

Introdução ao Biomagnetismo

Oswaldo Baffa Filho

Departamento de Física-FFCLRP
Universidade São Paulo

Aula #2-Grandezas Magnéticas

Medidas

- Eu sempre digo que quando você pode medir o que está dizendo e expressá-lo em números, você sabe alguma coisa acerca do assunto, mas quando você não pode expressá-lo em números o seu conhecimento é escasso e insatisfatório; pode ser o início do conhecimento, mas você avançou pouco em suas ideias para o estágio de ciência, qualquer que seja o assunto. *Lord Kelvin*

Mas cuidado...medir não é simples...

- Meça duas vezes, corte uma e xingue três vezes!



Porém...

- As medidas afetam a grandeza que se quer medir....
- *Tudo o que se vê não é
Igual ao que se viu há um segundo
Tudo muda o tempo todo no mundo”*

Como uma onda
Lulu Santos & Nelson Motta

Exemplos

- Temperatura
- Voltagem
- Corrente
- Pressão
- Fluxo
- Posição de um átomo
- Outros exemplos ?

Unidades

- SI ou MKS
- Mas unidades “estranhas” podem ser comuns...
 - Pressão — Altura de uma coluna de mercúrio
 - Sanctorius (1602) — Pulsologium → Pêndulo
 - Outros exemplos...

Erros, efeitos e correções

- ❑ Toda medida tem imperfeições que levam a erro. Tradicionalmente o erro é visto como tendo duas componentes: uma aleatória e outra sistemática.
- ❑ O erro aleatório tem origem em efeitos imprevisíveis e estocásticos. Embora esse erro não possa ser eliminado, pode ser reduzido por um grande número de medidas. ($X \pm SD$ -- SD não é uma medida do erro aleatório !)



REF: GUM-Guide to the Expression of Uncertainty in measurement, BIPM, 1993

-
- ❑ O erro sistemático também não pode ser eliminado, mas pode ser reduzido. Se esse erro aparece devido a um efeito reconhecido, pode ser quantificado e se de valor significativo para a precisão requerida na medida uma correção pode ser realizada.
 - ❑ Exemplo: efeito da impedância de um voltímetro.

Incerteza

- ❑ A incerteza de uma medida reflete a falta de conhecimento de seu valor exato. Mesmo após as correções de erros sistemáticos o valor encontrado é ainda uma estimativa do valor verdadeiro.
- ❑ Planejamento do experimento, condições ambientais, padrões, constantes, aproximações, etc..

Incertezas

- Tipo A: Método de cálculo envolve uma análise estatística de uma série de observações
- Média
- Variância, DQM
- Tipo B: Método de cálculo envolve todos os outros métodos que não sejam estatísticos
- Dados anteriores
- Experiência ou conhecimento sobre os materiais e instrumentos utilizados
- Especificação do fabricante
- Calibrações
- Handbooks

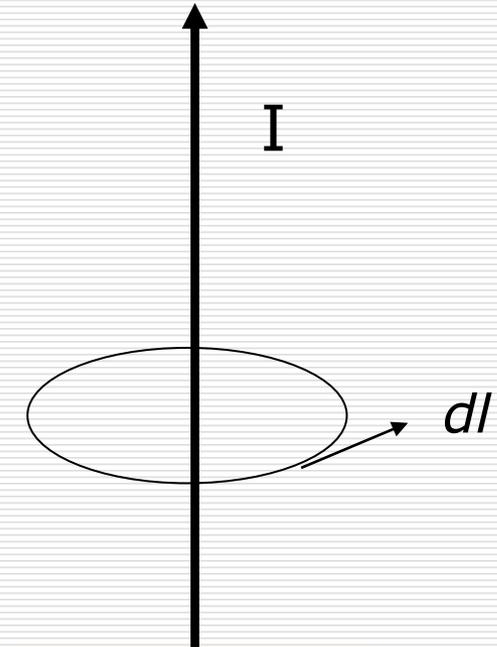
Intensidade de Campo Magnético

□ Lei de Ampère:

$$\int \vec{H} \cdot d\vec{l} = I$$

onde H é a intensidade de campo magnético

- regra da mão direita
- Para um fio retilíneo e infinito
- A unidade de H é A/m



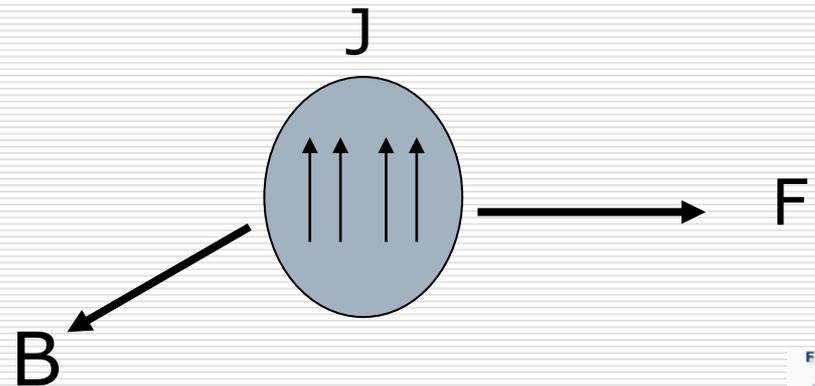
$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

Densidade de Fluxo Magnético

- H está associado a correntes elétricas
- B está associado à força magnética, onde F é a força/volume
- Unidades de B:
 $N/m^3 = (A/m^2)[B]$
 $[B] = N/A.m = \text{Tesla}$

$$\vec{F}_{\text{volumétrica}} = \vec{J} \times \vec{B}$$

$$F_{\text{volumétrica}} = JB \text{sen } \theta$$



O Campo B

- A lei de Biot-Savart permite o cálculo de B a partir das correntes

$$d\vec{B} = K_m \frac{id\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

- O campo magnético da terra tem uma densidade de fluxo magnético em nossa região de $20\mu\text{T}$.

Fluxo magnético ϕ

- ❑ O fluxo é dado por $\phi = B_n \cdot A$
- ❑ As unidades de $[\phi] = [B][A] = T \cdot m^2 = \text{Weber}$
- ❑ O conceito de fluxo é importante para entender o funcionamento de vários detectores de campo magnético, gradiômetros, SQUIDs. O fluxo magnético é quantizado em alguns sistemas.

$$\phi_0 = 2,07 \cdot 10^{-15} \text{ Wb}$$

Indução Magnética

- ❑ Cargas em movimento → Campo magnético
- ❑ E o contrário ? Lei de Faraday

$$V = - \frac{d\Phi}{dt}$$

- ❑ Correntes parasitárias (*eddy currents*)
- ❑ [Wb]=V.s e T = (V.s)/m²

Permeabilidade magnética

- Como discutido B e H são grandezas diferentes. Isto pode parecer confuso, porque as duas grandezas são utilizadas para se referir ao campo magnético

- No vácuo:

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

- A permeabilidade do vácuo é $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$

Permeabilidade magnética

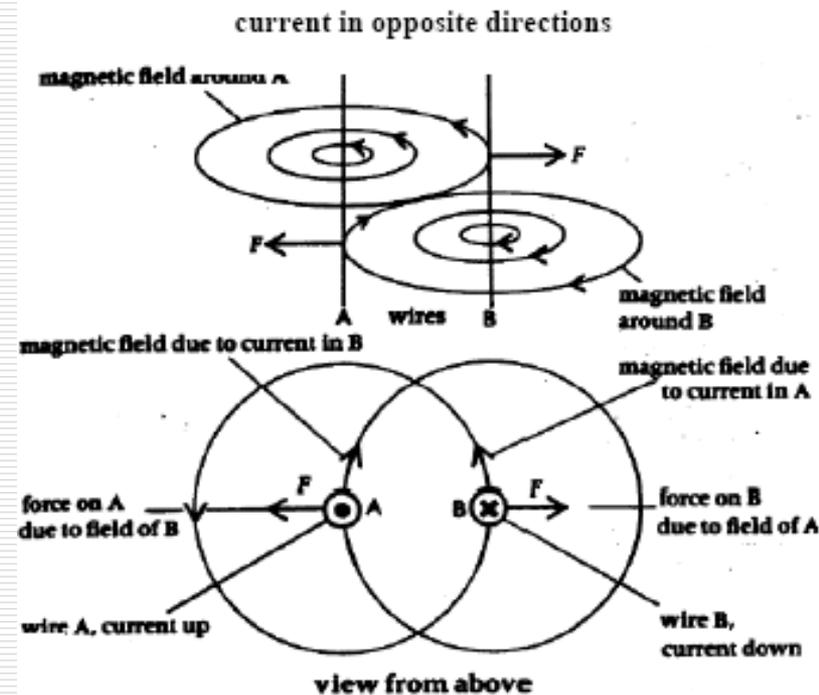
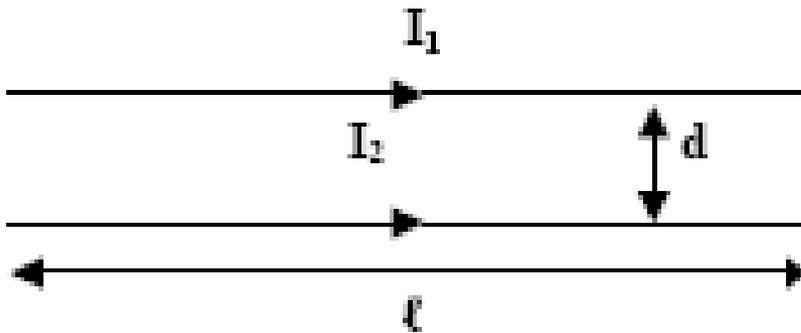
- Para qualquer meio material

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

- μ = permeabilidade magnética
- $\mu_r = \mu / \mu_0$ é a permeabilidade relativa
- $1 \text{ N/A}^2 = 1 \text{ V.s/A.m} = 1 \Omega.\text{s/m} = 1 \text{ Henry/m}$

A definição do Ampère

- O Ampère é definido através da força que atua entre dois condutores que levam uma corrente.



Módulo da força...

□ $F = \mu_0 I_1 I_2 l / (2\pi d)$

□ Para uma corrente idêntica temos:
 $F/l = \mu_0 I^2 / (2\pi d)$

□ Se $I = 1\text{A}$ e $d = 1\text{m}$ temos: $F/l = \mu_0 I / (2\pi) = 2 \cdot 10^{-7} \text{N/m}$

Linhas de força para um dipolo



Dipolo magnético e magnetização

- Átomos se comportam como momentos magnéticos

$$\chi = \frac{M}{H}$$

- O campo B pode ser calculado levando isso em consideração:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \mu \vec{H}$$

- Logo: $\mu = \mu_0 (1 + \chi) \rightarrow \mu / \mu_0 = \mu_r = (1 + \chi)$
- Para sistemas biológicos $\mu_r \cong 1$ e $\chi = \mu_0 M / B$

Susceptibilidades magnéticas

□ Susceptibilidade mássica

$$\chi = \frac{\chi}{\rho_{massa}}$$

□ Susceptibilidade molar

$$\chi = \frac{\chi}{\rho_{molar}}$$

Exemplo

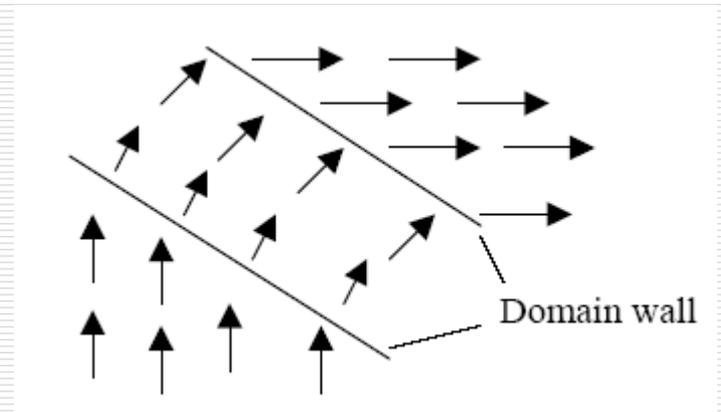
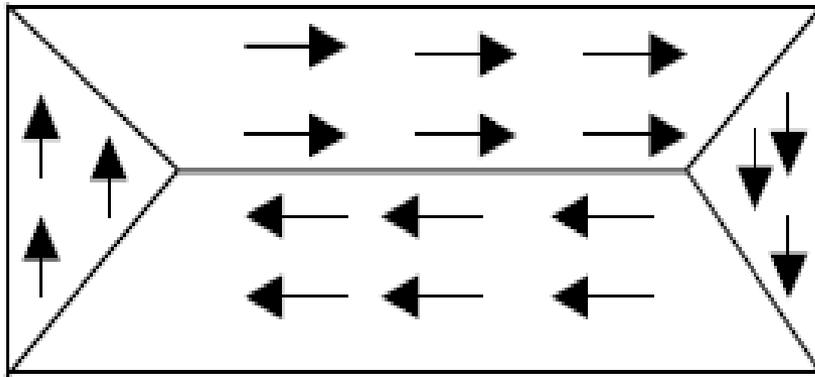
Alumínio: $\rho = 2.700 \text{ kg/m}^3$, $A = 27$, $\rho_{molar} = 10^5 \text{ moles/m}^3$

$\chi = 2,1 \cdot 10^{-5}$ $\chi_{massa} = 7,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$ e $\chi_{molar} = 2,1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{mol}$

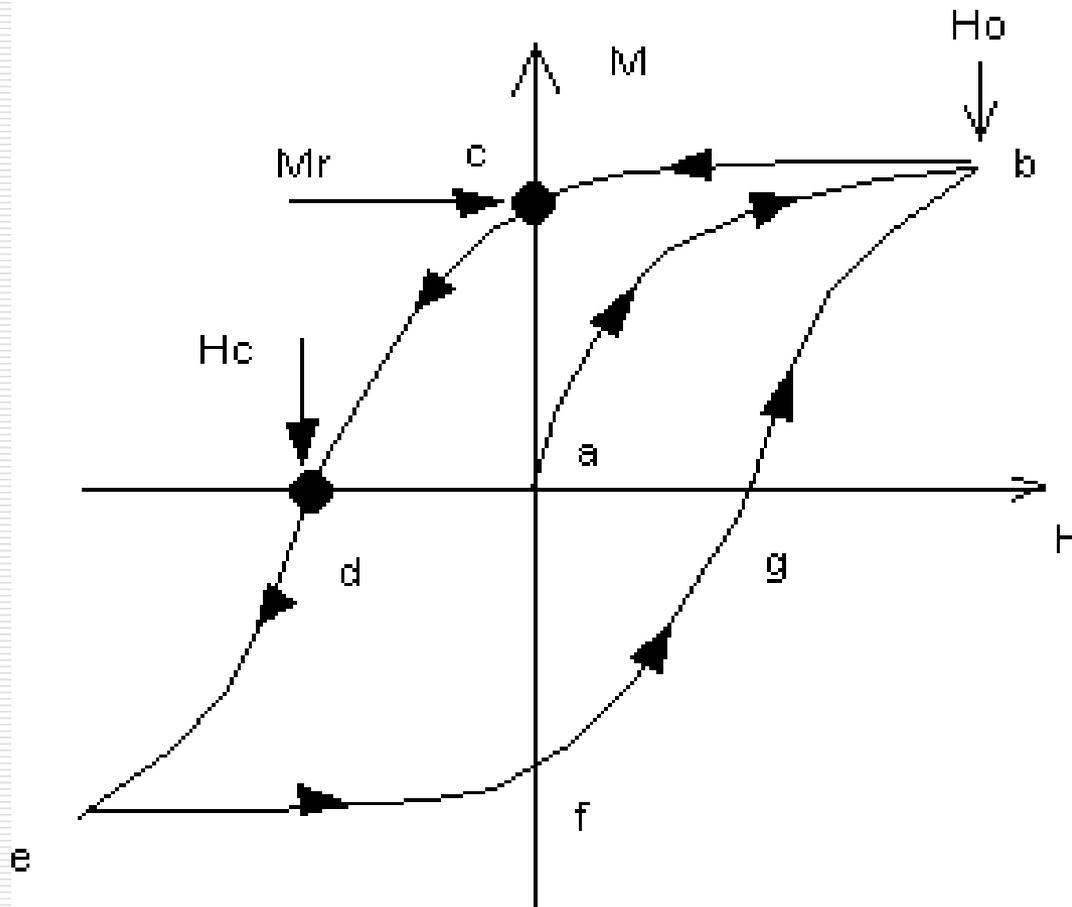
Propriedades magnéticas dos materiais

- Diamagnetismo → lei de Lenz
- Paramagnetismo → impurezas magnéticas O_2 , Cu^{2+} , etc..
- Ferromagnetismo → orientação espontânea dos dipolos em domínios magnéticos

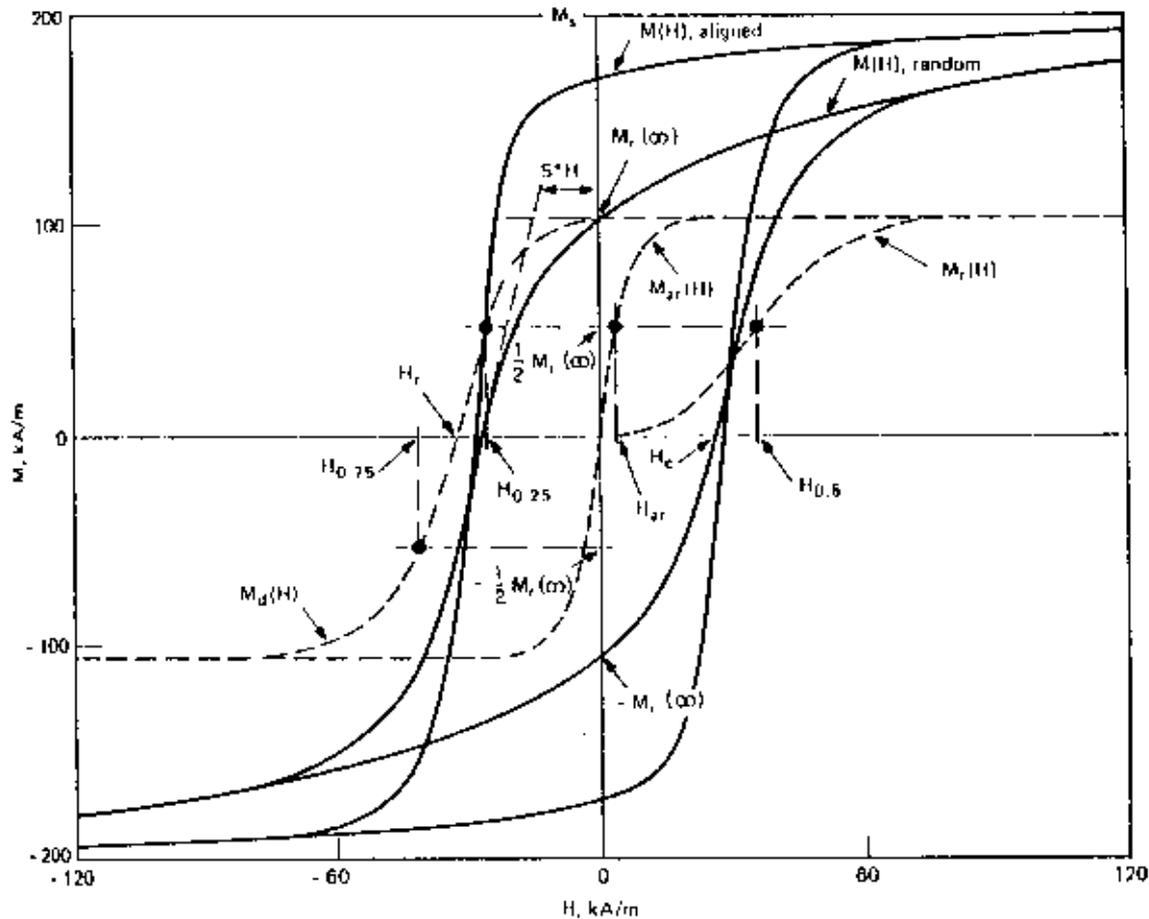
Domínios magnéticos



Curva de histerese



Óxido de Ferro-gama



Ferrimagnetismo

- Alguns materiais, como as ferritas, estão orientados antiparalelamente no domínio fazendo com que a magnetização total seja menor do que no caso ferromagnético, onde TODOS os dipolos tem a mesma orientação em um mesmo domínio magnético.
- Ex: Magnetita Fe_3O_4 ou $(\text{FeO})(\text{Fe}_2\text{O}_3)$

Antiferromagnetismo

- Número igual de dipolos orientados espontaneamente em direções opostas, logo $M=0$

Conversões de unidades

- 1 Tesla = 10^4 Gauss (G)
- 1 Oersted (Oe) = 12,5663706 • kA/m

Conversão de Unidades

Quantity	Symbol	Gaussian & cgs emu ^a	Conversion factor, C ^b	SI & rationalized mks ^c
Magnetic flux density, magnetic induction	B	gauss (G) ^d	10^{-4}	tesla (T), Wb/m ²
Magnetic flux	ϕ	maxwell (Mx), G*cm ²	10^{-8}	weber (Wb), volt second (V*s)
Magnetic potential difference, magnetomotive force	U, F	gilbert (Gb)	$10/4\pi$	ampere (A)
Magnetic field strength, magnetizing force	H	oersted (Oe), ^e Gb/cm	$10^3/4\pi$	A/m ^f
(Volume) magnetization ^g	M	emu/cm ^{3 h}	10^3	A/m
(Volume) magnetization	$4\pi M$	G	$10^3/4\pi$	A/m

Mais conversões...

Magnetic polarization intensity of magnetization	J, I	emu/cm ³	$4\pi \times 10^{-4}$	T, Wb/m ² ⁱ
(Mass) magnetization	σ, M	emu/g	$\frac{1}{4\pi \times 10^{-7}}$	A*m ² /kg Wb*m/kg
Magnetic moment	m	emu, erg/G	10^{-3}	A*m ² , joule per tesla (J/T)
Magnetic dipole moment	j	emu, erg/G	$4\pi \times 10^{-10}$	Wb*m ⁱ
(Volume) susceptibility	χ, κ	dimensionless, emu/cm ³	$\frac{4\pi}{(4\pi)^2 \times 10^{-7}}$	dimensionless henry per meter (H/m), Wb/(A*m)
(Mass) susceptibility	χ_p, κ_p	cm ³ /g, emu/g	$\frac{4\pi \times 10^{-3}}{(4\pi)^2 \times 10^{-10}}$	m ³ /kg H*m ² /kg
(Molar) susceptibility	χ_{mol}, κ_{mol}	cm ³ /mol, emu/mol	$\frac{4\pi \times 10^{-6}}{(4\pi)^2 \times 10^{-13}}$	m ³ /mol H*m ² /mol
Permeability	μ	dimensionless	$4\pi \times 10^{-7}$	H/m, Wb/(A*m)
Relative permeability ^j	μ_r	not defined		dimensionless
(Volume) energy density, energy product ^k	W	erg/cm ³	10^{-1}	J/m ³
Demagnetization factor	D, N	dimensionless	$1/4\pi$	dimensionless

-
- a. Gaussian units and cgs emu are the same for magnetic properties. The defining relation is $B = H + 4\pi M$.
- b. Multiply a number in Gaussian units by C to convert it to SI (e.g., $1 \text{ G} \times 10^{-4} \text{ T/G} = 10^{-4} \text{ T}$).
- c. *SI (Système International d'Unités)* has been adopted by the National Bureau of Standards. Where two conversion factors are given, the upper one is recognized under, or consistent with, SI and is based on the definition $B = \mu_0(H + M)$, where $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$. The lower one is not recognized under SI and is based on the definition $B = \mu_0 H + J$, where the symbol I is often used in place of J .
- d. $1 \text{ gauss} = 10^5 \text{ gamma } (\gamma)$.
- e. Both oersted and gauss are expressed as $\text{cm}^{-1/2} \cdot \text{g}^{-1/2} \cdot \text{s}^{-1}$ in terms of base units.
- f. A/m was often expressed as "ampere-turn per meter" when used for magnetic field strength.
- g. Magnetic moment per unit volume.
- h. The designation "emu" is not a unit.
- i. Recognized under SI, even though based on the definition $B = \mu_0 H + J$. See footnote c.
- j. $\mu_r = \mu / \mu_0 = 1 + \chi$, all in SI. μ_r is equal to Gaussian μ .
- k. $B \cdot H$ and $\mu_0 M \cdot H$ have SI units J/m^3 ; $M \cdot H$ and $B \cdot H / 4\pi$ have Gaussian units erg/cm^3 .
-

R. B. Goldfarb and F. R. Fickett, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Boulder, Colorado 80303, March 1985
 NBS Special Publication 696 For sale by the Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, DC 20402

Conversão de Unidades...

Grandeza- Símbolo Gaussiano & cgs- emu fator a , C b SI & mks c

- Magnetic flux density, B gauss (G) d 10^{-4} tesla (T), Wb/m^2
- magnetic induction
- Magnetic flux f maxwell (Mx), $\text{G}\cdot\text{cm}^2$ 10^{-8} weber (Wb), volt second ($\text{V}\cdot\text{s}$)
- Magnetic potential difference, U , F gilbert (Gb) $10/4\pi$ ampère (A)
- magnetomotive force
- Magnetic field strength, H oersted (Oe), e Gb/cm $10^3/4\pi$ A/m f
- magnetizing force
- (Volume) magnetization g M emu/ cm^3 h 10^3 A/m
- (Volume) magnetization $4\pi M$ G $10^3/4\pi$ A/m
- Magnetic polarization
- intensity of magnetization J , I emu/ cm^3 $4\pi \cdot 10^{-4}$ T, Wb/m^2 i
- 1 A $\cdot\text{m}^2/\text{kg}$
- (Mass) magnetization s , M emu/g $4\pi \cdot 10^{-7}$ $\text{Wb}\cdot\text{m}/\text{kg}$
- Magnetic moment m emu, erg/G 10^{-3} A $\cdot\text{m}^2$, joule per tesla (J/T)
- Magnetic dipole moment j emu, erg/G $4\pi \cdot 10^{-10}$ $\text{Wb}\cdot\text{m}$ i
- (Volume) susceptibility c , k dimensionless, emu/ cm^3 4π dimensionless
- $(4\pi)^{-1} \cdot 10^{-7}$ henry per meter (H/m), $\text{Wb}/(\text{A}\cdot\text{m})$
- $4\pi \cdot 10^{-3}$ m^3/kg
- (Mass) susceptibility c_r , k_r cm^3/g , emu/g $(4\pi)^{-1} \cdot 10^{-10}$ $\text{H}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$
- $4\pi \cdot 10^{-6}$ m^3/mol
- (Molar) susceptibility c_{mol} , k_{mol} cm^3/mol , emu/mol $(4\pi)^{-1} \cdot 10^{-13}$ $\text{H}\cdot\text{m}^2/\text{mol}$
- Permeability μ dimensionless $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m, $\text{Wb}/(\text{A}\cdot\text{m})$

Relative permeability μ_r not defined dimensionless
(Volume) energy density, W erg/cm³ 10⁻¹ J/m³
energy product k

Demagnetization factor D , N dimensionless $l/4\pi$ dimensionless

a. Gaussian units and cgs emu are the same for magnetic properties.
The defining relation is $B = H + 4\pi M$.

b. Multiply a number in Gaussian units by C to convert it to SI (e.g., 1 G
 $\times 10^{-4} \text{ T/G} = 10^{-4} \text{ T}$).

c. SI (*Système International d'Unités*) has been adopted by the National Bureau of Standards. Where two conversion factors are given, the upper one is recognized under, or consistent with, SI and is based on the definition $B = \mu_0(H + M)$, where
 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$. The lower one is not recognized under SI and is based on the definition $B = \mu_0 H + J$, where the symbol I is often used in place of J .

d. 1 gauss = 10⁵ gamma (g).

e. Both oersted and gauss are expressed as cm^{-1/2} * g^{-1/2} * s⁻¹ in terms of base units.

f. A/m was often expressed as "ampere-turn per meter" when used for magnetic field strength.

g. Magnetic moment per unit volume.

h. The designation "emu" is not a unit.

i. Recognized under SI, even though based on the definition $B = \mu_0 H + J$. See footnote c.

j. $\mu_r = \mu / \mu_0 = 1 + c$, all in SI. μ_r is equal to Gaussian μ .

k. $B \cdot H$ and $\mu_0 M \cdot H$ have SI units J/m³; $M \cdot H$ and $B \cdot H / 4\pi$ have Gaussian units erg/cm³.

R. B. Goldfarb and F. R. Fickett, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Boulder, Colorado 80303, March 1985
NBS Special Publication 696 For sale by the Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, DC 20402

Ainda sobre medidas...

- ❑ Precisão — repetição → desvio quadrático médio pequeno
- ❑ Incerteza — (acurácia) → o quão próximo a medida está de um padrão.
- ❑ Efeito consultório-ansiedade Medidas de pressão e taxa de batimento cardíaco podem sofrer grandes alterações.
- ❑ Histórico do Paciente—Nem sempre fala a verdade sobre tudo especialmente práticas sexuais e uso de drogas.

Erros de diagnóstico—Falso Positivo e o Falso Negativo

- ❑ Uma pessoa jovem foi diagnosticada como possuindo (febre) endocardite reumática → repouso absoluto por vários anos
- ❑ Posteriormente descobriu-se que a pessoa possuía artrite, doença na qual os movimentos devem ser mantidos para que não ocorra o enrijecimento das articulações.