

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
PRESIDENCIA DE LA NACION

PROYECTO MULTINACIONAL DE TECNOLOGIA DE MATERIALES
(Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico - OEA)

INTRODUCCION AL ENSAYO NO DESTRUCTIVO
POR CORRIENTES INDUCIDAS

Carlos Valdecantos Martínez*

*Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial
INTA-ESPAÑA

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
PRESIDENCIA DE LA NACION

PROYECTO MULTINACIONAL DE TECNOLOGIA DE MATERIALES
(Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico - OEA)

INTRODUCCION AL ENSAYO NO DESTRUCTIVO
POR CORRIENTES INDUCIDAS

Carlos Valdecantos Martínez*

*Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial
INTA-ESPAÑA

INTRODUCCION AL ENSAYO NO DESTRUCTIVO POR CORRIENTES
INDUCIDAS

1. Preámbulo.

El método no destructivo de ensayo por corrientes inducidas - (CI) se basa en los principios de la inducción electromagnética y se emplea para identificar o diferenciar una amplia variedad de propiedades físicas, estructurales y metalúrgicas - en todo tipo de materiales conductores.

También suelen llamarse corrientes parásitas o corrientes de Foucault, denominación esta última tomada del francés. El término inglés "eddy currents" puede traducirse literalmente por corrientes turbulentas o corrientes en torbellino.

Un principio general en Ensayos No Destructivos (END) es que, en todos los casos, el material objeto del ensayo se somete a la acción de ciertos fenómenos físicos que hacen que la energía, bajo diversas formas, fluya a través del material. Las heterogeneidades y discontinuidades provocan anomalías en el flujo de esa energía (distorsión, reflexión, absorción, etc.) que se detectan desde el exterior de la muestra. En el caso - de las CI la energía que se pone en juego es electromagnética y, por tanto, no se necesita ningún tipo de contacto ni de agente de acoplamiento entre el generador y la muestra. Esta es una ventaja de importancia excepcional que permite, por - ejemplo, el control continuo de alambre en caliente, donde es

fácil alcanzar velocidades de inspección de hasta 50 m/seg.

El ensayo por CI es de una gran versatilidad, lo que permite aplicarlo a la resolución de problemas tan variados como:

- Medición de parámetros físicos o tecnológicos:
 - Conductividad eléctrica.
 - Permeabilidad magnética.
 - Tamaño de grano.
 - Dureza.
- Detección de heterogeneidades o discontinuidades, tales como:
 - Vetas, pliegues, grietas, cavidades.
 - Diversos tipos de corrosión.
 - Inclusiones, segregaciones.
- Separación de metales mezclados mediante detección de diferencias en:
 - Composición química.
 - Estado de tratamiento térmico o mecánico.
- Medición de espesores de láminas metálicas finas o de recubrimientos, tanto conductores como no conductores, sobre base metálica.

En particular, la medida directa de la conductividad eléctrica por CI constituye una poderosa herramienta de control en numerosos procesos industriales. Es un método muy sencillo y rápido y proporciona resultados muy fiables, por lo que se aplica ampliamente en caracterización de materiales no ferromagnéticos. Este ensayo se suele aplicar repetidas veces en las diferentes etapas de un proceso de fabricación, lo que es posible gracias a la rapidez del ensayo y a la facilidad de interpretación. -- Así por ejemplo, se emplea en la identificación de chatarras o

materias primas, en el control del estado de tratamiento térmico, etapas de mecanizado e inspección final. Es una buena práctica comprobar la conductividad eléctrica de las piezas antes de almacenarlas ya que es la última oportunidad de detectar — desviaciones en la aleación o en el tratamiento térmico y también de evaluar la eficacia del personal a cuyo cargo está el control del proceso de producción.

La versatilidad del ensayo por CI es, sin embargo, un arma de dos filos. Por un lado lo hace útil en la resolución de una amplia gama de problemas pero, por otro, algunos ensayos pueden verse dificultados, y aun impedidos, debido a que la variable que se desea medir o detectar resulta enmascarada por una respuesta más intensa de otra variable cuya importancia tecnológica es secundaria o despreciable (por ejemplo, variaciones dimensionales en un problema de control por composición química).

La capacidad del ensayo por CI para resolver problemas de caracterización de materiales contrasta con la de otros métodos de END, como Radiología o Ultrasonidos vinculados, hoy por hoy, de manera casi exclusiva con problemas de defectología (el caso de los Líquidos Penetrantes y Partículas Magnéticas es más claro aún). Así, mediante CI es posible resolver, muchas veces con facilidad, problemas de caracterización, tales como:

- Determinación de la composición química.
- Determinación del estado de tratamiento térmico o mecánico.

Esto, unido a la ya citada rapidez del ensayo, (elevada velocidad de respuesta y facilidad de interpretación) permite intercalar el equipo de ensayo por CI en la propia cadena de producción

ción lo que equivale a decir que se controla el 100% de la fabricación, cuya uniformidad queda así garantizada. Como es bien sabido, la uniformidad es uno de los principales atributos de la calidad.

2. Desarrollo histórico.

Ya desde mediados del siglo XVIII se conocía la deferencia entre conductores y aislantes y se había descrito el fenómeno de electrización por influencia o inducción, que tenía lugar cuando un cuerpo cargado de electricidad se aproximaba a otro neutro.

En el primer tercio del siglo XIX se experimentaba ya con corrientes eléctricas proporcionadas por baterías voltaicas. -- Michael Faraday buscaba confirmar por la vía experimental el paralelismo que él suponía debería existir entre el comportamiento de la "electricidad de tensión" (estática) y la corriente eléctrica. Su pregunta era: si un cuerpo cargado es capaz de inducir una carga en otro próximo, ¿por qué la corriente eléctrica no causa otra corriente en los conductores vecinos?. En 1831 se publicó el primer trabajo de Faraday en el que describía los experimentos y los resultados obtenidos. Su "Experimental Research in Electricity", publicado en Londres en 1839, constituye un clásico de las ciencias físicas y muestra la audacia y el ingenio con que investigaba su autor y la manera clara y cuidadosa con que reconocía la evidencia. Los pocos -- más de doce experimentos descritos permitieron a Faraday sacar

a la luz cada uno de los aspectos esenciales de la producción de efectos eléctricos por la acción magnética. Demostró que las corrientes se inducen, en efecto, en otros conductores, pero no por una corriente estacionaria o constante, sino por corrientes variables.

En 1864 James Clerk Maxwell presentó su brillante teoría del electromagnetismo con las ecuaciones que llevan su nombre y que explican los experimentos de Faraday, la generación de corrientes inducidas y que le permitieron predecir la existencia de ondas electromagnéticas mucho tiempo antes de que Hertz, en 1888, realizase sus experimentos.

Poco tiempo después, hacia 1879, Hughes, inventor del teletipo y del micrófono, realizó lo que pudiera constituir el primer ensayo no destructivo por CI. Mediante un rudimentario aparato logró detectar diferencias en conductividad eléctrica, permeabilidad magnética y temperatura en diversos metales. También tuvo ocasión de comprobar la extraordinaria sensibilidad del método, lo que, paradójica aunque probablemente, ha sido una de las causas de su lento progreso.

El desarrollo de las CI como método con personalidad propia dentro de los END parte de la década de los años 20 con los trabajos de Kranz sobre medida de espesores y de Farrow, en los años 30, que puso a punto un método para el control de tubería soldada.

En la época inmediatamente anterior a la 2ª Guerra Mundial, -

Förster desarrolla la sonda que lleva su nombre y tras la guerra, aparecen los trabajos de varios investigadores que contribuyen a sentar las bases de la técnica y se desarrollan los primeros equipos comerciales.

En la actualidad el desarrollo de los equipos de ensayo por CI se caracteriza por el uso de electrónica avanzada y microprocesadores, así como por la aparición de los primeros equipos multifrecuencia comercializados.

3. Conceptos básicos.

Las CI son corrientes eléctricas originadas en un material conductor por un campo magnético variable. Fluyen en líneas cerradas paralelas a la superficie de la muestra y su sentido de circulación es tal que producen un campo magnético opuesto -- siempre al que las genera. El campo magnético inductor procede, la mayor parte de las veces, de un solenoide por el que circula una corriente alterna. En la fig. 1 se representa un esquema de los principales elementos que intervienen en el ensayo y que se relacionan a continuación:

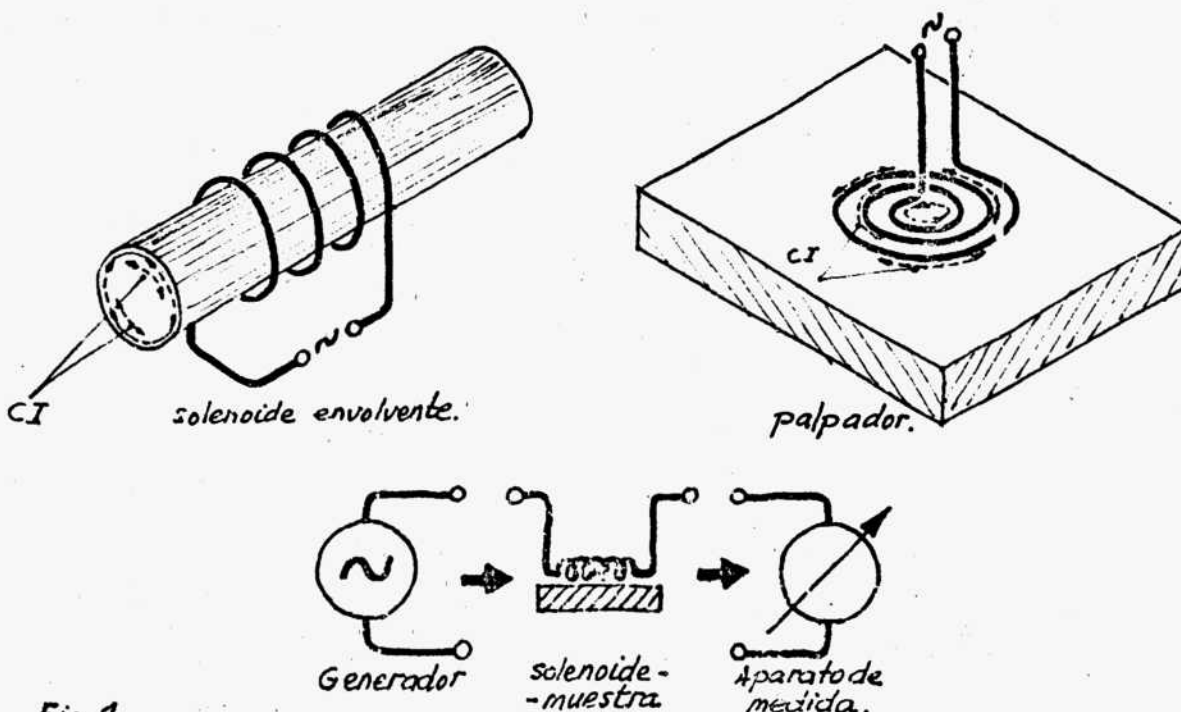


Fig. 1

- Características del solenoide.
 - Impedancia.
 - Forma geométrica y características constructivas.
- Características de la corriente de excitación.
 - Frecuencia.
- Características de la muestra.
 - Conductividad eléctrica.
 - Permeabilidad magnética.
- Geometría del conjunto.
 - Efecto de separación.
 - Efecto de borde.

3.1 Características del solenoide.

3.1-1 Impedancia.

Se representa por Z y es la oposición que el solenoide presenta al paso de la corriente alterna.

Un hilo conductor recto presenta una determinada resistencia óhmica R , fácilmente medible. Si el hilo se enrolla alrededor de una bobina hasta formar un solenoide, su resistencia óhmica R será la misma que antes. Si -- ahora se hace circular por el solenoide una corriente continua, se verificará la ley de Ohm:

$$V = iR$$

Sin embargo, si hacemos circular una corriente alterna, y suponiendo constante la diferencia de potencial V --

aplicada al circuito, veremos que los nuevos valores de intensidad y resistencia difieren de los encontrados con corriente continua tanto más cuanto mayor sea la frecuencia de la corriente. La aplicación de la ley de Ohm nos conduce a:

$$V = i'.Z$$

donde la nueva resistencia se representa por Z y es, como hemos dicho, la impedancia del solenoide que, al igual que R, se mide en ohmios.

El valor de Z resulta de la suma vectorial de la resistencia óhmica R del solenoide y de su reactancia inductiva X_L . El valor de R en los solenoides utilizados en CI es, en general, muy bajo por lo que, en vacío, es decir, en ausencia de muestra, su impedancia puede considerarse como puramente reactiva. En seguida veremos que deja de ocurrir esto al acoplar el solenoide a la muestra. La reactancia inductiva X_L es, a su vez, el resultado de la acción combinada de la inductancia del solenoide y de la frecuencia de la corriente. Su expresión es:

$$X_L = 2\pi f L = \omega L \quad (\text{frecuencia angular: } \omega = 2\pi f)$$

La inductancia o coeficiente de autoinducción L es un valor característico de cada solenoide que expresa su capacidad para producir inducción. Es constante mien-

tras no varíe el material del núcleo del solenoide. Al valor con el solenoide en vacío se le llama L_0 . Veamos con un cierto detalle como se produce la autoinducción. El campo magnético variable que da lugar a la aparición de corrientes inducidas en la muestra de ensayo ejerce también su influencia sobre el propio material conductor del solenoide, de forma que una espira cualquiera está induciendo corrientes en las espiras vecinas en una interacción mutua que se denomina autoinducción. Las corrientes autoinducidas tienden, según la ley de Lenz, a anular la causa que las produjo, es decir: la variación del campo magnético en el solenoide. Según esto, cuando disminuye la intensidad instantánea en cada ciclo de la corriente alterna, la corriente autoinducida se suma a la intensidad de excitación y se resta cuando el campo aumenta en los períodos de intensidad creciente. Esto equivale a decir que la corriente autoinducida está desfasada 90° respecto de la de excitación. El resultado es, tal como expresa la fig. 2, el desfase de la intensidad frente a la tensión aplicada al solenoide, desfase que será tanto mayor cuanto más elevada sea la inductancia. (90° para una autoinducción pura, es decir, con $R = 0$).

En otras palabras: la presencia de autoinducción en un circuito tiende a hacer que la corriente siga pasando

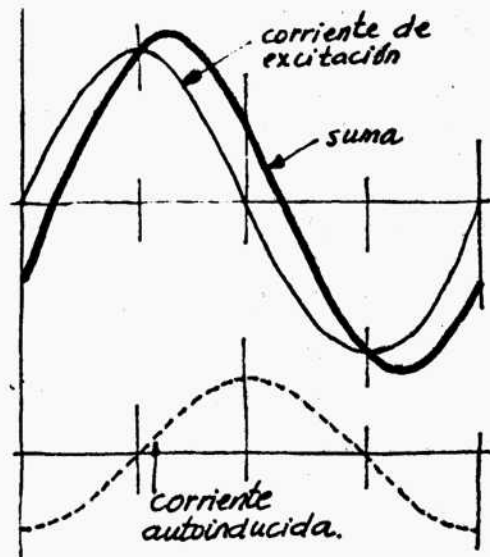


Fig. 2

aún después de haber abierto el circuito. Este es el motivo de la aparición de fuertes descargas al abrir interruptores en circuitos de alta L , (extracorrente de ruptura).

Cuando se introduce una muestra metálica en el solenoide (o se acerca el palpador a la superficie conductora), la situación se modifica de la siguiente manera:

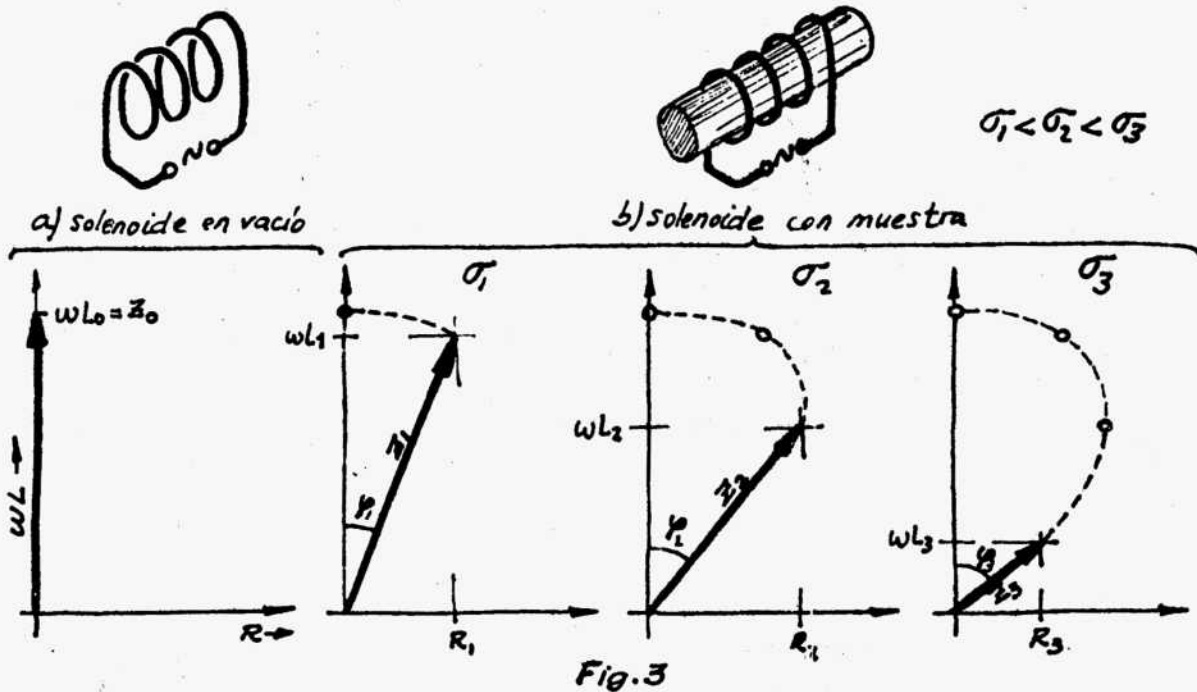
- 1º Se generan CI en la muestra que, naturalmente, sufren efecto Joule y se originan pérdidas óhmicas. Es como si hubiese aumentado la resistencia R del solenoide, que pasa a tener un valor distinto de cero (se había supuesto despreciable la R en vacío).

2º El campo magnético generado por las CI, al oponerse constantemente al primario lo debilita, con lo que el campo en el interior del solenoide es menor que en vacío. En consecuencia, también disminuye la -- autoinducción L_0 y, por tanto, la nueva reactancia inductiva ωL_1 será menor que ωL_0 .

3º Para todos los efectos es como si tuviésemos un nuevo solenoide en vacío con una impedancia Z_1 :

- Que es, en general, menor que Z_0 .
- Que presenta una clara componente óhmica R_1 (frente a $R_0 \simeq 0$).
- Que tiene una componente reactiva ωL_1 menor que ωL_0 .
- Que está desfasada respecto a Z_0 .

Se acostumbra a considerar la impedancia como un número complejo con R como componente real y ωL como componente imaginaria. Esto, además, incluye el hecho de que las intensidades asociadas a cada componente están desfasadas 90° . Así, la impedancia Z puede representarse en unos ejes cartesianos que forman el plano complejo de impedancia. En la fig. 3 se representa según este criterio el proceso descrito en el párrafo anterior, y se ilustra el efecto, sobre el que volveremos más -- adelante, de la conductividad eléctrica de la muestra que se introduce en el solenoide. Por el momento es suficiente con saber que:



- a) Todo aumento de conductividad de la muestra hace que disminuya la componente reactiva ωL y que aumente el ángulo de fase φ .
- b) La componente óhmica crece al principio con la conductividad, hasta un máximo, y luego vuelve a disminuir.

3.1-2 Construcción y forma geométrica.

Desde este punto de vista los solenoides que se emplean en el ensayo por CI son extraordinariamente variables y el criterio para su diseño o elección depende en gran manera de los objetivos del ensayo. Así, por ejemplo, cuando se trata de detectar grietas o, en general, dis-

continuidades planas, es esencial que el flujo de las CI sea perpendicular al plano de la grieta. En caso contrario (flujo de CI paralelo) se produciría una distorsión insuficiente para provocar en el solenoide una reacción detectable. El solenoide deberá, por tanto, producir un campo magnético paralelo a la dirección esperada de las discontinuidades.

Aunque más adelante volveremos sobre las características de los solenoides de ensayo, podemos establecer una primera clasificación:

Geometría	{	envolvente	{	de campo concentrado
		palpador { bobina		de campo ancho
			plano	
			de horquilla	
			para interiores	
	{	especiales		
Circuito electromagnético	{	solenoide simple		
		"	con secundario	
		"	de control absoluto	
		"	de control diferencial	

Si se trata de detectar pequeñas grietas superficiales será, en general, más adecuado un palpador de campo -- concentrado en el que el núcleo del pequeño solenoide está ocupado por un cilindro de hierro. Así el campo es mucho más intenso en la zona de apoyo. Como ejemplo de palpadores de campo ancho pueden citarse los que se utilizan para medir la conductividad eléctrica. En es-

te caso es preferible que la respuesta del solenoide - sea más estadística, por lo que se construyen de mayor diámetro y sin núcleo de hierro.

3.2 Características de la muestra.

3.2-1 Conductividad eléctrica.

Todos los materiales presentan una resistencia característica al paso de la corriente eléctrica. Los de máxima resistividad se llaman aislantes y los de mínima, - conductores. Hay un tercer grupo, los semiconductores, que tienen un interesante comportamiento intermedio. - El objeto de las CI es, en general, el grupo de conductores formado por los metales y sus aleaciones, cuya - conductividad varía en una banda muy ancha ya que, por ejemplo, el cobre electrolítico presenta una conductividad del orden de cien veces superior a la de algunas aleaciones de titanio.

La capacidad para conducir corriente se puede expresar en términos de:

- Conductividad (σ)
- O resistividad (ρ), su inversa.

En CI es normal utilizar la conductividad en vez de la resistividad.

Las unidades que se emplean para medir este parámetro son:

- El $\pi/\Omega \text{ mm}^2$, es decir: la longitud en metros, de un hilo de 1 mm^2 de sección, necesaria para que tenga un ohmio de resistencia.
- El tanto por ciento IACS. En este caso la conductividad se mide tomando como referencia la del cobre no aleado y recocido que se toma como 100. IACS son las iniciales de Internacional Annealed Copper Standard. (Cobre Recocido Patrón Internacional).

En la tabla siguiente se dan los valores de conductividad de diversos metales y aleaciones en las dos unidades citadas. Se incluyen también los valores equivalentes de resistencia en micro-ohmic-cm.

T A B L A I

CONDUCTIVIDAD ELECTRICA Y RESISTIVIDAD DE DIVERSOS
METALES Y ALEACIONES

<u>Metal o Aleación</u>	<u>CONDUCTIVIDAD</u>		<u>RESISTIVIDAD</u>
	$\pi/\Omega \text{ mm}^2$	%IACS	$\rho (\mu\Omega \text{ cm})$
Plata	61	105	1,63
Cobre recocido	58	100	1,72
Aluminio	35,5	61	2,82
Aleaciones de Aluminio:			
L314C (Al-4,3Cu)T4	17,5	30	5,7
L3710 (Al-5,7Zn)T6	18,6	32	5,4
Magnesio	21,5	37	4,6
Latón (70Cu-30Zn)	16,2	28	6,2
Titanio	1,8	3,1	55,6
Acero inoxidable			
AISI 304 (18-8)	1,45	2,5	69
Aleación Ti-6Al-4V	0,58	1	172,4

Para pasar a % IACS un valor de σ en $m/\Omega mm^2$ basta dividir por 58 y multiplicar por 100. De igual forma, la inversa del valor de resistividad en $\mu\Omega cm$ multiplicado por 100 nos da el valor en $m/\Omega mm^2$.

La conductividad eléctrica no es una constante para cada material, sino que varía en función del tratamiento térmico o mecánico. Esto es más acusado en algunas aleaciones en las que es fácil distinguir, por una simple medida de conductividad, el estado de tratamiento en que se encuentra. Así, por ejemplo, la aleación tipo dural, Al-4,5Cu tiene, en estado de recocido, una conductividad de 27 a 28 $m/\Omega mm^2$ que se reduce a 17-18 cuando la aleación se encuentra en estado de temple y maduración natural.

En general, en los materiales no ferromagnéticos, la conductividad disminuye cuando aumenta la dureza y viceversa. Así, es posible construir, para una aleación determinada, una curva que relacione los valores de conductividad con la dureza medida en los mismos puntos y utilizar esa calibración para determinar la dureza de otras muestras en las que la única variable sea el estado de tratamiento. Si hubiese mezcla de variables; por ejemplo, en nuestro caso, variaciones en la composición química, se cometerían errores en la apreciación de la dureza. Para evitar este riesgo se pueden

someter todas las piezas sospechosas al mismo tratamiento térmico. De esta forma las piezas cuya composición química sea idéntica alcanzarán los mismos niveles de dureza y conductividad. Variaciones en esta última serán, por otra parte, reflejo de cambios en composición química.

3.2-2 Permeabilidad magnética.

Si construimos un electroimán potente y situamos en su interior cantidades iguales de diferentes sustancias podremos medir, con un dinamómetro adecuado, la fuerza que el campo magnético ejerce sobre la sustancia ensayada. En la tabla II se agrupan una serie de resultados orientativos.

T A B L A II

FUERZA SOBRE 1 GRAMO DE MUESTRA EN UN CAMPO MAGNETICO
DE 18000 GAUSS Y UN GRADIENTE DE 1700 GAUSS/CM

<u>Substancia</u>	<u>Fuerza (dinas)</u>
<u>Diamagnéticas</u>	
- Grafito.....	-110
- Plomo.....	-37
- Agua.....	-22
- Nitrógeno líquido.....	-10 (78°K)
- Cobre.....	-2,6
<u>Paramagnéticas.</u>	
- Aluminio.....	+17
- Sodio.....	+20
- Sulfato de níquel.....	+830
- Oxígeno líquido.....	+7500 (90°K)
<u>Ferromagnéticas.</u>	
- Magnetita.....	+120.000
- Hierro.....	+400.000

Las sustancias clasificadas como diamagnéticas resultan empujadas hacia zonas donde la intensidad del campo magnético es menor, independientemente del sentido del mismo. Las sustancias paramagnéticas se caracterizan porque son atraídas hacia lugares de mayor intensidad de campo. Finalmente, el caso de las sustancias ferromagnéticas presenta, como puede verse en las cifras de la tabla II, una fuerte discontinuidad. En efecto, las fuerzas puestas en juego en las sustancias diamagnéticas y paramagnéticas son muy débiles mientras que un gramo de hierro es atraído con una fuerza de -- más de cuatrocientas veces su peso.

El parámetro usado en ingeniería para evaluar el carácter de un material en cuanto a su comportamiento frente al campo magnético es la permeabilidad magnética -- (μ) que se define como la relación entre el campo magnético H aplicado y el flujo magnético B en el interior de la muestra. El valor de μ en el vacío es, evidentemente, 1, ligeramente menor que 1 en las sustancias diamagnéticas y muy poco superior a 1 en las paramagnéticas. En cambio, toma valores muy elevados (varios miles) para las sustancias ferromagnéticas.

La permeabilidad magnética puede considerarse como constante en los materiales no ferromagnéticos ya que su valor se mantiene sensiblemente independiente de la --

magnitud del campo aplicado. Sólo en las proximidades del cero absoluto y con valores muy grandes de H se detectan desviaciones de permeabilidad, de manera que el campo B tiende a aproximarse a un valor límite.

Sin embargo, los materiales ferromagnéticos alcanzan con facilidad este valor límite que se denomina saturación.

En la fig. 4 (a) se representa B en función de H para hierro, níquel y un material no ferromagnético. La fig. 4 (b) es similar pero se han modificado las escalas en los ejes para poder apreciar mejor la forma de las curvas en el hierro y níquel aunque la correspondiente al no ferromagnético coincide prácticamente con el eje de abscisas. La diferencia entre ambos tipos de materiales resalta más si se tiene en cuenta la diferencia de escala en ambos ejes de la fig. 4 (a) que, en realidad, representan magnitudes que se miden en unidades equivalentes. En efecto: en el sistema CGS, H se mide en oersted y B en gauss. Esta distinción en el nombre de la unidad se sigue manteniendo a pesar de que gauss y oersted son nombres diferentes de la misma cosa, a saber: la unidad de campo magnético, (es como si el radio de una circunferencia lo midiésemos en cm. y reservásemos una unidad especial llamada "centímetro de arco" para medir distancias sobre la circunferencia).

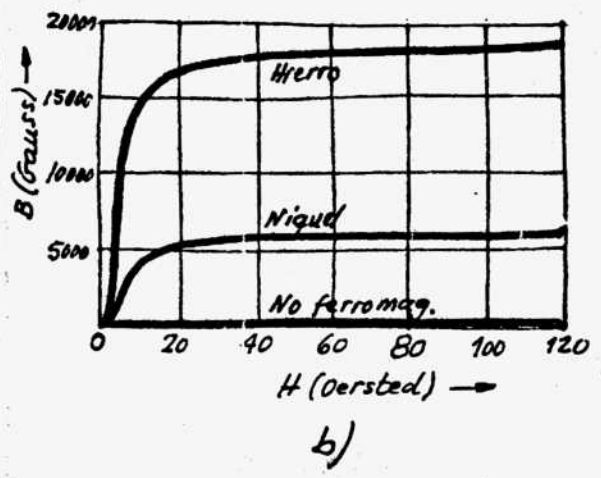
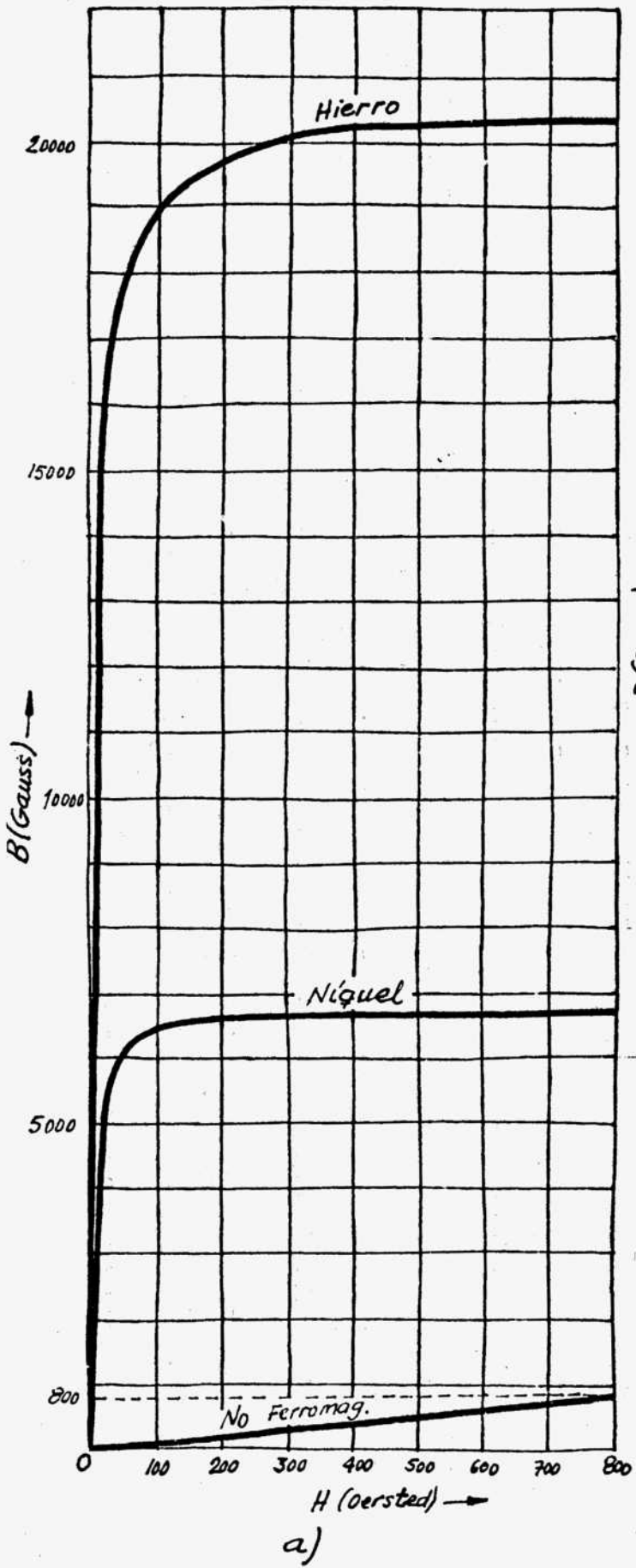


Fig. 4

No ocurre igual en el sistema MKS (Giorgi), en el que B se mide en tesla (10^4 gauss) y H se mide en amperes/metro ($4\pi \cdot 10^{-3}$ oersted).

En el caso del hierro, para un campo H de 2 oersted, - el campo B en la muestra alcanza del orden de 1000 -- gauss con lo que, en ese momento, μ sería igual a 500. Sin embargo, si H se eleva a 100 oersted, la muestra - está prácticamente saturada a un B de 17000 gauss, lo que equivale a una μ de 170. Así, resulta que la permeabilidad magnética de los materiales ferromagnéticos está lejos de ser un constante, como lo es la conductividad eléctrica, y además vemos que varía por el mero hecho de intentar medirla al aplicar un campo magnético a la muestra. Este es, tal vez, uno de los mayores inconvenientes que se plantean en el ensayo por CI de los materiales ferromagnéticos.

La fig. 5 representa la variación típica de la permeabilidad de un material ferromagnético.

La permeabilidad magnética ejerce una marcada influencia en el ensayo por CI y hace que las técnicas de ensayo para materiales ferromagnéticos difieran mucho - de las utilizadas en los no magnéticos. De igual modo - que la conductividad en estos últimos, la permeabilidad también resulta afectada por la composición, dureza, - tensiones, heterogeneidades, etc. Así, cabe esperar --

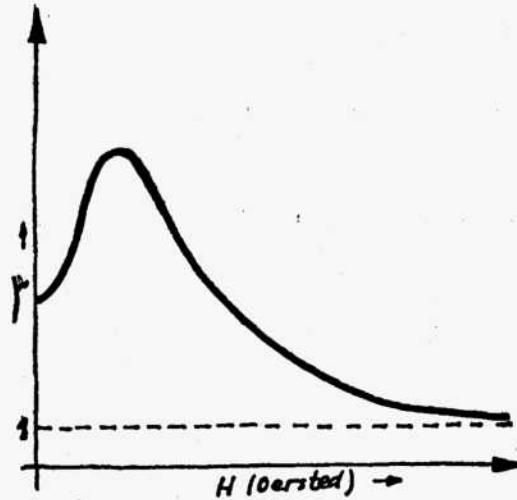


Fig. 5

que estos parámetros pueden estudiarse por CI y, en -- efecto, así es, pero teniendo en cuenta que pequeñas -- variaciones de permeabilidad darán lugar a grandes os-- cilaciones de la respuesta que pueden enmascarar la va-- riante de interés.

Muchos de los problemas que se plantean al ensayar ma-- teriales magnéticos por CI desaparecen si saturamos la muestra. Así μ , como se ve en la fig. 5 pasa a valer 1 y, por tanto, el material se puede ensayar como si -- se tratase de un no ferromagnético. Esto se logra me-- diante solenoides auxiliares de saturación por los que circula corriente continua, técnica que se aplica, so-- bre todo, en detección de discontinuidades, donde peque

Las variaciones muy localizadas de permeabilidad darían señales semejantes a grietas y podrían hacer que se rechazase un producto aceptable.

Más adelante se discutirá la influencia del tercer grupo de parámetros: efectos de separación y de borde.

4. Factores que afectan a la impedancia de un solenoide.

En un solenoide de impedancia en vacío:

$$\vec{Z}_0 = \vec{X}_{10} + \vec{R}_0$$

la corriente de intensidad i que circula por él da lugar a un campo \vec{H}_p cuya variación crea a su vez este campo \vec{H}_s opuesto. El campo suma:

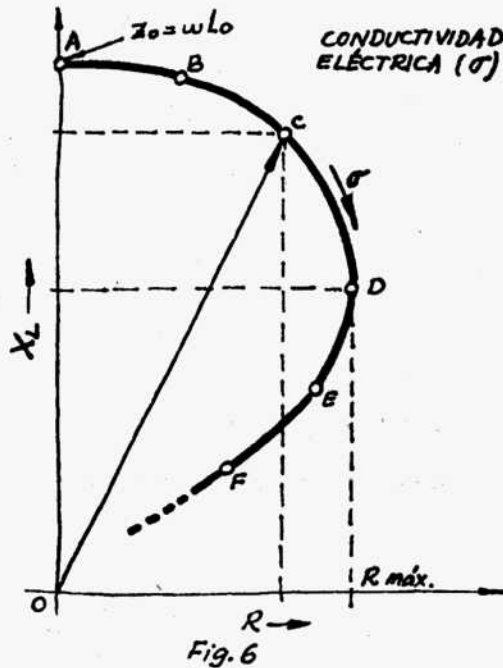
$$\vec{H}_t = \vec{H}_p + \vec{H}_s$$

tendrá un módulo menor, en general, que el de \vec{H}_p . Como hemos visto anteriormente, esto equivale a una variación de la impedancia aparente del solenoide cuyo nuevo valor \vec{Z}_1 es tal que, para la misma alimentación, proporciona un campo \vec{H}_t en lugar del \vec{H}_p que tenía en vacío.

Es de esperar, por tanto, que si varían las características de la muestra la nueva impedancia sea $\vec{Z}_2 \neq \vec{Z}_1$. Esto parece indicar la posibilidad de detectar diferencias entre las muestras midiendo simplemente la impedancia aparente del solenoide.

Así ocurre, en efecto, tal como se expresa en la fig. 6, donde -

se representan las componentes de la impedancia en función de la conductividad eléctrica de las diferentes muestras.



Si el material es aislante, es decir, si su conductividad es cero, las características del solenoide no varían respecto a las que tenía en vacío (punto A; $Z_0 = \omega L_0$; $R_0 \approx 0$). Cuando el material tiene una conductividad finita se generan CI y, por tanto, aparecen pérdidas óhmicas. En muestras de baja conductividad estas pérdidas son pequeñas debido a la poca intensidad de las CI generadas, pero aumentan con σ hasta alcanzar un máximo (punto D) para volver a disminuir a conductividades más altas con las que el efecto Joule es menor a pesar de la mayor intensidad de las CI.

La reactancia inductiva disminuye siempre que se incrementa σ (ver 3.1-1).

Así, situando el solenoide sobre muestras de conductividad creciente se genera el lugar geométrico ABCDEF que, adecuadamente calibrado, nos puede servir para medir σ en una muestra desconocida aunque, como veremos, existen equipos en los que se lee directamente la conductividad sin tener que construir el gráfico.

Si la conductividad sigue aumentando más allá de un punto tal como el F, la curva tiende hacia el origen de coordenadas donde llegaría en el caso hipotético de ensayar una muestra superconductora ($\sigma = \infty$) y con un acoplamiento muestra-solenoide perfecto (efecto de separación nulo o factor de llenado = 1, ver 4.1). Así pues, el origen de coordenadas es un punto puramente teórico.

Los parámetros:

- Forma de la curva (parabólica, semicircular).
- Posición de las distintas conductividades.

dependen de las variables del ensayo:

- Frecuencia.
- Forma geométrica del solenoide (envolvente, palpador, otros).
- Separación (acoplamiento) entre solenoide y muestra.
- Forma geométrica de la muestra (tubo, barra, muestra plana, etc.)

4.1 Efecto de separación. Factor de llenado.

Con el solenoide de tipo palpador en vacío, es decir sin ninguna muestra en la zona de influencia de su campo magnético

tico, el vector impedancia tiene su extremo en A (fig. 7) mientras que para una muestra de conductividad, por ejemplo, $40 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$, en contacto con el solenoide, el nuevo -

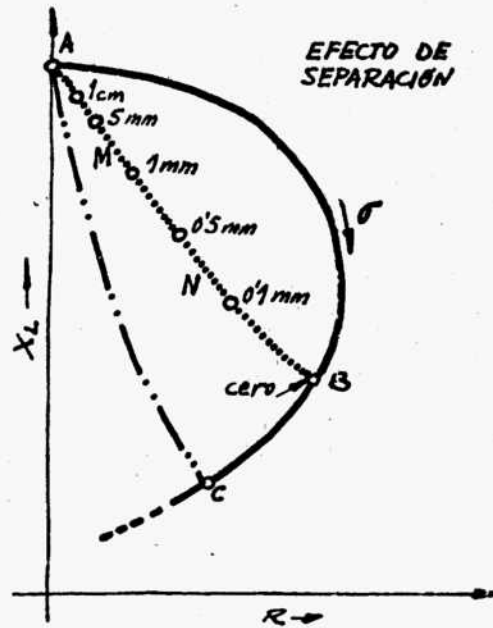


Fig. 7

extremo estaría en B. Sin embargo, el paso de A a B no es brusco sino que se produce a medida que el palpador se va aproximando a la muestra. Esa variación de la impedancia en función de la distancia es lo que se llama efecto de separación ("lift-off"). Si vamos tomando valores de Z al variar la distancia, podemos construir el lugar geométrico que representa la línea de trazos AMNB de la fig. 7. - Para otra muestra de conductividad mayor (punto C) el lugar geométrico vendría señalado por la línea de trazo y punto.

Hay que subrayar que las variaciones sensibles de impedancia comienzan a producirse (para la mayoría de los palpadores) a muy poca distancia de la muestra (1 cm o menos, - muchas veces) y que las variaciones son mucho más pronunciadas en las proximidades del contacto (distancia cero - teórica). Esto se ha querido expresar con los valores de distancia que, a título puramente orientativo, se han situado sobre la curva AMNB.

Existe, pues, el riesgo de interpretar erróneamente variaciones de impedancia que se han producido por simple modificación de la distancia solenoide-muestra. Este riesgo es, naturalmente, mayor en muestras de forma compleja.

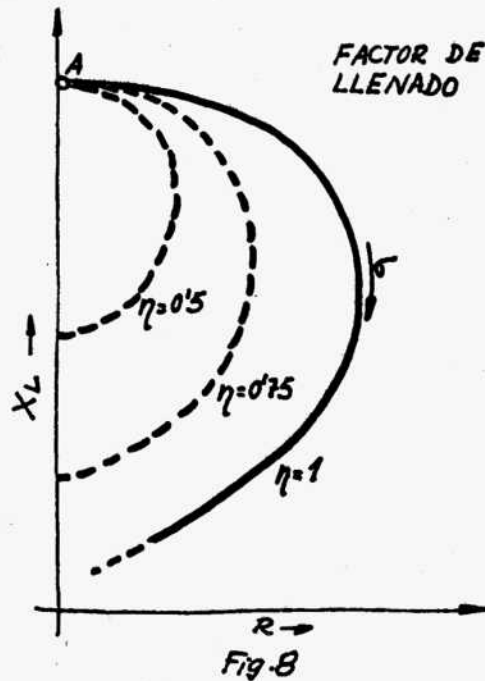
Aunque el efecto de separación es perturbador en la mayoría de los casos, puede utilizarse también en beneficio - de algunos ensayos. Calibrada adecuadamente la curva AMNB, es posible medir con precisión el espesor de recubrimiento no conductores (pintura, anodizados) sobre metales.

Si en lugar de un palpador se trata de un solenoide envolvente, el efecto de separación se convierte en "factor de llenado" que se representa por η y viene dado por la relación:

$$\eta = \left(\frac{D_m}{D_s} \right)^2$$

Dm: Diámetro de la muestra
Ds: Diámetro del solenoide

La fig. 8 representa los lugares geométricos de variación de la impedancia con la conductividad para tres valores distintos de η .



En el caso límite de conductividad infinita y factor de llenado 1 la curva pasa por el origen ya que, por una parte, no hay pérdidas óhmicas (resistencia nula en la muestra) y, por otra, el acoplamiento es perfecto con lo cual H_p resulta siempre anulado por H_s lo que provoca la anulación de la autoinducción del solenoide ($X_l = 0$). Como se ha apuntado anteriormente esta situación no puede darse en la práctica, pero no porque no pueda encontrarse un material superconductor, que sí se puede conseguir (por ejemplo, el plomo a la temperatura del helio líquido) sino --

porque es imposible tener un factor de llenado igual a la unidad.

4.2 Efecto de borde.

Cuando el solenoide de inspección se aproxima al borde de la muestra, las CI se distorsionan como consecuencia de su incapacidad para fluir por otro sitio que no sea el material conductor. Esto provoca una variación de la impedancia aparente y, por tanto, una indicación del aparato de medida que es muy similar a la que se produce en presencia de una grieta aunque, en general, mucho más intensa.

El efecto de borde es prácticamente imposible de eliminar en la técnica convencional de ensayo por CI y tampoco parece que exista ninguna aplicación que lo haga utilizable, como ocurre con el efecto de separación. La reducción del tamaño del solenoide mejora algo la situación pero, para algunas aplicaciones, no puede reducirse demasiado el diámetro.

En general, no es recomendable explorar muestras a distancias del borde inferiores al diámetro del solenoide. Además, cuando se está desplazando el palpador a lo largo del borde a explorar hay que asegurar, mediante una regla de plástico, por ejemplo, que la distancia palpador-borde permanezca invariable para evitar errores de interpreta--

ción por causa de desplazamientos del palpador hacia el -
borde o hacia el interior.

4.3 Frecuencia de ensayo.

Discutiremos separadamente el efecto de la frecuencia en la muestra de ensayo y en el solenoide, para después intentar una síntesis de ambos puntos de vista.

4.3-1 Profundidad de penetración. Efecto pelicular.

Las CI se distribuyen uniformemente en toda la masa - de la muestra. Por el contrario, su densidad (amp/cm^2) es máxima en la superficie y disminuye exponencialmente hacia el interior. Este fenómeno, llamado ^{efecto} pelicular, es tanto más acusado cuanto mayor sea la frecuencia de la corriente.

Para cada combinación frecuencia-material hay una banda de profundidad más allá de la cual la densidad de CI - es insuficiente para dar información detectable.

Se define como profundidad standard de penetración (o - profundidad efectiva de penetración) aquella en la que la densidad de CI se ha reducido, aproximadamente, a - un 37% (\times) de la que tenía en la superficie. Se puede calcular mediante la expresión:

$$\delta = \frac{503}{\sqrt{\mu f \sigma}}$$

(\times) Este número, 37%, aparentemente sin significado, - procede del carácter exponencial de la penetración de las CI. Más concretamente: $1/e = 0,3678 \approx 0,37$.

donde δ es la profundidad standard de penetración expresada en milímetros; μ la permeabilidad de la muestra, f la frecuencia de ensayo en hertz y σ la conductividad en $m/\Omega \text{ mm}^2$.

En la fig. 9 se dan las profundidades standard de penetración para diversos materiales y frecuencias.

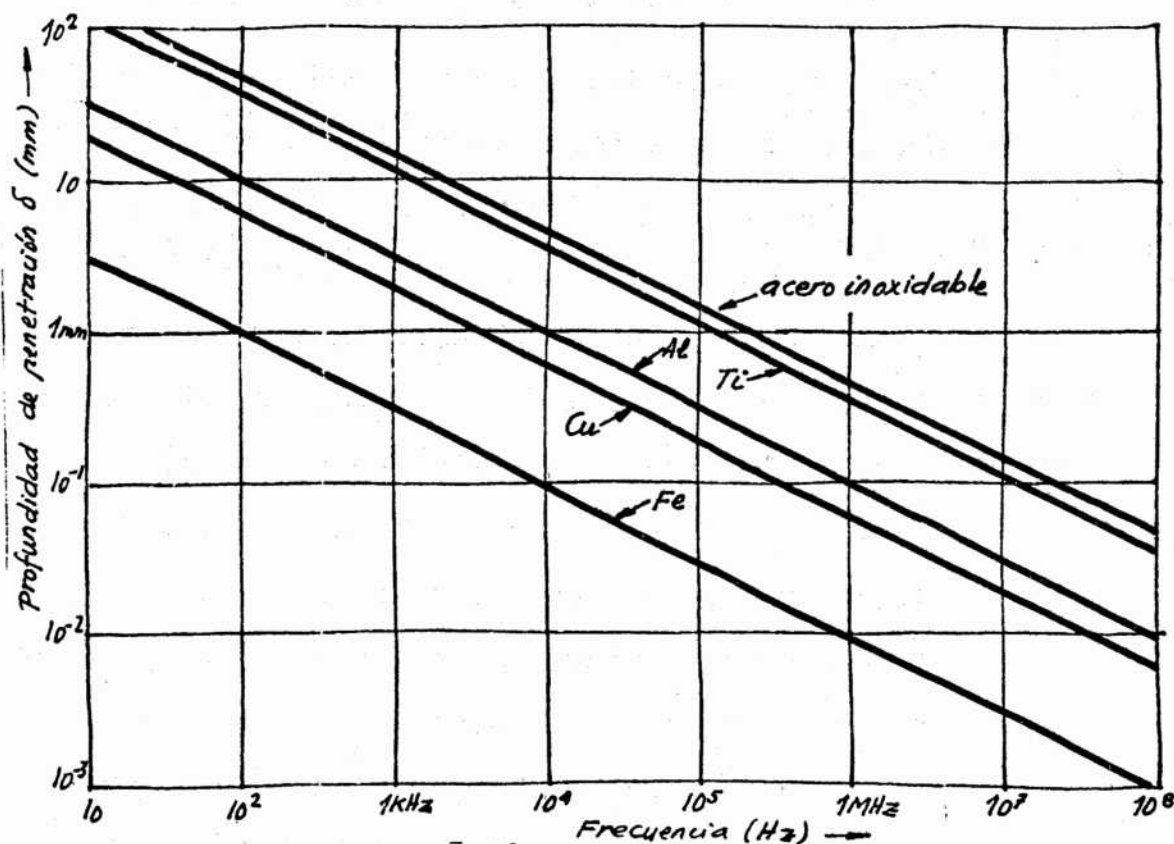


Fig. 9

Puede ocurrir que en un ensayo determinado la profundidad de penetración de las CI sea mayor que el espesor de la muestra. En ese caso la respuesta del para-

to de medida estará influida por el espesor, que distorsiona el flujo de CI. Por tanto, para eliminar esta variable habrá que asegurar, si estamos ensayando muestras finas, que el espesor es prácticamente constante o bien que está muy por encima de la profundidad de penetración. En general, será suficiente con que la muestra tenga un espesor de al menos dos o tres veces la profundidad standard de penetración.

El efecto pelicular puede aprovecharse, por ejemplo, para medir el espesor de películas metálicas finas sobre soporte no conductor. En la fig. 10 (a) se representan los lugares geométricos de variación de la impedancia en función del espesor de la muestra para distintos valores de σ . La fig. 10 (b) muestra, a mayor escala, una zona de la figura anterior que corresponde a un ensayo a una frecuencia tal que la profundidad standard de penetración es del orden de 0,2 mm (por ejemplo, ensayo sobre cobre a 100 kHz). Los valores son puramente orientativos.

El método es muy sensible para espesores pequeños por lo que se complementa con ultrasonidos cuya eficacia de medida cubre los espesores mayores.

Variando adecuadamente la frecuencia puede conseguirse que el ensayo sea idóneo para diferentes gamas de espesores.

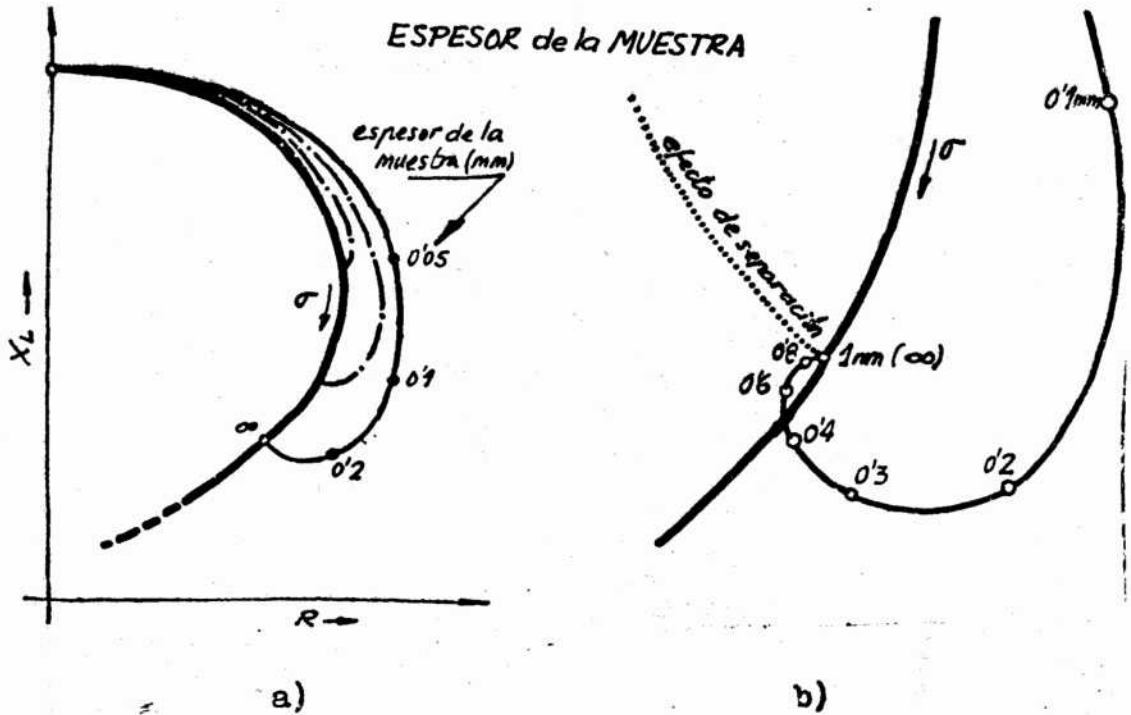


Fig. 10

4.3-2 Influencia de la frecuencia sobre la impedancia del solenoide.

El efecto más inmediato del aumento de frecuencia es el aumento proporcional de la reactancia del solenoide en vacío, lo que se traduce en un aumento de la escala del diagrama ya que a doble frecuencia, doble Z_0 . (fig. 11).

Sin embargo, la variación de conductividad no sigue esta ley proporcional. Las curvas de trazos de la fig. 11 indican la variación de la impedancia en función de la frecuencia para dos conductividades distin

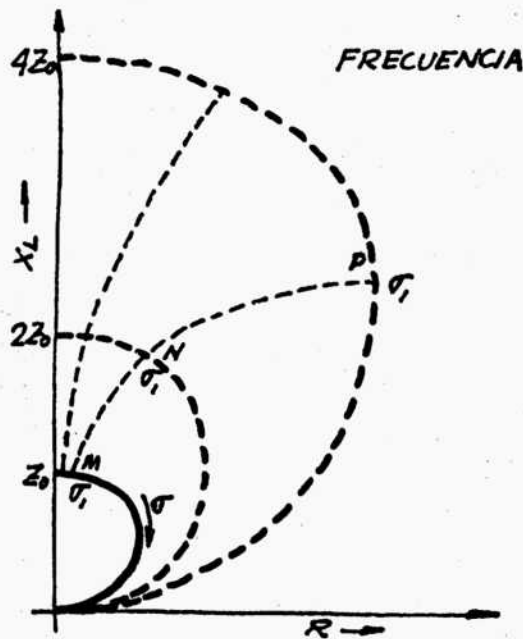


Fig. 11

tas. Los puntos M, N y P corresponden a una misma muestra de conductividad σ_1 ensayada en el mismo solenoide a tres frecuencias: f_1 , $2f_1$ y $4f_1$.

La variación de posición relativa de σ_1 en función de la frecuencia es del mayor interés, como se verá más adelante, para la separación de variables y para optimizar la sensibilidad del ensayo.

Con el fin de no multiplicar el número de diagramas, se acostumbra a normalizarlos, esto es: dividir los valores de R y X_1 por el valor de la impedancia en vacío $Z_0 = \omega L_0$. De esta forma un mismo diagrama puede

emplearse a cualquier frecuencia y con cualquier solenoide. Esto facilita la comprensión de las variaciones relativas de impedancia pero se oculta el cambio de escala cuando varía la frecuencia.

4.4 Grietas.

La impedancia aparente o efectiva del solenoide también se ve afectada por la presencia de grietas o, en general, discontinuidades, superficiales o subsuperficiales que, como se dijo al principio, provocan distorsión en el flujo de las CI con la consiguiente variación de la impedancia.

En el diagrama de la fig. 12 se ha señalado la dirección de variación de la impedancia con la presencia de grietas

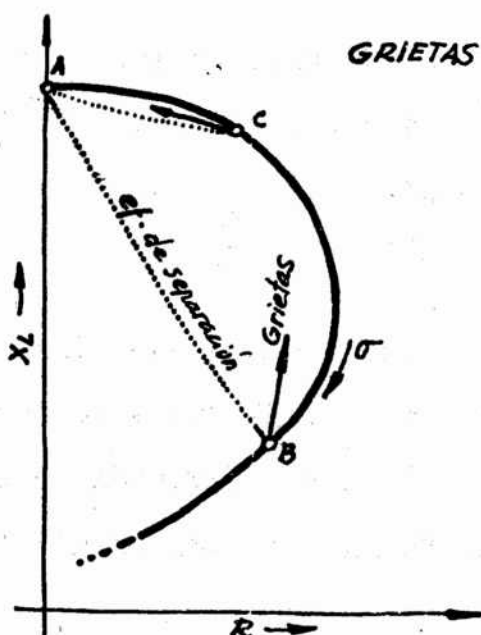


Fig. 12

tas para dos valores diferentes de conductividad. En el punto B, situado en la zona de conductividades altas, - la dirección grieta se distingue bien del efecto de separación y de las variaciones de σ . Sin embargo en el punto C, que corresponde a una conductividad baja, las tres direcciones son casi coincidentes por lo que será prácticamente imposible encontrar la verdadera causa de variación de Z. Esto significa:

- a) Los materiales de baja conductividad son más difíciles de ensayar debido a que se sitúan en zonas de baja resolución del diagrama. Cabe el recurso de elevar la frecuencia de ensayo para tratar de que el - punto llegue a zonas del diagrama con mayor poder de resolución (ver 4.3-2). El aumento de frecuencia está, sin embargo, limitado por la necesidad de alcanzar la profundidad de penetración necesaria.
- b) Aún en casos favorables, como el B, se necesita un - equipo sensible al ángulo de fase para distinguir las variables.

4.5 Resúmen.

En la fig. 13 se han esquematizado los diagramas de impedancia con la influencia de las distintas variables - con objeto de dar una visión de conjunto de lo dicho hasta ahora. Se ha incluido además (fig. 13 g) el lugar --

geométrico de σ para barras y tubos de pared fina (espesor inferior al de la profundidad standard de penetración). El espacio rayado entre ambas curvas corresponde a los tubos de pared gruesa. El desarrollo y construcción de estos diagramas se ha realizado por la vía teórica (aplicación de las ecuaciones de Maxwell) en estrecha correlación con los obtenidos experimentalmente.

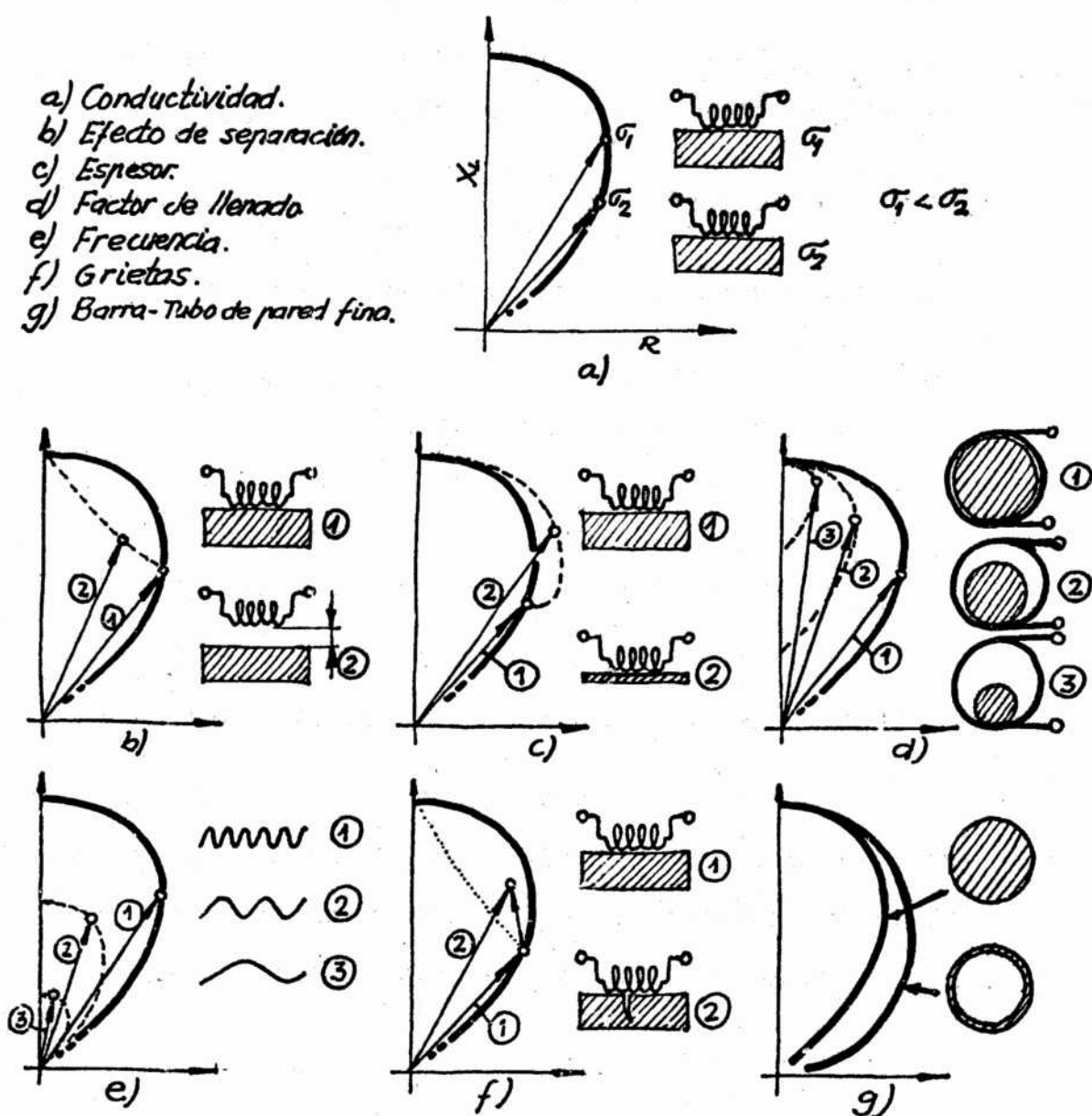


Fig. 13

5. Equipos.

5.1 Solenoides.

Como se dijo en 3.1-2, el tipo de solenoide usado en CI - varía ampliamente según las características de cada ensayo concreto.

Así, por ejemplo, en la inspección contra grietas de una superficie plana, se utilizará un solenoide tipo palpador de campo concentrado (fig. 14) ya que así se inducen CI - que fluyen paralelas a la superficie y, por tanto, atravesarán la grieta. Sin embargo, este palpador no sería -- adecuado para detectar discontinuidades laminares, del tipo hoja, que exigiría utilizar un solenoide en herradura tal como el de la fig.15.

En algunos casos puede ocurrir que con un palpador puntual como el de la fig. 14 se detecten también discontinuidades paralelas a la superficie, por ejemplo, cuando la profundidad de la hoja es muy poca, más concretamente, inferior a la penetración de las CI para ese ensayo. En este caso, - se detecta la hoja por efecto de disminución del espesor.

En la inspección de tubos y barras se emplean casi exclusivamente solenoides envolventes que permiten una gran velocidad de inspección, pero con el inconveniente de que sólo son sensibles para discontinuidades longitudinales que, -

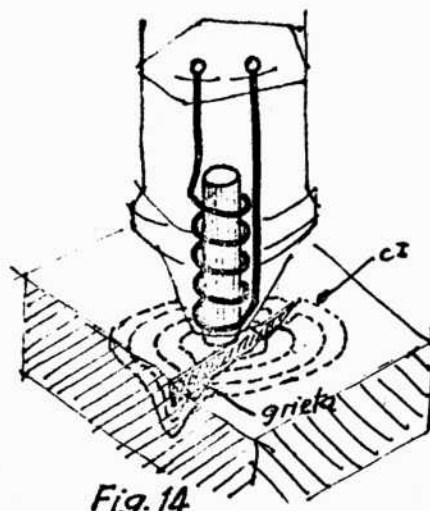


Fig. 14

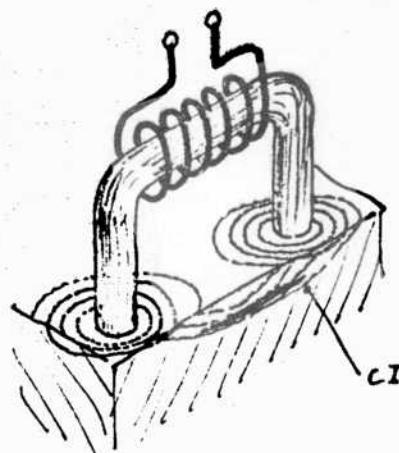


Fig. 15

por otra parte, constituyen la mayoría de los efectos detectados en tubos (fig. 16). Si es necesario detectar discontinuidades transversales hay que recurrir a alguna de las dos soluciones siguientes:

- a) Solenoide tipo palpador fijo que describe una hélice - sobre el tubo que gira y avanza.
- b) Solenoide doble diferencial.

En este último caso, el esquema de devanado de la unidad de exploración se representa en la fig. 17. Los dos solenoides son iguales, pero con arrollamientos en sentido -- contrario. De esta forma, si la impedancia de ambos es la misma (es decir, si las secciones de muestra que cubre ca da uno son idénticas) la suma de ambas será nula ya que - son opuestas. Por el contrario, cualquier discontinuidad provocará un desequilibrio entre ambas que será acusado -

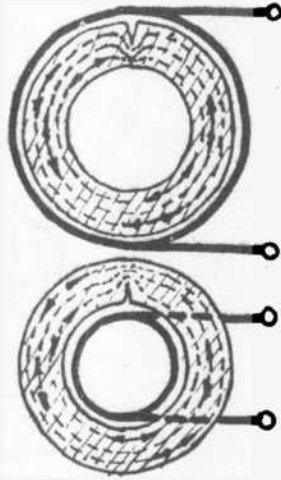


Fig. 16

por el aparato de medida. De esta forma se evita la influencia de variables tales como cambios graduales en el espesor o diámetro del tubo o incluso grandes cambios dimensionales entre diferentes tubos no producen indicación. Este sistema es, pues, muy sensible para discontinuidades y relativamente insensible a cambios que, en general, carecen de interés.

Un solenoide de características similares se utiliza también para el examen de tubos por el interior.

Actualmente se utilizan ampliamente los solenoides con secundario. En estos casos, hay un arrollamiento primario -- por el que circula la corriente alterna de excitación, -- mientras que el circuito del aparato de medida esta conectado a otro arrollamiento independiente (secundario) fig. 18(a) que, a su vez, puede adoptar la forma diferencial --

DEVANADO
DIFERENCIAL

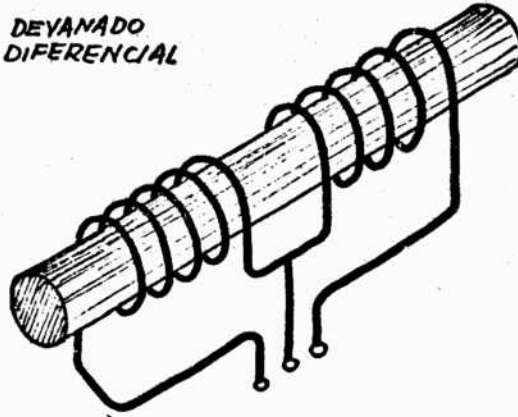


Fig. 17

(fig. 18 b). Cualquiera de estas dos técnicas permite medir el voltaje en el secundario como parámetro de ensayo, además de la impedancia. Los diagramas que expresan el voltaje en el secundario en función de los parámetros de la muestra, geometría, etc., son en todo semejantes a los estudiados para la impedancia.

En el ensayo de tubos de material ferromagnético es muy frecuente la aparición de fuertes señales debidas a cambios en permeabilidad que, en realidad, no corresponden a defectos pero que perturban mucho el desarrollo del ensayo (ver también 3.2-2). Estas interferencias se pueden eliminar saturando la muestra mediante solenoides auxiliares por los que circula una potente corriente continua (fig. 19). Los solenoides de ensayo por CI propiamente dichos se sitúan entre los anteriores con lo que se asegura que la

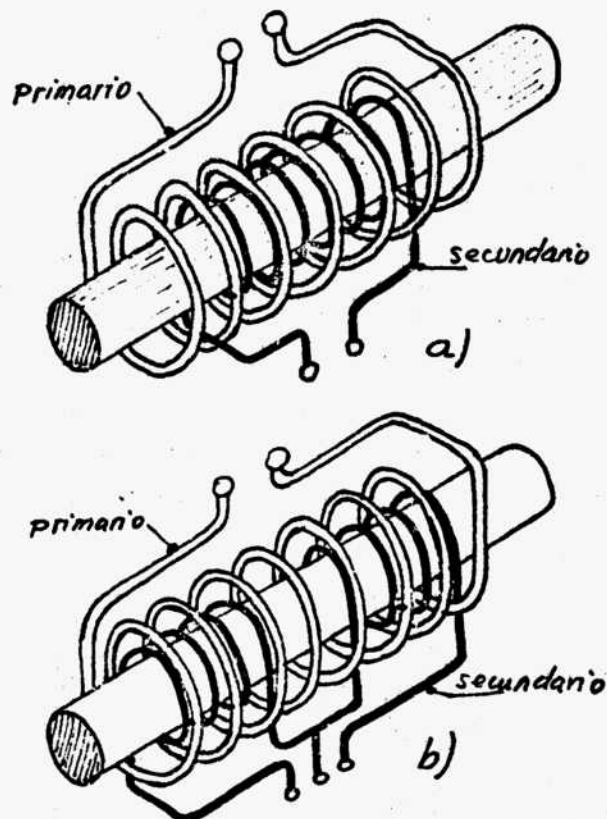


Fig. 18

zona de ensayo está magnéticamente saturada y su permeabilidad reducida a un valor constante próximo a 1.

5.2 Aparatos de detección y medida.

En la fig. 20 a) se esquematiza la versión más sencilla - de un equipo de CI en el que un simple voltímetro mide la tensión entre los bornes del solenoide de inspección. Un circuito así de simple sólo es adecuado para detectar variaciones grandes del efecto de separación que es, por ejemplo, el fundamento de muchos detectores de metales. - En el circuito de la fig. 20 b) el solenoide de inspección

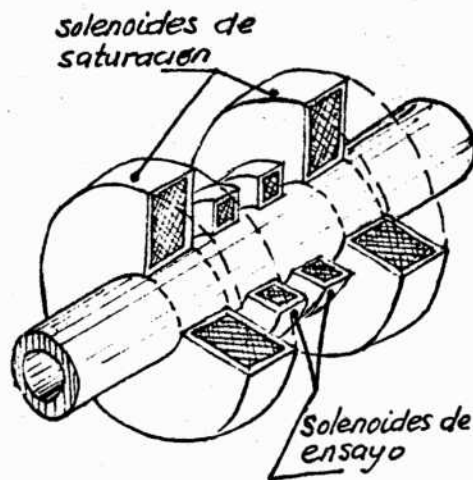


Fig. 19

está intercalado en una de la ramas de un puente de impedancias con el voltímetro de alterna adecuado y una impedancia variable para equilibrar el puente. El equilibrio se puede conseguir también con otro solenoide donde se coloca otra muestra semejante a la de ensayo. Así, el voltímetro indicará una tensión proporcional a la diferencia entre ambas muestras, pero si son iguales el voltaje será nulo. Con esta técnica pueden medirse variaciones de impedancia con una precisión del 0,01%. Para ello es fundamental una gran estabilidad de la fuente de corriente alterna, lo cual es una característica común en todos los equipos.

También se puede equilibrar el puente variando el valor -

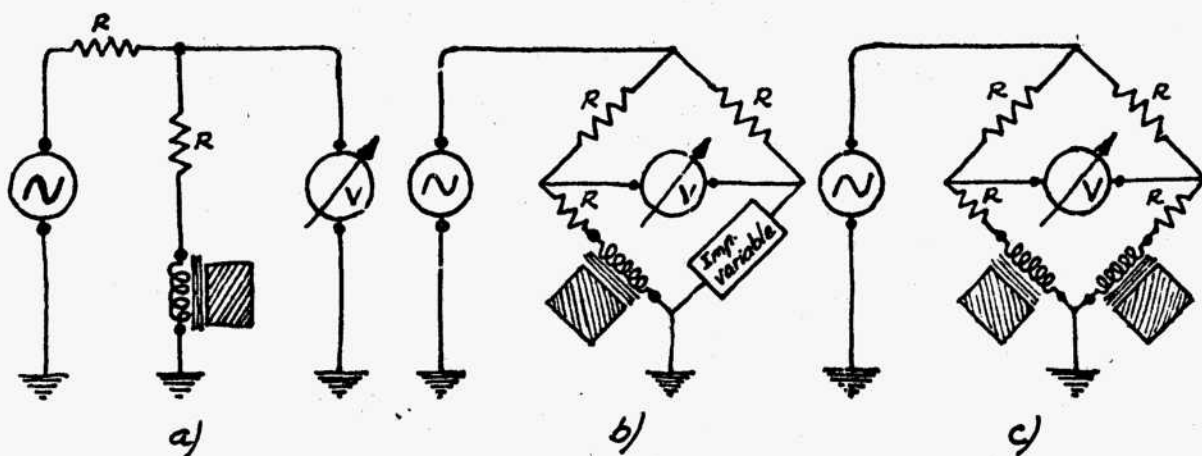


Fig. 20

de las resistencias R de las otras ramas o incluso de la resistencia en serie con el solenoide.

Sin embargo, el verdadero interés del ensayo no radica tanto en la forma de equilibrar el voltaje como en detectar la causa del desequilibrio.

A continuación vamos a hacer un breve resumen de las técnicas utilizadas para separar variables.

5.2-1 Compensación del voltaje.

La fig. 21 representa ampliada una zona, que incluye - el origen, del diagrama de influencia del efecto de separación. Supongamos que el objeto del ensayo es medir variaciones de σ en muestras de acabado superficial poco homogéneo o con capas de pintura de espesor variable. Se trata, por tanto, de evitar que las variaciones

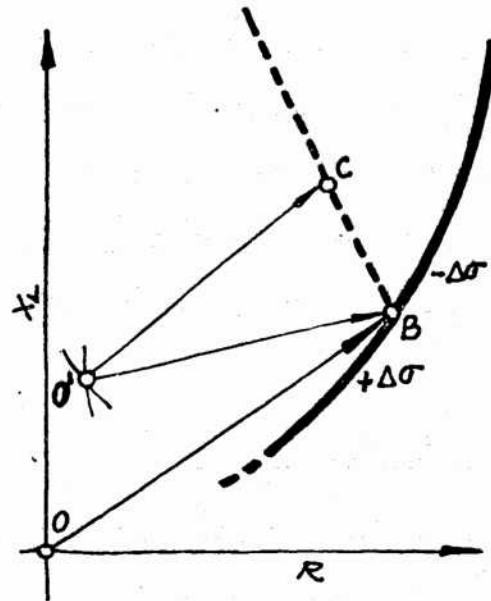


Fig. 21

del efecto de separación hagan errónea la lectura de conductividad. En el diagrama de la fig. 21 vemos que el vector impedancia (o el voltaje en el secundario) varía en magnitud y fase por causa de ambas variables. Si el equipo está compensado en vacío, es decir, voltaje cero con los solenoides descargados (o el palpador alejado de cualquier muestra), entonces los vectores impedancia parten del origen de coordenadas y no se podrá distinguir cual de las variables provoca los cambios de Z (o de V). Modificando adecuadamente los valores de las resistencias R y/o de la impedancia variable se puede conseguir que el voltaje en vacío sea distinto de cero o, lo que es lo mismo, el origen de vec-

tores deja de ser 0. Si hacemos que ese punto pase a ser O' , equidistante de los puntos B y C, entonces las variaciones de separación entre B y C no darán prácticamente ninguna variación en la magnitud de Z, mientras que las variaciones de σ seguirán siendo detectables. Las limitaciones de esta técnica se describen en el párrafo siguiente.

5.2-2 Medida del ángulo de fase.

Si en el ejemplo anterior se compensa el voltaje, o, si se prefiere, se desequilibra el puente, de manera que el punto origen de vectores pase a O'' (fig. 22), que es aproximadamente el centro de curvatura del tramo MN de curva, podremos medir conductividad en función del ángulo de fase φ , también con independencia casi total del efecto de separación. Si se mide simultáneamente la amplitud de los vectores \vec{ON} ... etc. se tiene que el aparato separa y cuantifica las dos variables: σ y efecto de separación.

Uno de los problemas de las técnicas de compensación de voltaje o de medida de fase es la variación de temperatura que se produce en un solenoide respecto del otro. Este efecto, es naturalmente, más acusado cuanto mayor sea el desequilibrio del puente debido a la diferencia del valor de la componente real (óhmica) en ambas ramas.

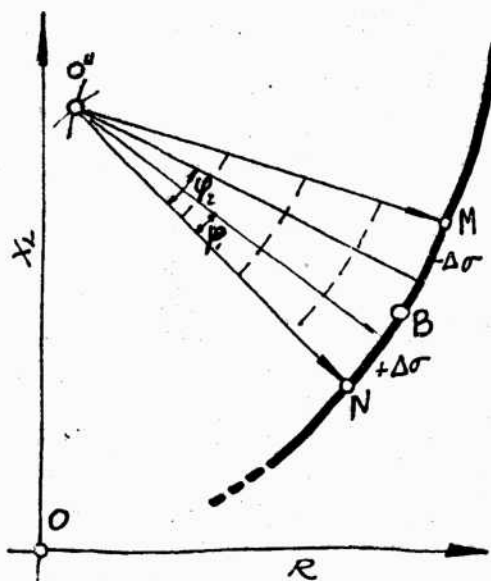


Fig. 22

Otra limitación no menos importante es la dificultad de encontrar el punto adecuado para origen de los vectores. El plano de impedancia está lleno de puntos y sólo un pequeño entorno alrededor del bueno resultará adecuado para nuestros propósitos. En los equipos cuya única indicación es la aguja de un voltímetro, el dar con el punto adecuado puede resultar muy laborioso o aleatorio.

Si el equipo es algo más sofisticado y dispone de un tubo de rayos catódicos, entonces es más fácil eliminar, o atenuar al menos, la influencia de variables indeseables.

Supongamos que se trata de medir el espesor de láminas metálicas. El lugar geométrico para el palpador correspondiente es la curva AFCEB de la fig. 23 a)

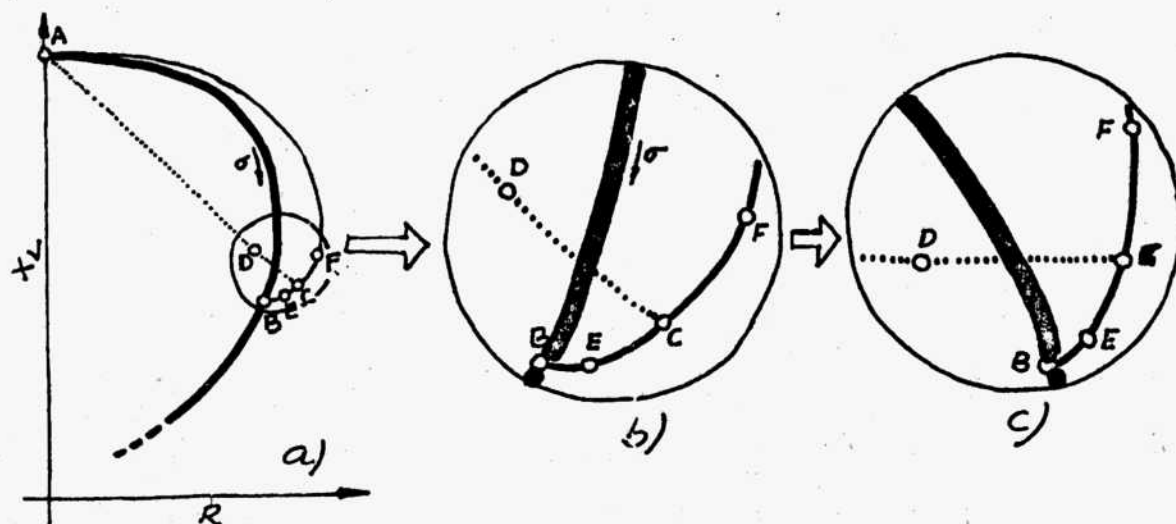


Fig. 23

El punto B es el que corresponde a la muestra de espesor infinito y está, por tanto, situado sobre la curva de σ . Si C representa la impedancia que corresponde al espesor nominal de las láminas, las variaciones en más o en menos respecto a ese valor nos darán puntos tales como el E o F, respectivamente. Si el palpador se retira de la superficie de una muestra de espesor nominal, se generará el lugar CDA, correspondiente al efecto de separación. En la fig. 23 b) aparece ampliada la zona de interés que puede ser la que aparece en la pantalla del osciloscopio. Vemos que variaciones tanto de separación como de espesor dan componentes en los canales horizontal y vertical de equipo lo que hará difícil la automatización del en-

sayo. Girando el control de fase se puede conseguir que la curva CD tome una posición prácticamente horizontal lo que significa que las variaciones de efecto de separación no darán señal (o la darán muy baja) en el canal vertical del equipo. Esta técnica, al igual que las descritas anteriormente, sólo puede compensar variaciones relativamente pequeñas de la variable indeseable, aunque su eficacia depende de la forma exacta que, para cada caso particular (material-frecuencia-palpador), tome la curva CDA.

5.2-3 Equipos actuales.

Las técnicas de END, en general, y las CI en particular, han pasado por una serie de etapas en su desarrollo cuyo objeto era distinguir las señales procedentes de pequeños defectos entre una gran variedad de ruido o falsas indicaciones. Los equipos actuales, en un estado avanzado de desarrollo, aplican todas las técnicas descritas para suprimir o reducir interferencias.

Un equipo de este tipo, como el que se esquematiza en la fig. 24, reúne todas, o al menos la mayoría, de las siguientes características:

- Generador de frecuencia variable continuamente entre, por ejemplo, 10 KHz y 1 MHz de gran estabilidad.

Esto permite ensayar materiales ferromagnéticos y no ferromagnéticos tanto en problemas de defectología como de caracterización.

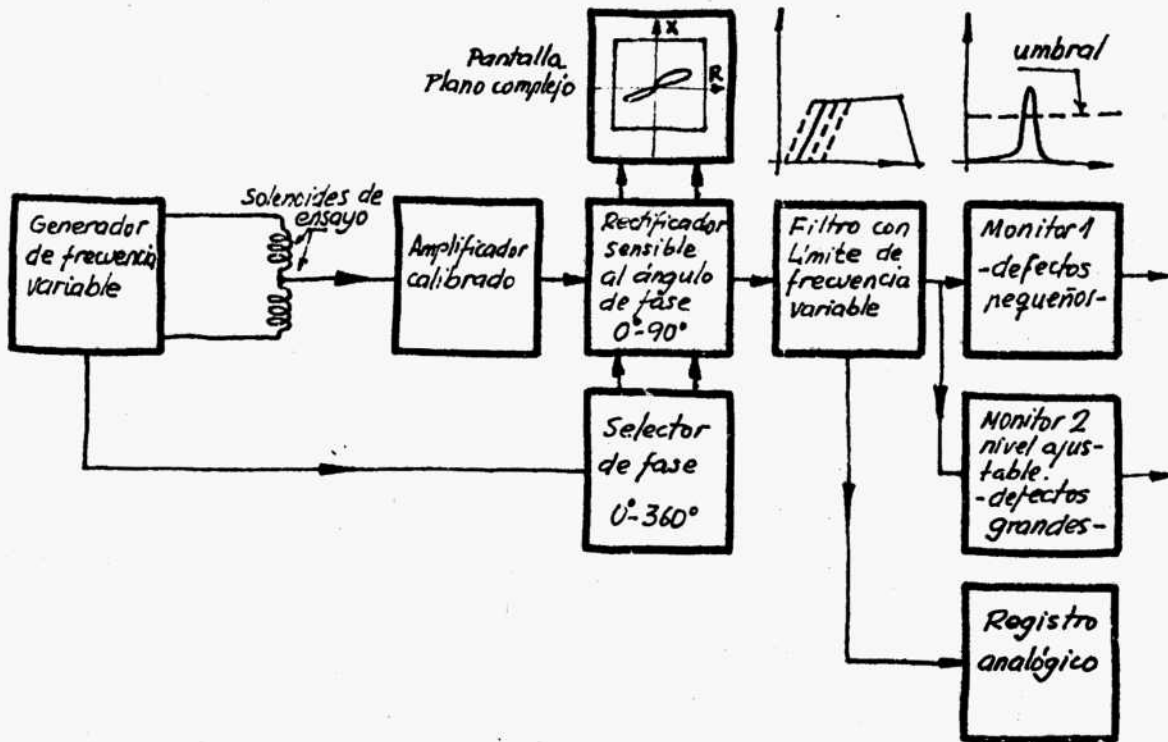


Fig. 24

- El voltaje alterno, modulado por la muestra, se manda a un amplificador de ganancia calibrada generalmente en dB.
- El voltaje amplificado pasa a un rectificador sensible al ángulo de fase que suele ser doble con un decaje entre ambos de 90° .
- Uno de los rectificadores controla la deflexión horizontal y otro la vertical de la pantalla del TRC, con lo que el desplazamiento de pincel electrónico es proporcional a las respectivas componentes del voltaje del secundario.
- Si la pantalla es de las que pueden retener la imagen (memoria) entonces muchos lugares geométricos de los que se han descrito en apartados anteriores se pueden dibujar directamente sobre la pantalla, que representa, para todos los efectos, el plano de impedancia. -

De esta forma es fácil seleccionar la frecuencia que produce la mejor separación entre las variables deseadas.

- Un mando de control de fase permite girar el oscilograma de manera que la variación de parámetros no significativos se produzca según la dirección no sensible de los monitores.
- El voltaje de salida del rectificador se hace pasar a través de un filtro de frecuencia variable (pasa-bajos, pasa-banda o pasa-altos) cuya misión es eliminar las señales que, aún rebasando el nivel de aceptación, no son de la frecuencia que se estima para defectos rechazables.

Así, por ejemplo, en la fig. 25 se ilustra el efecto de filtrado de señales de baja frecuencia. El voltaje de salida de un solenoide resulta modulado cuando pasa sobre un defecto. Pero la modulación suele ser abrupta (alta frecuencia) cuando la produce una grieta y suave (baja frecuencia) para la mayoría de las indicaciones de interferencia, en nuestro caso una variación local de conductividad que no resulta rechazable. (x)

Ambas indicaciones alcanzan la misma altura y, por --

(x) Naturalmente, la frecuencia de la modulación depende de la velocidad de desplazamiento del solenoide sobre la superficie de la pieza.

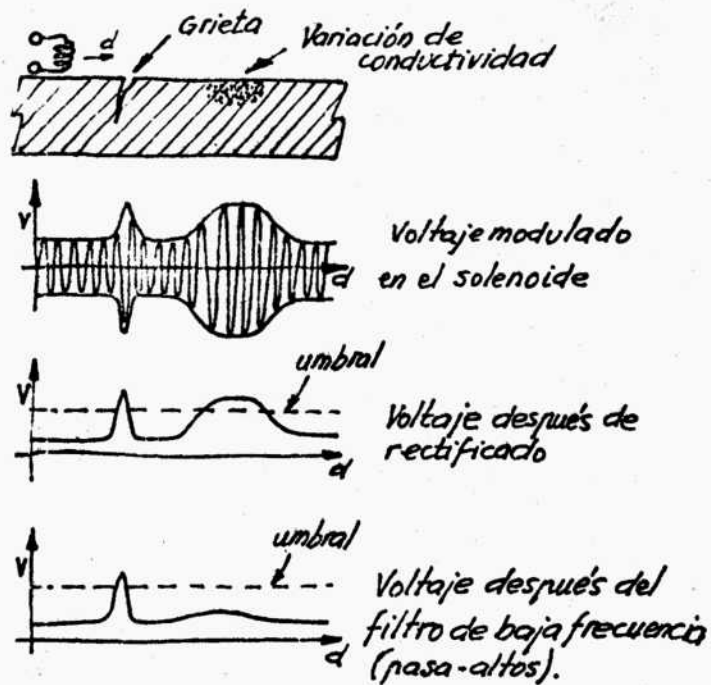


Fig. 25

tanto, pasan el umbral de detección. Sin embargo el filtro pasa-altos elimina la interferencia de baja frecuencia y deja pasar a la etapa final de registro la señal de la grieta.

En la fig. 26 se representa el esquema típico de los filtros citados. Su efecto se basa en que un condensador es un circuito abierto para la corriente continua o bajas frecuencias mientras que estas corrientes no encuentran ningún obstáculo para pasar por una inductancia. Por el contrario, las frecuencias elevadas atraviesan sin problemas el condensador pero no así

la inductancia debido al efecto de autoinducción.

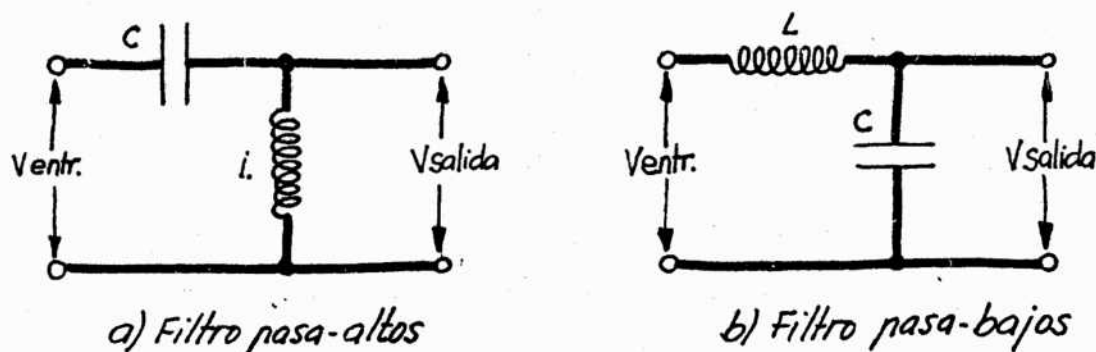


Fig. 26

La frecuencia de paso o anchura de banda del filtro se determinan modificando adecuadamente los valores de L y C .

De esta forma es posible conseguir que de todo el espectro de frecuencias pasen sólo las correspondientes a defectos y sea eliminado la mayor parte del ruido.

- La salida de la etapa de filtrado se puede enviar a varias etapas finales como registro analógico, monitores con sistemas de clasificación, etc.
- Todos los equipos disponen de mandos de control del voltaje para compensar adecuadamente la respuesta de los solenoides. Esto sirve, por ejemplo, para anular las pequeñas diferencias que inevitablemente se producen en la construcción de los solenoides diferenciales.

El equipo cuyas características básicas acabamos de describir es de tipo universal y puede ser usado para resolver prácticamente todos los problemas que se plantean en CI, tanto en materiales ferromagnéticos como no ferromagnéticos. Sin embargo requiere personal de alta cualificación en CI y su calibración para resolver algunos ensayos puede ser laboriosa. De ahí que muchas veces interese disponer de equipos, mucho menos sofisticados, diseñados para medir una variable, pero cuyo manejo es muy sencillo y no requieren personal muy especializado. La mayoría son, además, portátiles por lo que se utilizan en una gran variedad de circunstancias.

Así, por ejemplo, existen equipos diseñados exclusivamente para:

5.2-3.1 Medida absoluta de la conductividad eléctrica.

Funcionan con solenoide tipo palpador y dan directamente el valor de σ en $m/\Omega mm^2$ o en % IACS. La lectura en cada punto es cuestión de pocos segundos - una vez calibrado el equipo mediante un sencillo proceso previo. Estos equipos cubren una gama de conductividades desde 0,4 - 0,5 $m/\Omega mm^2$ para algunas aleaciones de titanio, hasta más de 61-62 para el caso de la plata. Operan a unas frecuencias típicas de 500 KHz para la banda de bajas conductividades y 60 KHz para las altas.

5.2-3.2 Medida de espesores de recubrimientos.

Funcionan también con palpador de muy diversos tipos y su gama de frecuencia varía entre pocos KHz y 10 MHz o más. Se pueden medir espesores de materiales no conductores (pintura, anodizado, etc.) sobre metales y también recubrimientos, electrolíticos o no, sobre acero. Cuando las capas son varias, como en el caso del níquel que se aplica sobre otra de cobre, puede resultar difícil la medición correcta del espesor. Con estos equipos se cubre una gama de espesores desde menos de una micra hasta varios centímetros.

5.2-3.3 Detección y medida de profundidad de grietas.

Permiten usar palpadores de una amplia variedad de configuraciones, de manera que se hace accesible casi cualquier zona de una pieza o conjunto. Funcionan a frecuencias altas, lo que permite medir la profundidad de grietas superficiales de incluso 0,1 mm, que puede ser menor aún si la inspección se lleva a cabo por procedimientos automáticos.

5.2-3.4 También son de amplia aplicación industrial los equipos diseñados exclusivamente para clasificación de materiales ferromagnéticos. Trabajan, naturalmente, en la zona de bajas frecuencias, de 10 a 1000 Hz,

y, en general, funcionan por el método diferencial con un montaje similar al de la fig. 20 c) en el que una muestra se mantiene fija en uno de los solenoides y por el otro se van pasando el resto de las piezas del lote. Pueden tener indicación por aguja sobre escala graduada, o bien un TRC en el que se representa alguno de los siguientes parámetros:

- Un ciclo de la onda de voltaje diferencial (representación lineal).
- Un punto que representa el extremo del vector - voltaje (representación puntual).
- Una elipse (u otra curva) que se deforma o se inclina en relación con las variaciones de la muestra de ensayo respecto de la patrón (representación elíptica).

Otros equipos trabajan por el método absoluto (un solenoide único) y la compensación del voltaje se realiza mediante un transformador interno. La indicación, sobre escala graduada casi siempre, puede ser función:

- Valor absoluto del voltaje en el secundario.
- De la componente real de ese voltaje.
- De la contribución de los armónicos sucesivos -- (3º, 5º, etc.) al voltaje del secundario.

A continuación se describe el proceso de operación

o calibrado de un equipo de control diferencial y TRC con representación lineal cuyos elementos fundamentales son:

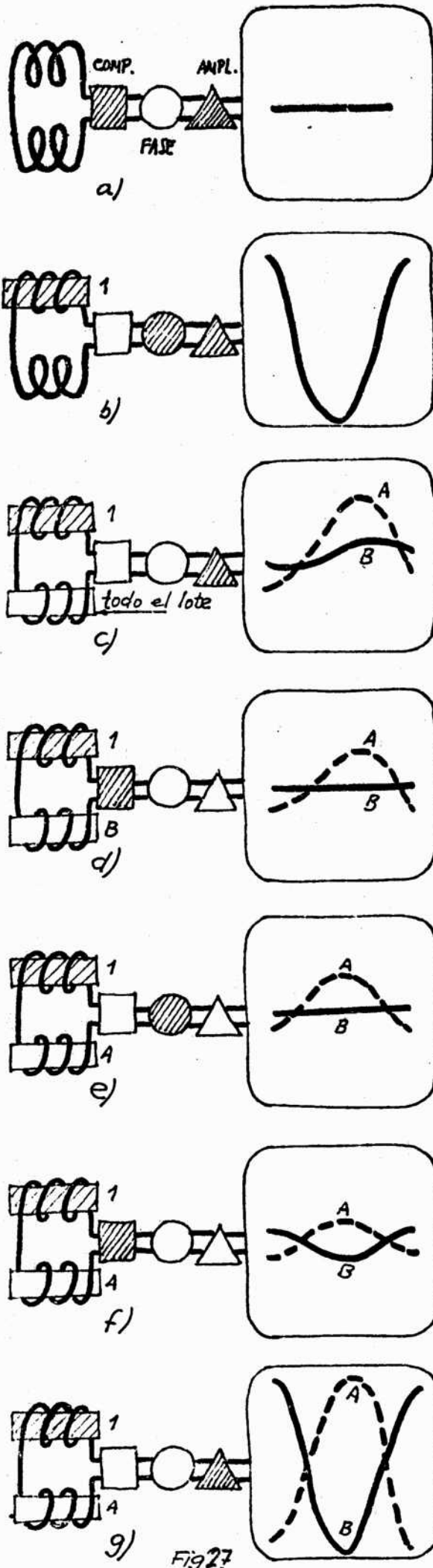
- Solenoides de ensayo conectados entre sí según el sistema diferencial.
- Control de compensación del voltaje en el secundario (representado por un cuadro en la fig. 27). Se utiliza para equilibrar la respuesta en vacío y, en caso necesario, para desequilibrarlo en el sentido adecuado.
- Control de fase cuyo fundamento ya ha sido descrito (representado por un círculo en la fig. 27).
- Amplificador (un triángulo en la fig. 27).
- Tubo de rayos catódicos (TRC).

En la fig. 27 se muestra el proceso completo de calibración o puesta a punto, cuyas etapas son:

- a) Compensación en vacío fig. 27 a) conviene hacerla siempre para evitar partir de una situación desconocida. Con el control de fase en 0° se va elevando la amplificación y compensando hasta -- conseguir una horizontal al máximo nivel de amplificación. A veces no sale exactamente una recta debido a interferencias o ruido de fondo.
- b) Una muestra cualquiera del lote se coloca en uno de los solenoides con lo que el voltaje se desequilibrará mucho. Amplificar hasta que el mínimo

de la curva llegue al extremo inferior del TRC. Esta será, en general, una sensibilidad insuficiente para resolver la mayoría de los problemas, pero se suele utilizar como referencia. Sobre ella es normal tener que amplificar de 6 a 12 dB.

- c) A continuación se pasa todo el resto del lote -- por el otro solenoide. Las diferencias entre -- las muestras se traducen en que el desequilibrio de la etapa anterior se compensa más con unas -- piezas que con otras. Siempre habrá, por tanto, una pieza que dé la curva más alta (curva A) y otra que la dé más baja (curva B). Es evidente, entonces, que todo el lote está comprendido entre las curvas A y B. La separación ya se ha -- producido; las etapas siguientes tienen por -- objeto optimizar la representación.
- d) Compensar hasta conseguir que la curva B quede horizontal.
- e) Girar el control de fase hasta que el máximo de la curva A quede situado en el centro de la pantalla.
- f) Compensar de nuevo hasta que ambas curvas se separen simétricamente del centro de la pantalla.



g) Amplificar hasta que ambas curvas alcancen los límites del TRC.

En estas condiciones, el paso de todas las piezas del lote por el solenoide de ensayo permitirá separarlas, por ejemplo, en dos familias: las que se agrupan junto a la curva A y las que lo hacen junto a la B. El ensayo, sin embargo, no nos dice nada acerca de la variable que da origen a la separación. Un ensayo de este tipo exige, pues, siempre ensayos complementarios (análisis químico, ensayos mecánicos, metalográficos, etc.) para comprobar si la causa de la separación es realmente la variable que se buscaba. Por ejemplo, si se trata de un problema de composición química, habrá que hacer análisis que nos dirán si las curvas de la familia A corresponden a un tipo de acero y las de la B a otro distinto.

La etapa final en estos ensayos es, por tanto, la que cuantifica los resultados y es normal que exija la realiza

ción de ensayos destructivos sobre algunas piezas para identificar las familias. Se deduce, pues, que este ensayo no es aplicable a piezas aisladas o lotes de pocas piezas.

Una vez puesto a punto, este ensayo puede intercalarse en una cadena de producción de forma que controle todas las piezas y las clasifique automáticamente en tres grupos típicos: aceptables, rechazables y recuperables. La elevada velocidad de respuesta de estos equipos, limitada por la inercia de los dispositivos mecánicos de clasificación, permite inspeccionar hasta 10.000 piezas por hora.

6. Aplicaciones.

De entre los numerosos ejemplos posibles, se recogen a continuación algunos de los más característicos con el fin de facilitar una visión panorámica de la amplitud de posibilidades del método en ensayo por CI.

6.1 Composición química.

6.1-1 No ferromagnéticos.

En la industria del aluminio para conductores eléctricos es, naturalmente, de importancia fundamental mantener la conductividad del producto por encima de un valor mínimo

especificado. En épocas pasadas, el control de la calidad se realizaba en base a análisis químicos espectrográficos de gran precisión ya que se conocía la negativa influencia que pequeños contenidos de ciertos elementos ejercían sobre la conductividad del aluminio. En la fig. 28 se muestra este efecto para diversos elementos.

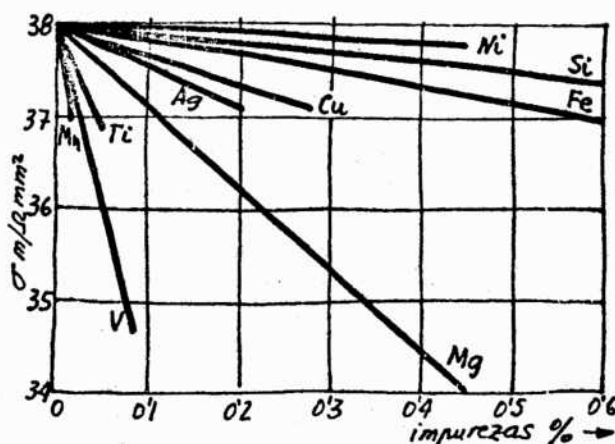


Fig. 28

Este control se realiza en la actualidad por medida directa de la conductividad por CI. El ensayo tiene numerosas ventajas, entre las que destaca la de medir en valor absoluto la variable decisiva, frente al método indirecto que representaba en análisis.

La notable sensibilidad del ensayo por CI queda patente en el gráfico de la fig. 29. Una variación de pureza de \times 99,99 % a 99,996 % da lugar a una variación del orden de $0,3 \text{ m}/\Omega \text{ mm}^2$ cantidad perfectamente apreciable en la escala de la mayoría de los equipos.

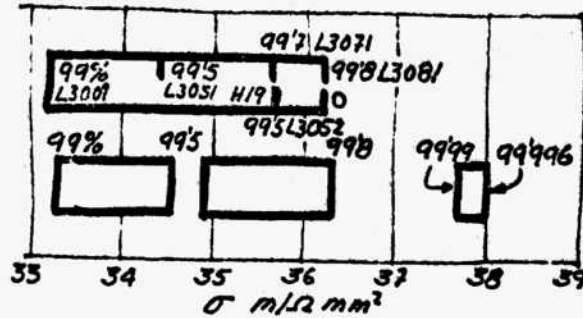


Fig. 29

La posibilidad de una rápida diferenciación de los distintos grados de aluminio es muy interesante para otras aplicaciones, como es la determinación de la aptitud de la aleación para ser conformada por impacto.

6.1-2 Ferromagnéticos.

El oscilograma de la fig. 30 corresponde a la separación por composición química de un lote de zapatas de freno de fundición gris. La familia superior corresponde al grupo de zapatas no aleadas, mientras que las dos inferiores agrupan a las piezas de fundición gris débilmente aleada al Cr-Ni, de superiores características mecánicas.

La separación de esta última familia en dos subfamilias - se debe a pequeñas diferencias en contenido en elementos de aleación, posiblemente por proceder de coladas distintas. Los números marcados sobre las curvas indican la du-

reza de las piezas correspondientes que, como puede verse, también está relacionada con la posición de las curvas.

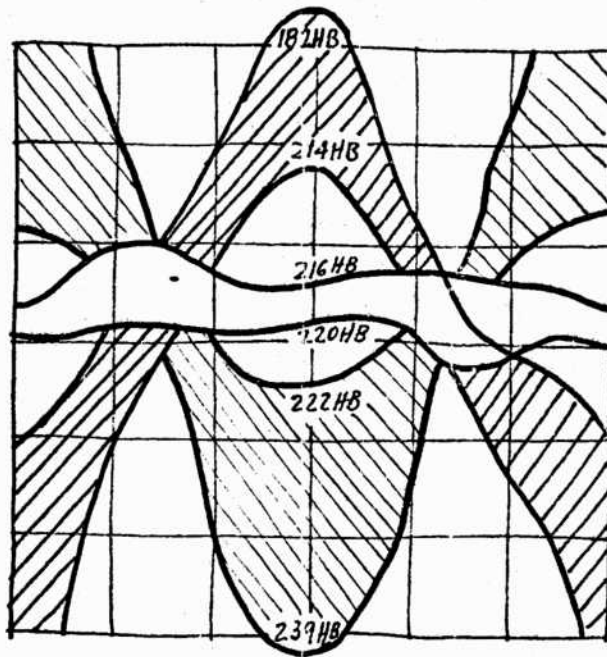


Fig. 30

6.2 Estado de tratamiento.

6.2-1 Tratamiento térmico. No ferromagnéticos.

La fig. 31 muestra el ciclo de tratamiento térmico característico de una aleación tipo dural, L-3140. Es notable la facilidad con que se diferencian entre sí los tres estados de recocido (O), maduración natural (T4) y maduración artificial (T6) por medida de conductividad. Sin embargo, los estados T4 y T6 se solapan en valores de límite elástico,

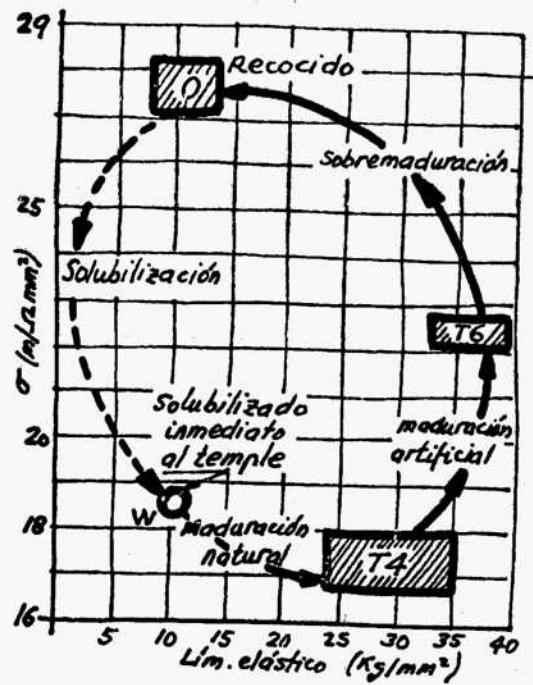


Fig. 31

que era el procedimiento (junto con la dureza) que se usaba para determinar el estado de tratamiento de la aleación hasta la aparición de los equipos de medida de conductividad por CI.

Otras aleaciones bonificables presentan diagramas semejantes.

6.2-2 Tratamiento mecánico. No ferromagnético.

En la fig. 32 se muestra la correlación casi lineal entre el grado de deformación en frío (acritud) de un latón -- Cu-38Zn y su conductividad eléctrica. La medida de dureza, muy sensible en las primeras etapas de la deformación, -- pierde sensibilidad para mayores reducciones.

Parece, pues, que en este caso, la medida de conductividad

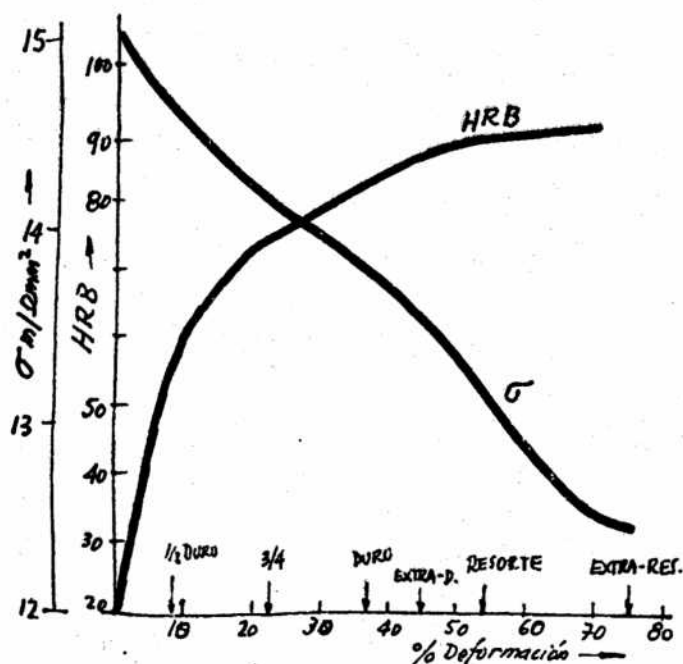


Fig. 32

es más apropiada que la dureza para caracterizar el estado de tratamiento de la aleación, sobre todo en las zonas de acritud media y elevada.

El margen de variación de la conductividad aumenta con el contenido en Zn, por lo que el grado de acritud se podrá establecer mejor en aleaciones como el latón de cartuchera (30% Zn), de amplia utilización industrial.

6.2-3 Tratamiento térmico. Ferromagnéticos.

La fig. 33 representa el oscilograma de separación de un lote de piezas de acero rápido de 18% W, donde se observa que las dos familias se diferencian únicamente en dos unidades Rockwell C. Esto prueba la extraordinaria sensibilidad del método.

Piezas cuyas temperaturas de revenido diferían en sólo -- 25°C, dieron lugar a curvas próximas, pero diferentes, - mientras que la variación de dureza correspondiente resultó inapreciable para el durómetro.

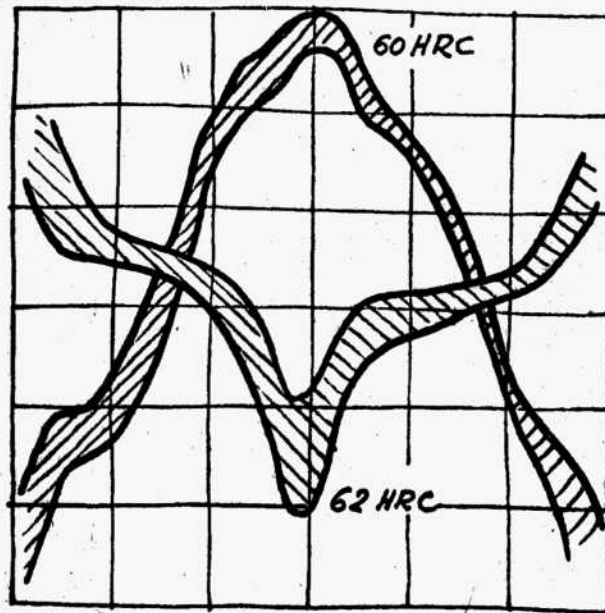


Fig. 33

En general, no se presentan dificultades de clasificación por estado de tratamiento cuando se trata de lotes en los que la composición química es constante. Sin embargo, en la práctica industrial, lo normal es que los problemas de estado de tratamiento vayan mezclados con otros de naturaleza. En algunos de estos casos es también posible separar en un solo ensayo las dos variables. De todas formas, cabe la posibilidad de someter a todas las piezas al mismo

tratamiento térmico. Así, las piezas de distinta composición darán diferente respuesta al tratamiento, lo que - permitirá su posterior separación.

Ensayos de este tipo se utilizan con éxito en la caracterización de piezas de fundición nodular.

6.3 Capas endurecidas.

Los procesos de cementación, carbonitruración, temple superficial por inducción o flameado, etc. de los aceros pueden - también controlarse por CI de manera que es posible medir la profundidad de la capa endurecida o su dureza aunque no debe haber variaciones simultáneas de ambos parámetros. Debe asegurarse además que el núcleo es homogéneo en composición y estado de tratamiento. También en estos casos es relativamente - frecuente la mezcla de variables que suele exigir el tratamiento térmico uniforme para todo el lote para después separar por composición química, tras lo cual es ya posible abordar - el problema de tratamiento superficial. Incluso pueden presentarse dificultades si, siendo la composición química constante, se presentan variaciones en el estado del núcleo, problema para cuya resolución sirve también el tratamiento previo - a todo el lote para dejar después el tratamiento superficial como única variable.

La fig. 34 es un ejemplo de clasificación de muestras de diferente profundidad de capa cementada . El eje vertical de este

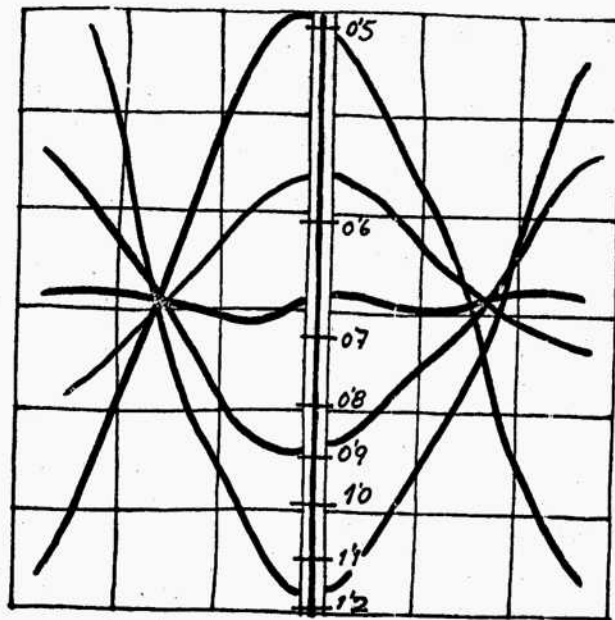


Fig. 34

oscilograma está calibrado en milímetros de espesor de capa, de manera que éste puede leerse directamente en el punto de intersección de la curva con el eje. En la fig. aparece la banda de espesores entre 0,5 y 1,2 mm, límites que pueden modificarse fácilmente en el sentido deseado con los mandos de compensación y amplificación. La falta de linealidad de la escala está estrechamente relacionada con la profundidad de penetración de la CI. Este ensayo fue realizado a 50 Hz. El método tiene una sensibilidad de medida semejante a la obtenida con una observación al microscopio metalográfico a 100-150 aumentos y, además, da una respuesta integrada del estado de toda la pieza.

6.4 Sobrecalentamientos locales.

En casos de incendio de máquinas o estructuras metálicas, es de gran interés llegar a detectar la zona que ha sufrido mayor calentamiento porque será probablemente la más deteriorada en sus características resistentes (con vistas a una posible recuperación) y también por conocer el origen del incendio.

Otras veces, sin tratarse de un accidente, se producen calentamientos locales no controlados, por ejemplo, al enderezar vigas o piezas deformadas o, incluso, debido a las propias condiciones de servicio de la pieza, como es el caso del calentamiento de los tambores de freno.

Es evidente que todo calentamiento localizado deja en el material una especie de huella dactilar en forma de isoterma más o menos irregulares que rodean el punto de máximo calentamiento. Las modificaciones microestructurales a que da lugar el calentamiento pueden detectarse por CI y se puede trazar el mapa de isotermas que facilita mucho el estudio de los daños sufridos por la pieza.

En el caso de las llantas de tren de aterrizaje, el método de detección y evaluación del sobrecalentamiento en servicio -- era la medida de dureza en diversos puntos de la llanta. Este ensayo, semidestructivo, está siendo sustituido por el de medida de conductividad que tiene la ventaja de la rapidez y

de que puede realizarse sobre cualquier punto de la superficie de la llanta. La fig. 35 muestra el comportamiento de una llanta de aleación L 3130 cuya conductividad aumenta casi linealmente con la pérdida de dureza, sobre todo en la zona crítica de 99 Brinell, que es el valor mínimo exigido.

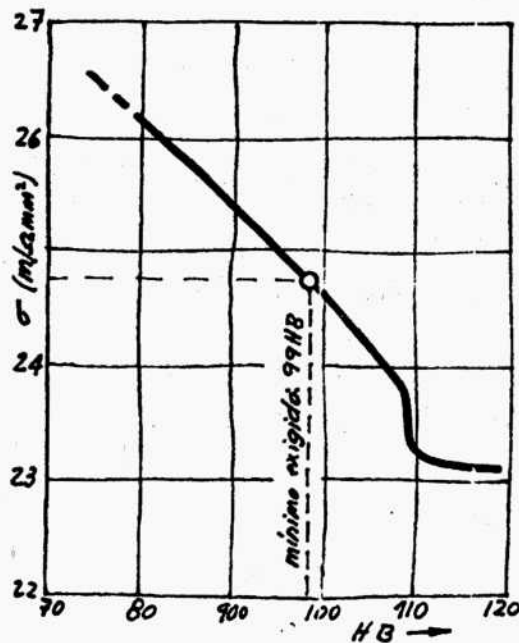


Fig. 35

También en los materiales ferromagnéticos se pueden detectar las isothermas debidas a calentamientos localizados mediante equipos que trabajan con palpador a baja frecuencia. En la fig. 36 se representa la variación de lectura en la escala de uno de estos equipos (360Hz de frecuencia) en función de la dureza de una plancha de acero de 0,18% C, 1,25% Mn y 17 mm

de espesor que fue calentada con soplete hasta unos 1000°C . seguido de un enfriamiento relativamente rápido.

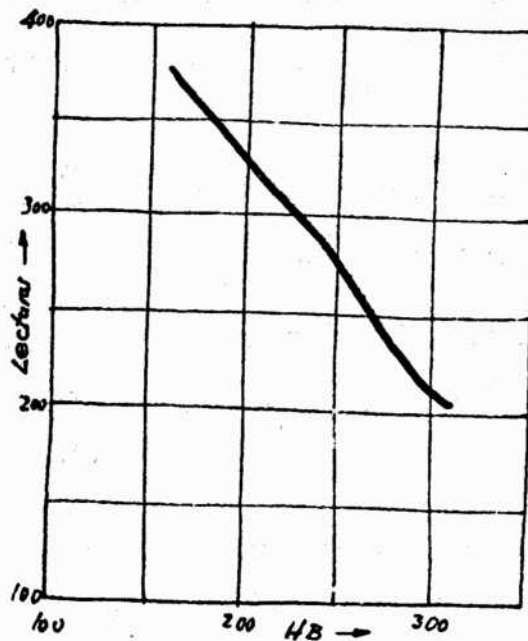


Fig. 36

El trazado del mapa de isoterma puede hacerse simplemente -- con el equipo de ensayo por CI, pero la evaluación de la pérdida de características sufrida por la pieza o estructura exige la realización de ensayos mecánicos (dureza, resistencia, etc.) en paralelo con los de CI sobre probetas de material -- igual al sobrecalentado con el fin de poner a punto el método.

6.5 Corrosión.

En aleaciones ligeras es fácil detectar corrosión por exfoliación o intergranular a través de la pérdida de conductividad

que provocan. Una muestra de larguero de aleación ligera llega a disminuir su conductividad hasta en un 40% debido a corrosión por exfoliación de poco más de 0,5 mm. de profundidad, y un espesor de corrosión de 0,09 mm. provoca una pérdida del 4%. Esta sensibilidad del método es de especial interés puesto que esas profundidades de corrosión pasan prácticamente desapercibidas para una inspección visual y no son fácilmente detectables por otros métodos.

También la corrosión intergranular provoca fuertes pérdidas de conductividad aunque, en general, menores que la exfoliación.

Otra característica interesante del método es que las picaduras de corrosión, más escandalosas por el deterioro del acabado superficial que provocan, pero, en general, menos agresivas mecánicamente que la corrosión intergranular, dan también pérdidas menores de conductividad. De esta forma es posible identificar y evaluar el efecto de los distintos tipos de corrosión. Naturalmente la puesta a punto del método para cada caso particular y el trazado de las curvas de calibración correspondientes exige la realización de ensayos destructivos (metalográficos, sobre todo).

6.6 Control de tubos no ferromagnéticos para intercambiadores.

El problema de detección de heterogeneidades y discontinuidades en tubos de material no ferromagnético para intercambiado

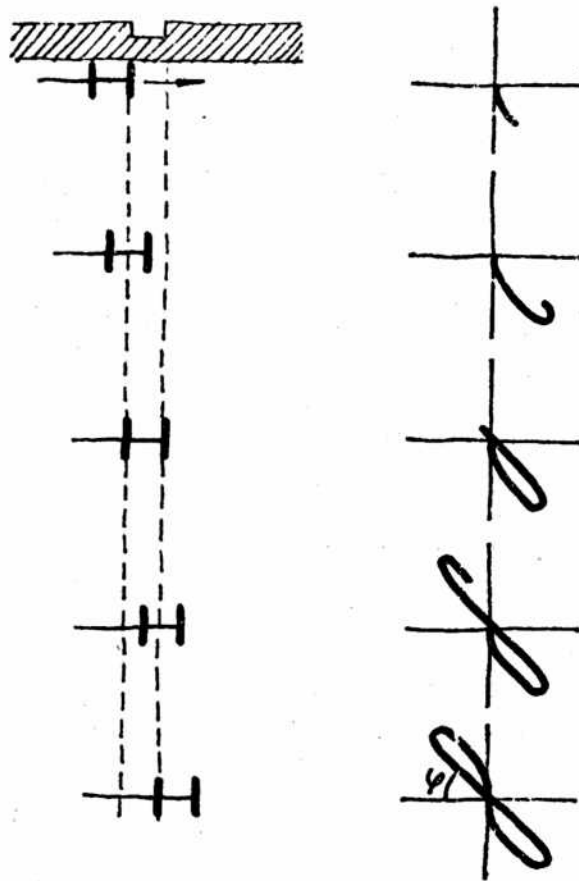


Fig. 37

La elección de los parámetros de ensayo:

- Distancia entre solenoides.
- Frecuencia.

Se suele hacer en base a ensayos sobre probetas patrón con defectos artificiales hasta obtener resultados óptimos.

Los parámetros:

- Amplitud de la señal.
- Angulo de fase y
- Forma de lóbulo.

Permiten conocer el origen de la indicación y evaluar su grado de severidad.

7. Referencias.

- 1.- F. Ramírez Gómez y col. "Introducción a los métodos de Ensayos No Destructivos de Control de la Calidad de los Materiales" INTA. Madrid 1977. 2ª Edición. pág. 439 y siguientes.
- 2.- "Nondestructive Inspection and Quality Control". American Soc. For Metals. Metals Handbook, 8 th edición. vol. 11. 1976, pág. 75 y siguientes.
- 3.- Edward M. Purcell. "Electricidad y Magnetismo" Berkeley Physics course, vol. 2, Edición Reverte 1969, 468 pág.
- 4.- H. Luz and P. Neumaier. "Nondestructive Testing of materials using the eddy current Method" Report nº 199. Inst. Dr. Förster.
- 5.- "Eddy Current Testing" Classroom training handbook. General Dynamics. Convair División. San Diego. California 1967.
- 6.- J. Hervás García "Control de tubos de cambiadores de calor en centrales nucleares por medio de corrientes inducidas". Seminario sobre técnicas especiales y aplicación de los END a la inspección en servicio de centrales nucleares. Universidad Politécnica de Madrid. 1979.
- 7.- K. Stöwer. "Introducción a los fundamentos del ensayo no destructivo de materiales metálicos mediante métodos -- electromagnéticos". Inst. Dr. Förster. Abril 1976.