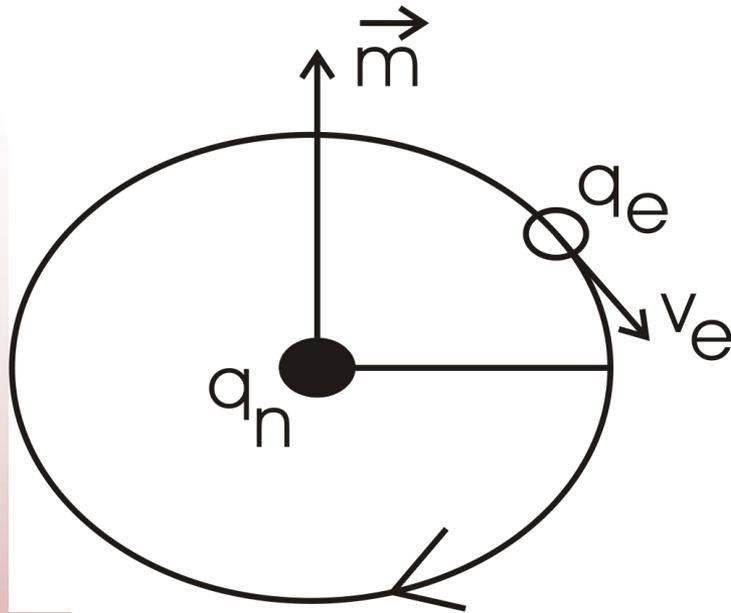


MAGNETISMO

Propriedade magnética dos materiais



v_e – é a velocidade do elétron;

q_e – é a carga do elétron;

q_n – é a carga do núcleo.

- O elétron em sua órbita em torno do núcleo representa uma corrente e, como uma espira onde circula uma corrente, apresenta momento magnético \mathbf{m} , perpendicular ao plano da sua órbita.
- O momento magnético do elétron no seu nível de energia mais baixo, é representado pelo magneton de Bohr (m_b), o qual é dado por:

$$m_b = (h/4\pi) q_e/m_e = 9,27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$$

h – é a constante de Plank;

m_e – é a massa do elétron.

Propriedade magnética dos materiais

- Além do movimento orbital, o elétron executa um movimento de rotação em torno de um eixo, o qual é chamado de 'spin'. Este movimento também está associado a um momento magnético.
 - $s = \frac{1}{2}$;
 - $s = -\frac{1}{2}$

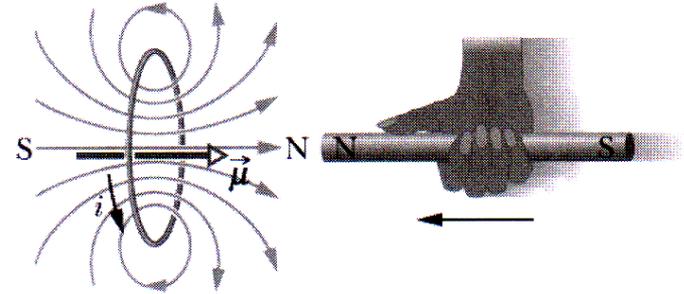
Propriedade magnética dos materiais

- Podemos distinguir três tipos de comportamento magnético nos materiais:
- **Diamagnetismo;**
- **Paramagnetismo;**
- **Ferromagnetismo.**
- Estes comportamentos estão associados aos movimentos orbitais (diamagnetismo) e de spin (paramagnético e ferromagnético) dos elétrons.

DIAMAGNETISMO

- O **diamagnetismo** está associado ao movimento orbital dos elétrons.
- Quando um elétron é submetido a um campo magnético ele precessiona em torno da direção do campo – precessão de Larmor
- Isto cria uma componente de rotação adicional à órbita do elétron. O sentido de rotação tende a ser oposta ao movimento de rotação orbital do elétron.

DIAMAGNETISMO

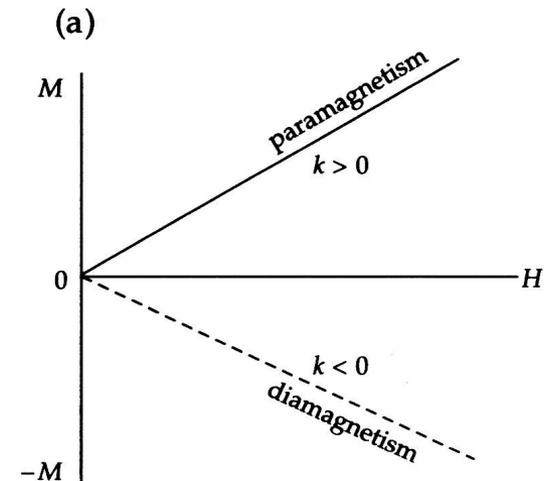


- **Lei de Lenz**

- Quando uma barra de ímã é aproximada de uma espira de corrente, surge uma corrente na espira, a qual cria um campo magnético que se opõe ao campo indutor do ímã.
- Do mesmo modo, quando aplicamos um campo magnético H a um elétron em sua órbita em torno do núcleo, a órbita do elétron é perturbada de modo a criar um campo que se opõe ao campo indutor.
- Surge então, uma fraca magnetização que é oposta e proporcional ao campo aplicado.

Propriedades dos materiais diamagnéticos

- A suscetibilidade magnética dos materiais diamagnéticos é baixa e negativa.
- Todos os materiais apresentam reação diamagnética quando submetidos a um campo magnético.
- Entretanto, este efeito é mascarado pelos efeitos mais fortes do **paramagnetismo** e **ferromagnetismo**.
- A magnetização desaparece quando o campo é retirado.



DIAMAGNETISMO

- Exemplos de minerais diamagnéticos:
- Quartzo (SiO_4)
- Calcita (CaCO_3)
- Halita (NaCl)
- Silvita (KCl)
- Grafite (C)
- Gipsita ($\text{Ca}[\text{SO}_4]_2\text{H}_2\text{O}$)
- Zircão [ZnSiO_4]

DIAMAGNETISMO

- Outros minerais são:
- Mercúrio, prata, bismuto, álcool etílico, cobre, dióxido de carbono, água, nitrogênio.
- A suscetibilidade diamagnética é adimensional, independe da temperatura e apresenta valores baixos:
 - (SI) $\sim 10^{-6}$

Propriedade magnética dos materiais

- Antes de vermos o paramagnetismo e o ferromagnetismo, vamos ver um pouco sobre a estrutura atômica dos elétrons.
- A mecânica quântica nos diz que os elétrons têm determinados níveis quantizados de energia.
- O momento angular é um número inteiro (n) de $h/2\pi$
h - constante de Plank
($h=6,62607004 \times 10^{-34} \text{ m}^2\text{kg/s}$)

Equações de onda propostas por Schrödinger

- $\Psi_{l,m,n}(r, \theta, \phi) = A_{l,m,n} P_l^m(\cos \theta) \cos, \text{sen}(m, \phi) f_n(r)$
- $A_{l,m,n}$ - amplitudes de probabilidade;
- $P_l^m(\cos \theta)$ – polinômios de Legendre;
- $\cos, \text{sen}(m, \phi)$ – funções que variam com ϕ ;
- $f_n(r)$ – função da distância até o centro.

Propriedade magnética dos materiais

- l, m, n, s – são os números quânticos e determinam o estado de energia do elétron.
- n – nível de energia – especifica a camada:
 - $(n = 1, 2, 3, \dots)$
 - $(n = K, L, M, \dots)$
- l – especifica o momento angular do elétron:
 - $0 \leq l \leq n-1$
 - $(l = 0, 1, 2, 3, \dots)$
 - $(l = s, p, d, f, \dots)$

Propriedade magnética dos materiais

- m – especifica a componente do momento angular orbital na direção de um campo aplicado
- $(-l \leq m \leq l)$;
- Temos, portanto, $2l+1$ valores de m
- s – é o momento angular de spin ($s = \pm \frac{1}{2}$)
- Spin para cima $s = +\frac{1}{2}$
- Spin para baixo $s = -\frac{1}{2}$
- $l = s$ ($l = 0$); $2l + 1 = 1$ (valores de m); $2 \times 1 = 2$ elétrons;
- $l = p$ ($l = 1$); $2l + 1 = 3$ (valores de m); $2 \times 3 = 6$ elétrons
- $l = d$ ($l = 2$); $2l + 1 = 5$ (valores de m); $2 \times 5 = 10$ elétrons
- $l = f$ ($l = 3$); $2l + 1 = 7$ (valores de m); $2 \times 7 = 14$ elétrons

Propriedade magnética dos materiais

- As órbitas dos elétrons são caracterizadas por estados de energia e, nos elementos, elas são preenchidas de acordo com três regras:
- 1- dois elétrons não podem ter o mesmo conjunto de números quânticos.
 - **Princípio de exclusão de Pauli.**
- Se dois elétrons apresentam os três primeiros números quânticos (n, l, m) iguais, os momentos angulares de spin associados à estes elétrons devem ser de sinais opostos: $s = +1/2$ e $s = -1/2$

Propriedade magnética dos materiais

1s

2s, 2p

3s, 3p, 3d

4s, 4p, 4d, 4f

5s, 5p, 5d, 5f, 5g

6s, 6p, 6d, ...

7s, 7p, ...

Regra 2

As órbitas são preenchidas de acordo com o aumento de energia:

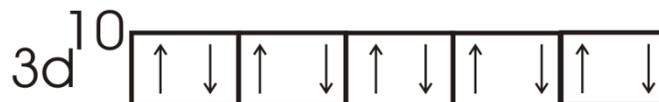
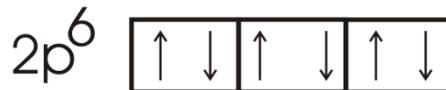
$n = 1$; $1s^2$ s ($l = 0$); $m = 2l + 1 = 1$; 2 elétrons

$n = 2$; $2s^2, 2p^6$

$n = 3$; $3s^2, 3p^6, 3d^{10}$

...

Configuração do $\text{Fe}^{26} - 1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 4s^2, 3d^6$



Propriedade magnética dos materiais

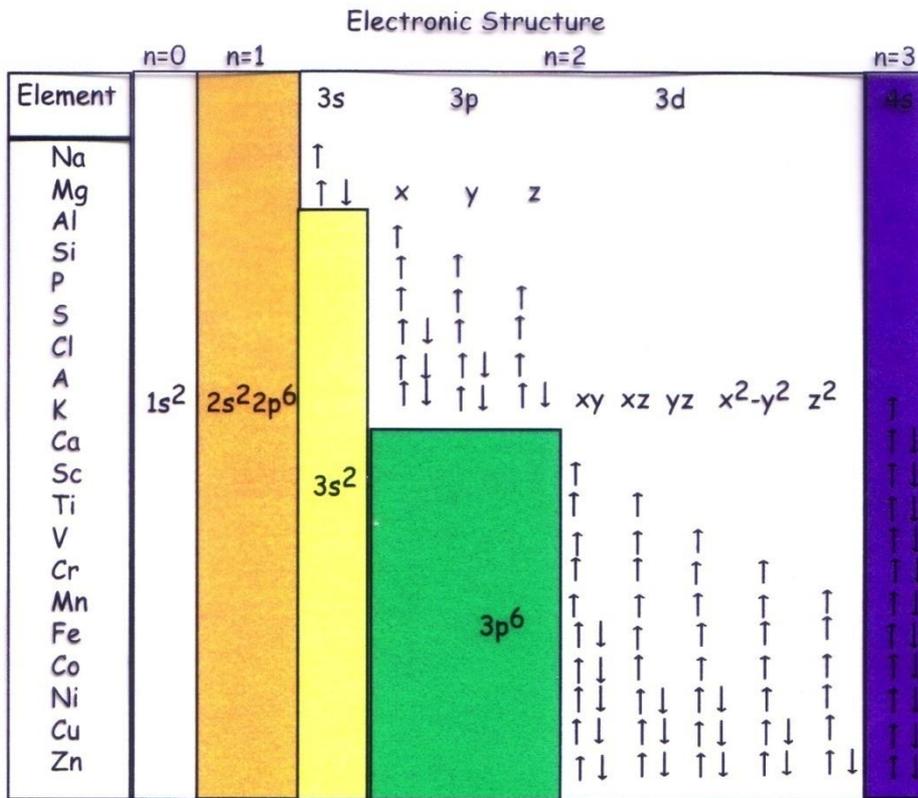


Figure 3.4: The electronic structure of the elements from Na to Zn.

- 3- Regra de Hund $Fe^{26} - 1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 4s^2, 3d^6$
- Os elétrons devem ser preenchidos de tal modo que os spins sejam tão paralelos quanto possível.

Propriedade magnética dos materiais

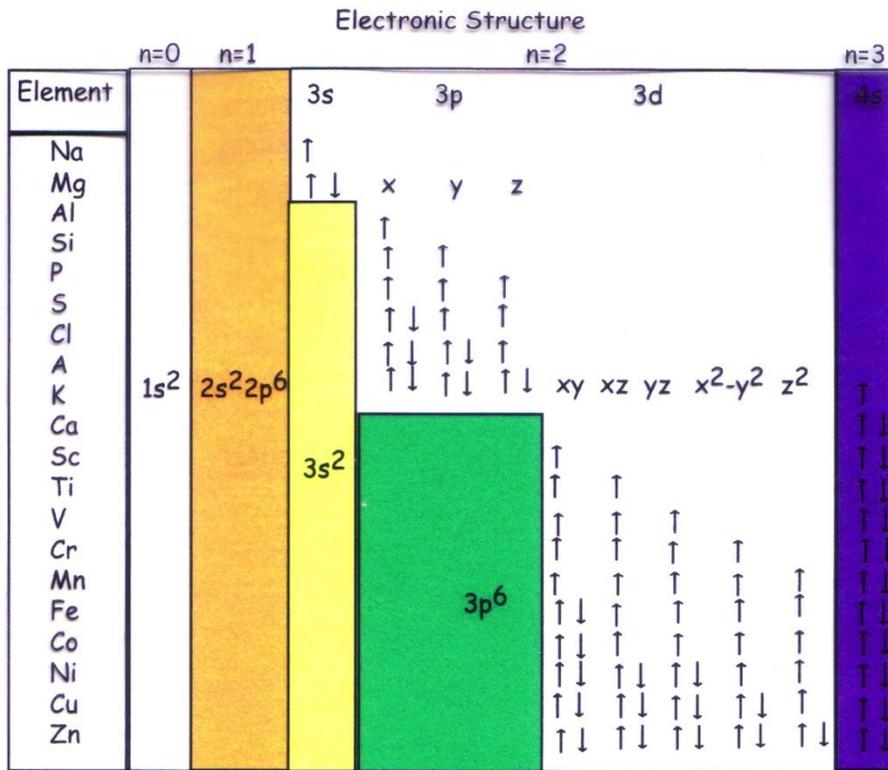


Figure 3.4: The electronic structure of the elements from Na to Zn.

- Os elementos de transição são caracterizados pelas camadas 3d não preenchidas.
- Spins não emparelhados produzem momento magnético resultante e dão origem aos efeitos do **paramagnetismo e ferromagnetismo**.

Paramagnetismo

- A **energia térmica** sempre se opõe ao alinhamento dos spins, de modo que, ela favorece uma orientação caótica dos momentos magnéticos dos spins.
- No caso dos materiais paramagnéticos, a energia magnética é pequena comparada com a energia térmica, de modo que, na ausência de campo magnético externo, os momentos magnéticos são orientados ao acaso.

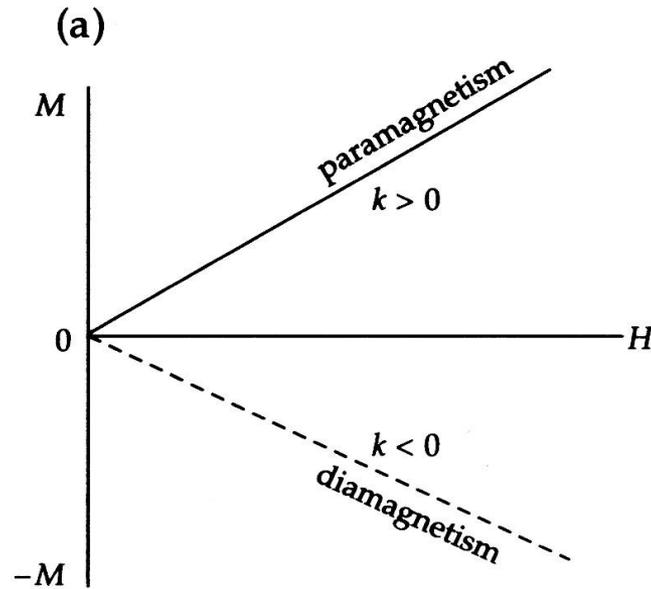
Paramagnetismo

- Quando se aplica um campo magnético **H** nestes materiais, há uma tendência destes spins se orientarem na direção do campo. Surge uma magnetização induzida (M_I) na direção do campo aplicado:

- $M_I = \chi_p \cdot H$

- χ_p é a suscetibilidade paramagnética

Paramagnetismo



- A suscetibilidade paramagnética é baixa e positiva, sendo proporcional ao campo aplicado.

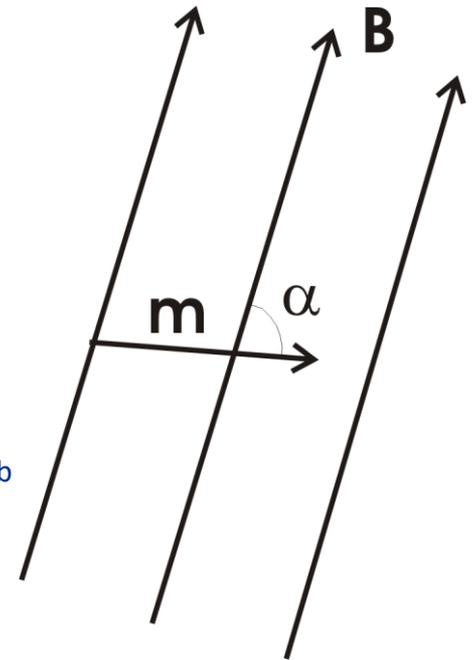
Paramagnetismo

- Um modelo para o paramagnetismo foi apresentado por P. Langevin (1905).
Premissas:

- 1- cada spin não emparelhado contribui com um momento de dipolo;
- 2- Na ausência de um campo aplicado, os momentos magnéticos estão orientados ao acaso;
- 3- Um campo magnético aplicado age no sentido de criar um momento resultante;
- 4- Há uma competição entre a energia térmica (KT) e a energia magnética:

- $E_m = -\mu_0 \mathbf{m}_b \cdot \mathbf{H} = -\mu_0 m H \cos(\alpha)$

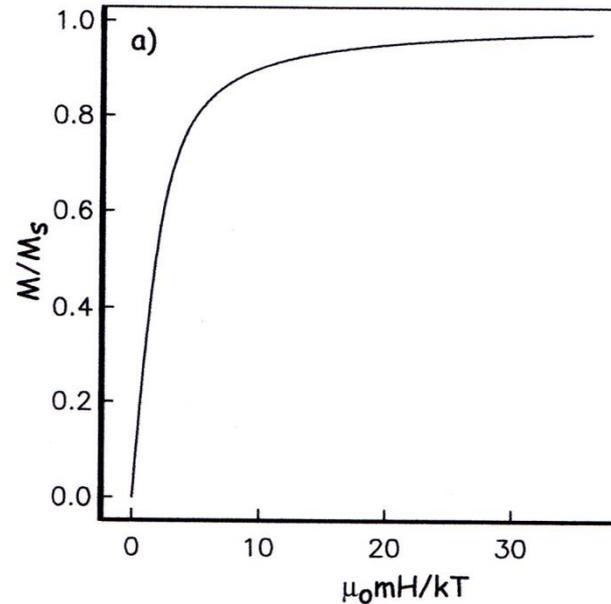
- α - é o ângulo entre o campo \mathbf{H} e o momento magnético \mathbf{m}_b
- K – constante de Boltzman



Equação de Langevin

- Com base nestas premissas e utilizando a mecânica estatística, chega-se à equação de Langevin para o paramagnetismo:
 - $M/M_s = [\text{cotgh}(a) - 1/a] = L(a)$;
- M é a magnetização adquirida pelo campo H ;
- M_s – é a magnetização de saturação (todos os momentos estão alinhados na direção do campo);
 - $a = m_b \mu_0 H / KT$

Paramagnetismo



A magnetização se aproxima da saturação quando $m_b \mu_0 H$ (energia magnética) é aproximadamente 10-20 vezes KT (energia térmica). Campos da ordem de 100 T são necessários para saturar materiais paramagnéticos.

Quando $KT \gg m_b \mu_0 H$, $L(a)$ é aproximadamente linear

$$\text{Cotgh}(a) = 1/a + a/3 + a^3/45 + \dots$$

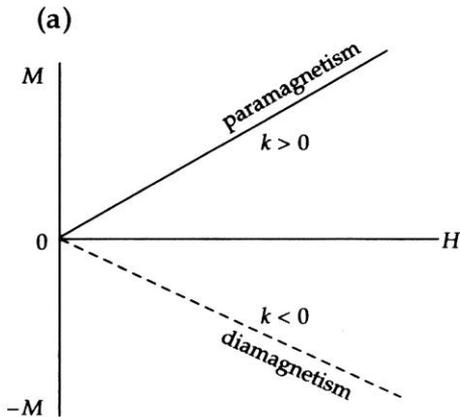
$$M/M_s = \text{cotgh}(a) - 1/a = 1/a + a/3 - 1/a = a/3$$

$$M/M_s = m_b \mu_0 H / 3KT$$

Paramagnetismo

- $M/M_s = \mu_0 m_b H / 3KT$
- $M/H = \mu_0 m_b M_s / 3KT$
 - $M_s = N m_b / V$
- (N é o número total de momentos magnéticos em um volume V do material)
 - $M/H = \mu_0 m_b N m_b / V 3 K T$
 - $M/H = (\mu_0 N m_b^2 / 3 K V) (1/T) = \chi_p$

Paramagnetismo



$$M/H = (\mu_0 N m_b^2 / 3 K V)(1 / T) = \chi_p$$

- $\chi_p = C / T$

- $C = \mu_0 N m_b^2 / 3 K V$

Lei de Curie para o paramagnetismo.

- $(1 / \chi_p) = T / C$

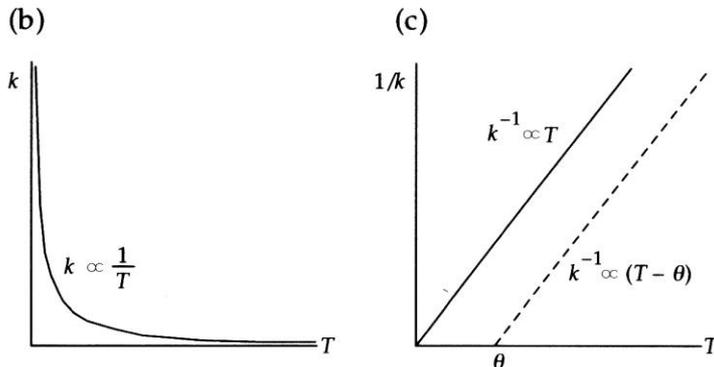


Fig. 5.9 (a) Variations of magnetization \mathbf{M} with applied magnetic field \mathbf{H} in paramagnetic and diamagnetic materials; (b) the variation of paramagnetic susceptibility with temperature, and (c) the linear plot of the inverse of paramagnetic susceptibility against temperature.

Paramagnetismo

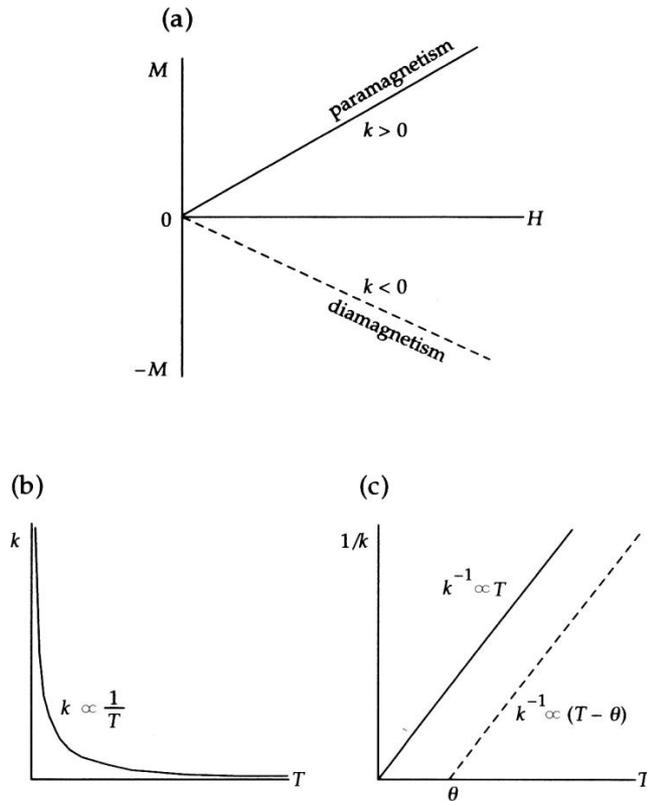


Fig. 5.9 (a) Variations of magnetization M with applied magnetic field H in paramagnetic and diamagnetic materials; (b) the variation of paramagnetic susceptibility with temperature, and (c) the linear plot of the inverse of paramagnetic susceptibility against temperature.

Em alguns materiais, a interação entre os íons é muito forte, de modo que, o material só se torna paramagnético acima de uma temperatura θ , quando a energia térmica supera a energia magnética.

θ é a **temperatura de Curie paramagnética** ou **constante de Weiss** e representa a temperatura acima da qual o material se torna paramagnético.

Muitos materiais são paramagnéticos à temperatura ambiente.

Paramagnetismo

- Exemplos de minerais paramagnéticos:
- Ilmenita – FeTiO_3
- Siderita – FeCO_3
- Rutilo – TiO_2
- Dolomita – $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
- Clorita – silicato de Fe, Mg, Al;
- Piroxênio – Mg, Ca, Fe
- Olivina – $(\text{MgFe})_2\text{SiO}_4$

Paramagnetismo

- Quando o campo externo é retirado, a agitação térmica faz com que os momentos magnéticos passem a ter direções aleatórias. Isto é, a magnetização do material volta a ser zero.

Ferromagnetismo

- Nos materiais paramagnéticos e diamagnéticos, as interações entre momentos magnéticos atômicos individuais são pequenas.
- Entretanto, em alguns minerais, os átomos ocupam posições próximas o suficiente para permitir uma forte interação de troca entre os átomos vizinhos – chamada de energia de troca.
- Esta interação de troca produz um forte campo molecular dentro do material, o qual alinha os momentos magnéticos atômicos e produz uma magnetização espontânea (M_s).
- Estes materiais são chamados de '**Ferromagnéticos**' e interagem fortemente com campos magnéticos externos.

Ferromagnetismo

- Foi Weiss quem introduziu o conceito de campo molecular (H_W).
- Na sua teoria:
 - $H_W = \beta M$
- β é uma constante de proporcionalidade.
- O campo total (H_T) será:
 - $H_T = H + H_W$
- Onde H é o campo externo

Temperatura de Curie

- É a temperatura acima da qual, os minerais perdem as propriedades ferromagnéticas e passam a se comportar como paramagnéticos.

Ferromagnetismo

- Para $T > T_C$
- $M / H = \chi_f = C / (T - T_C)$
- χ_f - é a suscetibilidade ferromagnética acima da temperatura de Curie.
- A expressão acima é conhecida como **lei de Curie-Weiss** e governa a suscetibilidade ferromagnética acima de T_C

Ferromagnetismo

- $T < T_c$
- Predomínio do campo molecular
 - $M / M_s = L [(T_c / T) (M / M_s)]$
 - $T_c = \mu_0 N m_b^2 \beta / V K$

Ferromagnetismo

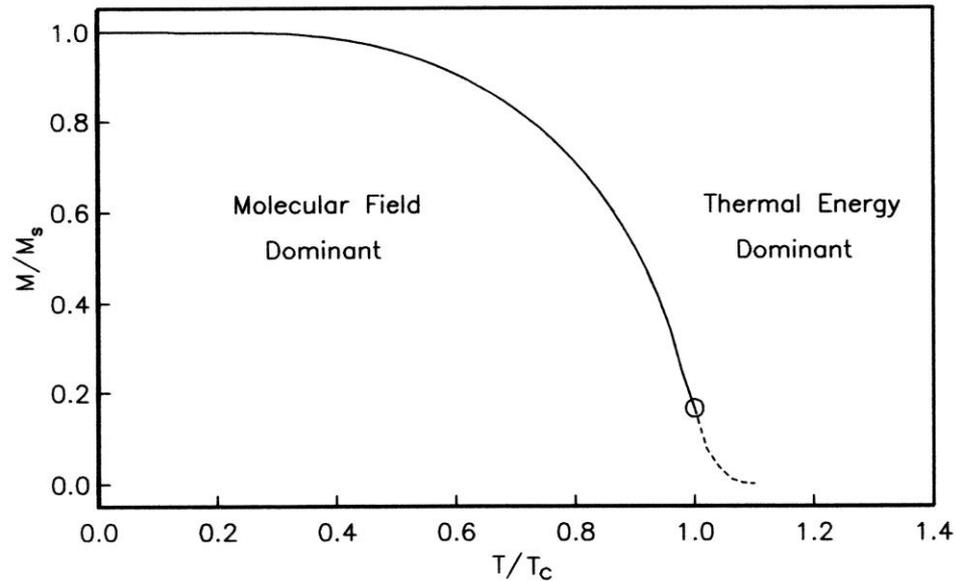


Figure 3.7: Behavior of magnetization versus temperature of a ferromagnetic substance.

Abaixo de T_C , as interações de troca são fortes e a magnetização é governada pela equação:

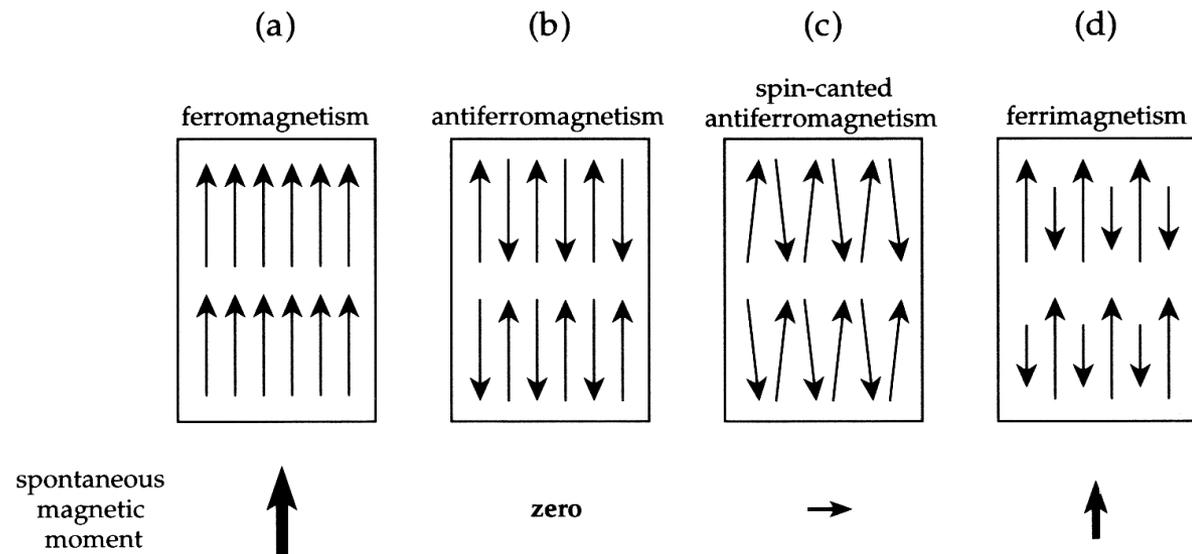
$$M / M_s = L [(T_C / T) (M / M_s)]$$

Para temperaturas acima de T_C , a energia térmica é dominante e magnetização é dominada pela **lei de Curie-Weiss**:

$$M / H = \chi_f = C / (T - T_C)$$

Ferromagnetismo

Fig. 5.10 Schematic representations of the alignments of atomic magnetic moments in (a) ferromagnetism, (b) antiferromagnetism, (c) spin-canted antiferromagnetism, and (d) ferrimagnetism.



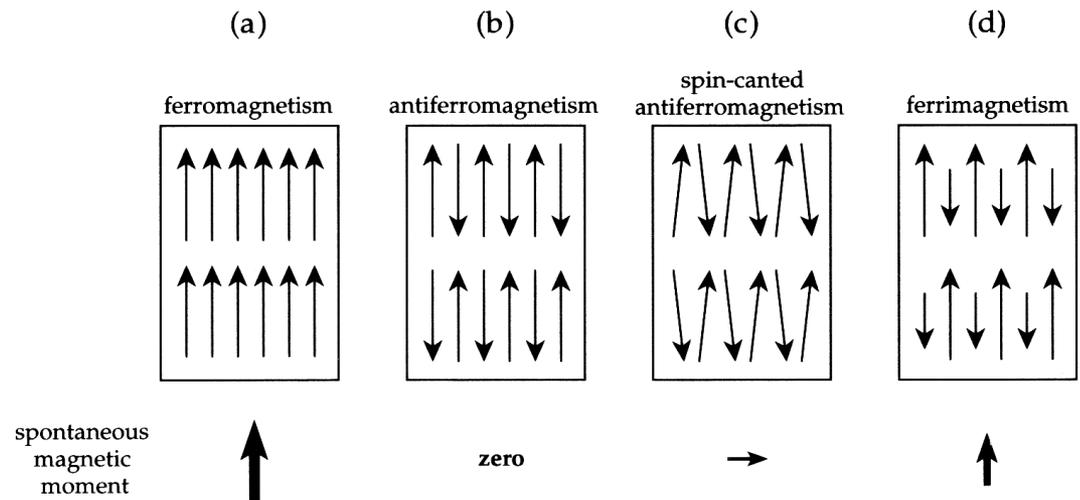
- Nos materiais ferromagnéticos, a interação de troca faz com que os momentos magnéticos se alinhem paralelamente no mesmo sentido (Fe).
- Exemplos são compostos e ligas como o CrO_2 , que é o componente básico da fita magnética
- Não existem minerais ferromagnéticos na natureza.

Ferromagnetismo

- Quando um material magnético é aquecido, sua magnetização espontânea desaparece na temperatura de Curie T_C .
- No caso do Ferro, $T_C = 770^\circ\text{C}$

Antiferromagnetismo

Fig. 5.10 Schematic representations of the alignments of atomic magnetic moments in (a) ferromagnetism, (b) antiferromagnetism, (c) spin-canted antiferromagnetism, and (d) ferrimagnetism.



Em certos óxidos de ferro, a interação entre os íons de ferro é anti-paralela, sendo que os momentos magnéticos são iguais e opostos, produzindo uma magnetização total nula.

Como resultado, a suscetibilidade magnética de um cristal **antiferromagnético** é baixa e positiva.

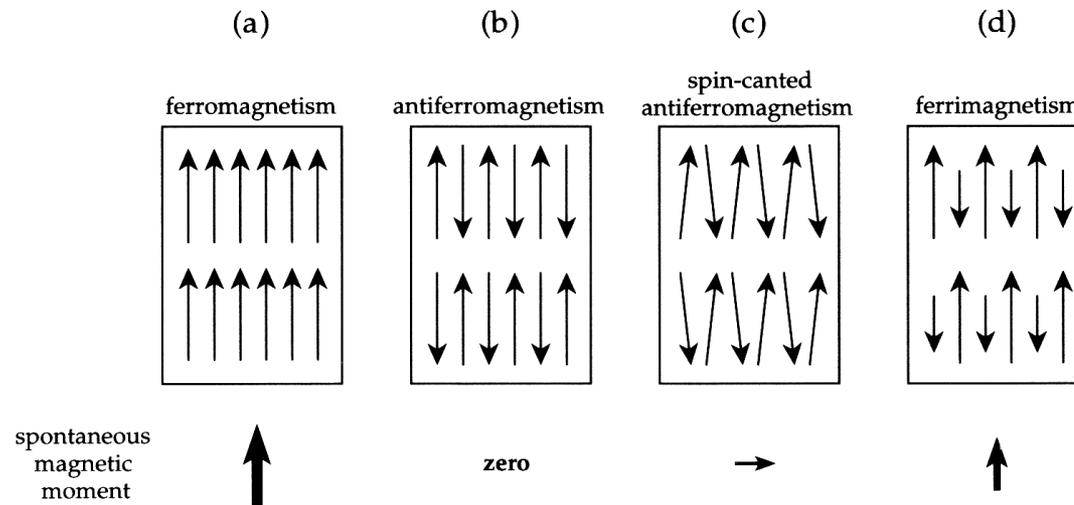
Como no caso dos materiais ferromagnéticos, os antiferromagnéticos perdem suas propriedades antiferromagnéticas a uma determinada temperatura denominada **Temperatura de Néel – T_N**

Exemplo: ilmenita (FeTiO_3) – $T_N = 50 \text{ K}$.

Ferromagnetismo parasítico

Spin-canted antiferromagnetism

Fig. 5.10 Schematic representations of the alignments of atomic magnetic moments in (a) ferromagnetism, (b) antiferromagnetism, (c) spin-canted antiferromagnetism, and (d) ferrimagnetism.



Quando um cristal antiferromagnético contém defeitos, lacunas ou impurezas, alguns spins antiparalelos formam-se desprovidos de seus pares. Uma fraca magnetização pode resultar destas imperfeições.

Outro efeito ocorre quando os spins não são exatamente antiparalelos, mas estão ligeiramente inclinados e, novamente, uma magnetização resultante pode ser produzida.

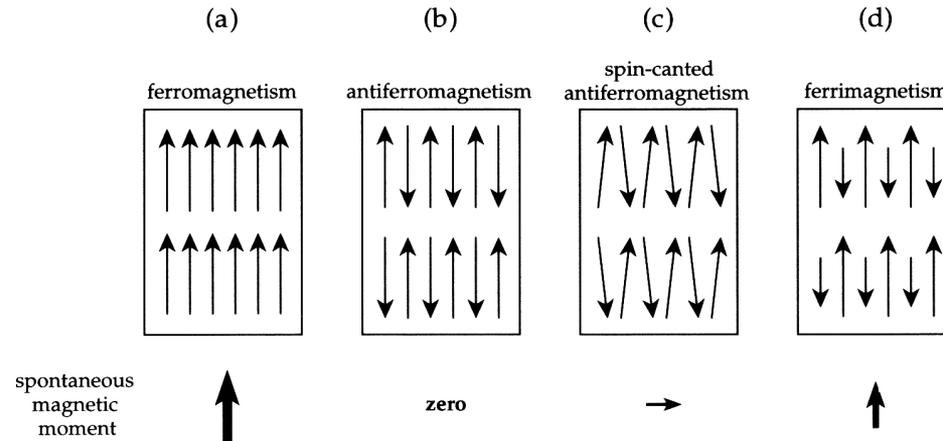
Materiais que exibem este tipo de ferromagnetismo parasítico apresenta características típicas de um material ferromagnético, incluindo histerese, magnetização espontânea e temperatura de Curie.

Ferromagnetismo parasítico

- Exemplo: **hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)**. Neste mineral, tanto a inclinação dos spins, como defeitos na rede cristalina, contribuem para as propriedades ferromagnéticas.
- A hematita apresenta uma magnetização espontânea fraca e variável, de cerca de 2.200 A/m, coercividades muito altas e $T_c = 675 \text{ }^\circ\text{C}$.
- As variações nas propriedades magnéticas da hematita decorrem da importância relativa entre defeitos e momentos magnéticos inclinados.

Ferrimagnetismo

Fig. 5.10 Schematic representations of the alignments of atomic magnetic moments in (a) ferromagnetism, (b) antiferromagnetism, (c) spin-canted antiferromagnetism, and (d) ferrimagnetism.



Quando o processo de interação envolve momentos magnéticos anti-paralelos e desiguais na rede cristalina. Neste caso, resulta uma magnetização espontânea na direção do momento magnético de maior intensidade (figura d).

Acima de uma determinada temperatura, o material **ferrimagnético** se torna paramagnético. Esta temperatura é chamada de temperatura de Néel, ou muito frequentemente, temperatura de Curie (T_C).

O mineral ferrimagnético mais importante é a magnetita (Fe_3O_4). $T_C = 580^\circ\text{C}$.

Pirrotita na composição Fe_7S_8 também é um mineral ferrimagnético. $T_C = 320^\circ\text{C}$.

Histerese

Materiais diamagnéticos e paramagnéticos:

- reta que passa pela origem

Materiais ferromagnéticos:

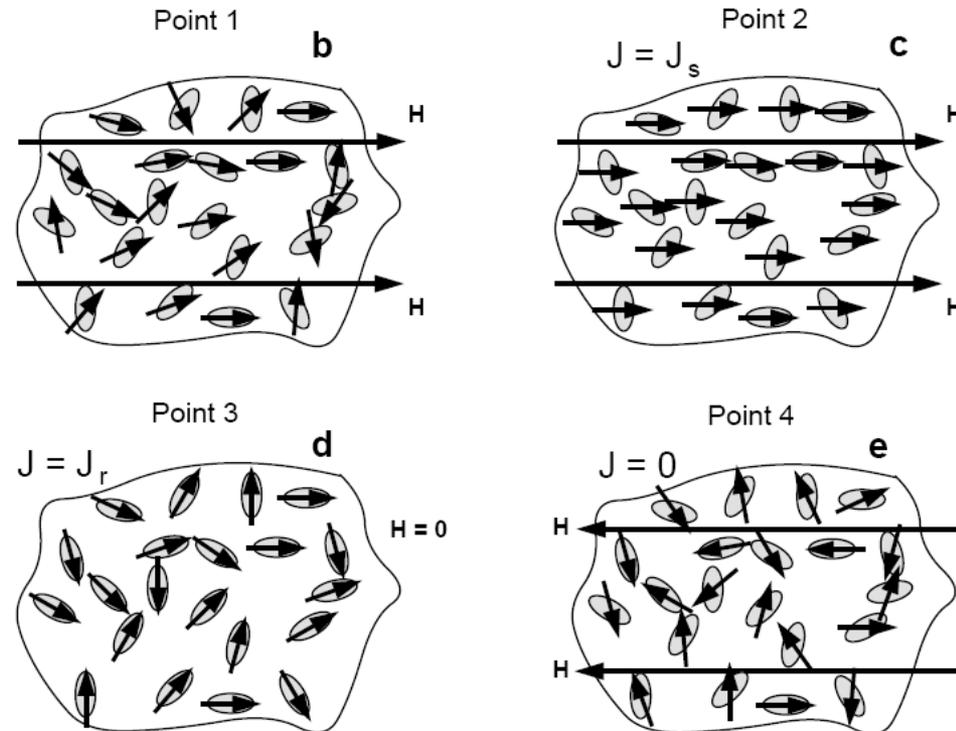
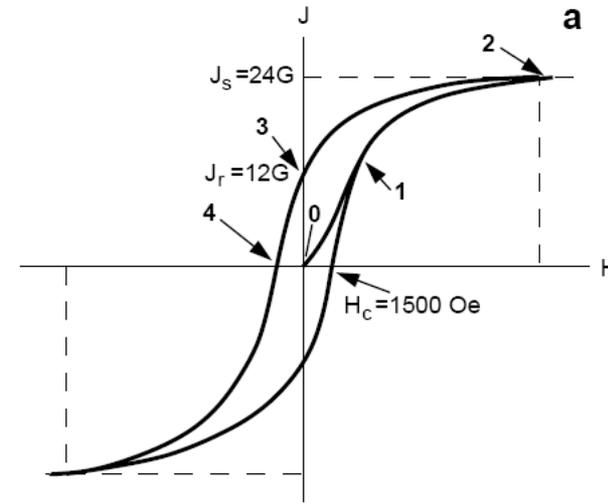
Ponto 0 (estado inicial):
momentos aleatórios na
ausência de campo aplicado

Ponto 1: início do ciclo de
histerese, alinhamento de
parte dos momentos
magnéticos

Ponto 2: magnetização de
magnetização (M_s)

Ponto 3: magnetização
remanescente de saturação
(M_r)

Ponto 4: campo coercivo (H_c)



Histerese

Todo material ferromagnético apresenta histerese. Quando um campo magnético é aplicado a um material ferromagnético com magnetização inicial nula, ele adquire uma magnetização remanente quando o campo é retirado.

A coercividade, como a temperatura de Curie, é uma característica de cada mineral magnético.

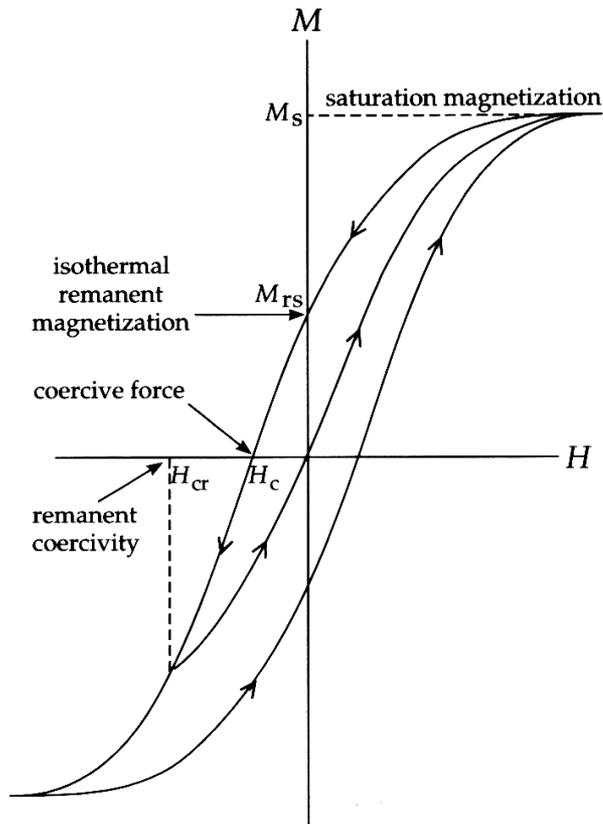
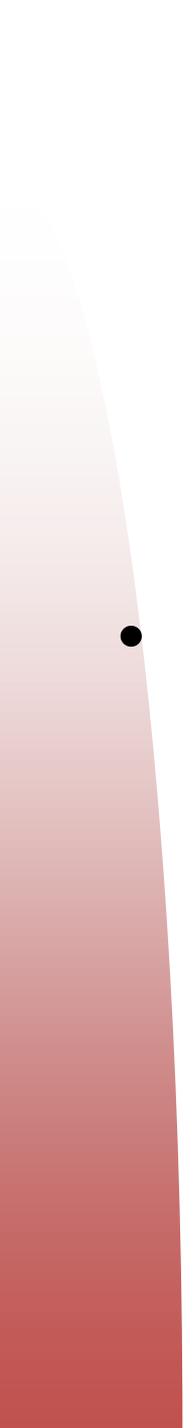


Fig. 5.11 The magnetization loop of an arbitrary ferromagnetic material.

J_s – magnetização de saturação; J_{rs} – magnetização remanente de saturação;

H_c – coercividade; H_{cr} – Coercividade de remanência;



FIM