

Utilización de un magnetómetro de torque de construcción simple en la determinación de espesores magnéticos de capas delgadas

F. Calderón Pinar, F. González-Quevedo Podríguez, Dpto. Física Aplicada, Laboratorio Magnetismo de la Universidad de La Habana. (Facultad de Física-Matemática)

RESUMEN

En este trabajo se reportan los resultados obtenidos en la determinación de los espesores magnéticos de capas delgadas ferromagnéticas entre 100 y 1000 Å de espesor mediante la utilización de un magnetómetro de torque de construcción muy simple.

El instrumento construido garantiza una precisión superior al 10 % siempre que se cumplan los requisitos del modelo en el cual se basa la medición.

ABSTRACT

Results obtained in determining the "magnetic effective thickness of thin ferromagnetic films are reported in this paper. Film thickness lie between 100 and 1000 Å. A torque magnetometer of very simple construction is used for the measurements.

The equipment built guarantess a higher than 10 % precission if the requirements of the model are fulfilled.

I N T R O D U C C I Ó N

El magnetómetro de torque es un instrumento sensible y versátil, el cual puede utilizarse tanto para determinar el tipo y características de la anisotropía magnética de una capa delgada como para determinar la mag-

netización o el espesor magnético de dicha capa con precisión satisfactoria. El instrumento puede ser también utilizado para obtener el lazo de histéresis de la capa o para el estudio de los procesos de histéresis rotacional (1-3).

El objetivo del presente trabajo es el de reportar los resultados obtenidos en la determinación del espesor magnético de capas ferromagnéticas uniáxicas, de espesores inferiores a 1000 Å, mediante un magnetómetro de torque de construcción simple.

MODELO UTILIZADO

El método de medición de espesores magnéticos utilizados por nosotros es similar al utilizado por Neugebauer en (4), el cual se basa en un modelo que detallamos a continuación.

Supongamos (ver figura 1) que la superficie de la capa forma un ángulo α con la dirección del campo H . La energía magnética en saturación es:

$$E = -M_S H \cos \alpha + \frac{1}{2} N M_S^2 \sin^2(\alpha_0 - \alpha) + K_1 \sin^2(\alpha_0 - \alpha) \quad (1)$$

donde $N = 4\pi$ es el factor de demagnetización y K_1 la constante de anisotropía.

Para $\alpha = 45^\circ$ la expresión (1) tiene un mínimo para:

$$\sin \alpha = \frac{-M_S H \pm \left[M_S^2 H^2 + 8(2\pi M_S^2 + K_1) \right]^{\frac{1}{2}}}{4(2\pi M_S^2 + K_1)} \quad (2)$$

El torque que actúa sobre el hilo del magnetómetro el cual sostiene a la capa de volumen V en el campo magnético de magnitud H es:

$$L = M_S H V \sin \alpha \quad (3)$$

y en campos pequeños, para los cuales podemos desprestigiar los términos en H^2 en la expresión (2) se obtiene:

$$\frac{L}{H} = - \frac{M_S^2 V}{4(2\pi M_S^2 + K_1)} H + \frac{M_S V}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

En el punto donde la recta anterior, extrapolada, corta al eje las ordenadas (ver figura 2), tendremos:

$$\left. \frac{L}{H} \right|_0 = \frac{M_S V}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

Para campos H demasiado pequeños se tiene $M < M_S$ por lo que $(\frac{L}{H})_0$ debe obtenerse como una extrapolación de la porción de la curva correspondiente a campos de alta intensidad.

Para:

$$H = \left(2\pi M_S^2 + K_1 \right) M_S^{-1}$$

resulta, de la expresión (4) que:

$$\frac{L}{H} = 0,707 \frac{L}{H} \quad (6)$$

lo cual puede utilizarse para medir K_1 .

Por otro lado, si H es muy grande, la expresión (7) se puede escribir de la forma:

$$\text{sen } \alpha = \frac{M_S H}{4 \left(2\pi M_S^2 + K_1 \right)} \pm \left[\frac{M_S^2 H^2}{16 \left(2\pi M_S^2 + K_1 \right)^2} + \frac{1}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

y haciendo

$$a = \frac{M_S H}{4 \left(2\pi M_S^2 + K_1 \right)}$$

se obtiene:

$$\text{sen } \alpha = a \pm \left(a^2 + \frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{2}} = a \pm a \left(1 + \frac{1}{2a^2} \right)^{\frac{1}{2}} ;$$

si $\frac{1}{2a^2} < 1$, podemos utilizar el desarrollo correspondiente en serie, obteniéndose:

$$L = - \left(2\pi M_S^2 + K_1 \right) V + 2 \left(2\pi M_S^2 + K_1 \right)^3 \frac{V}{M_S^2 H^2} \quad (8)$$

lo cual para $H \rightarrow \infty$ nos dará:

$$L|_{\infty} = \left(2\pi M_S^2 + K_1 \right) V. \quad (9)$$

CONSTRUCCIÓN DEL MAGNETÓMETRO

El montaje experimental utilizado está esquematizado en la figura 3, donde G es un cabezal goniométrico con una precisión de $2'$ de arco, al cual se fija el hilo T del magnetómetro, que es de cobre electrotécnico con un diámetro que varía entre 20 - 120 micras, según el tipo de muestra a estudiar. De este hilo pende una varilla recta de vidrio a la cual se fija la superficie reflectora O y la muestra M , la que queda entre los polos de un electroimán que es capaz de proporcionar un campo de 20 000 G en una región de 1 cm^3 alrededor de la muestra con una inhomogeneidad inferior al 1 %. Todo el sistema está aislado convenientemente de vibracio-

nes y corrientes de aire. El peso de la varilla con todos los aditamentos es del orden de 1 gr. El diámetro del hilo se escoge en cada caso siguiendo criterios de estabilidad que se detallan en (5). El campo H se determinó con un galvanómetro balístico con un error relativo del 5 %. La fuente de alimentación es un puente de diodos capaz de suministrar 4 KW de potencia. El filtrado de la corriente se efectúa aprovechando la gran inductancia del electroimán.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La calibración de la constante de torsión del hilo del magnetómetro se efectuó por un método convencional. El funcionamiento del equipo se comprobó utilizando una capa delgada monocristalina de Mn-Bi con una rotación de Faraday y magnetización de saturación determinadas previamente con un error relativo al 5 % (7).

El magnetómetro arrojó un espesor magnético de 185 \AA , lo cual coincidió con el espesor magnético determinado por magnetoóptica, dentro de un margen de error del 10 %.

En la tabla I se muestran los resultados obtenidos para capas policristalinas de Ni. Utilizando resonancia ferromagnética (RFM) se determinó como valor más probable para la magnetización de saturación de estas capas $M_s = 484 \pm 25$ Gauss. Estas capas, estudiadas por efecto Kerr mostraban características en su lazo de histéresis que permiten concluir el carácter de anisotropía uniaxial de las mismas, con un eje fácil de anisotropía en el plano de la capa. Como se observa de los resultados de la tabla I, existe una correspondencia entre espesores magnéticos medidos por el magnetómetro y los medidos por una microbalanza electrónica en el momento de la evaporación de las capas. Ambas determinaciones coinciden dentro de un margen del 10 % en todos los casos.

Las capas de aleación Fe-Ni-Cr se evaporaron sobre sustratos de vidrio previamente desgasificados y recubiertos con una capa de SiO_2 amorfo. Las evaporaciones se realizaron desde espirales de tungsteno. El material de partida era una aleación con el 30 % de Ni, el 7 % de Cr y el 1 % de Si. Un análisis por difracción de rayos X del evaporado mostró la formación de una fase austenítica bcc, muy semejante a la del NiFe y trazas de una ferrita de tungsteno, ferberita (ver referencia 6). La formación de la ferrita de tungsteno se debe a la contaminación con el oxígeno residual y con el material de los evaporadores.

Las capas obtenidas eran policristalinas, con anisotropía magnética uniaxial, con el eje de anisotropía inducida contenido en el plano de la capa, en la dirección del campo magnético orientador. En la tabla II se muestran los resultados de algunas de las mediciones efectuadas sobre las

capas obtenidas, utilizando RFM, el magnetómetro de torque y la comparación correspondiente con las lecturas de la microbalanza de cuarzo.

Se observa una gran dispersión en los valores de M_s obtenidos por RFM y se observa que el Cr, al parecer tiende a aumentar el factor giromagnético con respecto al del NiFe de composición semejante (ver referencia 7).

En la figura 4 se muestran los gráficos de L/H vs. H , medidos con el magnetómetro de torque, para algunas de estas capas. La muestra P-7 presenta una diferencia notable entre su espesor magnético y el dado por la microbalanza electrónica. Esto último parece estar relacionado con las características anómalas que presenta esta capa, la cual daba tres picos de absorción bien definidos por RFM para los siguientes valores de campo H : 781, 664 437 Oe. Estos tres picos aparecieron también en otras láminas, como la P-26, reflejando la posible existencia de varias fases ferromagnéticas en algunas de las muestras. Esta posibilidad se ve reforzada por la existencia de anomalías en la curva M_s vs T obtenida mediante efecto Kerr en la muestra P-7 y en la P-26. Es típica en los experimentos efectuados la forma específica de las curvas L/H vs H para las láminas anómalas, las cuales alcanzan la zona lineal sólo a altos valores del campo H , en comparación con las capas "normales", las cuales, como P-17 alcanzan la zona lineal con valores de H mucho menores. (ver figura 4).

CONCLUSIONES

Pese a la relativa sencillez del instrumento utilizado, el mismo puede determinar el espesor de una capa ferromagnética de menos de 1000 Å con un error relativo inferior al 10 %. La exactitud de la medición está relacionada con las características de la capa, la cual debe presentar una sola fase magnética, no estar contaminada y cumplir con los demás requisitos generales del modelo en el cual se basa esta medición.

AGRADECIMIENTOS

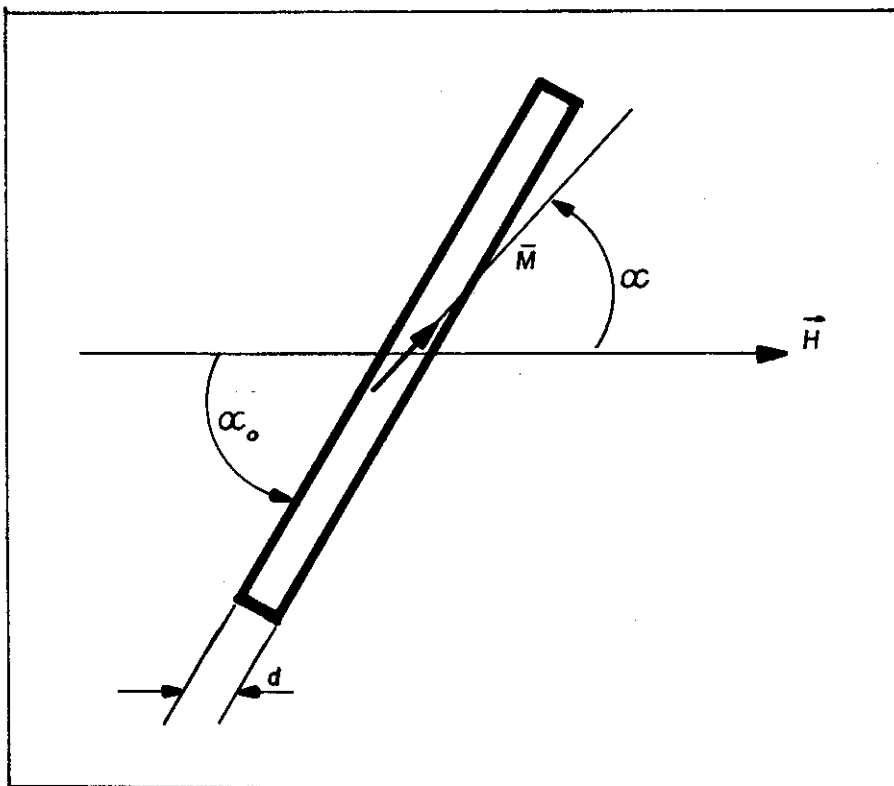
Agradecemos al cro. C.Dr. Alejandro Cabo el haber colaborado en las mediciones por R.F.M. de las muestras utilizadas en este trabajo y el haber dado a los autores interesantes sugerencias relativas al mismo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Katz, H.W. *et alt.*
I.E.E.E. Trans Magnetics MAG-1 218 (1965).
2. Humphrey, F.B. y A.R. Johnston
Rev. Sci. Instr., 34, 348 (1963).
3. Torok, E.Y. *et alt.*
Rev. Sci. Instr. 35, 1039 (1964).

4. Neugebauer, C.A.
Phys. Rev. 116, 1441, (1959).
5. Harrison, F.W.
Journal of Sci-Instr. 33, 5 (1956).
6. Narita, K.
Estructuras cristalinas de inclusiones no metálicas. Editora Metalurgia, Moscú 1969 (en ruso).
7. Calderón, F.
Tesis de Especialidad, Univ. Habana (1978).

Recibido: 21 de julio de 1984.



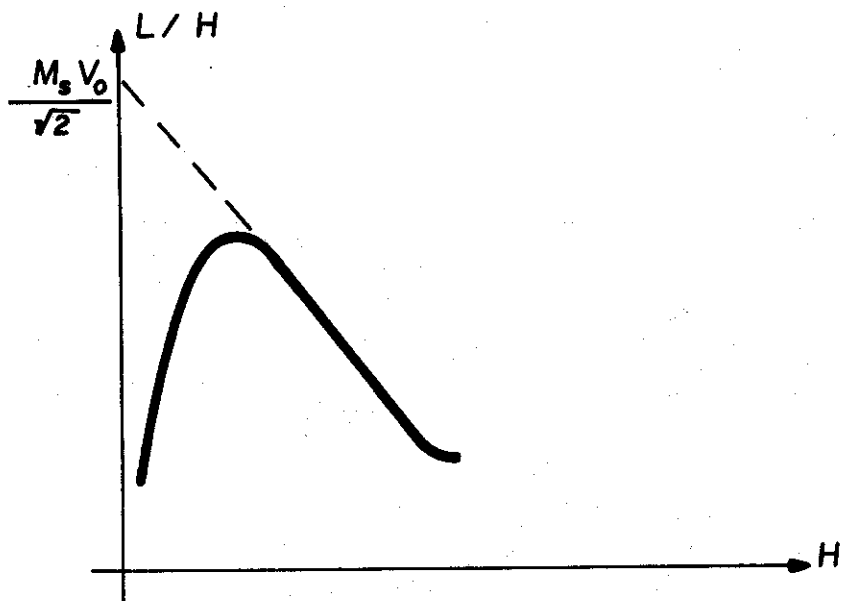


FIG. 2 - CURVA TÍPICA DE L/H CONTRA H DADA POR EL MAGNETÓMETRO.

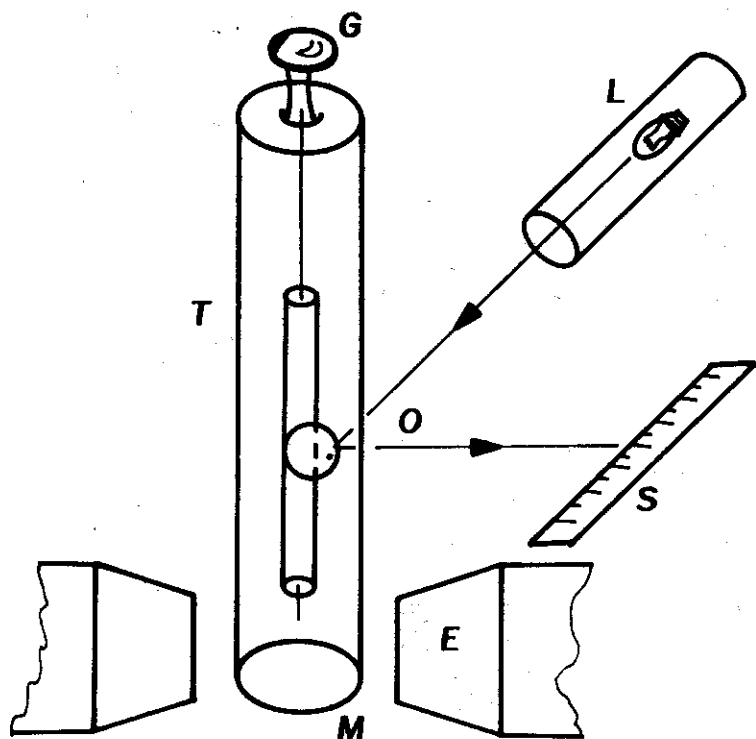
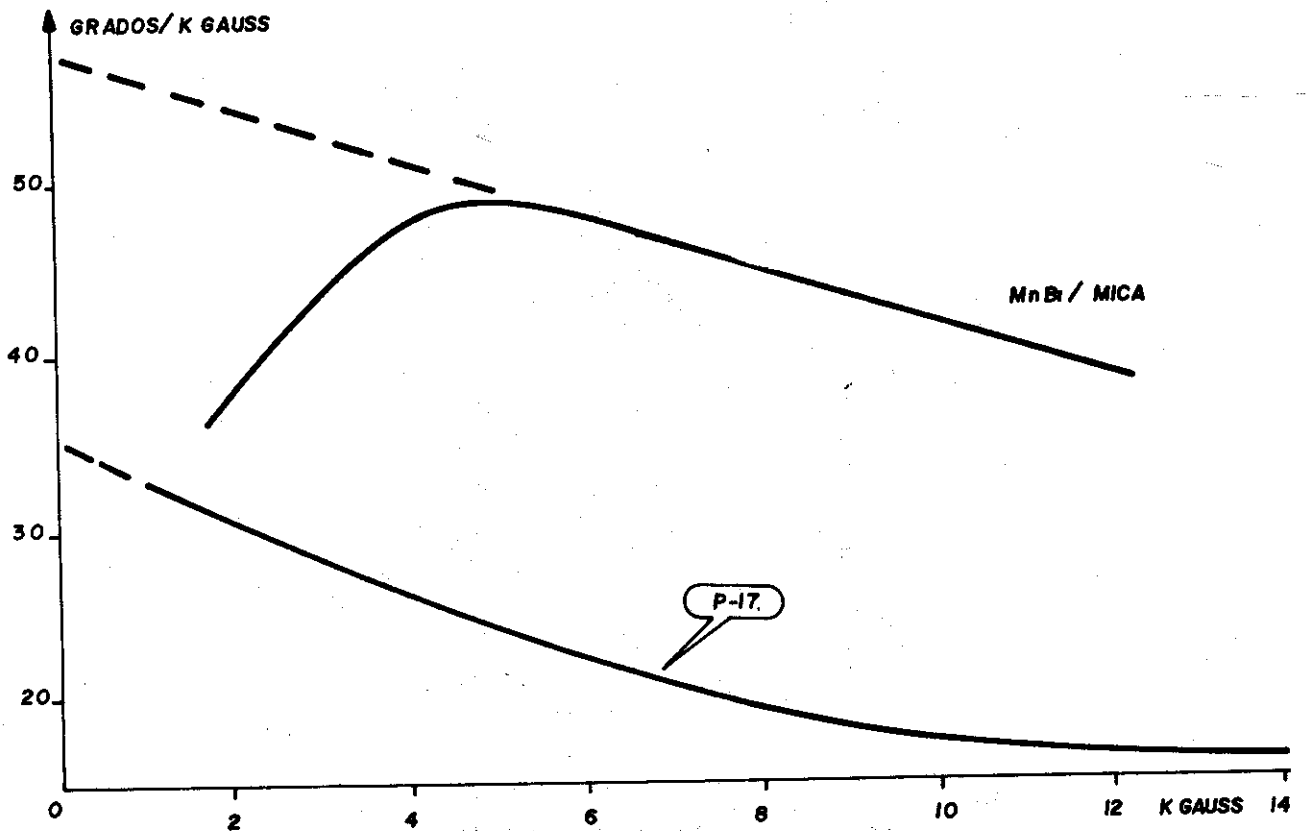
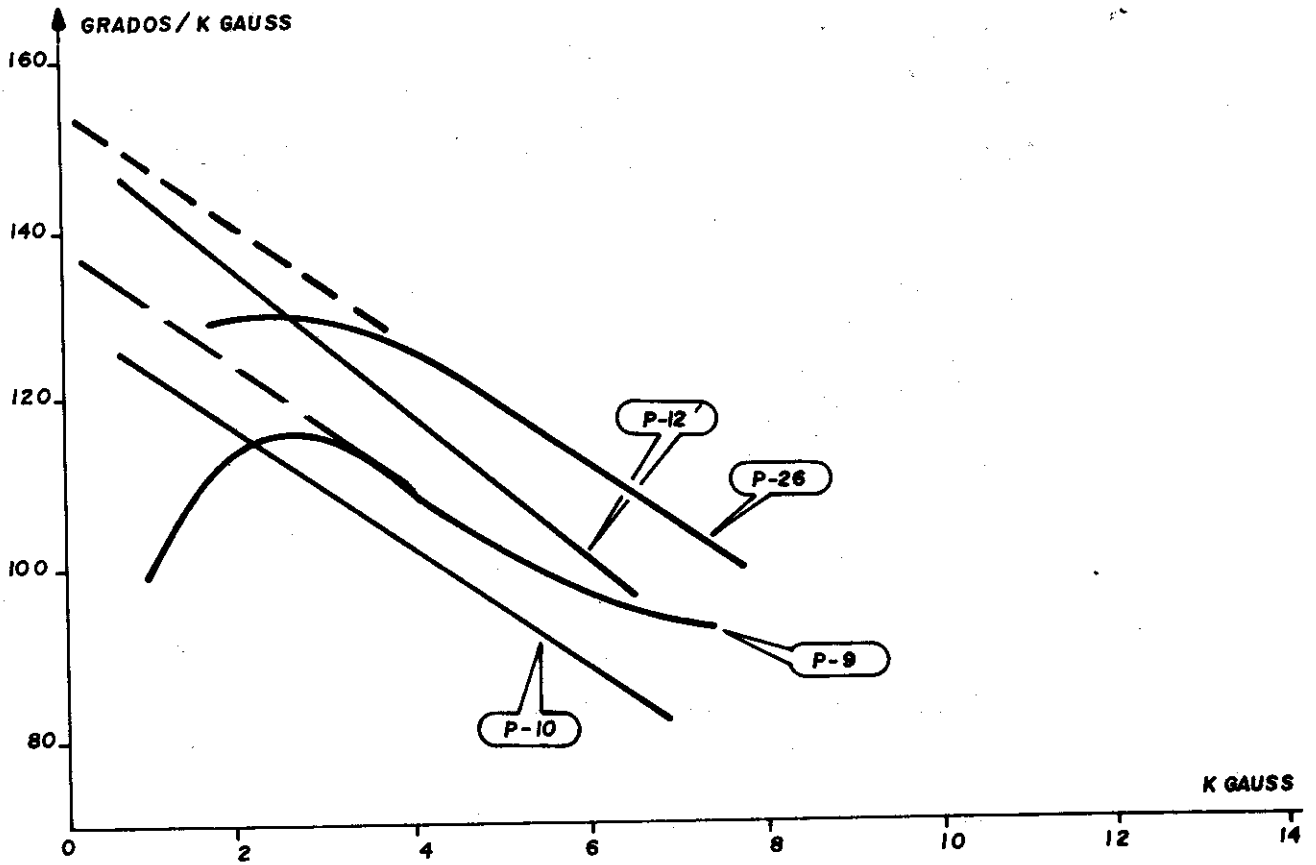


FIG. 3 - ESQUEMA DEL MONTAJE EXPERIMENTAL UTILIZADO.



▲ FIG.4. CURVAS EXPERIMENTALES TÍPICAS OBTENIDAS (LA CONSTANTE DE TORSIÓN DEL HILO NO ES LA MISMA EN TODOS LOS CASOS.)

TABLA I. Determinación del espesor magnético de capas ferromagnéticas de Ni

Muestra	$\left(\frac{L}{H}\right)_0 \times 10^{-2} \frac{\text{grados}}{\text{Gauss}}$	$V \times 10^{-6} (\text{cm}^3)$	$d(\text{Å})^*$	$\Delta f (\text{Hz})^{**}$
N-1	3.65	1.08	137	378 (145)
N-2	6.0	1.77	255	662 (254)
N-3	9.3	2.75	350	879 (338)
N-4	12.3	3.64	463	1049 (403)

* MEDIDA CON EL MAGNETÓMETRO DE TORQUE, PARA $M_s = 484 \pm 25 \text{ G}$

** ENTRE PARÉNTESIS, EL ESPESOR DETERMINADO POR LA MICROBALANZA EN UNIDADES ANGSTROMS.

TABLA II. Determinación del espesor magnético de capas ferromagnéticas de aleaciones Fe - Ni - Cr.

MUESTRA	M (GAUSS)	g	$d(\text{Å})^*$	$\Delta f (\text{Hz})^{**}$
P-7	908	2.00	945	1200 (800)
P-8	884	2.00	695	1100 (733)
P-9	861	2.04	918	1300 (866)
P-10	884	2.00	842	1350 (900)
P-12	1133	2.00	679	1020 (680)
P-17	788	2.17	293	465 (310)

* MEDIDO CON EL MAGNETÓMETRO DE TORQUE

** ENTRE PARÉNTESIS, EL ESPESOR DETERMINADO POR LA MICROBALANZA EN UNIDADES ANGSTROMS.