

# Magnetometria

## conceitos básicos

Yara Marangoni

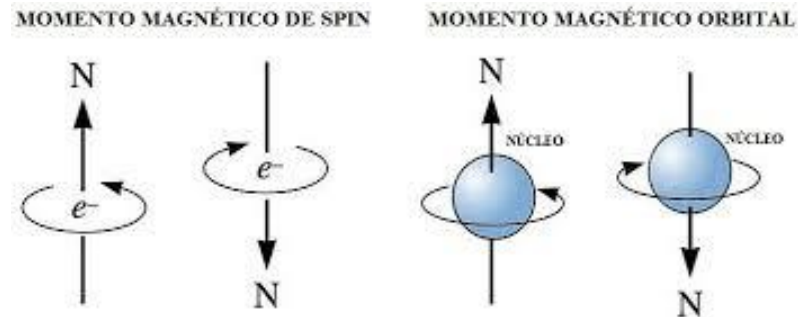
2022

# Magnetismo

- Originado de cargas elétricas em movimento.
- Isso vale para a Terra!
  
- Origem das propriedades magnéticas:  
Momento do dipolo causado pelo spin  
Movimento dos elétrons ao redor do núcleo  
Acoplamento dos spins entre átomos adjacentes
  
- Envolve campo que exerce força em outros corpos magnéticos e materiais eletricamente condutivos
  
- É dipolar

# Origem das propriedades magnéticas: Momento magnético

- Associação do movimento do elétron ao redor do núcleo atômico com o movimento dos planetas ao redor do Sol.
- carga orbitando forma uma corrente elétrica com momento magnético orbital associado;

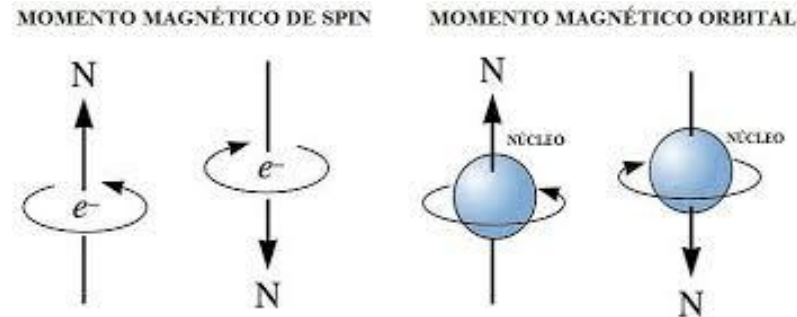


Barbosa, 2012

[https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/18600/1/MateusBB\\_DISSERT.pdf](https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/18600/1/MateusBB_DISSERT.pdf)

# Origem das propriedades magnéticas: Momento magnético

- momento magnético do spin associado ao movimento de rotação que o elétron faz ao redor do seu eixo;
- Cada momento magnético é diretamente relacionado ao seu momento angular.
- O momento magnético  $\mathbf{m}$  de cada átomo é associado a um circuito de corrente.



Barbosa, 2012

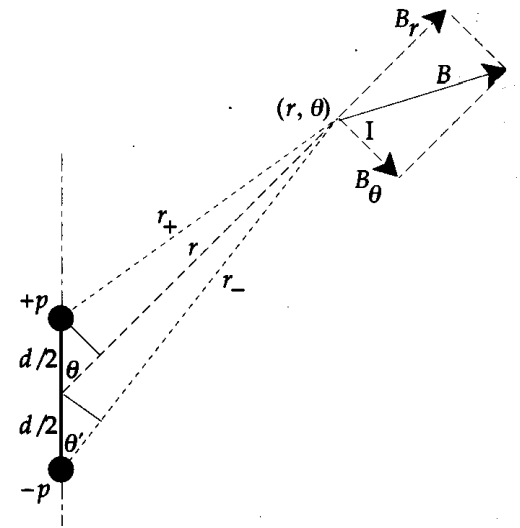
[https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/18600/1/MateusBB\\_DISSERT.pdf](https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/18600/1/MateusBB_DISSERT.pdf)

# Momento magnético – pensando em rochas

- momento magnético  $m$ : produto  $d.p$  entre a intensidade  $p$  e a distância  $d$  definida de  $-p$  a  $+p$ .

$$\vec{m} = \vec{d} \cdot p$$

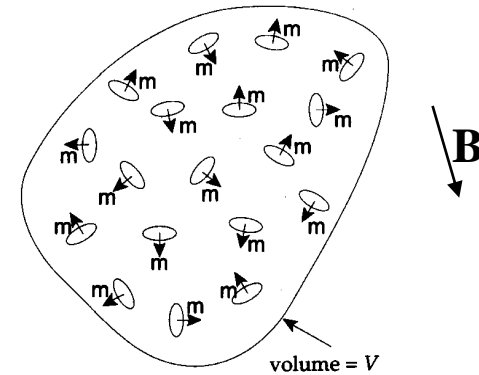
- No SI o momento é dado em  $\text{Am}^2$ , e a intensidade do polo é dada em Am
- Momentos microscópicos de dipolo  $m$  são associados a átomos individuais.



# Momento magnético – pensando em rochas

- intensidade de magnetização ou momento do dipolo por unidade de volume,  $\mathbf{M}$ , é dada pela razão entre a soma vetorial dos momentos magnéticos do dipolo,  $\mathbf{m}_i$ , e o volume  $V$ .
- No SI a unidade de  $\mathbf{M}$  é A/m.

$$\vec{M} = \frac{\sum_i \vec{m}_i}{V}$$



# Momento do dipolo magnético

- O momento magnético,  $\mathbf{m}$ , do dipolo é o parâmetro mais importante de um corpo magnetizado.
- A intensidade de magnetização,  $\mathbf{M}$ , é a quantidade fundamental que descreve o estado magnético do corpo.
- O momento de dipolo por unidade de volume,  $\mathbf{M}$ , é uma média sobre uma região contendo muitos átomos. Por esta razão,  $\mathbf{M}$ , e o campo indutor, podem ser definidos apenas em termos de uma região macroscópica.

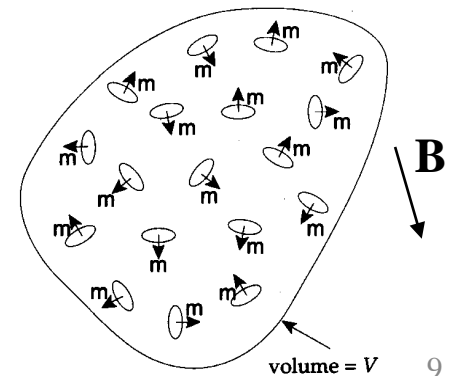
# Intensidade do polo

- Intensidade do polo magnético é a fonte responsável pelo campo magnético.
- Intensidade do polo é uma propriedade determinada pelo momento magnético dos átomos e moléculas constituintes daquele material.
- Em geofísica prefere-se determinar a magnetização ao invés da intensidade do polo.



# Magnetização

- Magnetização é uma função da intensidade do polo e do volume do objeto.
- A magnetização é a resposta magnética de um corpo quando este é colocado em um campo magnético não nulo, externo ao corpo, conhecido como campo indutor.
- É a magnetização de uma rocha que nos interessa.
- Magnetização por unidade de volume é a propriedade geofísica do método magnetométrico.



# Magnetização

- A magnetização é a resposta magnética de um corpo quando este é colocado em um campo magnético não nulo, externo ao corpo, conhecido como campo indutor.
- Pensando no caso da Terra. A Terra tem campo magnético.
- Então todas as rochas podem apresentar magnetização induzida?
- Todos os seres vivos podem apresentar magnetização induzida?

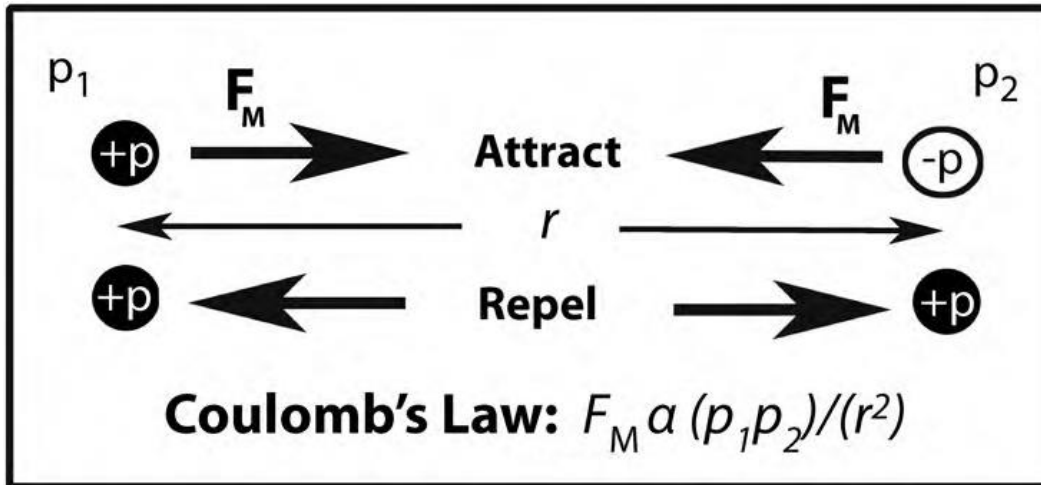
# Magnetização

- Magnetização é o resultado da soma vetorial da magnetização induzida por um campo magnético externo que está atuando sobre o corpo naquele momento, e outras magnetizações permanentes ou remanentes impressas no corpo estudado, que foram adquiridas em outros momentos da história desse corpo.
- Magnetização induzida: função da susceptibilidade magnética e da intensidade do campo indutor.
- Susceptibilidade magnética é a facilidade com que um objeto é magnetizado no campo magnético ambiente

# Magnetização

- Magnetização induzida: função da susceptibilidade magnética e da intensidade do campo indutor ou campo magnético ambiente
- Em Geofísica: campo magnético ambiente é o campo magnético terrestre (CMT).
- CMT: campo planetário, originado no interior do planeta, conhecido como campo principal ou campo interno

# Força magnética



$$\vec{F}_m = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{p_1 p_2}{\vec{r}^2} \text{ (SI)}$$

**F** força magnética em N

**p** intensidade de um dipolo elementar em Am (Amperes metros)

$\mu_0$  permeabilidade magnética do vácuo =  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m (Henry/metro)

# Campo magnético

- Campo magnético é a força por unidade de polo

$$\vec{B} = \frac{\vec{F}_m}{p_1} = \frac{\mu_0 p_2}{4\pi r^2}$$

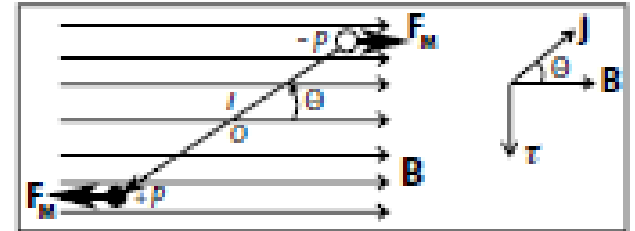
$p_1$  é um dipolo elementar no espaço onde o campo magnético  $\mathbf{B}$  está especificado e

$p_2 \gg p_1$   $p_1$  não altera o campo  $\mathbf{B}$

- Propriedades do campo são medidas em termos do trabalho necessário para mover um dipolo magnético no campo

# Potencial magnético escalar

$$V = -\vec{m} \cdot \vec{B}$$



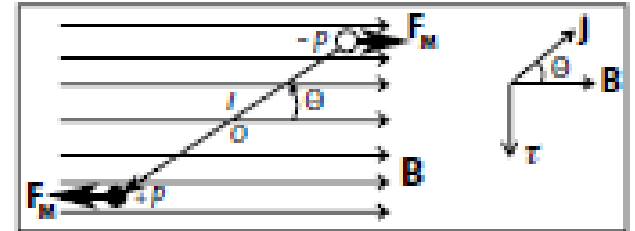
□ Produto  $\vec{m} \cdot \vec{B}$  governa o movimento do dipolo no campo magnético

Translação – aproxima ou afasta os polos de dois dipolos magnéticos elementares

Rotação: rotaciona o dipolo elementar até que o eixo do dipolos fique alinhado paralelo às linhas de campo.

# Potencial magnético escalar

$$V = -\vec{m} \cdot \vec{B}$$



□ Produto  $\vec{m} \cdot \vec{B}$  princípio mecânico por trás das medidas magnéticas

- 1) variação do momento magnético por unidade de volume ou magnetização quando o campo é conhecido – base para medir a suscetibilidade magnética
- 2) Variação do campo sob uma magnetização conhecida – base dos magnetômetros



# Força e potencial de polos

- força entre polos magnéticos de intensidade  $p_1$  e  $p_2$  separados  $r$  entre si:

$$F(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{p_1 p_2}{r^2} \quad \mu_0 \text{ é a permeabilidade magnética do vácuo.}$$

- potencial magnético de polo em P é dado por:  $W = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{p}{r}$
- campo magnético do polo na direção  $r$  é dado pelo gradiente do potencial (-grad W). No SI o campo é a densidade de fluxo magnético:

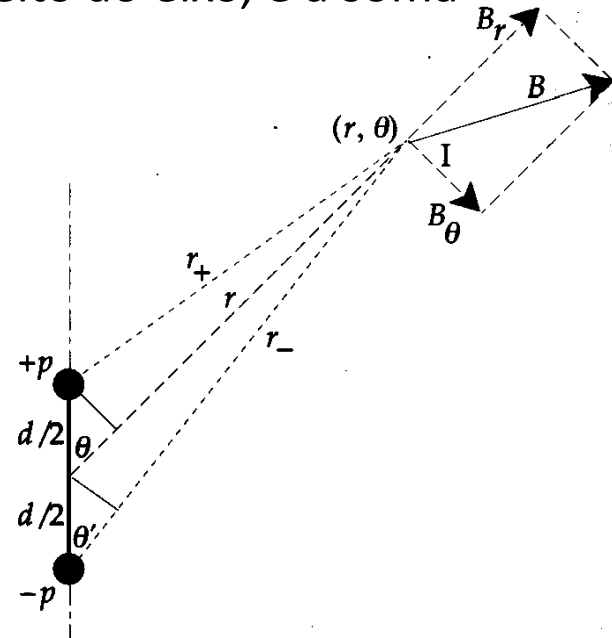
$$\vec{B}(\vec{r}) = -\text{grad } W = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{p}{r^2} \hat{r}$$

- A unidade de **B** no SI: Tesla (T). Como o campo magnético da Terra é pequeno, em Geofísica usa-se um submúltiplo do Tesla, nT =  $10^{-9}$  T.

# Potencial de dipolo

- Potencial magnético de um dipolo: a linha que liga polos positivos e negativos define um eixo onde o campo magnético tem simetria rotacional.
- Sejam dois polos magnéticos de intensidade  $p$  e distantes  $d$ , sendo a distância  $d$  definida de  $-p$  a  $+p$ . O potencial a uma distância  $r$  do ponto central, na direção do ângulo  $\theta$  com respeito ao eixo, é a soma do potencial dos polos positivo e negativo :

$$W = \frac{\mu_0}{4\pi} p \left( \frac{1}{r_+} - \frac{1}{r_-} \right) = \frac{\mu_0}{4\pi} p \left( \frac{r_- - r_+}{r_+ r_-} \right)$$



# Potencial de dipolo

- Quando  $d \rightarrow 0$  temos um dipolo. Nesse caso  $d \ll r$

$$r_+ \cong r - \frac{d}{2} \cos\theta \quad \text{e} \quad r_- \cong r + \frac{d}{2} \cos\theta'$$

- Se  $d \ll r$  então,  $\theta \approx \theta'$

$$\text{E } r_+ \cong r - \frac{d}{2} \cos\theta \quad \text{e} \quad r_- \cong r + \frac{d}{2} \cos\theta$$

$$W = \frac{\mu_0}{4\pi} p \left( \frac{1}{r_+} - \frac{1}{r_-} \right) = \frac{\mu_0}{4\pi} p \left( \frac{r_- - r_+}{r_+ r_-} \right)$$

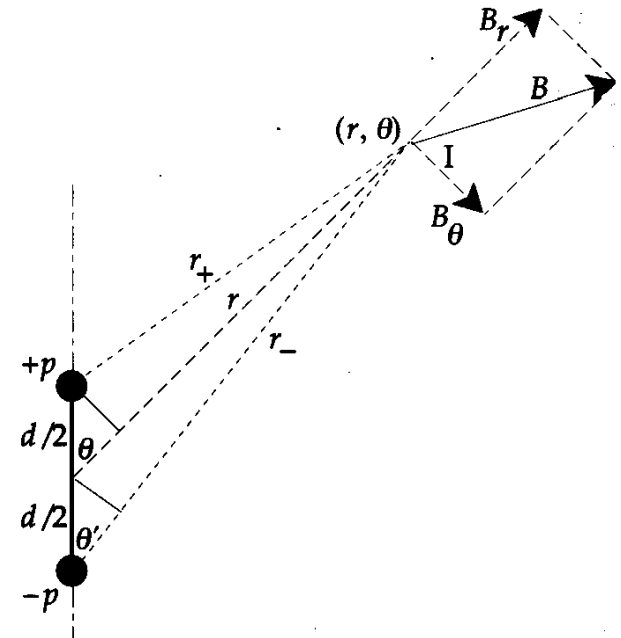
$$r_- - r_+ \cong \left( r + \frac{d}{2} \cos\theta \right) - \left( r - \frac{d}{2} \cos\theta \right) \cong d \cos\theta$$

$$r_+ r_- \cong \left( r - \frac{d}{2} \cos\theta \right) \left( r + \frac{d}{2} \cos\theta \right)$$

$$\cong r^2 + r \frac{d}{2} \cos\theta - r \frac{d}{2} \cos\theta - \underbrace{d^2 \cos^2\theta}_{\text{desprezar}} \cong r^2$$

$$W = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{(dp)}{r^2} \cos\theta = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m}{r^2} \cos\theta$$

$m (= dp)$  é o momento magnético do dipolo



# Campos magnético $\mathbf{B}$ e $\mathbf{H}$

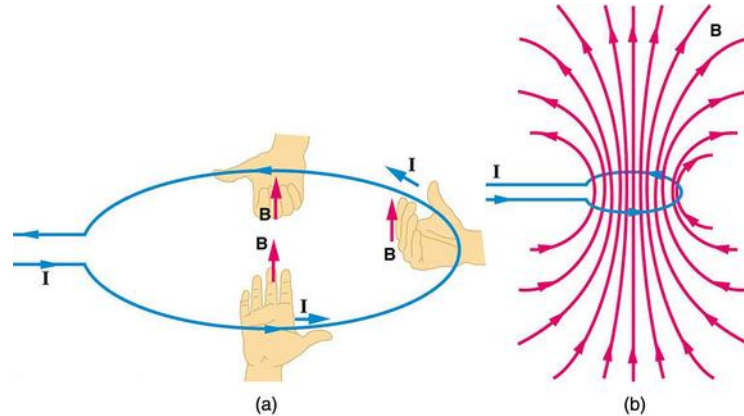
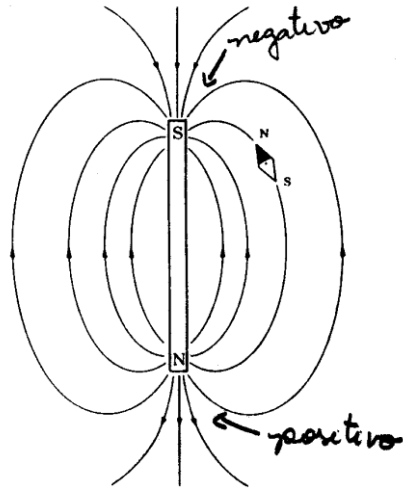
Todo campo magnético é originado de correntes elétricas.

- $\mathbf{B}$  é o campo magnético fundamental associado com correntes em qualquer meio.
- $\mathbf{B}$  é conhecido como indução magnética ou densidade de fluxo magnético.
- Quantidade  $\mathbf{H}$  pode ser vista como parâmetro computacional, proporcional à  $\mathbf{B}$ , em materiais não magnéticos.
- $\mathbf{H}$  é conhecido como intensidade de campo magnético.
- $\mathbf{H}$  pode ser definido e calculado em qualquer escala, incluindo a escala atômica.

Em um material magnético:  $\mathbf{H}$  descreve como  $\mathbf{B}$  é modificado pela polarização magnética (ou magnetização  $\mathbf{M}$ ) do material.

# Campos e Linhas de forças

- Linhas de força do campo indutor  $\mathbf{B}$  sempre formam um circuito fechado



- Linhas de força do campo  $\mathbf{H}$  são descontínuas nas superfícies onde a magnetização  $\mathbf{M}$  muda em intensidade ou direção.
- Métodos magnéticos usam  $\mathbf{H}$ .

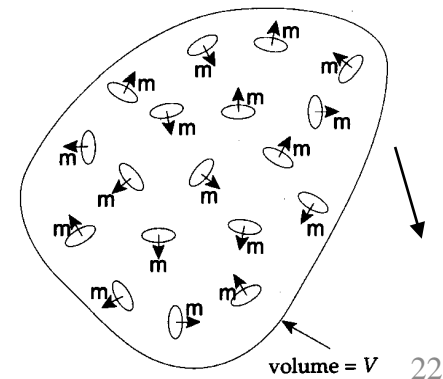
# Campos magnético $\mathbf{B}$ e $\mathbf{H}$

- Em um material magnético:  $\mathbf{H}$  descreve como  $\mathbf{B}$  é modificado pela polarização magnética (ou magnetização  $\mathbf{M}$ ) do material.

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

- Portanto  $\mathbf{H}$  e  $\mathbf{B}$  não são paralelos dentro de material magnético.
- Fora do corpo  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{H}$  são paralelos e  $\mathbf{H}$  é descontínuo.
- No vácuo e fora de um material magnético  $\mathbf{M}=0$  e  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{H}$  são paralelos e proporcionais

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$



# Campos magnético **B** e **H**

- Em um material magnético: **H** descreve como **B** é modificado pela polarização magnética (ou magnetização **M**) do material.

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

- Dentro de um material magnetizável campo **H** tem duas fontes:
  - sistema externo de correntes que produzem o campo **B**;
  - conjunto de correntes atômicas internas que levam os momentos magnéticos atômicos a se alinharem causando a magnetização **M**

# Campos magnético **B** e **H**

- Fora do material magnético,  $\mathbf{M} = 0$ ,  $\mathbf{H}$  e  $\mathbf{B}$  são paralelos e a razão entre eles é  $B/H = \mu_0$ , a permeabilidade do vácuo.
- Relembrando algumas dimensões no SI
- **M – momento magnético por unidade de volume**, no SI em A/m
- $[\mathbf{M}] = \text{A m}^2/\text{m}^3 = \text{A/m}$
- **B – campo magnético indutor, no caso o campo da Terra**, no SI em N/A.m ou T (Tesla)
- $\mu_0$  - **permeabilidade magnética do vácuo**, no SI em Henry/m ou N/A<sup>2</sup>
- campo **B**  $[B] = \text{H A/m}^2$  constante  $[\mu_0] = \text{H/m}$   $B/\mu_0 = \text{A/m}$
- No SI  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m de tal forma que os valores numéricos de  $B$  (em tesla) e  $H$  (em A/m) são muito diferentes para o mesmo campo.  
**M** e **B**/ $\mu_0$  tem a mesma dimensão



# Campos magnético **B** e **H**

- Em materiais anisotrópicos **B**, **M** e **H** não são paralelos
- No caso de um corpo que não é fortemente anisotrópico, todos os momentos magnéticos ficam estatisticamente alinhados com o campo magnético. Neste caso **M** e **H** são paralelos e proporcionais

$$\vec{M} = k\vec{H}$$

- $k$  é a suscetibilidade magnética.

# Campos magnético **B** e **H**

- Relembrando que: 
$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$
- E 
$$\vec{M} = k\vec{H}$$
- Temos: 
$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0\vec{H}(1 + k) = \mu_0\mu\vec{H}$$
- $\mu = (1+k)$  é conhecida como permeabilidade magnética do material,
- $\mu$  é uma medida da habilidade do material de transmitir o fluxo magnético.
- Para minerais e rochas comuns, não ferromagnéticas,  $\mu \approx 1$ .

# Campos magnético $\mathbf{B}$ e $\mathbf{H}$

Dunlop & Özdemir, 1997

- definição magnetostática: campo magnético exerce um torque na agulha da bússola ou em imã de barra suspenso por um fio (dipolos macroscópicos) tendendo a alinhar o eixo desses objetos com  $\mathbf{H}$  ou  $\mathbf{B}$ .
- definição eletrodinâmica: campo magnético exerce uma força de Lorentz numa partícula carregada em movimento, seja no espaço livre ou quando canalizada através de um condutor.  $\vec{H} = \vec{i}/2r$
- Momentos microscópicos de dipolo  $\mathbf{m}$  são associados a átomos individuais. Mas  $\mathbf{M}$ , o momento de dipolo por unidade de volume, é uma média sobre uma região contendo muitos átomos. Por esta razão,  $\mathbf{M}$ , e, portanto  $\mathbf{B}$ , podem ser apenas definidos em termos de uma região macroscópica.

# Quatro definições fundamentais

- Existem quatro definições fundamentais usadas para descrever um material ou região magnetizada:
  - - **B**, indução magnética;
  - - **H**, campo magnético;
  - - **J**, polarização magnética;
  - - **M**, momento de dipolo magnético por unidade de volume

# Quatro definições fundamentais

- - no cgs:
  - $\mathbf{B} = \mathbf{H} + 4\pi\mathbf{J}$
  - $\mathbf{J} = \mathbf{M}$
  - - no SI:
  - $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{J}$
  - $\mathbf{J} = \mu_0 \mathbf{M}$
  - onde  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m é a permeabilidade do vácuo.
- Indução magnética é função do campo magnético e da polaridade de magnetização ou mesmo momento de dipolo magnético por unidade de volume

# Tabelas de grandezas e dimensões

TABLE 8.1 Magnetic parameters.

*Parameters commonly used in the magnetic method in equivalent CGSu or EMu and SIu. Magnetic susceptibility is also given sometimes in electromagnetic units (EMu) of (EMu/cm<sup>3</sup>) or (EMu/g) to distinguish between volume and mass (or specific) susceptibility, but the quantity is dimensionless.*

Magnetics parameter	CGSu or EMu	SIu
Force of attraction and repulsion	10 <sup>5</sup> dynes	newton (N)
Magnetic field strength or intensity	oersted (Oe) $\gamma = 10^{-5}$ gauss	10 <sup>-3</sup> ampere (A)/m nanotesla (nT) = 10 <sup>-9</sup> tesla
Magnetic induction	10 <sup>4</sup> gauss	tesla (T)
Magnetic permeability of free space ( $\mu_0$ )	gauss/oersted (gauss = oersted)	$4\pi \times 10^{-7}$ henry (H)/m or $4\pi \times 10^{-7}$ N/A <sup>2</sup>
Magnetization	EMu/cm <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> A/m
Magnetic susceptibility	dimensionless	$4\pi$ (dimensionless)

(Hinze et al., 2013)

TABLE 8.2 Conversion of magnetic parameters from CGSu or EMu to Slu.

Parameter (symbol)	CGS units (or emu)	SI units	Conversion CGS $\rightarrow$ SI	Conversion SI $\rightarrow$ CGS
Magnetic induction ( <b>B</b> ) (Magnetic flux density)	gauss (G)	tesla (T) (Wb/m <sup>2</sup> ) (H A/m <sup>2</sup> )	1 G = 10 <sup>-4</sup> T 1 G = 10 <sup>5</sup> gamma ( $\gamma$ ) = 10 <sup>5</sup> nanotesla (nT)	1 T = 10 <sup>4</sup> G = 10 <sup>9</sup> $\gamma$ = 10 <sup>9</sup> nT 1 nT = 1 gamma ( $\gamma$ )
Magnetic field intensity ( <b>H</b> )	oersted (Oe)	ampere/meter (A/m)	1 Oe = 10 <sup>3</sup> /(4 $\pi$ ) A/m	1 A/m = 4 $\pi$ $\times$ 10 <sup>-3</sup> Oe $\approx$ 1257 $\gamma$
Magnetic polarization ( <b>J</b> ) (magnetization)	emu/cm <sup>3</sup> <b>B = H + 4<math>\pi</math>J</b> <b>J = M</b>	tesla (T) <b>B = <math>\mu_0</math> H + J</b> <b>J = <math>\mu_0</math> M</b>	1 emu/cm <sup>3</sup> = 4 $\pi$ $\times$ 10 <sup>-4</sup> T	1 T = 10 <sup>4</sup> /(4 $\pi$ ) emu/cm <sup>3</sup> (or gauss G)
Magnetization ( <b>M</b> ) (magnetic momen/unit vol)	emu/cm <sup>3</sup> (or gauss G)	A/m	1 emu/cm <sup>3</sup> = 10 <sup>3</sup> A/m	1 A/m = 10 <sup>-3</sup> emu/cm <sup>3</sup> (or gauss G)
Magnetic pole ( <i>p</i> )	unit pole	A m	1 unit pole = 10 <sup>-8</sup> A m	1 A m = 10 <sup>8</sup> unit pole
Magnetic dipole ( <b>m = pb</b> ) (dipole moment)	pole cm (or emu) (or G cm <sup>3</sup> )	A m <sup>2</sup>	1 pole cm = 10 <sup>-10</sup> A m <sup>2</sup> 1 G cm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> A m <sup>2</sup>	1 A m <sup>2</sup> = 10 <sup>10</sup> pole cm = 10 <sup>3</sup> G cm <sup>3</sup> (or emu)
Magnetic volume susceptibility ( <i>k</i> )	CGSu (or emu/cm <sup>3</sup> ) (dimensionless) <b>M = J = kH</b>	Slu (dimensionless) <b>M = J/<math>\mu_0</math> = kH</b>	1 CGSu = 4 $\pi$ Slu	1 Slu = 1/(4 $\pi$ ) CGSu
Magnetic mass (specific) susceptibility ( <i>k<sub>m</sub></i> )	CGSu cm <sup>3</sup> /g ( <i>k<sub>m</sub></i> = <i>k</i> / $\sigma$ )	Slu m <sup>3</sup> /kg ( <i>k<sub>m</sub></i> = <i>k</i> / $\sigma$ )	1 CGSu cm <sup>3</sup> /g = 4 $\pi$ $\times$ 10 <sup>-3</sup> Slu m <sup>3</sup> /kg	1 Slu m <sup>3</sup> /kg = 10 <sup>3</sup> /(4 $\pi$ ) CGSu cm <sup>3</sup> /g
Koenigsberger ratio ( <i>Q</i> )	dimensionless	dimensionless	1 emu = 1 Slu	1 Slu = 1 emu
Magnetic flux ( $\Phi$ )	maxwell (Mx)	Wb (V s)	1 Mx = 10 <sup>-8</sup> Wb	1 Wb = 10 <sup>8</sup> Mx
Magnetic potential ( <i>V</i> ) <b>B = -grad V</b>	gilbert (Gi)	tesla m (T m) (or Wb/m)	1 Gi = 10 <sup>-6</sup> T m = 10/(4 $\pi$ ) A	1 T m = 10 <sup>6</sup> Gi
Magnetic force ( <b>F</b> )	dyne (dyn)	new on (N)	1 dyn = 10 <sup>-5</sup> N	1 N = 10 <sup>5</sup> dyn

Notes: G = gauss;  $\gamma$  = gamma; Oe = oersted; T = tesla; nT = nanotesla; Wb = weber; H = henry; A = ampere; Gi = gilbert; Mx = maxwell; g = gram;  $\sigma$  = density (g/cm<sup>3</sup> = 10<sup>-3</sup> kg/m<sup>3</sup>); N = newton; Wb = H A = V s;  $\mu_0$  = 4 $\pi$   $\times$  10<sup>-7</sup> N/A<sup>2</sup> (or H/m)

# Campos e linhas de força

- **M** – momento magnético por unidade de volume, no SI em A/m
- **B** – campo magnético indutor, no caso o campo da Terra, no SI em N/A.m ou T (Tesla)
- $\mu_0$  - permeabilidade magnética do vácuo, no SI em Henry/m ou N/A<sup>2</sup>
- **M** e  $\mathbf{B}/\mu_0$  tem a mesma dimensão mas dentro de um material **M** não é exatamente igual a  $\mathbf{B}/\mu_0$ . A diferença é o campo **H**. Unidade de **H** no SI é A/m

$$\vec{H} = \vec{B} / \mu_0 - \vec{M}$$