

Fue de casa en casa arrastrando dos lingotes metálicos, y todo el mundo se espantó al ver que los calderos, las pailas, las tenazas y los anafes se caían de su sitio, y las maderas crujían por la desesperación de los clavos y los tornillos tratando de desenclavarse, y aun los objetos perdidos desde hacía mucho tiempo aparecían por donde más se les había buscado, y se arrastraban en desbandada turbulenta detrás de los fierros mágicos de Melquíades. «Las cosas tienen vida propia —pregonaba el gitano con áspero acento—, todo es cuestión de despertarles el ánima.»

Cien años de soledad

García Márquez

Interacción de canje

- La interacción de canje fue descubierta independientemente por Heisenberg y Dirac en 1926 y está íntimamente relacionada con el del principio de exclusión de Pauli, (1925). Surge de forma natural al considerar la indistinguibilidad de algunas partículas: En mecánica clásica las partículas son distinguibles y se describen con la estadística de Maxwell-Boltzmann, en la mecánica cuántica no existe un procedimiento físico para distinguirlas o decir si una partícula observada en un instante es la misma que otra observada en un instante posterior. Esta circunstancia hace que el tratamiento cuántico adecuado de las partículas idénticas requiera la estadística Bose-Einstein, El Ferromagnetismo es consecuencia del alineamiento de los spin de átomos adyacentes.
- Fuerzas de canje dependen fundamentalmente de las distancias atómicas y no de posiciones atómicas: la cristalinidad no es condición para el ferromagnetismo.
- **La anisotropía magnética es la no homogeneidad de las propiedades magnéticas**

El ferromagnetismo **no es particularidad** de un tipo de estructura cristalina, como vemos en la tabla. Lo que es característico de estos materiales es la presencia de capas **d o f parcialmente llenas**.

Materia l	Configuración electrónica	Estructur a cristalina	M (0°K)	T, curie (°C)	T, fusión (°C)
Fe	$3d^6 4s^2$	bcc	1690	770	1535
Co	$3d^7 4s^2$	hc	1360	1130	1495
Ni	$3d^8 4s^2$	fcc	470	360	1455
Cd	$4f^7 5d^1 4s^2$	hc	5666	16	1312

ferromagnéticos

- *El ferromagnetismo es un fenómeno social, no existe el ferromagnetismo en átomos aislados, solo se da, cuando los átomos de la sustancia pueden interactuar entre ellos.*
- *Las dos siguientes diapositivas muestran particularidades de tres metales ferromagnéticos.*

Antes de comenzar con el tema en cuestión aclaremos algunas ideas: Entendemos por fase de una sustancia el cuerpo macroscópico homogéneo. En los puntos de solidificación o ebullición pueden coexistir dos fase, o sea, hay presentes dos tipos de materia homogénea. Algunos metales, por ejemplo el hierro, estaño presentan alotropía o polimorfismo, cristalizan en varias estructura cada una de ellas es una fase. Estas fase se ponen de manifiesto con los cambios de temperatura y son llamados cambios de fase en estado solido. El caso que nos interesa es el hierro puro en particular. El comportamiento de este elemento es particular. Tiene dos estados solidos la ferrita o hierro alfa de fase cúbica de cuerpo centrado (**bcc**), fase de baja temperatura. Posteriormente pasa a otra fase sólida de estructura cubica centrada en el las caras **fcc** a mayor temperatura llama hierro gama. Si aumentamos mas la temperatura tenemos otra transformación, también de estructura **bcc**, luego de la cual funde. En el diagrama que se adjunta se observa el comportamiento indicado. La zona de rallado oblicuo indica la zona ferromagnética y la de rallado horizontal, la zona paramagnética. En un tiempo se pensó que el hierro tenia tres fases de estado solido, posterior mente se vio que el cambio que se produce a la temperatura T_c no es un cambio de fase de primer orden como los mencionados. Se debe a la transformación ferromagnética-paramagnética. Dicho de otro modo la transformación magnética ocurre dentro de la fase alfa. Vemos que una misma fase puede ser ferromagnética o paramagnética.

Tratemos de explicar el comportamiento particular de hierro. Recordemos que la propiedad adecuada para definir el equilibrio de un sistema metálico, que nos ofrece la termodinámica es la energía libre F , que en el equilibrio tiene un mínimo : $F = E - TS$. Se trata de expresar estas variables en función de datos medibles. En un proceso lento, reversible a presión constante. Es este el procedimiento formal para encontrar la energía libre. Veámoslo con un poco mas de detalle, sabemos que

$$dE = dQ + dW = dQ = C_p dT \text{ si prescindimos del trabajo,}$$

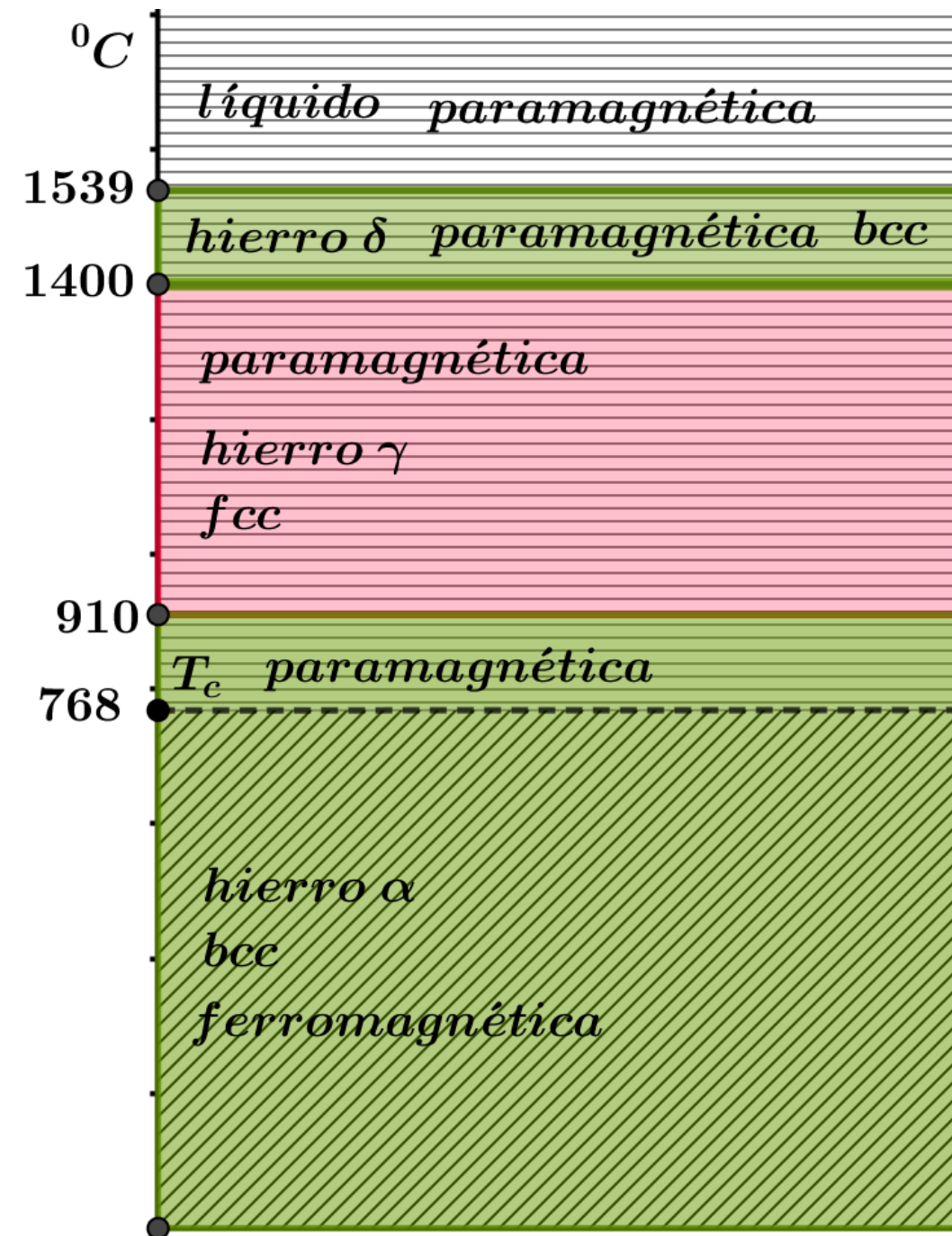
ya que en los metales es pequeño, recordamos que $dS = \frac{dQ}{T} = \frac{C_p dT}{T}$. La variación de la F sera

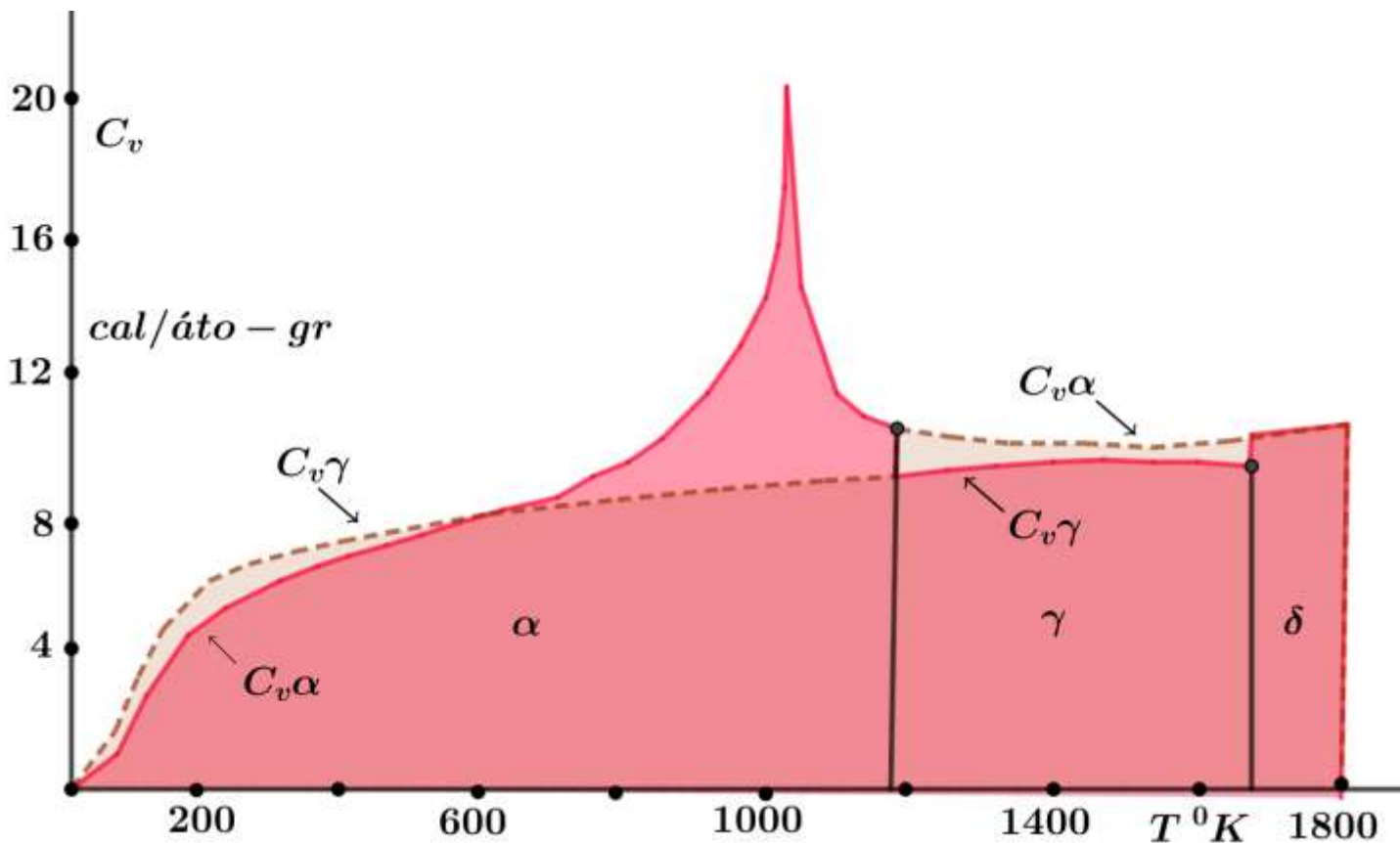
$$dF = dE - TdS - SdT = C_p dT - T \frac{C_p dT}{T} - SdT = -SdT$$

Integrando $F = F_0 - \int_0^T SdT$ siendo $F_0 = E_0$ (energía interna de interacción más energía de vibración a $0^\circ K$), también tenemos que $S = S_0 + \int_0^T \frac{C_p dT}{T}$, donde S_0 es la entropía a $0^\circ K$, (a esa temperatura no existe desorden y las vibraciones son mínimas) entonces $S_0 = 0$, por lo tanto

$$F = E_0 - \int_0^T SdT = E_0 - \int_0^T \left[\int_0^T \frac{C_p dT}{T} \right] dT$$

Vemos que al aumentar T la energía libre disminuye y más aun, cuando mayor es C_p . El balance entre E_0 y C_p determinaran en el caso de dos fases, cual tendrá menor energía libre, o sea cual será la estable.

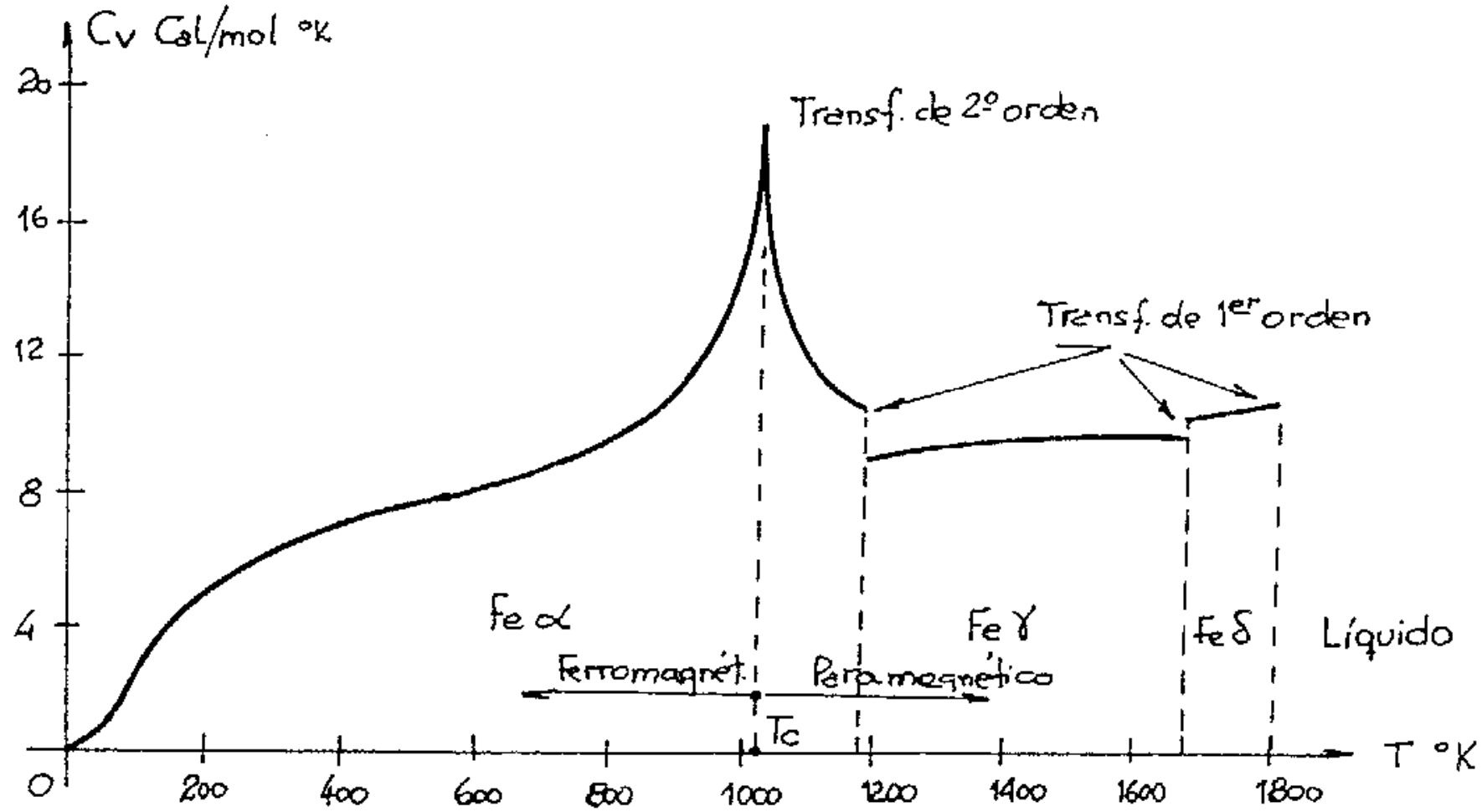




En general la fase estable a baja temperatura es la de menor energía interna o bien, la que tenga estructura más compacta. A temperatura altas el valor de la entropía y la temperatura son más importante, dando posibilidad a estructuras menos compactas.

El hierro puro tiene un comportamiento particular, la energía interna y la entropía por la presencia de la transformación de segundo orden (transformación paramagnética-ferromagnética) modifican esta situación. El esquema de la figura muestra los cambios en el calor específico de cada una de las fases. (Austin J. B. journal Ind. And Eng. Chem, 1932, 24, 1225)

Calor específico del Fe



Materiales magnéticos blandos y duros

El fundamento de la clasificación de los materiales magnéticos en blando(dulces) y duros se debe a las distintas aplicaciones de uno y otro. Un material magnético blando es fácilmente magnetizable y desmagnetizable, mientras que uno duro tiene propiedades totalmente distintas. Como sabemos estas propiedades están íntimamente ligadas al ciclo de histéresis de cada material. Un acero blando de hierro silicio ($3 - 4\% Si$), es utilizado en núcleos de transformadores, motores, generadores y tiene un ciclo de histéresis con baja fuerza coercitiva y un área pequeña, mientras que un material magnético duro posee un amplio ciclo de histéresis con una importante fuerza coercitiva. Su uso es frecuente en imanes permanentes.

Hierro silicio (fines 1800) La utilización de aleaciones de hierro silicio ($3 - 4\% Si$), trae aparejado los siguientes beneficios en las maquinas eléctricas:

- El agregado de silicio al hierro de bajo carbono, disminuye las perdidas por corriente parasitas.
- Aumenta la permeabilidad magnética y disminuye la anisotropía magnética bajando las perdidas por histéresis.
- También disminuye la magnetostricción bajando el clásico zumbido.

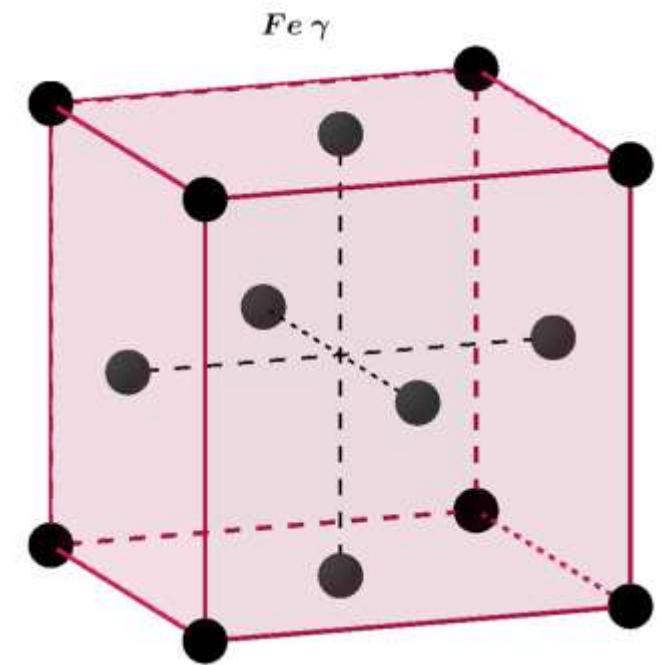
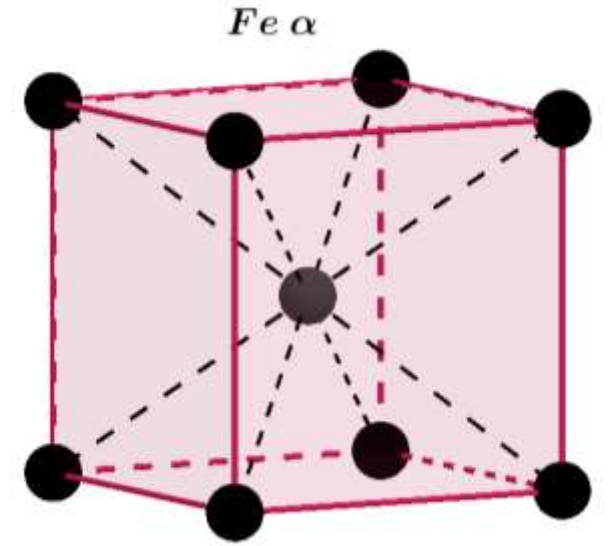
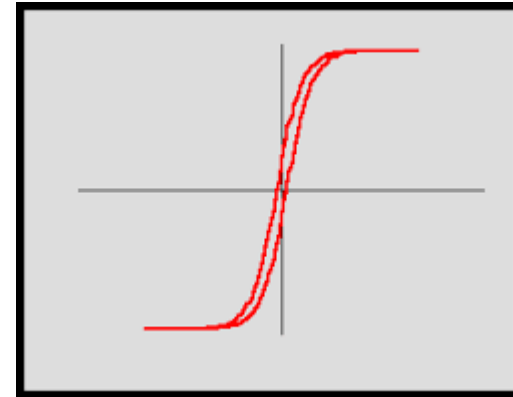
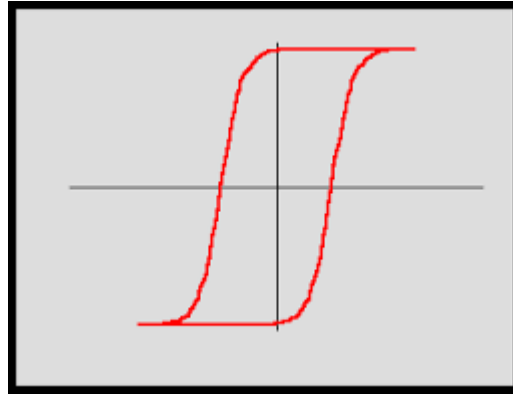
El efecto negativo del agregado de silicio es que disminuye la ductilidad de la ferrita y disminuye la temperatura de Curie. Es posible mejorar la característica del hierro silicio logrando la aleación con grano orientado. La presencia del C en el Fe lo endurece mecánica y magnéticamente, ya que genera cementita, Fe_3C , que impide el movimiento de paredes de dominios

Permalloy (1914) Es el nombre comercial de una aleación de aproximadamente $80\%Ni - 20\%Fe$, existen otras aleaciones, por ejemplo el permalloy 45 que contiene $45\%Ni - 55\%Fe$ o bien el permalloy-molibdeno es una aleación con el $81\%Ni - 17\%Fe - 2\%Mo$. Su uso es en transformadores reactancias etc.

Mumetal (1923) Es una aleación de aproximadamente $75\%Ni - 15\%Fe$ y $Cu - Mo$ tiene una permeabilidad muy alta, por lo cual es usada como pantalla para brindar campos magnéticos estáticos o de baja frecuencia. Su primera aplicación fue en los cables telegráficos submarinos.

Superpermalloy o supermalloy (inicios década 40): Es una aleación de $75\%Ni - 5\%Mo - 20\%$, con permeabilidad magnética alta y baja coercitividad. Algunas de sus propiedades son comparables con el Mumetal. Esta aleación requiere tratamientos térmicos a temperatura de $1300^{\circ}C$ en atmosfera de hidrogeno.

Vidrio metálico (1960 no magnético) Estos materiales son metales pero no tienen una estructura cristalina determinada, son amorfos. Se destacan por sus propiedades mecánicas: al no poseer dislocaciones son hasta tres veces más duros que los aceros. La ausencia de bordes de grano, conduce a una mayor resistencia al desgaste y a la corrosión. Son realmente vidrios auténticos, al calentarse se ablandan y fluyen. La primera aleación magnética fue llamada Metglas-2605 (**década de 1980**), con $80\%Fe - 20\%B$, con una temperatura de Curie $373^{\circ}C$ y una magnetización de saturación de 1,56 teslar. Sus propiedades magnéticas, como materiales magnéticamente blandos; son de baja coercitividad, elevada permeabilidad o alta magnetización de saturación permiten aplicaciones en núcleos de transformadores eléctricos. También son utilizados como biomateriales para implantes óseos o recubrimientos dentales, pues, no se oxidan fácilmente. Están confeccionados como base un material ferromagnético; hierro, cobalto o níquel aleados con boro, silicio, fosforo, entre otros.



	Hc	Bs [T]	Camp. coercitivo	(HB)max	
Magnetita piedra	30 Oe	0,3-0,4			
Acero, al carbono	50 Oe		505 Oe--4kA/m		
Acero -Cr	100 Oe—8kA/m				
Acero 30-40 Co, W, Cr	230 Oe	2,4		1MGOe	
FeCo nanoparticulas			2kOe—140kA/m		
Almico 58%Fe-30%Ni-12%Al			400 Oe—5,7A/m		

Imanes permanentes

Breve resumen de los principales materiales para los imanes permanentes. Estos materiales deben poseer la particularidad de mantener el campo magnético luego de ser magnetizado. El desarrollo de estos materiales se da por la necesidad de obtener importantes cantidades de energía magnética almacenada en pequeños volúmenes :

Alnico(1931) Es una aleación formada principalmente por Al-Ni-Co de donde deriva su nombre, generalmente tienen la siguiente composición 8 – 12%Al, 15 – 26%Ni – 5,24%Co, $\approx 6\%Cu$, $\approx 1\%Ti$, restoFe. Se lo fabrica por sinterizado o fundición y requiere un tratamiento térmico posterior. La temperatura de Curie es la mas alta hasta el momento $\sim 800^{\circ}C$, puede estar al rojo y sigue siendo magnético. Los imanes Alnico son conductores eléctricos, a diferencia de los imanes cerámicos. Hay una gran variedad de estas aleaciones, con distintos nombres comerciales. generalmente tienen una alta coercitividad, solo los imanes de tierras raras tienen mayor coercitividad. Algunas de la aleación son isotrópicas y pueden ser magnetizados en cualquier dirección. Otros, tales como alnico 5 y alnico 8, son anisotrópicas, y tiene una dirección preferente de magnetización. Las Aleaciones anisotrópicas generalmente tienen mejores propiedades magnéticas en la dirección elegida.

Imanes de tierras raras (lantánidos)

Recordemos que algunos cristales no presentan las mismas propiedades magnéticas según las distintas direcciones en que se las mida, o sea son anisótropos magnéticamente hablando. La anisotropía magnética es fundamental para construir imanes permanentes. En **1966** se descubre que una aleación de itrio-cobalto YC_5 tenía una constante de anisotropía magnética mucho mayor que los materiales conocidos a la fecha, dicho de otro modo, son fáciles de magnetizar en una dirección pero muy difíciles en las otras. Los lantánidos son generalmente ferromagnéticos, pero con un serio inconveniente para su uso industrial, tienen una temperatura de Curie que está por debajo de la ambiente. Este inconveniente puede ser solucionado formando compuestos con elementos de transición, como ser el hierro, níquel, cobalto, etc. Logrando de este modo temperaturas de Curie mayor que la ambiente.

Unos años después (se desarrollan los primeros imanes permanentes de tierras raras. Hasta el momento los mas conocidos son dos: los de samario-cobalto y los de neodimio.

- **Samario-cobalto (década del 70)** : existen dos tipos de aleaciones $SmCo_5$, Sm_2Fe_{17} Fueron los primeros de los imanes de tierras raras desarrollados. Tienen una alta coercitividad. Son resistentes a la corrosión y tienen una temperatura de Curie relativamente alta. Se los fabrica por sinterizado, pero el mayor inconveniente es que son relativamente frágiles. La alta coercitividad es lograda con el agregado de impurezas que anclan los dominios e impiden su movimiento, evitando la desmagnetización.
- **Neodimio(1980) $Nd_2Fe_{14}B$** Hasta el momento es el imán mas intenso construido con lantánidos, posee una temperatura de Curie mas baja que los confeccionados con samario-cobalto, por otro lado, deben ser protegidos contra la corrosión, se oxidan fácilmente.

Otras características de Fe

Ferrita: Este material cerámico es un caso exclusivo, por su diversidad y cualidades particulares. Las ferritas, en general son ferrimagnéticas no ferromagnéticas, o sea sus momentos magnéticos tienden a acoplarse antiparalelamente sin producirse cancelación entre ellos Al igual que ocurre con los materiales ferromagnéticos, se producen ciclos de histéresis cuando se aplica un campo externo. Se basan en óxidos de hierro. Su constitución es la siguiente ($FeO \cdot Fe_2O_3$), esta expresión nos indica que la ferrita contiene iones ferrosos (Fe^{2+}) y iones férricos (Fe^{3+}) en la proporción (1: 2) o aleado con pequeñas cantidades de bario, magnesio, níquel, zinc. Debido a que estos iones tienen aproximadamente el mismo tamaño que el ion Fe^{2+} es posible realizar importantes sustituciones sin cambios de la estructura cristalina. Es un material barato, resistente a la corrosión y estables. Se elaboro por primera vez en **1930**. Generalmente no contiene elementos en forma metálica, pero cumple con todas propiedades que poseen los metales ferromagnéticos. Es muy utilizado por tener dos propiedades que no se encuentra en los materiales ferromagnéticos comunes; gran resistencia eléctrica e importantes propiedades magnéticas Tienen una temperatura de Curie de aproximadamente $650^{\circ}C$ Este material presenta, según su composición, los dos tipos de comportamientos magnético de los materiales; blandos y duros:

Ferritas blandas
típicas

Óxidos de magnesio, zinc y hierro (MnO, ZnO, Fe_2O_3)

Óxidos de níquel , zinc y hierro (NiO, ZnO, Fe_2O_3)

Óxidos de níquel, cobre, zinc y hierro (NiO, CuO, ZnO, Fe_2O_3)

Ferritas duras
típicas

Óxidos de bario y hierro ($BaO, 6Fe_2O_3$)

Óxidos de plomo y hierro ($PbO, 6Fe_2O_3$)

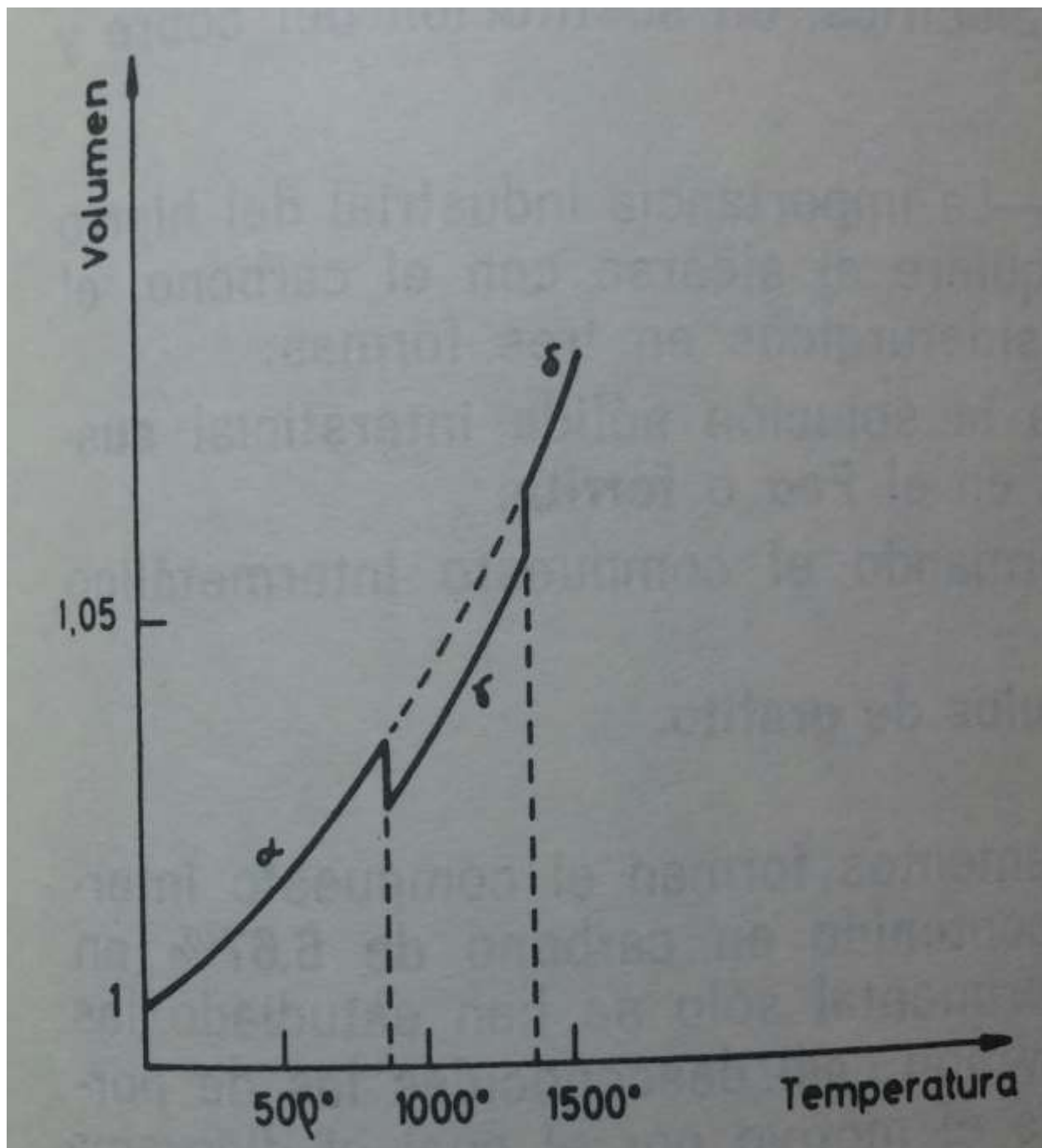
Ferritas duras, generan campos magnéticos intensos y permanentes, tienen estructura hexagonal en vez de la cubica o espinela que es la mas común en las ferritas. Posiblemente lo mas novedoso de este material es que sin ningún tratamiento especial, desarrollaba un ciclo rectangular de histéresis, puesto que los métodos para lograr ciclos rectangulares en los metales requieren introducir artificialmente una intensa anisotropía unidireccional.

Estructuras de la
Ferritas

Espinela, tienen estructura cubica, son materiales blandos, ciclos de histéresis estrecho, transformadores, reactancias, etc.

Granate, la resistencia eléctrica es muy elevada, por tanto se usa en microondas.

Hexagonales, son materiales duros, imanes permanentes



Caso del Fe

Generalmente cuando se baja la temperatura se pasa a una estructura más compacta con un volumen menor. Vemos que no es el caso de la transformación $\gamma \rightarrow \alpha$. Donde el **El Fe α** tiene el **68%** del volumen total de la celda unitaria ocupada por átomos de hierro. **El Fe γ** el **74%** del volumen total está ocupado por átomos de hierro. Podemos concluir, pues, que **El Fe γ** es **más denso** que el **Fe α** (para una misma cantidad de volumen, habrá más masa de Fe).