



**UNCUYO**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE CUYO



**FACULTAD  
DE INGENIERÍA**

# “PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE MATERIALES”

**MATERIALES**

**Prof. Titular: Dra. Ing. María J. Santillán**

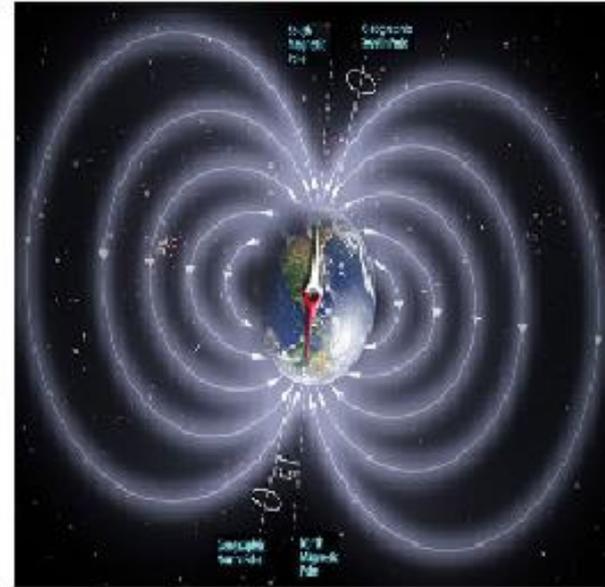
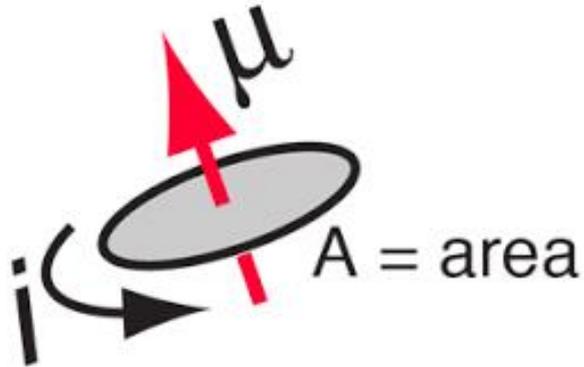
**Prof. Adjunto: Dr. Ing. Claudio Careglio**

# Campo Magnético terrestre

Recordando...

Es un fenómeno natural originado por los movimientos de metales líquidos en el núcleo del planeta

## DIPOLO MAGNÉTICO



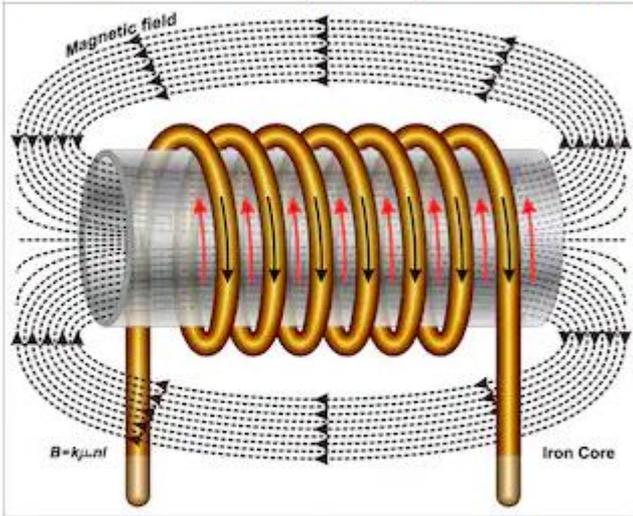
Los dipolos magnéticos se orientan según las líneas de campo. Las cargas e- viajan a lo largo de ellas

La dirección del campo magnético es aquella en la cual ha de moverse una carga para que el campo no ejerza fuerza alguna sobre ella.

# Campo Magnético producido por un hilo conductor

Recordando...

Solenoide o bobina de hilo de Cu enrollada de n espiras y de longitud l



Intensidad de Campo magnético

$$H = 0,4 \pi \cdot n \cdot i / l$$

DENSIDAD DE FLUJO MAGNETICO O INDUCCIÓN MAGNÉTICA

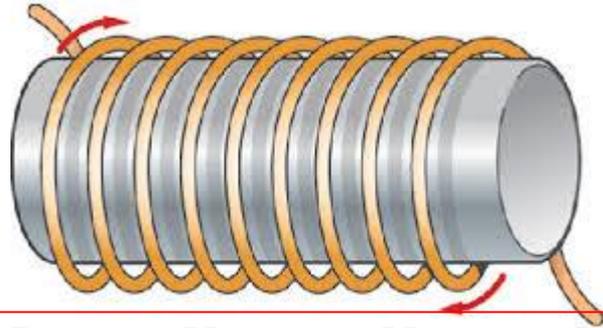
$$B = \mu \cdot H$$

$\mu$  ==> Permeabilidad Magnética

El campo H produce líneas de fuerza  
La densidad de estas líneas

$$\frac{F}{q \cdot v \cdot \sin \varphi} = \text{cte}'' = B = |\vec{B}|$$

# Barra de hierro dentro de un solenoide = ELECTROIMÁN



$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \cdot H + \mu_0 \cdot M$$

Campo externo      Campo inducido

La magnetización aparece cuando se aplica B a un cuerpo  
 Densidad de momentos dipolares magnéticos

$$\vec{M} = \frac{d\vec{\mu}}{dV}$$

$$B = \mu_0 \frac{N i}{l}$$

N: número total de espiras  
 l: longitud del solenoide  
 i: intensidad de corriente.

## Unidades de magnitudes magnéticas

Magnitud magnética	Unidades de SI	Unidades CGS
B (inducción magnética)	Weber/metro <sup>2</sup> (Wb/m <sup>2</sup> ) o tesla (T)	Gauss (G)
H (campo aplicado)	Amperio/metro (A/m)	Oersted (Oe)
M (imanación)	Amperio/metro (A/m)	

# Campo magnético producido por Materiales

## Susceptibilidad Magnética $\chi$

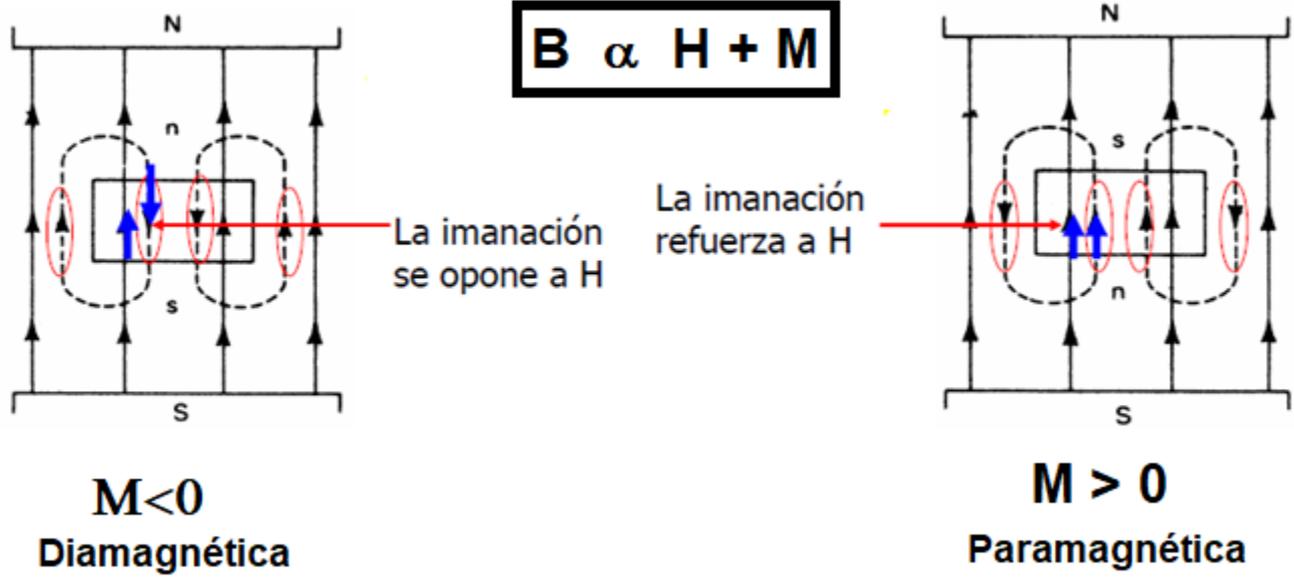
$\chi_v$  = Susceptibilidad magnética por unidad de volumen.

$$\chi_v = M/H$$

Sensibilidad a la magnetización

+ ó - negativo si la imanación de la muestra refuerza o si se opone al campo.

### Inducción magnética (B)

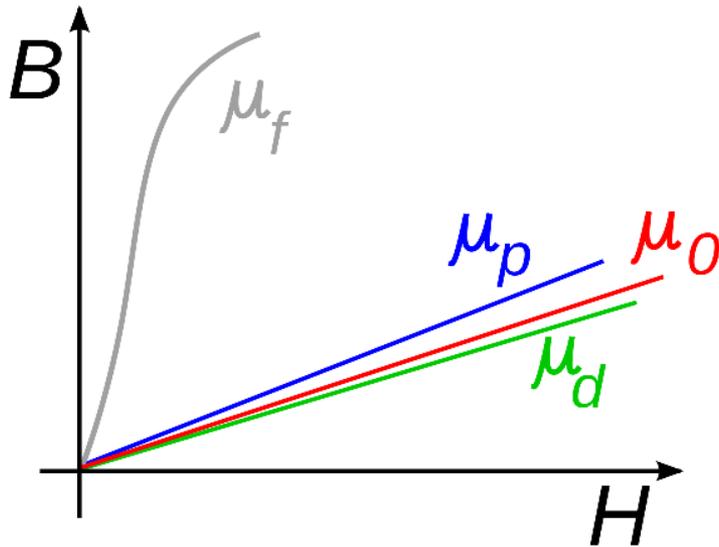


# Materiales Magnéticos

Se caracterizan por su permeabilidad:

$$\mu = B/H$$

Mide el incremento del campo magnético debido a la presencia de un material imantado



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

$$\mu_r = \mu/\mu_0(1 + X_m)$$

$\mu$  = permeabilidad magnética absoluta

$\mu_0$  = permeabilidad magnética del vacío

$X_m$  = susceptibilidad magnética del material

**Paramagnéticos o no magnéticos,  $\mu \sim 1$**   
Aire, Al, Pd

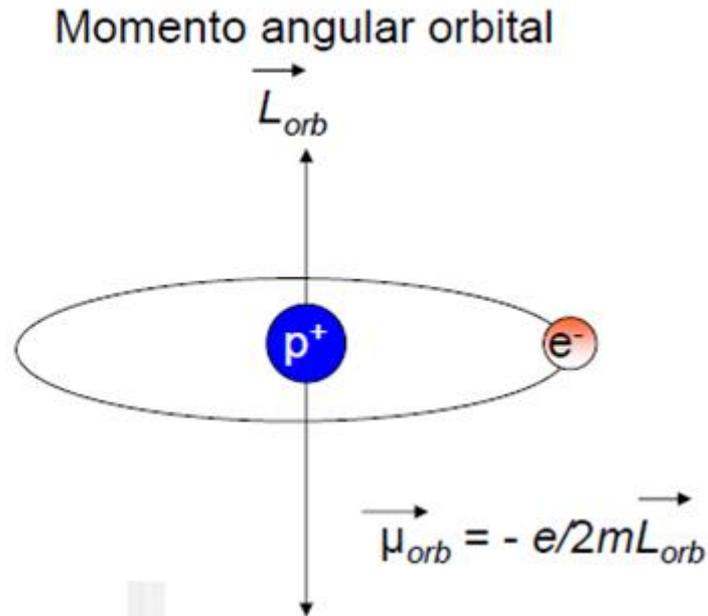
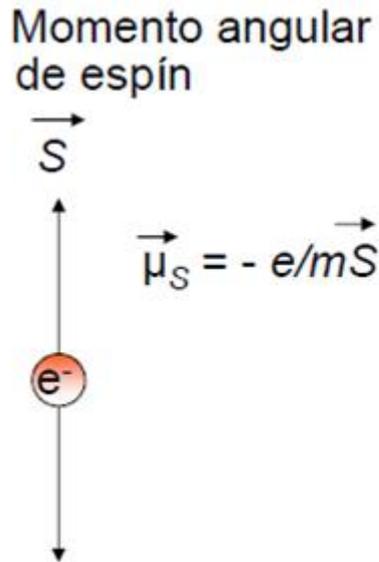
**Diamagnéticos o magnéticos débiles,  $\mu < 1$**   
Cu, He, Bi, Ag, Pb, agua

# Magnetismo en sólidos

Describe diferentes comportamientos de materiales sometidos a la acción de  $B$  externo.

Electrones  $\rightarrow$  propiedades magnéticas (es un imán)

$H \rightarrow$  interactúa con los  $e^-$  del material  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Momento angular orbital} \\ \text{Momento angular espín} \end{array} \right.$



# MOMENTOS MAGNÉTICOS ATÓMICOS

- Electrón girando en torno a un núcleo

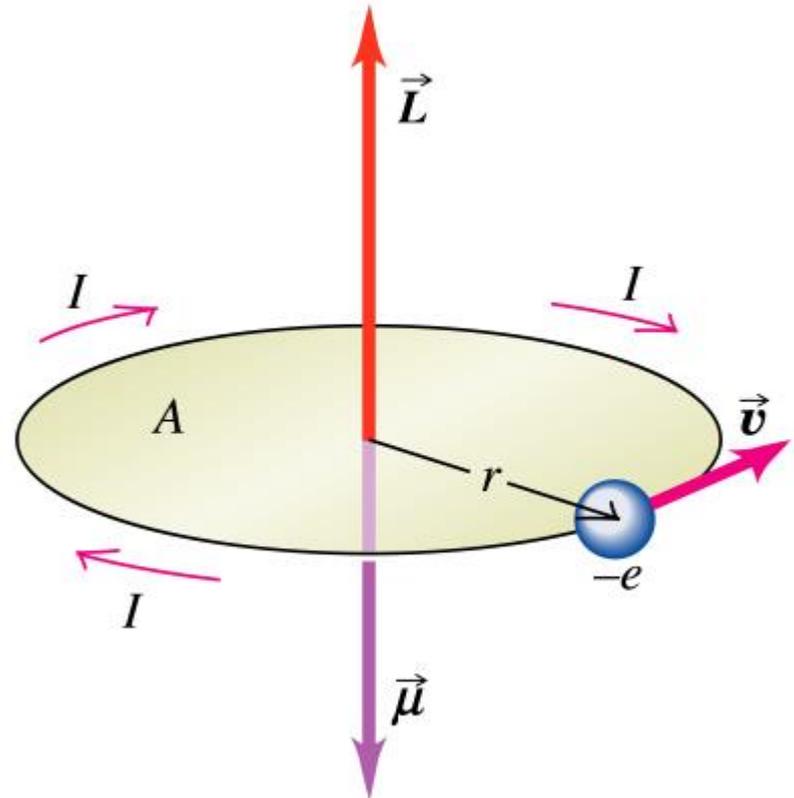
## Momento magnético

$$m = IA = -e v (\pi r^2) = \frac{-e \hbar L}{2m \hbar}$$

$$\vec{m} = -\mu_B \frac{\vec{L}}{\hbar}$$

Magnetón de Bohr

$$\mu_B = 9.27 \times 10^{-24} \text{ A m}^2$$



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Magnetón de Bohr: Unidad cuántica del momento magnético

- El electrón tiene además momento interno (spín)
- Momento magnético total

$$\vec{m} = -\mu_B \left( \frac{\vec{L}}{\hbar} + \gamma \frac{\vec{S}}{\hbar} \right)$$

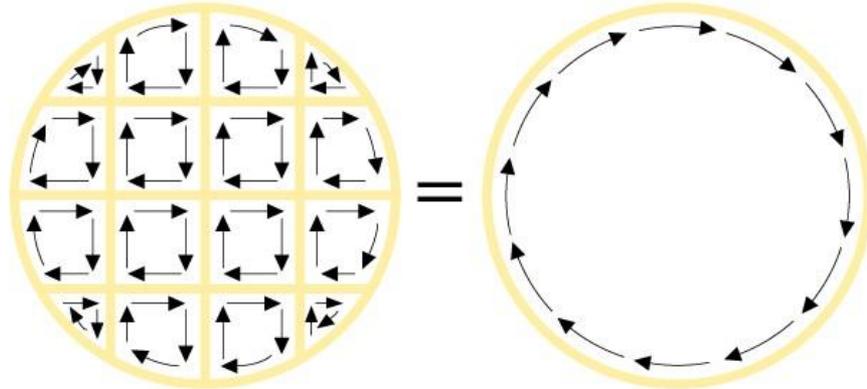
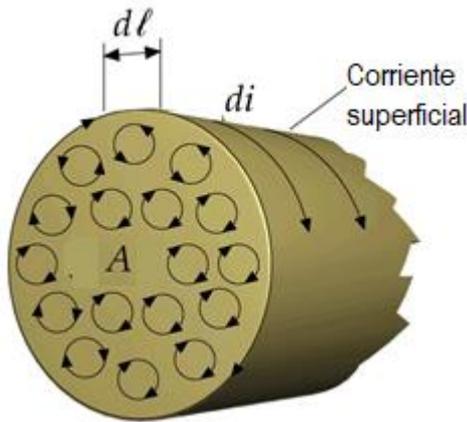
Factor giromagnético  $\gamma$  para  
e-: -2,0024

- **Átomos:**

- Crean campos magnéticos.
- Pueden tener momentos dipolares inducidos.
- Se orientan según el campo magnético.

# MAGNETIZACIÓN

- Cuando el material presenta momento magnético aparecen corrientes microscópicas.
- Se crea una corriente superficial de carga.



En el interior la corriente es nula!!!

**Magnetización:** Momento dipolar magnético por unidad de volumen.

$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dVol}$$

$$d\vec{m} = di \vec{A}$$

$$dVol = A dl$$

**Corriente / longitud**

$$M = \frac{di}{dl}$$

**Magnetización de saturación** → Todos los dipolos orientados

$$\vec{M}_s = n \vec{m}$$

**n** = moléculas/volumen

# CAMPO DE IMANTACIÓN y $\vec{H}$

- La magnetización en casi todos los materiales es proporcional al campo aplicado  $B_0$ .

$$\vec{B}_m = \mu_0 \vec{M}$$

- Si el material está imantado crea un campo de imantación
- El campo total resulta:

$$\vec{M} = \chi_m \frac{B_0}{\mu_0}$$

$$\vec{B}_T = B_0 + B_m$$

Excitación magnética (H)

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

$$\vec{B}_T = \mu_r \vec{B}_0$$

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

$$\vec{B}_m = \chi_m \vec{B}_0$$

# Tipos de Materiales Magnéticos

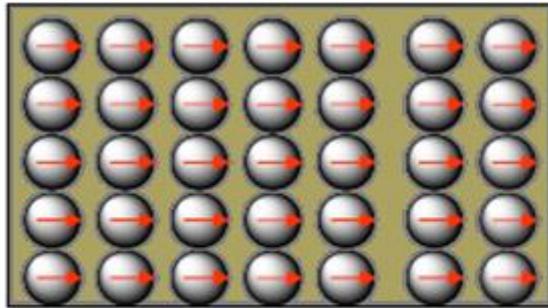
**Diamagnéticos**

**Paramagnéticos**

**Ferromagnéticos**

Depende del comportamiento de sus momentos magnéticos frente a un campo magnético externo

# DIAMAGNETISMO



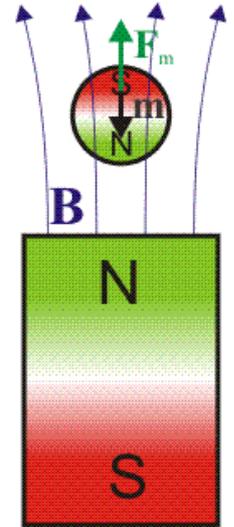
Material

H externo



$$\chi < 0$$

- Desequilibrio ligero de los electrones en movimiento
- Pequeños dipolos magnéticos en los átomos que se oponen al H aplicado.



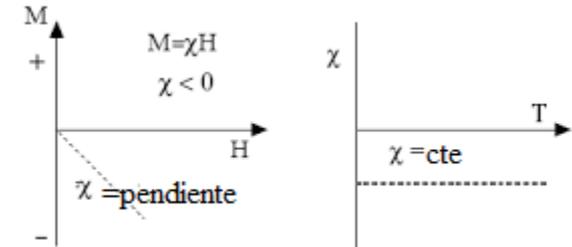
- Faraday (1846).
- El campo de magnetización es opuesto al aplicado ( $\chi_m < 0$ )
- Efecto presente en todos los materiales.
- Se observa en *materiales que no tienen momentos magnéticos permanentes*
- Las “espiras” atómicas crean corrientes magnéticas inducidas.

- Determinada por la movilidad de electrones.

- Mayor con el incremento en el número de electrones del átomo

En materiales con momento magnético permanente este efecto está enmascarado.  
 Los materiales **superconductores** son diamagnéticos perfectos  $\chi_m = -1$

$$\vec{B}_m = -\vec{B}_0 \Rightarrow \vec{B}_T = 0$$



- antiferromagnético
- ferromagnético
- diamagnético
- paramagnético

1																	18
1	2											13	14	15	16	17	18
H 1.008	He 4.003											B 10.81	C 12.01	N 14.01	O 16.00	F 18.99	Ne 20.18
3	4											13	14	15	16	17	18
Li 6.94	Be 9.012											Al 26.98	Si 28.09	P 30.97	S 32.06	Cl 35.45	Ar 39.95
11	12											13	14	15	16	17	18
Na 22.99	Mg 24.31											Al 26.98	Si 28.09	P 30.97	S 32.06	Cl 35.45	Ar 39.95
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K 39.10	Ca 40.08	Sc 44.96	Ti 47.88	V 50.94	Cr 51.99	Mn 54.94	Fe 55.85	Co 58.93	Ni 58.69	Cu 63.55	Zn 65.38	Ga 69.72	Ge 72.64	As 74.92	Se 78.96	Br 79.90	Kr 83.80
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb 85.47	Sr 87.62	Y 88.91	Zr 91.22	Nb 92.91	Mo 95.94	Tc 98.91	Ru 101.07	Rh 102.91	Pd 106.42	Ag 107.87	Cd 112.41	In 114.82	Sn 118.71	Sb 121.76	Te 127.6	I 126.90	Xe 131.29
55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs 132.91	Ba 137.33	Lantánidos	Hf 178.49	Ta 180.94	W 183.85	Re 186.21	Os 190.23	Pt 195.08	Au 196.97	Hg 200.59	Tl 204.38	Pb 207.2	Bi 208.98	Po 209	At 210	Rn 222	
87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Fr 223	Ra 226	Actínidos	Rf 261	Db 262	Sg 263	Bh 264	Hs 265	Mt 266	Ds 267	Rg 268	Cn 272	Uut 273	Fl 274	Uup 275	Lv 276	Uus 277	Uuo 278
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
La 138.91	Ce 140.12	Pr 140.91	Nd 144.24	Pm 144.91	Sm 150.36	Eu 151.96	Gd 157.25	Tb 158.93	Dy 162.50	Ho 164.93	Er 167.26	Tm 168.93	Yb 173.05	Lu 174.97			
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			
Ac 227.03	Th 232.04	Pa 231.04	U 238.03	Np 237.04	Pu 244.06	Am 243.06	Cm 247.07	Bk 247.07	Cf 251.08	Es 252.08	Fm 257.09	Md 258.10	No 259.10	Lr 260.10			

$\chi_A$ (contrib diamagn de los átomos)		$\chi_B$ (contrib diamagn de los enlaces)	
Átomo	$\chi_A$ ( $10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ )	Enlace	$\chi_B$ ( $10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ )
H	-2,93	C=C	+5,5
C	-6,00	C≡C	+0,8
C (aromático)	-6,24	C=N	+8,2
N	-5,57	C≡N	+0,8
N (aromático)	-4,61	N=N	+1,8

Puede suceder que el efecto magnético negativo se cancele por efectos positivos

# Diamagnetismo: aplicaciones

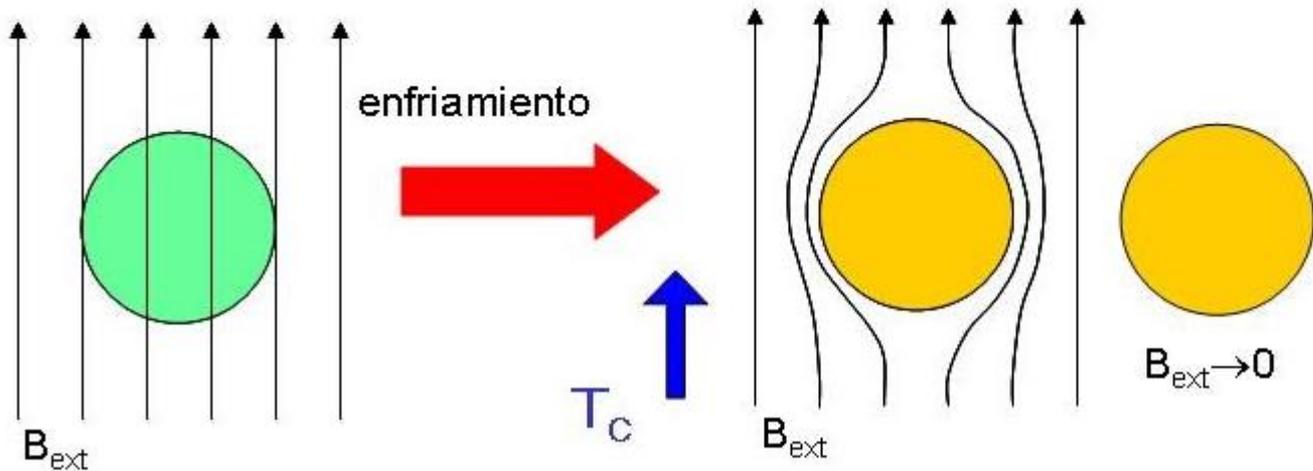
Trenes de levitación magnética usan poderosos electroimanes superconductores para flotar sin tocar la pista.



**Superconductor**

- Material con  $R = 0$
- Diamagnético: repele el campo magnético

Pero se necesita enfriar.....

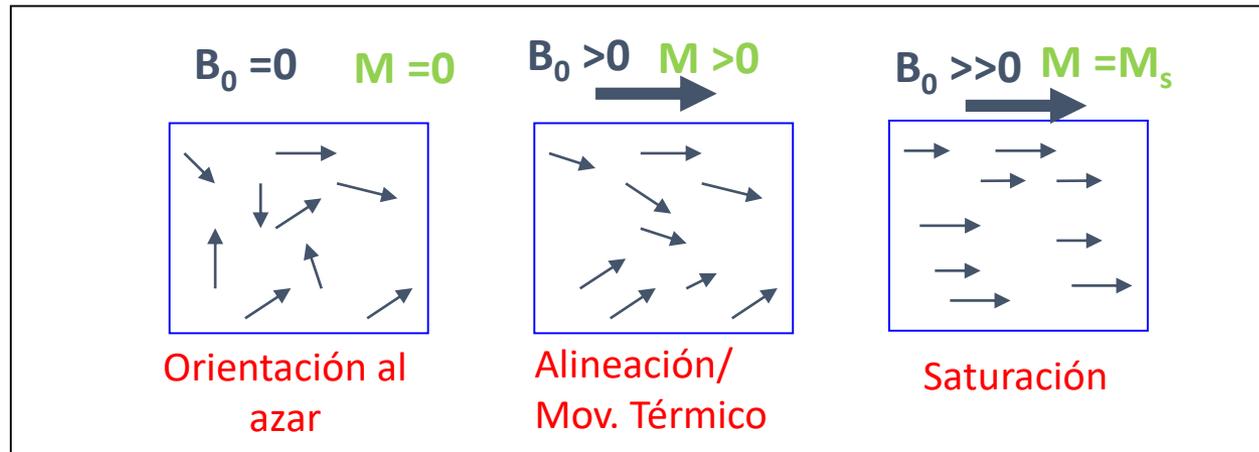




# PARAMAGNETISMO

- Materiales con momentos magnéticos permanentes que interactúan débilmente entre sí  $\chi_m > 0$  (pequeña)
- Magnetización baja
- [permeabilidad magnética](#) es similar a la del [vacío](#).
- Originado por el alineamiento parcial de los spines del electrón o de momentos magnéticos atómicos o moleculares por un campo magnético aplicado

$$\vec{M} = \chi_m \frac{B_0}{\mu_0}$$

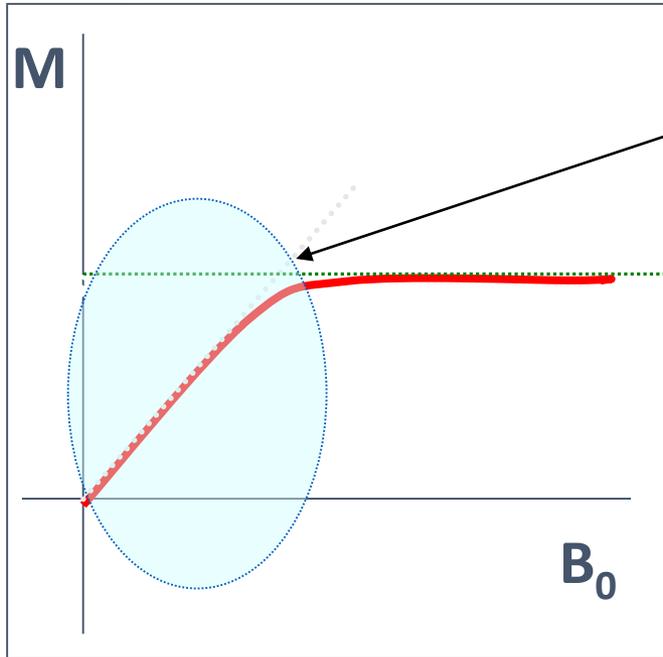


El núcleo atómico posee carga y puede tener momento magnético el cual es mucho menor que el momento angular que genera el electrón.  $\mu = 10^{-3}$

[aire](#), [magnesio](#), [aluminio](#), [titanio](#), [wolframio](#).

# Ley de Curie

Magnetización frente a campo externo



$$M = \frac{1}{3} \frac{\vec{m} \cdot \vec{B}_0}{KT} M_s$$

$$\chi_m = \frac{1}{3} \frac{m M_s}{KT} \mu_0$$

- Válida para bajos valores del campo aplicado.
- Hay competencia entre la agitación térmica y la alineación magnética.

En un electrón,  $\vec{\mu}_L$  y  $\vec{\mu}_S$  contribuyen al paramagnetismo.

El  $\vec{\mu}$  del electrón desapareado tiende a alinearse con  $H_{\text{ext}}$  reforzándolo.

$$\chi > 0$$

$$\chi_{\text{paramagnética}} = \chi_M - \chi_{\text{diamagnética}}$$

# Paramagnetismo y Ley de Curie

★ En ausencia de H,  $M = 0$

Los momentos magnéticos individuales de los electrones,  $\mu_i$ , se orientan al azar anulándose mutuamente

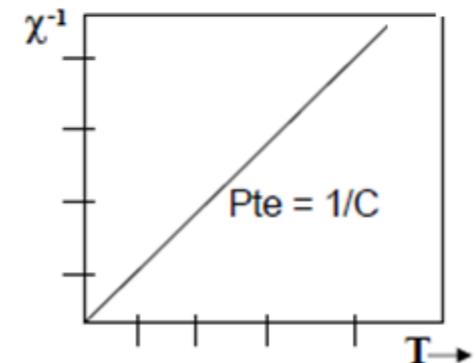
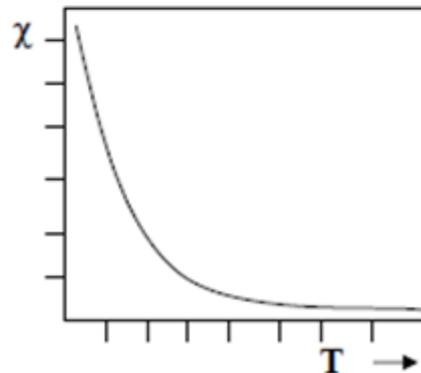
★ En presencia del H,  $M \neq 0$

Mayor estabilidad de los estados electrónicos que alinean el momento magnético con H

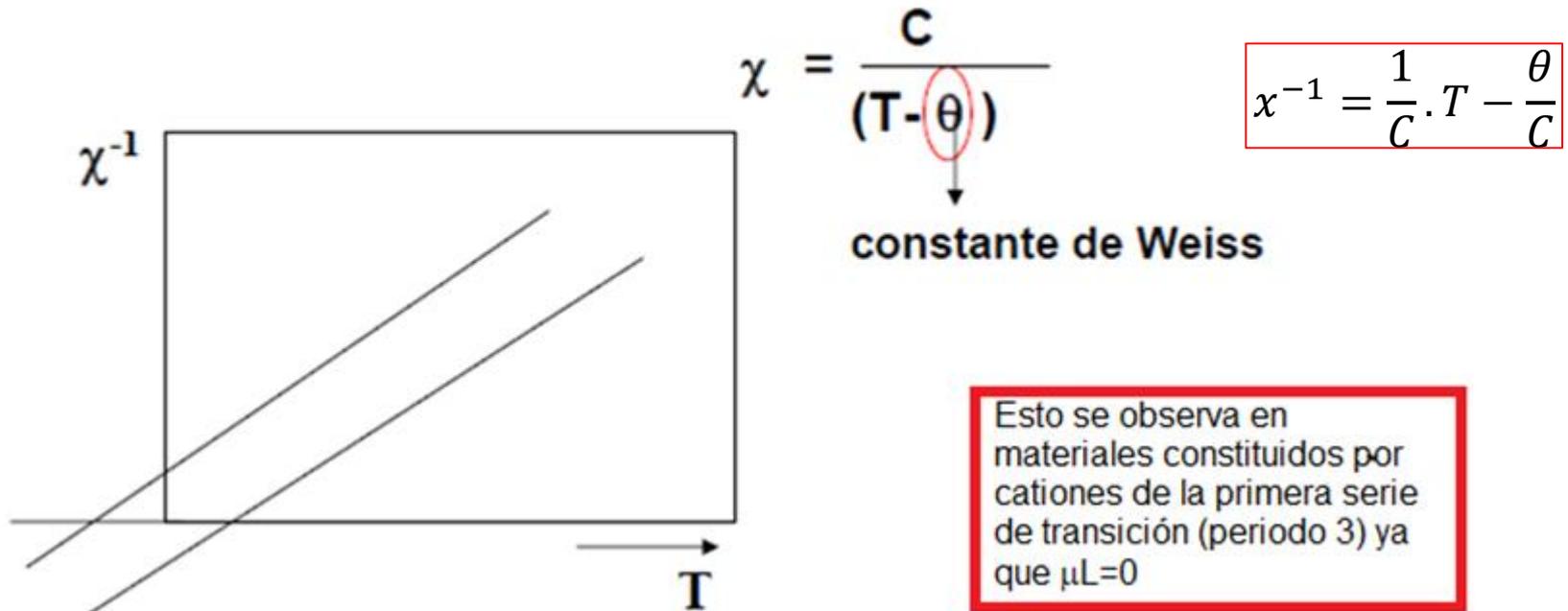
A mayor I del H  $\Rightarrow$  más poblados

★ La diferencia de población entre estados y la  $\chi <$  al  $> T$

**Ley de Curie:**  $\chi = C/T$ ,  
donde C es la cte de Curie,  
propia del material



Mejor aproximación se obtiene Ley de Curie-Weiss



$$\mu_{\text{exp}(MB)} = \sqrt{8C}$$

Independiente de T

$$\mu_{\text{teor}(MB)} = \sqrt{\mu_L + \mu_s}$$

# FERROMAGNETISMO

- Se presenta en Fe, Co, Ni y aleaciones.

1 1 1.00794 H HIDRÓGENO 1,1	2 4 6.941 Li LITIO 1,0	3 9 18.998 Be BERILIO 2,0	4 11 22.990 Na SODIO 1,0	5 10.811 B BORO 3,0	6 12.011 C CARBONO 2,0	7 14.007 N NITRÓGENO 2,5,4,3	8 15.999 O OXÍGENO 2,0	9 18.998 F FLUOR 4,0	10 20.180 Ne NEÓN 2,0																									
19 39.102 K POTASIO 2,0	20 40.078 Ca CALCIO 2,0	21 44.956 Sc ESCANDIO 3,0	22 47.88 Ti TITANIO 3,0	23 50.942 V VANADIO 3,0	24 51.996 Cr CROMO 3,0	25 54.938 Mn MANGANESO 3,0	26 55.845 Fe HIERRO 3,0	27 58.933 Co COBALTO 3,0	28 58.933 Ni NÍQUEL 3,0	29 63.546 Cu COBRE 1,2	30 65.37 Zn ZINC 2,0	31 69.723 Ga GALIO 3,0	32 72.64 Ge GERMANIO 4,0	33 74.922 As ARSENICO 3,0	34 76.94 Se SELENIO 4,0	35 78.972 Br BROMO 4,0	36 83.80 Kr KRIPTÓN 4,0																	
37 85.47 Rb RUBIDIO 2,0	38 87.62 Sr ESTRONCIO 2,0	39 88.906 Y ITRIO 3,0	40 91.224 Zr ZIRCONIO 4,0	41 92.906 Nb NIOBIO 5,0	42 95.94 Mo MOLIBDENO 5,0	43 97.907 Tc TECNICIO 5,0	44 101.07 Ru RUTENIO 5,0	45 101.07 Rh RADIO 5,0	46 106.42 Pd PALADIO 5,0	47 107.87 Ag PLATA 5,0	48 112.41 Cd CADMIO 5,0	49 114.82 In INDIO 3,0	50 118.710 Sn ESTAÑO 4,0	51 121.76 Sb ANTIMONIO 3,0	52 127.60 Te TELURO 4,0	53 126.905 I YODO 5,0	54 131.29 Xe XENÓN 5,0	55 132.905 Cs CESIO 1,0	56 137.33 Ba BARIO 2,0	57 138.905 La LANTANO 3,0	58 140.908 Ce CERIO 3,0	59 140.908 Pr PRASEODIMIO 3,0	60 144.24 Nd NEODIMIO 3,0	61 147.07 Pm PROMETIO 3,0	62 150.36 Sm SAMARIO 3,0	63 151.96 Eu EUROPIO 3,0	64 157.25 Gd GADOLINIO 3,0	65 158.925 Tb TERBIO 3,0	66 162.50 Dy DISPROSIO 3,0	67 164.930 Ho HOLMIO 3,0	68 167.259 Er ERBIO 3,0	69 168.934 Tm TULIO 3,0	70 173.054 Yb YTERBIO 3,0	71 174.967 Lu LUTECIO 3,0
87 223.071 Fr FRANCIO 1,0	88 226.025 Ra RADIO 2,0	89 227.03 Ac ACTINIO 3,0	90 232.0377 Th TORIO 4,0	91 231.03688 Pa PRACTINIO 4,0	92 238.02891 U URANIO 3,4,5,6	93 237.04817 Np NEPTUNIO 3,4,5,6	94 244.06422 Pu PLUTONIO 3,4,5,6	95 244.06422 Am AMERICIO 3,4,5,6	96 247.07438 Cm CURCIO 3,0	97 247.07438 Bk BERKELIO 3,4	98 251.07642 Cf CALIFORNIO 3,0	99 252.08322 Es EINSTEINIO 3,0	100 252.08322 Fm FERMIUM 3,0	101 257.10375 Md MENDÉLÉVIO 3,0	102 259.10888 No NOBELIO 3,0	103 261.10888 Lr LAWRENCIO 3,0																		

También aceros y aleaciones

58 140.908 Ce CERIO 3,0	59 140.908 Pr PRASEODIMIO 3,0	60 144.24 Nd NEODIMIO 3,0	61 147.07 Pm PROMETIO 3,0	62 150.36 Sm SAMARIO 3,0	63 151.96 Eu EUROPIO 3,0	64 157.25 Gd GADOLINIO 3,0	65 158.925 Tb TERBIO 3,0	66 162.50 Dy DISPROSIO 3,0	67 164.930 Ho HOLMIO 3,0	68 167.259 Er ERBIO 3,0	69 168.934 Tm TULIO 3,0	70 173.054 Yb YTERBIO 3,0	71 174.967 Lu LUTECIO 3,0
90 232.0377 Th TORIO 4,0	91 231.03688 Pa PRACTINIO 4,0	92 238.02891 U URANIO 3,4,5,6	93 237.04817 Np NEPTUNIO 3,4,5,6	94 244.06422 Pu PLUTONIO 3,4,5,6	95 244.06422 Am AMERICIO 3,4,5,6	96 247.07438 Cm CURCIO 3,0	97 247.07438 Bk BERKELIO 3,4	98 251.07642 Cf CALIFORNIO 3,0	99 252.08322 Es EINSTEINIO 3,0	100 252.08322 Fm FERMIUM 3,0	101 257.10375 Md MENDÉLÉVIO 3,0	102 259.10888 No NOBELIO 3,0	103 261.10888 Lr LAWRENCIO 3,0

No observable en elementos de la 2ª y 3ª serie de transición.  
Los orbitales 4d y 5d son más difusos y dan origen a bandas más anchas

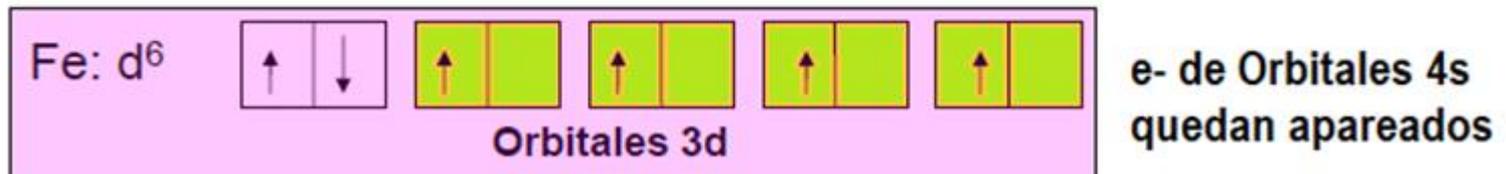
# FERROMAGNETISMO

- Existen interacciones entre los espines de los electrones. → alto grado de alineamiento → Fuerte interacción entre dipolos magnéticos vecinos
- La susceptibilidad  $\chi_m > 0$  (grande)
- Magnetización alta aún para valores del campo externo bajos.
- En ausencia de campo existen dominios magnéticos con magnetización no es nula.  
→ **tienen sus momentos alineados → magnetos permanentes.**

Presentan imanación espontánea.

**Materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos con  $T_c \gg$**

Alineamiento en la red cristalina de electrones desapareados situados en los orbitales 3d



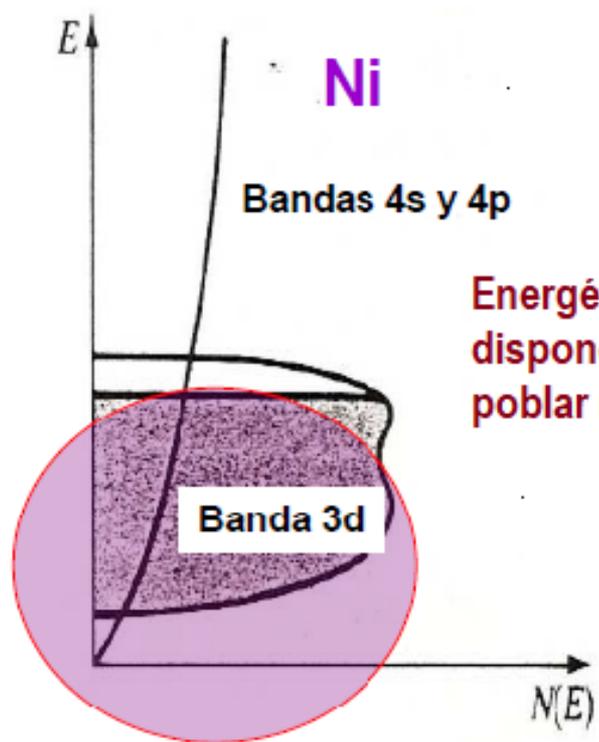
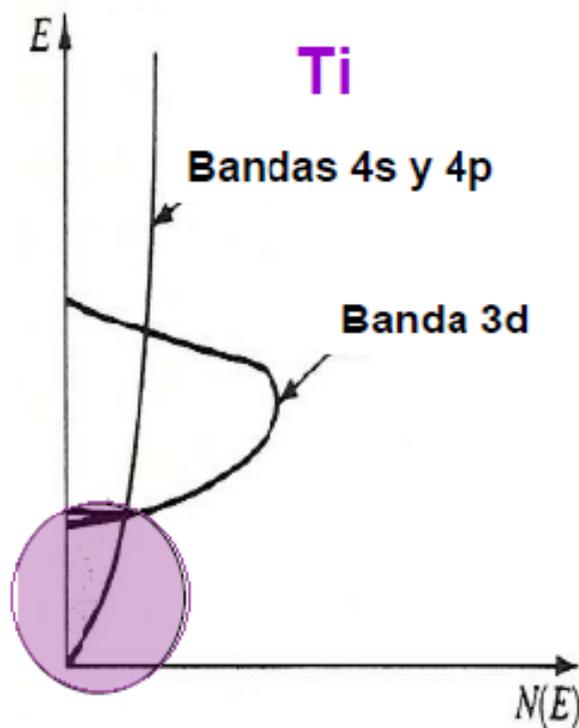
Ojo... Con **ferrimagnetismo!!!**

Electrones desapareados 3d	Átomo	Número de electrones	Configuración electrónica de los orbitales 3d	Electrones 4s
2	Ti	22		2
2	Ni	28		2

Ocurre en bandas parcialmente llenas con alta densidad de estados cerca del nivel de Fermi



$\text{Fe: } 3d^6$ ,  $\text{Co: } 3d^7$ ,  $\text{Ni: } 3d^8$



Energéticamente favorable es disponer de e- no apareados para poblar niveles de  $E >$

Fe (4e-);  $T_c = 1043 \text{ K}$   
 Co (3e-);  $T_c = 1388 \text{ K}$   
 Ni (2e-);  $T_c = 627 \text{ K}$

# Ferromagnetismo

$T < T_c$  **Magnetización**

Alineación de espines de e- en regiones microscópicas



**Dominios magnéticos**



Tamaños entre  $10^{-12}$  y  $10^{-8}$  m<sup>3</sup>  
y contienen entre  $10^{21}$  y  $10^{27}$  átomos

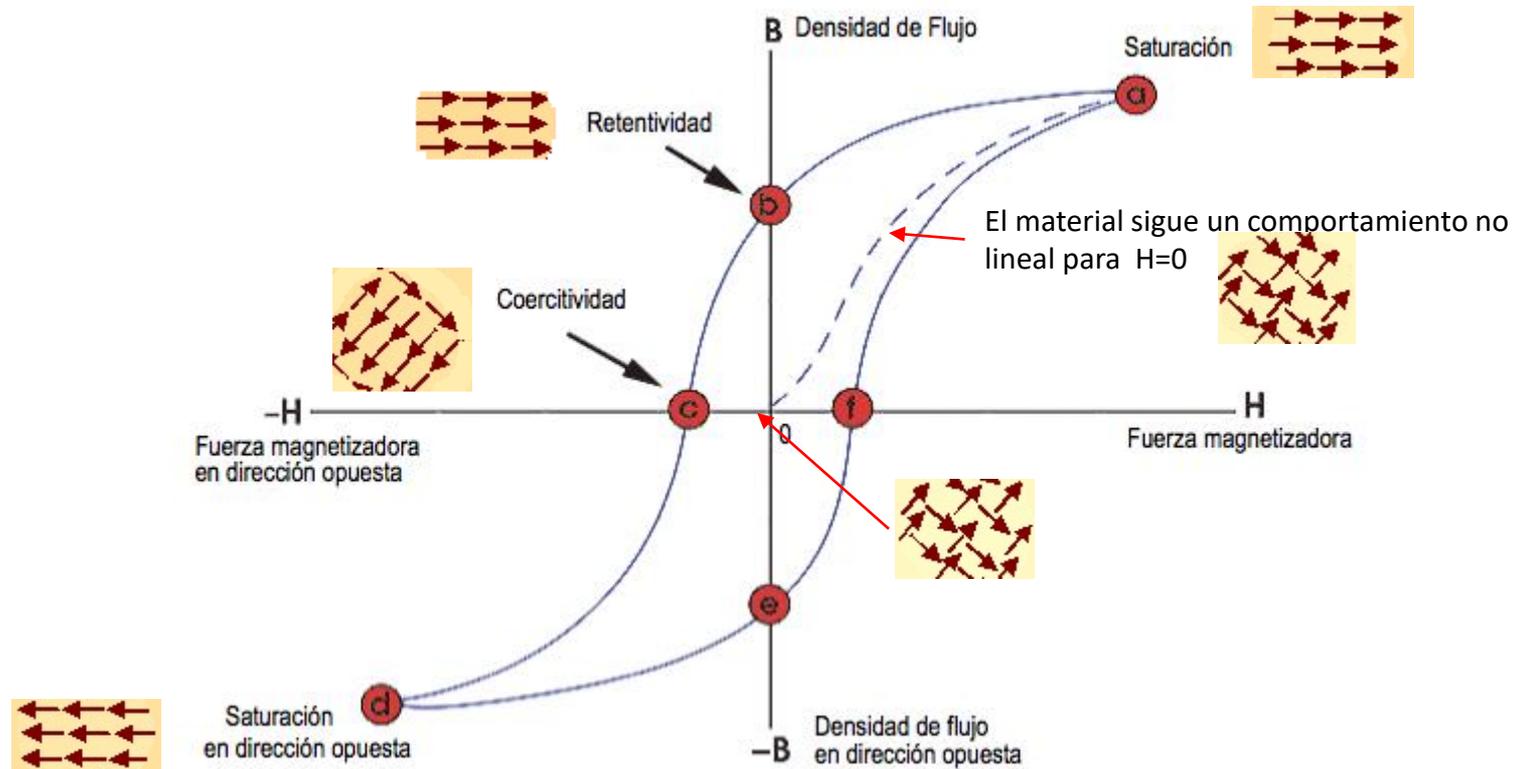
$T > T_c$  **Desmagnetización**

**Analizar Ciclo de Histéresis !!!**

# Ciclo de Histéresis

Una propiedad característica de los materiales ferromagnéticos

## Cambio de la magnetización al variar H



a) Alineación de dominios magnéticos

b)  $H=0$

Material Ferromag (MF) retiene un grado de magnetización

c) Campo impulsor mag. debe invertirse  $\rightarrow$  Magnetiz ( $B$ )=0

d) Alineación de dominios magnéticos (sentido opuesto)

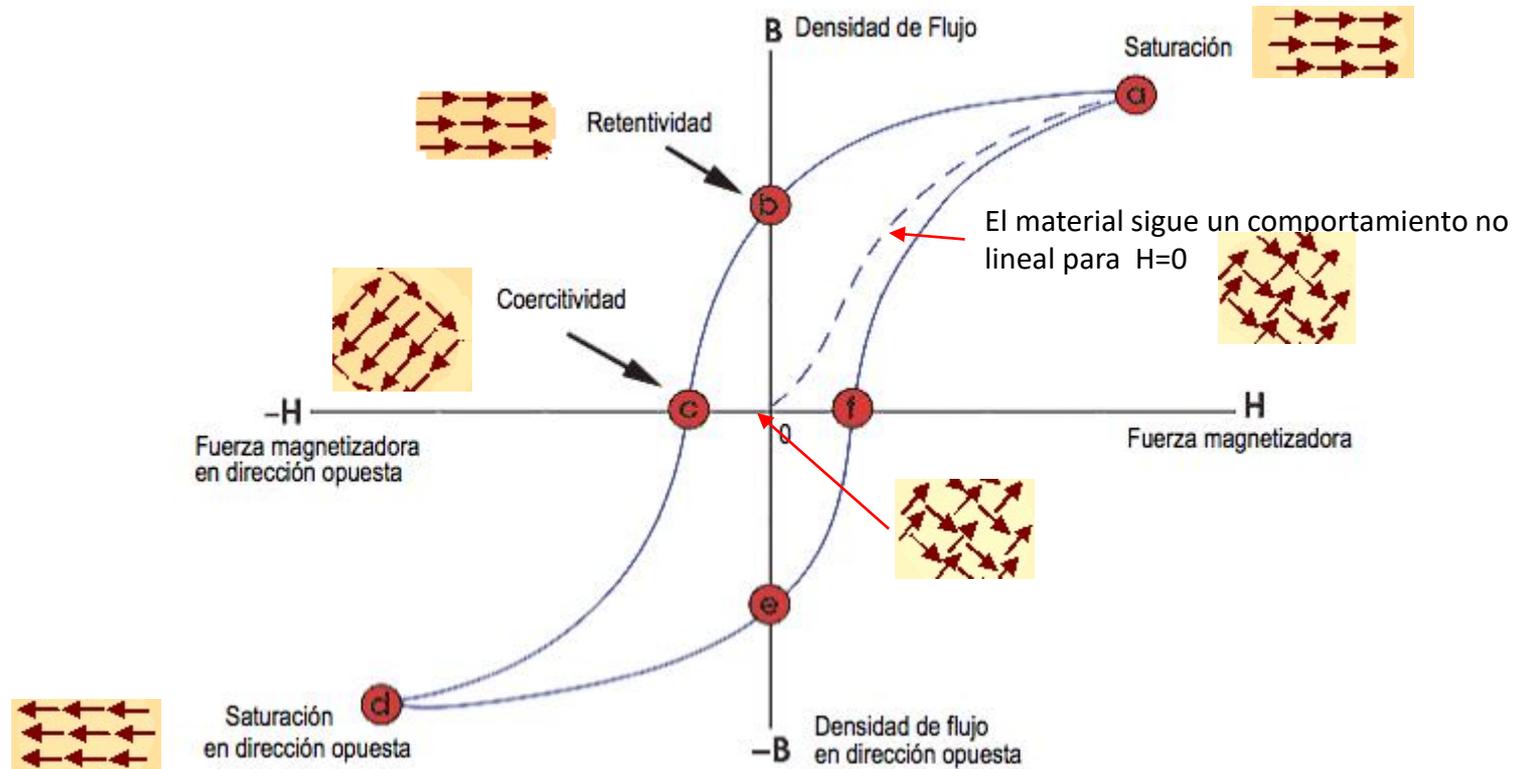
e) La pendiente de histéresis muestra la memoria de magnetización del mat FM

f) Intensidad de  $H$  aplicado

# Ciclo de Histéresis

Una propiedad característica de los materiales ferromagnéticos

## Cambio de la magnetización al variar H



a) Alineación de dominios magnéticos

b)  $H=0$

Material Ferromag (MF) retiene un grado de magnetización

c) Campo impulsor mag. debe invertirse  $\rightarrow$  Magnetiz ( $B$ )=0

d) Alineación de dominios magnéticos (sentido opuesto)

e) La pendiente de histéresis muestra la memoria de magnetización del mat FM

f) Intensidad de  $H$  aplicado

# Magnetización- Desmagnetización

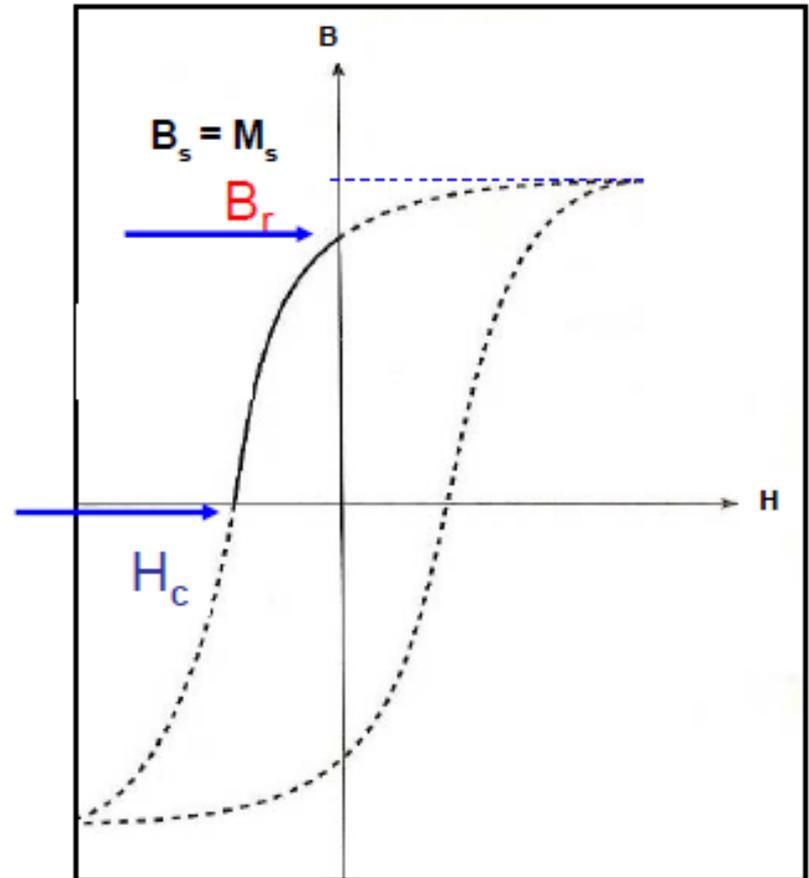
## Magnetización remanente $B_r$ ( $H = 0$ )

Indicativo de la habilidad del material para actuar como imán permanente.

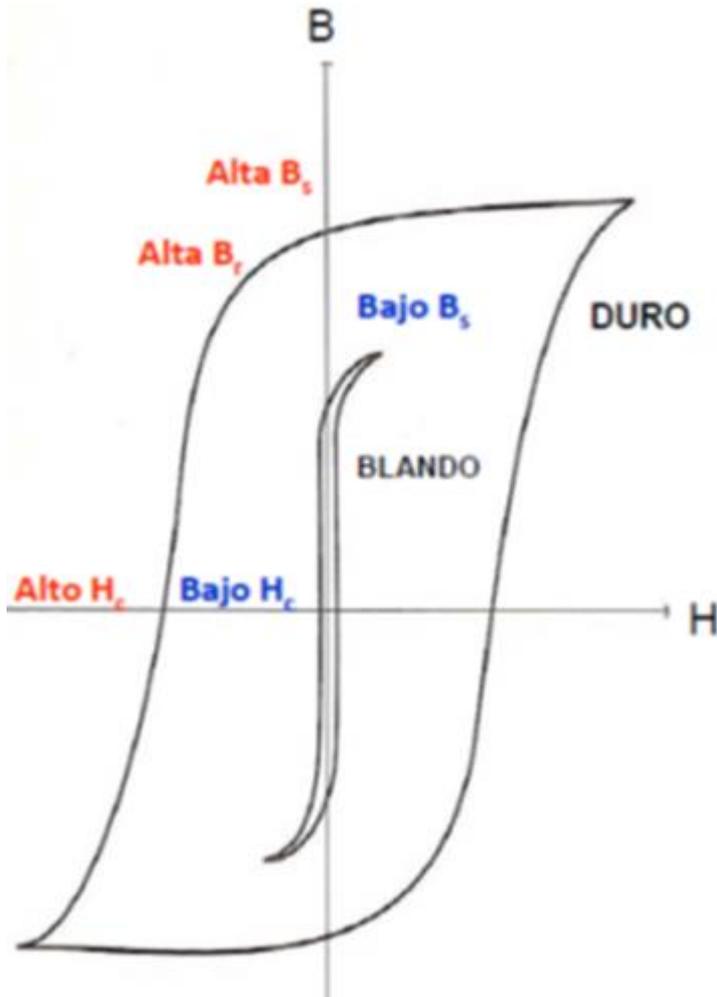
## Campo coercitivo $H_c$

Campo magnético necesario para anular el flujo magnético dentro del imán.

Indicativo de la habilidad del imán para soportar factores desmagnetizantes.



# Material Ferromagnético Duro o Blando

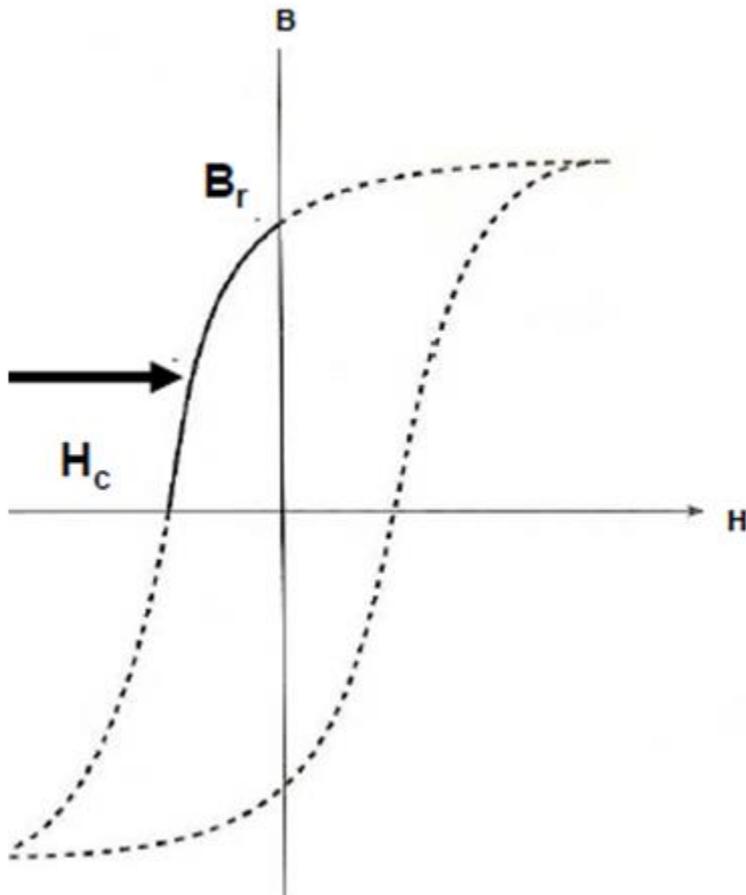


**Duros** → Imanes permanentes.

**Blandos** → imanes temporarios.

Cambia su ciclo de histéresis → Analizar!!

# Magnetización- Desmagnetización



Potencial de material magnético duro

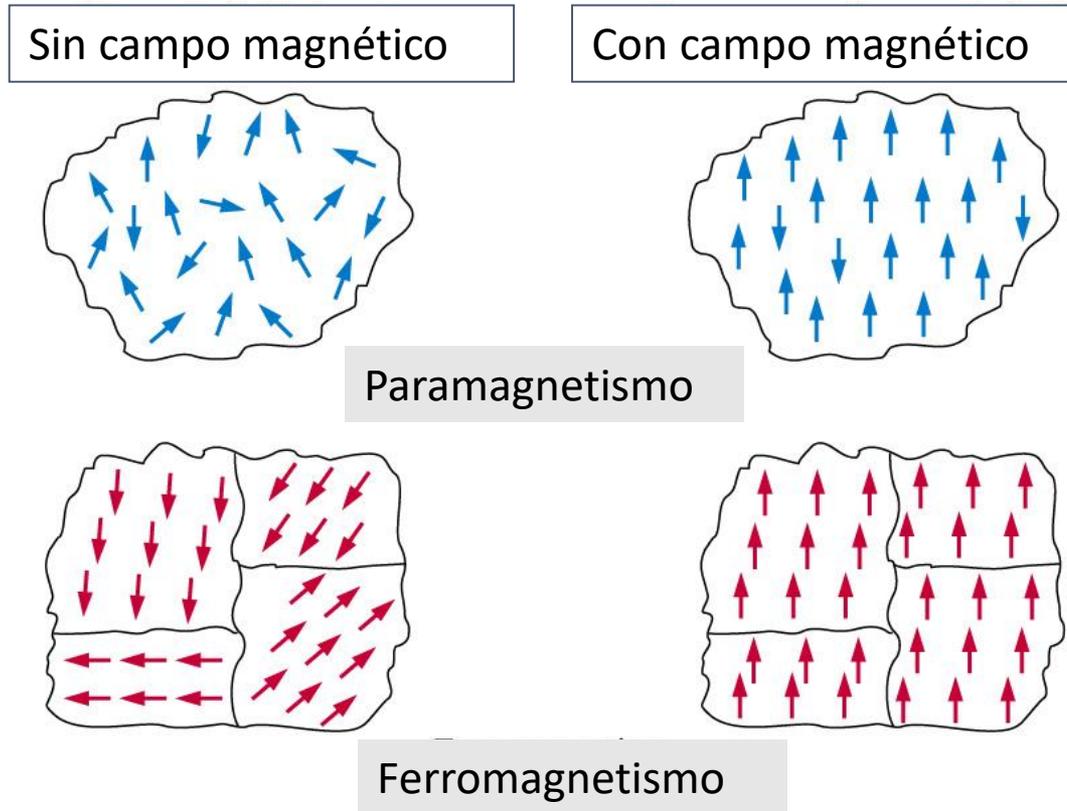
$$E_{\text{máx}} = [B \times H]_{\text{máx}}$$

Evalúo en cuadrante desmagnetizador de H-B

Imán = Material capaz de almacenar E

$$E = (B_r \times H_c)_{\text{max}}$$

- Al aplicar H, los dominios se orientan todos en dirección al campo externo.



A temperaturas altas ( $T > T_{\text{Curie}}$ ) se convierten en materiales paramagnéticos a causa de la agitación térmica.

# Energías involucradas en la estructura de dominios FM

- $E^\circ$  de transformación.
- $E^\circ$  magnetostática
- $E^\circ$  anisotropía magnética ( $E^\circ$  cristalina)
- $E^\circ$  de pared de dominio
- $E^\circ$  magnetoestricción

**ESTRUCTURA MAGNÉTICA ESTABLE**

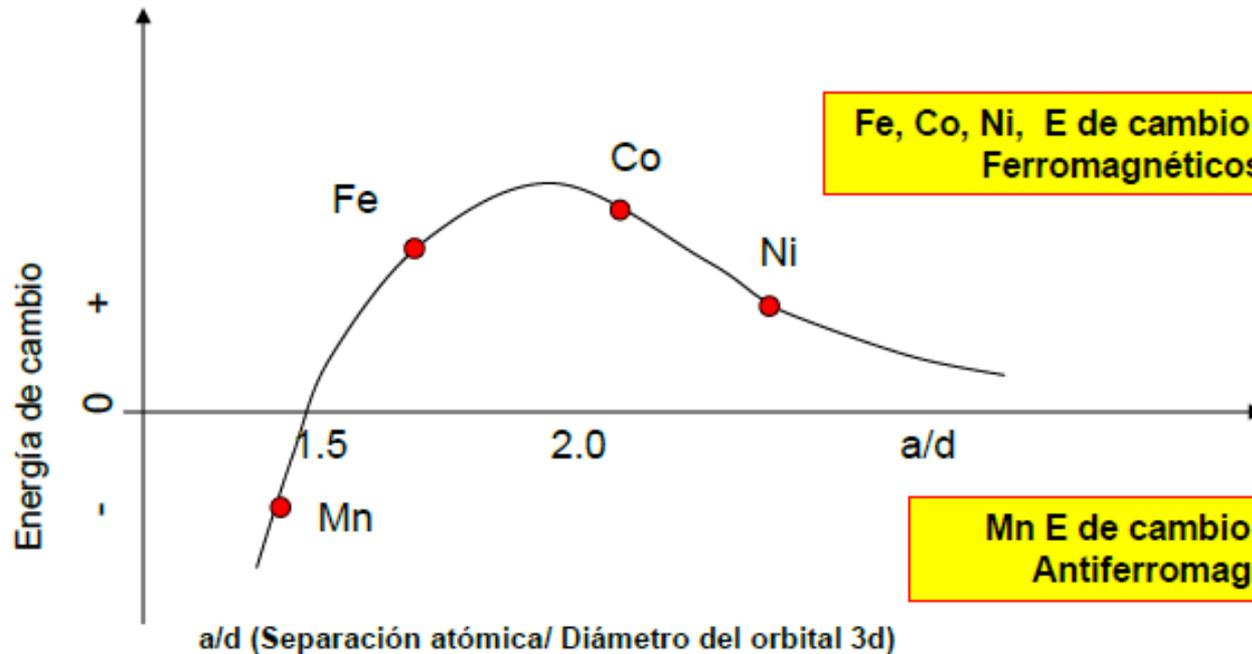
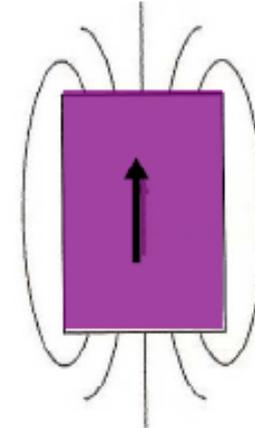


**$E^\circ$  potencial total mínima**

- **E° de transformación de los dominios**

Energía asociada a la alineación de los dipolos atómicos en la misma dirección

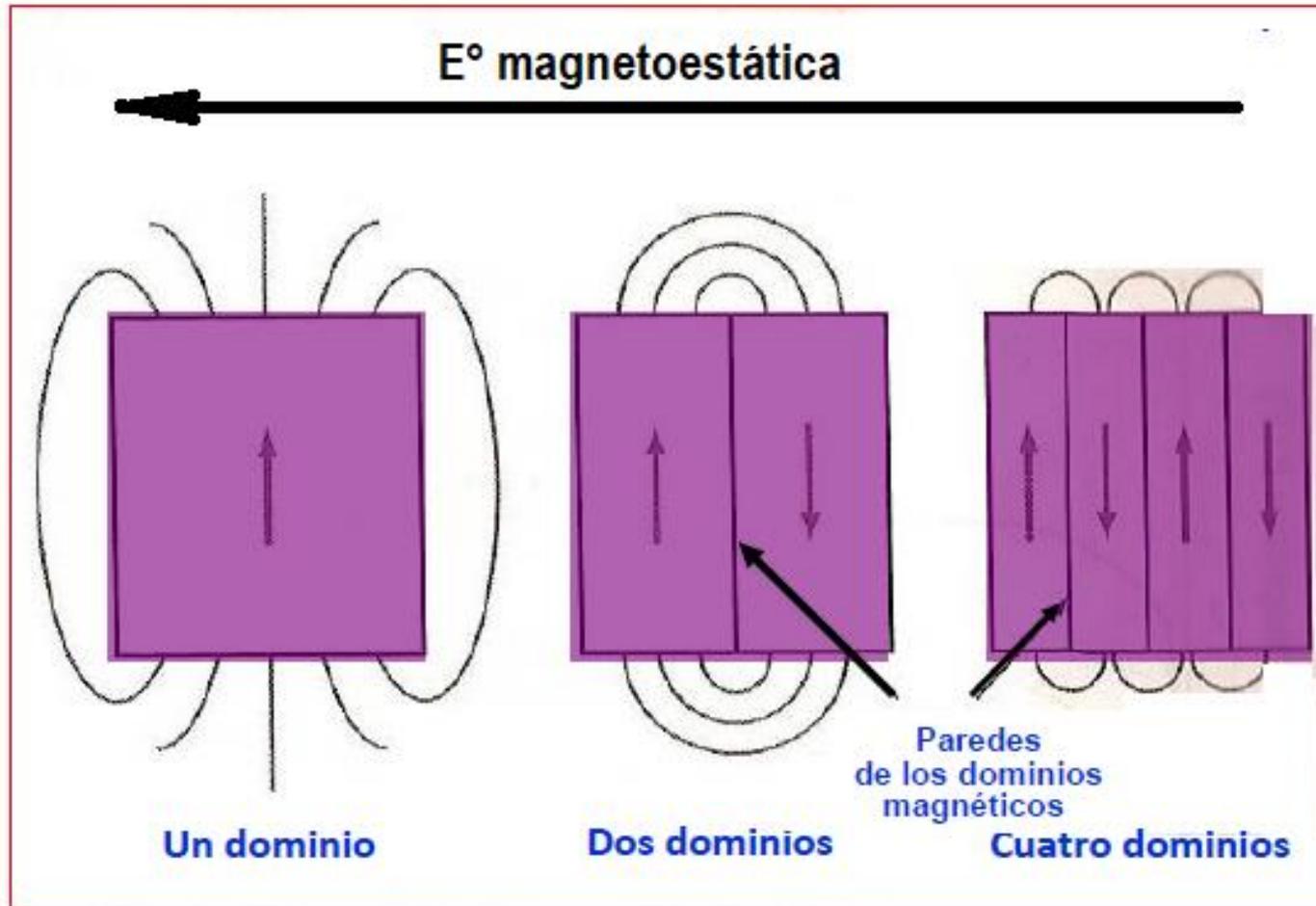
La formación de un solo dominio minimiza la E dentro de un material ferromagnético



Fe, Co, Ni, E de cambio positiva  
Ferromagnéticos

Mn E de cambio negativa  
Antiferromagnético

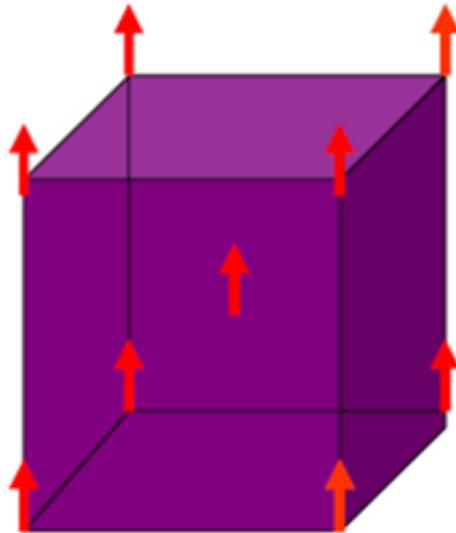
- **E° Magnetoestática**



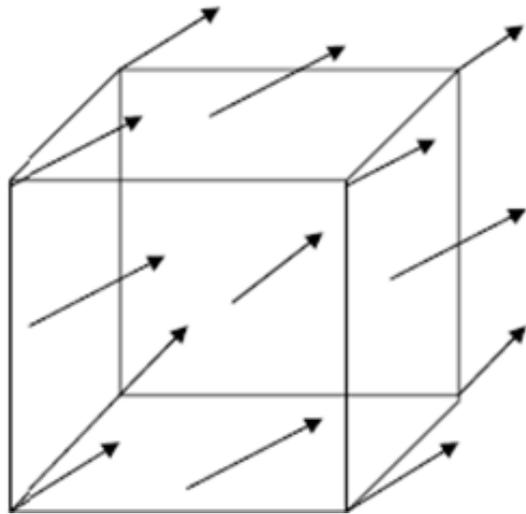
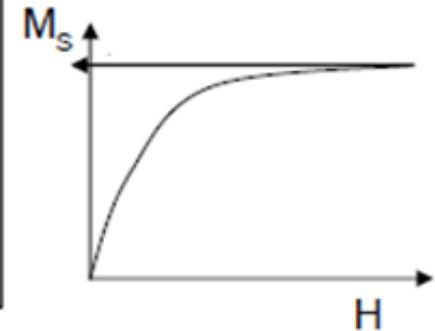
La formación de dominios múltiples reduce la E magnetos

- **E° de anisotropía magnetocristalina**

\*Trabajo para girar los dominios



$\alpha$ -Fe  
Momentos magnéticos  
debidos al espín del Fe  
alineados y la  
orientación coincide  
con la red cristalográfica

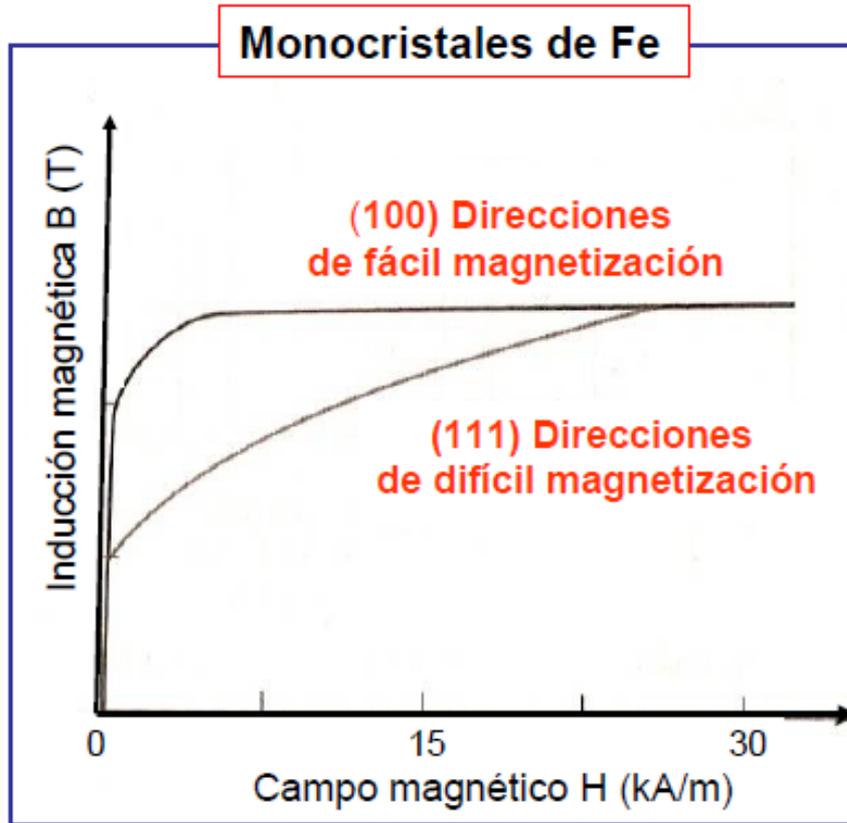


Ni (FCC)

La dirección de magnetización no es una  
dirección simple!!

> anisotropía => preferencia en dirección de imantación

- **E° de anisotropía magnetocristalina**



Granos que saturan a  $\ll H$

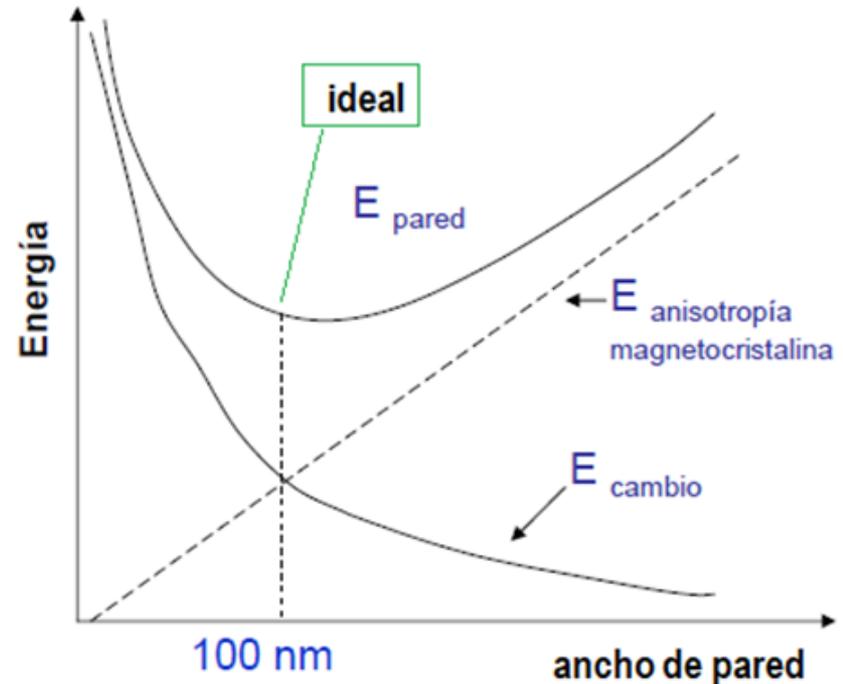
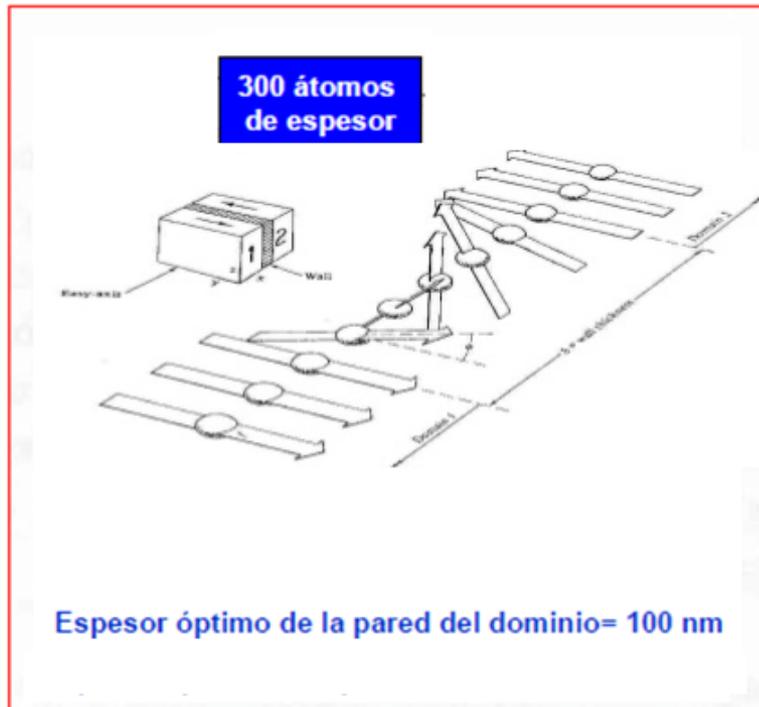
Los granos deben girar su momento resultante en la dirección del  $H_{\text{aplicado}}$  para alcanzar alcanzar la  $M_s$  a  $\gg H$

Esencial para la posterior aplicación de los materiales ferromagnéticos duros y blandos

Ideal es tener monocristales

# • E° de Pared de Dominio

\* Cambio de 180° que experimenta el dominio en dirección de H



Rotación de  $m$  entre dominios a 180° implica un incremento de energía. Se puede estimar que la energía de las paredes de los dominios debido a esa rotación por unidad de área es

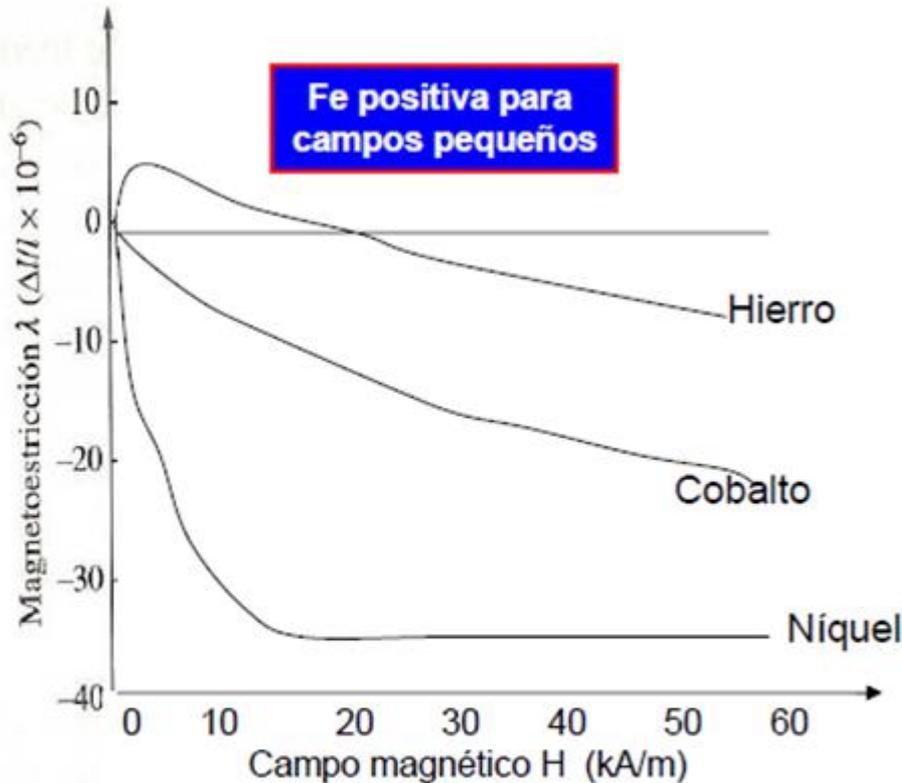
$$\gamma = 4(A K_1)^{1/2} = 4 \left( \frac{k T_c K_1}{a} \right)$$

Donde  $A$  es el parámetro de canje magnético

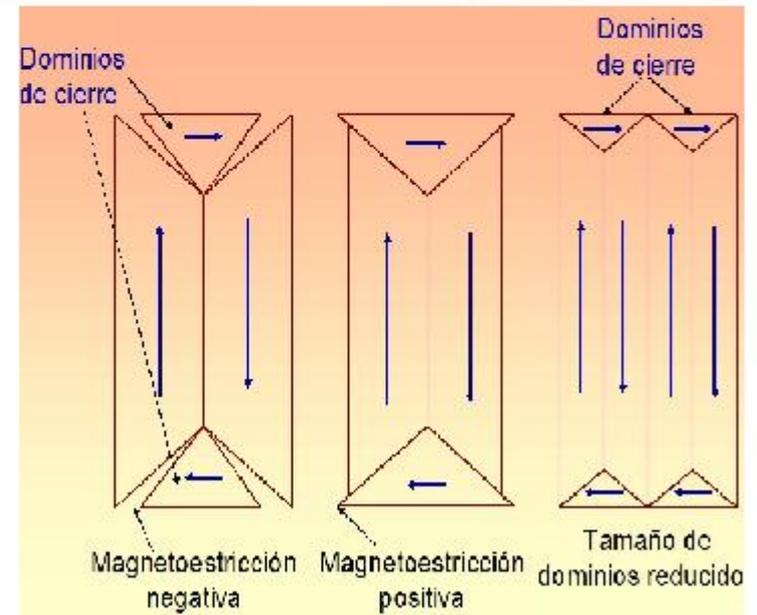
Importante porque si hay pequeñas variaciones de  $A$  o  $K_1$  dentro del material (por bordes de grano, segundas fases, inclusiones o defectos)  $\Rightarrow \delta$  dependerá de la posición de la pared

# • E° Magnetoestrictiva

\*A causa de las tensiones mecánicas generadas por magnetización



Contracción o expansión en la dirección de magnetización

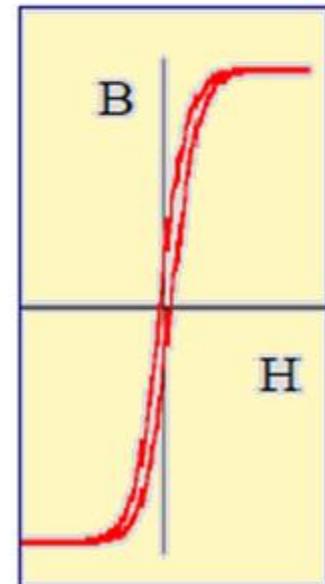


< magnetoestricción por creación de Dominios reducidos

# MATERIALES MAGNÉTICOS BLANDOS

## PROPIEDADES DESEABLES

- Ciclo de histéresis lo más fino posible  
El material se magnetiza con  $H$  poco intenso  $\Rightarrow$  alta  $\mu = B/H$
- Bajo campo coercitivo,  $H_c$ , para desimanar
- Alta inducción de saturación,  $B_s$
- Libre de defectos (monocristal)



Cuando un material ferromagnético blando es imanado y desimanado repetidas veces

# MATERIALES MAGNÉTICOS BLANDOS: Aplicaciones

Ferritas blandas de composición  $MO \times Fe_2O_3$   
( $M = Fe^{2+}, Mn^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+}$ ) y estructura espinela inversa

## Materiales cerámicos ferromagnéticos



⇒ Muestran  $\phi_{\text{eléctrica}} \gg \sim$  aislantes

Bajas pérdidas de energía  
por corrientes parásitas

⇒ Presentan  $B_s >$  aunque menor que la  
mostrada por materiales ferromagnéticos

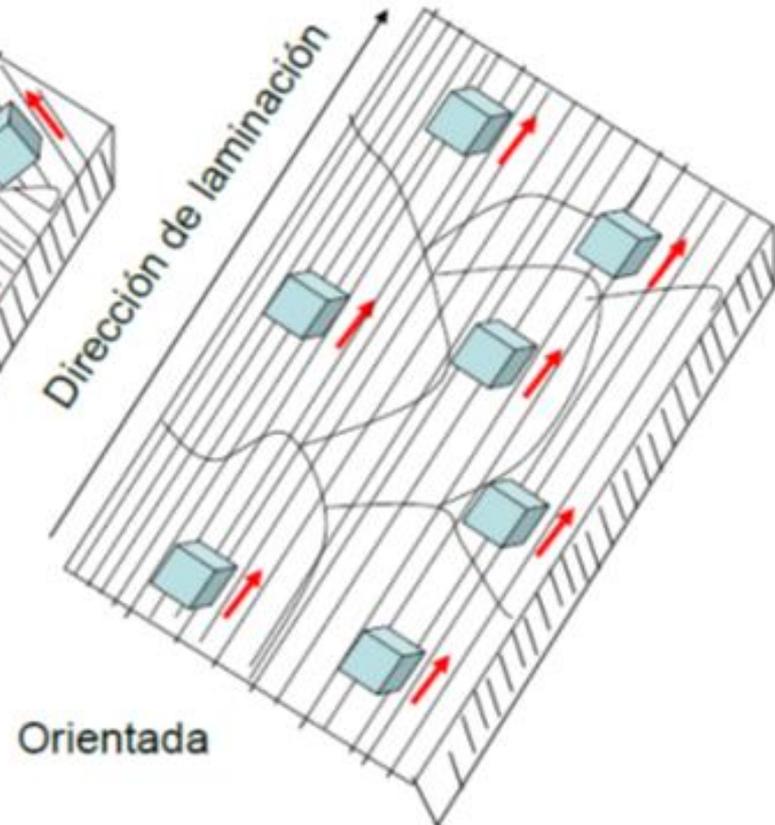
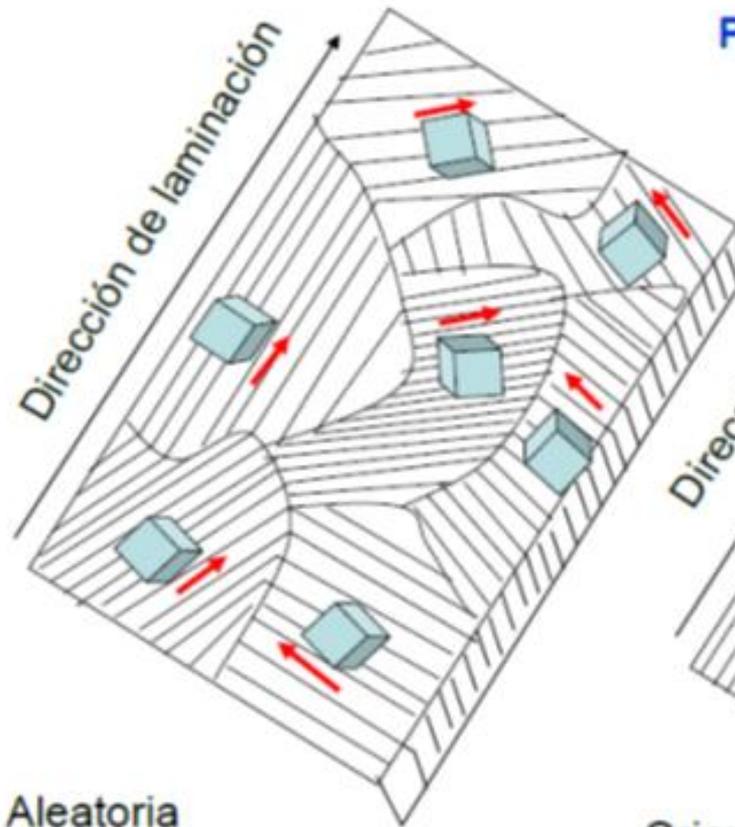
Material y composición	Inducción de saturación, $B_s, T$	Campo coercivo, $H_c, A/cm$	Permeabilidad relativa inicial $\mu_i$
Hierro magnético, chapa de 0,2 cm	2,15	0,800	250
48% MnO- $Fe_2O_3$ , 52% ZnO- $Fe_2O_3$ (ferrita suave)	0,36		1.000
36% NiO- $Fe_2O_3$ , 64% ZnO- $Fe_2O_3$ (ferrita suave)	0,29		650

Se utilizan como guía de ondas para comunicaciones

# MATERIALES MAGNÉTICOS BLANDOS: Aplicaciones

Aleaciones de Fe con 3-4% de Si  
Materiales magnéticos blandos más utilizados

Procesado por laminado en frío



# MATERIALES MAGNÉTICOS BLANDOS: Aplicaciones

Aleaciones de Fe con 3-4% de Si



$\ll$  intersticiales de oxígeno  
defectos que dificultan el  
movimiento de las paredes  
de los dominios

$\ll$  la  $E$  anisotropía magnetocristalina  
y  $E$  magnetoestrictiva

$\gg \mu$

Efecto negativo

- $\ll M_s$  y la  $T_c$  de la aleación
- $\ll$  La ductilidad del Fe y para  $[Si] \gg 4\%$  no se puede laminar el material

Se utilizan en motores, transformadores ó generadores

# MATERIALES MAGNÉTICOS BLANDOS:

## Aplicaciones

### Aleaciones de Fe y Ni

- Permalloy (Fe + 45%Ni)
- Supermalloy (79% Ni)

$\ll E_{a. \text{ magnetocristalina}} \text{ y } E_{\text{magnetostrictiva}}$

En relación a Aleaciones de Fe-Si

A bajos H

$\gg \mu$

Material y composición	Inducción de saturación, $B_s$ , T	Campo coercivo, $H_c$ , A/cm	Permeabilidad relativa inicial $\mu_r$
45 Ni-55 Fe (45 Permalloy)	1,60	0,024	2.700
75 Ni-5 Cu-2 Cr-18 Fe (Mumetal)	0,80	0,012	30.000
+79 Ni-5 Mo-15 Fe-0,5 Mn (Supermalloy)	0,78	0,004	100.000

Aplicación más importante  $\Rightarrow$  comunicación de alta sensibilidad  
 $\Rightarrow$  el equipo ha de recibir o transmitir pequeñas señales.

# MATERIALES MAGNÉTICOS BLANDOS:

## Aplicaciones

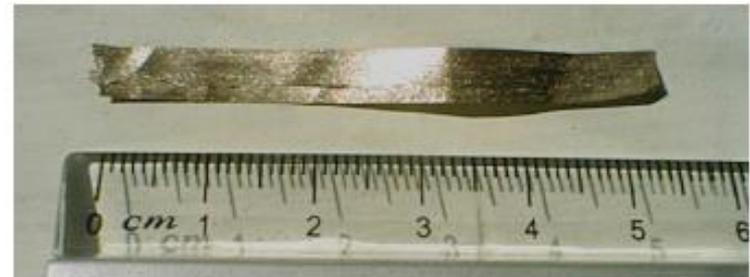
Vidrios metálicos

Combinaciones de los metales ferromagnéticos Fe, Co y Ni con los metaloides B y Si...

Estructura amorfa que se forma por enfriamiento rápido del fundido



Se producen cintas a una rapidez de un kilómetro por minuto



- Son muy fuertes y muy duros aunque muestran alguna flexibilidad
- Muy resistentes a la corrosión.
- Magnéticamente son materiales muy blandos

# MATERIALES MAGNÉTICOS BLANDOS: VIDRIOS metálico



**Dominios magnéticos  
inducidos en un vidrio metálico**

-  $\Phi_{\text{electrica}} \gg \gg$   $\Rightarrow$  Pérdidas por corrientes parásitas  $\ll \ll$

**AMORFOS: No existen fronteras de grano. Las paredes de los dominios se mueven con facilidad**

-  $E_{\text{anisotropía}} \sim 0$   
- Pérdidas de histéresis son  $\ll$  }  $\gg \gg \mu$

Aleación (% atómico)	$B_s$ (T)	$\mu_{\text{max}}$	Aplicaciones
$\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$	1.56	600.000	Transformadores de potencia con bajas pérdidas en el núcleo.
$\text{Fe}_{81}\text{B}_{13.5}\text{Si}_{3.5}\text{C}_2$	1.61	300.000	Transformadores de pulso, interruptores magnéticos.
$\text{Fe}_{87}\text{Co}_{18}\text{B}_{14}\text{Si}_1$	1.80	4000.000	Transformadores de pulso, interruptores magnéticos.

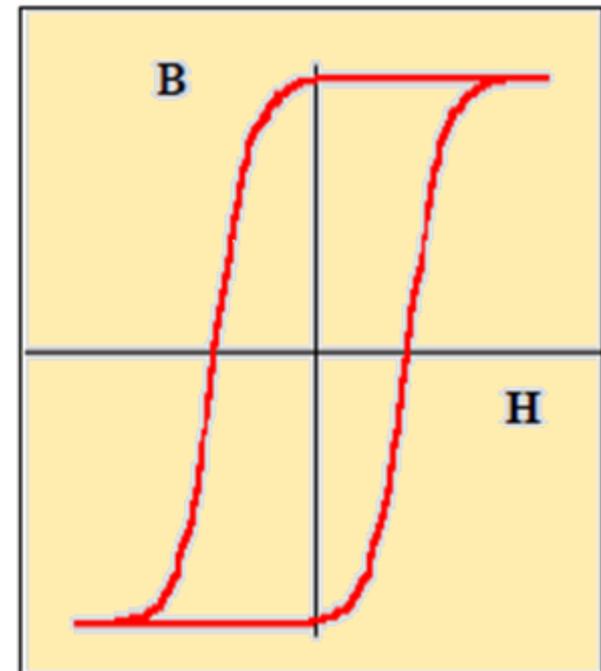
La estructura atómica desordenada también hace que los vidrios metálicos sean muy eficaces como imanes, porque carecen de los tipos de defectos encontrados en los metales con estructura cristalina.

# MATERIALES MAGNÉTICOS DUROS: Aplicaciones

Propiedades deseables para su aplicación

- Baja permeabilidad magnética inicial,  $\mu_i$
- Alto campo coercitivo,  $H_c$ , para desimantar
- Alta inducción de saturación,  $B_s$
- Alta remanencia,  $B_r$

Maximizar  $E = [ B \times H ]_{\text{máx}}$

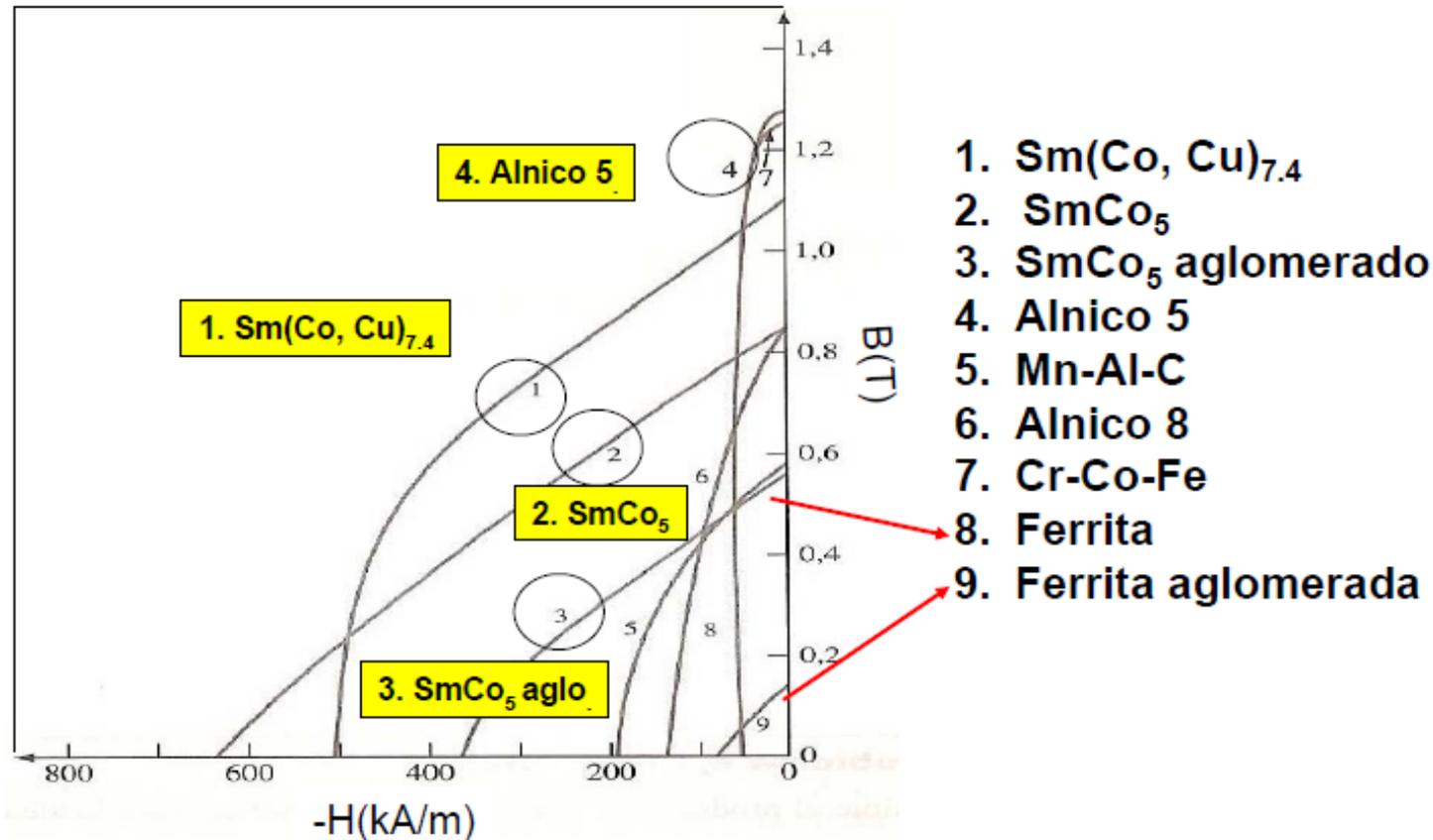


# **MATERIALES MAGNÉTICOS DUROS:**

## **Aplicaciones**

- **Ferritas Duras**
- **Aleaciones de Alnico**
- **Aleaciones de Tierras Raras**
- **Aleaciones Nd-Fe-B**
- **Aleaciones Co-Pt-Cr**

# MATERIALES MAGNÉTICOS DUROS: Aplicaciones



En función de cual vaya a ser la aplicación se hará uso de uno u otro

Ferritas hexagonales de composición  $\text{MO} \times 6\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\text{M} = \text{Ba}^{2+}, \text{Sr}^{2+}$ )

Altavoces, timbres

$\text{Ba}^{2+}$  : Imanes heladera

# MATERIALES MAGNÉTICOS DUROS:

## Aplicaciones

Alnico (aleaciones de Al, Ni y Co)

Material base de la aleación: Al, Ni y Co + Fe

Muchas variantes en función de la proporción de sus elementos

Mejores imán permanente

Materiales magnéticos duros mas importantes a nivel comercial

**Buena resistencia a la T**

- Alta inducción remanente,  $B_r$
- Moderada coercitividad,  $H_c$
- Alto producto de E,  $(B \times H)_{\max}$

Material y composición	Inducción remanente. $B_r$ , T	Campo coercitivo $H_c$ , kA/m
Alnico 1, 12 Al, 21 Ni, 5 Co, 2 Cu, Fe	0,72	37
Alnico 5, 8 Al, 14 Ni, 25 Co, 3 Cu, Fe	1,28	51
Alnico 8, 7 Al, 15 Ni, 24 Co, 3 Cu, Fe	0,72	150

Aleaciones frágiles fabricadas en forma de polvo  $\Rightarrow$  formas complejas.

# MATERIALES MAGNÉTICOS DUROS:

## Aplicaciones

### Aleaciones de las Tierras Raras

Los  $\vec{\mu}$  de la mayoría de las tierras raras  $\gggg$  que los de los elementos de transición Fe, Co y Ni

Valores altos de  $B_r$

Las tierras raras  $\Rightarrow$  grandes constantes de anisotropía magnetocristalina

Valores altos de  $H_c$

$(B_r \times H_c)_{\max}$  altos

Inconveniente: orbitales 4f  $\Rightarrow$  permanecen paramagnéticos a T ambiente

$\Rightarrow$  Excepción del Gd con  $T_c = 293$  K

**Aleaciones ferromagnéticas de Co y Fe con lantánidos  $\text{SmCo}_5$  y aleaciones endurecidas por precipitación de composición  $\sim \text{Sm}(\text{Co}, \text{Cu})_{7.5}$**

$T_c \gg$  y  $[B \times H]$  es 3 [AlNiCo]

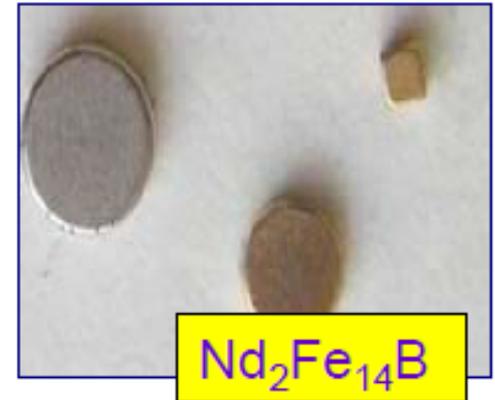
**\*Dispositivos biomédicos ; válvulas**

# MATERIALES MAGNÉTICOS DUROS:

## Aplicaciones

### Aleaciones magnéticas de Nd-Fe-B

- 1984, encarecimiento del precio del Co
- Búsqueda de nuevos imanes
- Poseen  $H_c$  aunque  $T_c$  no sea elevada  $\Rightarrow [B \times H] \gg \gg$



B, necesario para conseguir la anisotropía estructural, define un eje alargado

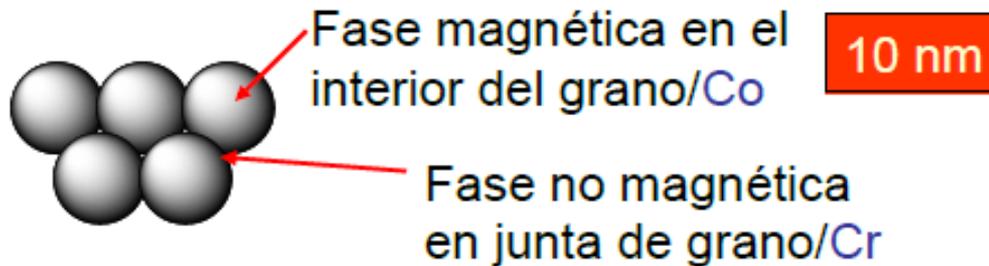
Fases intergranulares ricas en Nd no ferromagnéticas, alineados en los granos constitutivos de la matriz Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>

**Bajo Peso, compacticidad=> Motores eléctricos de arranque de automoción**

# MATERIALES MAGNÉTICOS DUROS: Aplicaciones

Aleaciones magnéticas de Co-Pt-Cr

Sputtering



Pt reduce tamaño de grano  $\Rightarrow$  mayor FnM  $\Rightarrow$  separa granos

Material y composición	Inducción remanente. $B_r$ , T	Campo coercitivo $H_c$ , kA/m
Fe-Cr-Co, 30 Cr, 10 Co, 1 Si, 59 Fe	1,17	46

Interacción débil de granos  $\Rightarrow$   
transiciones magnéticas definidas  
(bit de almacenamiento)

+

Tamaño cristalita  
pequeño

$\Rightarrow$

$\gg$  densidad de  
integración

Soporte magnético

# MATERIALES MAGNÉTICOS DUROS: Aplicaciones

## Sistemas magnéticos granulares

1990: 20Gb/ 500 Gb

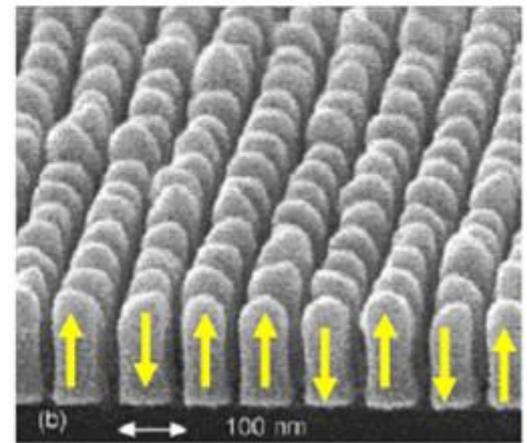
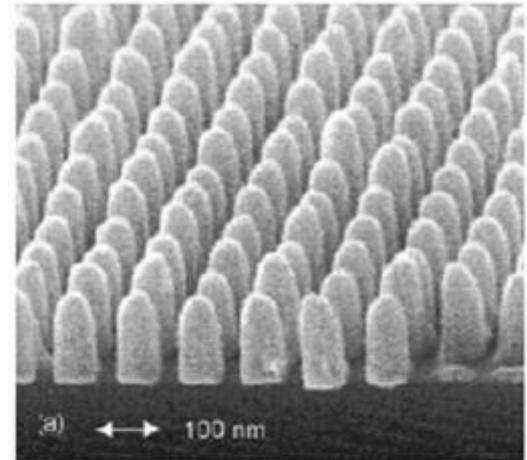
2003: 100Gb/ 2010: teras

Discos de aluminio + sistemas granulares de aleaciones ferromagnéticas separados por cabezales de lecto-escritura



Generan señales eléctricas que alteran los campos magnéticos del disco → información

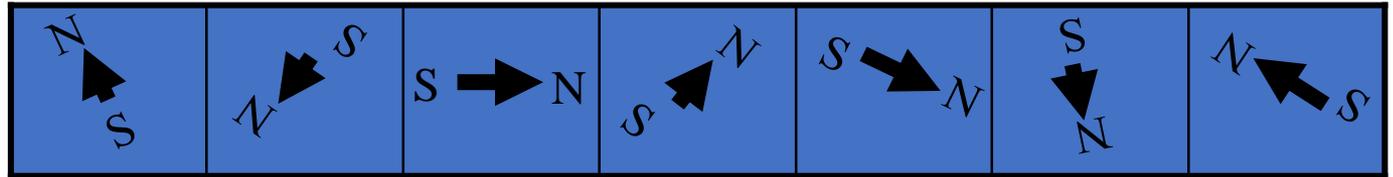
0 ó 1 en función a a orientación



1 0 1 1 0 1 0 1

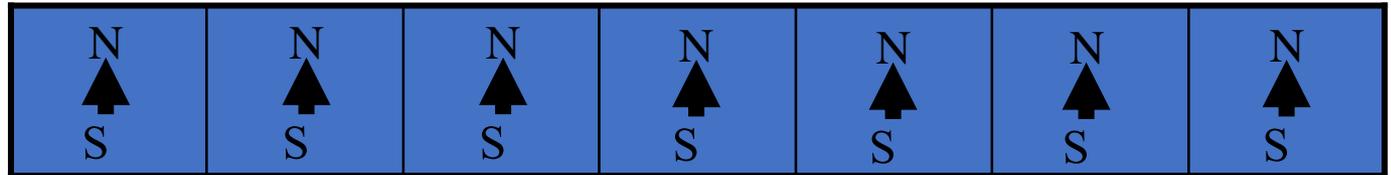
# Arreglos de spín en materiales paramagnéticos, ferromagnéticos, antiferromagnéticos y ferrimagnéticos

Paramagnético



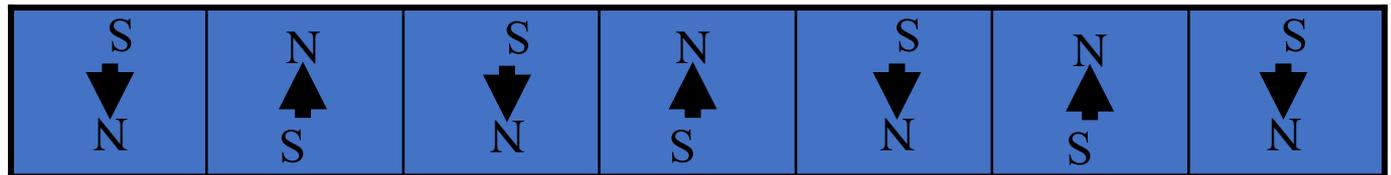
Orientados al azar

Ferromagnético



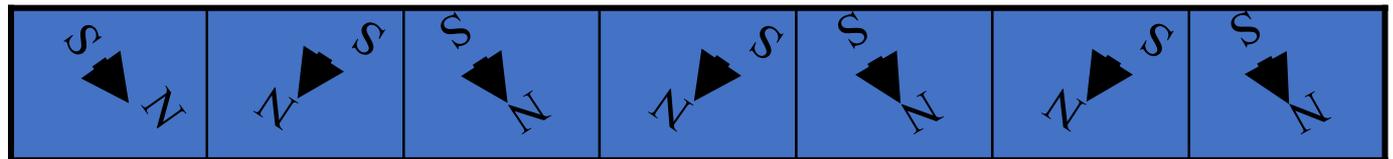
Orientados en una sola dirección

Antiferromagnético



Orientados en sentidos contrarios

Ferrimagnético



La alineación no es paralela