

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

Cursos de Entrenamiento Avanzado en Metalurgia
Ciclo de Especialización

METODO DE ENSAYO POR PARTICULAS MAGNETICAS

Miguel A.Giuliodori

INEND Proyecto PNUD ARG537/71

Programa Multinacional de Metalurgia

Programa Regional de
Desarrollo Científico y Tecnológico

Organización de los Estados Americanos
OEA

Argentina
1976

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

Cursos de Entrenamiento Avanzado en Metalurgia
Ciclo de Especialización

METODO DE ENSAYO POR PARTICULAS MAGNETICAS

Miguel A. Giuliadori

INEND Proyecto PNUD ARG537/71

Programa Multinacional de Metalurgia

Programa Regional de
Desarrollo Científico y Tecnológico

Organización de los Estados Americanos
OEA

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

METODO DE ENSAYOS POR PARTICULAS MAGNETICAS

CAPITULO I

Introducción Histórica

Este método fue concebido por W.E.Hoke del Bureau of Standards en 1920, e introducido a una aplicación industrial por A.V.de Forest en 1928, quien juntamente con F.B.Doane formó en 1934 Magnaflux Corporation.

Fundamentos Teóricos

Haremos una breve introducción a la teoría del campo magnético, definiendo sus elementos y las premisas fundamentales que lo rigen.

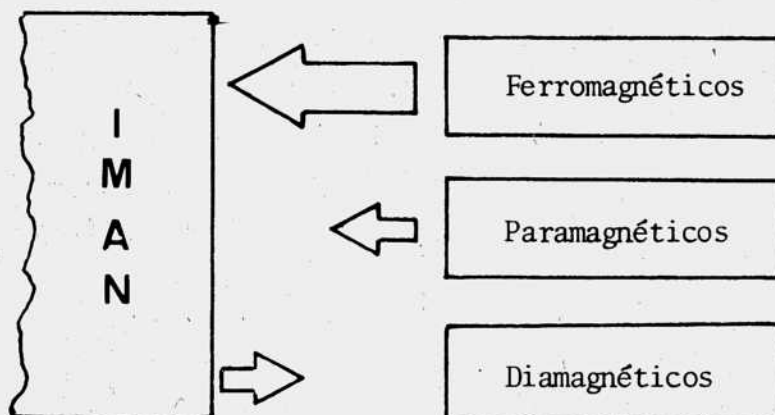
Denominemos IMAN a todo aquel cuerpo que tenga la propiedad de atraer otras sustancias llamadas FERROMAGNETICAS. Esa característica de atracción se llama MAGNETISMO, y se debe a un efecto de INDUCCION MAGNETICA ejercido por el imán sobre el otro cuerpo, al que transforma momentáneamente en un imán.

A toda sustancia que acuse los efectos de la proximidad de un imán la denominamos *cuerpo magnético*, y se dividen en:

Ferromagnéticos : son fuertemente atraídos por un imán (hierro, níquel, cobalto, casi todos los aceros, etc.).

Paramagnéticos : son levemente atraídos por un imán (platino, aluminio, cromo, potasio, estaño, etc.).

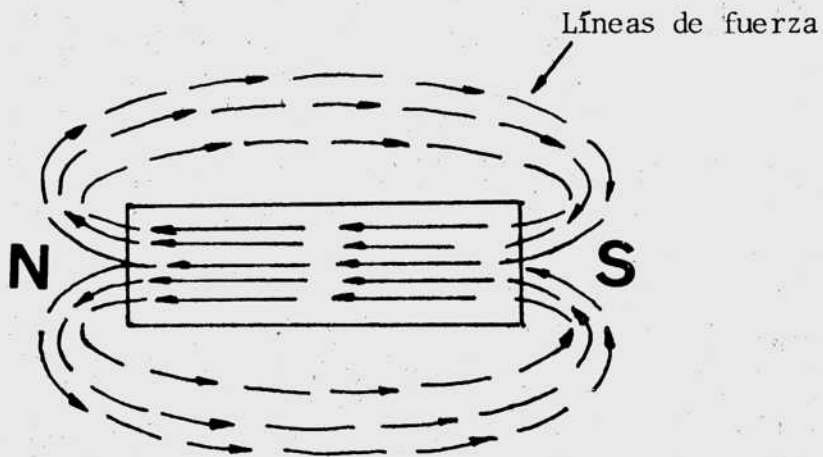
Diamagnéticos : son levemente repelidos por un imán (plata, plomo, cobre, mercurio, etc.).



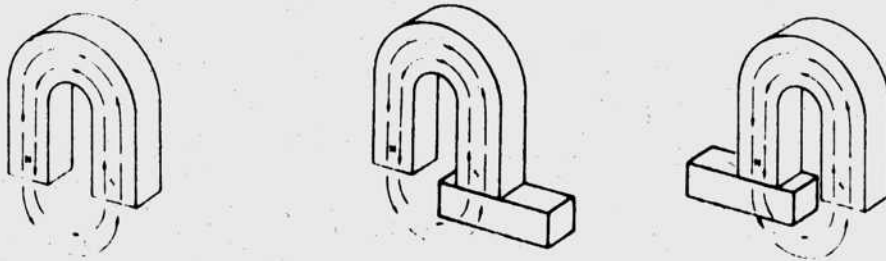
Llamaremos CAMPO MAGNETICO al espacio exterior al imán dentro del cual se ejerza el efecto de inducción. O sea, el campo magnético está conformado por el conjunto de todas las líneas de fuerza, cuyo número y forma dependen del foco magnético o fuente que generó el campo.

Entendiendo por LINEA DE FUERZA a una curva tal que en cada uno de sus puntos es tangente a la dirección que tomaría una aguja imanada (brújula) en ese punto, o sea a la dirección del campo.

Las líneas de fuerza son lazos cerrados que no se cruzan, buscan el camino de menor resistencia, tienen un sentido definido (dentro del imán van de SUR a NORTE, y fuera de él de NORTE a SUR), y se encuentran más densamente en los polos del imán.



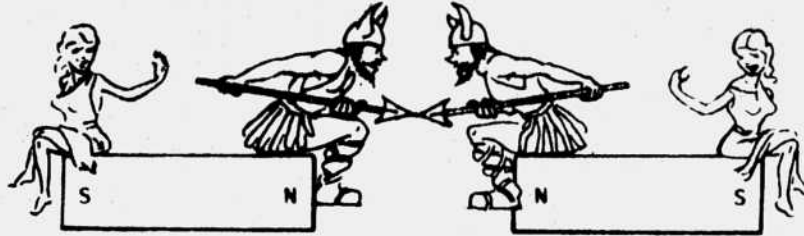
Las fuerzas de *Atracción* o de *Repulsión* se manifiestan en aquellas zonas donde entran o salen líneas de fuerza, o sea en las denominadas POLOS del imán.



Tenemos que:

POLOS IGUALES SE REPELEN

POLOS DISTINTOS SE ATRAEN



Definimos como INTENSIDAD DE CAMPO "H" o fuerza magnetizante, a la fuerza que actúa sobre un polo norte magnético unitario, colocado dentro de un campo magnético. O sea es la fuerza que tiende a establecer un flujo magnético en un circuito magnético.

Se mide en OERSTEDS.

Siendo la INDUCCION o DENSIDAD DE FLUJO "B" el número de líneas de fuerza por unidad de área, tomada en ángulo recto a la dirección del flujo.

Se mide en GAUSS

Tenemos que: $B \propto H$

El factor de proporcionalidad es la PERMEABILIDAD " μ " que representa la facilidad con que un material puede ser magnetizado, de donde:

$$B = \mu \cdot H$$

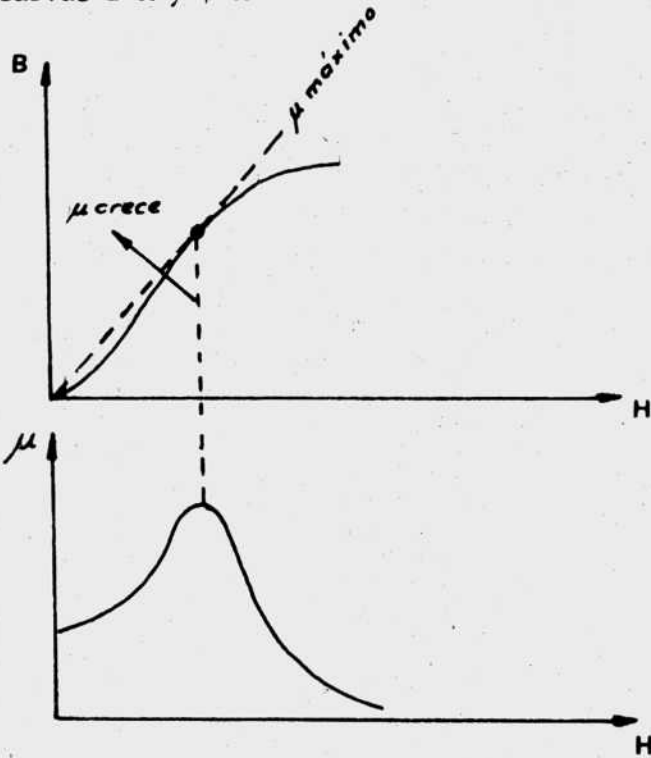
En donde H se refiere a la fuerza que tiende a magnetizar un cuerpo, y B al campo inducido en dicho cuerpo. Tenemos que OERSTEDS y GAUSS son numéricamente iguales en aire o vacío, de donde se desprende que para el aire

$$\mu = 1$$

Podemos clasificar nuevamente los cuerpos magnéticos en función de su permeabilidad:

Ferromagnéticos	$\mu > 1$
Paramagnéticos	$\mu = 1$
Diamagnéticos	$\mu < 1$

Curvas B-H y μ -H

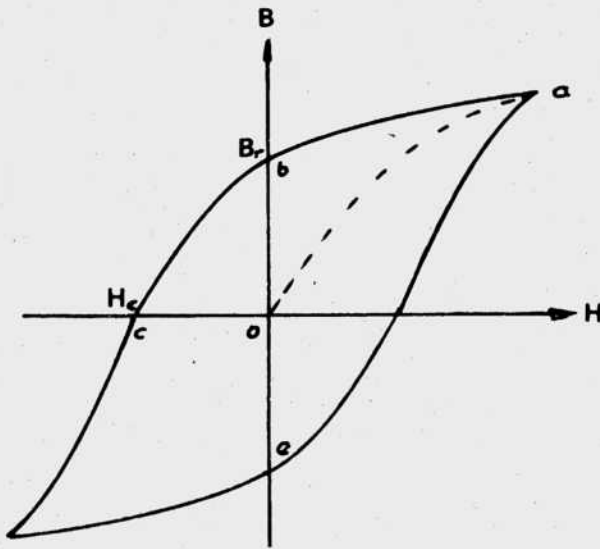


La permeabilidad " μ " crece con el valor de H , hasta un cierto límite para luego decrecer.

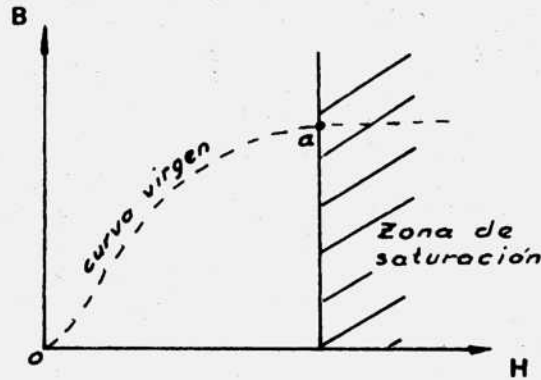
Vemos que $\mu \neq \text{cte.}$ y depende de:

- a) del valor de H o de B
- b) de la composición química del material
- c) de la temperatura
- d) del tratamiento térmico anterior
- e) del procesamiento mecánico anterior

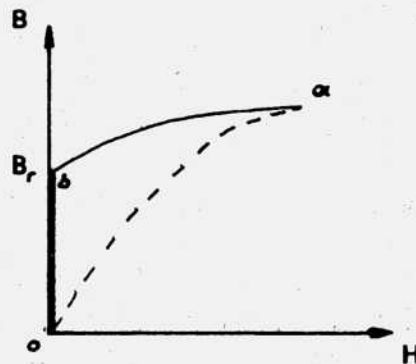
Por lo tanto B no es linealmente proporcional a H , dando lugar a las denominadas CURVAS DE HISTERESIS de los materiales.



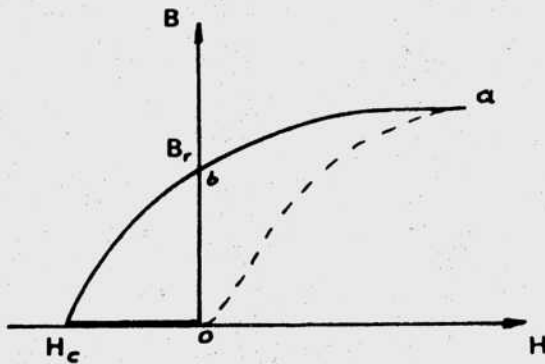
Con intensidad de campo nula no hay magnetización (punto 0). La sección o-a o *curva virgen* se logra cuando el material no ha sido sometido a la acción de un campo magnético, y culmina en el punto "a", pues se entra en la *zona de saturación*, en la cual a pesar de incrementar H no se notan incrementos apreciables de B.



A partir de este punto si reducimos H, vemos que los valores de inducción no corresponden a la curva o-a sino a la a-b. Si llegamos a anular el valor de H, observamos que hay un valor de inducción B_r denominado MAGNETISMO REMANENTE que caracteriza la RETENTIVIDAD del material. O sea la habilidad del material de retener una porción del campo magnético luego de interrumpida la corriente magnetizante.



Disminuyendo H, llegamos al punto "c" denominado FUERZA CORRECTIVA o H_c , que es la magnetización inversa que debemos aplicar al material para anular su magnetismo remanente ó residual.



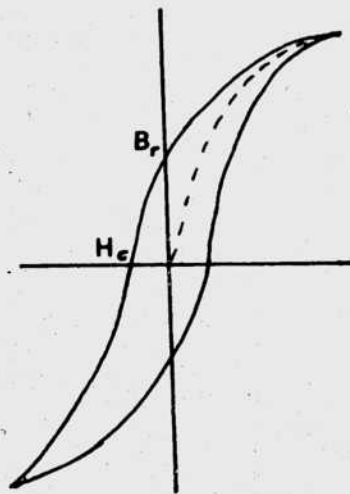
Si seguimos disminuyendo H llegamos al punto "d" en donde el material se encuentra nuevamente saturado.

Aumentando ahora el valor de H llegamos hasta el punto "e" donde existirá un nuevo magnetismo remanente de polaridad inversa al anterior.

Incrementando nuevamente el valor de H se obtiene el punto "o" donde se cierra el ciclo de histéresis.

El ciclo de histéresis es propio de cada material, y su área nos da las características magnéticas del mismo.

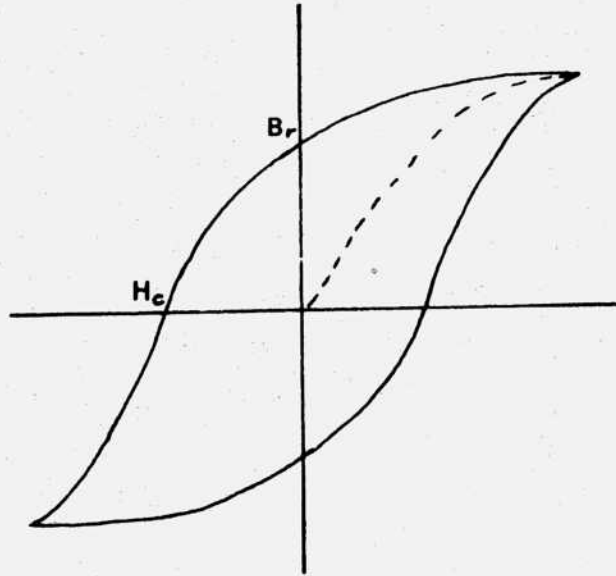
;



Si la curva es delgada el material tiene:

- a) baja retentividad (pequeño B_r)
- b) alta permeabilidad
- c) baja reluctancia

Estas características corresponden a un material fácil de magnetizar y de desmagnetizar, con un bajo contenido de carbono, por ejemplo: hierro.



Si la curva es ancha el material tiene:

- a) alta retentividad (B_r grande)
- b) baja permeabilidad
- c) alta reluctancia

Estas características corresponden a un material duro de magnetizar, con un alto contenido de carbono, por ejemplo: acero.

Por su elevada retentividad sería un buen imán.

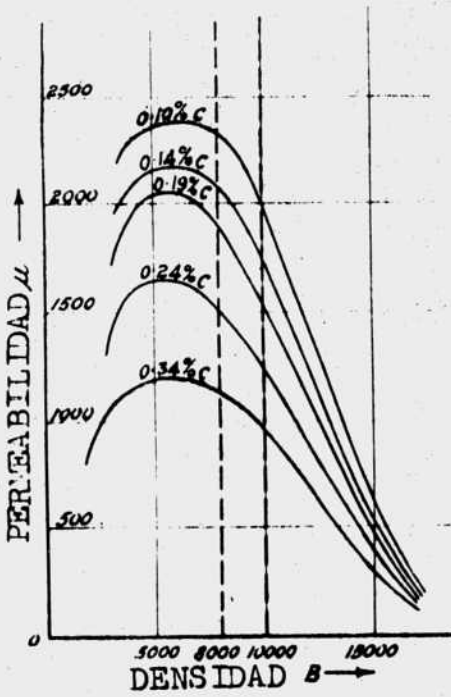
Aclaremos que RELUCTANCIA MAGNETICA es la resistencia que presenta el material a ser magnetizado.

A continuación damos una tabla de conversión de unidades usadas en magnetismo y algunas curvas de referencia:

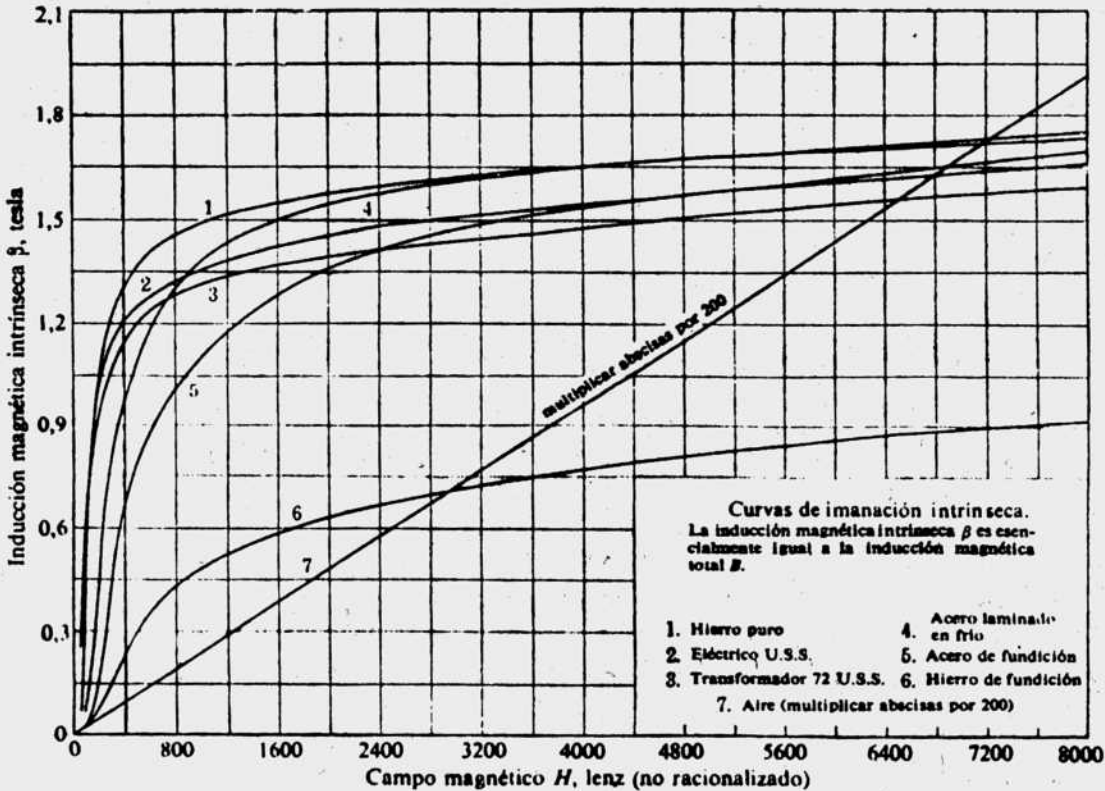
Multiplicar	Por	Para obtener
F en uem	10	F en ampere-espira
F en ampere-espira	0,47	F en gilbert
F en gilbert	0,07958	F en ampere-espira
H en oersted	1000	H en milioersted
H en oersted	79,58	H en lenz
H en lenz	0,01257	H en oersted
H en oersted sin racionalizar	1	H en oersted racionalizado
	4,7	
B en gauss	10^{-4}	B en tesla
B en tesla	10^4	B en gauss

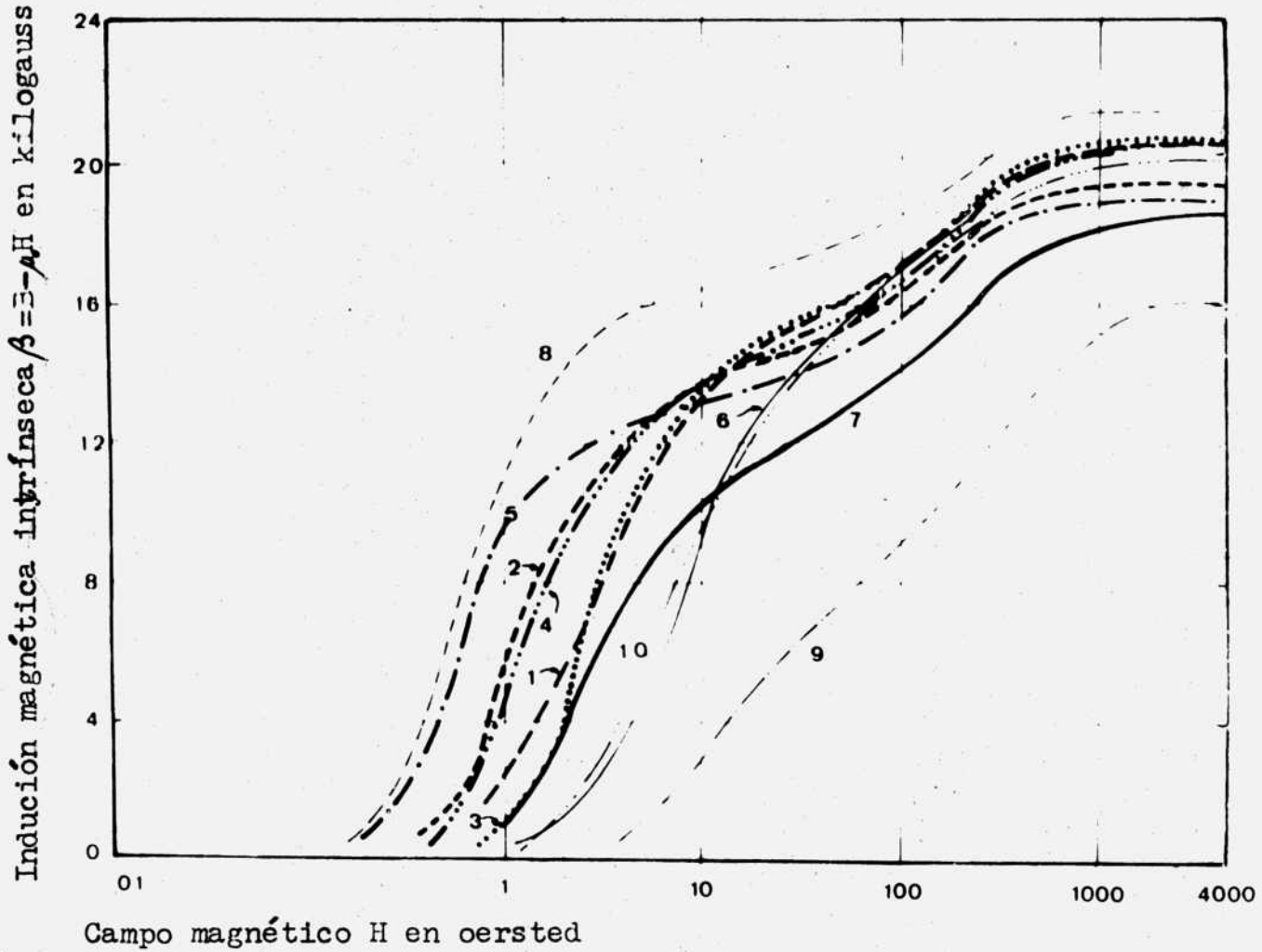


Curvas de inducción normal de un número de diferentes aceros superpuestas en el mismo gráfico.



Variación de la permeabilidad con la densidad de flujo, graficadas para cinco aceros con diferentes contenidos de carbono.





- 1: Acero estandar
- 2: Acero al silicio (mediano)
- 3: Acero trabajado en frio
- 4: Acero pobre en silicio
- 5: Acero rico en silicio
- 6: Fundiciones de acero
- 7: Fundiciones de hierro maleable
- 8: Hierro electrolítico
- 9: Hierro colado
- 10: Hierro al carbono (forja)

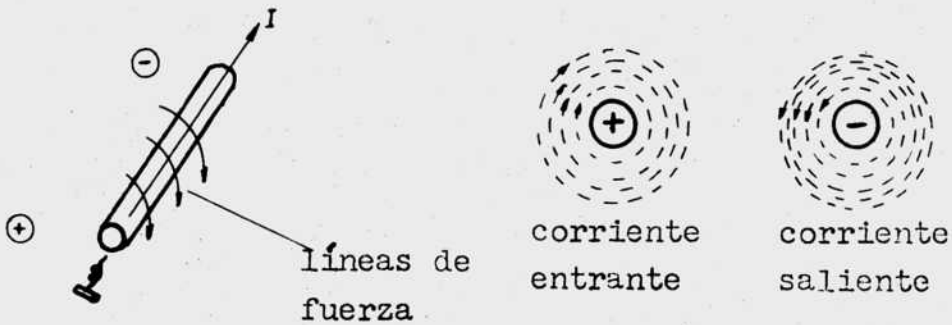
Curvas de imanación normal en C.C. para diversos materiales

CAPITULO II

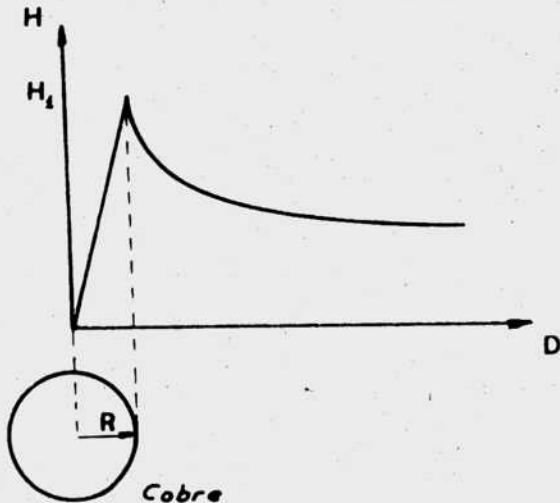
Campos Magnéticos Inducidos Eléctricamente

Cuando una corriente eléctrica circula a través de un conductor crea un campo magnético alrededor del conductor, concéntrico con el mismo. Siendo la intensidad del campo "H", directamente proporcional a la intensidad de corriente que circula; y la densidad de líneas de flujo será tanto mayor cuanto más cerca nos encontremos de la superficie del conductor.

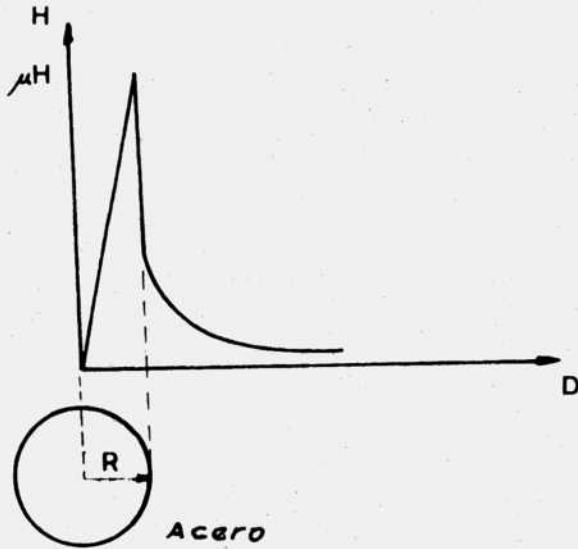
Recordando que la corriente circula de positivo a negativo y aplicando la *regla del tirabuzón*, podemos conocer el sentido de las líneas de fuerza.



Si el conductor es de cobre este campo es exterior e interior.



Si el conductor es de un material ferromagnético el campo queda delimitado en su interior, siendo máximo en su superficie.



Fundamentos del Método de Partículas Magnéticas

Si tenemos un imán herradura



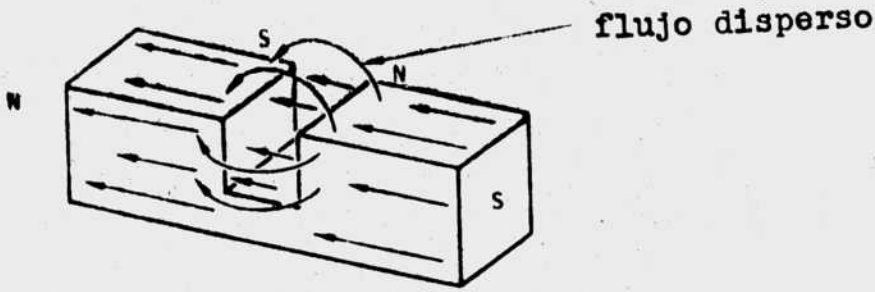
y lo cerramos hasta aproximar sus extremos, nos queda



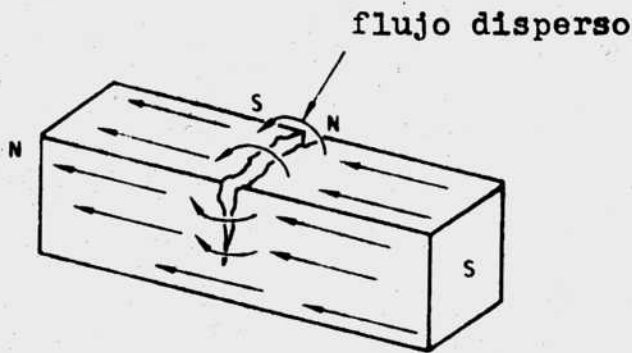
y si lo cerramos del todo, vemos que prácticamente desaparecen los polos, pero existe una pequeña cantidad de líneas de fuerza que se cierran a través del aire, a las que denominaremos FLUJO DISPERSO, el cual nos determina el CAMPO DE FUGA



Análogamente, si en un imán se efectúa un corte parcial, se forman dos polos opuestos y aparecerá en esa zona un campo de fuga, formado por las líneas de fuerza que salen de la barra y pasan a través del aire de un polo al otro.

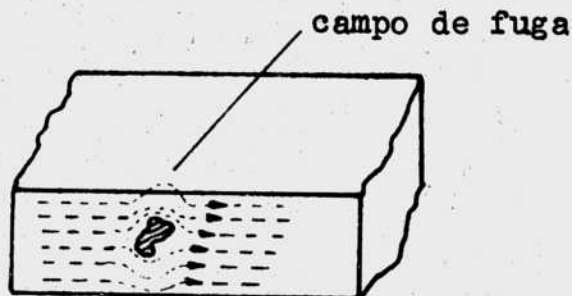


Como la interrupción del camino de las líneas de fuerza dentro del imán crea dos nuevos polos, deducimos que una discontinuidad (fisura, inclusión, variación de los parámetros magnéticos del material, etc.) dará lugar a la formación de dos nuevos polos, y por ende de un campo de fuga.

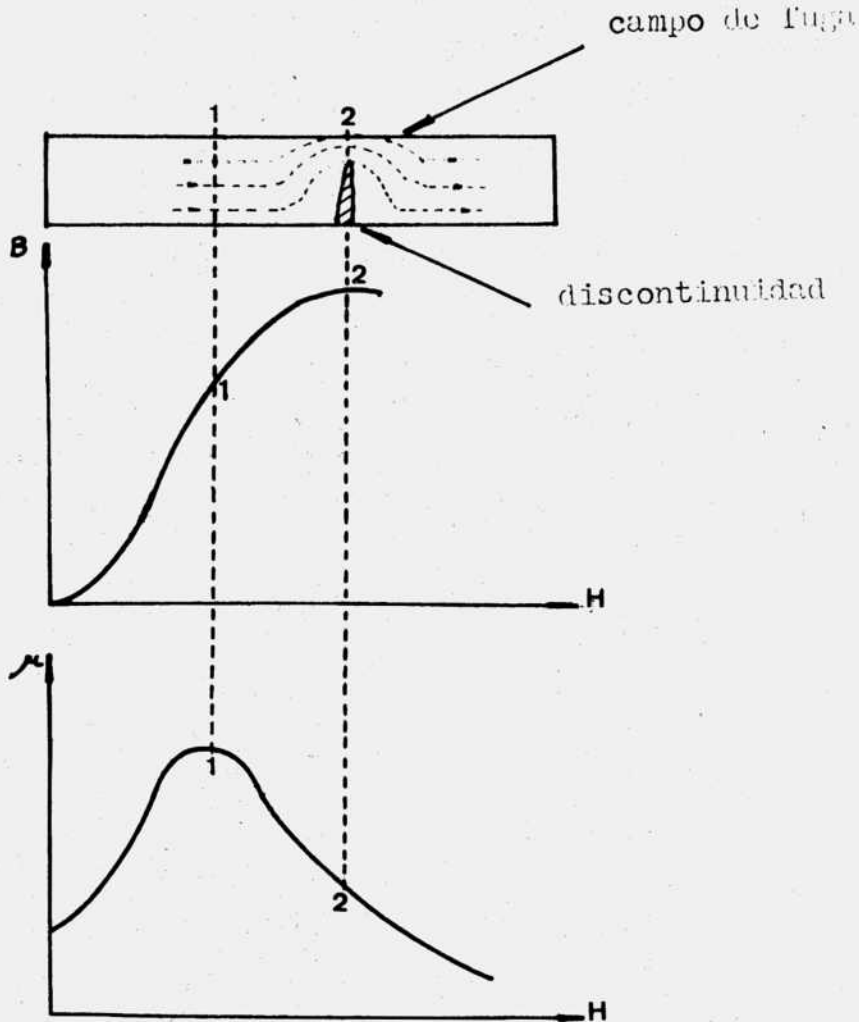


Vemos que: *El método de partículas magnéticas consiste en la detección de campos de fuga, o sea flujos dispersos provocados por la formación de polos magnéticos a ambos lados de aquellas discontinuidades que interrumpen el camino de las líneas de fuerza.*

Por lo tanto, éste método puede detectar discontinuidades en materiales que puedan ser fuertemente magnetizados o ferromagnéticos.



En consecuencia, en la sección que corresponde a la discontinuidad, hay una gran densidad de flujo que deberá pasar por una sección reducida. Por lo tanto, la permeabilidad será menor que en el resto de la pieza, forzando a que parte del flujo escape fuera de la misma, dando lugar a un campo de fuga.



Dicho campo de fuga nos permite detectar la discontinuidad, mediante un detector o medio magnético. O sean las partículas magnéticas, que son atraídas por los campos de fuga, dando lugar a la indicación de la discontinuidad.

La condición óptima de trabajo es aquella que: en el momento de la detección, la intensidad de campo "H" sea tal que en la pieza se obtenga *máxima permeabilidad* sobre la curva virgen.

CLASIFICACION DE LAS TECNICAS DE ENSAYO

a) Técnica del campo residual o remanente

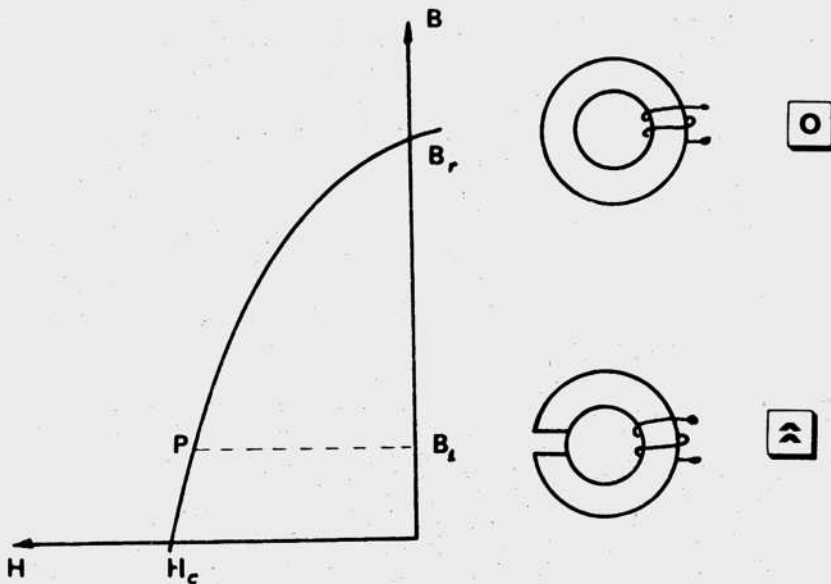
Se utiliza el campo magnético que retiene el material luego que se interrumpe la fuerza magnetizante. Este magnetismo residual o remanente es siempre menor que el que existe cuando la corriente está fluyendo.

b) Técnica del campo continuo

Consiste en efectuar la aplicación de las partículas magnéticas mientras se mantiene la fuerza magnetizante.

Por lo tanto un campo continuo es una técnica de ensayo más sensible que la del campo residual, o sea provee una mejor indicación, por ser mayor el flujo disperso y por ende la atracción sobre las partículas magnéticas.

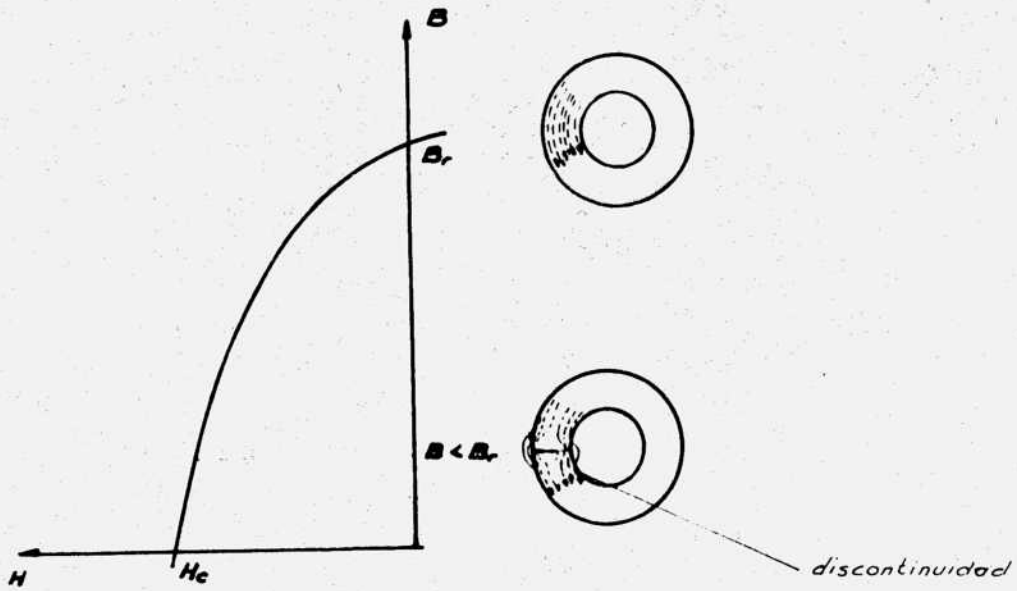
Veamos qué sucede con dos muestras tubulares, una con polos libres y otra sin ellos, al suspender la magnetización.



⊙ Si no tiene polos libres retiene una alta densidad de flujo.

⤴ Vemos que los polos libres tienen un efecto desmagnetizante, o sea que la densidad de flujo disminuye.

Análogamente, veamos el efecto de una discontinuidad en una muestra tubular.



Luego de magnetizar un objeto de esta forma permanece como un imán permanente sin polos libres, operando en un punto prácticamente coincidente con el de B_r (magnetismo remanente). Si presentase un defecto que forme polos libres, pasaría a operar en el punto "P". Por lo tanto el medio o partículas utilizadas para detectar deben ser aplicadas durante el proceso de magnetización. De tal forma que el *flujo disperso remanente* en los polos libres sólo cumple la función de mantener la indicación, formada con un campo mucho mayor.

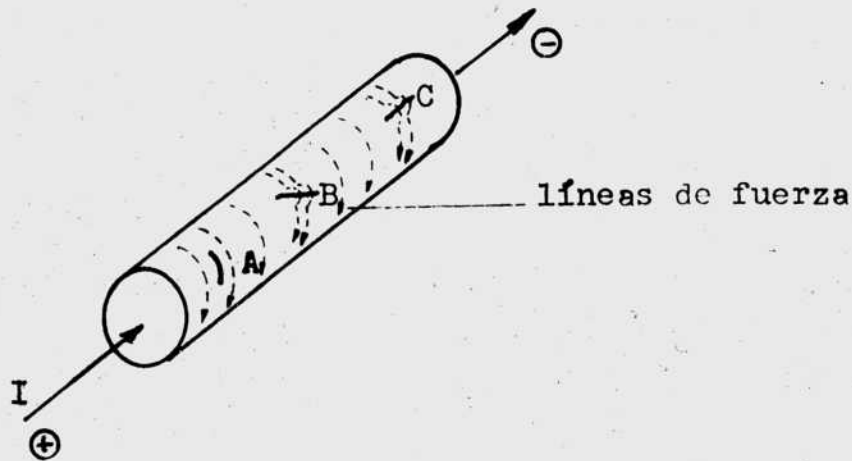
CAPITULO III

MODOS DE MAGNETIZACION

a) Magnetización Circular

Recordando que la circulación de corriente a través de un material ferro magnético producía un campo magnético confinado en su interior, y máximo en su superficie. Podemos aplicar este efecto en la detección de discontinuidades.

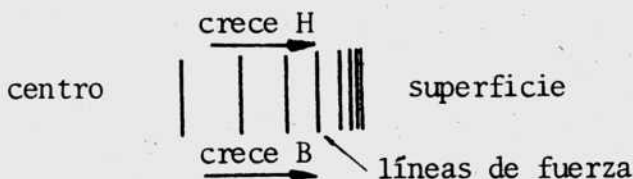
Si tomamos una barra con discontinuidades orientadas en distintos sentidos, y hacemos circular corriente a través de ella

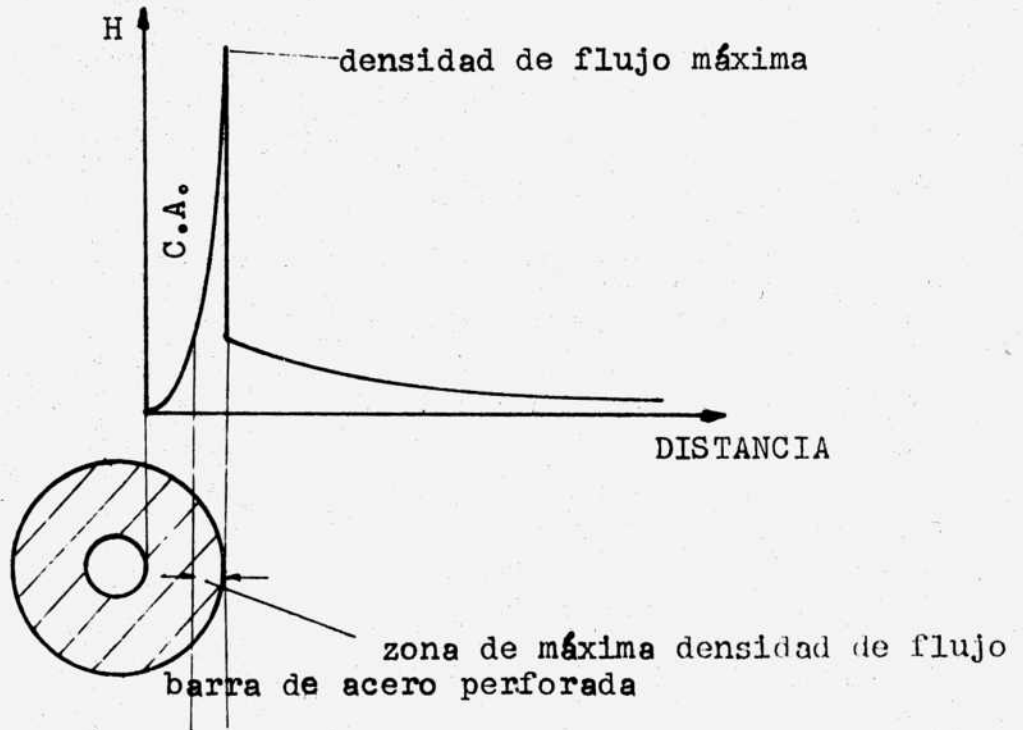
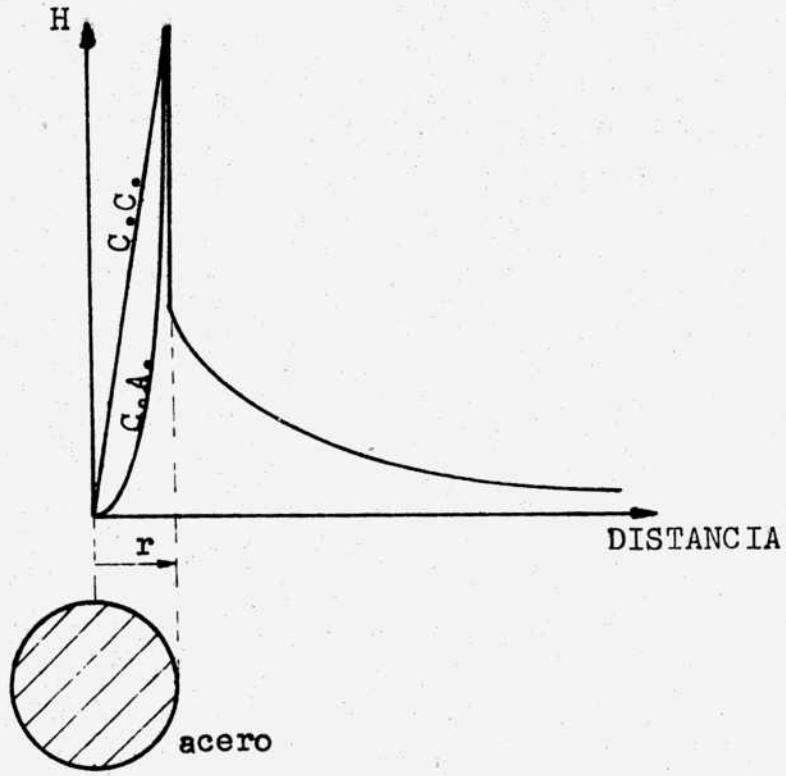


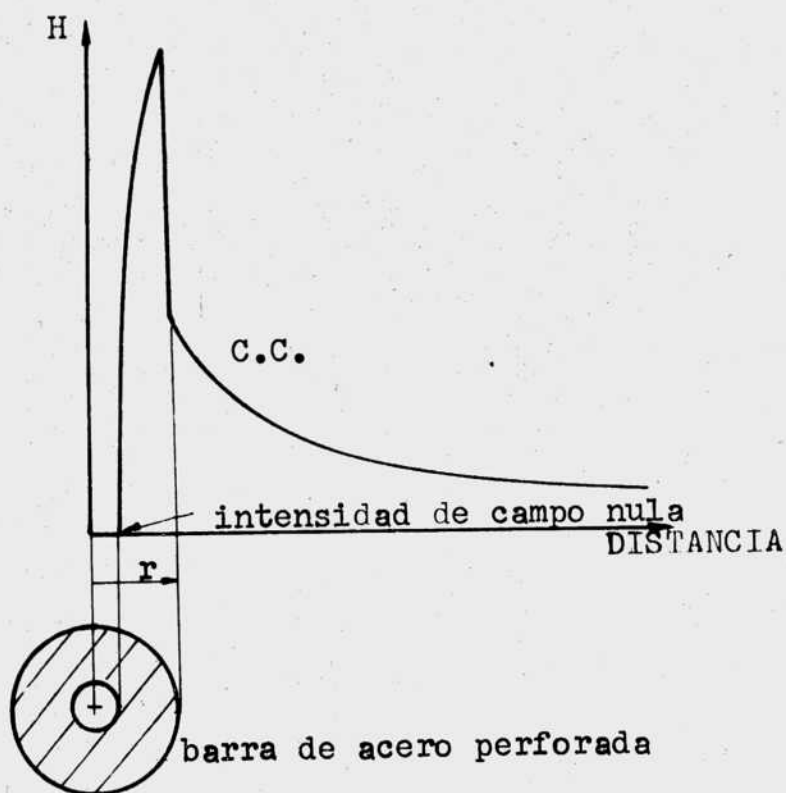
Vemos: que la discontinuidad "A" es paralela a las líneas de fuerza, o sea que *no produce polos magnéticos*, por lo tanto no provoca campos de fuga y *no se detecta*. Las discontinuidades "B" y "C" sí se detectan.

Por lo tanto, debemos tener una idea de la orientación posible de los defectos en la pieza a ensayar (basándonos en su proceso de fabricación, tratamiento térmico, esfuerzos mecánicos a que fué sometida, etc.) para fijar la dirección de circulación de corriente que nos permita detectar dichas discontinuidades.

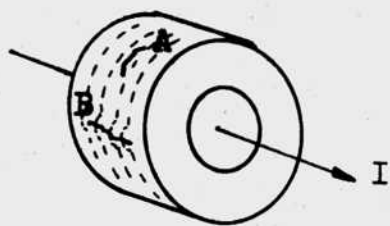
El campo se incrementa desde cero en el centro de la barra hasta alcanzar su valor máximo sobre la superficie, esto nos indica que el flujo disperso será mayor si la discontinuidad es superficial







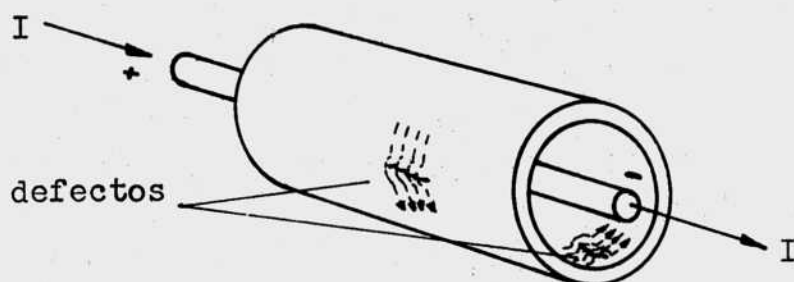
Veamos el siguiente caso:



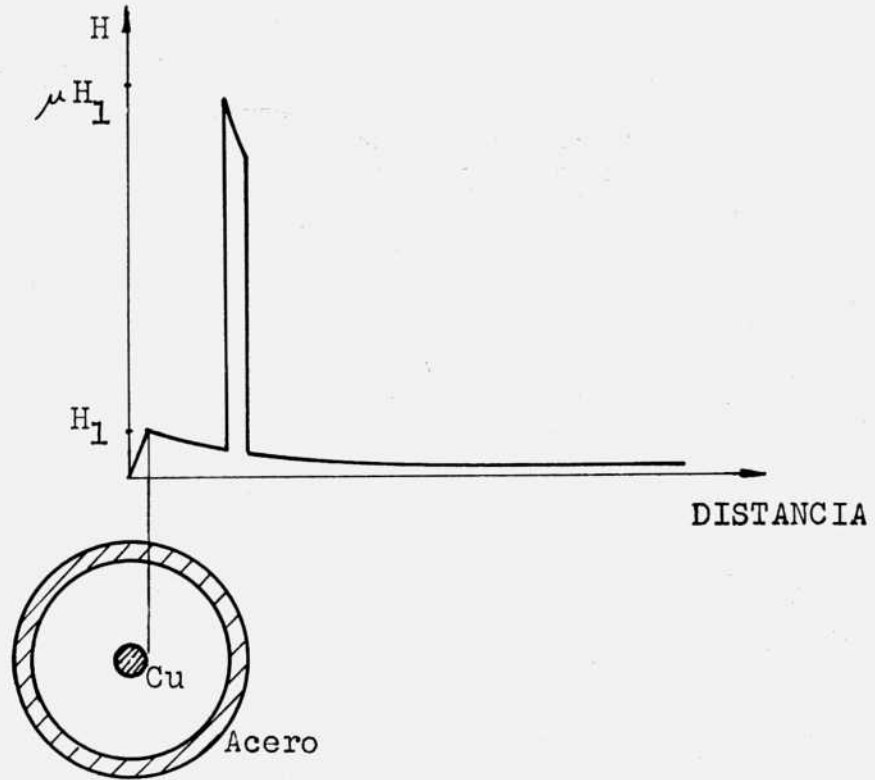
la fisura "A" es paralela a las líneas de fuerza, luego no es detectable; en cambio la fisura "B" si se detecta.

La intensidad de campo máxima estará sobre la superficie exterior. Por lo tanto, para ver defectos en la superficie interior se utiliza para magnetizar, un conductor central de cobre. Dicho conductor produce un

campo magnético exterior a él que es concatenado por la pieza a inspeccionar.

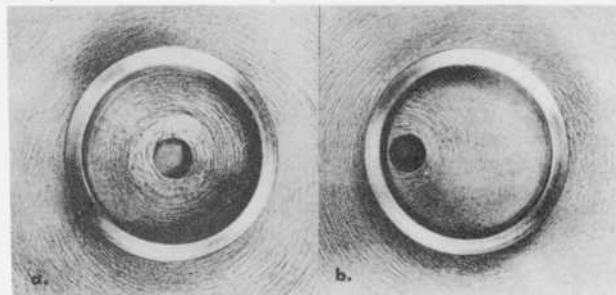


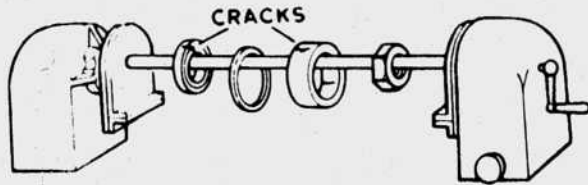
Siendo la distribución del campo:



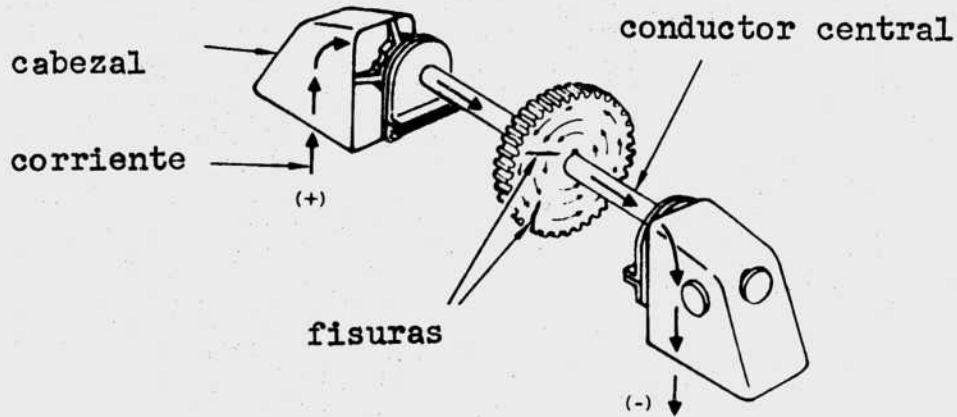
La intensidad de corriente requerida para la magnetización circunferencial es de 600-800 Amp. por cada 25 m.m. de espesor o diámetro.

Se debe tener en cuenta que la situación del conductor central con respecto a las paredes de la pieza a ensayar tiene gran influencia sobre la densidad de campo inducido en las diferentes secciones de las paredes del espécimen. Para que el campo sea uniforme en una pieza de geometría regular el conductor debe ser concéntrico con la pieza.

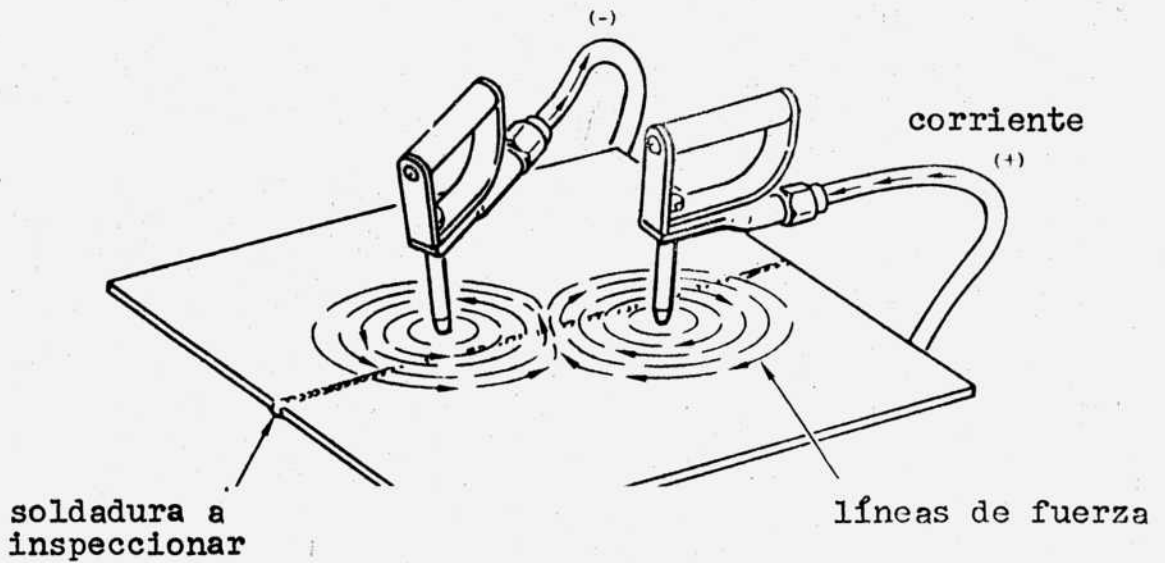




Otra forma de magnetización circunferencial con conductor central es:



También es magnetización circular o circunferencial la utilización de pun-
tas:



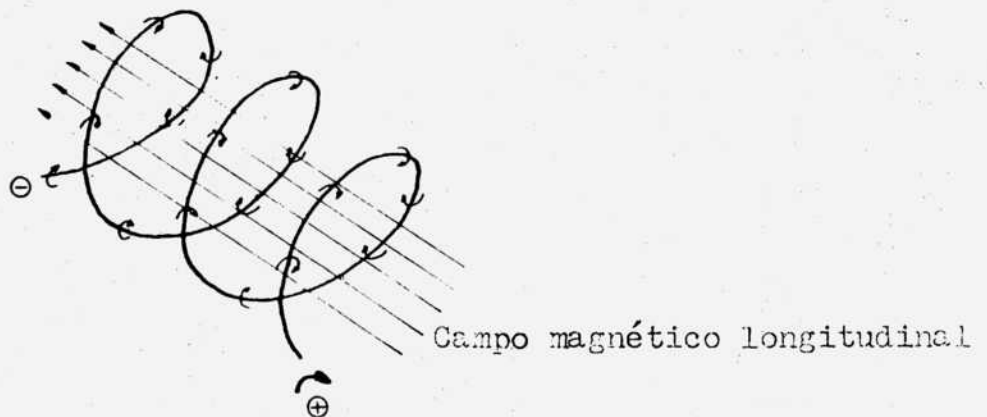
Las puntas deben estar ubicadas de tal forma que las líneas de fuerza sean normales a la zona de la soldadura a inspeccionar.

Debe tenerse en cuenta en este caso, que por ser el contacto puntual, al operar con corrientes elevadas la superficie de la pieza bajo ensayo puede ser deteriorada por falsos contactos, o sufrir calentamientos localizados.

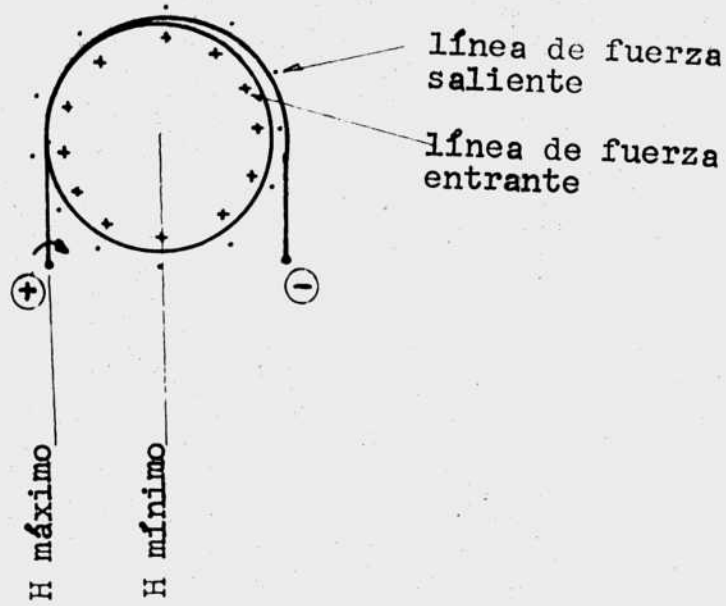
Para evitar la formación de arcos debidos a falsos contactos hay electrodos provistos de una llave dispuesta de tal modo que impide la circulación de corriente por las puntas si no existe un buen contacto eléctrico entre la pieza en ensayo y el electrodo.

b) Magnetización Longitudinal:

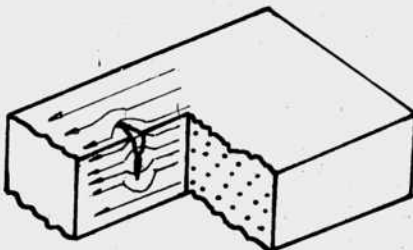
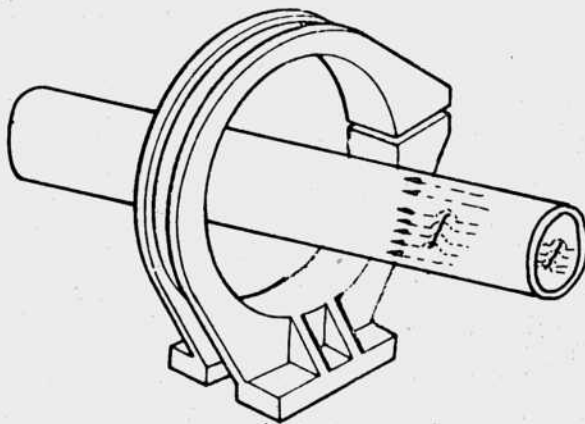
Se fundamenta en que la corriente eléctrica al pasar a través de una barra de cobre crea un campo magnético alrededor de la misma, sólo que se modifica la geometría de la barra formando una bobina con la misma.



La máxima intensidad de campo está sobre la superficie interior de la bobina, pues es donde hay mayor densidad de flujo



Este modo de magnetización, permite detectar fisuras o discontinuidades, tanto interiores como exteriores. Pues las líneas de fuerza en magnetización longitudinal, se presentan en toda la sección de la pieza.



Para magnetización longitudinal se requieren:

$$\frac{45.000}{L/D} = \text{Amp.}/\text{vueltas}$$

L = longitud de la pieza

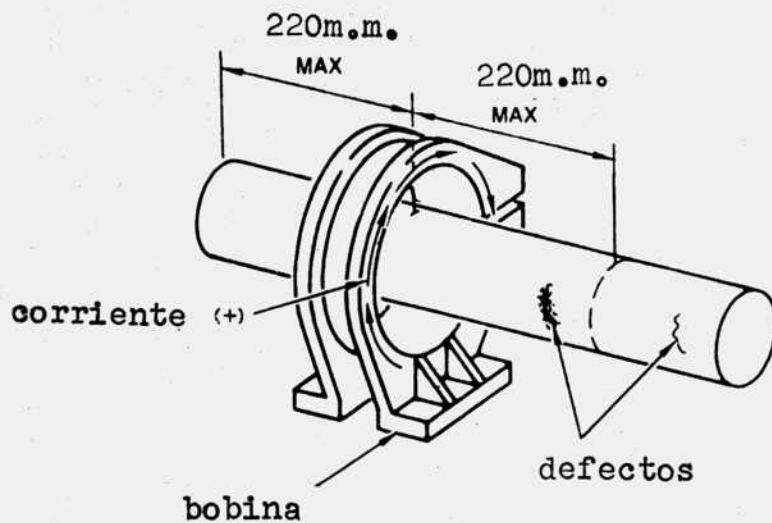
D = diámetro o espesor

esta fórmula es válida para $2 < \frac{L}{D} < 15$ y para una sección de la pieza $< \frac{1}{10}$ del área de la bobina.

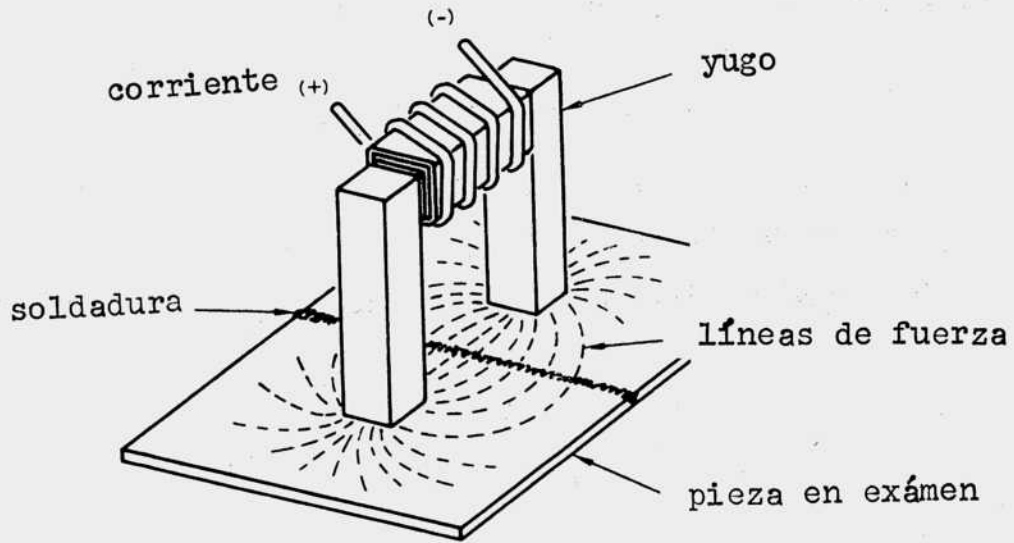
De donde, la corriente de magnetización será:

$$I = \frac{\text{Amp.}/\text{vueltas}}{N^{\circ} \text{ de vueltas de la bobina}}$$

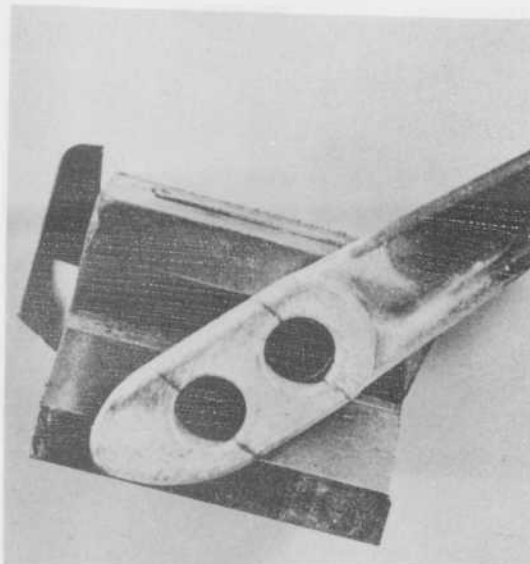
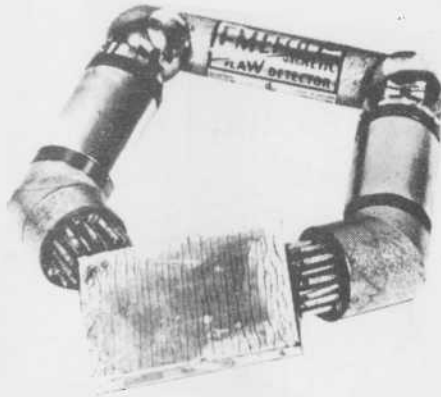
Si la pieza se ubica sobre la pared interior de la bobina, ésta magnetiza como máximo hasta 220 m.m. a ambos lados de la misma.



Otra forma de magnetización longitudinal es mediante la utilización del YUGO, que consiste en una bobina de alambre de cobre arrollada sobre un núcleo de chapas de hierro-silicio en forma de "U".



También podemos obtener magnetización longitudinal utilizando un IMAN PERMANENTE.



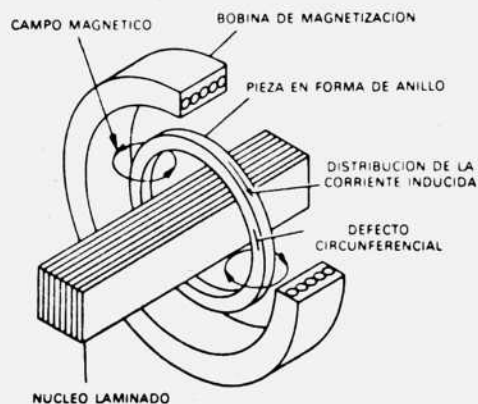
Para obtener magnetización longitudinal se suele utilizar el cable arrollado alrededor de la pieza a examinar cuando debido al tamaño de ésta, no se puede utilizar la bobina provista a tal efecto.



c) Magnetización por corrientes inducidas

Se aplica este modo de magnetización cuando se desean detectar defectos en dirección circunferencial en piezas con forma de anillo.

Se coloca la pieza dentro de una bobina magnetizante, concéntricamente con la misma. Y se coloca dentro de la pieza y paralelo al eje de la bobina, un núcleo laminado de acero de baja retentividad. La longitud del núcleo debe ser paroximadamente igual al diámetro del anillo y no inferior a 15 cm.

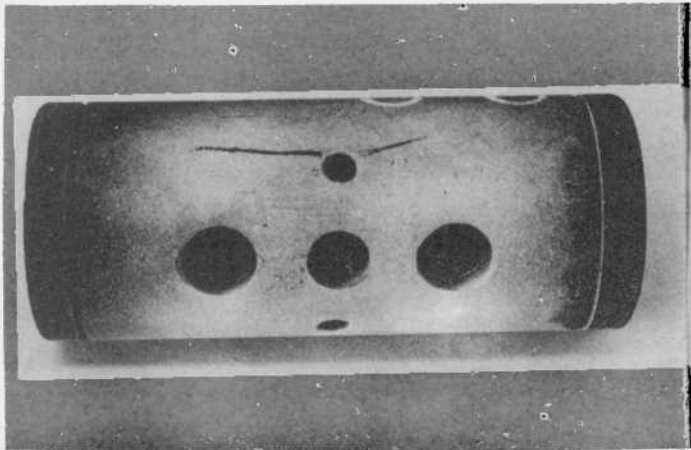


Este procedimiento induce un campo magnético circular en la pieza, que permite detectar defectos circunferenciales.

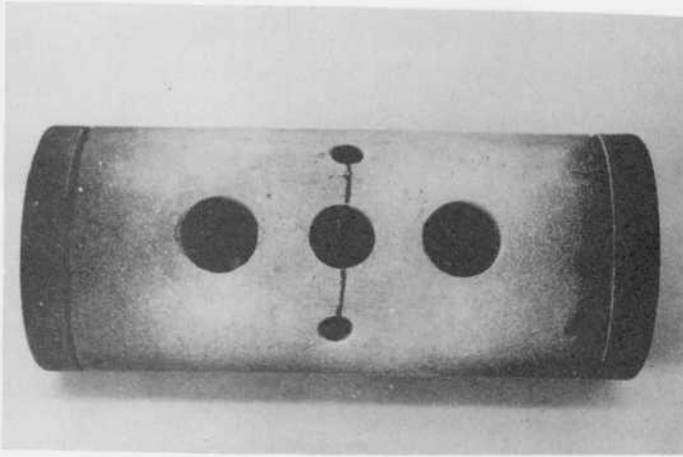
d) Magnetización combinada circular y longitudinal

Para inspeccionar completamente defectos con diferentes orientaciones en la pieza son necesarios dos o más magnetizaciones e inspecciones. Una de ellas con magnetización circular y otra con magnetización longitudinal. Para disminuir tiempo de inspección y efectuar una sola observación, en cierto tipo de piezas de geometría simple es posible aplicarlas simultáneamente dos o más corrientes magnetizantes con el fin de detectar defectos orientados en todas las direcciones mediante un solo ensayo. Esto crea lo que se llama un "campo vectorial".

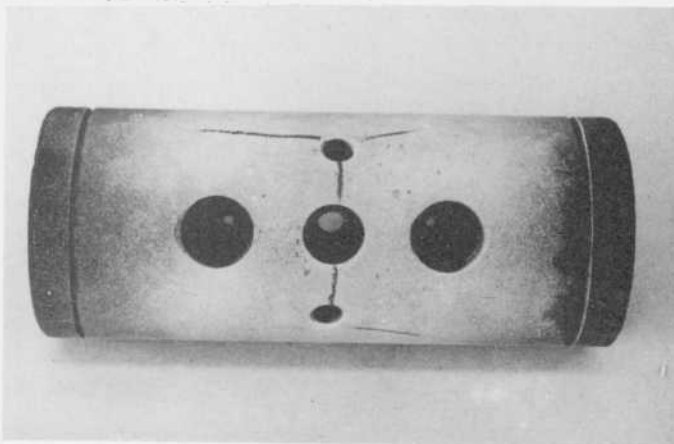
Este modo de magnetización debe ser realizado por personal cualificado.



Magnetización circular



Magnetización longitudinal



Magnetización vectorial

Toda otra forma de magnetización es combinación de los modos anteriormente descritos.

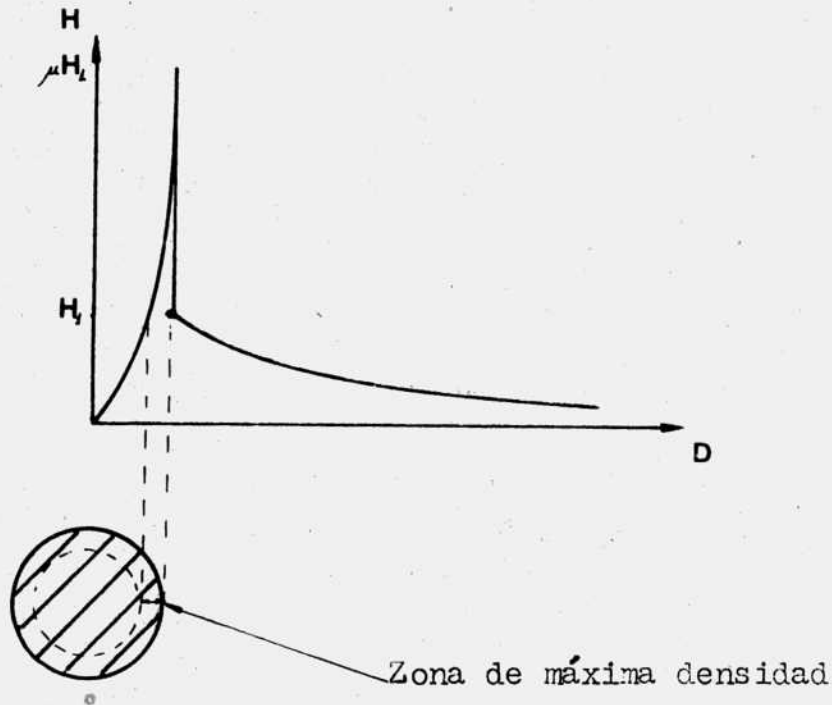
A continuación se dá una tabla con la clasificación y la nomenclatura de to dos los modos de magnetización según las normas DIN 54121.

Main Groups	Type of Magnetisation	Sub Groups	Arrangement and Field Direction	Code Letters for Reports	Stamp or Etching Symbol	
Pole Magnetisation 1	Yoke Magnetisation with ... 1.1	Permanent Magnet 1.1.1		YMP		
		Direct Current 1.1.2		YMD		
		Alternating Current 1.1.3		YMA		
		Impulsive Current 1.1.4		YMI		
		Solenoid or Coil Magnetisation with ... 1.2	Direct Current 1.2.1		SMD	
			Alternating Current 1.2.2		SMA	
	Impulsive Current 1.2.3			SMI		
	Current Flow 2	Through-Current with ... 2.1 (Current through Object)	Direct Current 2.1.1		TCD	
			Alternating Current 2.1.2		TCA	
			Impulsive Current 2.1.3		TCI	
		Conductor-Bar Current with ... 2.2	Direct Current 2.2.1		BCD	
			Alternating Current 2.2.2		BCA	
Impulsive Current 2.2.3				BCI		
Induced Current with ... 2.3		Alternating Current 2.3.1		ICA		
		Impulsive Current 2.3.2		ICI		
Combination Techniques		For Example: Yoke Magnetisation with Through Current	Direct Current with Alternating Current 1.1.2 2.1.2		YMD-ICA	
		Demagnetisation Symbol				in conjunction with the other symbols

TIPOS DE CORRIENTE PARA MAGNETIZAR

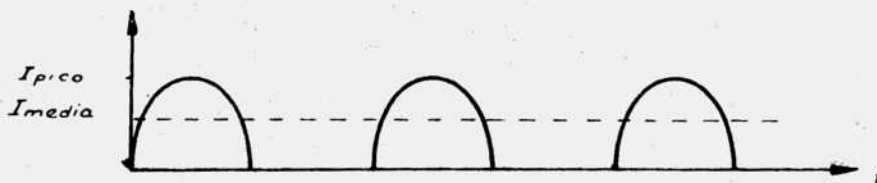
a) Alterna monofásica:

Tiene poca penetración, por lo tanto las líneas de fuerza se concentran en la superficie, siendo muy sensible a discontinuidades superficiales. Este tipo de excitación da gran movilidad a las partículas magnéticas.

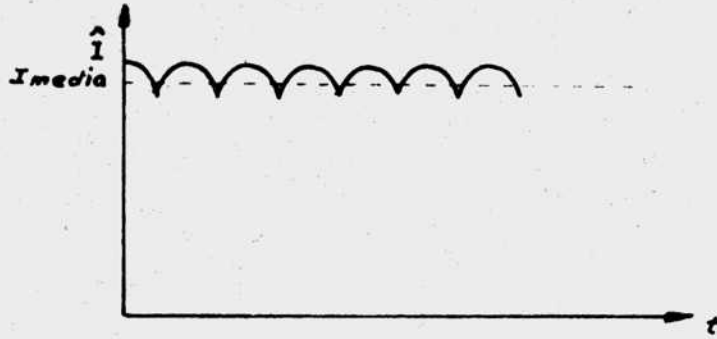


b) Alterna rectificadora de 1/2 onda o continua pulsante:

Por ser pulsante otorga gran movilidad a las partículas magnéticas, con lo cual responden mejor a los flujos dispersos



Tiene las mejores cualidades de penetración para defectos sub-superficiales. La densidad de flujo está determinada por la $I_{(pico)}$, mientras que el calentamiento es producido por la $I_{(media)}$. En esto reside su principal ventaja con respecto a la continua por rectificación de trifásica, ya que esta tiene $I_{(pico)} \approx I_{(media)}$ con lo cual a igual densidad de flujo tenemos mayor calentamiento.



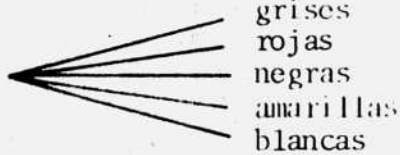
CAPITULO IV

PARTICULAS MAGNETICAS

Características y técnicas de aplicación

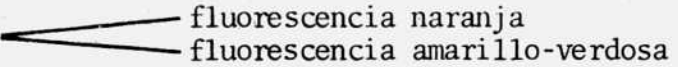
Las principales características que deben poseer son: muy baja retentividad y elevada permeabilidad (o sea un ciclo de histéresis muy delgado), tamaño y forma adecuado, baja densidad, elevada movilidad, muy buena visibilidad o contraste, e inalterabilidad.

Comercialmente se presentan en dos variedades:

- a) Para observar con luz blanca:
- 
- grises
 - rojas
 - negras
 - amarillas
 - blancas

- b) Para observar con luz ultravioleta de onda larga, que en las lámparas comúnmente utilizadas en los equipos comerciales tienen un pico de radiación en 3650×10^{-9} mts (3650 A), conocida normalmente como "luz negra".

fluorescentes



- fluorescencia naranja
- fluorescencia amarillo-verdosa

Las técnicas de aplicación son dos:

- a) Técnica seca:

Es más sensible para la detección de discontinuidades subsuperficiales. Se la utiliza para piezas grandes de difícil manejo y es adecuada para la detección con equipos de magnetización portátiles.

Es sumamente importante para esta técnica, que la superficie a inspeccionar esté limpia y seca.

Las partículas magnéticas a utilizar en esta técnica pueden ser para observar con luz blanca o con luz "negra".

Seleccionando el grano de las partículas magnéticas se preestablece el umbral de detección.

- a 1) con campo continuo

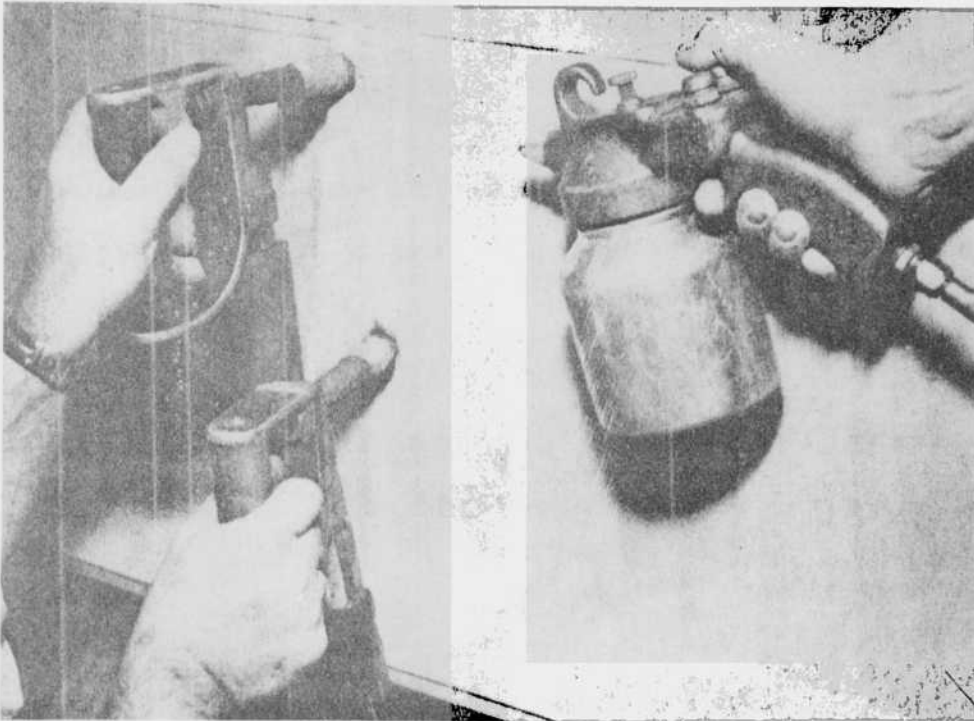
Normalmente se la aplica cuando se utiliza para magnetizar *puntas, yugo o bobina*.

Los pasos a seguir son los siguientes:

- 1) Aplicamos la corriente de magnetización.

- 2) Espolvoreamos las partículas magnéticas.
- 3) Quitamos soplando suavemente el exceso de partículas, mientras se aplica la corriente para no borrar accidentalmente alguna indicación.
- 4) Suspendemos la circulación de corriente.
- 5) Analizamos las indicaciones.

A continuación podemos ver la inspección de una soldadura, mediante esta técnica.



a 2) Con campo remanente

Sólo se pueden ensayar por esta técnica piezas cuyo magnetismo remanente sea elevado. Este requisito lo cumplen aquellas piezas cuyo contenido de carbono sea superior al 0,2%.

Esta técnica de ensayo debe aplicarse en aquellas piezas de geometría complicada y cambios de sección relativamente notorios, para evitar que indicaciones no relevantes (defectos aparentes) puedan enmascarar indicaciones de defectos reales.

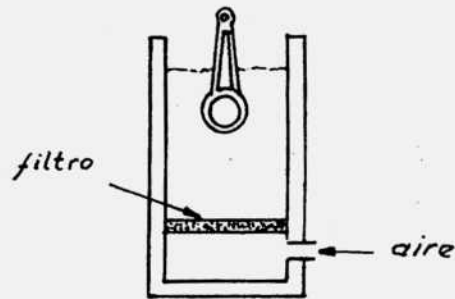
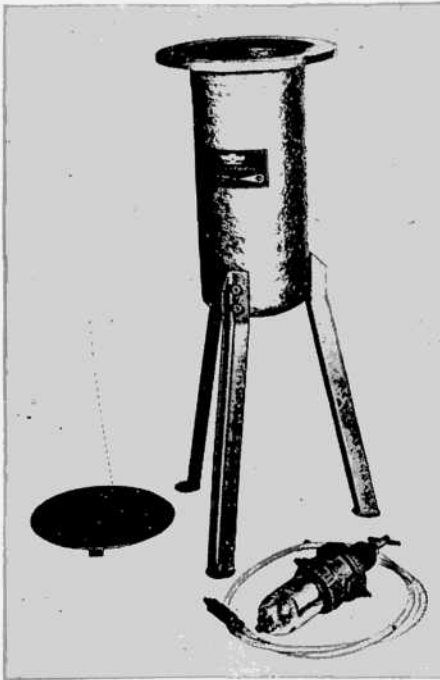
Los pasos a seguir son los siguientes:

- 1) Aplicamos la corriente de magnetización.
- 2) Suspendemos la circulación de corriente.
- 3) Espolvoreamos las partículas magnéticas.
- 4) Quitamos el exceso de partículas soplando suavemente.

5) Analizamos las indicaciones

Existe en el mercado un equipo especialmente diseñado para la aplicación del medio detector. Se denomina "camara de torbellino", y en ella se introducen las piezas en ensayo previamente magnetizadas.

En dicha cámara las partículas magnéticas son mantenidas en suspensión mediante una inyección de aire comprimido. Este baño de partículas magnéticas secas se comporta como un líquido de baja viscosidad en el que puedan sumergirse las piezas con gran facilidad, lográndose así un considerable aumento de la velocidad de ensayo.



b) Técnica Húmeda:

Las partículas se aplican en suspensión en aceite liviano, kerosene, agua u otro vehículo con punto de ignición no inferior a 60°C.

Las partículas magnéticas para preparar el baño suelen venir en forma de

polvo, pasta o concentrados líquidos. Los concentrados para diluir en agua traen incorporados, o en su defecto el fabricante suministra por separado, aditivos para reducir la sedimentación de las partículas, agentes humectantes antiespumantes y agentes antioxidantes de acuerdo a las necesidades del proceso.

Estos concentrados a su vez poseen un emulsionante que impide la coagulación de las partículas, incluso cuando aceites o contaminantes grasos estén presentes en el baño hasta una determinada proporción en volumen, especificada por el fabricante del producto.

También se comercializa el baño preparado en forma de aerosol, en dos variantes:

- a) partículas rojas
- b) partículas fluorescentes

Esta técnica es más sensible para la detección de discontinuidades superficiales; es más utilizada para ensayar piezas pequeñas o ser aplicada en procesos de automatización.

Presenta una muy buena movilidad de las partículas, para lo cual se utilizan vehículos de baja viscosidad.

Normalmente se utiliza esta técnica cuando se magnetiza entre cabezas (magnetización circular).

Se procede de la siguiente manera:

- 1) Se baña toda la superficie de la pieza con las partículas magnéticas en suspensión.
- 2) Se aplica la corriente en el instante en que suspendemos el baño, para evitar que la fuerza del chorro del baño lave alguna indicación.
- 3) Se suspende la circulación de corriente.
- 4) Se analizan las indicaciones.

En la preparación del baño es de suma importancia la *concentración* del mismo, o sea la relación entre el volumen de partículas magnéticas y el volumen de líquido. Estas concentraciones están fijadas en la norma ASTM E-138-63.

Una concentración muy baja disminuye la sensibilidad del ensayo, y una concentración muy elevada puede enmascarar la indicación de los defectos.

Para esta técnica de ensayo es fundamental la limpieza de los componentes del equipo, y la concentración del baño.

Los pasos a seguir para la preparación del baño son los siguientes:

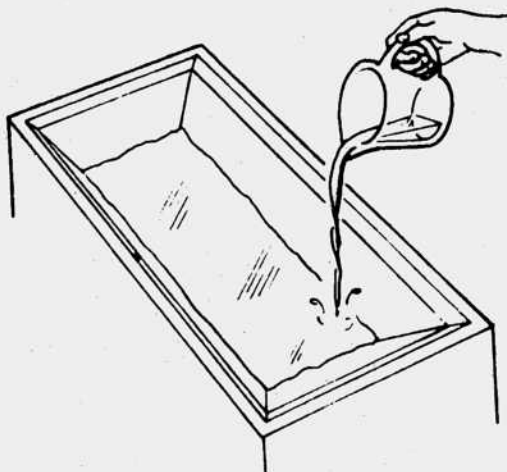
- 1) Antes de preparar el nuevo baño, limpiar todos los componentes del equipo de bombeo y el tanque.
- 2) Llenar el tanque con el vehículo recomendado por el fabricante para el tipo de partículas utilizadas.
- 3) Pesar o medir la cantidad de partículas en un recipiente limpio. Las cantidades típicas son:
 - 45 gr. de partículas no-fluorescentes cada
 - 4 litros de aceite liviano.
 - 7 gr. de partículas fluorescentes cada
 - 4 litros de aceite liviano.



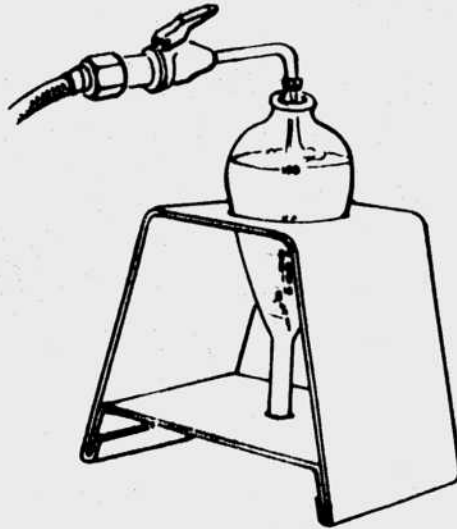
- 4) Añadir una pequeña cantidad de aceite a las partículas, y mezclar vigorosamente.



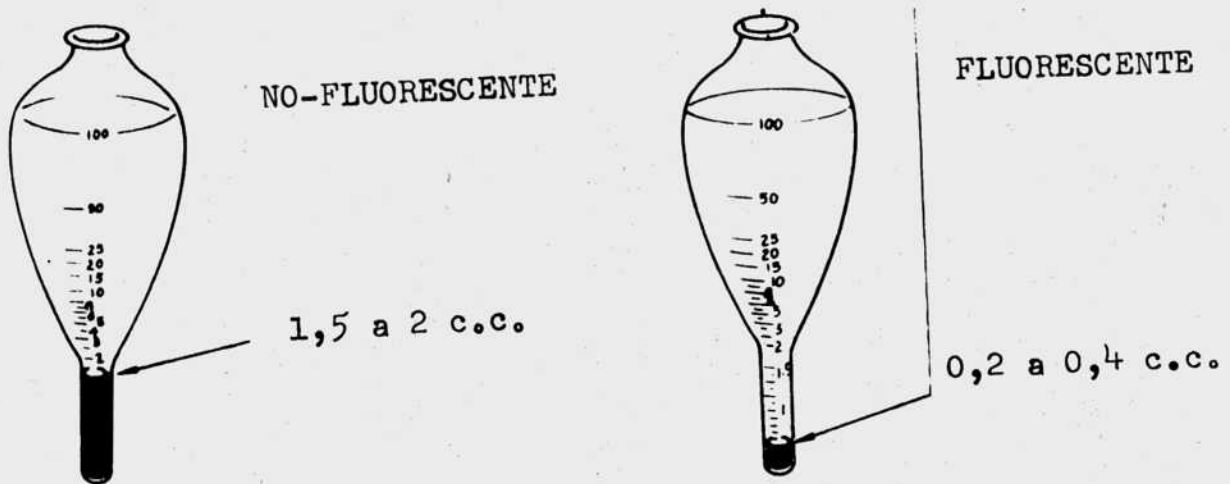
- 5) Volcar el contenido del recipiente en el tanque con aceite y conectar la bomba de recirculación hasta asegurar una completa distribución de las partículas en el baño.



- 6) Llenar con el baño el tubo de centrifuga hasta enrasar con la indicación de 100 cc.



- 7) Dejar decantar en un lugar libre de vibraciones durante treinta minutos.



- 8) Verificar el volumen de partículas acumuladas en el fondo del tubo. Para partículas coloreadas debe haber entre 1,5 y 2 cc. Para partículas fluorescentes debe haber entre 0,2 y 0,4 cc. Si la lectura es mayor, añadir vehículo. Si es menor se deben añadir partículas al baño. Esta verificación debe hacerse todos los días, antes de comenzar a trabajar.

CAPITULO V

Ventajas con respecto al método de líquidos penetrantes:

- 1) Es más rápido.
- 2) No son necesarias limpiezas sofisticadas, ni preparaciones especiales de la superficie.
- 3) Puede detectar discontinuidades superficiales aún bajo delgadas capas plásticas o esmaltes.
- 4) Puede detectar ciertas discontinuidades sub-superficiales.

Desventajas:

- 1) Los materiales no-magnéticos no pueden ser testeados con este método (Al, Mg, Cu, Pb, Ti, bronce, aceros austeníticos, etc.).
- 2) El campo magnético debe interceptar las discontinuidades en una dirección dada, por lo tanto, el operador debe conocer su posible ubicación o efectuar más de un ensayo por pieza.
- 3) Las excesivas corrientes que son necesarias para magnetizar piezas grandes.
- 4) La desmagnetización que puede ser necesaria con posterioridad al ensayo.
- 5) El calentamiento localizado y quemado de la superficie de la pieza cuando se utilizan puntas o pinzas con elevada circulación de corriente.

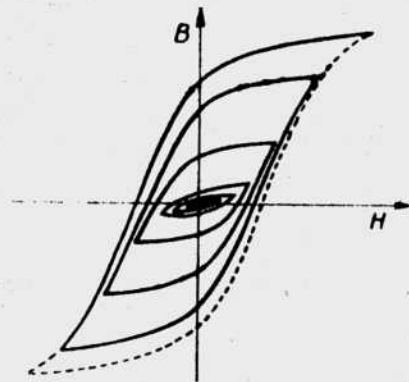
Precauciones a tener en cuenta:

- 1) Los arcos eléctricos que aparecen debido al mal contacto entre las puntas y la pieza cuando circulan corrientes elevadas: por lo tanto *no usar en áreas explosivas.*
- 2) Los aceites y pastas utilizados afectan la piel. Para uso continuo de estos productos emplear guantes o cremas protectoras.
- 3) Las partículas magnéticas utilizadas en el método seco no son tóxicas, pero en lo posible debe evitarse su inhalación usando máscaras.
- 4) En caso de emplear luz negra, poner los filtros adecuados. No enfocarla directamente sobre los ojos ni usarla sobre superficies reflectantes.

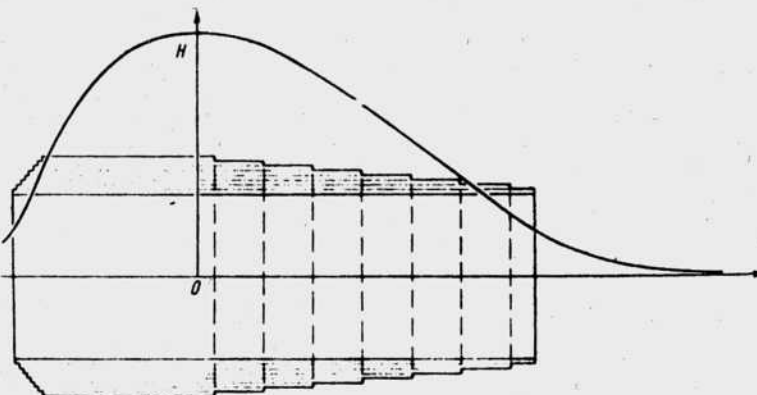
Desmagnetización

Suele ser necesario desmagnetizar las piezas una vez inspeccionadas, debido a que el campo magnético residual atrae partículas metálicas ferromagnéticas, por lo tanto si la pieza está sometida a movimiento rotativo o alternativo, esta circunstancia aumentaría el desgaste. Si la pieza debe ser maquinada estas partículas adheridas interferirán en la operación. También pueden molestar para el caso de posteriores soldaduras de arco, pues el campo remanente puede llegar a desviar el arco eléctrico. En otros casos pueden interferir con el uso de instrumentos sensibles a campos magnéticos (aeronáutica por ejemplo).

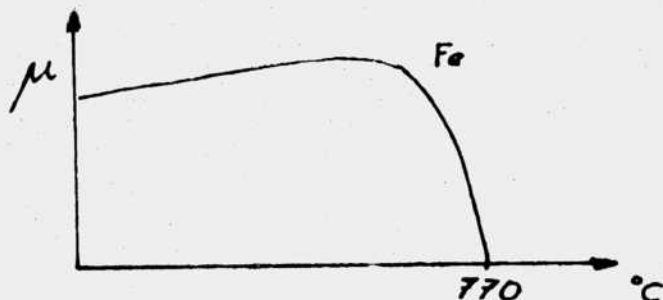
Para desmagnetizar se somete la pieza a un campo magnético alternativo decreciente, en forma continua o por pasos. Este campo puede ser obtenido con la misma bobina que utilizamos para magnetización longitudinal. Excitamos dicha bobina con corriente alterna y pasamos la pieza a través de la misma hasta alejarnos de ella (esto sin interrumpir el paso de corriente). Obtenemos así ciclos de histéresis de valor decreciente como se muestra a continuación:



Otra forma de obtener un campo similar al descrito es empleando la bobina de desmagnetización representada abajo, en la cual el arrollamiento es decreciente en un sentido, obteniéndose una gradual disminución de la intensidad de campo. Si la bobina es excitada por corriente alterna se tendrán los ciclos de histéresis descritos.



Otra forma de desmagnetizar es elevar la temperatura de la pieza hasta llegar a su *punto de Curie*, a partir del cual un material ferromagnético pierde totalmente su magnetismo remanente.



TECNICAS Y EQUIPOS DE DESMAGNETIZACION

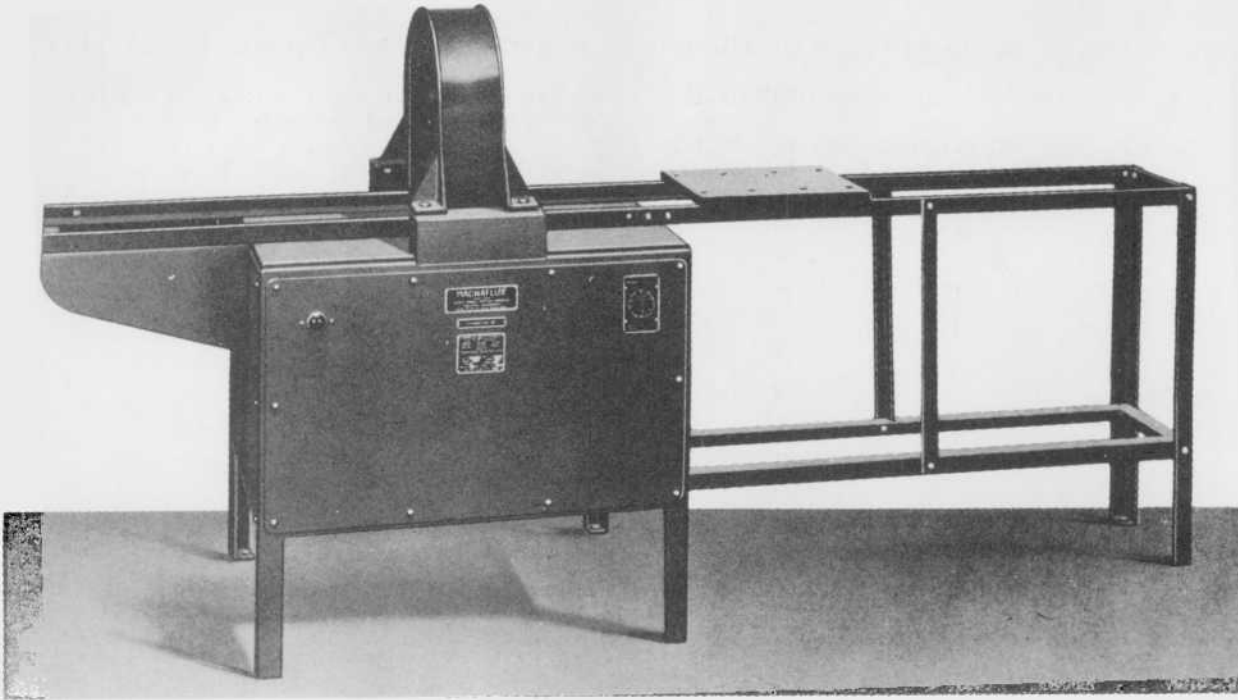
a) Desmagnetización con bobina y corriente alterna

El equipo más común de desmagnetización consiste en una bobina del tipo de túnel abierto, por la que circula corriente alterna a la frecuencia de la línea.

La pieza se coloca en la bobina y se conecta la corriente. Mientras permanece conectada la corriente, la pieza se retira de la bobina hasta una distancia de aproximadamente 1m-1,5m, antes de cortar la corriente. En las piezas de forma regular su eje principal debe ser ubicado paralelamente al eje de la bobina. En las piezas de forma compleja es posible a veces, una más completa desmagnetización si se gira y voltea la pieza de extremo a extremo.

El diámetro de la bobina debe ser lo suficientemente grande para acomodar a la pieza. Cuando se desmagnetizan piezas pequeñas en bobinas grandes, se debe mantener la pieza contra la pared interior o esquina de la bobina, pues en dicha área es más intensa la fuerza desmagnetizante. A veces es posible desmagnetizar una pieza de tamaño superior al de la abertura de la bobina, colocándola junto a dicha abertura, conectando la corriente, girar la pieza y luego alejarla hasta una distancia de 1-1,5 mts. Por ser los resultados de este procedimiento bastante inciertos, se recomienda utilizarlo sólo cuando se trate de desmagnetizar unas pocas piezas, si la cantidad de éstas fuese grande se debe recurrir a una bobina del tamaño adecuado.

Las bobinas de gran tamaño poseen un carro desplazable sobre rieles, en los cuales se colocan las piezas pesadas para facilitar su manipulación.



Model SB-1416T Demagnetizer

b) Desmagnetización con equipo de inspección de corriente alterna y corriente continua

b1) Equipo portátil:

Normalmente estos equipos pueden suministrar ambas corrientes, alterna y rectificada de 1/2 onda.

Se hace una bobina con tres o cuatro vueltas del cable. Se ajusta el valor de la corriente alterna al mayor valor que se utilizó para magnetizar la pieza. Se coloca la pieza dentro de la bobina y se conecta la corriente. Luego se saca la pieza de la bobina hasta alejarla de 1 a 1,5 mts. y se interrumpe la corriente. En el caso de tratarse de piezas grandes, lo que se aleja, es la bobina.

Debido a la poca profundidad de penetración de la corriente alterna, algunas piezas pueden resultar difícil de desmagnetizar completamente utilizando corriente alterna. Esto se puede dar en piezas de gran tamaño o de geometría no regular. En estos casos se emplea corriente continua.

Para desmagnetizar una pieza con corriente continua, la misma se coloca en la bobina y se ajusta la corriente a un valor similar al utilizado para magnetizar. Se da un impulso de corriente a este valor inicial. Se invierte la polaridad y se reduce el valor de corriente y se da un impulso de corriente con el nuevo valor. Este proceso de invertir y reducir se continúa hasta alcanzar el mínimo valor que permite el equipo. La pieza deberá estar aho-

ra efectivamente desmagnetizada, pero el procedimiento es muy lento.

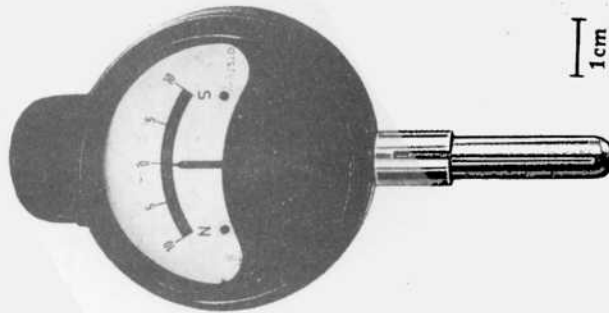
Es posible también usar este procedimiento para la desmagnetización circular, cuando la corriente se hace pasar a través de la pieza, en lugar de a través de la bobina.

b2) Esquipo estacionario

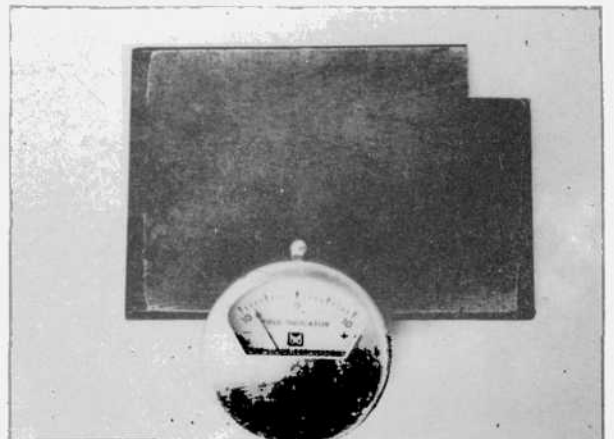
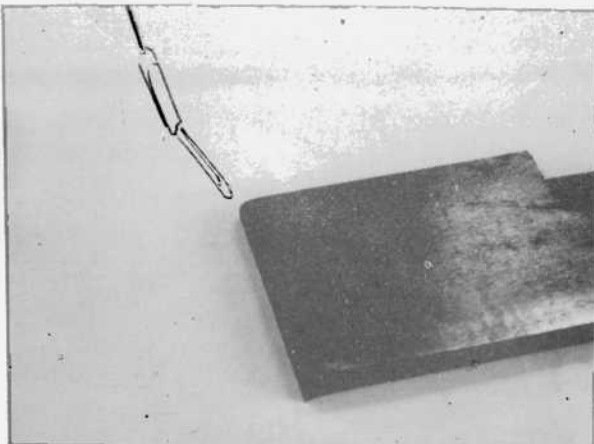
Si bien en equipos estacionarios la metodología es la misma, estos suelen poseer una llave selectora de intensidad de corriente, que permite seleccionar entre un mínimo de diez valores de corriente de desmagnetización. Hay equipos en los cuales esta llave selectora es accionada por un motor que hace recorrer los valores de corriente de máximo a mínimo en forma automática, al pulsar el botón de desmagnetización. A este proceso se lo denomina desmagnetización por "pasos decrecientes".

c) Verificación de la desmagnetización

La presencia de un campo residual longitudinal puede determinarse mediante la utilización de un indicador de campo magnético. Una fuerte deflexión de la aguja indica la existencia de un intenso campo residual. Este método sólo indica valores relativos.



Otra forma es mediante la utilización de una cadena hecha con 5 ó 6 broches para papel, tal como se observa en la siguiente fotografía.



INDICACIONES NO-RELEVANTES O DE DEFECTOS APARENTES

Son indicaciones correctas, producidas por un campo de fuga que no tiene su causa en una discontinuidad que afecte la utilidad de la pieza.

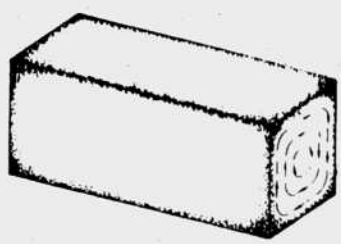
Las causas de la aparición de este tipo de indicaciones son:

- a) Excesiva corriente magnetizante.
- b) Geometría de la pieza.
- c) Variaciones de permeabilidad dentro de la pieza.

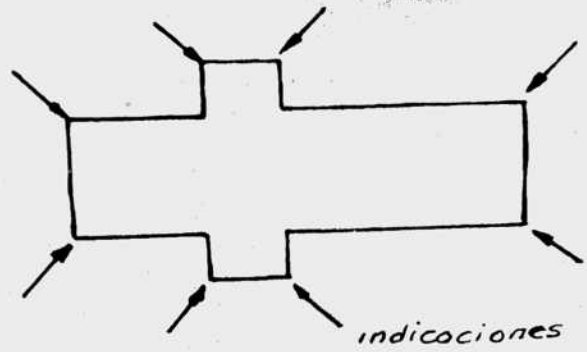
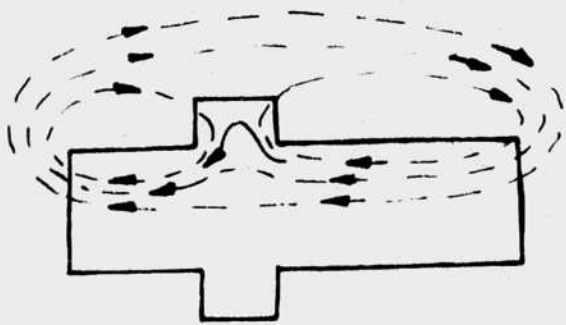
Las indicaciones no relevantes son normalmente difusas.

Algunos de los casos típicos son los siguientes:

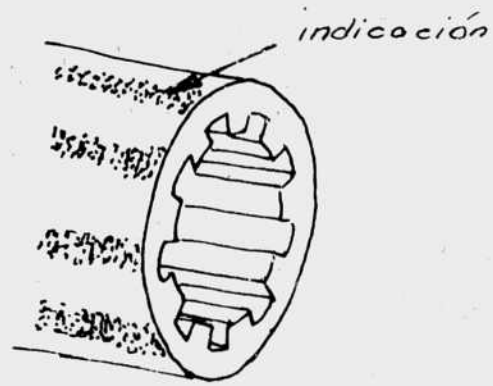
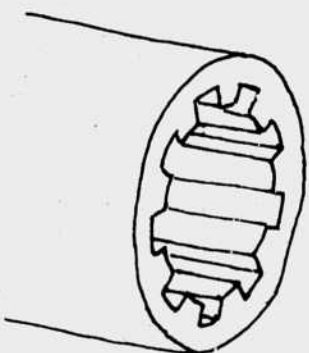
- a) Si la corriente de magnetización circular excede la permeabilidad del material, en los ángulos del artículo se forman indicaciones no-relevantes.

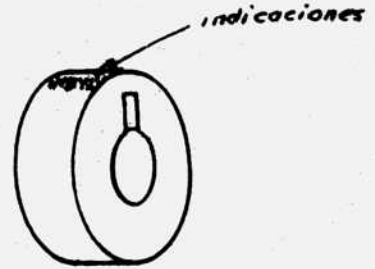
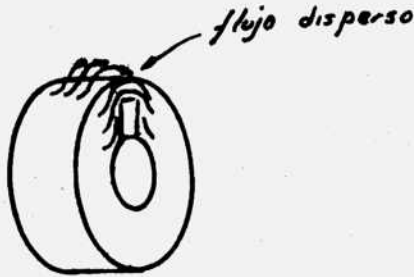
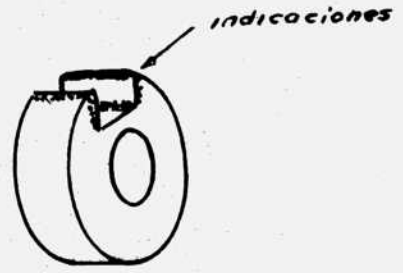
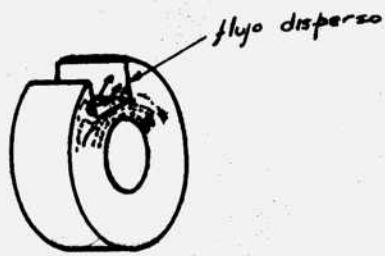


Habrán indicaciones no-relevantes en todos los puntos en donde entren o salgan líneas de fuerza, y éstas tienden a hacerlo en los bordes.

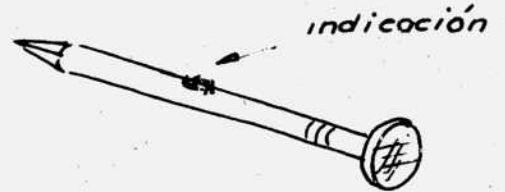


- b) Se presentan también cuando existen reducciones localizadas de espesor.

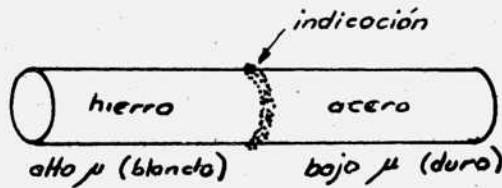




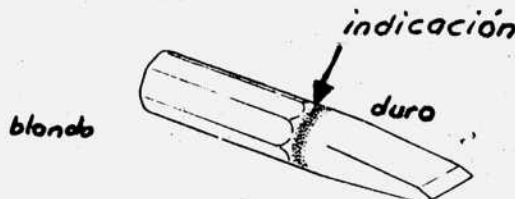
c) Aparecen debido a que el trabajado en frío de un material puede cambiar la permeabilidad del mismo en forma localizada, el área de trabajado en frío presenta baja permeabilidad.



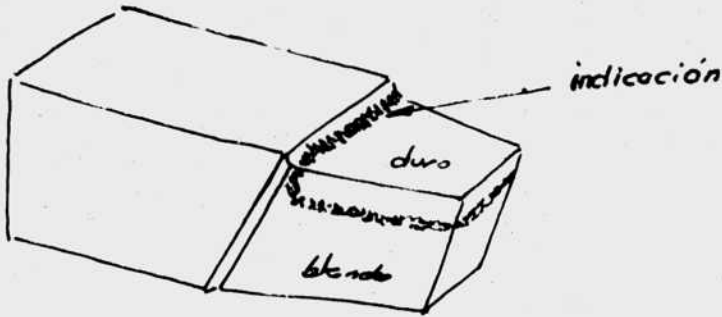
En el caso de soldar dos materiales ferromagnéticos de distintas permeabilidades (hierro y acero, por ejemplo), tendremos un salto brusco de la permeabilidad en la zona de unión. La indicación resultante no discriminará entre un defecto en la soldadura y la variación de permeabilidad.



Este caso también se presenta en piezas con tratamientos térmicos localizados (por ejemplo en un cortafrío), pues la parte templada será magnéticamente dura o sea que tendrá mayor reluctancia que la parte no templada.

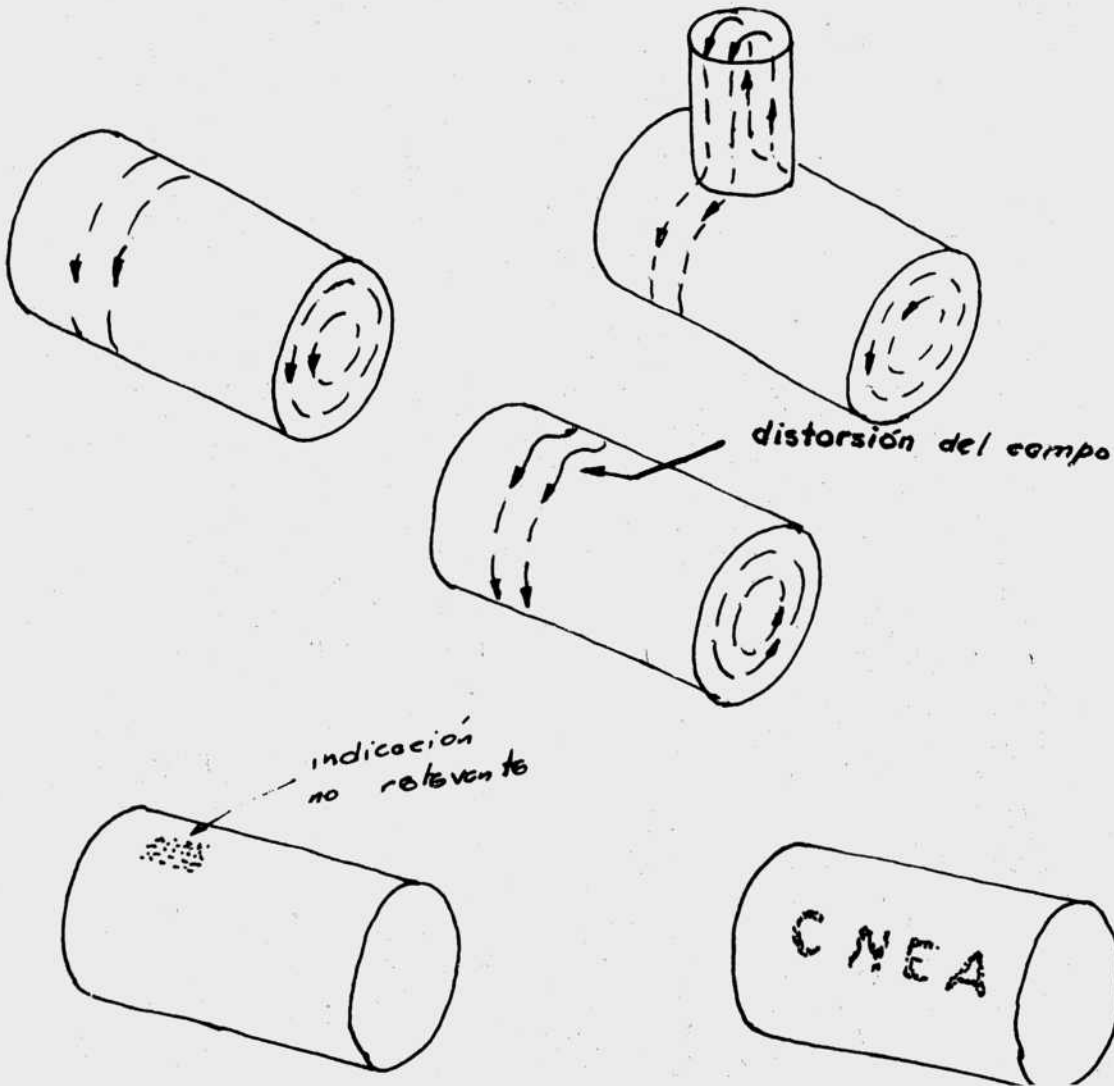


Se obtienen indicaciones no-relevantes cuando se suelda con bronce u otro material no ferromagnético. En la figura que se muestra, se suman los efectos debidos a estar soldada con bronce y ser dos metales de muy distinta permeabilidad.



ESCRITURA MAGNETICA

Si a una barra magnetizada con un campo circular, se le encima otro material ferromagnético, se producirá una distorsión en el campo original. Esta distorsión permanecerá aún después de retirado el elemento perturbador, y esto dará lugar a una indicación no-relevante. Este efecto es lo que ocasiona la denominada *escritura magnética*.



METODO DE REGISTRO DE LAS INDICACIONES

Tipos de registros

En ciertas ocasiones es necesario guardar los registros de las piezas inspeccionadas y de las indicaciones encontradas en ella. El tamaño y forma, así como la ubicación de las indicaciones sobre la pieza, debe quedar registrado junto con toda otra información pertinente. Tal como el reacondicionamiento efectuado o la decisión sobre la utilidad de la pieza.

El incluir un registro visible de las indicaciones en el informe lo hacen mucho más completo y comprensible.

Los tipos de registros más comunes son los siguientes:

- a) Croquis parcial o total de la pieza.
- b) Transferencia a cinta adhesiva transparente.
- c) Registro fotográfico.

Transferencia a cinta

Mediante este método se puede obtener un preciso registro. Si la indicación está formada por partículas de polvo seco, soplando con cuidado se debe eliminar el exceso de polvo de la superficie. Luego se aplica sobre la indicación una cinta adhesiva transparente, con el lado de pegado hacia la indicación, y se presiona levemente la cinta. Si se presiona excesivamente, dará un ancho de la indicación superior al real.

Al retirar la cinta tendremos en ella una réplica del mapa de defectos. Uno de estos registros puede verse a continuación.



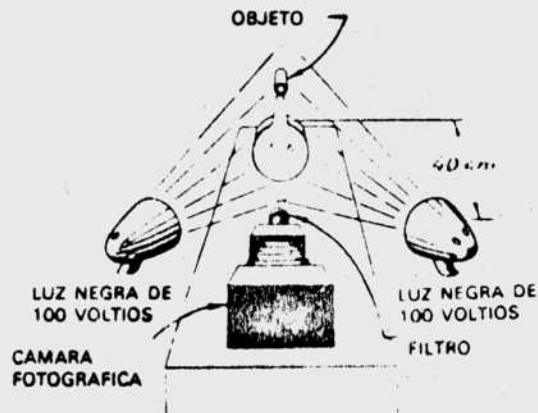
Si la indicación fue formada mediante la utilización del método húmedo, es necesario dejar el agente utilizado como vehículo antes de aplicar la cinta adhesiva.

Registro fotográfico

También pueden tomarse fotografías para utilizarlas como registros, es necesario que se vea una parte lo suficientemente amplia de la pieza, para poder reconocer la misma y la posición de la indicación sobre ella. Para señalar el tamaño relativo de los defectos es conveniente incluir en la fotografía una regla.

La toma de fotografías de indicaciones fluorescentes requiere una técnica fotográfica especial, que se detalla a continuación.

Este tipo de fotografía de ser realizada en un cuarto oscuro ubicando el foco de radiación, la cámara y el objeto como se muestra en la figura.



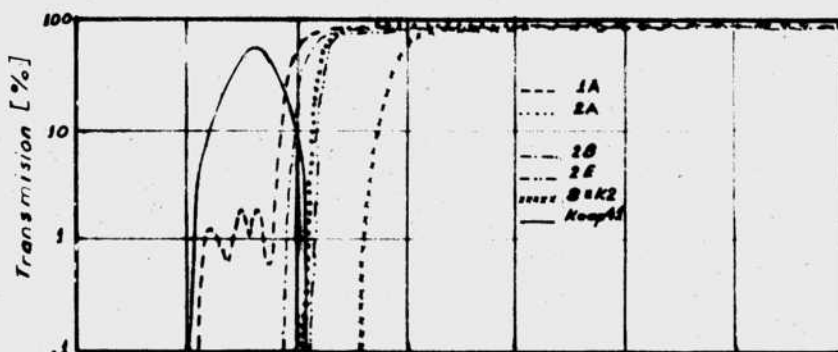
La mayoría de los focos de radiación para trabajos de fluorescencia, emiten no sólo radiaciones ultravioletas, sino también radiaciones visibles, por lo tanto debe colocarse delante de los focos (si éstos no lo traen incorporados) un filtro K))P 41. La función del mismo, es permitir el paso de las radiaciones precisas para producir fluorescencia exclusivamente. A este filtro se lo denomina "filtro excitante".

Además del filtro excitante, debe colocarse un filtro "barrera" del tipo "WRATTEN" delante de la lente de la cámara. Este filtro actúa como una barrera contra la radiación excitante, permitiendo sólo el paso de la radiación proveniente de la indicación fluorescente. Los filtros para este uso son:

KODAK WRATTEN 1A
KODAK WRATTEN 2A
KODAK WRATTEN 2B

KODAK WRATTEN 2E
KODAK WRATTEN 8

cuyas curvas de transmisión se pueden ver a continuación.



La exposición correcta para registrar una indicación fluorescente, depende del tipo de película, de la intensidad de la radiación excitante y de la distancia entre el objeto y el foco de radiación.

Como dato de referencia daremos las condiciones de exposición para película reversible AGFA Profesional 50 S:

Focos de excitación: 2 lámparas de "luz negra" G.E. de 100 W

Distancia foco de excitación-objeto: 30 cm.

Filtro excitante: KOOP 41

Filtro barrera: Kodak Wratten 2E

Diafragma: f/8

Tiempo de exposición: 30 seg.

Es conveniente, durante la exposición, iluminar brevemente y en forma indirecta, la pieza con luz blanca, para resaltar el perfil de la misma.

ENSAYOS POR PARTICULAS MAGNETICAS
DATOS PARA LA MAGNETIZACION

1. Aplicación de polos magnéticos. (ASME-V/Art.7-1974)

a) Imanes permanentes o electroimán excitado por corriente continua.

- Se requiere fuerza portante de 20 kg. como mínimo.

Espacio entre polos de 75 a 150 mm.

b) Electroimán excitado por corriente alterna.

- Se requiere fuerza portante de 5 kg como mínimo.

Estas técnicas sólo son recomendables para detectar defectos abiertos a la superficie. Para espesores menores que 6 mm. es más apropiado el electroimán excitado por corriente alterna que aquellos excitados por corriente continua o que los imanes permanentes de igual fuerza portante.

2. Inducción mediante corriente eléctrica

a) Magnetización circular con puntas de contacto

- Distancia entre puntas no inferior a 75 mm ni mayor que 200 mm.

- Si el voltaje a aplicar es mayor que 25 volts (circuito abierto) se aconseja usar contactos de plomo, acero o aluminio para evitar contaminar con cobre el material.

- Corriente de magnetización (ASME-V/Art.7-1974)

Distancia entre Contactos	Espesor del Material	
	Menor que 20 mm	Mayor que 20 mm
	Amperios	Amperios
75 mm	170 - 330	300 - 373
100 mm	360 - 440	400 - 500
125 mm	450 - 550	500 - 625
150 mm	540 - 660	600 - 750
175 mm	630 - 770	700 - 875
200 mm	720 - 880	800 - 900

Estos valores son considerados apropiados para corriente continua o rectifica cada en aceros estructurales.

b) Magnetización circular por aplicación de corriente entre extremos o mediante conductor central

- Con corriente continua se aplicarán los siguientes valores (ASME-V/Art.7 - 1974)

Diámetro de la pieza	Amperaje por CM. de diámetro (*)
12,5 cm	250 a 350 A
12,5 a 25 cm	200 a 250 A
25 cm	120 a 200 A

(*) Se considera el diámetro de la mayor sección normal al flujo de corriente.

- Con corriente alterna se aplicará entre 200 y 300 Amp. por cada cm. del mayor diámetro normal al flujo de corriente.

c) Magnetización longitudinal con bobina o solenoide formado con cable.

- Solamente se obtiene una inspección efectiva si la razón largo sobre diámetro (L/D) de la pieza es igual o mayor que 2.
- El área transversal de la pieza no debe ser menor que 1/10 del área de la bobina de magnetización.
- El número de Amper-vuelta requerido es inversamente proporcional a L/D y varía entre:

$$\frac{10000}{L/D} \quad \text{y} \quad \frac{30000}{L/D} \quad (\text{ASTM-E138})$$

- Según ASME-V/Art.7-1974 se debe aplicar corriente continua o rectificada calculando el N° de Amper-vuelta de acuerdo a la fórmula:

$$A = \frac{35000}{2+L/D}$$

Para piezas pequeñas a magnetizar en bobinas grandes y para relaciones L/D = 4 se aplicará:

$$A = \frac{45000}{L/D}$$

- El campo efectivo se extiende hasta 150 o 200 mm por fuera de ambos extremos de la bobina.