

---

PROFUNDIDAD DE FISURAS Y MEDICION DE ESPESORES EN  
CHAPAS FINAS POR EL METODO DE CORRIENTE CONTINUA

---

Argentino I. Galarreta

---

Serie II, n° 122

---

## ANTECEDENTES

---

Muchas veces la indeterminación que presentan ciertos defectos, como en el caso de la profundidad en fisuras, plantean una serie de dificultades que han movido a indagar con métodos particulares de ensayos, la posibilidad de eliminar esa indeterminación, solucionando problemas que en el campo de la industria resultan beneficiosos, pues a la par que dan más información sobre los mismos, pueden en muchos casos, cuando son determinados y si llegan a ser despreciables, ser eliminados y dar lugar a la recuperación de muchas piezas con la consiguiente economía.

Asimismo la medición de espesores desde una sola cara trae aparejada la ventaja de evitar en piezas o elementos metálicos terminados su destrucción, para comprobar condiciones de espesor en paredes ya establecidas y que ne cesitan su confirmación.

El presente trabajo tiene la intención de cubrir esas necesidades que periódicamente se les plantean a industriales, tanto productores como usuarios, públicos o privados, y que hacen asiduas consultas sobre el particular a nuestro Laboratorio.

---

## PRINCIPIOS DEL METODO

---

En cualquier elemento metálico conductor, de resistividad  $\rho$  (ohm-cm), al ser atravesado por una corriente eléctrica de I amperes entre dos electrodos se establece u na diferencia de potencial V producida entre otros dos electrodos que responderá a

$$V = I \cdot k \cdot \rho$$

donde k es función de la distancia entre electrodos y la geometría de dicho elemento. Cualquier modificación producida en el mismo, manteniendo constante la distancia entre electrodos, ha de incidir en la relación V/I que se podrá determinar. Podemos expresar esto de otra manera, entre dos electrodos de contacto, unidos a una fuente de corrienu

te continúa puestos en contacto con una superficie limpia de un elemento metálico conductor, se produce un flujo de corriente de un electrodo hacia el otro, que se distribuirá en el mismo de una forma que dependerá únicamente de la conductibilidad y del espesor del metal.

En la figura N° 1 se representa al elemento metálico grueso conductor y la distribución del flujo de corriente aplicando entre A y B una fuente de corriente continua. Las líneas negras representan el flujo de corriente y las punteadas las líneas equipotenciales. Al establecerse la corriente entre A y B, los puntos de interferencia de las líneas de flujo y de las líneas equipotenciales pueden considerarse como graduaciones de la diferencia de potencial entre A y B. Consecuentemente colocando dos electrodos conectados a un galvanómetro, su lectura nos dará, la medida de la diferencia o caída de potencial entre los mismos cuando se establece la corriente entre A y B.

La separación de los electrodos del galvanómetro en relación a los de corriente, será tal, que no influya en la medida cualquier caída de potencial debido a algún contacto defectuoso de los electrodos de corriente. La separación de los electrodos de medida de diferencia de potencial estará en función de su aplicación, considerándose que para la determinación de profundidad de fisuras es preferible espacios pequeños, no mayor de 1/4 de pulgada y distancias iguales entre los electrodos de corriente y de medida. Para la medición de espesores son preferibles distancias no iguales y espacios mayores entre los electrodos de medida, aunque esta consideración estará en función del cabezal de prueba para chapas finas.

En éstas la distribución de las líneas de flujo se efectúa como lo indica la figura N° 2.

Suponiendo las mismas características del cabezal de prueba que para los ensayos con elementos metálicos gruesos como la indicada en la figura 1, en las chapas finas se suma a la limitación de las líneas de flujo, el hecho de que las líneas equipotenciales se cierran más, lo que hace que para un mismo material y para un determinado valor de corriente, será mayor la caída de potencial en -

tre los electrodos colocados en la chapa fina, que en el elemento metálico de mayor espesor.

---

#### CONDICIONES DE ENSAYO

---

Tanto para la determinación de profundidad de fisuras, como para la medición de espesores, es condición principal que los materiales bajo ensayo posean una resistividad eléctrica isotrópica y homogénea, condición que generalmente cumplen casi todos los materiales metálicos, lo que facilita las operaciones de medida ya que esta propiedad es la única que entra en las mediciones, lo que simplifica la interpretación de los resultados.

La segunda condición de importancia es la preparación de la superficie sobre la que se aplicará el método de medición. Las superficies de terminado maquinado no necesitarán preparación previa y la medición puede hacerse en forma inmediata. No así las que presenten signos de oxidación, la que tendrá que ser eliminada previamente. Las superficies en las cuales la incidencia de un proceso de corrosión sea tal que no se pueda eliminar por simple limpieza o en superficies rugosas, es conveniente hacer una marca recta en donde los electrodos puedan ser colocados y proceder a la medición respectiva.

---

#### EQUIPO DE ENSAYO

---

El equipo para la determinación de profundidad de fisuras o para la medición de espesores de chapas finas, que usamos en nuestra experiencia, se muestra en la figura N° 6.

El esquema del circuito corresponde a la figura N° 4.

El cabezal de prueba y su esquema se muestran en la figura N° 5.

El contacto con el metal se hace a través del cabezal, que consta de cuatro puntas (electrodos) montados linealmente sobre un material aislante, en nuestro caso, lucite. Los electrodos están forzados por resortes que aseguran el buen contacto e inclusive sirven para el buen apoyo cuando se trata de superficies curvas.

Los electrodos fueron contruídos de acero tratado térmicamente para endurecerlos (como herramientas de fresadora) y matener su punta aguda.

La separación entre electrodos en nuestro cabezal se fijó en cuatro milímetros de distancia entre los mismos y en forma igual entre las cuatro puntas.

El circuito eléctrico fue alimentado por un acumulador de: 6 Volts, 120 amperes. La corriente fue controlada por una resistencia variable y leída en un amperímetro de alcance: 30 A. a plena escala. La corriente con la cual trabajamos en nuestra experiencia fue fijada en 10 amperes.

El potencial en el circuito potenciométrico fue medido por la deflección de un galvanómetro a bobina móvil sistema D'ansorval.

---

#### MEDICION DE PROFUNDIDAD DE FISURAS

---

El método de corriente continua, en cuanto a los principios enunciados precedentemente, puede ser considerado como una extensión en su aplicación para determinar fallas superficiales o internas, ya que cualquier defecto de esa índole puede ser detectado por la variación de la conductibilidad, a la de determinación de la profundidad de ciertos defectos, como fisuras, que se continúan bajo la superficie, relacionando su profundidad y el espesor del material.

El modo más conveniente de aplicar esta técnica es usando un cabezal de prueba con cuatro puntas (electrodos) igualmente separados, colocados en línea, y de detalles constructivos como el mostrado anteriormente. Se conecta la llave del circuito para equilibrar las fuerzas elec -

tromotrices térmicas que se producen entre los electrodos  $P_1$  y  $P_2$  y en cualquier otro punto del circuito ajustando el cero del galvanómetro. Se aplica el cabezal de prueba sobre una parte del material y del mismo espesor donde se quiere medir la profundidad de la fisura, y que se sepa no defectuosa, se hace circular una corriente de  $I$  amp. entre las puntas exteriores obteniéndose en el galvanómetro una cierta deflexión  $\theta_p$ . Se lleva el cabezal de prueba sobre la fisura y se colocan las puntas de tal manera que dos de ellas queden de un lado y dos del otro, tratando que la línea de unión de las puntas (electrodos) formen un ángulo recto con la dirección de la falla, circulando la misma corriente de  $I$  amp. entre los electrodos exteriores se leerá en el galvanómetro otra deflexión  $\theta_x$ , fig. 3.

Con la relación de las deflexiones  $\theta_x/\theta_p$ , se entra en el gráfico hasta encontrar la curva que corresponda a la relación de espesor del material y distancia entre electrodos  $e/a$ , la que nos dará en la ordenada la relación  $D/a$  (profundidad de defecto y distancia entre electrodos), de donde se deduce la medida buscada.

---

#### DETERMINACION DEL GRAFICO

---

Siguiendo a Buchanan y Thurston quienes determinaron un gráfico de una familia de curvas por medio de una cubeta de mercurio como conductor, variando su altura (espesor) para cada curva e introduciendo como fallas, láminas artificiales de material aislante, aplicamos la variante para la determinación de la familia de curvas que necesitábamos preparando varias series de probetas de similar resistividad y dimensiones, que respondieran cada una de las series de probetas a un espesor determinado con fisuras efectuadas de expreso y previamente medidas para obtener cada curva.

Con la relación entre espesor y distancia de puntas  $e/a$ , que nos ubica en la curva que se quiere determinar, medimos la deflexión en el galvanómetro que corresponde a la del espesor de la probeta y medimos la deflec -

ción que corresponde a la serie de defectos previamente medidos, lo que nos da, conocida la relación  $D/a$ , o sea profundidad de defecto y distancia entre electrodos, la serie de puntos necesarios para la construcción de cada curva.

$I = \text{constante} = 10 \text{ amperes}$

Curva  $e/a = 12$

d	R	$\theta_x/\theta_P$
4	1	1,7
16	4	2,58
24	6	2,75
32	8	2,95
40	10	3,2
44	11	3,45

$e = \text{espesor de probeta} = 48 \text{ mm}$

Curva  $e/a = 10$

d	R	$\theta_x/\theta_P$
4	1	1,7
8	2	2,2
16	4	2,6
24	6	2,8
32	8	3,1
38	9,5	3,5

$e = 40 \text{ mm}$

Curva e/a= 6

d	R	$\theta_x/\theta_P$
2	0,5	1,52
4	1	1,68
8	2	2,2
16	4	2,7
20	5	3,00
22	5,5	3,2

e= 24 mm

Curva e/a= 4

d	R	$\theta_x/\theta_P$
4	1	1,7
6	1,5	2,0
10	2,5	2,45
12	3	2,65
14	3,5	3,0
15	3,75	3,15

e= 16 mm



Curva  $e/a=2$

d	R	$\theta_x/\theta_p$
0,5	0,12	1,2
1	0,25	1,3
2	0,5	1,5
4	1	1,8
6	1,5	2,3
7	1,75	2,8

$e=8$  mm

La distancia a entre electrodos es constante e igual a 4 mm.

La obtención de estos resultados que configuraron el gráfico, Fig. N° 7, fueron guiados para la solución de problemas que fueran oportunamente planteados al LEMIT y que fueron motivo de posteriores ensayos sobre piezas en las cuales pudo comprobarse la bondad del método cuando se ajustan todas las condiciones del ensayo. El gráfico de familias de cinco curvas que responden a los espesores de las probetas, en las condiciones que le dieron origen además de las ya anunciadas, figura la de haber establecido que la longitud de la fisura es grande comparando con su profundidad y que el plano que la contiene es prácticamente perpendicular a la superficie. Para otros tipos de fisuras como las de longitud pequeña con respecto a su profundidad o que la extensión de la misma en el interior no se propague en forma regular, se pueden determinar familias de curvas siguiendo la misma técnica, con sólo variar la relación de espesor del material y la distancia entre electrodos  $e/a$ , colocando en su lugar o haciendo cada curva con relación de longitud de falla y de espacio entre electrodos  $L/a$ . Para estos casos no se tiene en cuenta el espesor del material.

Como puede observarse en las tablas correspondientes y el gráfico N° 1, a medida que la fisura es menor en relación al espesor de la probeta, la relación de deflexiones tiende hacia 1, lo que naturalmente tiene que ser, pero que algunas veces dificulta la apreciación de las lecturas, lo que nos indujo a plantear en estos casos dos soluciones: la de acercar más las puntas (electrodos) o de aumentar el valor de la corriente. La primera la tomamos como consideración teórica para el desarrollo de la curva para determinar espesores en chapas finas, teniendo la limitación de que hay una distancia entre electrodos mínima, para ambos casos. En la segunda se encuentra la limitación de que a mayor corriente se alteran los elementos del equipo, como cables, alcance de instrumentos, aumento de las fuerzas electromotrices térmicas de contacto, etc.

Precisamente en las observaciones de aplicación del método para la determinación de profundidad de fisuras, destacamos la dificultad de mantener el equilibrio de esas en los contactos de los electrodos, haciendo para cada medición un control de dicho equilibrio con el cero del galvanómetro.

Entre las aplicaciones prácticas del método usando el gráfico determinado y que posteriormente se pudo comprobar resultados por otros medios, figuran: el de medir la profundidad de una fisura en una matriz de acero para eslabones de cadenas, eje de polea, palier, diente de engranaje, etc.

El primero fue un caso interesante a resolver por las implicancias no sólo prácticas sino económicas que planteaba: el de conocer con un grado alto de exactitud la profundidad de la fisura, pues se le ligaba el hecho de seguir usando la matriz si la falla entraba en un cierto orden de tolerancia previsto, para continuar en servicio, lo que significaba una gran economía por el elevado costo de la matriz y además el hecho de que estando la falla dentro de la tolerancia, conocer su profundidad para eliminarla completamente pues el corte de dicha matriz suponía un elevado costo relativo debido a la dureza del acero especial con que estaba construida.

---

## MEDICION DE ESPESORES

---

En procedimiento similar al de determinación de profundidad de fisuras, se conecta la llave del circuito ajustando el cero del galvanómetro para lograr el equilibrio de las f. e. m. f. térmicas entre los electrodos y otros puntos del circuito.

Se aplica el cabezal de prueba (cuatro electrodos) primeramente sobre una probeta de espesor conocido y mayor del que se quiere medir, estableciendo en el circuito una corriente de 1 amperes, que se mantiene constante, y una diferencia de potencial cuyo valor se mide en el galvanómetro. Posteriormente se lleva el cabezal de prueba al material del espesor a medir, que tiene que tener la misma resistividad que la probeta, procediendo a la lectura en el galvanómetro de la diferencia de potencial respectiva.

Con la relación de ambas medidas o deflexiones del galvanómetro se entra en el gráfico determinado para los valores de ensayo establecidos y se obtiene el valor del espesor buscado.

La elección de la distancia entre electrodos se hizo teniendo en cuenta que lo más probable era medir pequeños espesores, como la diferencia que puede entrar en un rango de espesor de chapas finas, entre 0,5 y 1,54 mm. Por este motivo el uso del cabezal de prueba en la experiencia de medición de profundidad de fisuras se repitió en ésta, ya que estimamos como ya lo adelantamos que la menor distancia entre electrodos para medir pequeñas diferencias de espesor, nos asegura mayor sensibilidad y posibilita diferencias en las deflexiones del galvanómetro que nos permite mediante el gráfico o curva determinado, asegurar la exactitud de la medida.

---

DETERMINACION DEL GRAFICO PARA LA MEDICION DE ESPESORES DE CHAPAS ENTRE LOS N° 16 HASTA 26 (FIG. N° 8)

---

Material: chapas de hierro decapado

Distancia entre electrodos  $a = 4$  mm.

$I =$  constante = 10 amp.

Se prepararon cinco probetas tomando como chapa patrón la de calibre  $16 = 1,54$  mm  $\theta_P = 18$

Medidas de las probetas:  $50 \times 100$  mm. Las lecturas se tomaron apoyando el cabezal en el centro geométrico de las mismas.

#### DETERMINACION DE LA CURVA

Notación: A, B y C: puntos de la curva

$e =$  espesor de la chapa  $P =$  espesor de la chapa patrón.

$\theta_x =$  deflección de la chapa.

$\theta_P =$  deflección de la chapa patrón

$R =$  relación entre D y distancia entre puntas = a siendo  $D = P - x$ , donde x es el espesor a medir,  $R = P - x/a$

Por lo tanto la fórmula para medir el espesor con las variables propuestas es la siguiente:

$$x = P - R.a$$

Puntos	$e_{mm}$	$\theta_x$	$\theta_x/\theta_P$	R
A	1,22	22,5	1,25	0,08
B	0,82	36	2,0	0,19
C	0,54	58	3,22	0,25

La cuarta probeta medida con tornillo micrométrico con un espesor de 0,89 mm se usó para verificar la curva trazada; se obtuvieron con el cabezal de prueba y el equipo utilizado, los siguientes resultados:

$$\theta_x = 33 \quad \theta_x/\theta_P = 1,83 \quad R = 0,166 \quad R.a = 0,664$$

Por lo tanto  $x = P-R.a = 1,54 - 0,664 = \underline{0,876}$

Numerosas fueron las aplicaciones del método y la curva experimentada en ensayos realizados en el LEMIT sobre todo en la medición de espesores de chapas con que se construyen los muebles metálicos que son adquiridos por la Provincia de Buenos Aires.

Entre las observaciones efectuadas en la aplicación del método de corriente continua en la medición de espesores de chapa fina, y que crea limitaciones en su aplicación, son la dificultad de balancear las f.e.m. térmicas en el contacto de los electrodos en continuas inspecciones, y el efecto de borde que altera el campo e léctrico lo que varía la medida de las caídas de potencial y en consecuencia sus resultados lo que impide aplicar las curvas características previamente determinadas.

A este respecto hemos tratado de encontrar un factor de conversión para eliminar la influencia del borde en las mediciones y trabajar con la curva característica, multiplicando el resultado encontrado con la misma, por el factor de conversión por el efecto del borde.

A tales efectos hemos preparado otras probetas con las dimensiones siguientes: 20 x 83 mm en las que interviene el efecto de borde que afecta el resultado de las medidas y que usando el mismo cabezal que para la determinación de la curva característica anterior, se ob - tiene la nueva curva con la diferencia que puede apre - ciarse en el gráfico, Fig. N° 9.

Queda en nuestro trabajo determinar nuevas curvas características usando probetas de dimensiones tales que por efecto de borde se afecten las mediciones p.e., aumentando progresivamente el ancho de aquellas, lo que nos dará una serie de curvas que integradas nos darán el factor de conversión buscado y solucionar así el proble - ma del efecto de borde en la medición de espesor tomando puntos de medida en cualquier posición.

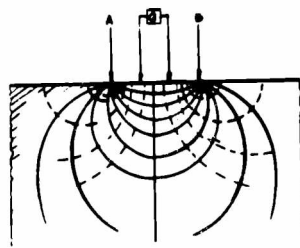


FIG. 1

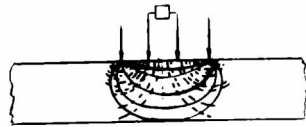


FIG. 2

DISTRIBUCION DE LINEAS DE CORRIENTE Y POTENCIAL

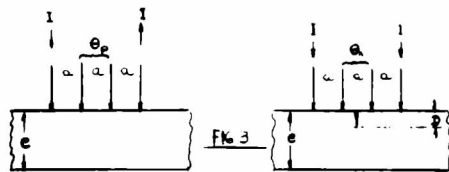


FIG. 3

METODO PARA LA DETERMINACION DE PROFUNDIDAD DE FALLAS

ESQUEMA DE CIRCUITO

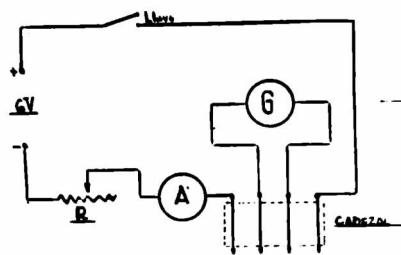


FIG. 4

ESQUEMA DE CABEZAL

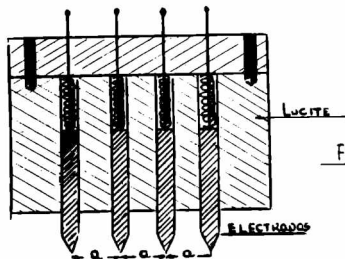


FIG. 5

Fig. 6

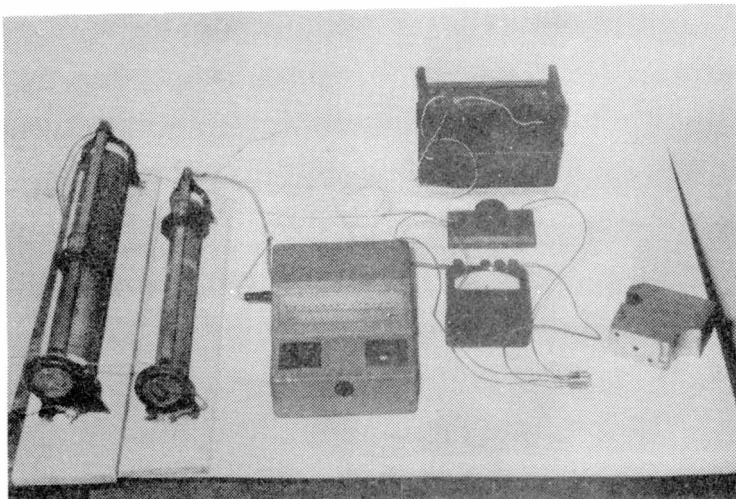


Fig. 7

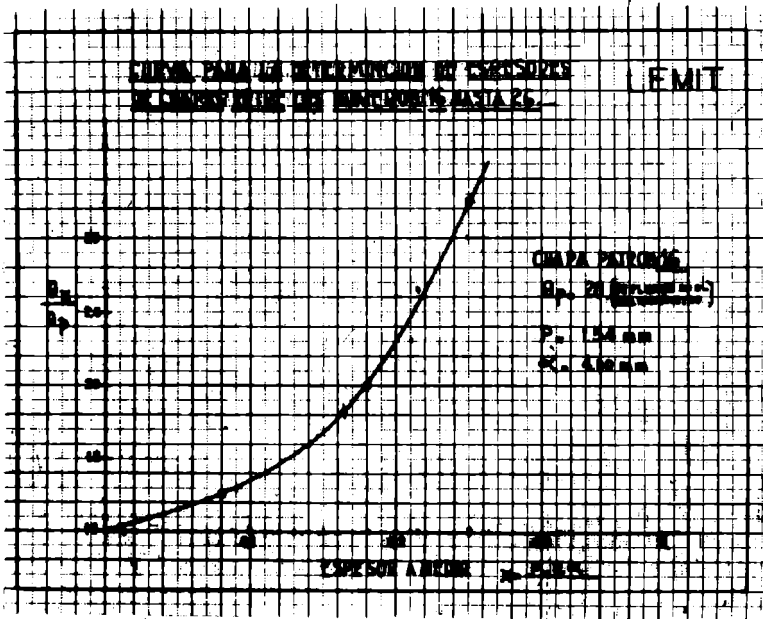
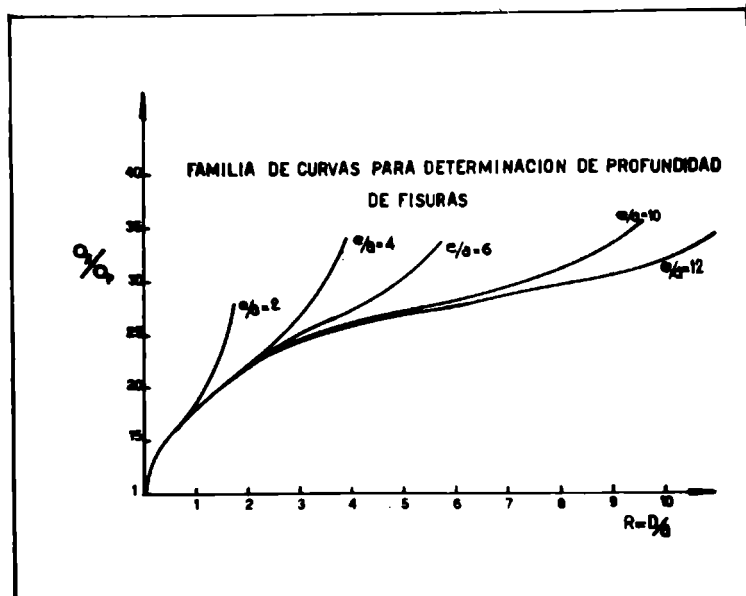
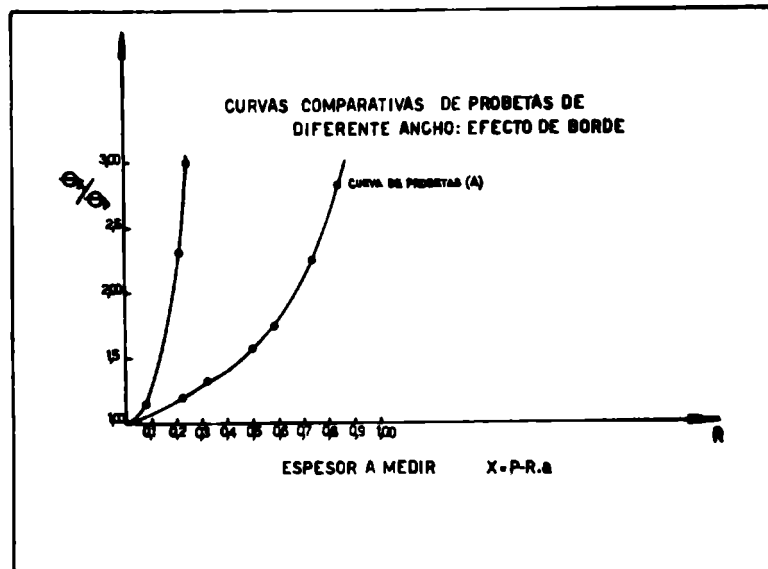


Fig. 8

Fig. 9



---

BIBLIOGRAFIA

---

Non Destructive Testing - Handbook.

En el presente trabajo colaboraron en su ejecución el Ing. Roberto Decastelli en los ensayos para la determinación de las curvas características, el Sr. José Decarli y personal de la sección mecánica de precisión en la construcción de los elementos de ensayo y asimismo personal de la Sección Dibujo y Proyectos, a quienes se agradece.