

CNEA-AC 85/85

PMTM/A-75

04.85.30

ej. 2

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
Dependiente de la Presidencia de la Nación
GERENCIA DE DESARROLLO

CURSOS DE ENTRENAMIENTO AVANZADO EN METALURGIA

Ciclo de Especialización

ENSAYO POR CORRIENTES INDUCIDAS I

Alfredo Leston y Marta S. Granovsky

INEND Proyecto PNUD ARG/71/537

Buenos Aires

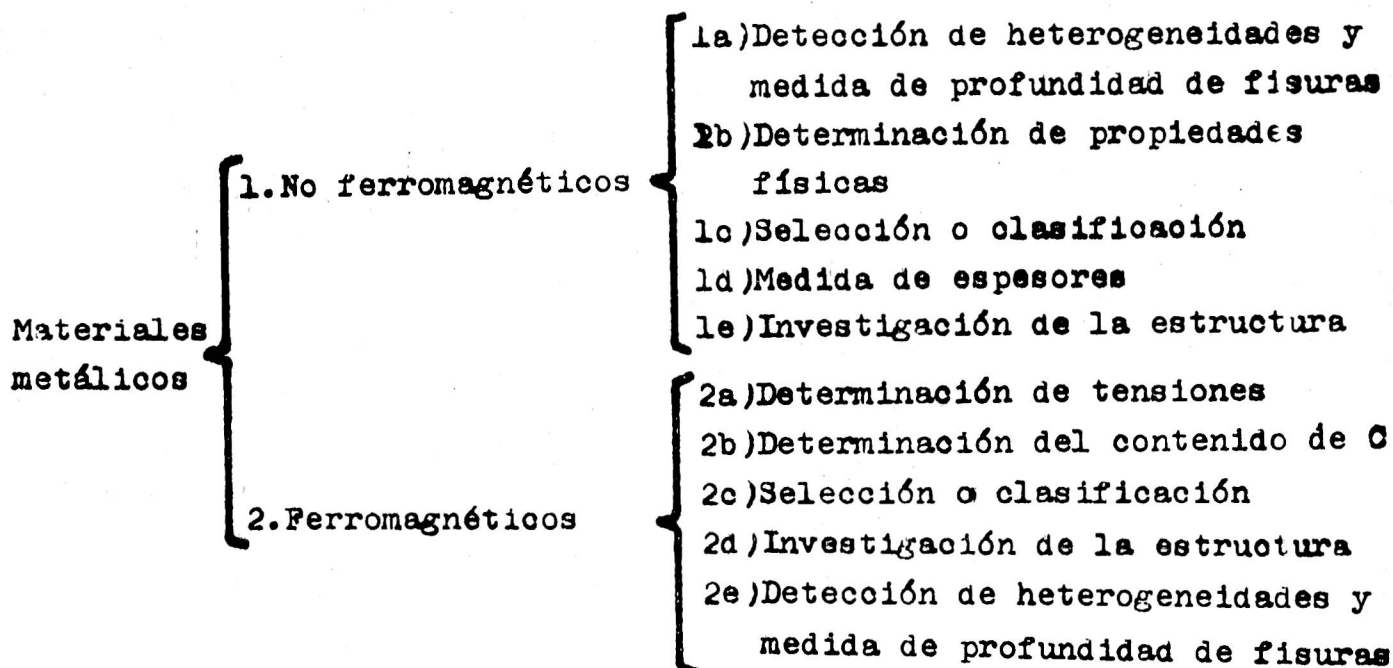
1985

1.- INTRODUCCION:

Una de las características fundamentales que definen la calidad de un material es la uniformidad de sus propiedades físico químicas y tecnológicas, así como la ausencia de heterogeneidades perjudiciales para su función o empleo, de manera que el producto responda por igual a los procesos o tratamientos, y que las piezas o componentes que se logren del mismo, presenten igual grado de fiabilidad.

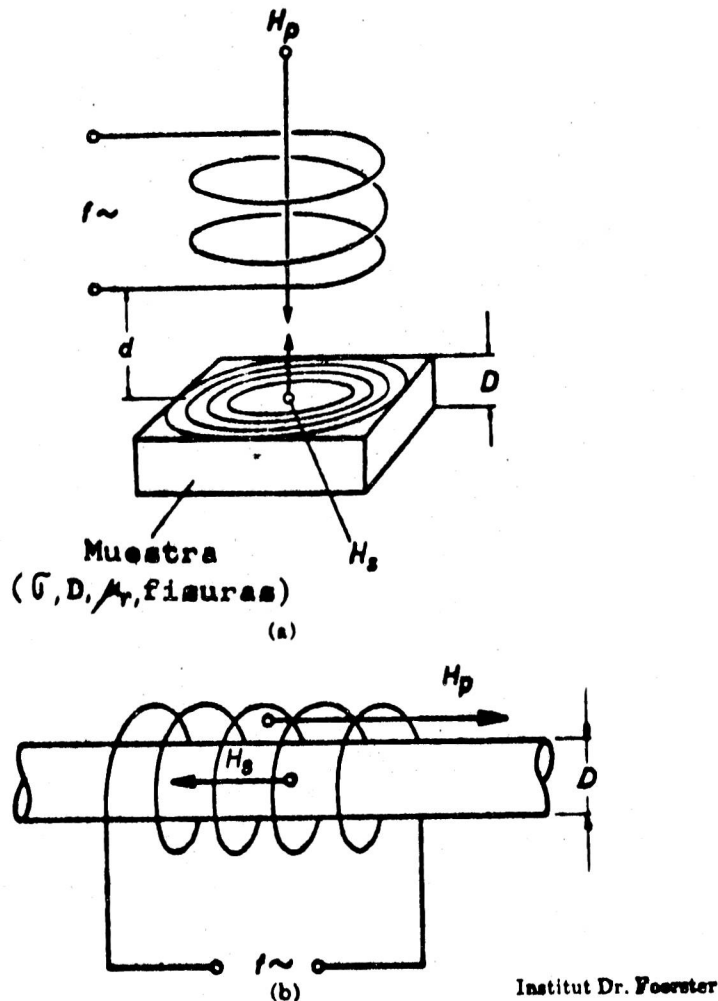
Los métodos de examen no destructivo de materiales, tales como los basados en las radiaciones penetrantes, en los ultrasonidos, en las partículas magnéticas, en los líquidos penetrantes, etc, están generalmente limitados a la comprobación de la calidad de los materiales en cuanto a la presencia de heterogeneidades (poros, fisuras, impurezas y otros tipos de discontinuidades); en cambio, los métodos de inducción electromagnética permiten, además, la caracterización no destructiva de los materiales metálicos, es decir no solo la detección de las posibles heterogeneidades presentes, sino también la comprobación de su naturaleza o composición, de su estado estructural, así como de otras características metalúrgicas de los mismos, ampliando de esta forma el campo de aplicación de los métodos de examen no destructivo, y contribuyendo primordialmente a garantizar la uniformidad de la producción.

Una síntesis de las posibilidades de aplicación del método de inducción electromagnética (conocido también como método de corrientes inducidas o corrientes parásitas o corrientes de Foucault) viene dada en el cuadro siguiente:



2.- PRINCIPIOS BASICOS:

Si una muestra conductora se coloca en un campo magnético variable sinusoidal H_p generado por la circulación de una corriente alterna de frecuencia f por un solenoide, aquél crea en la muestra corrientes inducidas circulares o de Foucault, las cuales a su vez dan lugar a un campo magnético opuesto H_s que modifica al campo primitivo.



- Fig. 2.1 -

En ausencia de muestra, el solenoide puede ser caracterizado por las componentes de su impedancia eléctrica, es decir por su:

- Reactancia inductiva $X_{L_0} = 2\pi f L_0 = \omega L_0$
- Resistencia ohmica R_0

En presencia de una muestra, la inductancia toma un nuevo valor L y la resistencia uno R , debido a la modificación sufrida por el campo H_p bajo la influencia del campo inducido H_s , es decir, como si hubiese un cambio aparente en la impedancia al solenoide se aproxima una muestra conductora. Esta impedancia se representa por el número complejo:

$$Z = R + j\omega L$$

Este cambio aparente de impedancia se produce tanto en amplitud como en fase, y puede representarse según el plano complejo de impedancias.

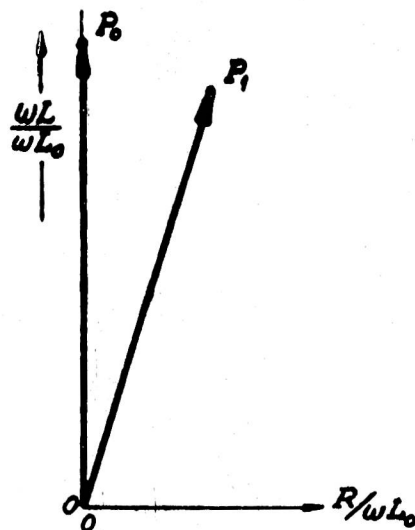
Con el fin de independizar los resultados de los parámetros de diseño o de geometría del solenoide usado, es conveniente normalizar el plano complejo, normalizando la impedancia respecto de su valor en ausencia de muestra:

$$\frac{Z}{Z_0} = \frac{R}{Z_0} + \frac{j\omega L}{Z_0}$$

Dado que el valor de R_0 es prácticamente nulo, la normalización se realiza dividiendo por ωL_0

$$\frac{Z}{\omega L_0} = \frac{R}{\omega L_0} + \frac{j\omega L}{\omega L_0}$$

con lo cual se generalizan los resultados para cualquier solenoide con un número arbitrario de espiras y en cualquier configuración.



- Fig. 2.2 -

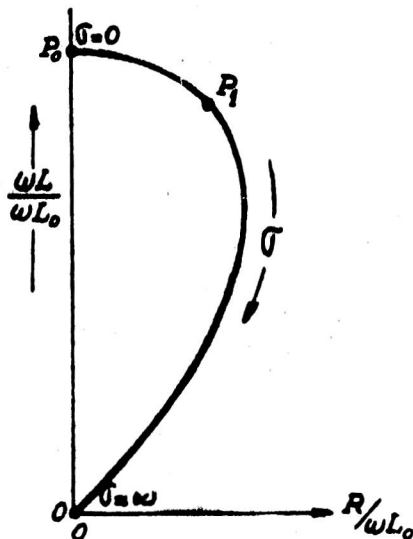
Por lo tanto, en ausencia de la muestra, corresponde un estado P_0 (fig. 2.2). Al introducir una muestra conductora se modifica este estado debido al campo secundario H_s producido por las corrientes inducidas, siendo su efecto análogo a si las características propias del solenoide se modificaran y pasasen al estado P_1 .

La amplitud y la fase del desplazamiento aparente de la impedancia del solenoide desde el estado P_0 al P_1 , bajo la influencia de la muestra ensayada, son funciones de las propiedades de la misma y de las características del sistema, pudiéndose sintetizar en el siguiente cuadro:

PROPIEDADES SIGNIFICATIVAS DE LA MUESTRA	CARACTERISTICAS DEL SISTEMA
<ul style="list-style-type: none"> - conductividaa eléctrica (σ) - dimensiones (diámetro de una barra, espesor de una chapa) - permeabilidad magnética relativa (μ_r) - presencia de discontinuidades (fisuras, poros, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> - frecuencia del campo alterno del solenoide (f) - tamaño y forma del solenoide (bobinas exteriores, interiores, palpadores, etc.) - distancia del solenoide al material (d) o efecto de separación (se puede considerar también el espesor de un recubrimiento no conductor sobre la muestra conductora)

En el diagrama de impedancia compleja, la componente reactiva puede relacionarse con la energía almacenada en el solenoide y la muestra durante cada ciclo de corriente alterna sinusoidal, y la componente resistiva con la energía disipada en la muestra durante cada ciclo.

Suponiendo constantes todos los demás parámetros veamos como afecta un cambio de conductividad eléctrica (σ) de la muestra a la impedancia aparente del solenoide. Cuando la muestra tiene conductividad eléctrica nula no se inducen corrientes de Foucault (estado P_0 , fig. 2.3). Si la conductividad de la muestra aumenta a un valor determinado, se inducen corrientes de Foucault que reducen la energía almacenada por ciclo, aumentando la disipación de energía en forma de calor (estado P_1). Si la conductividad sigue aumentando, la componente reactiva sigue disminuyendo y la resistiva creciendo hasta un valor máximo, decreciendo posteriormente. Se obtiene entonces como efecto de la variación de la conductividad (σ) la curva de la figura 2.3.



- Fig. 2.3 -

La influencia de varias propiedades físicas de la muestra sobre la impedancia del solenoide puede ser calculada, en ciertos casos, para varias frecuencias.

A menudo, del cambio de impedancia (distancia P_0 a P) es posible medir cuantitativamente y en forma independiente una de otra no solo la conductividad, dimensiones y permeabilidad magnética de la muestra, sino también la magnitud y dirección de fisuras. La frecuencia óptima para un problema dado se determinará analítica o experimentalmente y será aquella que provea la mayor sensibilidad obtenible con los métodos electromagnéticos para la detección de;

- variaciones en la conductividad eléctrica, en selección de materiales
- variaciones en las dimensiones de la muestra, en control dimensional
- fisuras

Los principios básicos fundamentales de los métodos de ensayo por corrientes de Foucault fueron desarrollados siguiendo dos caminos:

a) Aquellos problemas con posibilidades de ser tratados mediante análisis matemáticos fueron resueltos cuantitativamente sobre las bases de hipótesis razonables referentes a la forma de la muestra y a las propiedades del material de la misma.

b) Aquellos otros en los cuales no es posible encontrar una solución matemática exacta debido a las condiciones de contorno fueron resueltos aplicando las leyes de similitud, las cuales permiten obtener información cuantitativa por medio de mediciones sobre modelos. Estos modelos pueden ser aplicados a muestras de dimensiones, conductividad y permeabilidad magnética dadas.

Al primer grupo pertenecen los siguientes casos:

- Solenoide rodeando:
 - a) barras cilíndricas
 - b) tubos
 - c) esferas
 - d) elipsoides de revolución

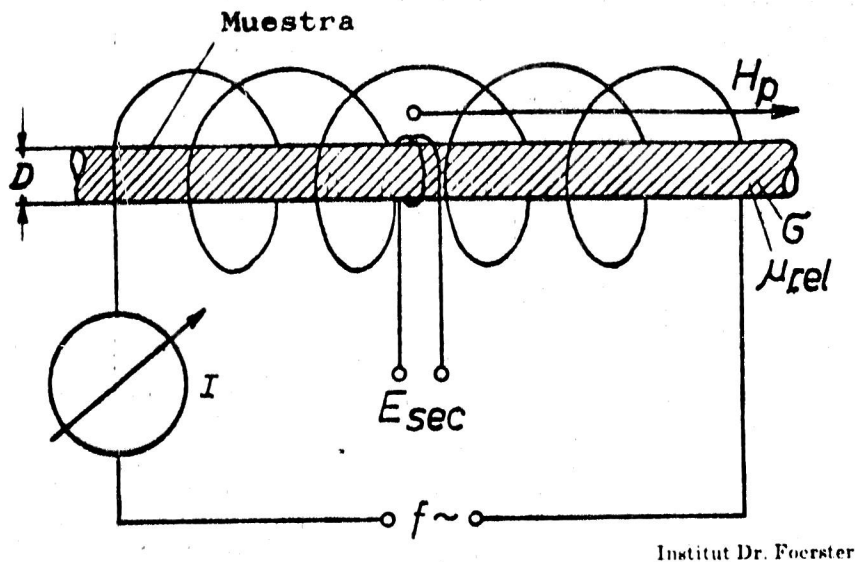
- Solenoide interior en tubos
- Palpador en placas metálicas delgadas

Al segundo grupo pertenecen:

- Cilindros o tubos con fisuras, poros u otras discontinuidades de cualquier forma y tamaño
- Excentricidad de tubos
- Esferas con fisuras
- Placas delgadas metálicas con variaciones de conductividad eléctrica, espesor y distancia palpador-muestra

3.- SOLENOIDE RODEANDO UNA MUESTRA CILINDRICA:

Si se introduce una muestra conductora ($\sigma \neq 0$) de gran longitud y de diámetro D en el interior de un solenoide formado por dos bobinas concéntricas, una exterior o bobina primaria, alimentada con corriente alterna de frecuencia f y una interior o bobina secundaria de diámetro D_s y N es-



Institut Dr. Foerster

- Fig. 3.1 -

piras, conectada a los bornes de un medidor de voltaje, la corriente que circula por la bobina primaria genera un campo magnético H_p , el cual induce una corriente eléctrica en el secundario.

La tensión en los bornes de la bobina secundaria sin muestra es:

$$E_0 = 2\pi f N \frac{(\pi D_s^2)}{4} H_p \cdot 10^{-8} \text{ Volt} \quad (3.1)$$

suponiendo H_p uniforme en toda la sección.

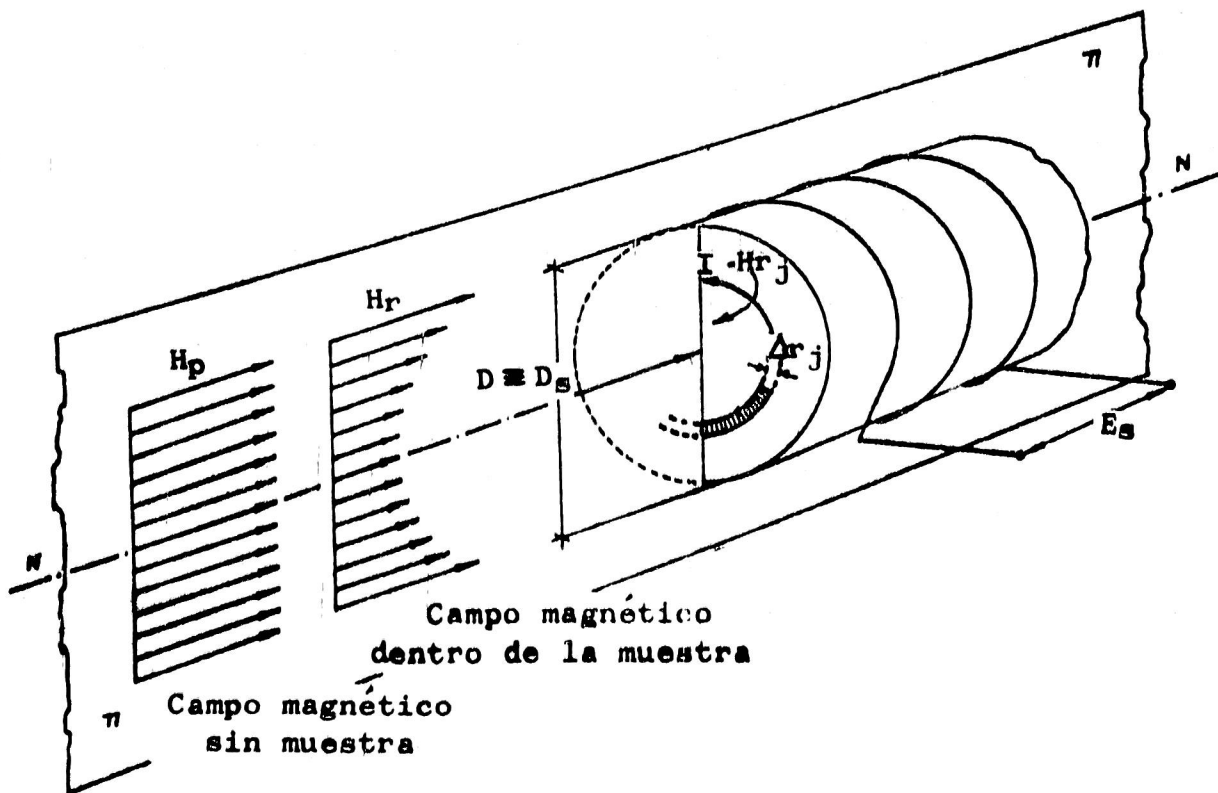
Al introducir la muestra en el solenoide, el campo magnético H_p induce corrientes circulares en la misma, las cuales dan lugar a su vez a un campo magnético H_s opuesto al H_p , por lo cual se debilita la intensidad de éste y disminuye, en consecuencia, la tensión en los bornes del secundario.

Debido a que la intensidad y distribución de las corrientes inducidas en la muestra dependen de las propiedades del material y de sus dimensiones, se puede obtener información de ellas a partir del análisis del voltaje en la bobina secundaria (E_s).

Para simplificar el cálculo matemático de dicho voltaje, se establecen las siguientes hipótesis:

- 1) La longitud de la muestra es lo suficientemente grande para evitar los efectos de borde.
- 2) El diámetro de la muestra D es constante a lo largo de toda su longitud y es igual al diámetro interno de la bobina secundaria.
- 3) La conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética relativa de la muestra son constantes en todo el volumen y para los distintos estados de magnetización (por lo tanto el material deberá ser no-ferrromagnético $\mu_r = 1$, ó en caso contrario deberá ser levemente magnetizado o llevado a saturación magnética, superponiendo un fuerte campo magnético continuo al campo alterno).
- 4) El campo magnético es sinusoidal, operándose a una frecuencia única. No se consideran armónicos y el solenoide se caracteriza por la impedancia, similar a la de los circuitos lineales de corriente alterna sinusoidal.
- 5) Los efectos de histéresis se consideran despreciables frente a los efectos producidos por las corrientes inducidas.

Bajo estas condiciones el campo magnético dentro de la muestra no es uniforme, ya que disminuye su intensidad hacia el centro y sufre un desplazamiento de fase φ que es máximo en el centro



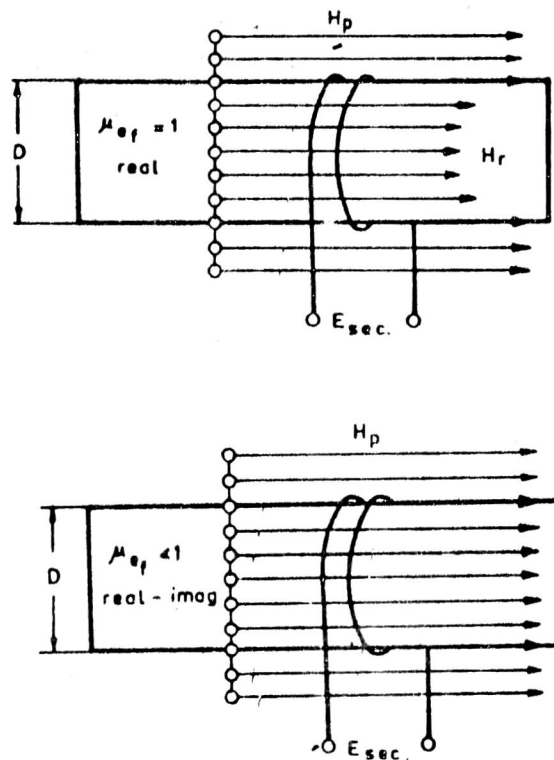
- Fig. 3.2 -

Tomando infinitos elementos j de sección A_j , en cada uno de ellos H_{rj} tendrá un valor distinto en magnitud y fase respecto de los otros. El voltaje en bornes del secundario será:

$$E_s = 2\pi f N \mu_r \cdot 10^{-8} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} H_{rj} \cdot A_j \quad (3.2)$$

donde: μ_r es la permeabilidad magnética de la muestra.

Para evitar complicaciones en el cálculo de esta expresión, donde se debería introducir la variación de fase entre las intensidades máximas de los respectivos campos H_{rj} , se supone que el campo magnético H_p se mantiene uniforme y constante en toda la sección de la muestra. Para ello se introduce el concepto de permeabilidad magnética efectiva μ_{ef} como parámetro ficticio asignado a la muestra, permaneciendo constante en toda la sección y siendo un número complejo con una magnitud inferior a la unidad.



- Fig. 3.3 -

Suponiendo constante la intensidad de campo magnético H_p y multiplicando por la constante ficticia del material μ_{ef} , se llega a la siguiente expresión del voltaje en el secundario:

$$E_s = 2\pi f N \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot H_p \cdot \mu_r \cdot \mu_{ef} \cdot 10^{-8} \text{ Volt} \quad (3.3)$$

e bien:

$$R_s = E_0 \cdot \mu_r \cdot \mu_{ef} \text{ Volt} \quad (3.4)$$

Resumiendo: La permeabilidad magnética efectiva μ_{ef} es un número complejo, de magnitud menor que la unidad, constante en toda la sección de la muestra y dependiente del material de la misma.

3.1.- Determinación de la permeabilidad magnética efectiva:

En los ensayos de piezas de geometría simple, el valor de μ_{ef} puede calcularse mediante extensos desarrollos matemáticos. En geometrías más complejas, para su determinación debe recurrirse a la experimentación con modelos y al auxilio de las leyes de similitud que se verán más adelante.

3.1.1.- El diámetro de la muestra es igual al de la bobina:

En el caso particular de una muestra cilíndrica de material uniforme que llena totalmente al solenoide, el cálculo de la permeabilidad magnética efectiva se realiza aplicando las funciones de Bessel, de las que interesa solamente su argumento Λ . Del desarrollo matemático que justifica esta consideración y las expresiones siguientes surge que:

$$\mu_{ef} = F(\Lambda)$$

siendo:

$$\Lambda = \frac{f \cdot \mu_r \cdot \sigma \cdot D^2}{5066} \quad (3.5)$$

y por lo tanto.

$$\mu_{ef} = F\left(\frac{f \cdot \mu_r \cdot \sigma \cdot D^2}{5066}\right) \quad (3.6)$$

donde:

f = frecuencia de ensayo en ciclos por segundo

r = permeabilidad magnética relativa de la muestra

σ = conductividad eléctrica de la muestra ($n/\Omega \text{ cm}^2$)

D = diámetro de la muestra en cm

Cuando la frecuencia de ensayo es tal que resulta $\Lambda = 1$ se la denomina frecuencia característica o límite f_g

$$f_g = \frac{5066}{\mu_r \cdot \sigma \cdot D^2} \quad (3.7)$$

Despejando f de (3.5):

$$f = A \cdot \frac{5066}{\mu_r \cdot G \cdot D^2} \quad (3.8)$$

Relacionando (3.7) y (3.8), se obtiene que:

$$A = f/f_g$$

es decir que:

$$\mu_{er} = F (f/f_g) \quad (3.9)$$

que indica que la permeabilidad magnética efectiva se puede obtener en función de una simple relación de frecuencias.

En la tabla 3.I , y de acuerdo con la expresión (3.9), se dan los valores de las componentes real e imaginaria de μ_{er} para distintos valores de la relación f/f_g en el caso de muestras cilíndricas.

f/f_g	$\mu_{er}(\text{real})$	$\mu_{er}(\text{imag.})$
0.00	1.0000	0.0000
0.25	0.9989	0.0311
0.50	0.9948	0.06202
1	0.9798	0.1216
2	0.9264	0.2234
3	0.8525	0.2983
4	0.7738	0.3449
5	0.6992	0.3689
6	0.6360	0.3770
7	0.5807	0.3757
8	0.5361	0.3692
9	0.4990	0.3599
10	0.4678	0.3494
12	0.4262	0.3284
15	0.3701	0.3004
20	0.3180	0.2657
50	0.2007	0.1795
100	0.1416	0.1313
150	0.1156	0.1087
200	0.1001	0.09497
400	0.07073	0.06822
1.000	0.04472	0.04372
10.000	0.01414	0.01404

Institut Dr. Foerster

- Tabla 3.1 -

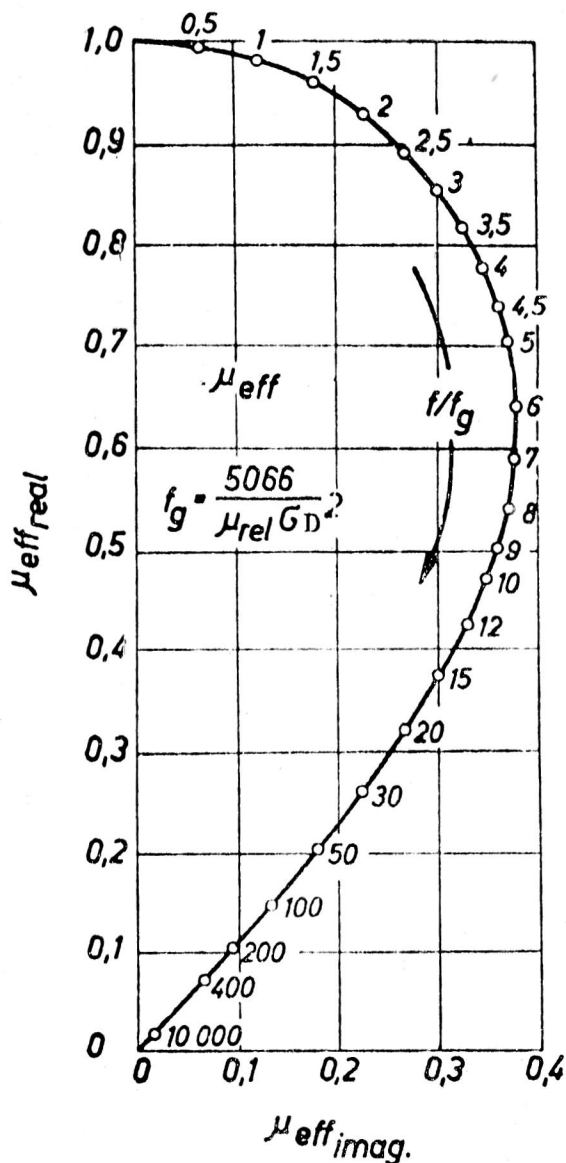
Llevando los valores de esta tabla a un sistema de coordenadas, se obtiene la curva representativa, en el plano complejo, de la variación de la permeabilidad magnética efectiva con la relación de frecuencias f/f_g (fig 3.4)

La información contenida en este gráfico, o lo que es lo mismo en la tabla 3.I, es fundamental y de aplicación general para todos los ensayos sobre muestras cilíndricas.

Una vez conocida la permeabilidad magnética efectiva, el voltaje en el secundario se obtiene de las ecuaciones:

$$E_{sR} = E_0 \cdot \mu_r \cdot \mu_{efI} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot N \frac{\pi \cdot D_s^2}{4} H_p \cdot \mu_r \cdot \mu_{efI} \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

$$E_{sI} = E_0 \cdot \mu_r \cdot \mu_{efR} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot N \frac{\pi \cdot D_s^2}{4} H_p \cdot \mu_r \cdot \mu_{efR} \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$



Institut Dr. Foerster

- Fig. 3.4 -

En resumen, para el cálculo de ambas componentes de E_s , aplicando μ_{ef} , los pasos a seguir son los siguientes:

- 1º) Determinar f_g a partir de los valores de σ , μ_r y D del material de la muestra
- 2º) De acuerdo con la frecuencia de ensayo, determinar la rela-

ción f/f_g

3º) Ubicar el punto f/f_g sobre el plano complejo de μ_{ef} de la figura (5.6) determinando μ_{efR} y μ_{efI} .

4º) Calcular: $E_{sR} = \mu_{efI} \cdot E_0$

$$E_{sI} = \mu_{efR} \cdot E_0$$

de donde se obtiene:

$$E_s = \sqrt{E_{sR}^2 + E_{sI}^2}$$

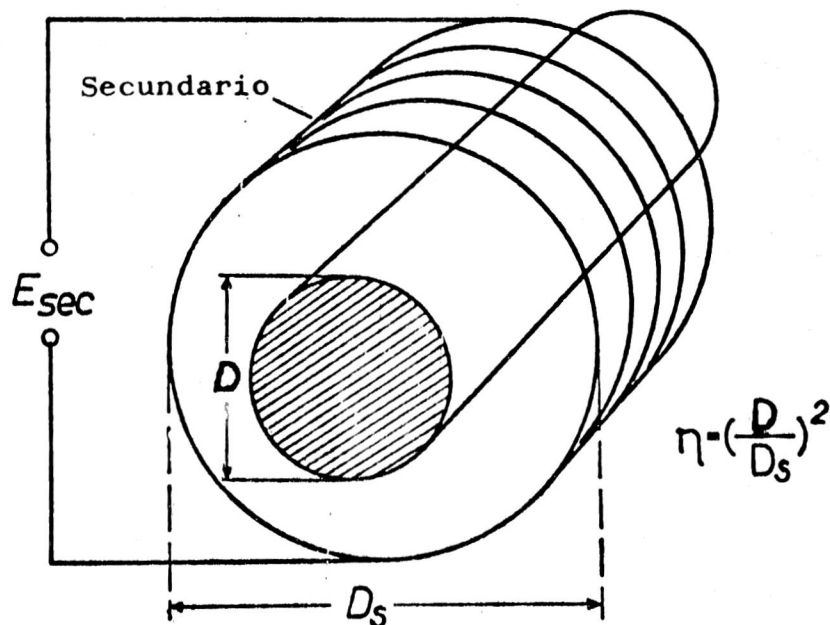
3.1.2.- El diámetro de la muestra es menor que el de la bobina:

En el

caso de que el diámetro D_s del secundario sea mayor que el diámetro D de la muestra, parte del flujo magnético circulará por un anillo de aire de sección:

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot (D_s^2 - D^2)$$

cuyas permeabilidades magnéticas son $\mu_r = 1$ y $\mu_{ef} = 1$ (real)



- Fig. 3.5 -

El voltaje en el secundario debido al campo magnético H_p tendrá en este caso dos componentes, una debida al anillo de aire y otra a la muestra. La componente debida al anillo de aire está dada por:

$$E_{s(aire)} = 2\pi \cdot f \cdot N \cdot \pi \cdot \frac{(D_s^2 - D^2)}{4} \cdot H_p \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

y la componente debida a la muestra es:

$$E_s(\text{muestra}) = 2\pi f N \frac{\pi D^2}{4} \cdot \mu_r \cdot \mu_{ef} \cdot H_p \cdot 10^{-8} \quad (3.11)$$

Por lo tanto el voltaje total en el secundario es:

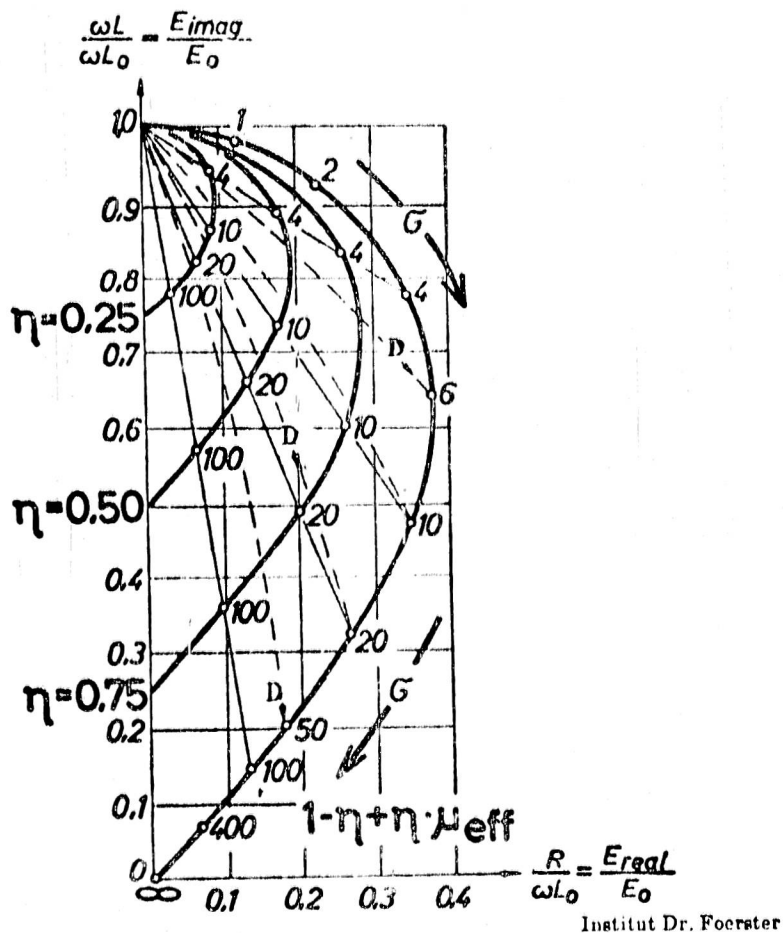
$$E_s = 2\pi f N \frac{\pi D^2}{4} \cdot \left[1 - \left(\frac{D}{D_s}\right)^2 + \left(\frac{D}{D_s}\right)^2 \cdot \mu_r \cdot \mu_{ef} \right] \cdot H_p \cdot 10^{-8} \quad (3.12)$$

La relación:

$$\left(\frac{D}{D_s}\right)^2 = \eta \quad (3.13)$$

se define como factor de llenado y representa la fracción del área del secundario llenada por la muestra. Por lo tanto el voltaje queda expresado como:

$$E_s = E_0 \cdot (1 - \eta + \eta \cdot \mu_r \cdot \mu_{ef}) \quad (3.14)$$



- Fig. 3.6 -

cuyas componentes real e imaginaria vendrán dadas por:

$$E_{sR} = E_0 \cdot (\eta \cdot \mu_r \cdot \mu_{efI}) \quad (3.15)$$

$$E_{sI} = E_0 \cdot (1 - \eta + \eta \cdot \mu_r \cdot \mu_{efR}) \quad (3.16)$$

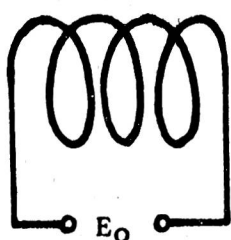
siendo el factor:

$$(1 - \eta + \eta \cdot \mu_r \cdot \mu_{ef}) \quad (3.17)$$

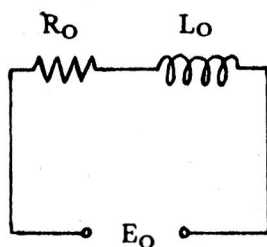
un número complejo que puede ser representado en un plano complejo.

En la figura (3.6) puede verse el diagrama normalizado de impedancias o tensiones para algunos valores particulares del factor de llenado η .

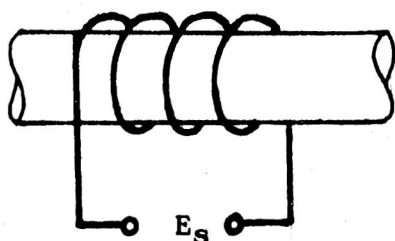
RESUMIENDO:



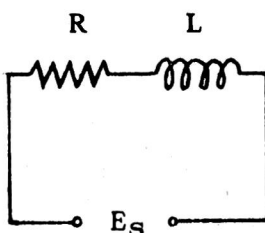
\doteq



$$E_0 = jI\omega L$$



\doteq



$$E_s = I \cdot (R + j\omega L)$$

$$\begin{cases} E_{sR} = I \cdot R \\ E_{sI} = I \cdot \omega \cdot L \end{cases}$$

y de acuerdo a lo visto en las expresiones (3.15) y (3.16):

$\frac{E_{sR}}{E_0} = \frac{R}{\omega L_0} = \eta \cdot \mu_r \cdot \mu_{efI}$	(3.18)
--	--------

$\frac{E_{sI}}{E_0} = \frac{\omega L}{\omega L_0} = 1 - \eta + \eta \cdot \mu_r \cdot \mu_{efR}$	(3.19)
--	--------

De donde se desprende que las curvas de la figura (3.6) se aplican tanto a:

- Componentes normalizadas de tensión secundaria
- Valor normalizado de las componentes de la impedancia

Por su parte, para el caso particular de que $\mu_r = 1$ y $\eta = 1$ tendremos que:

$\frac{E_{sI}}{E_0} = \frac{\omega L}{\omega L_0} = \mu_{efR}$
$\frac{E_{sR}}{E_0} = \frac{R}{\omega L_0} = \mu_{efI}$

por lo que para este caso particular la figura (3.4) que nos dá $\mu_{ef} = F(f/f_g)$ representa las tres formas de valorar los datos de ensayo:

- Plano complejo de permeabilidad magnética efectiva
- Plano complejo de impedancia normalizada
- Plano complejo de tensiones secundarias normalizadas

De acuerdo al tipo de solenoide utilizado trabajaremos en uno de los siguientes planos:

- Solenoide simple \longrightarrow Plano de impedancia
- Solenoide con primario y secundario \longrightarrow Plano de tensiones secundarias

Las ecuaciones dadas en este resumen indican que ambos dispositivos están definidos por las mismas ecuaciones.-

3.2.- Separación de efectos debidos a variaciones de distintos parámetros:

La influencia de la conductividad eléctrica σ , la permeabilidad magnética μ_r y el diámetro D de la muestra pueden ser analizados para el caso de un solenoide que rodea la barra cilíndrica, teniendo en cuenta las hipótesis enunciadas anteriormente (punto 3). Estas propiedades de la muestra influyen sobre el valor de la función característica $(1 - \eta + \eta \cdot \mu_r \cdot \mu_{ef})$ usada en el cálculo de la impedancia o de la tensión sobre la bobina secundaria. Esta función contiene todos los factores básicos que afectan a los ensayos por corrientes inducidas, donde:

- La permeabilidad magnética efectiva μ_{ef} está determinada por f/f_g

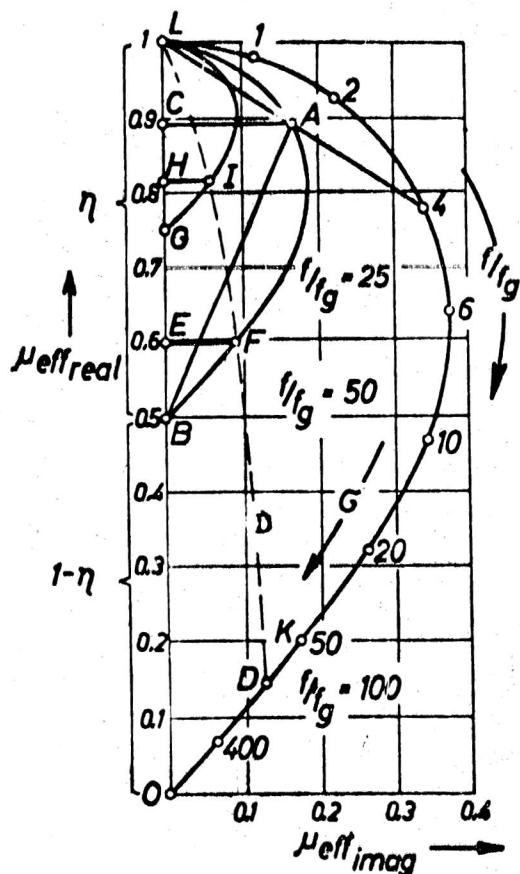
- La frecuencia límite f_g es una función de las propiedades físicas de la muestra, incluyendo la conductividad eléctrica σ , la permeabilidad magnética μ_r y el diámetro D .
- La frecuencia de ensayo f es característica del equipo usado.
- El factor de llenado η es determinado por el diámetro de la muestra D y el diámetro interno del solenoide D_s .

Debido a que la conductividad eléctrica σ aparece solo en el término μ_{ef} de la función característica y que el diámetro de la muestra afecta tanto al μ_{ef} como al factor de llenado η , los efectos producidos por las variaciones de estos parámetros pueden ser diferenciados.

3.2.1.- Muestras no ferromagnéticas.

3.2.1.1.- Separación de los efectos debidos a variaciones de conductividad eléctrica y diámetro de la muestra:

Para mostrar la posibilidad de separar los efectos de variación de conductividad eléctrica y de diámetro, tomaremos como ejemplo el de una barra de aluminio ($\sigma = 35 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$), ($\mu_r = 1$), de diámetro $D = 1,2\text{cm}$ y que llena totalmente al solenoide ($\eta = 1$). La frecuencia límite calculada es $f_g = 100$, y suponiendo que la frecuencia de ensayo es $f = 10 \text{ KHz}$ tendremos una relación $f/f_g = 100$.



- Fig. 3.7 -

Estas condiciones de ensayo nos ubican en el punto D de la figura (3.7), donde el vector \overline{OD} representa la función característica $(1 - \eta + \eta \cdot \mu_r \cdot \mu_{ef})$ que, en este caso, por ser $\eta = 1$ coincidirá con la permeabilidad magnética efectiva correspondiente a estas condiciones de ensayo.

Si suponemos ahora que el diámetro de la barra disminuye desde su valor original a 0,85cm, la relación de frecuencias será $f/f_g = 50$ y el factor de llenado $\eta = 0,5$, desplazando nuestro punto de trabajo desde D hasta el F (figura 3.7). Para calcular las coordenadas del punto F se procede de la siguiente manera:

- se lleva en ordenadas el segmento $\overline{OB} = 1 - \eta = 0,5$ que representa la influencia del anillo de aire.
- a partir de B se lleva el vector \overline{BF} , cuya magnitud viene dada por el producto de η y de μ_{ef} para $f/f_g = 50$. Las componentes de este vector serán:

$$\overline{BE} = \eta \cdot \mu_{efR} = 0,5 \times 0,2 = 0,1$$

$$\overline{BF} = \eta \cdot \mu_{efI} = 0,5 \times 0,18 = 0,09$$

- el vector \overline{OF} representará el parámetro complejo $(1 - \eta + \eta \cdot \mu_{ef})$ para estas condiciones de ensayo.

Se concluye entonces que la reducción del diámetro de la muestra de 1,2 a 0,85cm ha desplazado el voltaje secundario normalizado desde el punto D hasta el F.

Si suponemos ahora que la conductividad eléctrica de la barra se reduce a un nuevo valor $\sigma = 17,5 \text{ cm/mm}^2$, manteniendo el diámetro en su valor original de 1,2cm, la relación de frecuencias variará a $f/f_g = 50$ produciéndose un desplazamiento del punto de operación del D hacia el K.

Se concluye, con este ejemplo, que las variaciones de conductividad eléctrica se presentan en una dirección diferente a la de las variaciones en diámetro en los planos complejos de impedancia o voltaje normalizado, lo que demuestra la posibilidad de discernir entre variaciones de conductividad y dimensionales.-

3.2.2.- Muestras ferromagnéticas:

La permeabilidad magnética relativa de los materiales ferromagnéticos es mucho mayor que la unidad, por lo que sus efectos son totalmente distintos en comparación con los de los no ferromagnéticos.

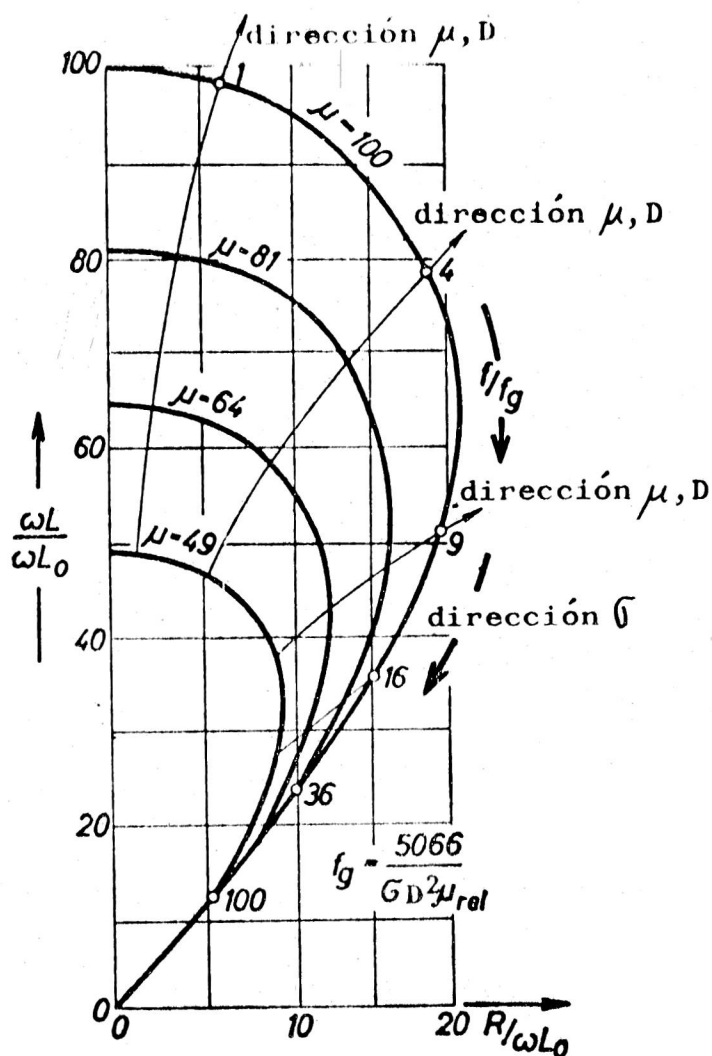
Con el fin de facilitar el estudio de los planos complejos de impedancia o de tensión, en el caso de muestras ferromagnéticas ($\mu_r \gg 1$) conviene simplificar las ecuaciones (3.18) y (3.19) obtenidas para

el caso de muestras no ferromagnéticas ($\mu_r = 1$)

Si el factor de llenado η no es muy pequeño, puede despreciar el término $(1 - \eta)$ frente al $\eta \mu_r \mu_{ef}$ que es mucho mayor, con lo que:

$$\frac{E_{sI}}{E_0} = \frac{\omega L}{\omega L_0} \approx \eta \mu_r \mu_{efR} \quad (3.20)$$

$$\frac{E_{sR}}{E_0} = \frac{R}{\omega L_0} \approx \eta \mu_r \mu_{efI} \quad (3.21)$$



- Fig. 3.8 -

La figura 3.8 muestra el plano complejo de impedancia normalizada para estas expresiones simplificadas, en donde se supuso $\eta = 1$. Estas curvas difieren de las correspondientes a muestras no ferromagnéticas en que los valores de μ_{efR} y μ_{efI} están incrementados por

el factor μ_r .

3.2.2.1.- Efecto de las variaciones de permeabilidad magnética relativa μ_r :

Las componentes real e imaginaria de la permeabilidad magnética efectiva dependen solo de la relación f/f_g

$$\frac{f}{f_g} = \frac{f}{5066} \cdot D^2 \cdot \mu_r$$

En las expresiones (3.20) y (3.21) el factor $\mu_r = \frac{D^2 \cdot \mu_r}{D_s^2}$

incluye el producto del cuadrado del diámetro de la muestra por la permeabilidad magnética relativa, de la misma manera que en la expresión (3.22). Por lo tanto las variaciones debidas a μ_r y D aparecen en la misma dirección en el plano complejo de impedancias (fig. 3.8).

En consecuencia, es imposible distinguir si un cambio en esa dirección es debido a un efecto de permeabilidad magnética relativa o a un efecto dimensional.

3.2.2.2.- Efecto de las variaciones del diámetro D de la muestra:

Co-

mo ya hemos visto, un incremento en el diámetro D de una muestra cilíndrica no ferromagnética da lugar a una disminución de la permeabilidad magnética efectiva μ_{ef} . En cambio, en las muestras ferromagnéticas se obtiene un efecto contrario dentro del margen útil de medición ($0 < f/f_g < 200$), tal como se aprecia en la figura 3.8.

Esto se debe a que el aumento de masa de material ferromagnético dentro del solenoide de ensayo (que aumenta el voltaje del secundario) prevalece sobre el efecto de debilitación del campo producido por las corrientes inducidas (que tienden a reducir el voltaje del secundario).

3.2.2.3.- Efecto de las variaciones de la conductividad eléctrica :

Al igual que en el caso de las muestras no ferromagnéticas, la dirección de variación de la permeabilidad magnética efectiva μ_{ef} debida a cambios en la conductividad eléctrica σ es idéntica a la debida a variaciones de la relación f/f_g . Pero en contraposición con lo que sucedía con las muestras no ferromagnéticas, los cambios en conductividad eléctrica σ se pueden separar mejor de los efectos de variaciones en diámetro D o en permeabi-

lidad relativa μ_r en la zona correspondiente a la mitad superior del plano complejo de impedancia, es decir para relaciones de f/f_g menores de 15.

3.2.2.4.- Efecto de la histéresis magnética:

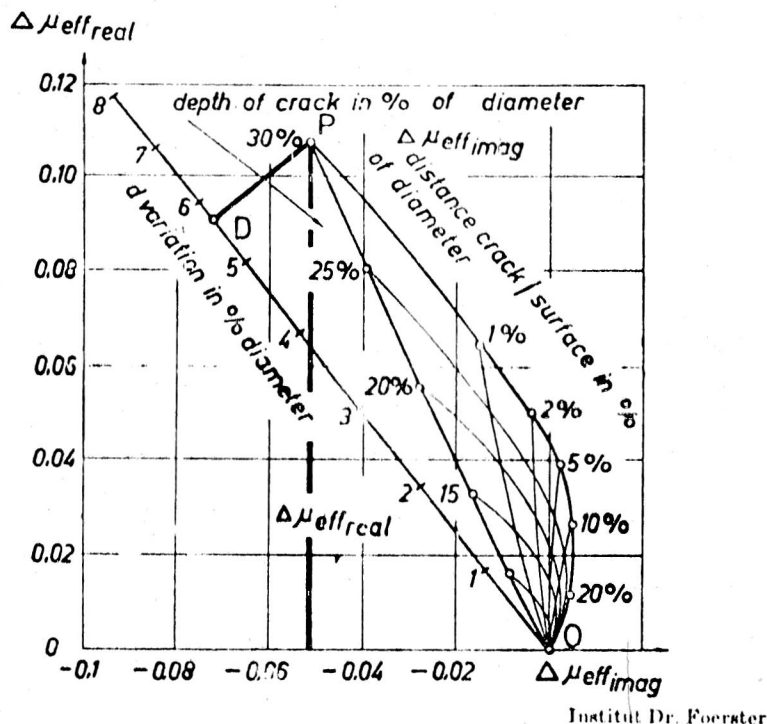
Los efectos debidos a histéresis magnética se suman a la componente horizontal o real del plano complejo de impedancia de la figura 3.8 , es decir en la dirección de $\mu_{of I}$. Sin embargo, esta componente es siempre muy pequeña en comparación con la componente debida a las corrientes inducidas y por lo tanto puede ser despreciada.

3.3.- Detección de fisuras:

Los efectos producidos en el plano complejo de impedancia o de voltaje debidos a la presencia de fisuras o de discontinuidades, dependen de la morfología, situación, orientación y profundidad de las mismas. Para su análisis tendremos en cuenta dos casos, de acuerdo al tipo de material a ensayar.

3.3.1.- Materiales no ferromagnéticos:

En la figura 3.9 se representan las variaciones de permeabilidad magnética efectiva producidas por la presencia de fisuras superficiales y subsuperficiales de diferentes profundidades y a distintas distancias de la superficie, para barras no ferromagnéticas.

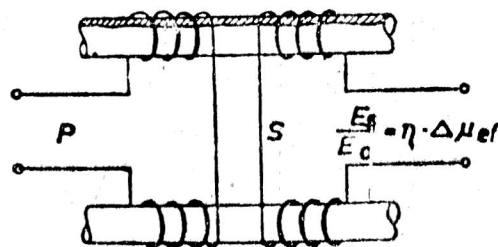


- Fig. 3.9 -

Si el equipo de ensayo opera por control diferencial mediante un par de solenoides como los indicados en la figura 3.10, el voltaje diferencial del secundario debido a las variaciones de permeabilidad magnética efectiva producidas por la presencia de una fisura, vendrá dado por:

$$\frac{E_{sI}}{E_o} = \frac{\Delta \omega L}{\omega L_o} = \eta \cdot \Delta \mu_{efR} \quad (3.22)$$

$$\frac{E_{sR}}{E_o} = \frac{\Delta R}{\omega L_o} = \eta \cdot \Delta \mu_{efI} \quad (3.23)$$



Institut Dr. Foerster

- Fig. 3.10 -

El punto 0 de la figura 3.9 corresponde al caso de una muestra cilíndrica no ferromagnética sin fisura, para una relación $f/f_g = 5$. En consecuencia, esta figura representa la zona próxima a $f/f_g = 5$ de la figura 3.4 pero a una escala considerablemente mayor. La figura 3.9 permite determinar directamente la tensión diferencial correspondiente a fisuras superficiales o subsuperficiales con profundidades y posiciones específicas.

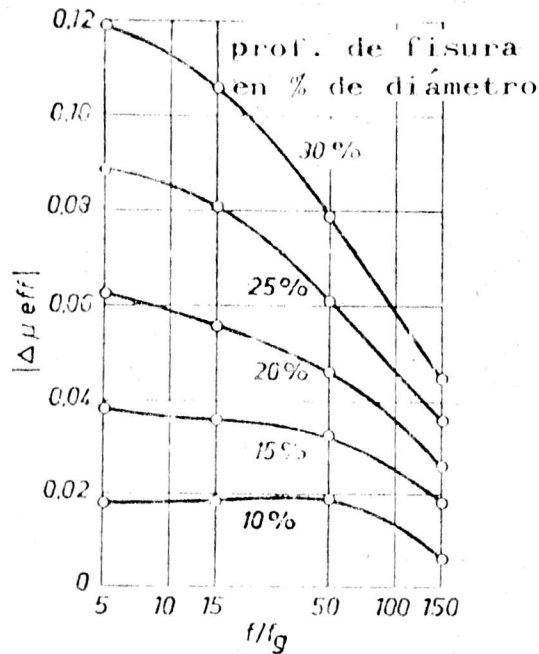
Igualmente, esta figura representa la variación de permeabilidad magnética efectiva en función de la variación del diámetro D de la muestra. Para eliminar el efecto de interferencia debido a variaciones de diámetro, conviene limitar las indicaciones del ensayo a solo aquellas que sean perpendiculares a la dirección de dichas variaciones. Así, por ejemplo, el vector \overline{PD} de la figura 3.9 representa el cambio de permeabilidad magnética efectiva o de impedancia en la dirección perpendicular a la de las variaciones de diámetro, para una fisura de un 30% de profundidad.-

La elección de una relación $f/f_g = 5$ es particularmente útil por permitir la detección de fisuras superficiales y subsuperficiales con igual sensibilidad. Esto puede apreciarse en la misma figura, ya que

la distancia entre la recta DO y la curva PO se mantiene constante durante la mayor parte de su extensión.

3.3.1.1.- Selección de la frecuencia para la detección de fisuras superficiales:

En la figura 3.11 se representan los cambios de permeabilidad magnética efectiva $\Delta\mu_{ef}$ debidos a fisuras superficiales en función de la relación de frecuencias f/f_g . Cada curva corresponde a una profundidad de fisura distinta. Por ejemplo, el



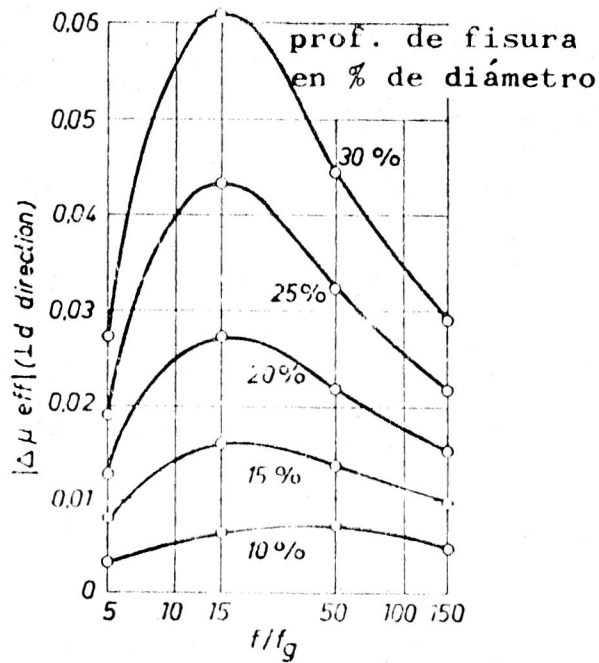
- Fig. 3.11 -

valor de $\Delta\mu_{ef}$ para una fisura de profundidad 30%, con una relación $f/f_g = 5$ corresponde a la distancia OP de la figura 3.9.

Esta familia de curvas se obtuvo partiendo de varios gráficos similares al de la figura 3.9 pero para relaciones $f/f_g = 15, 50$ y 150 .

Por su parte, la figura 3.12 representa la magnitud de las indicaciones debidas a fisuras superficiales, obtenidas con un equipo que suprime la influencia de las variaciones en diámetro D de la muestra. Por lo tanto, este gráfico nos dá solamente la componente de la variación de permeabilidad magnética efectiva perpendicular a la dirección de variaciones en diámetro de la muestra en función de la relación f/f_g , para fisuras de distinta profundidad.

De la figura 3.12 se desprende que para la detección de fisuras superficiales en barras no ferromagnéticas, con independencia de las variaciones del diámetro de la muestra, el margen de frecuencias óptimas de ensayo oscilará en relaciones de f/f_g comprendidas entre



- Fig. 3.12 -

10 y 50.-

3.3.1.2.- Selección de la frecuencia para la detección de fisuras subsuperficiales:

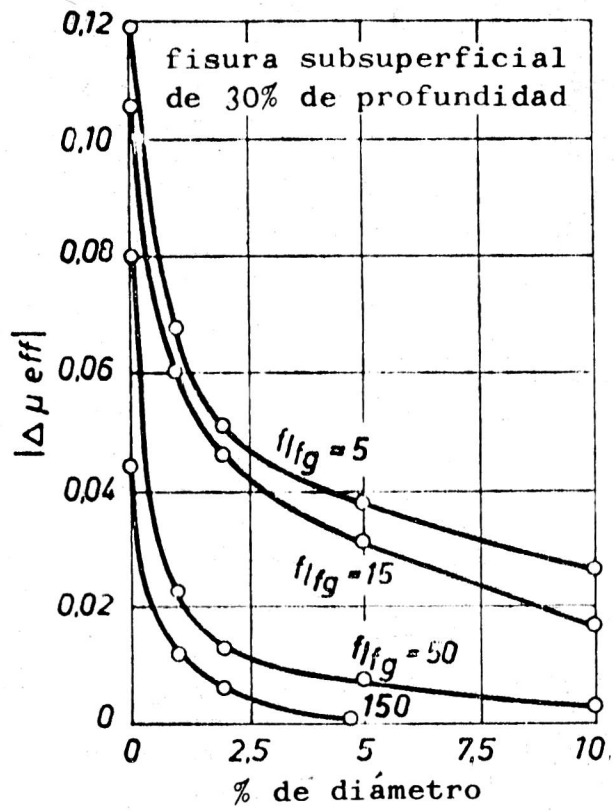
En la figura 3.13 se representan las magnitudes de las variaciones de permeabilidad magnética efectiva debidas a fisuras subsuperficiales, en función de la distancia de la fisura a la superficie, para distintas relaciones f/f_g .

Esta familia de curvas corresponde al caso particular de fisuras de 30% de profundidad. Para otras profundidades de fisuras se pueden obtener familias de curvas similares a ésta.

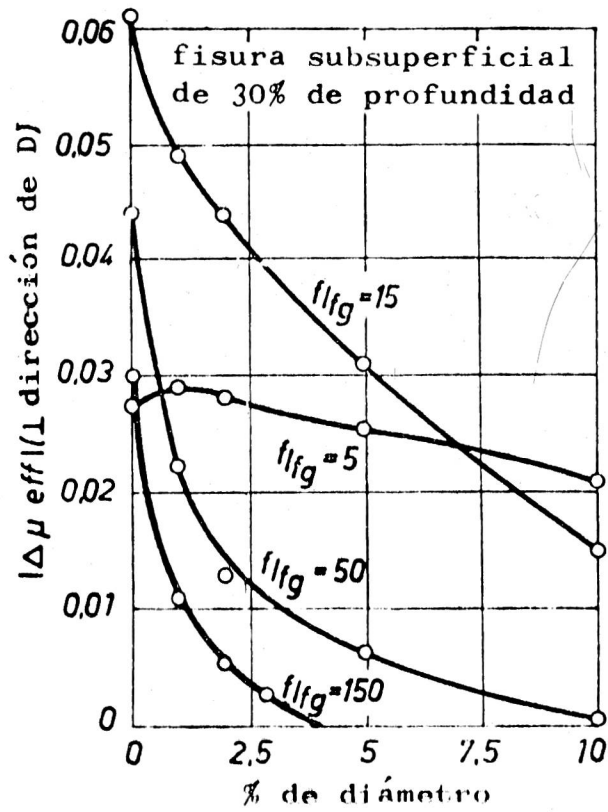
En la figura 3.13 se manifiesta claramente el fuerte decrecimiento en magnitud de las indicaciones debidas a fisuras cuando éstas se alejan de la superficie, particularmente para elevadas relaciones de f/f_g .

Por su parte, la figura 3.14 es análoga a la 3.12 ya que representa solo la componente de $\Delta\mu_{ef}$ perpendicular a la dirección de las variaciones en diámetro de la muestra; es decir que corresponde a las magnitudes de las indicaciones de fisuras subsuperficiales obtenidas con un equipo que suprime la influencia de estas variaciones.

En esta última figura es importante la curva correspondiente a $f/f_g = 5$, pues nos revela que dentro de cierto margen las indicacio-



- Fig. 3.13 -



- Fig. 3.14 -

nes de fisuras subsuperficiales, en un equipo que suprime la influencia de las variaciones en diámetro, son prácticamente independientes de la distancia de la fisura a la superficie de la barra, siempre y cuando esta distancia no sea excesiva. Esta circunstancia favorable de independencia de la indicación de la fisura con la distancia a la superficie, es debida a que las variaciones en la permeabilidad magnética efectiva para fisuras subsuperficiales son el resultado de rotaciones de fase en el plano complejo de impedancia (figura 3.9) hacia una dirección perpendicular a la de variaciones del diámetro de la muestra. De este modo, la componente de $\Delta\mu_{ef}$ perpendicular a la dirección de variaciones de diámetro se mantiene prácticamente constante cuando aumenta la distancia de la fisura a la superficie de la muestra, mientras que la magnitud total de $\Delta\mu_{ef}$ decrece considerablemente, tal como puede apreciarse en la figura 3.9.

Como consecuencia de la observación de las figuras 3.13 y 3.14 se desprende que las frecuencias óptimas de ensayo para detección de fisuras subsuperficiales son aquellas que corresponden a relaciones f/f_g comprendidas entre 4 y 20.

3.3.2.- Materiales ferromagnéticos:

En los ensayos para la detección de fisuras superficiales en materiales ferromagnéticos (por ejemplo en aceros), la dirección común de los cambios de diámetro y permeabilidad magnética relativa forma un ángulo grande con la dirección de cambios producidos por fisuras en la zona superior del plano complejo de impedancia, dentro del rango de f/f_g comprendido entre 0 y 10 (ver figura 3.8). En esta zona se puede establecer una clara diferenciación entre los efectos debidos a variaciones de diámetro y permeabilidad magnética relativa y las indicaciones correspondientes a fisuras superficiales.

Para el análisis de fisuras en materiales ferromagnéticos se pueden utilizar los mismos métodos que se emplearon en el caso de barras no ferromagnéticas, al menos en lo que respecta a la magnitud de la variación de permeabilidad magnética efectiva (figuras 3.9 y 3.11)

Pero en este caso, para el cálculo de la tensión diferencial bastará con multiplicar las ecuaciones 3.22 y 3.23 por la permeabilidad magnética relativa μ_r correspondiente a la muestra ferromagnética, es decir que:

$$\frac{E_s I}{E_0} = \frac{\Delta \omega L}{\omega L_0} = \eta / \mu_r \cdot \Delta \mu_{efR} \quad (3.24)$$

$$\frac{E_{sR}}{E_0} = \frac{\Delta R}{\omega L_0} = \eta \cdot \mu_r \Delta \mu_{efI} \quad (3.25)$$

Estas ecuaciones son válidas siempre que se prescinda de los armónicos provocados por los efectos de histéresis magnética de la muestra.

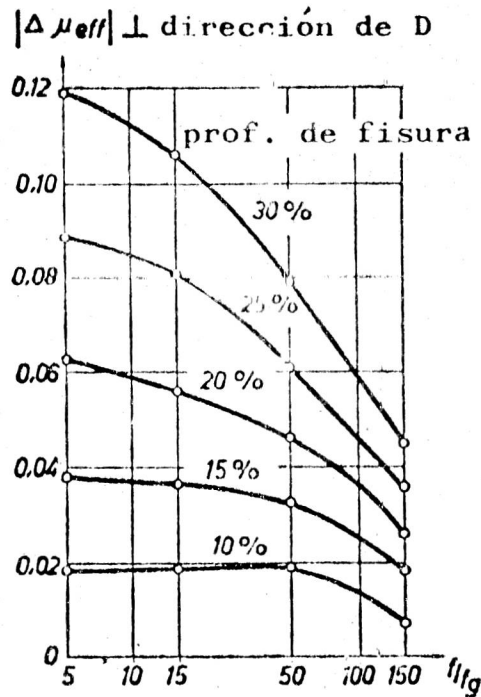
Por ejemplo, si la permeabilidad magnética relativa de una muestra ferromagnética es $\mu_r = 100$, la tensión diferencial debida a la presencia de una fisura específica (morfología, posición y profundidad dadas) será cien veces mayor que para una muestra no ferromagnética, siempre que ambos ensayos se realicen a la misma relación de frecuencias f/f_g .

3.3.2.1.- Supresión del efecto de variaciones en el diámetro de la muestra. Selección de la frecuencia para la detección de fisuras:

Como ya se ha visto, la dirección de las variaciones de diámetro, en el plano complejo de impedancias, es totalmente diferente en el caso de muestras ferromagnéticas que en el caso de muestras no ferromagnéticas. También se vió que, en contraste con el caso de materiales no ferromagnéticos, las direcciones de los efectos de variación en diámetro y de presencia de fisuras en muestras ferromagnéticas forman un gran ángulo entre sí, en los planos complejos de impedancia y de tensión, para bajas relaciones de frecuencia f/f_g .

En la figura 3.15 se muestran los cambios de la componente de la variación de la permeabilidad magnética efectiva $\Delta \mu_{ef}$ perpendicular a la dirección de las variaciones en diámetro, debidos a la presencia de fisuras superficiales de distintas profundidades, en función de la relación de frecuencia f/f_g , para el caso de muestras cilíndricas ferromagnéticas.

Comparando esta figura con la 3.12 correspondiente a muestras no ferromagnéticas, se observa que, así como en el caso anterior el margen de frecuencias óptimas de ensayo venía dado para relaciones de f/f_g comprendidas entre 10 y 50, en el caso de materiales ferromagnéticos este margen vendrá dado para relaciones de f/f_g menores que 10. Más aún, para relaciones $f/f_g < 10$ los efectos debidos a variación en diámetro y en permeabilidad magnética relativa tienen la misma dirección, y además perpendicular a la dirección de variaciones producidas por la presencia de fisuras. De este modo, los dos



- Fig. 3.15 -

efectos podrán ser separados o suprimidos simultáneamente de las indicaciones de fisuras.

3.4.- Zonas de los planos complejos con máximo poder de resolución:

En forma resu-

mida repasaremos cuales son las zonas, en los planos complejos de impedancia o de tensión normalizados, con máximo poder de resolución, para el caso analizado de un solenoide rodeando una muestra cilíndrica ferromagnética o no ferromagnética.

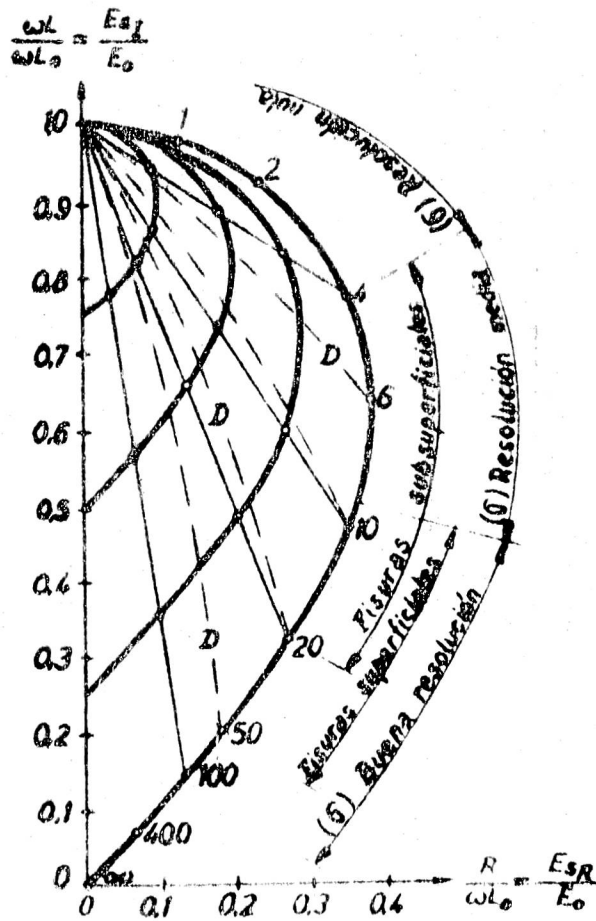
Durante este capítulo se ha puesto de manifiesto que, en determinadas zonas de estos planos complejos, los efectos de las variaciones de la conductividad eléctrica $\bar{\sigma}$, el diámetro D, la permeabilidad magnética relativa μ_r (en el caso de barras ferromagnéticas) y la presencia de fisuras se presentan con ángulos de fase distintos.

3.4.1.- Muestras no ferromagnéticas:

- La máxima diferencia de fase entre las variaciones de impedancia o de tensión debidas a cambios de conductividad eléctrica $\bar{\sigma}$ y de diámetro D ocurre en la zona inferior del plano complejo, (figura 3.16), manteniéndose esta diferencia de fase prácticamente constante para relaciones de frecuencia f/f_g :

$$9 \leq f/f_g \leq 100 \quad \text{buena resolución}$$

teniéndose entonces en esta zona la mejor resolución. En consecuer-



- Fig. 3.16 -

cia, para la detección de variaciones de conductividad eléctrica σ con independencia de las variaciones del diámetro de la muestra, las frecuencias óptimas de ensayo deberán ser, en principio, medias o elevadas. Para relaciones de f/f_g inferiores, se tendrá:

$$4 \leq f/f_g \leq 9 \quad \text{resolución media}$$

$$0 \leq f/f_g \leq 4 \quad \text{resolución nula}$$

- En cuanto a la detección de fisuras superficiales con independencia de las variaciones de diámetro de la muestra, el margen de frecuencias óptimas de ensayo está dado para relaciones f/f_g ;

$$10 \leq f/f_g \leq 50 \quad (\text{frecuencias medias o elevadas})$$

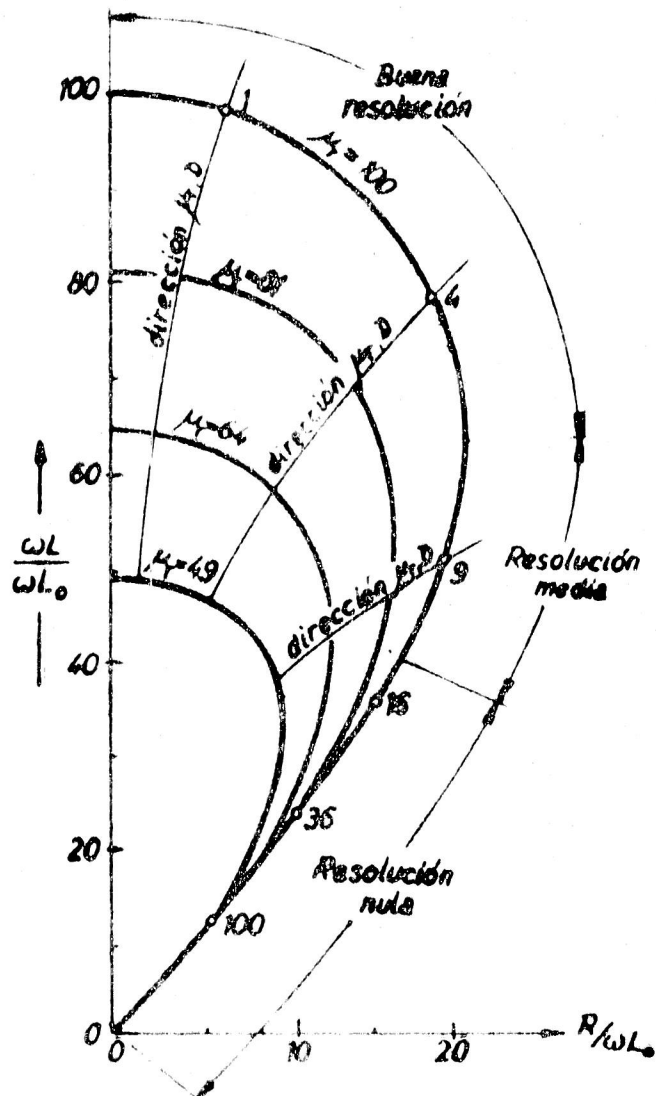
En el caso de fisuras subsuperficiales con independencia de las variaciones de diámetro de la muestra, las frecuencias óptimas de ensayo corresponden a relaciones de frecuencia:

$$4 \leq f/f_g \leq 20 \quad (\text{frecuencias medias})$$

La relación de frecuencias $f/f_g = 5$ es particularmente interesante ya que, dentro de este margen, las indicaciones de fisuras subsuperficiales son prácticamente independientes de la distancia de la fisura a la superficie de la muestra cilíndrica, lo que permite la detección de fisuras superficiales y subsuperficiales con la misma sensibilidad.

Dada la correlación entre las variaciones de permeabilidad magnética efectiva μ_{ef} y la profundidad de las fisuras (superficiales o subsuperficiales), y la proporcionalidad de aquella con la tensión diferencial secundaria, se podrá establecer una correlación entre las lecturas en el equipo y la profundidad de las grietas.

3.4.2.- Muestras ferromagnéticas:



- Fig. 3.17 -

- En las muestras no ferromagnéticas, el incremento en el diámetro de la misma dá lugar a una disminución de la permeabilidad magnética efectiva. En las muestras ferromagnéticas se obtiene, en cam-

bio, un efecto contrario. En consecuencia, los cambios en conductividad eléctrica σ se pueden separar mejor de los cambios en diámetro D o en permeabilidad magnética relativa μ_r (estos últimos tienen igual dirección en el plano complejo de impedancias), en la zona correspondiente a la mitad superior del plano complejo, es decir, para relaciones de frecuencia f/f_g comprendidas entre 0 y 15. Dentro de este margen de frecuencias se pueden distinguir las siguientes zonas:

$0 \leq f/f_g \leq 6$	buena resolución
$6 \leq f/f_g \leq 15$	resolución media
$f/f_g > 15$	resolución prácticamente nula

habiéndose indicado en la figura 3.17 las áreas correspondientes a estas tres zonas para distintos valores de permeabilidad magnética relativa μ_r . De todo esto se deduce que las frecuencias óptimas de ensayo en el caso de muestras cilíndricas ferromagnéticas deberán ser, en principio, bajas.

- Así como en el caso de muestras no ferromagnéticas el margen de frecuencias óptimas de ensayo para la detección de fisuras superficiales venía dado para relaciones de frecuencia f/f_g comprendidas entre 10 y 50, en el caso de muestras ferromagnéticas el margen de frecuencias óptimas corresponde a relaciones de f/f_g :

$$0 \leq f/f_g \leq 10$$

es decir que la frecuencia óptima de ensayo será en principio, baja.