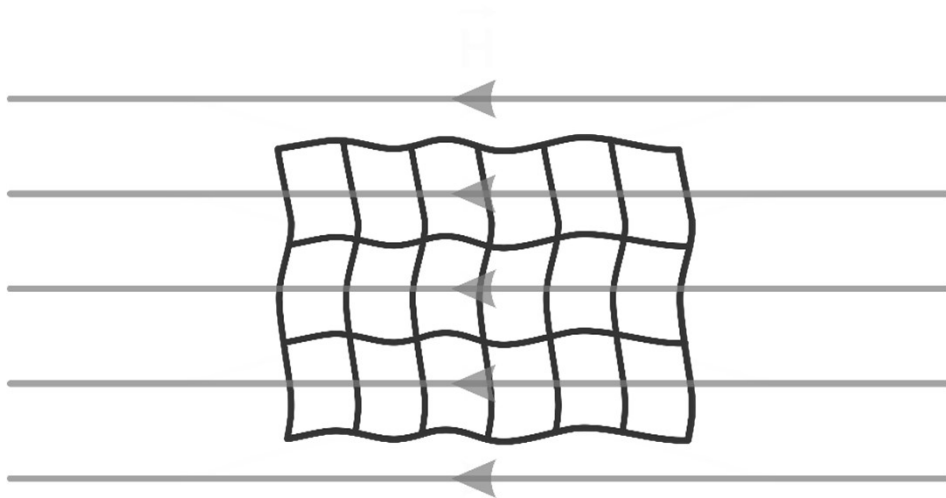
- Materiais magnéticos:
  - Ferromagnéticos:  $\mu \neq \mu_0 \gg \mu_r \gg 1$ ;
  - Ferrimagnéticos:  $\mu \neq \mu_0 \gg \mu_r \gg 1$ ;
- Desmagnetizado: a;
- Primeira Magnetização: a-b;
  - Não-linearidade: saturação ( $B_s$ );
- Desmagnetização parcial: b-c;
  - Histerese: Densidade de Campo Residual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





## Curva B x H: materiais magnéticos

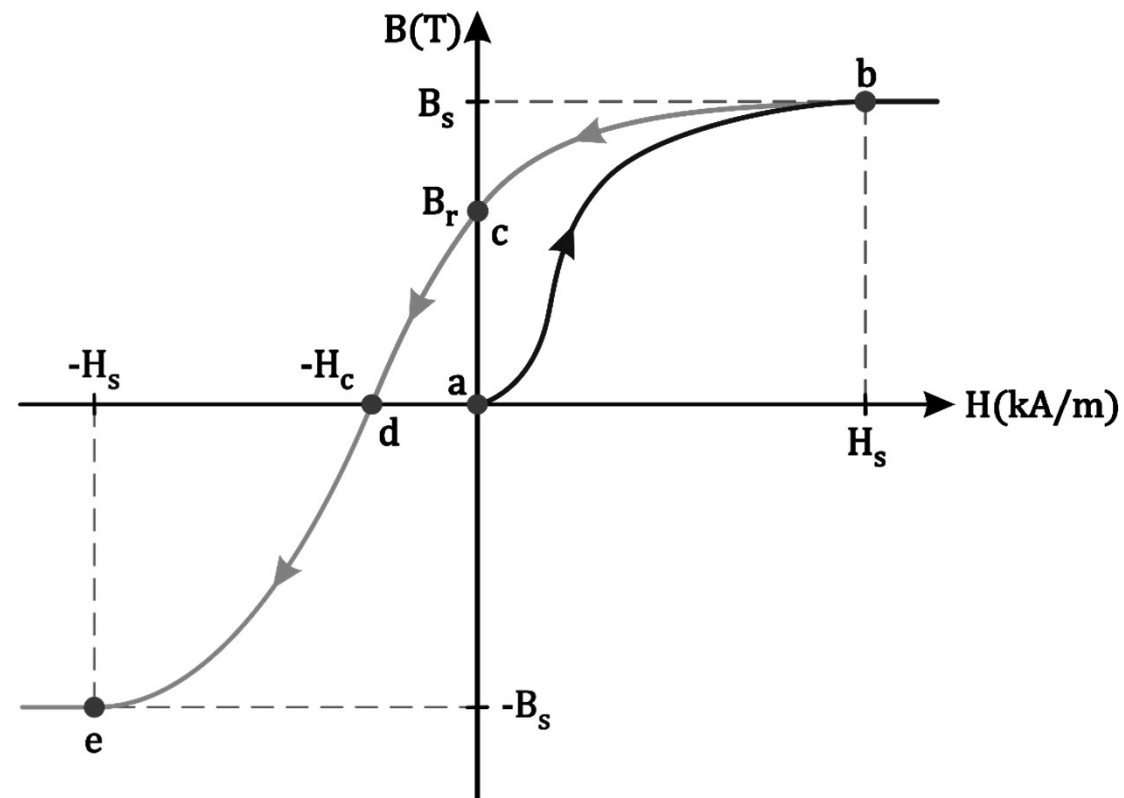
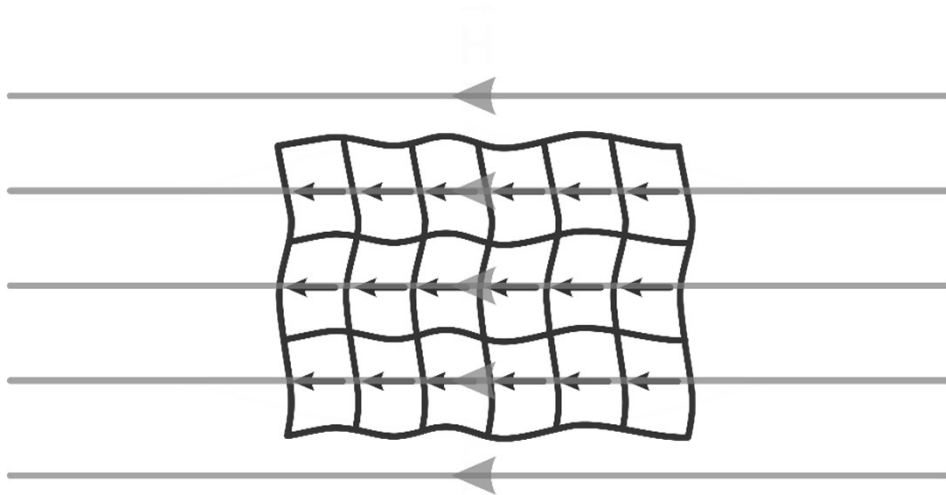
- Completa desmagnetização: c-d;
  - Campo magnético coercitivo ( $-H_c$ );





## Curva B x H: materiais magnéticos

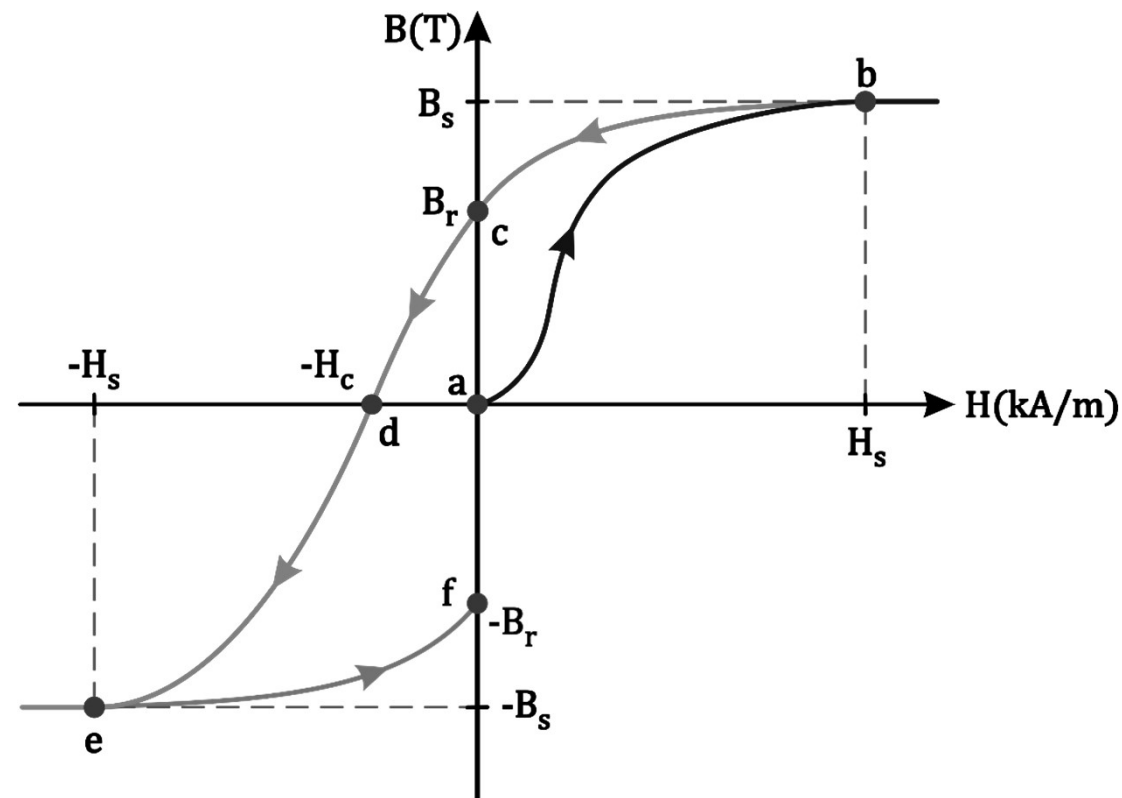
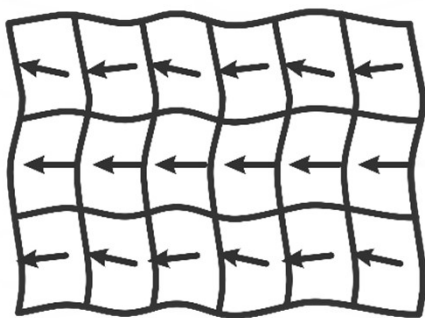
- Completa desmagnetização: c-d;
  - Campo magnético coercitivo ( $H_c$ );
- Magnetização no sentido oposto: d-e;
  - Saturação negativa ( $-B_s$ );





## Curva B x H: materiais magnéticos

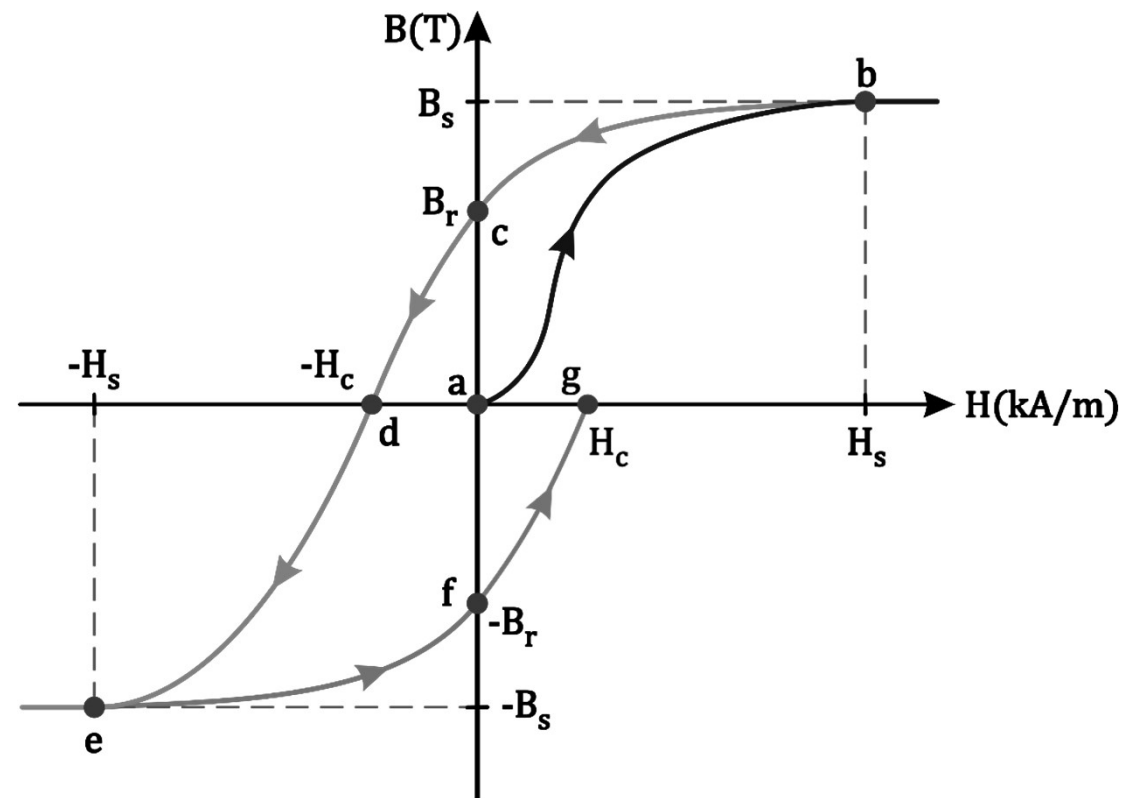
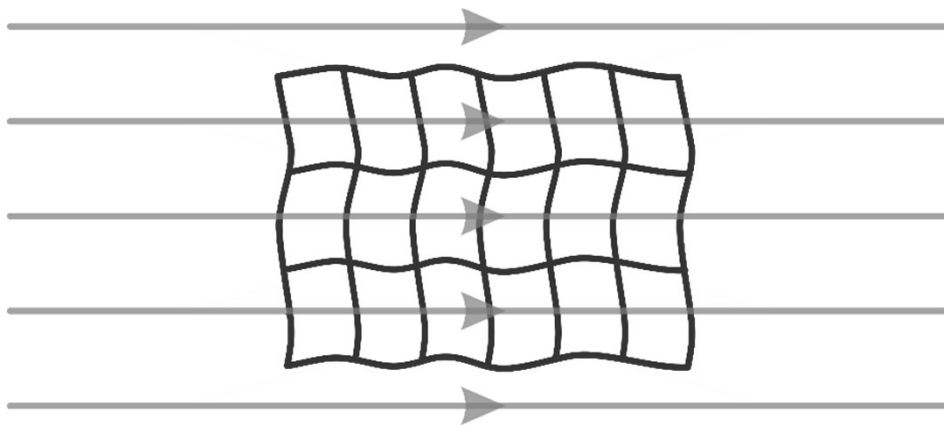
- Completa desmagnetização: c-d;
  - Campo magnético coercitivo ( $H_c$ );
- Magnetização no sentido oposto: d-e;
  - Saturação negativa ( $-B_s$ );
- Desmagnetização parcial: e-f;
  - Densidade de Campo Residual ( $-B_r$ );





## Curva B x H: materiais magnéticos

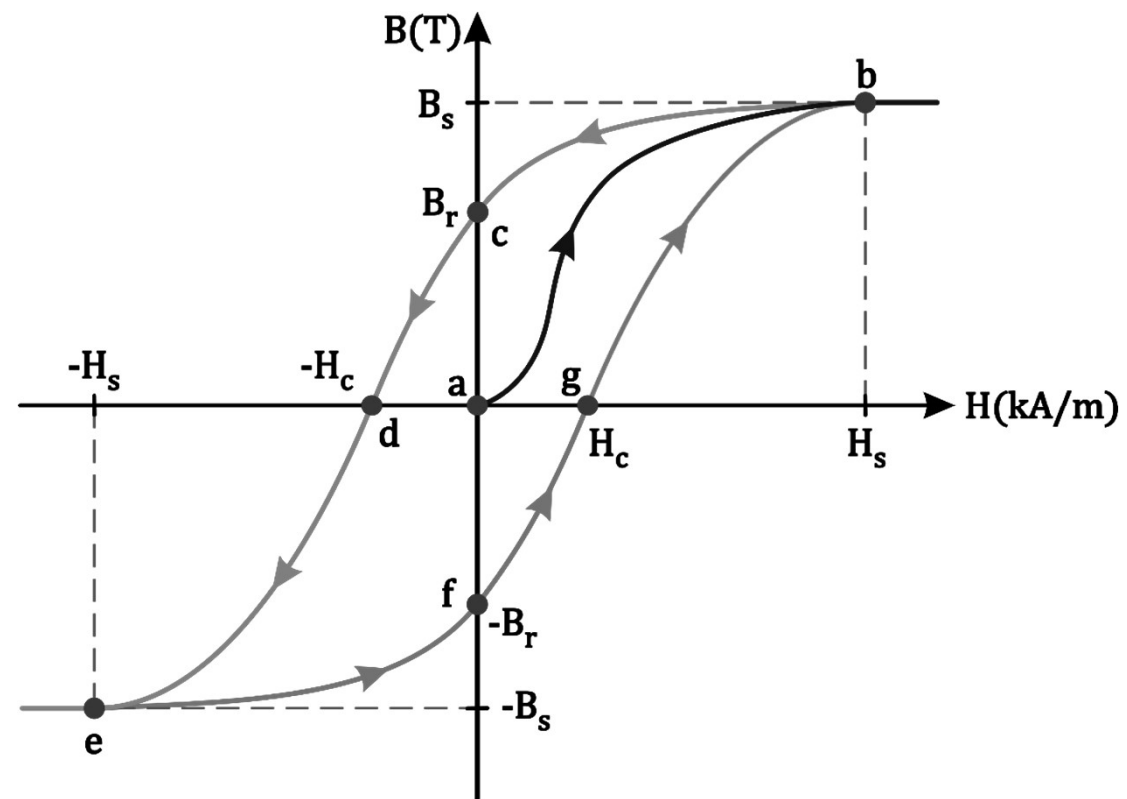
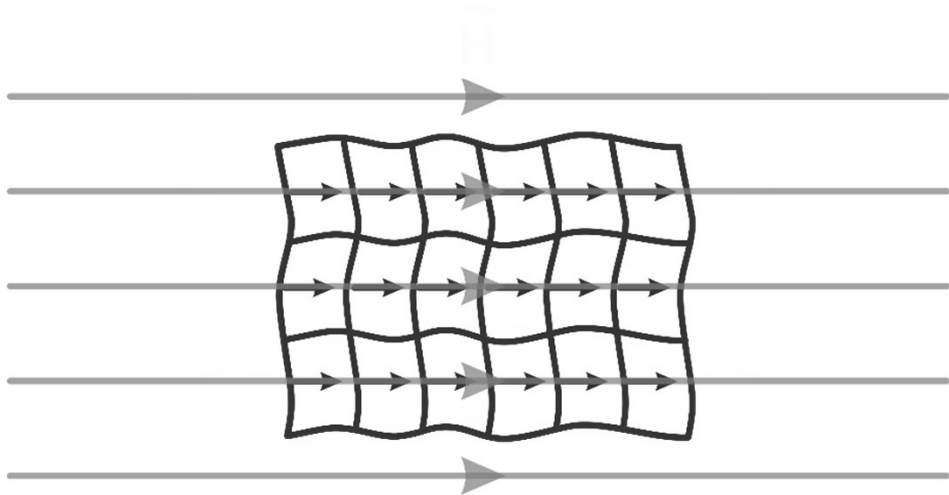
- Completa desmagnetização: c-d;
  - Campo magnético coercitivo ( $H_c$ );
- Magnetização no sentido oposto: d-e;
  - Saturação negativa ( $-B_s$ );
- Desmagnetização parcial: e-f;
  - Densidade de Campo Residual ( $-B_r$ );
- Completa desmagnetização: f-g;
  - Campo magnético coercitivo ( $H_c$ );





## Curva B x H: materiais magnéticos

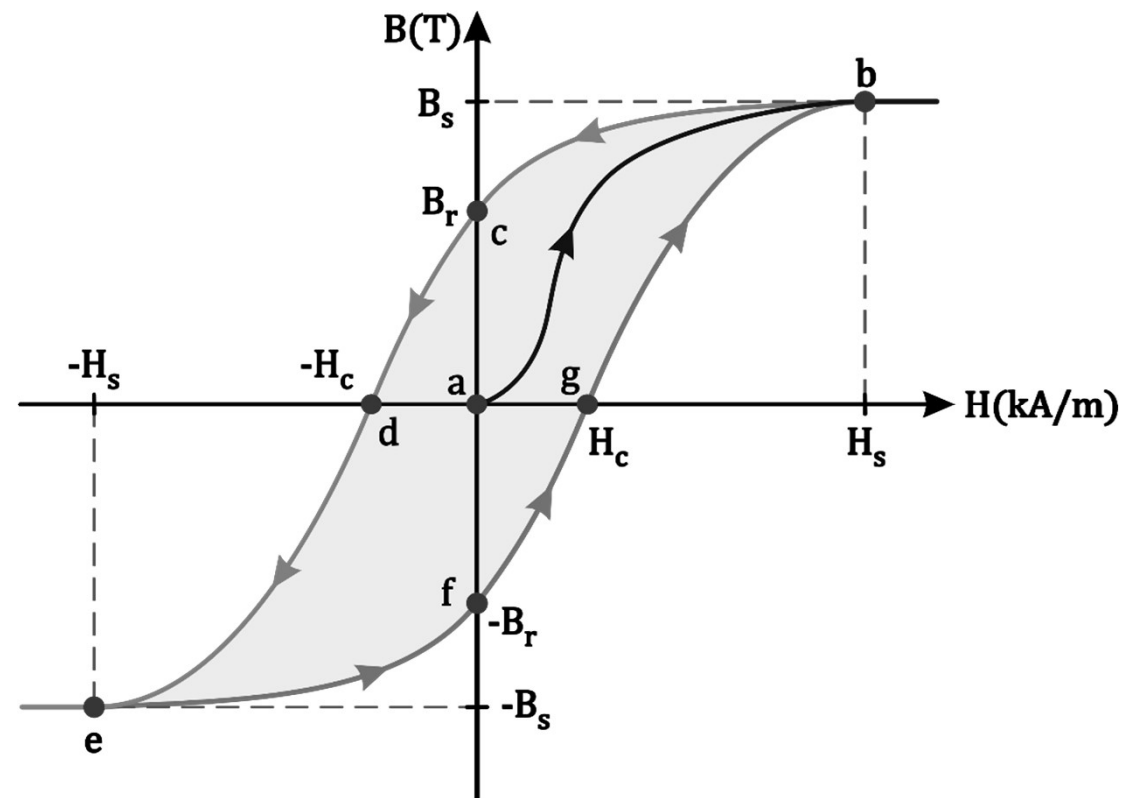
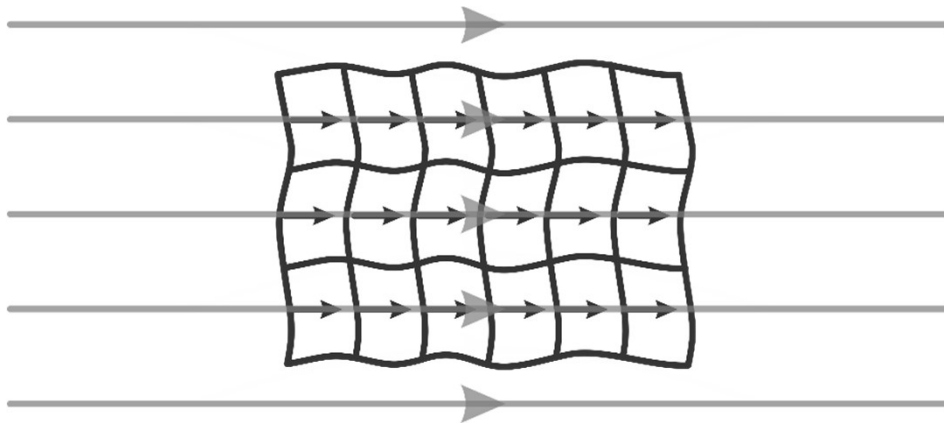
- Remagnetização positiva: g-b;





## Curva B x H: 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 B x H: materiais magnéticos

- Remagnetização positiva: g-b;

• His

• Cor

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

(kA/m)





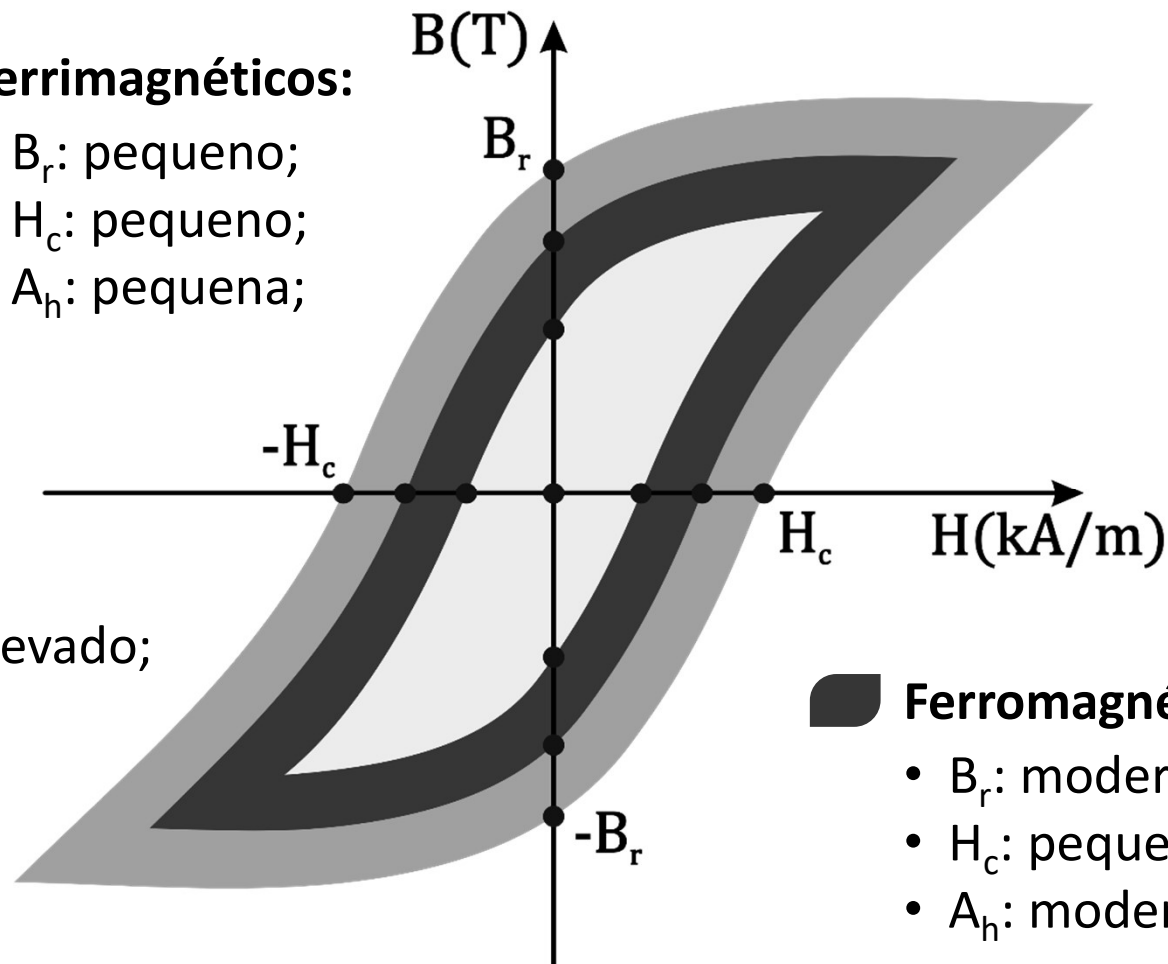
## Curva B x H: comparativo

### Ferrimagnéticos:

- $B_r$ : pequeno;
- $H_c$ : pequeno;
- $A_h$ : pequena;

### Duros:

- $B_r$ : moderado/elevado;
- $H_c$ : elevado;
- $A_h$ : elevada;



### Ferromagnéticos:

- $B_r$ : moderado;
- $H_c$ : pequeno;
- $A_h$ : moderada;



## Principais Tipos de Ímãs Permanentes

- Ímãs AlNiCo:
  - Compostos por um substrato de ferro ao qual são adicionados Alumínio (Al), Níquel (Ni) e Cobalto (Co);
  - $B_r \approx 1\text{T}$ ;
  - $H_c > 50\text{kA/m}$ ;
  - $T_c \approx 700^\circ\text{C}$ ;
  - Boa condutividade elétrica;



## Principais Tipos de Ímãs Permanentes

- 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;



## Principais Tipos de Ímãs Permanentes

- 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;



## Principais Tipos de Ímãs Permanentes

