

Exercícios com revisões teóricas para suas soluções.

Obs: Antes da solução de cada problema:

(1) Deteca-se os termos não conhecidos/entendidos.

⇒ Busca-se estas informações

(2) Busca-se as relações matemáticas que relacionam as grandezas apresentadas no problema.

(3) Uma vez que (1) e (2) ficaram claramente compreendidos (o que significam e em quais situações podem ser aplicados)



Resolve-se o problema

21.8 Calcule (a) a magnetização de saturação e (b) a densidade do fluxo de saturação para o cobalto, que possui um momento magnético líquido por átomo de 1,72 magnétons de Bohr e uma densidade de $8,90 \text{ g/cm}^3$.

* Vamos sublinhar os termos não conhecidos/compreendidos.

21.8 Calcule (a) a magnetização de saturação e (b) a densidade do fluxo de saturação para o cobalto, que possui um momento magnético líquido por átomo de 1,72 magnétons de Bohr e uma densidade de $8,90 \text{ g/cm}^3$.

* Antes de iniciarmos a solução, vamos revisar/estudar os termos sublinhados.

Magnetização

Vimos, no capítulo sobre modelos atômicos, que átomos geram campos magnéticos resultantes dos movimentos orbitais e também dos spins de seus elétrons desemparelhados (sem compensação inversa). Resulta que átomos magnéticos comportam-se como pequenas bússolas (tendem a alinhar-se com campos magnéticos de fontes externas) e também agem como fonte de campo magnético que atuam sobre átomos vizinhos.

A fim de diferenciar-se, em uma relação matemática, qual termo refere-se à "reação" do átomo quando na presença de de campo magnético externo do próprio campo externo; define-se a intensidade magnética atômica por **momento magnético** $\vec{\mu}$.

Por exemplo: Para uma espira de corrente 

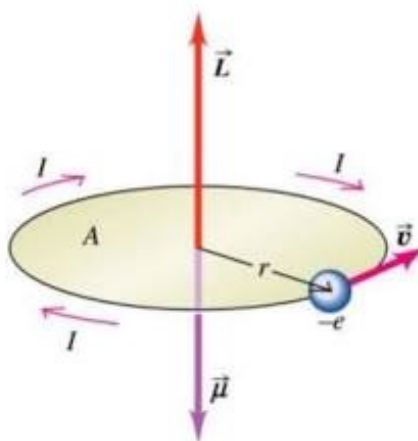
Corrente em uma espira

Biot-Savart

$$B(z) = \frac{\mu_0 i A}{2\pi z^3} = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi z^3}$$

$$\mu = iA$$

Momento de dipolo magnético ou simplesmente momento magnético



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

cas.ufrgs@gmail.com

MNPEF-UFERSA: 2016.1

Note que fixando um ponto qualquer no espaço $\Rightarrow B \propto \mu$, ou seja, são equivalentes.

A definição do magnetismo de átomos (assim como espiras de corrente elétrica) por μ também simplifica relações, tais como:

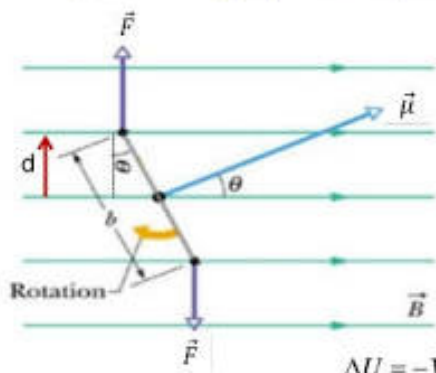
* Energia de um momento magnético $\vec{\mu}$ submetido a um campo magnético $\vec{H}$. 

$$E = -\mu_0 \vec{\mu} \cdot \vec{H} \quad (\text{páginas } 9 \rightarrow 11 \text{ no arquivo teórico}).$$

Ilustrando:

ENERGIA POTENCIAL DE UM DIPOLO MAGNÉTICO

Quando um dipolo magnético muda de orientação em um campo magnético, o campo realiza um trabalho sobre ele. Este trabalho origina a energia potencial para um dipolo magnético



→ usei E.

$$U = -(\vec{\mu} \cdot \vec{B})$$

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

$$\Delta U = -W_{\text{mag}} = -2.F.d = -2.i.a.B.\frac{b}{2} \cos \theta$$

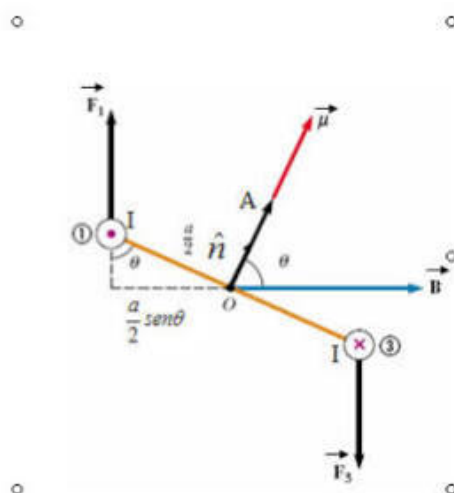
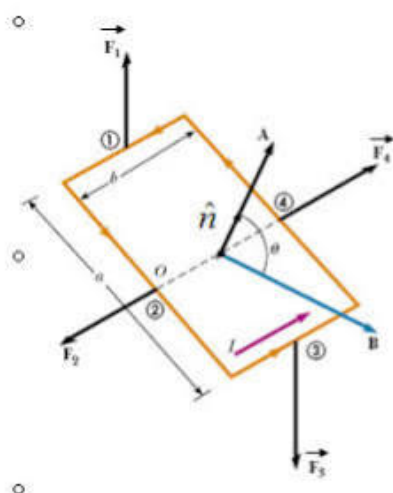
$$\Delta U = -\mu.B.\cos \theta = -(\vec{\mu} \cdot \vec{B})$$

Admitindo $U_{\theta=90^\circ} = 0$ para $\theta = 90^\circ$, vem que: $U = -(\vec{\mu} \cdot \vec{B})$

É correto colocar em função de $\vec{H}$. Veremos o porque mais a frente.

* Torque sofrido por um momento magnético $\vec{\mu}$ quando submetido a um campo magnético $\vec{B}$ efeito bússola → (tende a se alinhar com o campo magnético)

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$



⇒ Um átomo pode possuir momento magnético total $\vec{\mu}$.

Um material que possuir, em sua composição, constituintes magnéticos (composição total ou parcial) será um material magnético. Para tratar de materiais macroscópicos é conveniente trabalhar-se com a característica por unidade de volume.

⇒ Do ponto de vista do magnetismo de materiais, define-se a magnetização $\vec{M}$ como sendo a quantidade de momentos magnéticos por unidade de volume;

$$\vec{M} \equiv \sum_i \vec{\mu}_i, \quad \text{Eq. (1)}$$

onde o índice na soma deve cobrir todos os momentos magnéticos dentro de uma unidade de volume.

=====ΔΔ=====

Magnetização de Saturação

Note, na Equação (1), acima, que a magnetização resulta de uma soma vetorial. Portanto, pode ser zero se os momentos individuais estiverem distribuídos em sentidos aleatórios.

A magnetização de saturação é a magnetização obtida quando todos os momentos magnéticos $\vec{\mu}_i$ estiverem totalmente alinhados no mesmo sentido.

Uma forma de se obter isso é através da aplicação de um campo externo de "alta" intensidade.

Densidade de Fluxo Magnético.

A densidade de fluxo magnético (também chamada de indução magnética) é o nosso "velho conhecido" $\vec{B}$.

$\vec{B}$ é comumente (e incorretamente) referido como campo magnético.

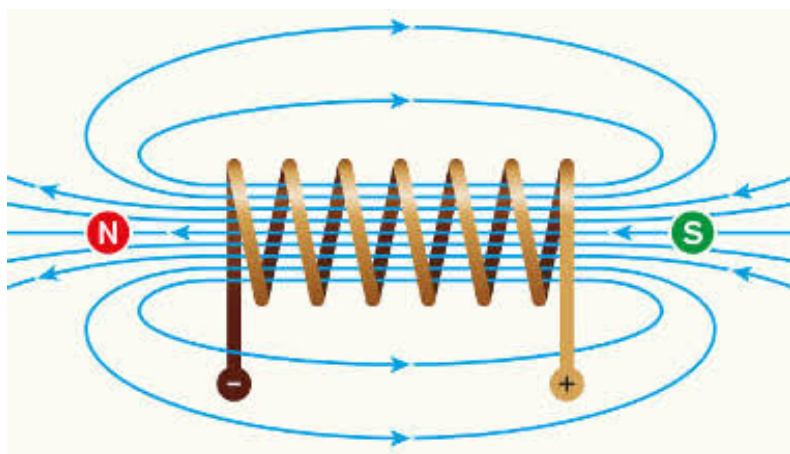
$\vec{B} \equiv$ Densidade de Fluxo Magnético ou Indução Magnética.

Isso mesmo, $\vec{B}$ não é campo magnético. Campo magnético é denotado pela letra H . Vetorialmente $\Rightarrow \vec{H}$.

Qual a diferença entre $\vec{B}$ e $\vec{H}$?

Resposta: Uma resposta completa envolveria aspectos históricos acerca das primeiras observações e estudos dos fenômenos magnéticos durante o século XVIII. Vamos focar na importância prática atual

Estuda-se materiais magnéticos aplicando-se campos externos provenientes de espiras/fios condutores atravessados por correntes elétricas. O valor destes campos (em um ponto do espaço onde uma amostra magnética será posicionada para estudo) é calculado com base no valor da corrente elétrica e da geometria da espira utilizada $\Rightarrow$



$\Rightarrow$ O campo magnético no centro é calculado.

O pesquisador sabe qual o valor do campo magnético que será aplicado sobre a amostra. Este é definido como **Campo Magnético $\vec{H}$** . Este é o valor do campo magnético no ponto onde a amostra será posicionada antes de ser posicionada.

Pensando na mesma região do espaço, após o posicionamento da amostra, a reação da amostra ao campo $\vec{H}$ promove uma tendência de alinhamento dos constituintes da amostra. O valor de campo na região onde a amostra foi posicionada é alterado pela presença da amostra. Agora o valor será $\vec{H} + \text{Campo local gerado pelos constituintes da amostra}$; este é o "campo" verdadeiro. O "campo" verdadeiro ocorre não só devido à presença da amostra, mas pela ação de $\vec{H}$ induzindo alinhamento dos seus constituintes. Este campo verdadeiro resultante é definido como **Indução Magnética $\vec{B}$** (também Densidade de Fluxo Magnético).

Então, na região interna da amostra o "campo" resultante será a soma de dois: O aplicado pela espira de corrente ($\vec{H}$) mais o produzido pela própria amostra. Esta soma é representada por $\vec{B}$;

⇒ O "campo" devido à reação da amostra é proporcional à magnetização da amostra ($\vec{M}$). No sistema internacional de medidas define-se que $\vec{B}$ e $\vec{M}$ têm a mesma dimensão.

$\vec{H}$ é calculado em termos da corrente elétrica i , geometria e característica do meio (μ_0). Sua unidade no S.I. é definida como Amper/metro. $\vec{M}$ possui unidades de momento magnético ($I \cdot \text{Área} \Rightarrow \text{Amper} \cdot \text{m}^2$) por unidade de volume. Então $[M] = \frac{\text{A} \cdot \text{m}^2}{\text{m}^3} = \frac{\text{A}}{\text{m}}$; mesma unidade de H (no S.I.)

$$[H] = \frac{\text{Amper}}{\text{metro}} = \frac{\text{Coulomb}}{\text{seg} \cdot \text{metro}}$$

$$[M] = \frac{\text{Coulomb}}{\text{seg}} \times \frac{\text{metro}^2}{\text{m}^3} = \frac{\text{Coulomb}}{\text{seg} \cdot \text{metro}}$$

⇒ $\vec{B}$, por outro lado, foi historicamente desenvolvido de forma independente de $\vec{H}$ e $\vec{M}$; em termos de cargas elétricas em movimento.

⇒ No S.I. adquiriu unidades diferentes. Contudo $B \propto H$ e também a M . ⇒ $\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$

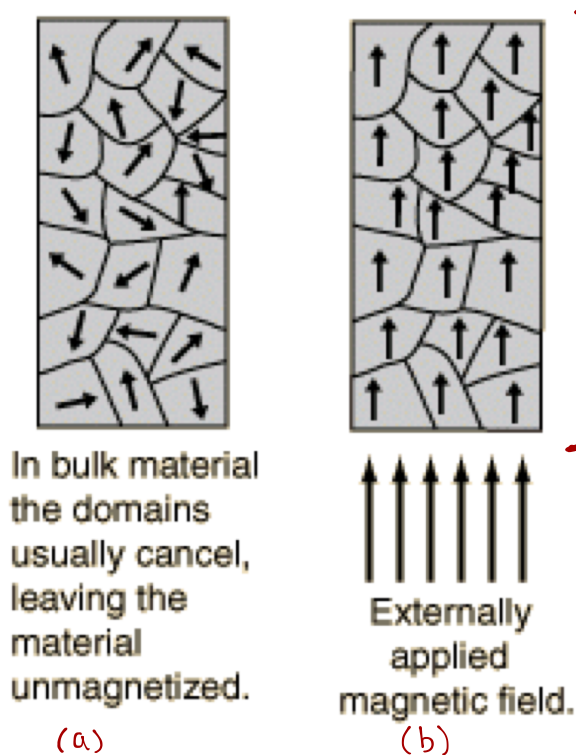
$$\vec{B} \equiv \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$

Eq. (2)

- Magnetização da amostra
- Campo magnético aplicado na amostra
- Constante que adequa a dimensionalidade e intensidade de $\vec{H}$ e $\vec{M}$ com $\vec{B}$
- Densidade de Fluxo Magnético ou Indução magnética.

Densidade de Fluxo de Saturação

O termo **Saturação** de alguma grandeza representa o valor máxi que a grandeza pode atingir. Neste sentido a **Magnetização** atinge a saturação pois após o alinhamento completo dos momentos magnéticos atômicos



(a) Sem campo $\vec{H}$ aplicado.
 $\Rightarrow$ Magnetização total nula.

(b) Campo magnético com intensidade suficiente para alinhar todos os momentos magnéticos, levando à **saturação da magnetização**.

Como o valor de $\vec{B}$ é proporcional à $\vec{H}$;

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}),$$

$\vec{H}$ pode ser tão alto quanto se queira, depende apenas da intensidade da corrente elétrica aplicada na espira geradora; portanto, $\vec{B}$ também. Desta forma podemos dizer que a **Densidade de Fluxo**

Magnético não satura.

Na prática localmente, na situação de saturação, $\vec{M} \gg \vec{H}$. De fme-se, portanto que $\vec{B}$ de saturação é o valor de $\vec{B}$ obtido no $\vec{H}$ mínimo capaz de saturar a magnetização $\vec{M}$.

$$\Rightarrow \boxed{\vec{B}_{\text{sat.}} = \mu_0 (\vec{H}_{\text{sat.}} + \vec{M}_{\text{sat.}})}$$

===== $\Delta \nabla$ =====

Magneton de Bohr (μ_B)

Trata-se de um valor de referência para momento magnético, definida como o momento magnético mínimo que um elétron pode assumir devido ao movimento orbital em torno de um próton (átomo de Hidrogênio).

É comumente utilizado como se fosse uma unidade de momento magnético, tal que outros valores são escritos em termos dele.

===== $\Delta \nabla$ =====

Solução do Problema.

21.8 Calcule (a) a magnetização de saturação e (b) a densidade do fluxo de saturação para o cobalto, que possui um momento magnético líquido por átomo de 1,72 magnétons de Bohr e uma densidade de 8,90 g/cm³.

(a) Magnetização $\equiv$ Quantidade de momento magnético resultante, após soma vetorial, em uma unidade de volume.

$\Rightarrow$ Se sabemos quantos átomos tem em uma unidade de volume; e qual o valor de momento de cada átomo, basta somarmos todos os momentos em uma unidade de

$$(b) \quad \vec{B}_{sat} = \mu_0 (\vec{H}_{sat} + \vec{M}_{sat})$$

Na saturação todos estão alinhados no mesmo sentido. Além disso, como na saturação $|\vec{M}| \gg |\vec{H}|$

$$\Rightarrow \vec{B}_{sat} \approx \mu_0 \vec{M}_{sat} \quad \mu_0 = 1,257 \times 10^{-6} \frac{\text{Tesla-m}}{\text{Ampere}}$$

Em módulo

$$B_{sat} \approx 1,257 \times 10^{-6} \times 1,45 \times 10^6 \times \frac{\text{Tm}}{\text{A}} \times \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$B_{sat} \approx 1,8 \text{ Tesla}$$

FIM

21.27 Os seguintes dados aplicam-se para um aço de transformador:

H (A/m)	B (teslas)	H (A/m)	B (teslas)
0	0	200	1,04
10	0,03	400	1,28
20	0,07	600	1,36
50	0,23	800	1,39
100	0,70	1000	1,41
150	0,92		

- (a) Construa um gráfico de B em função de H .
 (b) Quais são os valores da permeabilidade inicial e da permeabilidade relativa inicial?
 (c) Qual é o valor da permeabilidade máxima?
 (d) Em aproximadamente qual campo H essa permeabilidade máxima ocorre?
 (e) A que susceptibilidade magnética essa permeabilidade máxima corresponde?

Verificação dos Termos:

Permeabilidade (e também Susceptibilidade)

Vimos acima que

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

Diferentes materiais apresentam diferentes dificuldades de alinhamento de sua magnetização $\vec{M}$ com o campo magnético aplicado $\vec{H}$. Materiais que magnetizam com maior facilidade são ditos mais susceptíveis. A susceptibilidade é um parâmetro que associa $\vec{M}$ com $\vec{H}$;

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

Eq. (3)



Susceptibilidade magnética, característica de cada material.



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

$$\Rightarrow \vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \chi \vec{H})$$

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} \quad \text{Eq. (4)}$$

Se definirmos $\mu_0 (1 + \chi) \equiv \mu$ (sem o índice zero)

$$\Rightarrow \vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{Eq. (5)}$$

Note que em um material qualquer podemos escrever

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad \text{ou} \quad \vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{sendo } \mu = \mu_0 (1 + \chi).$$

Se não houver material algum $\Rightarrow \vec{M} = \vec{0}$

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

$$\text{Com material} \Rightarrow \vec{B} = \mu \vec{H}$$

μ é definido como permeabilidade magnética do material submetido à $\vec{H}$.

Como sem material algum $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$, então μ_0 é a permeabilidade magnética do **Vácuo**.

Define-se também a permeabilidade relativa, de um material, com relação ao vácuo;

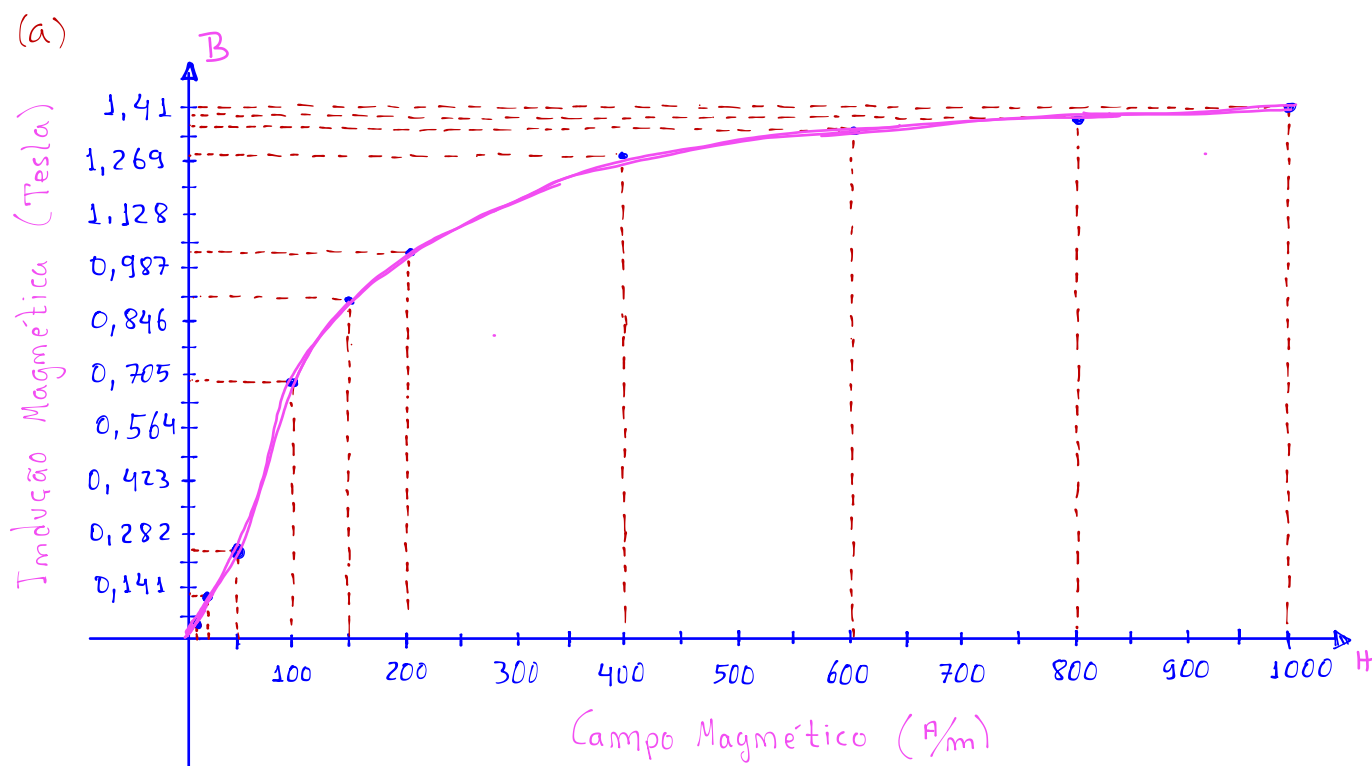
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad \text{Eq. (6)}$$

Solução do Problema.

21.27 Os seguintes dados aplicam-se para um aço de transformador:

H (A/m)	B (teslas)	H (A/m)	B (teslas)
0	0	200	1,04
10	0,03	400	1,28
20	0,07	600	1,36
50	0,23	800	1,39
100	0,70	1000	1,41
150	0,92		

- (a) Construa um gráfico de B em função de H .
 (b) Quais são os valores da permeabilidade inicial e da permeabilidade relativa inicial?
 (c) Qual é o valor da permeabilidade máxima?
 (d) Em aproximadamente qual campo H essa permeabilidade máxima ocorre?
 (e) A que susceptibilidade magnética essa permeabilidade máxima corresponde?



- (b) Permeabilidade $\Rightarrow B = \mu H$
 Coeficiente angular (inclinação da curva).

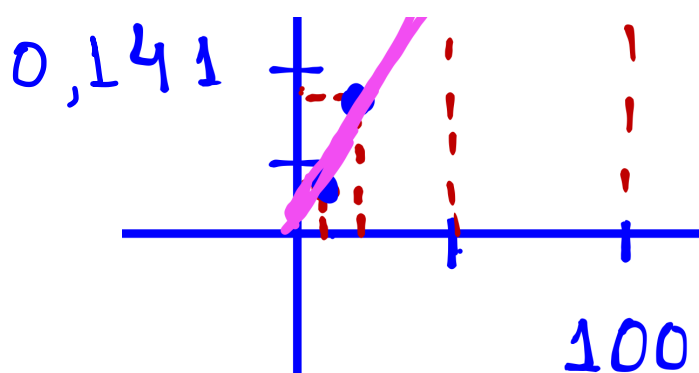
Inicialmente a curva é côncava para cima. Intermediariamente passa por um ponto de inflexão, mudando a curvatura para baixo. Finalmente a curva tende a uma linearidade horizontal (saturação).

$B = \mu H$ é uma equação linear, diferente do que se observa na curva $B(H)$.

Na verdade, a permeabilidade é uma característica local:

$$\mu = \frac{\Delta B}{\Delta H}, \text{ onde } \Delta B \text{ e } \Delta H \text{ deve ser obtido localmente.}$$

Inicialmente podemos obter uma permeabilidade aproximado através da região inicial gráfica.

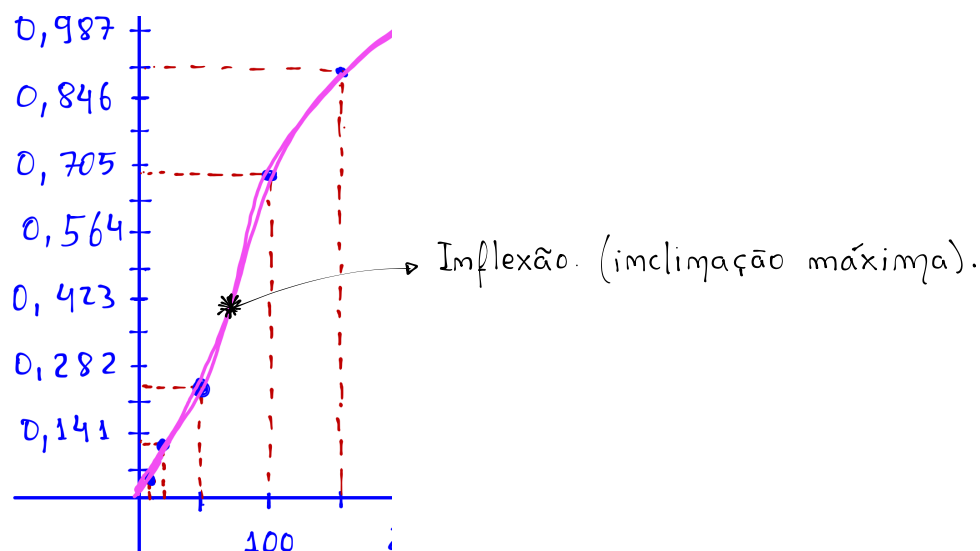


Vou utilizar, como inicial, a região da origem até o primeiro ponto $A(0,0) \rightarrow B(10, 0,03) \Rightarrow$ veja na tabela.

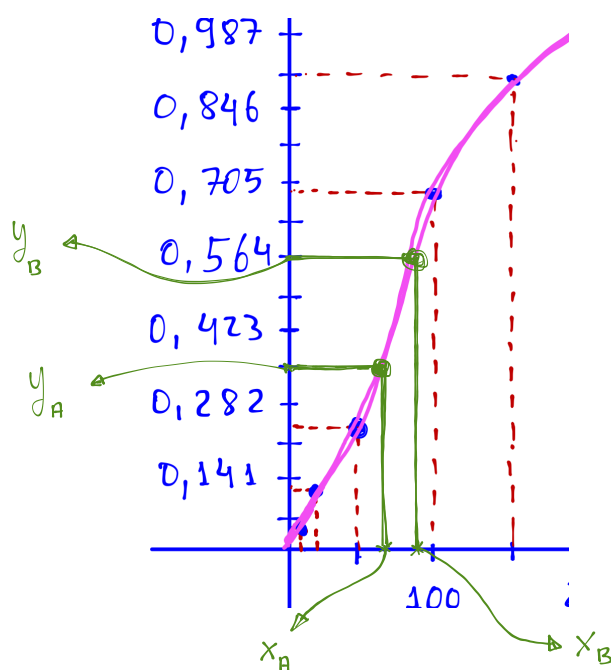
$$\mu = m = \frac{\Delta B}{\Delta H} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A}$$

$$\mu \approx \frac{0,03}{10} \approx 0,003 \text{ T.m/A}$$

(c) O valor máximo de μ ocorre na região de inflexão:



Não é necessário (algumas vezes nem é possível) usar os pontos da tabela. Sempre é possível estimar valores diretamente no gráfico.



$$y_A \approx 0,423 \text{ T}, \quad y_B \approx 0,564 \text{ T},$$

$$X_A \approx 70 \text{ A/m}, \quad X_B \approx 90 \text{ A/m}$$

$$\mu_{\text{máx}} \approx \frac{0,564 - 0,423}{90 - 70} \approx 0,0071 \text{ T.m/A}$$

Obs: Dados extraídos de uma curva desenhada manualmente geram incertezas que não foram consideradas. Portanto, o valor obtido é aproximado.

- (d) A permeabilidade máxima ocorre no ponto de inflexão, aproximadamente no centro da região utilizada na região de inflexão adotada em (b).

$$H = 80 \text{ A/m}$$

- (e) Susceptibilidade (χ).

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi)$$

$$\chi = \frac{\mu}{\mu_0} - 1$$

$$\chi_{\text{máx}} = \frac{\mu_{\text{máx}}}{\mu_0} - 1$$

$$\chi_{\text{máx}} \approx \frac{0,0071}{1,257 \times 10^{-6}} - 1$$

$$\chi_{\text{máx}} = 5650 ?$$

Qual a unidade ? $[M]$ = momento magnético por unidade de volume.

$$\Rightarrow [\chi \cdot H] = \frac{\text{Corrente} \times \text{área}}{\text{volume}}$$

$$\text{Como } [H] = \frac{\text{corrente}}{\text{metro}}$$

$$\Rightarrow [\chi] \times \frac{\text{corrente}}{\text{metro}} = \frac{\text{Corrente} \cdot \text{metro}^2}{\text{m}^3}$$

$$[\chi] = \text{adimensional, se } [M] = \frac{\text{momento}}{\text{m}^3}$$

21.26 Um material ferromagnético possui uma remanência de 1,25 tesla e uma coercibilidade de 50.000 A/m. A saturação é obtida a uma intensidade do campo magnético de 100.000 A/m, na qual a densidade do fluxo magnético é de 1,50 tesla. Usando esses dados, esboce toda a curva de histerese na região entre $H = -100.000$ e $+100.000$ A/m. Certifique-se de botar em escala e identificar ambos os eixos coordenados.

Compreendendo os termos destacados:

Material Ferromagnético:

Obs: Vamos aproveitar a discussão para estudar outros tipos de características magnéticas em materiais.

- (1) Ferromagnetismo
- (2) Antiferromagnetismo
- (3) Ferrimagnetismo
- (4) Paramagnetismo
- (5) Diamagnetismo

Para compreender-se as características acima, verificadas experimentalmente em materiais, necessita-se introduzir dois outros fatos:

Interação de troca e Domínios magnéticos.

Interação de troca: A interação de troca é uma força de acoplamento entre momentos magnéticos vizinhos - Coma aquela que faz com que elétrons se acoplem com momentos magnéticos paralelos ou antiparalelos. Sua origem é quântica e depende da distância interatômica.

A interação de troca pode ser positiva ou negativa, dependendo da interação eletrostática e distância interatômica. Se positiva, promove acoplamento paralelo entre momentos magnéticos vizinhos. Se negativa, promove acoplamento antiparalelo.

(1) Ferromagnetismo

Acoplamento paralelo - em mesmo sentido - entre momentos magnéticos vizinhos $\rightarrow$ Interação de troca > 0 .

(2) Antiferromagnetismo

Acoplamento antiparalelo - em sentidos contrários - entre momentos magnéticos vizinhos $\rightarrow$ Interação de troca < 0 .

Obs: Ferromagnetismo produz regiões com alinhamento espontâneo paralelo. Dentro desta região a magnetização tende espontaneamente à saturação.

No Antiferromagnetismo os momentos se alinham espontaneamente de forma antiparalela; neste tipo de alinhamento os momentos magnéticos inversos tendem a anular-se mutuamente resultando em magnetização local nula.

Ilustração de Ferromagnetismo.

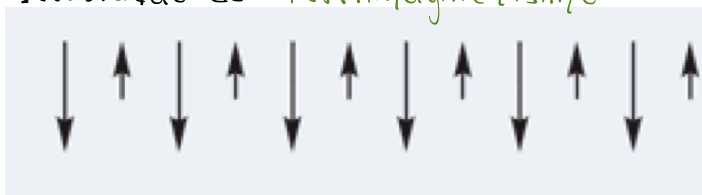


Ilustração de Antiferromagnetismo



(3) Ferrimagnetismo: Ferrimagnetismo é o mesmo tipo de acoplamento que Antiferromagnetismo. Contudo, trata-se de acoplamento antiferromagnético entre átomos vizinhos diferentes. Desta forma, como são átomos diferentes, os momentos magnéticos acoplados também são diferentes e não se anulam, fazendo resultar em magnetização local não nula.

Ilustração de Ferrimagnetismo

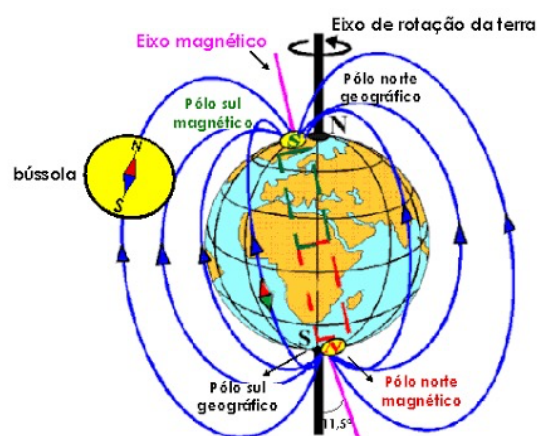
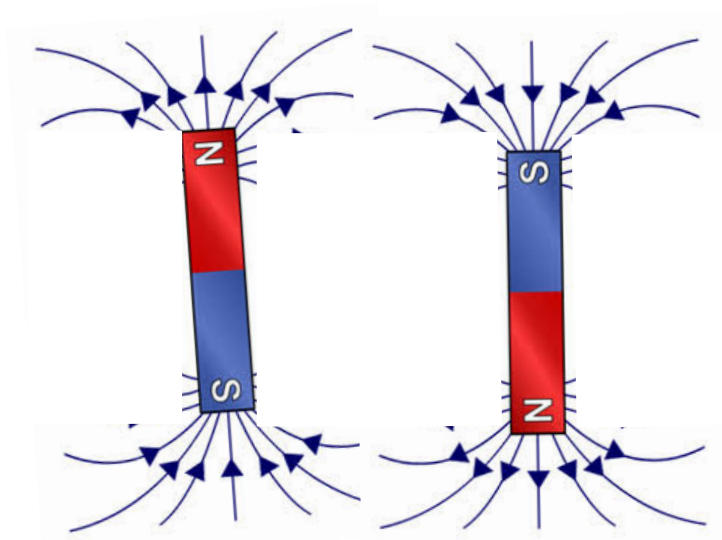


Domínios Magnéticos em materiais Ferromagnéticos.

Além da Interação de troca, discutida acima, existe também a interação dipolar magnética.

A interação dipolar magnética é a interação popularmente conhecida. Como polos iguais se repelem e polos inversos se atraem, então dois momentos magnéticos próximos tendem a alinhar-se antiparalelamente.

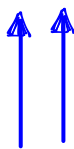
Ilustrações



Portanto, se a interação de troca é Ferromagnética (paralela) e a interação dipolar é sempre antiparalela, quem ganhará a briga?

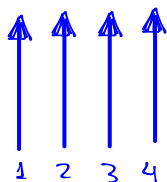
Ocorre que a interação de troca é muito mais forte que a dipolar, mas enquanto a dipolar é de longo alcance a de troca só atua sobre os vizinhos. Então se imaginarmos apenas dois átomos se acoplando ferromagneticamente $\rightarrow$ a Interação ferromagnética ganha.





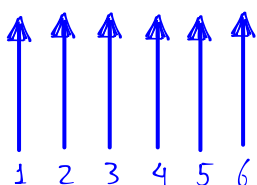
"A dipolar que inverte mas de troca >> dipolar"

Acrescentando mais átomos:



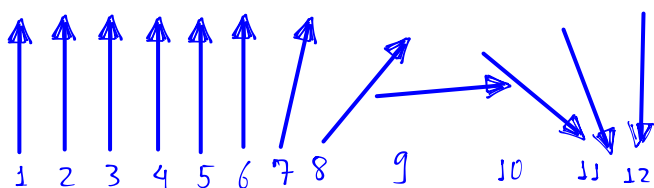
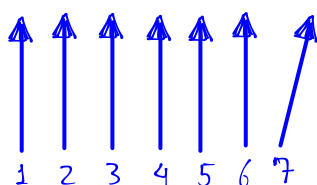
⇒ A de troca ainda ganha, mas o 4º átomo sente a influência dipolar dos outros três e a de troca apenas do 3 (no máximo até o 2).

Acrescentando mais:

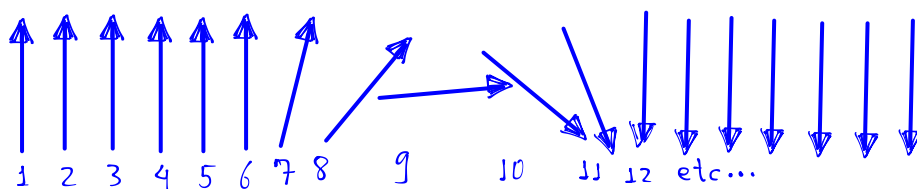


⇒ O sexto sente o acúmulo dipolar (~~tentando~~ ~~inverte-lo~~) dos outros 5. De troca apenas dos vizinhos próximos.

Seguindo, a interação dipolar, por ser de longo alcance, vai acumulando e a de troca fica sempre limitada aos vizinhos próximos. Chega um momento que a dipolar começa a vencer a batalha e os próximos átomos adicionados começam a inverter.



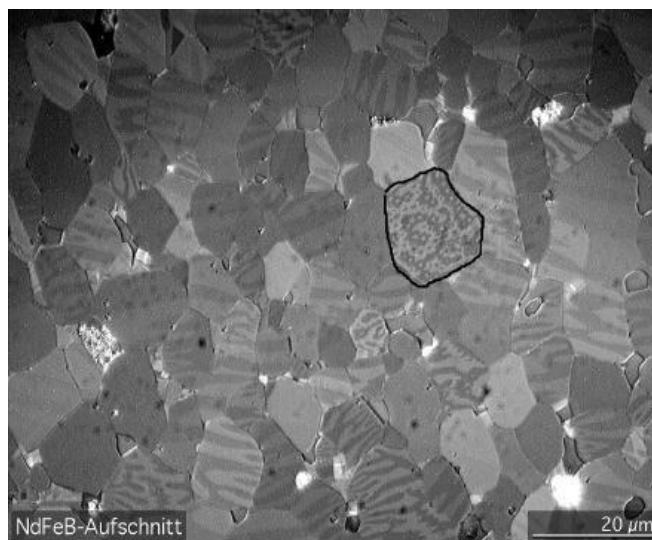
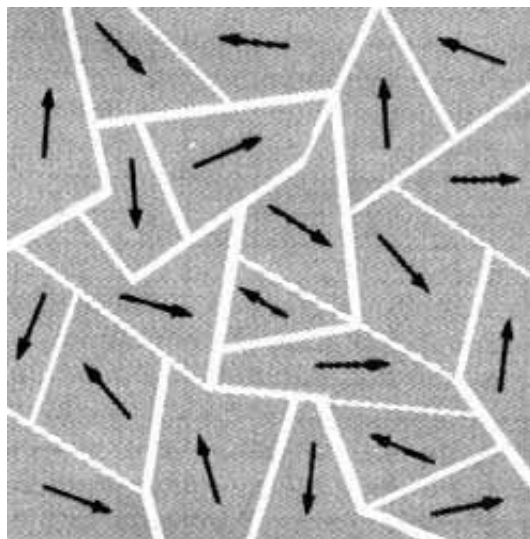
A partir da inversão recomeça o acúmulo.



⇒ Cada região alinhada é chamada de região de **Domínio Magnético**. A região entre domínios é chamada parede de domínios.

Obs: O ferro utilizado no dia a dia (utensílios domésticos tipo geladeiras, máquinas de lavar, etc.) é ferromagnético à temperatura ambiente. Não é magnético como um todo pois os Domínios Magnéticos invertidos se anulam no total.

Ilustração de domínios



Domínios magnéticos reais verificados através da técnica de Efeito Kerr magneto-óptico.

Foto retirada do site

<http://copro.com.ar/>

Efecto_Kerr_magneto_optica.htm

em 04/12/2017.

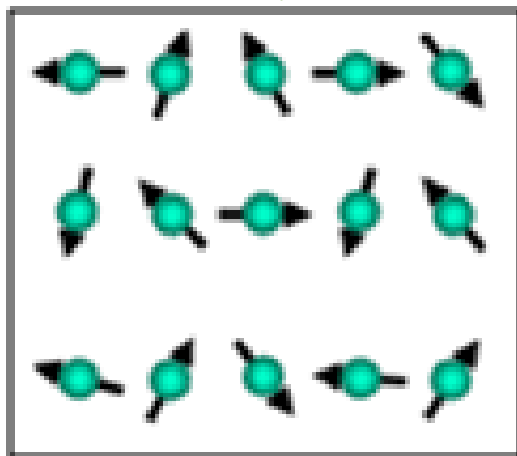


(4) Paramagnetismo:

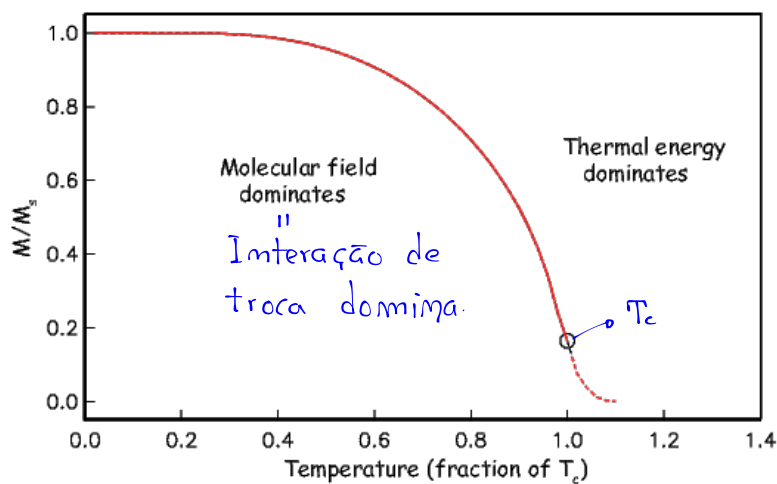
Os acoplamentos por interação de troca (Ferromagnetismo, Antiferromagnetismo e Ferrimagnetismo) possuem um adversário que comumente tende a desacoplar tudo $\Rightarrow$ A temperatura.

Os choques térmicos causam vibrações que tendem a desacoplar os alinhamentos magnéticos interatômicos. Se os choques térmicos tiverem energias superiores à energia de acoplamento, então os momentos se soltam e vibram (giram) como se estivessem soltos.

Ilustração de um material em temperatura suficiente para levá-lo ao estado Paramagnético.



Obs. Existe uma temperatura específica para cada material magnético, chamada de temperatura crítica, a partir da qual o material passa de Ferromagnético (ou Antiferromagnético) para paramagnético.



Curva da magnetização como função da temperatura. Na temperatura crítica T_c o acoplamento de troca é desfeito e o material se torna Paramagnético.

Gráfico retirado de:

<https://earthref.org/MagIC/books/Tauxe/Essentials/WebBook3ch3.html>

(5) **Diamagnetismo**: Todo material é diamagnético. Trata-se de uma reação à variação de fluxo magnético quando submetido à $\vec{H}$. (Lei de Lenz/Faraday)

Só é importante em materiais não magnéticos pois sua intensidade é baixa, relativamente.

É uma reação à variação no fluxo magnético, portanto negativa.

⇒ **Susceptibilidade negativa**.

Significa que a indução na região da amostra é menor do que seria no vácuo, quando submetido à $\vec{H}$.

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

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

No vácuo $\chi = 0$

No material diamagnético $\chi < 0$

$$\Rightarrow |\vec{B}|_{\text{vácuo}} > |\vec{B}|_{\text{material}}$$

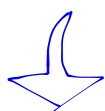
===== ΔΔ =====

Curva de Histerese

Leiam as páginas 26 → 29 do orgivo anterior. Remanência e Coercividade fazem parte desta explicação.

===== ΔΔ =====

Vamos, finalmente, à solução do problema proposto.



- 21.26** Um material ferromagnético possui uma remanência de 1,25 tesla e uma coercibilidade de 50.000 A/m. A saturação é obtida a uma intensidade do campo magnético de 100.000 A/m, na qual a densidade do fluxo magnético é de 1,50 tesla. Usando esses dados, esboce toda a curva de histerese na região entre $H = -100.000$ e $+100.000$ A/m. Certifique-se de botar em escala e identificar ambos os eixos coordenados.

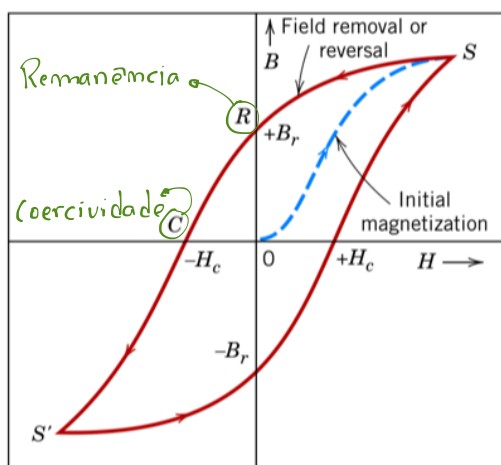
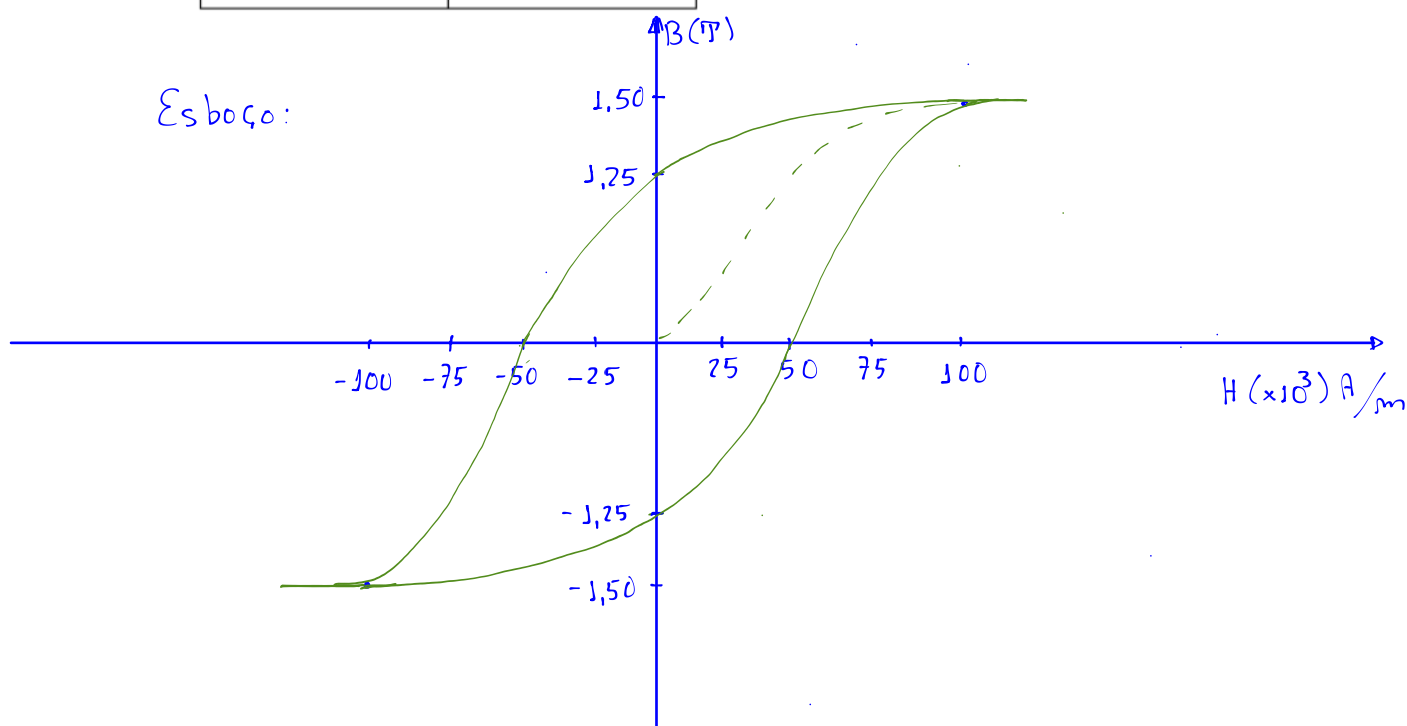


Figure 20.14 Magnetic flux density versus the magnetic field strength for a ferromagnetic material that is subjected to forward and reverse saturations (points S and S'). The hysteresis loop is represented by the solid curve; the dashed curve indicates the initial magnetization. The remanence B_r and the coercive force H_c are also shown.

Esboço:

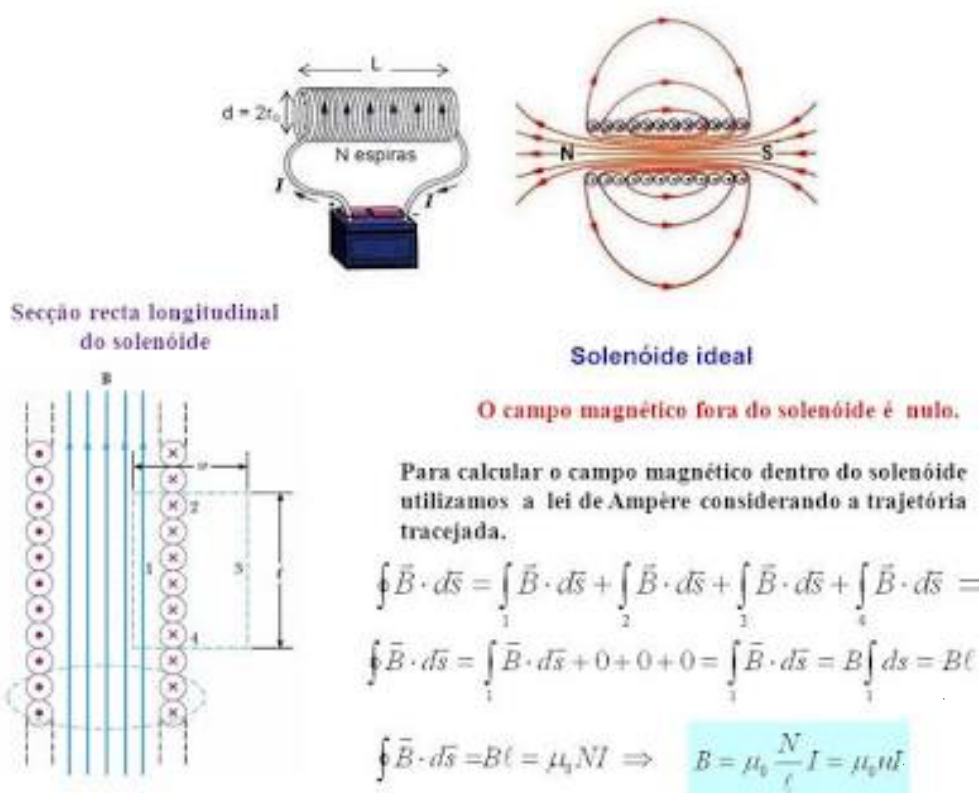


21.28 Um ímã em barra de ferro com uma coercibilidade de 4000 A/m deve ser desmagnetizado. Se a barra for inserida no interior de uma bobina de arame cilíndrica, com 0,15 m de comprimento e 100 voltas, qual será a corrente elétrica exigida para gerar o campo magnético necessário?

Solução:

Trata-se de um problema de eletromagnetismo. Precisa-se de um campo magnético $H = 4000 \text{ A/m}$.

Bobina cilíndrica. (Relembrando)



"Correção" do problema acima: Aplica-se H e não B .

$$B = \mu_0 H \quad " \mu \text{ atmosférico} \approx \mu_0 "$$

$$\Rightarrow H = \frac{B}{\mu_0}$$

$$H = \frac{\mu_0 n I}{\mu_0}, \text{ dentro do solenóide.}$$

↑ número de voltas por metro.

$$H = n I$$

$$I = \frac{H}{n}$$

$$100 \text{ voltas em } 0,15\text{m} \implies n = \frac{100}{0,15} \text{ voltas/m}$$

$$I = \frac{4000}{100/0,15} \text{ A}$$

$$I = 6,0 \text{ A}$$

21.6 A densidade do fluxo magnético no interior de uma barra de um dado material é de 0,435 tesla para um campo H de $3,44 \times 10^5 \text{ A/m}$. Calcule o seguinte para esse material: (a) a permeabilidade magnética, e (b) a susceptibilidade magnética. (c) Qual(is) o(s) tipo(s) de magnetismo você sugeriria estar(em) sendo exibido(s) por esse material? Por quê?

Solução:

Dados: $B = 0,435 \text{ T}$
 $H = 3,44 \times 10^5 \text{ A/m}$

$$\mu = ?$$

$$\chi = ?$$

Tipos de materiais possíveis.

$$(a) \quad B = \mu H \implies \mu = \frac{B}{H}$$

$$\mu = \frac{0,435}{3,44 \times 10^5} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$$

$$\mu = 0,13 \times 10^{-5} \text{ T} \cdot \text{m/A}$$

(b) $\mu \equiv \mu_0 (1 + \chi)$

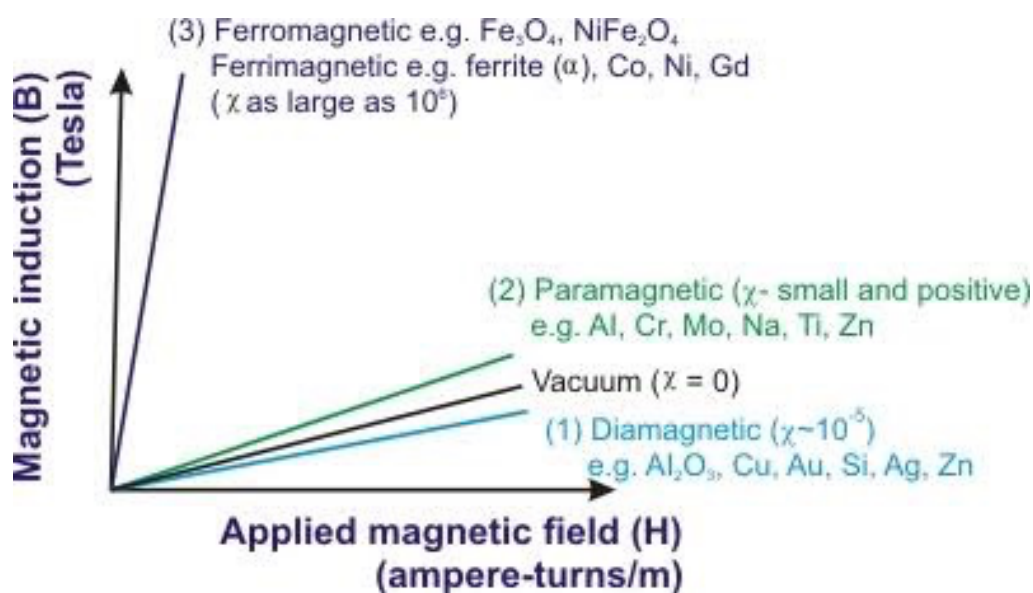
$$\chi = \frac{\mu}{\mu_0} - 1$$

$$\chi = \frac{0,13 \times 10^{-5}}{1,257 \times 10^{-6}} - 1$$

$$\chi = 1,00599 - 1$$

$$\chi = 5,99 \times 10^{-3}$$

(d)



Um valor positivo pequeno é característica de materiais paramagnéticos. Contudo, como todos os materiais são diamagnéticos, o pequeno valor positivo para μ deve resultar da soma de duas componentes $\Rightarrow$ Paramagnético + diamagnético. A contribuição paramagnética é maior pois $\chi_{\text{diamag}} < 0$.