

00368

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE CIENCIAS
INSTITUTO DE INVESTIGACION EN MATERIALES



MECANISMOS DE MAGNETIZACION IRREVERSIBLE
EN MATERIALES POLICRISTALINOS

00368
1982

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
MAESTRIA EN CIENCIAS
(FISICA DE MATERIALES)
P R E S E N T A:

CARLOS ENRIQUE MEDINA SOTO
(INGENIERO ELECTRICISTA I. P. N.)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

I N D I C E

Introducción	1
Magnetismo en sólidos	1
Generalidades de las ferritas	8
Histéresis	11
Modelos	14
Dispositivo experimental	22
Principio básico	22
Diseño del circuito	24
Calibración	31
Ráfagas	36
Selección de muestras	43
Resultados experimentales	49
Conclusiones	62
Referencias	64

S I M B O L O S

M	=	Magnetización
H	=	Campo magnético externo
X	=	Susceptibilidad
T	=	Temperatura
T _c	=	Temperatura de Curie
B	=	Inducción magnética
M _s	=	Magnetización de saturación
M _r	=	Magnetización remanente
H _c	=	Campo magnético coercitivo
H _{cr}	=	Campo magnético crítico
P	=	Fuerza de anclaje
p	=	Presión magnética
S	=	Superficie
d	=	Diámetro
F	=	Fuerza de anclaje
f	=	Fuerza de anclaje por unidad de longitud
L	=	Perímetro de la membrana
r	=	Radio
V	=	Voltaje
Ø	=	Flujo magnético
t	=	Tiempo
H _z	=	Hertz [frecuencia]
i	=	Corriente
r _m	=	Radio medio
n	=	Número de espiras
R	=	Resistencia
e	=	Espesor
r _o	=	Radio Interior
R _o	=	Radio Exterior
A	=	Factor de amplificación

C = Capacitor
f_p = Factor de potencia
D_m = Diámetro de grano
C_c = Coeficiente de correlación
a = Coordenada al origen
b = Pendiente

INTRODUCCION

El fenómeno del magnetismo en los materiales juega un papel importante en nuestra experiencia diaria, pues se extiende desde los imanes permanentes usados para las puertas de refrigeradores, hasta los elementos de la memoria magnética de las computadoras más sofisticadas, pasando por los núcleos de transformadores, armaduras de los motores, electroimanes, etc.

MAGNETISMO EN SOLIDOS.

Una relación entre magnetización $[M]$ y Campo Magnético -- $[H]$ nos puede dar una clasificación de varias clases de magnetismo y cada una está caracterizada por su propia estructura magnética.

Como la susceptibilidad relativa (\bar{X}) depende de la intensidad del campo magnético, podemos interpretar el tipo de comportamiento de \bar{X} en términos de la estructura magnética del material y desde este punto de vista, podemos clasificar los diferentes tipos de magnetismo como sigue:

- a).- Diamagnetismo
- b).- Paramagnetismo
- c).- Ferromagnetismo
- d).- Antiferromagnetismo
- e).- Ferrimagnetismo

A continuación hacemos una breve descripción de cada uno de ellos.

Diamagnetismo.- Es un magnetismo débil, en el cual se muestra una magnetización opuesta a la dirección del campo aplicado; - la susceptibilidad es negativa y con un orden de magnitud de - aproximadamente 10^{-5} a 10^{-6} , ver Fig. 1a. El origen de este - magnetismo es una rotación orbital de electrones alrededor del núcleo inducida electromagnéticamente por la aplicación de un campo externo, ver Fig. 1b. Sabemos por la ley de Lenz, que - la corriente así inducida produce un flujo magnético que se -- opone a cualquier cambio en el campo externo. Entre las sus-- tancias que presentan este tipo de magnetismo se encuentran -- los gases raros monoatómicos He, Ne, A, Etc. y elementos como el C [diamante], Si, Ge, con ligadura covalente por el compor-- tamiento de electrones.

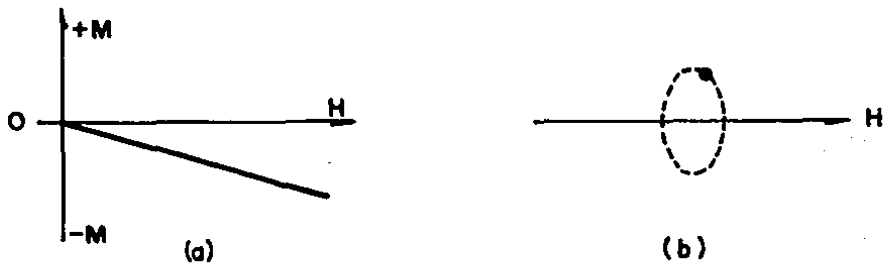


Figura N^o 1

Paramagnetismo.- En este tipo de magnetismo la magnetización- M es directamente proporcional al campo magnético H , ver Fig.- 2a. En la mayoría de los casos las sustancias paramagnéticas- contienen átomos magnéticos o iones cuyos espines están aislados de sus alrededores magnéticos y pueden cambiar con cierta-

libertad sus direcciones, ver Fig. 2b. A temperaturas finitas los espines son agitados térmicamente y toman orientaciones al azar, con la aplicación de un campo magnético las orientaciones promedio de los espines son ligeramente cambiadas y esto produce una débil magnetización inducida paralela al campo magnético aplicado, aquí la susceptibilidad es inversamente proporcional a la temperatura con una magnitud aproximada de 10^{-3} a 10^{-5} , ver Fig. 2c. Los elementos con capas interiores incompletas tales como los iones de los metales de transición y iones de tierras raras, pueden tener un momento neto elevado y compuestos de estos elementos son fuertemente paramagnéticos - así como FeSO_4 y MnCl_2 .

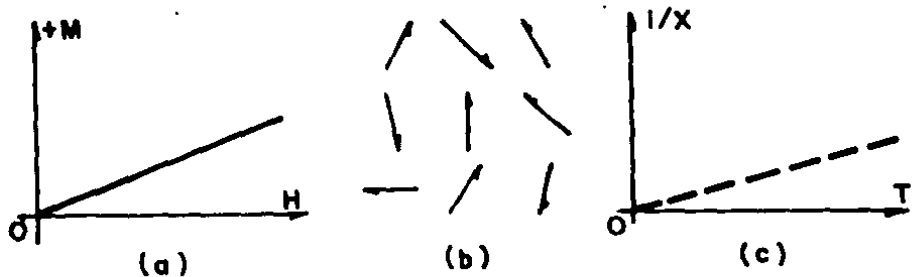


Figura N^o 2

Ferromagnetismo.- En el caso del ferromagnetismo, los espines están alineados paralelos uno al otro como resultado de una fuerte interacción positiva actuando entre vecinos, ver Fig. 3a; conforme la temperatura se incrementa, el arreglo de los espines es alterado por la agitación térmica, dando como resul

tado una dependencia de la temperatura de magnetización espontánea como se muestra en la figura 3b.



Figura N^o 3

Arriba del punto de Curie la susceptibilidad obedece la Ley de Curie-Weiss, la cual establece que $1/X$ incrementa desde cero en el punto de Curie e incrementa linealmente con la temperatura; el valor de la susceptibilidad magnética es positivo y elevado de acuerdo al valor del campo H aplicado. El ferromagnetismo se exhibe generalmente en los metales (Fe, Ni, Co) en sus aleaciones y en unos cuantos óxidos tales como CrO_2 y EuO .

Antiferromagnetismo.- Es un magnetismo débil el cual es similar al paramagnetismo en el sentido de que exhibe una pequeña susceptibilidad positiva; la dependencia de la susceptibilidad a la temperatura de este magnetismo es caracterizada por la --ocurrencia de un cambio en la curva $1/X - T$ a la denominada-temperatura de Curie. La razón para ésto es que abajo de la -temperatura de Curie se establece un arreglo de espines antipa-ralelos, por lo tanto los espines positivos y negativos se cen

celan completamente los unos a los otros, ver Fig. 4a. Debido a esto el arreglo antiferromagnético de espines y su tendencia a ser magnetizados por el campo externo es opuesto por una fuerte interacción negativa que actúa entre espines positivos y negativos.

La susceptibilidad decrece con un decrecimiento en la temperatura, contrario al comportamiento paramagnético usual; por encima de la temperatura de Curie el arreglo de los espines es azaroso, de tal manera que la susceptibilidad ahora decrece con un incremento en la temperatura, ver Fig. 4b. Como ejemplo de sustancias antiferromagnéticas tenemos las sales de los elementos de transición como: MnO , FeO , Cr_2O_3 , FeS , CoF , Etc.

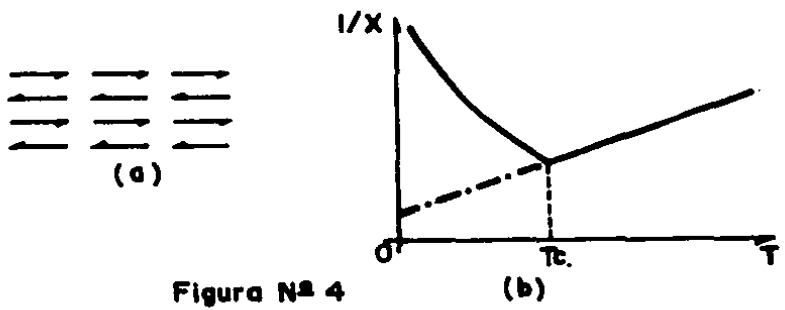


Figura N° 4

Ferrimagnetismo.- Es el término propuesto por Néel para describir el magnetismo de las ferritas. En estas sustancias los iones magnéticos ocupan dos clases de sitios en la red: A y B; espines en los sitios A apuntan en la dirección positiva, mien

tras que los mismos en los B apuntan en la dirección negativa, ver Fig. 5a; debido a una fuerte interacción negativa actuando entre los dos sistemas de espines sobre A y B. Por lo tanto - el número de iones magnéticos y también la magnitud de espines de los iones individuales son diferentes entre el sitio A y el B. Tal arreglo ordenado de espines da lugar a una magnetización resultante; puesto que tal magnetización es producida sin la acción de ningún campo magnético externo, esta es llamada - magnetización espontánea.

Conforme la temperatura se incrementa, el arreglo de los espines es alterado por la agitación térmica, lo cual es acompañado por una disminución de la magnetización espontánea. A cierta temperatura, llamada el punto de Curie, el arreglo de los espines viene a ser completamente al azar y la magnetización espontánea desaparece. Hay muchos tipos de dependencia - entre la temperatura y la magnetización espontánea, según la - intensidad relativa de la interacción entre sitios A-A, B-B y A-B. Uno de los tipos comunes de dependencia de temperatura - para las ferritas es mostrado en la Figura 5b.

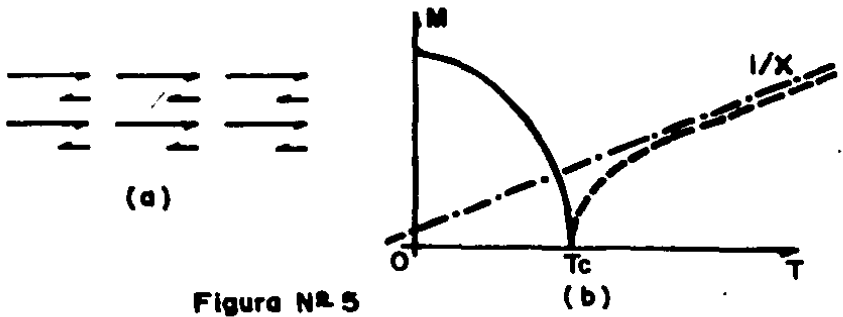


Figura N° 5

Sobre el punto de Curie, la sustancia exhibe paramagnetismo y la susceptibilidad decrece con el incremento de temperatura, ($\chi = F(H)$). En el caso del ferrimagnetismo, la gráfica de $1/\chi$ contra T es curvada como se muestra en la Figura 5b y la extrapolación lineal de la porción de alta temperatura generalmente interseca al eje de temperatura en el lado negativo.

El ferrimagnetismo es observado en varias clases de compuestos magnéticos como las ferritas, $MnFe_2O_4$, $ZnFe_2O_4$, - - - $CoOFe_2O_3$, $BaO.6Fe_2O_3$.

GENERALIDADES DE LAS FERRITAS.

Son materiales cerámicos magnéticos conocidos también como ferrimagnéticos; son óxidos de metales de transición cuya fórmula esté dada como: $M^{2+}Fe_2^{3+}O_4^{2-}$ ó $(MO.Fe_2O_3)$, donde la M- (MO) representa un catión divalente ó, como en el caso de las ferritas mixtas, una combinación de iones metálicos divalentes.

Entre los iones magnéticos más comunes de las ferritas en contramos a: Mn^{2+} , Fe^{2+} , Co^{2+} , Zn^{2+} , en la primera serie de -- transición de la tabla periódica.

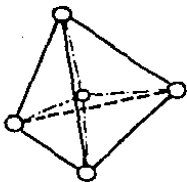
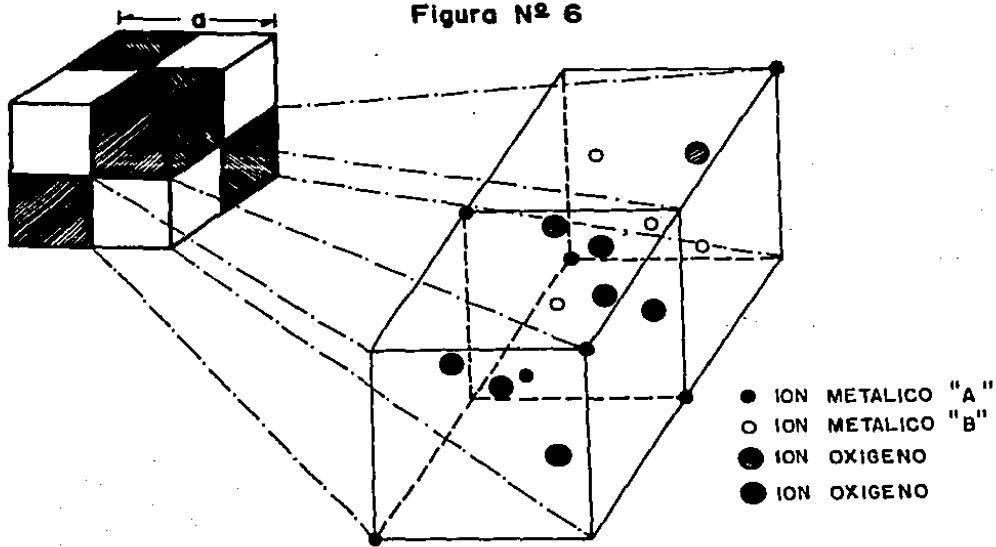
Para lograr una completa caracterización, es necesario de terminar las relaciones que existen entre su estructura, sus propiedades y su tecnología; su estructura nos presenta dos aspectos: la iónica y la granular.

Su estructura granular contribuye a las propiedades magnéticas del material (a través del diámetro granular medio) y -- también, pero con menos importancia, a través de las imperfecciones del mismo (tales como inclusiones, poros o precipitados de una fase no metálica).

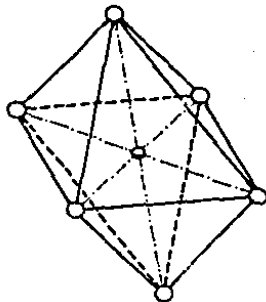
En la estructura iónica, la celda unitaria está formada -- por 8 moléculas, que forman los octantes del cubo, según se muestra en la Figura No. 6.

Tiene 32 iones de oxígeno ordenados en una red cúbica centrada en las caras (ccf). Esta distribución determina dos tipos de sitios intersticiales, los denominados sitios A que son tetraédricos y los sitios B que son los octaédricos, ver Figura No. 7.

Figura N^o 6



SITIO "A" TETRAEDRICO



SITIO "B" OCTAEDRICO

FIG. No. 7

Hay 64 sitios A y de éstos 8 están ocupados por los iones metálicos. Además hay 32 sitios B y 16 están ocupados también por iones metálicos.

Cuando los cationes divalentes (como los Zn^{2+}) residen en los sitios A y los hierros (Fe^{3+}) están en los sitios B, la estructura es llamada ESPINELA NORMAL; cuando los iones divalentes residen en los sitios B y los iones de hierro trivalentes (Fe^{3+}) están igualmente divididos a lo largo de las posiciones intersticiales B y A, la estructura es llamada ESPINELA INVERSA.

HISTERESIS.

Un ciclo de histéresis puede ser obtenido midiendo la intensidad de magnetización M o el campo de inducción B como una función del campo magnético externo aplicado H . Supongamos -- que una muestra se encuentre desmagnetizada inicialmente y es colocada dentro de una bobina según se muestra en la Figura No. 8.

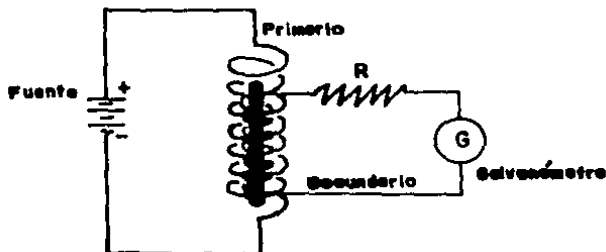


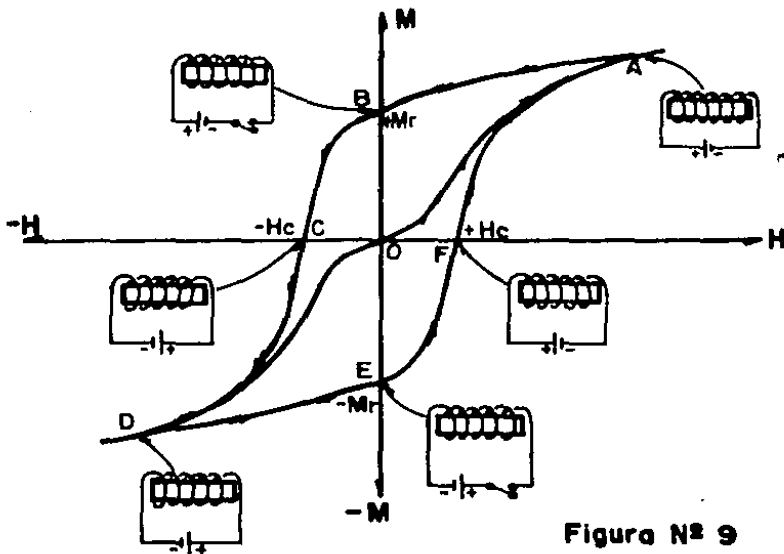
FIG. No. 8

Cuando una corriente circula por el primario (D.C.), se produce un campo magnético uniforme en la bobina y la muestra responde a ese campo desarrollando un momento magnético. Las líneas de flujo magnético asociadas con la magnetización de la muestra, inducen un voltaje en la bobina secundaria, el cual puede ser detectado por un galvanómetro conectado en serie con una resistencia a dicha bobina.

Cada vez que se invierte la polaridad de la fuente conectada al primario, el campo magnético inducido se invierte y la magnetización o flujo magnético en la muestra se invierte tam-

bién; cada vez que ésto se hace, un voltaje fijo es inducido en el secundario.

Por medio de esta técnica de inversión de polaridad en la fuente, podemos obtener el ciclo de histéresis magnético completo variando el campo magnético aplicado desde valores de cero a valores positivos y desde cero otra vez, hasta los negativos, obteniéndose así la Figura No. 9.



Cuando se aplica por primera vez el campo a la muestra y éste no es muy elevado, hay una región donde la muestra se comporta reversiblemente; pero si el campo es suficientemente in-

tenso, la curva toma la forma de "S" alargada y corresponde al tramo OA en la Figura 9, ésto significa que la intensidad de magnetización en la muestra se aproxima a la magnetización de saturación (M_s). Si eliminamos el campo magnético (H), la curva de magnetización no regresa a cero por la trayectoria inicial sino que sigue una nueva trayectoria [AB], indicando que la muestra permanece parcialmente magnetizada; en este punto la magnetización residual en la muestra es llamada magnetización remanente (M_r).

Ahora si el campo magnético es invertido, la muestra será forzada a desmagnetizarse continuando la curva AB hacia el punto C y creando así un campo denominado campo coercitivo (H_c); este campo es necesario para poder reducir la magnetización a cero.

Si este campo invertido se incrementa negativamente, la muestra empieza a desarrollar una magnetización negativa a lo largo de la curva CD en la gráfica y si el campo inverso es lo suficientemente alto para llevar a la muestra a saturación en sentido inverso, llegamos al punto D; si después el campo invertido se reduce a cero, la magnetización regresa hasta el punto E por la trayectoria DE obteniéndose así el valor de $-M_r$ (ésto se logra cuando se desconecta la fuente alimentadora).

Si el campo magnético se regresa a su polaridad anterior (invirtiéndola nuevamente), la magnetización cae a cero por la trayectoria EF y es necesario un campo crítico positivo ($+H_c$) para eliminar la magnetización remanente.

Si el campo magnético es continuamente incrementado, la muestra se saturará eventualmente siguiendo la trayectoria FA- y ahí la muestra ha regresado al mismo estado que se había producido por la magnetización inicial.

Si este cambio de polaridad en la fuente alimentadora se hace repetitivo, entonces la magnetización seguirá la curva -- cíclica mostrada en la Figura No. 9.

Cuando alimentamos el embobinado primario de la muestra - con una corriente alterna, entonces la inversión del campo magnético sobre la muestra se realiza cíclicamente de acuerdo a la frecuencia de la misma y esto nos representa el cambio de polaridad en la fuente alimentadora.

MODELOS.

Pierre Weiss⁽¹⁾ propuso que los materiales magnéticos están formados por pequeñas regiones y que cada una de ellas está en todo momento magnetizada; a estas regiones les llamó DOMINIOS MAGNETICOS.

Aunque cada dominio está magnetizado independientemente de sus vecinos (su orientación es diferente para cada uno), el material completo debe tener una magnetización cero cuando no está dentro de un campo magnético externo; al poner dicho material dentro de un campo externo, entonces, sus dominios toman una orientación preferente (la que tenga el campo externo) y la magnetización adquiere un valor diferente a cero.

Hay dos maneras de lograr que una estructura de dominios se magnétice: a).- Permitiendo la rotación de los dominios individuales, ver Fig. 10a. b).- Permitiendo que los dominios crezcan a costa de sus vecinos con orientaciones menos favorables o sea que se desplazan sus paredes, ver Fig. 10b.

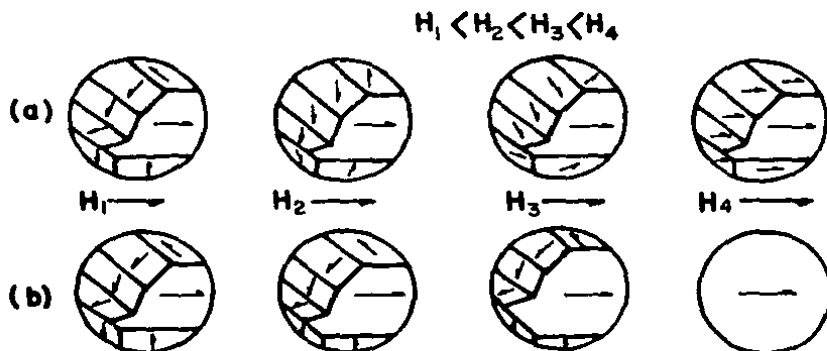


Figura N^o 10

Estos dos conceptos nos pueden explicar el fenómeno de -- histéresis; inicialmente cuando el campo magnético externo es pequeño, no se produce un crecimiento o rotación notable de -- los dominios, pero a medida que aumentamos el campo externo, -- las paredes de los dominios orientados favorablemente crecen -- o provocan el giro de los restantes y la inducción magnética -- aumenta rápidamente; cuando le damos el campo externo un valor muy elevado, entonces entramos a la región de saturación en la inducción, ahí se detiene el crecimiento de los dominios y se produce la rotación de los dominios restantes con alineación --

desfavorable; al eliminar el campo externo la muestra permanece magnetizada, aunque los dominios que giraron regresan a su posición anterior quedando únicamente los dominios grandes en la posición que tomaron debido al campo.

Al aplicar ahora en la muestra un campo en sentido inverso el fenómeno en los dominios se repite inversamente de tal manera que si la aplicación del campo en sentidos opuestos es repetitiva, se va a producir un ciclo de histéresis.

A. Globus^(2,3) propuso un modelo muy sencillo para explicar un ciclo de histéresis en los materiales magnéticos. Dicho modelo consiste en considerar un grano esférico que contiene dos dominios magnéticos separados por una pared o membrana, la cual está enclada en la frontera del grano dividiéndolo -- por mitad, ver Figura No. 11.

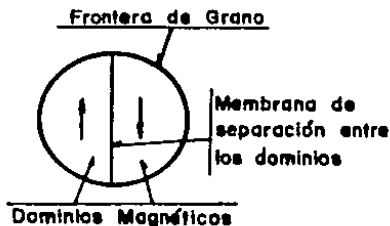


Figura N^o 11

También considere que esta membrana de separación es capaz de deformarse para uno u otro lado bajo la acción de un campo magnético externo aplicado al grano; puede desplazarse si dicho campo externo es lo suficientemente grande para provo

cer se desencalaje y quedar enclada en otra posición, que dependerá de la intensidad del campo magnético externo.

Por la simplicidad de este modelo y el comportamiento de la membrana, ésta puede asociarse al mismo comportamiento de una membrana elástica que está fija en los extremos y se le da forma al aplicarle una fuerza externa.

Este modelo presupone también que todos los demás granos que forman el material se comporten de la misma manera provocando una acción cooperativa.

Bajo la consideración de este modelo (que considera el mecanismo de magnetización dominante como el movimiento de paredes), puede explicarse también el ciclo de histéresis de la siguiente manera: partiendo de la consideración de que el grano está inicialmente con campo magnético externo cero y que la membrana está en su posición media inicial, ver Figura No. 12.

Al aplicarle un campo magnético externo pequeño, (menor que el campo crítico H_{cr}), la membrana sufre una deformación en dirección del campo aplicado poniéndose cóncava (recta OA de la Fig. 12); si dicho campo externo es incrementado hasta rebasar su valor crítico H_{cr} , la membrana sufrirá un desencalaje de su posición inicial desplazándose dentro del grano, hasta un punto donde el valor del campo externo aplicado sea tal que la fuerza de anclaje se iguale con la fuerza de empuje de la membrana (cualquier punto intermedio en la curva AB de la Figura No. 12).

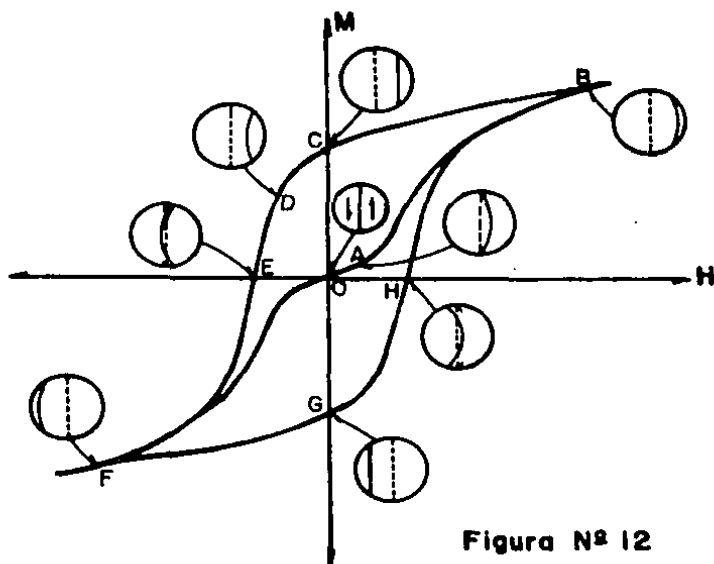


Figura N^o 12

En ese punto, la membrana vuelve a anclarse pero permaneciendo cóncava debido a la acción del campo externo, (punto B en la fig. 12); si eliminar el campo externo, la membrana se torna plana pero anclada en su nueva posición (correspondiendo al punto C en la fig. 12); si ahora dicho campo externo es invertido, la membrana sufrirá una fuerza de empuje en sentido contrario al anterior (punto D en la fig. 12) y si el valor -- del campo es tal que rebase la fuerza de anclaje, la membrana se desanclará y se desplazará en sentido contrario al anterior

hasta un punto tal que las fuerzas de anclaje y desanclaje se igualen otra vez (puntos E y F en la Fig. 12). En general en este movimiento la membrana rebasa la posición media inicial - en el grano debido a que esté en una situación de no equili--- brio y por la inercia del movimiento llega hasta el punto F de la figura No. 12, en donde las fuerzas de anclaje y desanclaje se han igualado.

Después de suceder ésto, si quitamos el campo externo inverso, la membrana retornará a su forma plana, pero en la nueva posición obtenida por el efecto del desplazamiento dado por el campo externo invertido (punto G en la Fig. 12).

Si repetimos el efecto de invertir nuevamente el campo -- magnético externo, la membrana tendrá el mismo comportamiento que el ya descrito anteriormente y pasamos al punto H de la -- misma figura No. 12, y si éste fenómeno lo hacemos en forma -- consecutiva, formaremos un ciclo repetitivo denominado ciclo - de histéresis.

Es importante hacer notar que en el grano se ejercen dos fuerzas diferentes; una fuerza de desanclaje P proporcionada - por el campo magnético externo, que cuando $H = H_{cr}$ es igual - a la presión magnética (p) por la superficie de la membrana -- (S), ver fórmula No. 1.

$$P = p S \quad \text{--- --- --- --- --- [1]}$$

$$\text{donde } p = 2 M_B H$$

$$S = \frac{\pi d^2}{4}$$

y la ecuación (1) queda:

$$P = 2 M_s H_{cr} \frac{\pi d^2}{4} \text{ ----- (1a)}$$

y la otra, la fuerza de anclaje [F] que se opone al desanclaje es igual a la fuerza de anclaje por unidad de longitud [f] por el perímetro de la membrana [L] unida al grano, ver fórmula No 2.

$$F = f L \text{ ----- (2)}$$

donde $L = \pi d$

quedando la ecuación (2) así:

$$F = f \pi d \text{ ----- (2a)}$$

igualando las ecuaciones (1a) y (2a) obtenemos:

$$P = F$$

$$2 M_s H_{cr} \frac{\pi d^2}{4} = f \pi d$$

y si $d = 2r$ se obtiene:

$$f = M_s H_{cr} r \text{ ----- (3)}$$

La ecuación (3) nos dice que la fuerza de anclaje de la membrana (f) dentro del grano, es proporcional a la magnetización [M_s] por el campo magnético externo [H_{cr}] y por el radio del grano, para el caso donde $H = H_{cr}$, ver Fig. No. 13.



Figura № 13

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.

Principio básico.- Debido a que un ciclo de histéresis se --- exhibe en una gráfica del campo magnético externo (H) contra - la inducción magnética del material (B), tenemos que combinar- estas características dentro de un dispositivo para obtener di- cho ciclo.

La particularidad del dispositivo consiste en considerar- la muestra del material (ferrite) como si fuera el núcleo de - un pequeño transformador, con dos embobinados, uno primario -- que recibe la señal de entrada y otro secundario que nos da la respuesta del comportamiento del material de acuerdo a las ca- racterísticas del mismo y de la señal de entrada.

Si a este pequeño transformador le proporcionamos en el - primario una señal de entrada suministrada por una fuente de - corriente continua, solamente vamos a tener una variación del- campo magnético externo sobre la muestra cuando la corriente - que pase por el conductor del embobinado va desde un valor ce- ro hasta un máximo. Cuando el máximo es alcanzado, el campo - magnético externo persiste pero sin variación alguna. Si aho- ra desconectamos la señal de corriente alimentadora, se obser- va que varía desde un máximo hasta cero y es en ese instante - cuando se vuelve a obtener en el embobinado primario otra va- riación del campo magnético externo, ver figura No. 14.

El mismo fenómeno pero en sentido inverso ocurriría si -- se invierte la conexión de la fuente alimentadora al primario.

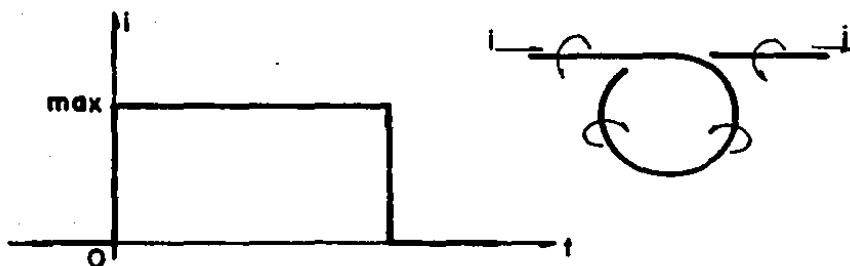


Figura Nº 14

Por la ley de la Inducción de Faraday se establece que en el embobinado secundario se induce un voltaje que es función de la variación de flujo del primario, ($V = f\{d\Phi\}$), por tanto para que esta variación de flujo ($d\Phi$) exista, siempre necesitamos cambiar la fuente alimentadora de corriente continua a otra de corriente alterna donde vamos a tener una inversión de la señal en función del tiempo y esto nos proporciona la variación del campo magnético externo necesario para obtener la señal de voltaje en el embobinado secundario en función de las características del material, ver figura No. 15.

Este efecto de inversión de la señal en función del tiempo es indicado como la frecuencia ($1/t$) a la cual se invierte la señal.

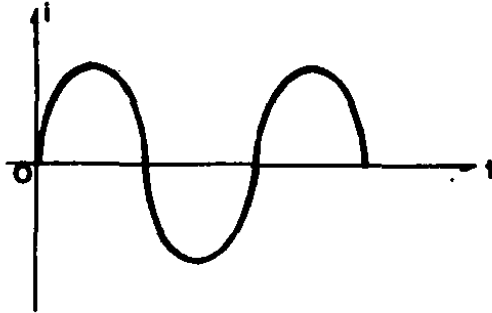


Figura N^o 15

De acuerdo al modelo de Globus esto implica que la membrana correrá de un sentido a otro de acuerdo a la frecuencia de inversión de la señal en el primario.

Para el caso en que existan en la muestra electrones libres (dependiendo del tipo de ligadura entre los átomos), entonces existirán en ella corrientes de "Eddy" y para frecuencias muy altas [MHz] se presenta el efecto adicional de relajamiento de espines, además el valor de resonancia de la membrana en el grano, fluctúa entre los 5 a 50 MHz^[4].

Diseño del circuito.- El diseño del circuito fué hecho pensando en las características de las muestras de ferrita a analizar.

Debido a que el campo magnético externo (H) es función de la corriente que es la señal de entrada a la muestra estamos, por decirlo así, colocando el efecto de este campo en la mues-

tra; como la inducción magnética del material (B) esté en función con el voltaje que es la señal de salida, estamos obteniendo por medio de éste el comportamiento del material. Las muestras son de forma toroidal a manera de poder usarlas como un pequeño transformador y así embobinarlas con facilidad; además, nos aseguramos que la inducción magnética circule por la muestra únicamente y no por otro medio, haciendo innecesario intervenir factores de desmagnetización, ver Figura No. 16.

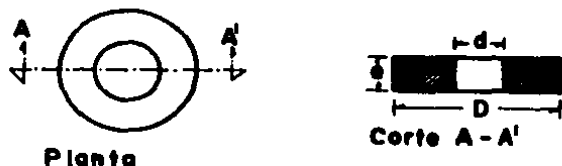


Figura N° 16

Como en el embobinado primario circula una señal de entrada que puede variar tanto en intensidad de corriente como en frecuencia, hubo necesidad de diseñar un equipo especial para suministrar y controlar estos parámetros. Dicho equipo consistió en un Generador de Señales, un Amplificador de Voltaje y un Amplificador de Potencia, todos conectados en serie con el embobinado primario de la muestra y éste a su vez se conecta en serie a una resistencia con un borne a tierra; entre la resistencia y el embobinado se saca una terminal que va hacia el eje X del osciloscopio, cuya finalidad es obtener de ahí un --

voltaje que es proporcional al campo aplicado.

En el embobinado secundario de la muestra se manifiesta - el efecto de la inducción magnética del material y nos proporciona una señal de salida que es un voltaje; debido a que su intensidad es pequeña, para poder detectarlo se diseñó un amplificador de voltaje que fué conectado en serie con el embobinado.

La frecuencia de diseño fué 1 KHz, la cual está muy por - abajo de los fenómenos de relajamiento⁽⁴⁾ en la ferritas y también muy por encima de la frecuencia de la red (60 Hz).

Debido a que esta señal (voltaje secundario), debe ser en viada al eje Y del osciloscopio, para que tenga efecto en el - mismo desde el origen, se hace pasar por un integrador y posteriormente por un scopliador. El diagrama completo del circuito diseñado para este dispositivo se muestra en la figure No. 17.

Después de haber diseñado el circuito completo del equipo, se procedió a imprimir cada uno de estos en una placa de fibra de vidrio con una película de cobre para hacer los circuitos - integrados; posteriormente se reunieron y soldaron en la placa los demás elementos necesarios (resistencias, capacitores, diodos, amplificadores operacionales, etc.), para obtener así los dispositivos completos, ver Foto No. 1.

En un chasis se montó el Generador de Funciones, el Amplificador de voltaje, el Amplificador de potencia y se sacaron - dos bornes para conectar el embobinado primario de la muestra;

HISTERESISCOPIO

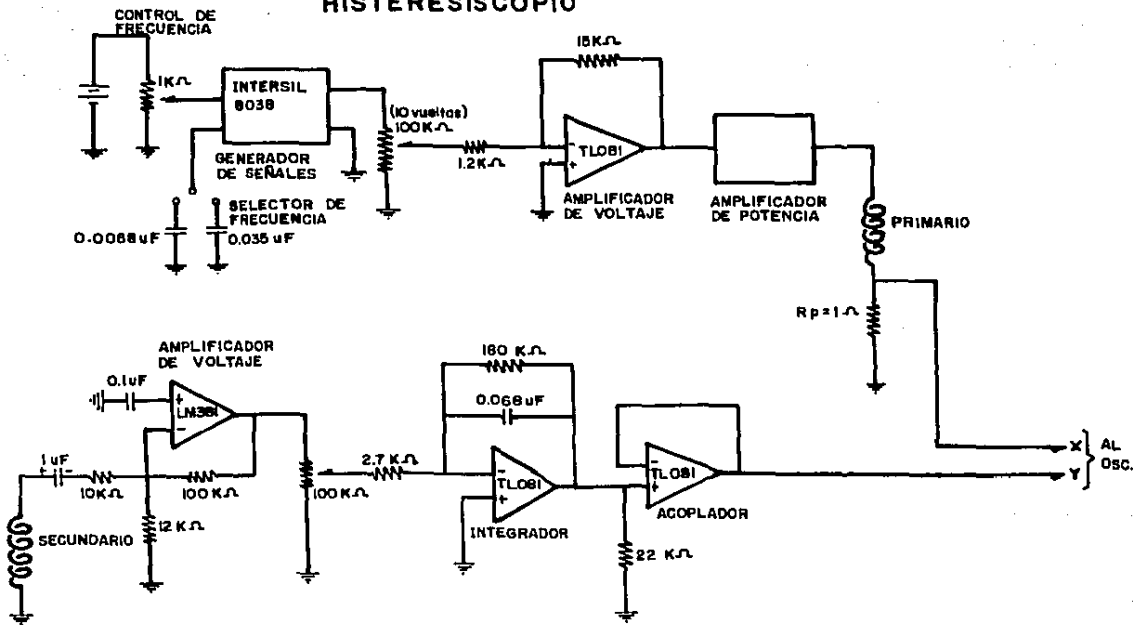


Figura N° 17



FOTO No. 1

Circuito integrado del Amplificador de voltaje, Integrador y Acoplador.

también se instaló la otra sección del Amplificador de Voltaje, Integrador y Acoplador con otros dos bornes para el embobinado secundario de la muestra, además se colocaron cuatro bornes más para enviar la señal al osciloscopio, ver Foto No. 2.

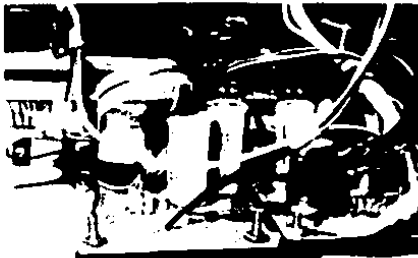


FOTO No. 2

Circuito Integrado del Generador de Señales, Amplificador de Voltaje y Amplificador de Potencia.

Debido a que los transformadores de alimentación cuando se instalaron en el mismo chasis nos produjeron vibración en la imagen obtenida en el osciloscopio, se procedió a separar

FUENTE DE PODER REGULADA

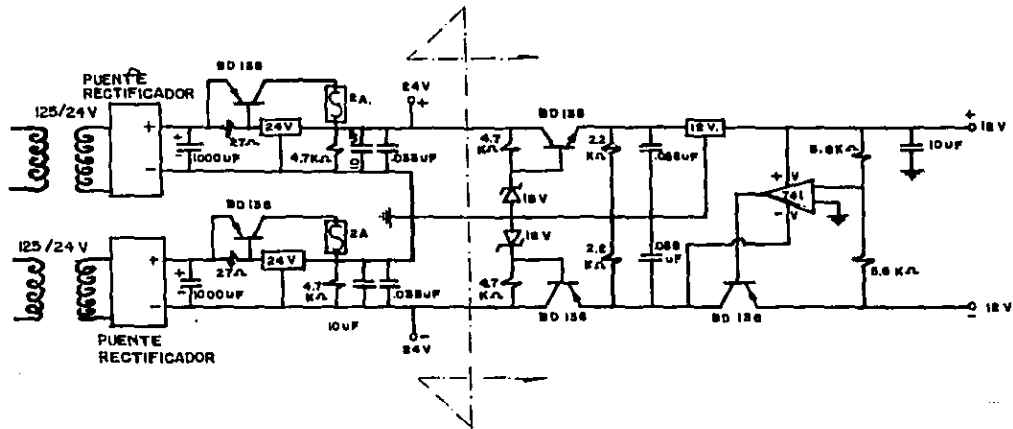


Figura N° 18

del mismo y se diseñó una fuente de poder regulada que se instaló en su propio chasis y cuyo diagrama se muestra en la Figura No. 1B; la Foto No. 3 nos muestra el circuito integrado del mismo.



FOTO No. 3

Fuente de Poder Regulada.

En la Foto No. 4 se muestran cada circuito integrado montado dentro de su chasis correspondiente, integrando así el Histeresiscopio y la Fuente de Poder Regulada, así como también la distribución del equipo cuando se hicieron las mediciones.



FOTO No. 4

Distribución del Histeresiscopio, la Fuente de poder regulada y el Osciloscopio.

Calibración.- Se mencionó anteriormente que la señal de entrada al embobinado primario de la muestra es la intensidad de corriente que se mide a través de la resistencia R_p (ver circuito de la Fig. 17) y que ésta se encuentra relacionada con el campo magnético externo (H), esto es por medio de la fórmula:-

$$H = \frac{n_p i_p}{2 \pi r_m} \quad \text{--- --- --- --- ---} \quad (4)$$

por la Ley de Ohm sabemos que: $i = \frac{V}{R}$

por lo tanto la ecuación (4) queda:

$$H = \frac{n_p V_p}{2 \pi r_m R_p} \quad \text{--- --- --- --- ---} \quad (4a)$$

y despejando el voltaje se obtiene:

$$V_p = \frac{H 2 \pi r_m R_p}{n_p} \quad \text{--- --- --- --- ---} \quad (5)$$

donde: r_m = radio medio de la muestra

n_p = No. de espiras del primario

i_p = corriente del primario

R_p = resistencia en el primario = 1 ohm.

En las terminales del secundario se obtiene un voltaje V_s que está dado por la fórmula:

$$V_s = - n_s \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{--- --- --- --- ---} \quad (6)$$

debido a que el flujo inducido en el material por el embobina-

do primario está dado por:

$$d\phi = -B \, de \quad \text{--- (7)}$$

donde B = inducción magnética; las dimensiones de la muestra son las que se muestran en la Figura No. 19.

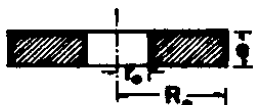


Figura N^o 19

entonces: $de = e \, dr \quad \text{--- (8)}$

que sustituyendo en (7) obtenemos:

$$d\phi = -B \, e \, dr \quad \text{--- (7a)}$$

sustituyendo (7a) en (6) y despejando tenemos:

$$V_s \, dt = n_s \, B \, e \, dr \quad \text{--- (9)}$$

integrando desde r_0 hasta R_0 y despejando se tiene:

$$B = \frac{\int V_s \, dt}{n_s \, e \, [R_0 - r_0]} \quad \text{--- (10)}$$

es importante notar que el voltaje V_s que está en la integral de la ecuación (10), representa el voltaje de salida del bobinado secundario, ver Figura No. 20, y debido a que el voltaje que entra al osciloscopio es el voltaje integrado V_i , la --

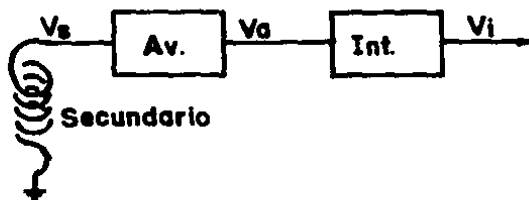


Figura N° 20

Integral anterior deberá modificarse de la siguiente manera:

$$V_s = A V_e$$

$$y \quad V_i = \frac{1}{RC} \int V_s dt = \frac{A}{RC} \int V_e dt \quad \text{--- [11]}$$

$$\text{despejando} \quad \int V_s dt = \frac{V_i RC}{A} \quad \text{--- [11a]}$$

donde R = Resistencia

C = capacitor

A = factor de amplificación (9.4)

y sustituyendo en la ecuación (10) obtenemos:

$$B = \frac{V_i R C}{A n_s e (R_o - r_o)} \quad \text{--- [12]}$$

con esta ecuación (12) podemos conocer la Inducción Magnética del material; si damos el valor de B como conocido en esta ecuación, entonces obtendríamos el valor de V_i el cual debe ---

ajustarse en el osciloscopio; despojando de (12) tendríamos:

$$V_i = \frac{B A n_s e (R_o - r_o)}{R C} \text{ ----- (12a)}$$

Si enviamos los resultados de las ecuaciones (5) y (12a) a los ejes X e Y del osciloscopio respectivamente, podemos obtener el ciclo de histéresis del mismo.

Para poder realizar con más facilidad los cálculos necesarios para cada muestra, nos auxiliamos de una calculadora Merca "HEWLETT-PACKARD", HP-41C, donde se pasaron los datos usando los siguientes programas:

```

01  LBL  HYST  <H>
02  0 = ? <<mm >
03  PROMPT
04  d = ? < mm >
05  PROMPT
06  + [suma]
07  np = ?
08  PROMPT
09  - [división]
10  0
11  - [división]
12  1/X [inverso]
13  STO 01
14  LBL 01
15  Vp = ? <volts>
16  PROMPT
17  RCL 01
18  * [producto]
19  H <Dersted > =
20  ARCL X
21  AVIEW

```


22 STOP
23 GTO 01
24 END.

01 LBL HYST
02 D = ? <mm>
03 PROMPT
04 d = ? <mm>
05 PROMPT
06 - [resta]
07 e = ? <mm>
08 PROMPT
09 * [producto]
10 $n_e = ?$
11 PROMPT
12 * [producto]
13 2.56 E -6
14 * [producto]
15 STO 03
16 LBL 02
17 B = ? <gauss>
18 PROMPT
19 RCL 03
20 * [producto]
21 V_i [volts] =
22 ARCL X
23 AVIEW
24 STOP
25 GTO 02
26 END.

Refegas.- Las muestras de ferritas son tratadas como pequeños transformadores de tal manera que al aplicarle una corriente alterna al embobinado primario produce un campo magnético, el cual genera una inducción magnética en la muestra que es detectada en el embobinado secundario por medio de un voltaje.

Este tratamiento de las muestras puede producir un calentamiento considerable si existen cargas libres (corrientes de "Eddy"), lo que conduciría a cambios importantes en las características del ciclo de histéresis obtenido ya que tanto el campo coercitivo como la magnetización (ó inducción magnética), son función de la temperatura, ver figura No. 21.

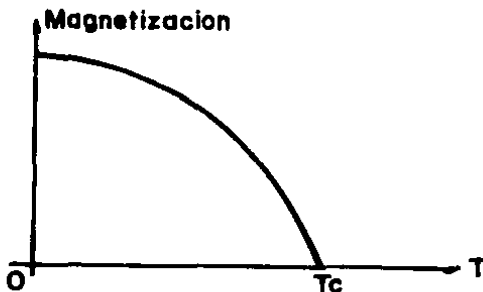


Figura N° 21

Para evitar estos cambios en las características del ciclo de histéresis se propone en este trabajo un sistema de medición que permite reducir considerablemente el calentamiento en las muestras. Dicho sistema contiene los siguientes equi-

pos:

- 2 Generadores de funciones (HP 3310A y B)
- 1 Amplificador de potencia (Philips Mod. LBB 1952)
- 1 Amplificador Philips de banda ancha (DC-1MHR Mod. PM5170)
- 1 Amplificador operacional (Tektronix)
- 1 Osciloscopio (SOAR Mod. MS-6020)
- 1 Graficador (Metrohm Labograph E-47B)
- 1 Multímetro Digital (Keithley Mod. 191)

La Foto No. 5 nos muestra la disposición del mismo para su utilización:

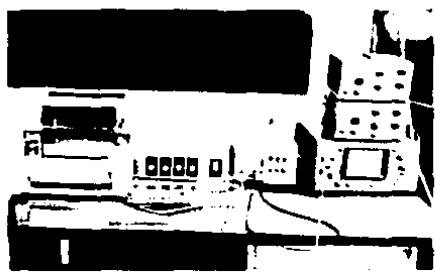


FOTO No. 5

Equipo para medición en el sistema de ráfagas.

y su diagrama esquemático de funcionamiento es el siguiente, -- ver Figura No. 22.

El generador de ráfagas nos proporciona una señal repetitiva durante un período T_1 (que corresponde al 15% del total); dando un período T_2 (que corresponde al 85% del total) de descanso a la misma; la suma de los períodos T_1 y T_2 nos da en realidad el período total T de la función generada.

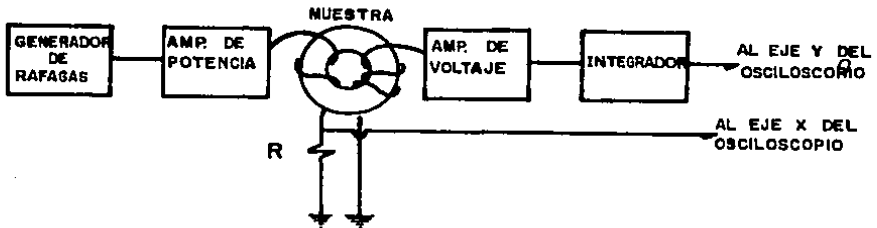


Figura N° 22

El amplificador de potencia suministra un Factor de potencia F_p que amplifica la señal proporcionada por el generador de ráfagas, misma que circula por el embobinado primario de la muestra y posteriormente es disipada por una resistencia que - esté en serie con el embobinado.

Entre el embobinado y la resistencia se saca un borne que va al eje X del osciloscopio.

En el embobinado secundario se detecta una señal de voltaje debido a la inducción magnética pero como esta señal es muy débil, el amplificador de voltaje la hace detectable por medio de un preamplificador y un acoplador; conectado en serie a --- éste hay un integrador que actúa como un operador integral sobre la función de voltaje y la señal integrada es enviada al - eje Y del osciloscopio. En el osciloscopio se reciben las dos señales (ejes X e Y) y se grafican en forma de un ciclo de hig téresis.

La muestra se colocó dentro de una cajita térmica para evitar fugas o contribuciones externas a la temperatura de la misma; sobre ella se instaló un termopar para detectar las variaciones de su temperatura y sus terminales se conectaron a una graficadora para obtener los resultados del experimento.

La Foto No. 6 nos muestra una imagen tomada sobre el osciloscopio del ciclo de histéresis que presenta la muestra al ser aplicada la señal en el primario en forma continua.

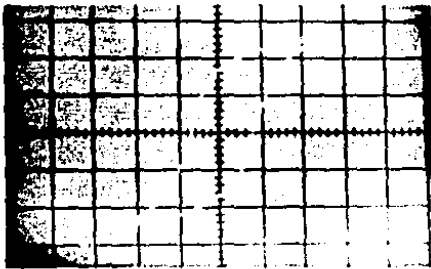


FOTO No. 6

Ciclo de histéresis
para señal continua.

La Foto No. 7 muestra otra imagen del ciclo de histéresis pero cuando la señal de entrada al primario es aplicada en forma de ráfagas.

La Foto No. 8 nos ilustra el tipo de señal que es aplicada al primario en forma de ráfaga.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

a).- Después de probar con varias muestras, se observó que la aplicación de la señal de una manera continua presenta en la

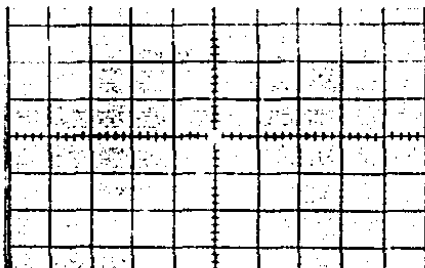


FOTO No 7

Ciclo de histéresis -
para señal en ráfagas.



FOTO No. 8

Señal de entrada.

muestra un calentamiento mayor que en la aplicación por ráfagas; esto lo ilustra la Figura No. 23.

b).- La señal aplicada al primario debe ser de un 15% de aplicación efectiva y descansar un 85% del total.

c).- Para el caso de cambiar la frecuencia, el fenómeno se sigue cumpliendo siempre y cuando al inicio (b) sea conservado rigurosamente.

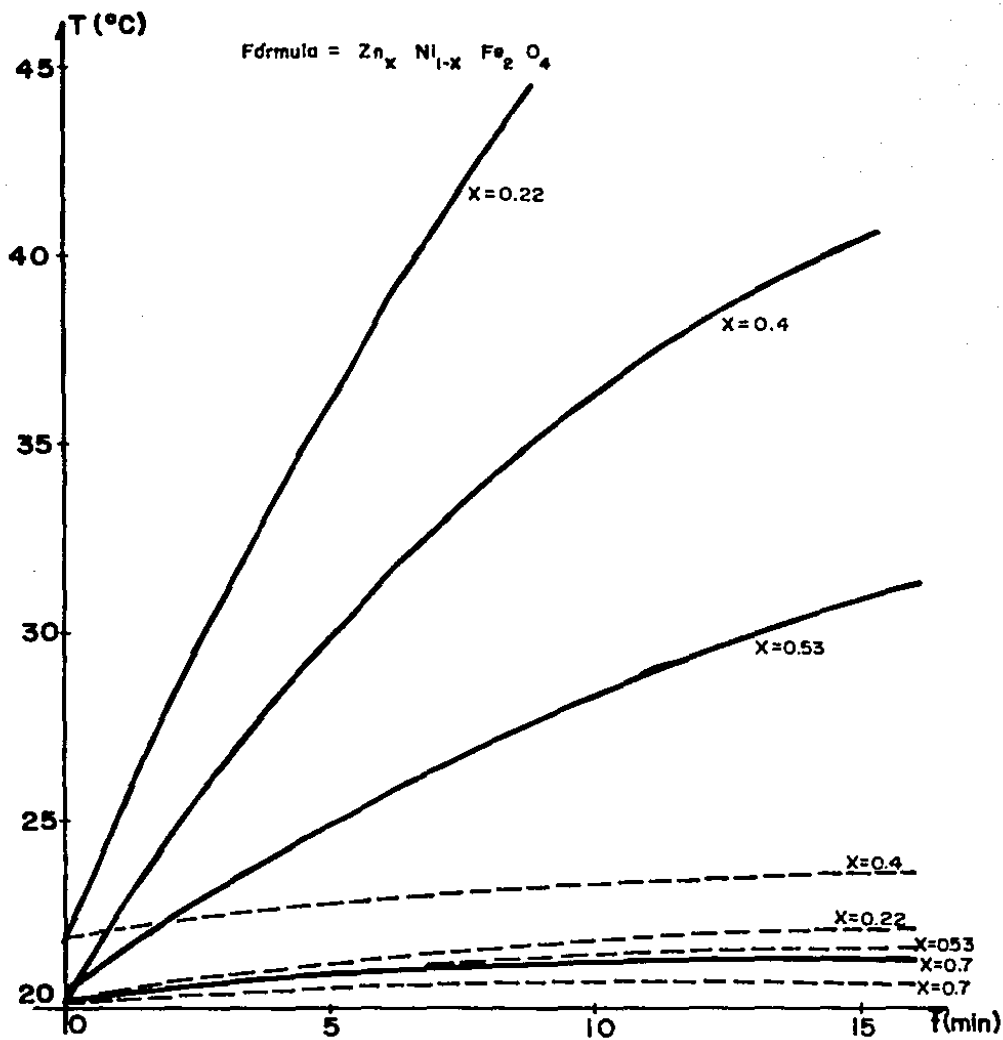


Figura Nº 23

Este fenómeno de calentamiento es muy importante para el caso de muestras con resistividad baja y/o campos coercitivos muy altos, lo que nos conduce a H aplicados muy elevados.

Las muestras que fueron tratadas por éste método (ráfaga--gas), tienen por fórmula $Zn_x Ni_{1-x} Fe_2O_4$, donde x toma los valores de 0.22, 0.40, 0.53 y 0.70; y por la figura No. 23, -- puede observarse que a mayor valor de x el calentamiento en la muestra disminuye.

Debido a que nuestros experimentos con el Histeresiscopio se hicieron con muestras con un valor de $x = 0.70$, no tuvimos en ellas un calentamiento detectable (según se puede observar en la Fig. 23), por lo tanto no hubo necesidad de usar el método de ráfagas en nuestros experimentos.

SELECCION DE MUESTRAS.

Se dispone de una cierta cantidad de muestras preparadas anteriormente.^[5] Con objeto de caracterizarlas, se utilizó su temperatura de Curie, la cual puede determinarse por medio de diversas técnicas.^[6, 7, 8]

Estas técnicas para la determinación de la temperatura de Curie de las muestras ferrimagnéticas, están basadas en los -- cambios de una propiedad física durante el paso a través de la temperatura de transición; generalmente el cambio de esta propiedad física en estos materiales durante la transición es pequeña y puede detectarse únicamente con un equipo muy sensible.

Para determinar esta temperatura de transición pueden ser usadas mediciones de la resistividad,^[6] dilatación^[7] así como contribución magnética al calor específico^[8]; esta contribución magnética, crece conforme la temperatura se aproxima a la de transición y desaparece cuando se alcanza el punto de -- Curie; pero la medición del calor específico es generalmente -- lenta y difícil de realizar.

Otra técnica que es simple y rápida es el DSC^[9] (Differential Scanning Calorimetry), con las ventajas de que necesita una cantidad muy pequeña de muestra sin importar su forma; -- pero aún así hay muy pocos resultados reportados sobre materiales ferro y ferrimagnéticos, además que la temperatura de transición aquí se representa por una desviación muy pequeña en la curva.

Existe una más que esté basada en la medición continua de la permeabilidad magnética inicial⁽¹⁰⁾ como una función de la temperatura.

La determinación de la temperatura de Curie a partir de la curva de permeabilidad es obviamente más fácil, pues ésta propiedad pasa desde un máximo hasta aproximadamente la unidad (o sea que es fácilmente observable la zona de transición), -- con la ventaja de que además nos permite una evaluación de la homogeneidad química de la muestra basada en la pendiente de la curva a la temperatura de Curie.

Cuando la caída es muy vertical, nos indica que la muestra es homogénea y la pérdida de su permeabilidad magnética es la misma en todos sus puntos; si la caída se desvía de la verticalidad, significa que el punto de Curie no es exactamente el mismo para todos los puntos de la muestra y se puede decir que no es muy homogénea dependiendo de qué tan inclinada sea la caída en la gráfica, ver figura No. 25.

Para este método, las muestras deben de tener una forma tal que pueden embobinarse y ser tratadas como pequeños transformadores, ver Foto No. 8.

Las muestras de ferritas fueron preparadas por el método normal⁽⁵⁾ de cerámicas, a partir de la mezcla estequiométrica de los óxidos correspondientes, a una temperatura de sinterizado relativamente baja (1145°C) para evitar la volatilización del Zinc.



FOTO No. 9

Muestra de ferrita -
embobinada para su -
conexión.

El tiempo de sinterizado fué variado desde 14 horas hasta 144 horas para obtener un espectro amplio de tamaño de grano. - Se les dió la forma toroidal para simplificar las mediciones - de la permeabilidad magnética y poderlas embobinar como un pequeño transformador.

Las composiciones de las muestras fueron determinadas a - partir de la siguiente fórmula:

$(Zn_{0.7} Ni_{0.3})_{50} (Fe_2O_3)_Y$ donde la única variable es Y tomando los siguientes valores: 49.8, 50.0, 50.5 y 56.0.

Cuando Y = 50.0, se tiene la mezcla estequiométrica; si Y es mayor que 50.0 se tiene un exceso de óxido trivalente y si Y es menor que 50.0, el exceso es de óxido divalente.

La permeabilidad magnética fué medida inicialmente a temperatura ambiente hasta llegar a la temperatura de transición en un aparato especialmente adaptado⁽¹¹⁾ para estos materiales; las muestras fueron colocadas dentro de un recipiente de hie-

erro de gran masa [comparado con las muestras], para evitar variaciones bruscas de calor en las muestras, introduciéndolas - luego en un horno para aumentar su temperatura.

El diagrama del equipo utilizado es el mostrado en la figura No. 24, donde:

- (1).- Generador de funciones
- (2).- Amplificador de voltaje
- (3).- Multímetro [volts]
- (4).- Muestra [transformador]
- (5).- Amplificador de voltaje
- (6).- Rectificador
- (7).- Acoplador
- (8).- Graficadora
- (9).- Termopar
- (10).- Punta fría.

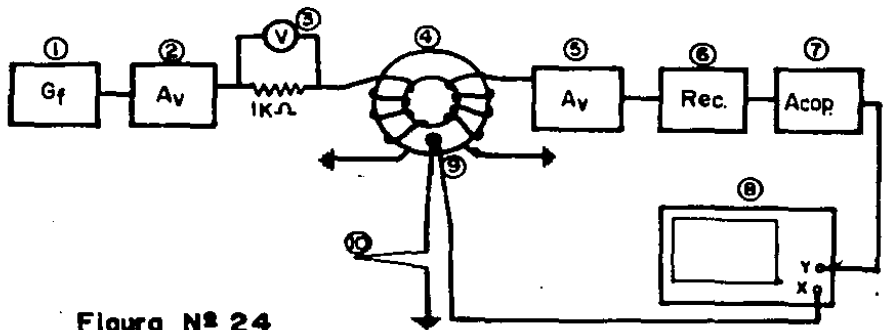


Figura N° 24

Si la frecuencia [1KHz] y la amplitud del primario se mantienen constantes puede demostrarse^[11] que el voltaje en el secundario es proporcional a la permeabilidad magnética del material. Si ponemos una resistencia de 1 K Ω y en sus terminales mantenemos un volt, aseguramos que en el primario pase una corriente que producirá un campo lo suficientemente pequeño como para permanecer dentro de la zona de magnetización reversible^[12]; esta corriente nos produce la magnetización de la muestra; la señal del secundario es amplificada, rectificada y enviada al eje Y de la graficadora.

Conectando un termoper a la muestra para registrar el incremento de temperatura constante y enviando esta señal al eje X de la graficadora, podemos registrar el comportamiento a la permeabilidad magnética de la muestra en función con la temperatura.

La punta fría nos sirve de referencia para tener la temperatura real de la muestra. La figura No. 25 nos da un ejemplo de las gráficas obtenidas, donde: V_{oy} representa la permeabilidad magnética del material a la temperatura ambiente; V_{ox} represente el aumento de temperatura en la muestra dado por el horno y detectado por el termoper.

El comportamiento físico de la muestra es el siguiente: - al inicio tenemos un voltaje V_{oy} que es el valor de la permeabilidad inicial a la temperatura ambiente; conforme aumenta la temperatura de la muestra, la permeabilidad magnética va aumentando poco a poco; en el momento en que se alcanza la temperatura de Curie, se pierde toda la permeabilidad magnética de la

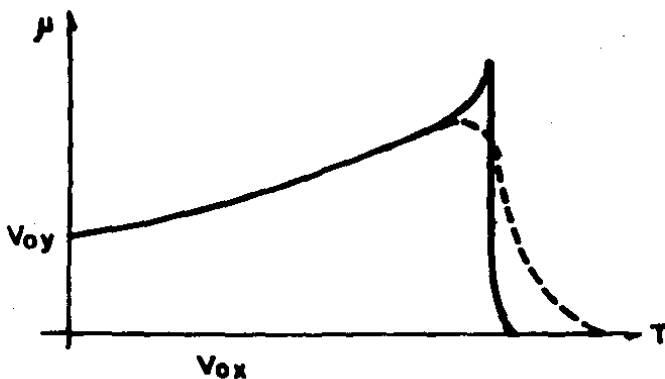


Figura N° 25

muestra debido a la alteración de los espines por la agitación térmica y entonces se observa en la gráfica una caída abrupta hasta tocar el eje X.

Para el estudio que sigue, consideramos solamente las --- muestras que presentaron una caída dentro de $\Delta T \leq 10^{\circ}\text{C}$, para cada valor de Y.

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y CONCLUSIONES.

La curva de magnetización inicial describe la magnetización obtenida cuando un material es magnetizado a partir de un estado no magnetizado. Esta curva se encuentra al unir los puntos extremos dados por todos los ciclos de histéresis que son obtenidos cuando se incrementa la excitación magnética sobre la muestra, partiendo desde cero ($B = H = 0$). La Foto No. 10, nos da un ejemplo de lo anterior.



FOTO No. 10

Curva de Magnetización inicial mostrando los ciclos que la forman.

Globus por medio de su modelo nos da una explicación muy simple de la física del fenómeno que representa la curva; la recta inicial representa la parte reversible (donde la membrana que separa los dominios es únicamente curvada); a partir del momento en que aparece el primer ciclo de histéresis entramos a la parte irreversible (que nos indica el desdoblamiento de la membrana); conforme se incrementa la excitación los ciclos se van haciendo mayores (estos representan un despla-

miento de la membrana), hasta llegar a un límite llamado "punto de saturación" (lo cual representa el contacto de la membrana con la pared del grano). La figura No. 26 nos da una ilustración gráfica del fenómeno.

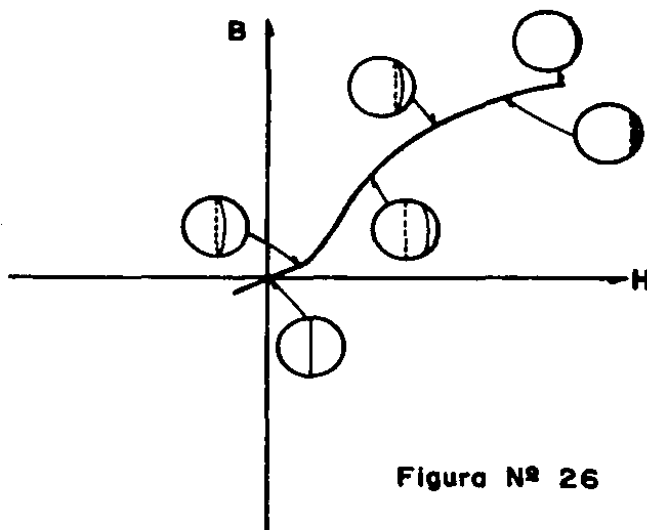


Figura N° 26

Debido a que las muestras son series de diferentes composiciones, deben tener diferentes formas de ciclos de acuerdo a su tamaño de grano, dimensiones, excitación, etc. Para poder hacer una comparación entre ellos es necesario hacer una calibración a manera de tener una misma base comparativo.

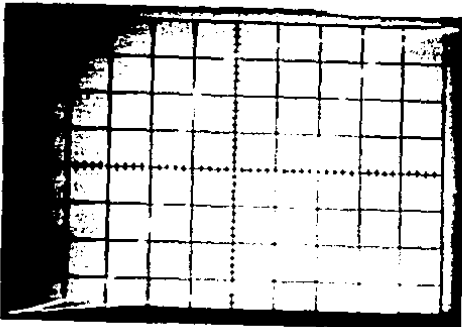
Por lo tanto antes de fijar los ciclos de las ferritas en el osciloscopio, hay que tener en consideración un procedimiento de calibración de acuerdo a los datos de las Fórmulas (5) y

[12a] dadas anteriormente en el párrafo de calibración; este procedimiento sigue los pasos que a continuación se indican:

- 1).- Medir las dimensiones de las muestras (D, d y e)
- 2).- Embobinarlas (15 vueltas en el primario y 5 vueltas en el secundario.
- 3).- Montarlas sobre el Histeresiscopio.
- 4).- Calcular con la HP-41C, el voltaje V_y para una $B' = \frac{B}{8_e}$
= 0.4 (Gauss).
- 5).- Ajustar el valor obtenido en el osciloscopio de tal manera que el valor de V_y abarque un número de cuadros determinado para facilitar su lectura; en nuestro caso fueron 8 cuadros de pico a pico en el eje Y.
- 6).- Calcular con la HP-41C, el valor de V_x para una $H = 1$ Oe.
- 7).- Ajustar este valor obtenido en el eje X del osciloscopio de tal manera que abarque 8 cuadros de pico a pico para que cada cuadro tenga un valor de 0.125 Oe.
- 8).- Una vez ajustados los valores calculados para una muestra en el osciloscopio, fotografíar el ciclo que nos representen y después hacer 3 reducciones en B' de un cuadro cada una hasta obtener una serie de cuatro fotografías por muestra.

La serie de fotos que se muestra a continuación nos da un ejemplo de los ciclos obtenidos para una de las muestras de la serie $Y = 50.5$, ver Fotos Nos. 11, 12, 13 y 14.

El diámetro del grano se obtuvo fotografiando las muestras a manera de contar aquellos que estuvieran en un área dada, ver Fotos Nos. 15, 16, 17 y 18 y luego calcular su tamaño por me---



FCFO No. 11

$B_{max} = 1243.8$ Gauss

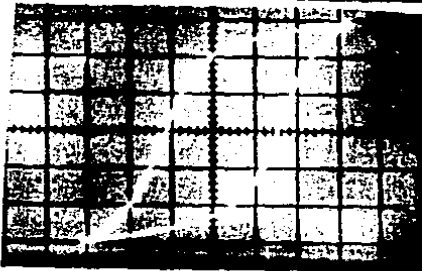
$B_{min} = 1$ Gauss

$\lambda = 0.1982$ (μ^{-1})

$B_{min} = 991.1$ Gauss

$B_{max} = 9.197$ Gauss

$B_{min} = 0.1$

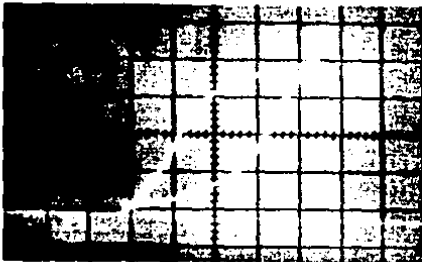


FCFO No. 12

$B_{min} = 698.476$ Gauss

$B_{max} = 0.197$ Gauss

$B_{min} = 0.1$

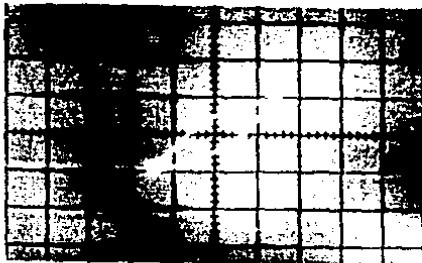


FCFO No. 13

$B_{min} = 698.476$ Gauss

$B_{max} = 0.197$ Gauss

$B_{min} = 0.1$



FCFO No. 14

$B_{min} = 698.476$ Gauss

$B_{max} = 0.197$ Gauss

$B_{min} = 0.1$

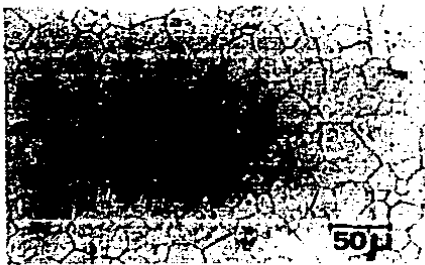


FOTO No. 15

Muestra No. 16, Y 491.8

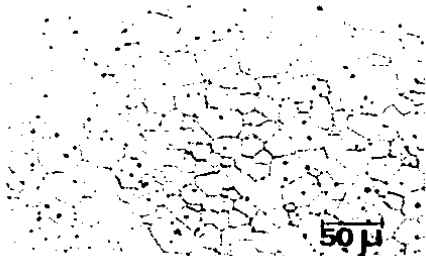


FOTO No. 16

Muestra No. 17, Y 491.0



FOTO No. 17

Muestra No. 18, Y 491.8

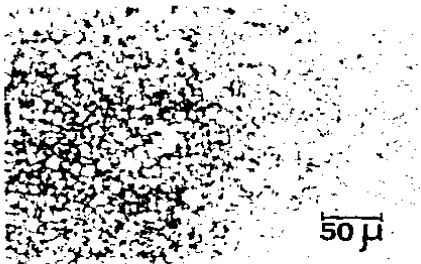


FOTO No. 18

Muestra No. 19, Y 491.0

dio de la fórmula:

$$D_m (\mu) = \sqrt{\frac{\text{Area}(\text{mm})}{\text{No. de Granos}}} \times G (\mu/\text{mm}) \quad \text{--- (13)}$$

donde G= factor de amplificación.

Puesto que las muestras de ferritas son diferentes según la fórmula química, cada serie tiene un valor diferente⁽⁵⁾ de B_s debido al valor de Y en la composición, entonces para poder compararlos adecuadamente entre los valores medidos en los ciclos obtenidos entre muestra y muestra, se tomó como base el valor de $B' = \frac{B}{B_s}$ para todas las muestras y calculando B_s según se indicó anteriormente.

De la ecuación No. 3 [página 30], se obtiene el campo crítico que corresponde al punto donde la fuerza magnética (P) es igual a la fuerza de anclaje (F).

$$H_{cr} = \frac{F}{M_s r} \quad \text{--- (3a)}$$

si $r = 2/D_m$ donde D_m = diámetro del grano, entonces la ecuación (3a) queda:

$$H_{cr} = \frac{2F}{M_s} \cdot \frac{1}{D_m} \quad \text{--- (3b)}$$

donde se observa que H_{cr} tiene una relación inversa con D_m .

Para diferentes posiciones de anclaje de la membrana en la pared del grano puede suponerse que necesitamos aplicar un-

dio de la fórmula:

$$D_m (\mu) = \sqrt{\frac{\text{Area (mm)}}{\text{No. de Granos}}} \times G (\mu/\text{mm}) \quad \text{--- (13)}$$

donde G = factor de amplificación.

Puesto que las muestras de ferritas son diferentes según la fórmula química, cada serie tiene un valor diferente^[5] de B_s debido al valor de Y en la composición, entonces para poder compararlas adecuadamente entre los valores medidos en los ciclos obtenidos entre muestra y muestra, se tomó como base el valor de $B' = \frac{B}{B_s}$ para todas las muestras y calculando B_s según se indicó anteriormente.

De la ecuación No. 3 (página 20), se obtiene el campo crítico que corresponde al punto donde la fuerza magnética (P) es igual a la fuerza de anclaje (F).

$$H_{cr} = \frac{F}{M_s r} \quad \text{--- (3a)}$$

si $r = 2/D_m$ donde D_m = diámetro del grano, entonces la ecuación (3a) queda:

$$H_{cr} = \frac{2 F}{M_s} \cdot \frac{1}{D_m} \quad \text{--- (3b)}$$

donde se observa que H_{cr} tiene una relación inversa con D_m .

Para diferentes posiciones de anclaje de la membrana en la pared del grano puede suponerse que necesitamos aplicar un-

campo crítico (H_{cr}) a un grano cuyo diámetro en la longitud de la membrana (grano 2), para que pueda ser desplazada nuevamente de regreso, y que dicho campo crítico es aproximadamente -- igual al campo coercitivo (H_c) del grano inicial (grano 1); -- luego puede decirse que H_c es inversamente proporcional a D_m . ver figura No. 27, como lo indica el modelo teórico propuesto por A. Globus^[13].

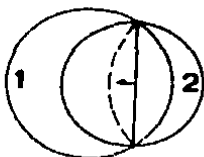
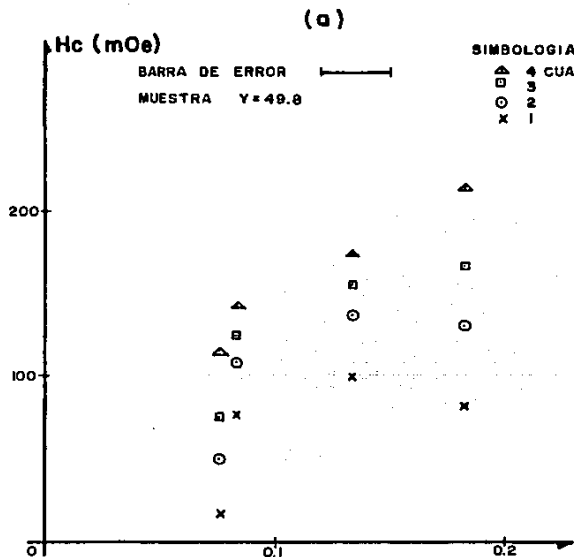


Figura N° 27

Después de obtener todas las fotos y de haber leído los -- valores de H_c y $1/D_m$, por medio de mínimos cuadrados, se procedió a calcular el Coeficiente de Correlación (C_c), la Coordenada del origen (a) y la Pendiente (b), obteniéndose la Tabla No.1 así como las gráficas dadas en las Figuras Nos. 28, 29, 30 (a) y (b) y 31(a) y (b).

Figura N° 28



SIMBOLOGIA

△	4 CUADROS
□	3 "
○	2 "
x	1 "

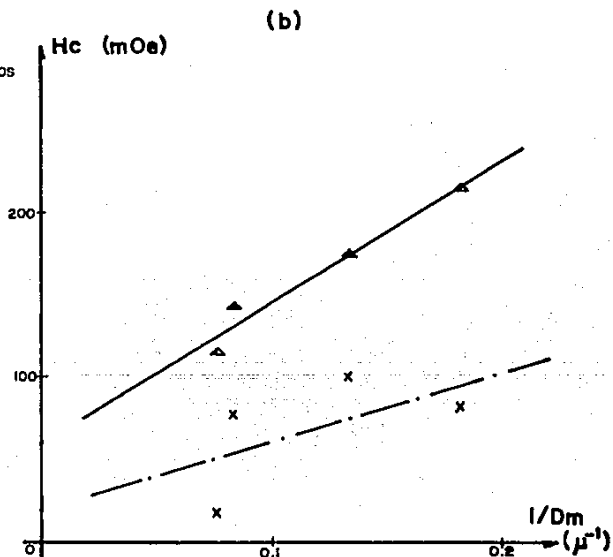


Figura N° 29

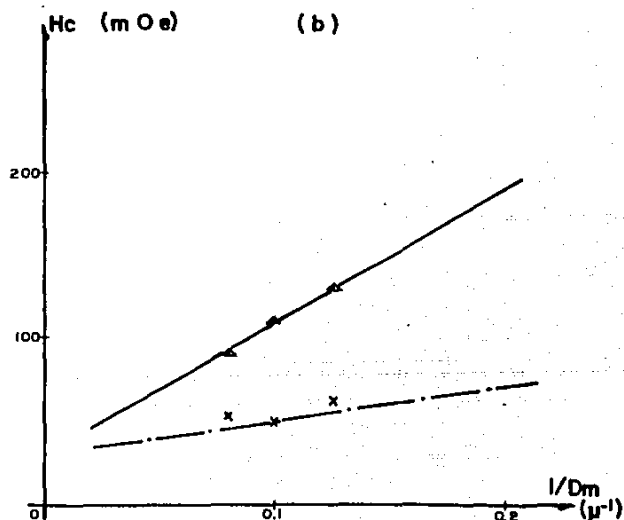
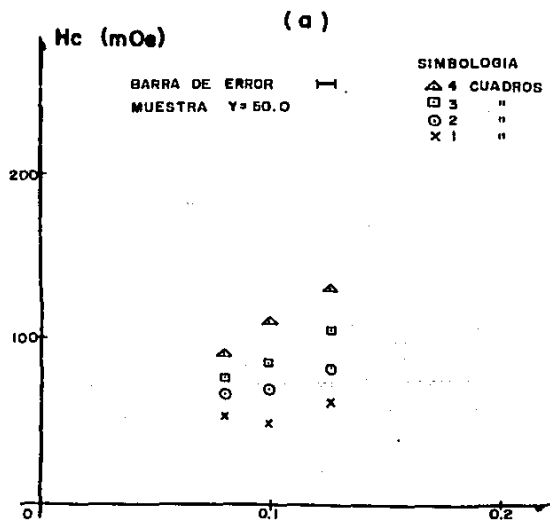


Figura N° 30 (a)

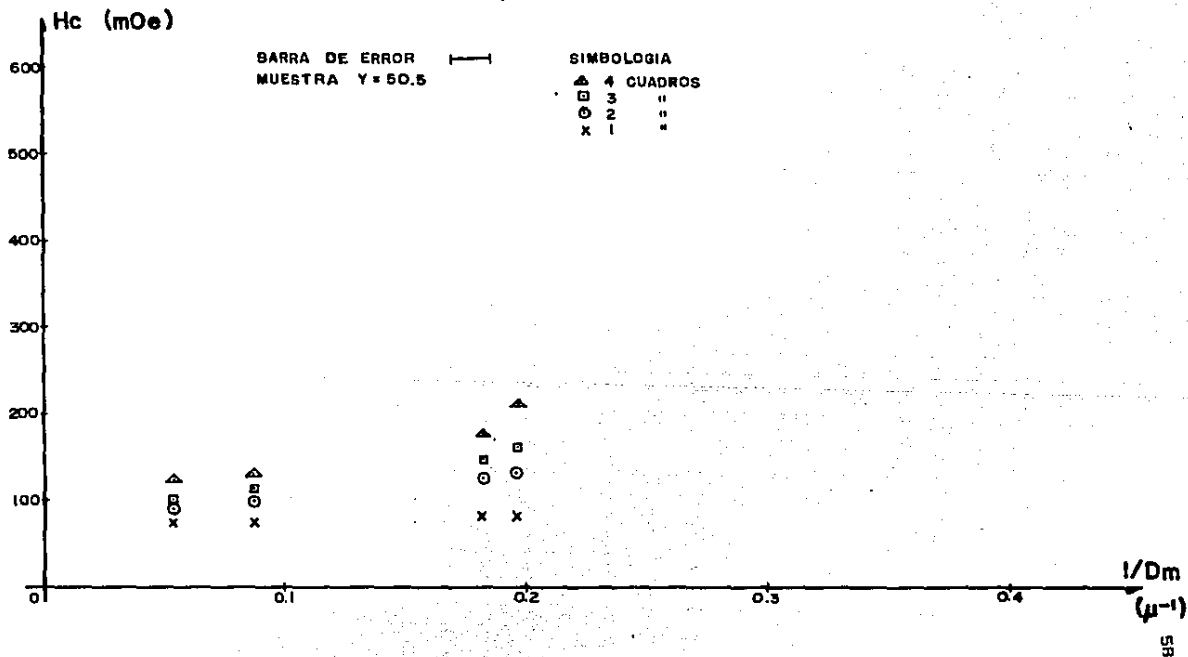
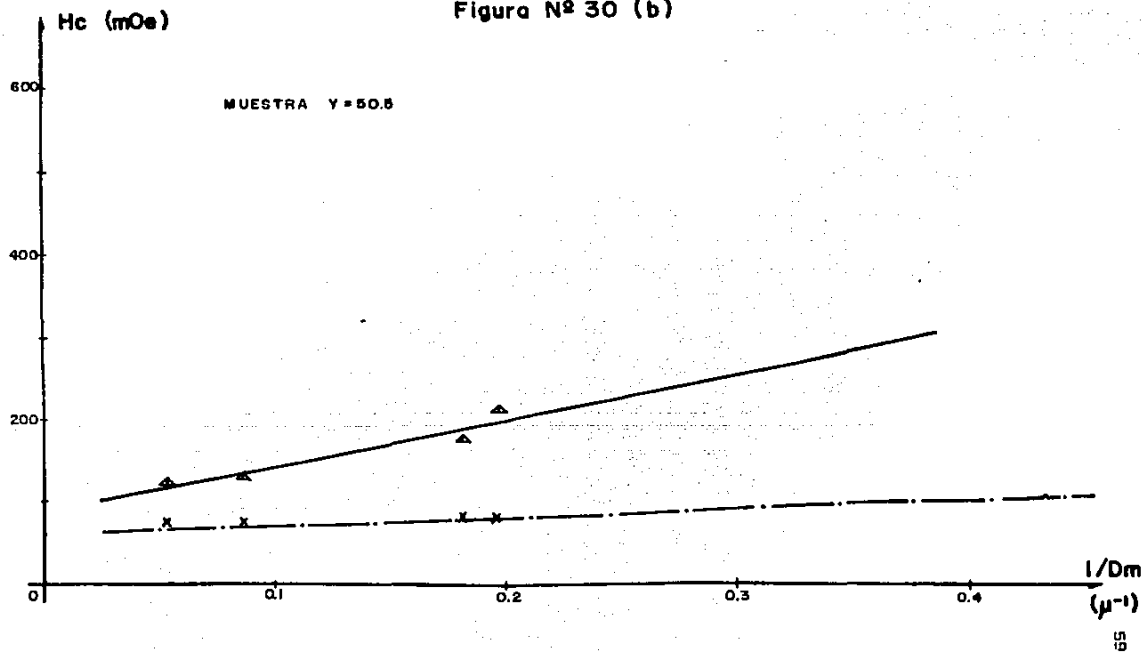


Figura N° 30 (b)



ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Figura N° 31 (a)

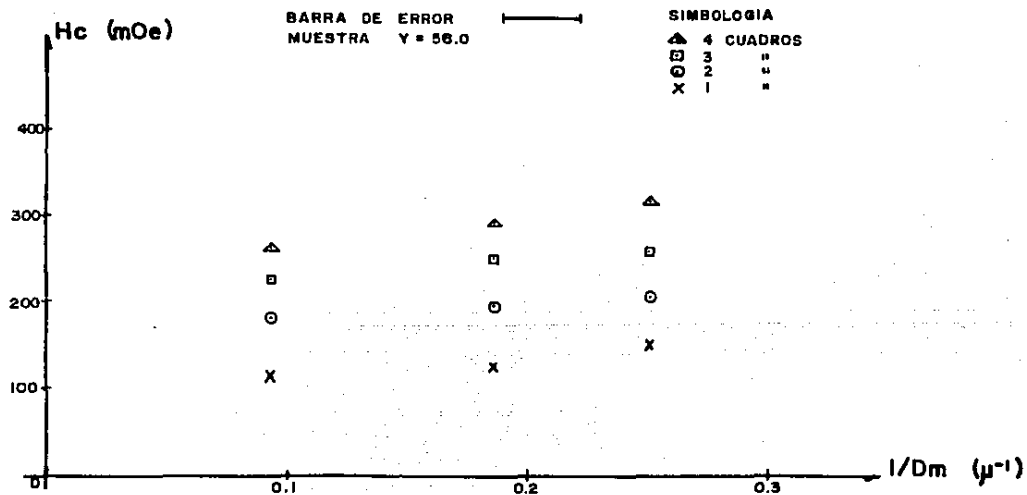


Figura N° 31 (b)

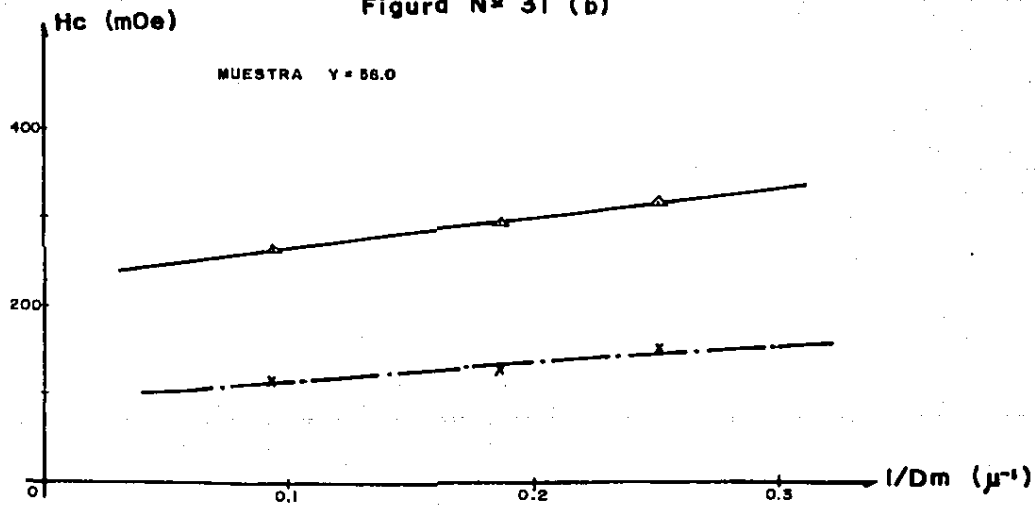


TABLA No. 1

Muestra No.	B/B _s	Cc	a	b
16	0.1	0.3490	0.0190	0.4237
16	0.4	0.9687	0.0611	0.8501
17	0.1	0.5900	0.0300	0.2090
17	0.4	0.9965	0.0300	0.8008
18	0.1	0.9609	0.0675	0.0848
18	0.4	0.9200	0.0890	0.5600
19	0.1	0.8850	0.0921	0.2140
19	0.4	0.9980	0.2280	0.3534

Este table tiene un valor indicativo debido a que el número de muestras analizadas fue muy pequeño; de éste puede observarse que:

La pendiente para todas las composiciones va creciendo -- conforme Y decrece para B' = 0.4. Así mismo para B' = 0.1, va -- creciendo conforme Y decrece para las muestras 16, 17 y 18.

La diferencia entre las pendientes para B' = 0.4 y B' = 0.1 es mayor en la muestra 17 (Y=50.0) que es la estequiométrica, -- disminuyendo conforme se aleja de la estequiometría.

En general el Coeficiente de Correlación va creciendo en B' = 0.1 conforme Y crece. La diferencia entre B' = 0.4 y B' = 0.1 va disminuyendo conforme Y disminuye.

De las gráficas dadas en las figuras 28, 29, 30(a),(b) y 31(a), (b), puede observarse lo siguiente:

Se obtiene una recta donde el campo coercitivo (H_c) es inversamente proporcional a D_m , cumpliéndose así el modelo teórico de A. Globus^[13].

Se obtiene una pendiente bien definida para cada desviación de la estequiometría ($Y \neq 50.0$), lo cual puede interpretarse con base en que cada composición Y tiene una estructura iónica diferente bien definida.

El análisis de los Coeficientes de Correlación, indica una menor dispersión, en general, para $B' = 0.4$ que para $B' = 0.1$, esto puede interpretarse basándonos en que, un campo aplicado mayor ($B' = 0.4$), es menos sensible a defectos como poros, dislocaciones, precipitados y la correlación con D_m es mejor.

Además aquí también se presenta el diseño y construcción de un equipo (Histeresiscopio y Fuente de poder regulada), de gran utilidad y versatilidad en el estudio de los mecanismos de magnetización; y que también puede ser empleado para aplicaciones específicas según se desee.

Se propone también la utilización de un método para evitar el calentamiento excesivo en las muestras que redundaría en errores en el análisis de los ciclos de histéresis de las mismas.