



**INSTITUTO DE
TECNOLOGIA**

PROF. JORGE A. SABATO

**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE GENERAL SAN MARTIN
COMISION NACIONAL
DE ENERGIA ATOMICA**

**MAESTRIA EN
CIENCIA Y
TECNOLOGIA
DE MATERIALES**

**RUIDO BARHAUSEN Y EMISIÓN
MAGNETO ACÚSTICA:
DESARROLLO DE UN SISTEMA DE
MEDICIÓN Y APLICACIÓN A LA
CARACTERIZACIÓN
MICROESTRUCTURAL
Y AL ESTADO DE TENSIONES**

Adrián Alejandro Ruiz

Resumen

En el presente trabajo se expone al efecto Barkhausen y la Magneto Emisión Acústica en materiales ferromagnéticos y su relación con la Teoría de los Dominios Magnéticos. La primera etapa del trabajo consistió en el desarrollo de un sistema integral de medición de señales de Ruido Barkhausen (RB) y Emisión Magneto Acústica (EMA). La medición de dichos fenómenos fue realizada en probetas de acero de bajo contenido de carbono con diferentes tratamientos termo-mecánicos y sometidas a radiación neutrónica, con el objeto de identificar aspectos microestructurales a partir de dichas señales. Para corroborar el cambio de las señales de RB con diferentes niveles de tensiones aplicadas, se las midió sobre un material ferromagnético sometido a tensiones de tracción y compresión. Se presentan parámetros de análisis a partir de señales RB y EMA, y se discuten sus resultados. Se proponen futuras líneas de trabajo, para instaurar este sistema de medición como un método de Ensayo No Destructivo (END).

Palabras Claves: Ruido Barkhausen, Emisión Magneto Acústica, Tratamientos termo-mecánicos, Daño por Radiación, Tensiones, Ensayos No Destructivos.

Abstract

The present work deals with the Barkhausen effect and the Magnetic Acoustic Emission on ferromagnetic materials and the relationship with the Magnetic Domains Theory. The development of a complete system aimed at the measurement of the Barkhausen Noise (BN) and the Magnetic Acoustic Emission (MAE) is described. The technique was applied to characterize low carbon content steel samples submitted to different thermo-mechanical treatments and to neutron irradiation in order to identify microstructural changes. In addition, the variation of BN signals was verified at different levels of applied stress. The parameters related with the BN and the MAE signals are analysed and discussed. Further research work is proposed to develop this measurement system as a method of Non Destructive Testing (NDT).

Key Words: Barkhausen Noise, Magneto Acoustics Emission, Heat and mechanical treatment, Irradiation Damage, Stress, Non Destructive Testing.

Algunos de los resultados de este trabajo fueron presentados en el congreso XXXI Reunión Anual de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear, AATN, Bs. As., 23-25 Noviembre 2004, bajo el título,

“Construcción de un equipo para Medición de Ruido Barkhausen y Emisión Magneto Acústica en aleaciones base Hierro”, Ruiz A., Marengo J., López Pumarega I., Piotrkowski R., Ruzzante J.

Este trabajo tuvo el apoyo económico del Subprograma de Gestión y Extensión de Vida de Centrales Nucleares de la CNEA.

Agradecimientos

A mi esposa Ing. Alejandra Benitez, a mis hijos Manuel y Milena quienes supieron tolerar mis estados de ánimo durante todo este período.

A mis padres Irma E. Reverdite y Enrique R. Ruiz quienes sembraron esta semilla.

A mis directores, la Dra. Isabel López Pumarega y la Dra. Rosa Piotrkowski por su apoyo en mi trabajo.

Al Sr. José Marengo, pues este trabajo no podría haber sido posible sin su colaboración, apoyo, ideas y conocimiento.

A todo el grupo de Ondas Elásticas, Dr. José Ruzzante, Sra. María Armeite, Lic. Dino Filipussi, y Mg. Lic. Martín Gómez.

A Mg. Ing. Ignacio Mieza, por sus importantes aportes y su visión de los problemas, por su colaboración incondicional y su amistad.

Al Sr. Sr. Ramón Castillo de la U.A. Materiales, Centro Atómico Constituyentes quién organizó, y colaboró con todos los tratamientos termo-mecánicos realizados en este trabajo.

Al Subprograma de Gestión y Extensión de Vida de Centrales Nucleares de la CNEA, y al Dr. Raúl Versaci por su gestión de los fondos necesarios para la ejecución de este trabajo.

A la Dra. Ana María Fortis y al personal involucrado del reactor RA1 CAC CNEA, por su colaboración y apoyo en todo lo que fue la irradiación, manipulación y disposición final de las muestras ensayadas.

A todo el personal del taller, especialmente al Sr. Andrés Acosta, quién fabricó las probetas y otros dispositivos.

Al Ing. Luis Ibañez y al Lic. Sachi del E.E.C.E., U.A. ENDE, CNEA, por haberme facilitado la probeta, el elemento de sujeción y las pesas para el ensayo de tensiones.

A los Directores, Profesores y Administrativos de la Maestría que me han permitido llegar a este punto.

Índice

1	Introducción	1
2	Dominios Magnéticos	3
2.1	Materiales Ferromagnéticos y Teoría de los Dominios Magnéticos	3
2.1.1	Origen atómico del Ferromagnetismo	3
2.1.2	Teoría de Dominio de Weiss	4
2.1.2.1	Estructura de dominios ideal	5
2.1.3	Energía de Paredes de Dominios	9
2.1.3.1	Tipos de Paredes de Dominios	11
2.1.4	Determinación de la estructura de equilibrio de dominios	12
2.2	Evolución de la Estructura de Dominios aplicando un campo Magnético	13
2.2.1	Proceso de Magnetización en términos de la teoría de Dominios	13
2.2.2	Movimiento de las Paredes de Dominios	15
2.2.3	Procesos en Dominios	18
2.3	Teorías de interacción de las paredes de dominios	19
2.3.1	Inclusiones	19
2.3.2	Zonas de tensiones inhomogéneas	20
2.3.3	Bordes de grano	22
	Referencias Capítulo 2	23
3	Propiedades Magnéticas y Medición del Efecto Barkhausen	24
3.1	Propiedades Magnéticas	24
3.1.1	Ciclo de Histéresis Magnética	24
3.1.2	Variaciones de los parámetros determinados en el Ciclo de Histéresis	26
3.2	Discontinuidades en la Magnetización	27
3.2.1	Efecto Barkhausen y Ruido Barkhausen	27
3.2.2	Emisión Magneto Acústica (EMA)	28
3.2.3	Ruido Barkhausen, EMA y dominios magnéticos	29
3.3	Medición del Efecto Barkhausen	29

3.3.1 Método Inductivo	29
3.3.2 Método Acústico	30
3.3.3 Otros Métodos	31
3.4 Métodos de Análisis de Señales	31
3.4.1 Ruido Barkhausen	31
3.4.2 Emisión Magneto Acústica	35
3.4.2.1 Emisión Acústica	35
3.4.2.2 Señal de Emisión Magneto Acústica EMA	36
3.5 Relación entre microestructura, RB y EMA	38
3.5.1 Tamaño de Grano	38
3.5.2 Precipitados, crecimiento de segundas fases y contenido de Carbono	39
3.5.3 Trabajado en frío y deformación plástica	41
3.5.4 Daño por radiación	42
3.5.5 Campo de Tensiones	43
3.5.6 Otras relaciones	45
Referencias Capítulo 3	46
4 Construcción del sistema para Medición del Ruido Barkhausen y Emisión Magneto Acústica	48
4.1 Trabajos Iniciales	48
4.1.1 Caracterización magnética de un acero de uso nuclear	48
4.2 Instrumental construido para la medición de Ruido Barkhausen	50
4.2.1 Yugo excitador	50
4.2.2 Alimentador de Corriente	51
4.2.3 Bobinas sensoras	52
4.2.4 Amplificador y Filtro de frecuencia de señal RB	54
4.2.5 Otros equipos utilizados	54
4.3 Instrumental utilizado para la medición de EMA	55
4.3.1 Amplificador de Emisión Acústica y medidor RMS	55
4.3.2 Sensores	55
4.3.3 Preamplificador	55

4.4 Sistema completo de medición de RB y EMA	56
Referencias Capítulo 4	58
5 Preparación de muestras y experimentación	59
5.1 Preparación de Muestras	59
5.1.1 Muestras con tratamientos termo-mecánicos e irradiación	59
5.1.1.1 Tratamientos Térmicos	60
5.1.1.2 Tratamientos Mecánicos	62
5.1.1.3 Determinaciones de Dureza sobre probetas con tratamientos termo-mecánicos	62
5.1.2 Muestras para Irradiación	63
5.1.3 Muestras para medición de RB y EMA solicitada por tensiones	63
5.2 Experimentación	63
5.2.1 Medición del RB y EMA en probetas con tratamientos termo-mecánicos	63
5.2.1.1 Disposición del Sistema para medición de RB y ajuste de parámetros	63
5.2.1.2 Disposición del equipo para medición de EMA y ajuste de parámetros	66
5.2.2 Medición de RB y EMA en probeta irradiada	67
5.2.3 Medición de RB y EMA en probetas tensionadas	67
5.2.3.1 Disposición del equipo para aplicar tensión sobre la probeta	67
5.2.3.2 Disposición del equipo para medición del RB y EMA y ajuste de parámetros	68
Referencias Capítulo 5	70
6 Resultados de la experimentación y discusión	71
6.1 Mediciones en probetas con tratamientos termo-mecánicos	71
6.1.1 Resultados de RB	71
6.1.2 Resultados de EMA	90
6.2 Resultados de la probeta irradiada y discusión	96
6.2.1 Resultados de RB	97
6.2.2 Resultados de EMA	100
6.3 Resultados de experimentación en probeta tensionada	102
6.3.1 Resultados de RB	102
6.3.2 Resultados de EMA	105

6.4 Resumen general de Resultados de medición de RB y EMA sobre probetas con tratamientos termomecánicos, sometidas a irradiación y tensionadas.	107
Referencias Capítulo 6	110
7 Conclusiones, y propuestas para investigaciones futuras	112
7.1 Conclusiones	112
7.2 Futuras líneas de trabajo	115
Anexo 1 – Caracterización Magnética del acero ASTM 508 Clase 2	117
Anexo 2 – Curva de calibración del sensor de Emisión Acústica	127
Anexo 3 – Programa de cálculo del parámetro M	128

Capítulo 1

Introducción

El efecto Barkhausen fue descubierto hace más de 80 años, cuando el Prof. H. Barkhausen, notó que al someter a un material ferromagnético a un campo magnético creciente en forma continua, su magnetización se producía en forma discontinua. Este efecto puede ser cuantificado a través de dos fenómenos complementarios, el Ruido Barkhausen (RB) que es la producción de pulsos de voltaje debidos a los cambios discontinuos en la magnetización, y la Emisión Magneto Acústica (EMA) que es la producción de ondas elásticas originadas principalmente por la variación en las deformaciones debidas a la magnetostricción.

Desde entonces, este fenómeno ha sido investigado en una amplia variedad de materiales ferromagnéticos y con una amplia variedad de procedimientos experimentales. A partir de estos resultados se comprobó que el RB y la EMA son muy dependientes de la microestructura del material. Muchos autores propusieron la utilización de estos fenómenos para medir cambios en las propiedades del material, pero sólo en los últimos años, con los avances en la teoría y en las técnicas experimentales, esto ha sido posible.

Los objetivos de este trabajo fueron:

- ✓ Desarrollo de un Sistema que permitiera medir el Ruido Barkhausen y la Emisión Magneto Acústica,
- ✓ Medición de dichos fenómenos en muestras de material ferromagnético con diferentes estados, con el objeto de observar diferencias cuali-cuantitativas en las señales obtendadas.

Con el objeto de tener una mayor comprensión sobre el tema y sin el ánimo de realizar una revisión de la física del magnetismo, en el Capítulo II se desarrolla una introducción a la Teoría de Dominios Magnéticos, describiendo su interacción con campos magnéticos externos, y el comportamiento de los mismos frente a factores propios del material como bordes de grano, zonas de tensiones inhomogéneas, etc.

En el Capítulo III, se describen las Propiedades Magnéticas, las discontinuidades en la magnetización de los materiales ferromagnéticos, la aparición del efecto Barkhausen y la medición del mismo. También se describen algunos métodos experimentales de medición del

efecto Barkhausen, y algunos de los métodos de análisis de las señales RB y EMA. Finalmente se detalla la relación entre la microestructura y el RB y EMA.

El diseño y construcción del Sistema de Medición del RB y EMA se describe en el Capítulo IV. En él se incluyen los distintos componentes del Sistema como el excitador magnético, los sensores magnéticos construidos y utilizados, así como también todo el equipamiento de Emisión Acústica que fue empleado para la detección de la EMA.

En el Capítulo V se realiza la descripción de la Preparación de Muestras y la Experimentación, donde se detallan los materiales utilizados para las probetas, sus características, dimensiones, microestructura, etc. También se resumen la disposición de los equipos para la medición de RB y EMA, los índices de medidos de las señales analizadas, la elección de los parámetros de control de los equipos, etc.

Los resultados de las mediciones magnéticas y acústicas obtenidos, y la discusión de los mismos se informan en el Capítulo VI.

Finalmente en el Capítulo VII se presentan las conclusiones y los posibles trabajos a futuro, para mejorar y calibrar el Sistema construido, y optimizar el estudio de las señales de RB y EMA con el objeto de utilizar del efecto Barkhausen como un Ensayo No Destructivo de rutina, tanto en laboratorio, en planta de producción, o en elementos preexistentes.

El presente trabajo fue desarrollado en el Grupo Ondas Elásticas, de la Unidad de Actividad Ensayos No Destructivos y Estructurales (ENDE), del Centro Atómico Constituyentes, CNEA.

Capítulo 2

Dominios Magnéticos

Para tener un adecuado entendimiento del efecto Barkhausen se realizará una breve introducción a los Dominios Magnéticos con especial atención a los materiales ferromagnéticos. Luego se explicarán algunas teorías respecto de los movimientos de los dominios magnéticos y la interacción de los mismos con diferentes elementos que pueden impedir su movimiento.

2.1 Materiales Ferromagnéticos y Teoría de los Dominios Magnéticos

2.1.1 Origen atómico del Ferromagnetismo

El comportamiento magnético macroscópico de los materiales surge de los momentos magnéticos atómicos, m , que componen al material. Existen dos contribuciones al momento magnético atómico provenientes del momento magnético de los electrones. Uno es el momento magnético intrínseco y momento angular intrínseco (espín) de cada electrón. Otro es el movimiento orbital de los electrones que produce un momento magnético y un momento angular magnético.

El principio de exclusión de Pauli permite que un electrón solamente tenga una combinación particular de 4 números cuánticos n , l , m_l y m_s . Los primeros tres números indican el estado energético del electrón. El número cuántico de espín magnético m_s , puede solamente tomar los valores $\pm \frac{1}{2}$. Cada estado de energía puede contener dos electrones, si solamente hay un electrón en un dado nivel de energía, su momento de espín contribuye globalmente con el momento de espín del átomo. Se necesita un segundo electrón, que tiene un espín antiparalelo al primero, para que ambos espines se cancelen mutuamente, dando como resultado un momento neto nulo. Fuertes propiedades magnéticas se asocian entonces con elementos que tengan un gran número de espines desapareados.

En materiales sólidos, los momentos orbitales están fuertemente acoplados con la red cristalina y por ello están relativamente imposibilitados de cambiar de dirección cuando se aplica un campo magnético externo. Un átomo con espines descompensados tiene un momento magnético neto diferente de cero en ausencia de un campo magnético aplicado; los sólidos compuestos con tales átomos son denominados "paramagnéticos". En general, los momentos magnéticos en los materiales paramagnéticos están alineados al azar cuando no hay

un campo magnético aplicado, y el proceso de magnetización consiste en el alineado de estos momentos magnéticos atómicos en la dirección del campo aplicado. Sin embargo, algunos materiales paramagnéticos cuando son enfriados, pasan por una temperatura de transición, en la que aparece un estado de orden local, donde sus momentos atómicos se alinean. Cuando el material está en este estado de orden local y sus momentos adyacentes están alineados paralelamente, se lo denomina “ferromagnético”; si sus momentos están alineados antiparalelamente se los denomina “antiferromagnético” [1] (ver Fig.2.1), existiendo además otros tipos de ordenamientos que no se citarán en este trabajo.

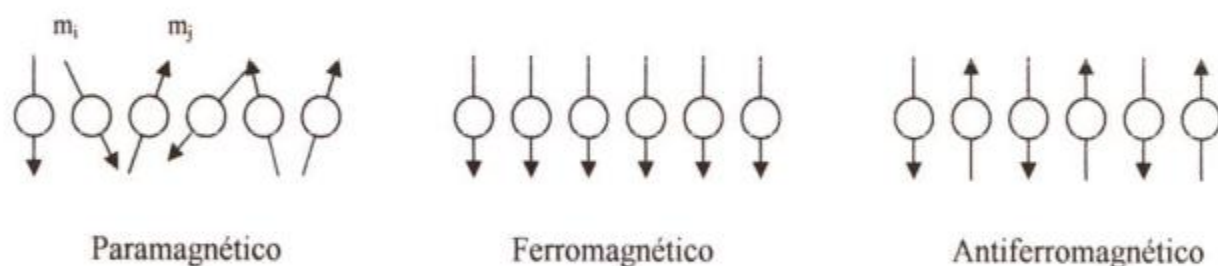


Fig. 2.1 Esquema de los vectores magnéticos atómicos en materiales con distintos ordenamientos magnéticos.

La temperatura de transición desorden-orden, es conocida como Temperatura de Curie T_C , en los materiales ferromagnéticos, y el grado de orden aumenta al disminuir la temperatura. El grado de magnetización que se alcanza en estas zonas de orden local se denomina “espontánea”.

2.1.2 Teoría de Dominio de Weiss

Weiss [2, 3] postuló que los átomos en los materiales ferromagnéticos tienen momentos magnéticos permanentes que están alineados paralelamente unos a otros en extensas regiones de una muestra (desde aquí denominados “dominios”). Este postulado fue más tarde mejorado dentro de la teoría de los “dominios” de momentos paralelos (Weiss, 1926). La magnetización (es decir el momento magnético por unidad de volumen) de un bloque de material es la suma vectorial de la magnetización de los dominios. Para una muestra ferromagnética en el estado desmagnetizado esta suma es cero. Cuando se aplica un campo, la configuración de los dominios cambia, por ejemplo con el tamaño de los dominios, apareciendo una magnetización neta (diferente de cero) en la dirección del campo.

$$\mathbf{M} = \mathbf{m} / V \quad (2.1)(*)$$

donde $\mathbf{M}$ = Magnetización del material

$\mathbf{m}$ = momento magnético, suma vectorial en todo el material

V = volumen de la muestra

La hipótesis de Weiss fue confirmada por observación directa (Bitter, 1931), y el concepto de energía magneto estática, el cual explicaba la formación de los dominios fue propuesta por Landau y Lifshitz (1935) [4].

(*) En todo este trabajo se indica a las magnitudes vectoriales con negritas.

2.1.2.1 Estructura de dominios ideal

En un material ferromagnético, homogéneo, libre de defectos y monocristalino con simetría cúbica, la estructura de dominios puede ser explicada a través de una minimización de cuatro términos de energía: intercambio, magneto estática, de anisotropía y magneto elástica (Kittel y Galt, 1956) [5].

a) Energía de intercambio

Weiss extendió una teoría existente para los materiales paramagnéticos basado en la termodinámica-estadística debida a Boltzmann y Langevin, para describir el alineamiento de los momentos magnéticos atómicos dentro de los dominios. En la teoría original de Weiss el “campo medio” (o “molecular”) era proporcional a la magnetización macroscópica M ,

$$H_e = \alpha M \quad (2.2)$$

donde H_e = campo medio

α = constante de campo medio

M = magnetización

La aproximación del campo medio requiere que todos los momentos magnéticos actúen igualmente con todos los otros. Evidentemente esta es una simplificación de la situación real, sin embargo éste es un concepto útil para considerar los átomos dentro de un dominio, que usualmente se extienden sobre 10^{12} a 10^{18} átomos. Si consideramos la interacción de un solo momento,

$$H_e = \alpha_{ij} m_j \quad (2.3)$$

La interacción de todos los momentos dentro del dominio, es simplemente la suma,

$$H_{et} = \sum \alpha_{ij} m_j \quad (2.4)$$

Y la energía de un momento por unidad de volumen es,

$$E = -\mu_0 \mathbf{m}_i \cdot \mathbf{H}_{et} = -\mu_0 \mathbf{m}_i \cdot \sum \alpha_{ij} \mathbf{m}_j \quad (2.5)$$

donde E = Energía de intercambio por unidad de volumen

μ_0 = permeabilidad magnética en el espacio vacío

$\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j$ = momentos magnéticos atómicos

α_{ij} = coeficiente de interacción de campo medio entre $\mathbf{m}_i$ y $\mathbf{m}_j$

Si consideramos que el coeficiente de interacción α_{ij} es el mismo para cada momento, y calculamos el total de energía para los vecinos cercanos, es decir extendemos la sumatoria hasta dichos vecinos, obtenemos:

$$E = -\mu_0 \alpha \sum \mathbf{m}_i \cdot \sum \mathbf{m}_j \quad (2.6)$$

donde α = coeficiente de interacción medio de vecinos cercanos

α toma valores positivos en caso de ser un material ferromagnético, y valores negativos si es antiferromagnético. Si consideramos un solo dominio, y todos los momentos magnéticos

están paralelos y alineados entre sí por ser un ferromagnético, el estado se lo denomina de saturación, y podemos observar que para materiales ferromagnéticos donde $\alpha > 0$, E para esta condición es mínima.

b) Energía Magnetostática

La existencia de los dominios magnéticos fue postulada por Landau y Lifschitz en 1935 como ya se comentó, a partir de una consideración energética, la minimización de energía magneto estática.

La energía por unidad de volumen de un dipolo de magnetización $\mathbf{M}$ en un campo magnético $\mathbf{H}$ esta dada por,

$$E = - \mu_0 \int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{M} \quad (2.7)$$

donde E = Energía magnetostática por unidad de volumen

$\mathbf{H}$ = Campo magnético aplicado

$\mathbf{M}$ = Vector magnetización

μ_0 = permeabilidad magnética en el espacio vacío

Cuando el dipolo está sujeto sólo a su propio campo de demagnetización, es decir $\mathbf{H}$ externo es cero, $\mathbf{H}_d = -N_d \mathbf{M}$ [1], entonces,

$$E_d = - \mu_0 \int \mathbf{H}_d \cdot d\mathbf{M} = - \mu_0 \int -N_d \mathbf{M} \cdot d\mathbf{M} = \mu_0 N_d \mathbf{M}^2 / 2 \quad (2.8)$$

donde E_d = Energía magnetostática por unidad de volumen en material demagnetizado

N_d = Coeficiente de demagnetización, función de la geometría del volumen

($N_d < 1$)

En ausencia de un campo aplicado, la energía magnetostática es mínima cuando la magnetización $\mathbf{M}$ es cero (es decir el volumen de cada dominio debe tender a cero), y entonces la subdivisión en dominios se favorece (ver Fig.2.2 (a), (b)). Reduciendo el tamaño de los dominios se reduce la extensión espacial del campo, entonces se reduce la energía (ver Fig. 2.2 (c)). Si se pueden formar dominios a 90° , los polos libres externos pueden ser eliminados, reduciendo la energía magneto estática aún más (Fig. 2.2 (d)).

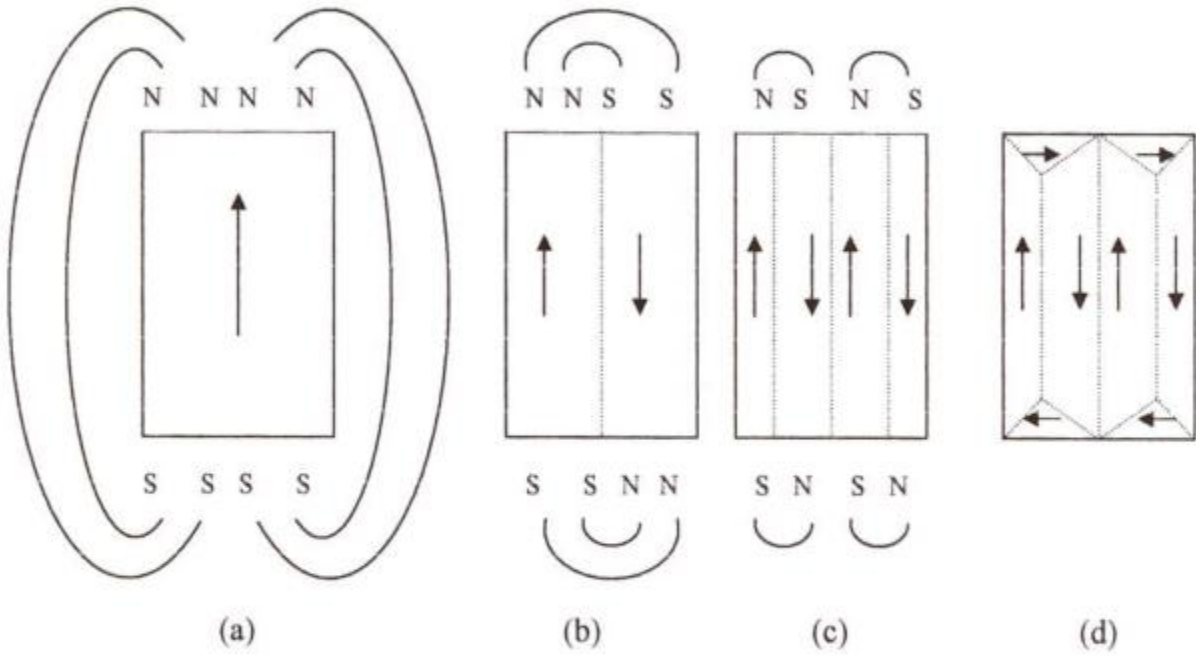


Fig. 2.2 Esquema de subdivisión en dominios de un material cúbico. (a) Muestra saturada, alta energía de demagnetización E_d , (b) y (c) División de dominios disminuyendo E_d , (d) Polos libres en superficie eliminados por dominios de cierre.

La energía de un espécimen multi-dominio es más compleja y se verá más adelante, pero podemos ver que si M puede ser reducido por la aparición de dominios, la energía magnetostática debe disminuir. Reduciendo el tamaño de los dominios, disminuye la extensión donde está el campo y entonces disminuye la energía. Sin embargo el tamaño de los dominios está influenciado por otros factores, tales como la energía de las paredes de los mismos.

c) Energía de anisotropía cristalina

Se llama anisotropía magneto cristalina a la preferencia de los momentos magnéticos atómicos de alinearse a ciertas direcciones cristalinas denominadas ejes de fácil magnetización. De la misma manera que existen estas direcciones de fácil magnetización, existen direcciones "duras" en la cual la magnetización es desfavorable. Esto aparece debido al acoplamiento de los momentos de espín y orbital (Brooks, 1940) [6], donde los momentos orbitales están forzados en determinadas direcciones debido a la red cristalina, por lo que la simetría del cristal influirá en el comportamiento de los espines a través de su acoplamiento.

En el caso de materiales cúbicos se puede usar como primera aproximación para el cálculo de la energía de anisotropía E_a , la siguiente ecuación,

$$E_a = K_1 (\cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_2 \cos^2 \theta_3 + \cos^2 \theta_3 \cos^2 \theta_1) \quad (2.9)$$

donde $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ son los ángulos del vector magnetización con los ejes cristalográficos.
 K_1 = constante de proporcionalidad o constante de anisotropía

Como ejemplo, el valor de K_1 para el hierro b.c.c es $0.480 \cdot 10^5 \text{ J/m}^3$, y las direcciones de fácil magnetización son las $\langle 100 \rangle$. Esto permite que se formen dominios de cierre orientados a 90° respecto de los dominios principales (ver Fig. 2.2 (d)).

d) Energía Magneto elástica

La magnetización de los materiales ferromagnéticos está en la mayoría de los casos acompañada de cambios dimensionales. El resultado de esta deformación es la denominada magnetostricción,

$$\lambda = \Delta l / l \quad (2.10)$$

donde λ = magnetostricción
 l = longitud inicial

Desde un punto de vista fenomenológico existen dos aspectos principales a considerar: la magnetostricción espontánea que surge a partir del ordenamiento de los momentos magnéticos dentro de los dominios a la temperatura de Curie (ver 2.1.1); y la magnetostricción inducida por un campo magnético externo.

Si un dominio de un material cristalino cúbico ferromagnético es magnetizado hasta la saturación, en una dirección definida por sus cosenos directores α_1 , α_2 y α_3 , con respecto a los ejes del cristal x , y y z , se induce una deformación λ_s denominada magnetostricción de saturación, en una dirección definida por sus cosenos β_1 , β_2 y β_3 siendo:

$$\lambda_s = 3/2 \lambda_{100} (\alpha_1^2 \beta_1^2 + \alpha_2^2 \beta_2^2 + \alpha_3^2 \beta_3^2 - 1/3) + 3 \lambda_{111} (\alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2 + \alpha_2 \alpha_3 \beta_2 \beta_3 + \alpha_3 \alpha_1 \beta_3 \beta_1) \quad (2.11)$$

donde λ_{100} = magnetostricción de saturación medida en la dirección $\langle 100 \rangle$
 λ_{111} = magnetostricción de saturación medida en la dirección $\langle 111 \rangle$

Si un dominio está restringido por sus vecinos, la magnetostricción se manifiesta como una energía de deformación en vez de un cambio dimensional. Para mantener una coherencia entre los dominios de cierre y los dominios principales de la Fig. 2.2 (d) se requiere que la energía de deformación sea proporcional al volumen de los dominios de cierre. Esta energía se podría reducir disminuyendo el tamaño de los dominios de cierre, pero se debe mantener un balance entre la energía de las paredes de los dominios, que se verá más adelante.

A continuación se presenta la Tabla 1, con los coeficientes de magnetostricción de algunos materiales cúbicos.

Tabla 1. Coeficientes de magnetostricción de materiales cúbicos [1].

Material	$\lambda_{100} [10^{-6}]$	$\lambda_{111} [10^{-6}]$
Hierro	21	-21
Níquel	-46	-24
Terfenol	90	1600

Para materiales a los que se le aplica una tensión σ , y con magnetostricción isotrópica la densidad de energía es [7, 8],

$$E_{me} = 3/2 \lambda_s \sigma \sin^2 \theta \quad (2.12)$$

donde E_{me} = energía magneto elástica producida al aplicar σ
 θ = ángulo entre la magnetización y la dirección de σ
 σ = tensión o esfuerzo aplicado
 λ_s = magnetostricción de saturación.

2.1.3 Energía de Paredes de Dominios

Dos dominios magnéticos vecinos que tienen momentos magnéticos en diferentes direcciones presentan una zona frontera característica, donde los vectores de magnetización perteneciente a un dominio pasan de una posición a otra, de tal manera que el último de la zona tenga la dirección del dominio vecino (ver Fig. 2.3), a esta zona se la denomina “pared de dominio”.

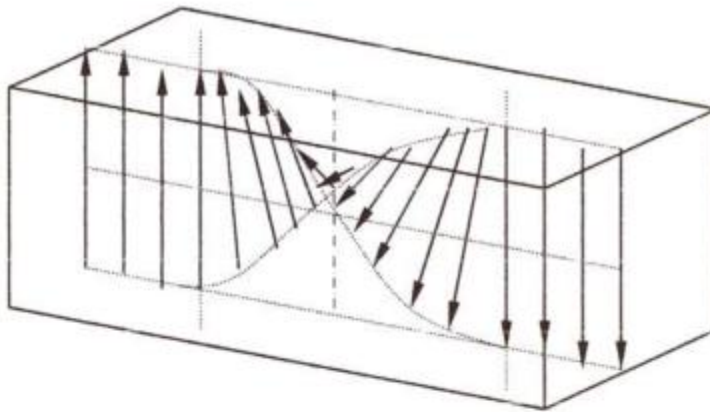


Fig. 2.3 Pared de dominio de 180°, donde se ve el alineamiento de los momentos magnéticos individuales, [5].

La energía de las paredes de los dominios está asociada a dos fuentes que compiten entre sí. una es la energía de intercambio debida a la interacción entre momentos magnéticos, que tiende a hacer a las paredes más anchas porque la energía de intercambio es menor en materiales ferromagnéticos cuando los momentos vecinos están alineados entre sí (teoría de Weiss), y la segunda es la energía de anisotropía que tiende a hacer a las paredes de los dominios lo más delgadas posibles porque la energía de la anisotropía es menor cuando los momentos están alineados a lo largo de las direcciones de los ejes cristalográficos de fácil magnetización.

a) Energía de intercambio

Está dada por,

$$E_{\text{intercambio}} = - \mu_0 \mathbf{m} \cdot \mathbf{H}_e \quad (2.13)$$

donde $\mathbf{m}$ = momento dipolar de un átomo

$\mathbf{H}_e$ = Campo de interacción

En el modelo de Weiss, dijimos que $\mathbf{H}_e$ es proporcional a la magnetización, y la magnetización alcanzada será $\mathbf{M}_s$ para un dominio. Para temperaturas menores a las de Curie, ésta es aproximadamente igual a la magnetización en la saturación macroscópica,

$$\mathbf{H}_e = \alpha \mathbf{M}_s \quad (2.14)$$

Si consideramos la interacción de momentos individuales $\mathbf{m}$ entonces $\mathbf{M}_s = N \mathbf{m}$, donde N es el número de átomos por unidad de volumen,

$$\mathbf{H}_e = \alpha \mathbf{M}_s = \alpha N \mathbf{m} \quad (2.15)$$

La energía por momento debido a la interacción es,

$$E_{\text{intercambio}} = - \mu_0 \alpha N \mathbf{m}_i \cdot \mathbf{m}_j \quad (2.16)$$

donde $\mathbf{m}_i$ y $\mathbf{m}_j$ son los momentos vecinos.

Si sólo consideramos a los vecinos cercanos, se modifica la ecuación anterior, debiendo reemplazar a α con una interacción análoga $\mathcal{J}$. Entonces se define la energía de interacción entre momentos magnéticos en la pared del dominio como,

$$E_{\text{intercambio}} = - \mu_0 z \mathcal{J} \mathbf{m}_i \cdot \mathbf{m}_j \quad (2.17)$$

donde z = número de vecinos cercanos

$\mathcal{J}$ = Constante de interacción entre vecinos cercanos

$\mathbf{m}_i$ y $\mathbf{m}_j$ = momentos magnéticos de los vecinos cercanos.

Evidentemente, la energía de interacción dependerá del ángulo entre los momentos vecinos que se consideren, si ϕ es el ángulo entre momentos vecinos $\mathbf{m}_i$ y $\mathbf{m}_j$ entonces,

$$E_{\text{intercambio}} = - \mu_0 z \mathcal{J} m^2 \cos \phi \quad (2.18)$$

donde ϕ = ángulo entre momentos vecinos

Si consideramos una cadena lineal, cada momento magnético atómico tiene dos vecinos cercanos. Sustituyendo $\cos \phi = 1 - \phi^2 / 2$, (si ϕ es pequeño) entonces la energía de intercambio es,

$$E_{\text{intercambio}} = \mu_0 \mathcal{J} m^2 (\phi^2 - 2) \quad (2.19)$$

La energía de interacción extra debida a la rotación del ángulo de los momentos dentro de la pared es por lo tanto la suma de las energías de interacción individuales sobre todos los momentos en la pared,

$$E_{\text{intercambio extra}} = \mu_0 \mathcal{J} m^2 \phi^2 n \quad (2.20)$$

donde n = número de momentos en la pared.

Para una pared de 180° , es decir en la que los vectores magnéticos finales están desorientados entre sí 180° (ver 2.1.3.1), con un ancho de pared de n celdas de tamaño " a ", $\phi = \pi/n$, la energía por unidad de área es,

$$E_1 = E_{\text{intercambio extra}}/a^2 = \mu_0 \mathcal{J} m^2 \pi^2 / (na^2) \quad (2.21)$$

A partir de este resultado se ve claramente que la energía de interacción es minimizada cuando ϕ es muy pequeño, correspondiente a paredes muy anchas. Por lo tanto la energía de intercambio favorece las paredes de dominios anchas.

b) Energía de Anisotropía

Para los cristales cúbicos, usando una constante de aproximación dada por la energía de un " p "ésimo momento en la pared es [1],

$$E_a = (K_1/4) \sin^2 2p\phi \quad (2.22)$$

donde K_1 = constante de aproximación de la energía de anisotropía para cristales cúbicos.

Sumando esto sobre el ancho de la pared del dominio, la energía por unidad de área es,

$$E_{a \text{ total}} = K_1 n a \quad (2.23)$$

donde a = constante de malla

n = número de átomos en la pared del dominio

Si l_d es el ancho de la pared $l_d = na$.

$$E_{a \text{ total}} = K_1 l_d \quad (2.24)$$

Vemos entonces que la energía de anisotropía se minimiza cuando la pared del dominio es más fina.

La energía por unidad de área total de la pared es la suma de la energía de intercambio y la energía de anisotropía, es decir

$$E_{\text{tot pared}} = E_1 + E_{a \text{ total}} = \mu_0 \mathcal{J} m^2 \pi^2 / (na^2) + K_1 l_d$$

$$E_{\text{tot pared}} = \mu_0 \mathcal{J} m^2 \pi^2 / l_d a + K_1 l_d \quad (2.25)$$

Con lo que la energía total de la pared dependerá de la energía de intercambio y la anisotropía.

2.1.3.1 Tipos de Paredes de Dominios

Generalmente las paredes de dominios se pueden clasificar en paredes de 180° y paredes que no son de 180° , denominadas en adelante paredes no de 180° . En las paredes de dominios de 180° , las direcciones de los dominios vecinos son antiparalelos, y consecuentemente los momentos en los dos dominios vecinos siempre quedan en direcciones cristalográficas equivalentes. Este tipo de paredes ocurre en casi todos los materiales, y se diferencian de las paredes no de 180° , en que no son afectadas por tensiones (ver 2.3.2).

En materiales cúbicos con constante de anisotropía mayor que cero, las paredes no de 180° son todas de 90° , por lo que las direcciones de los momentos magnéticos del dominio vecino, forman ángulos rectos respecto de las anteriores. En hierro, los ejes de fácil magnetización son todas las direcciones $\langle 100 \rangle$, y las paredes de los dominios entre las direcciones $[100]$ y $[\bar{1}00]$ son paredes de 180° , mientras que entre $[100]$ y $[010]$ son paredes a 90° .

En la superficie de muchos materiales magnéticos cúbicos, se presentan los denominados dominios de cierre o "closure domains" como se muestran en la Fig. 2.4 y mencionadas en 2.1.2.1.

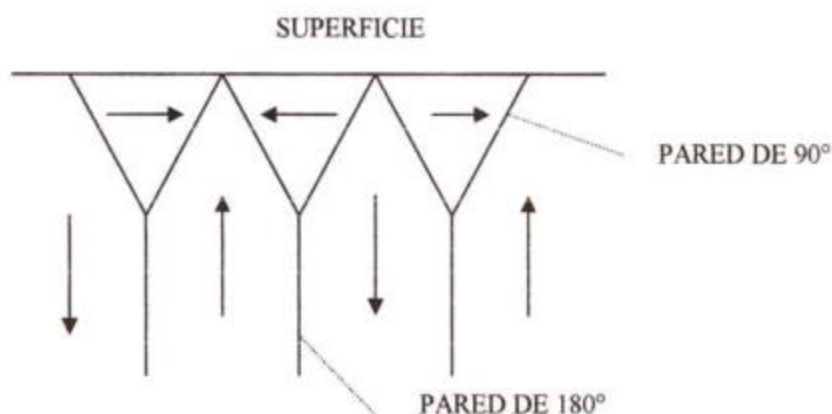


Fig. 2.4 Dominios de cierre en la superficie de un material cúbico con estructura cristalina cúbica, en este caso Fe-Si de grano orientado.

2.1.4 Determinación de la estructura de equilibrio de dominios

Para obtener la configuración de energía mínima de un ensamble de dominios debe encontrarse la estructura de equilibrio, por lo que debe resolverse un complejo conjunto de ecuaciones diferenciales. Estas ecuaciones micro magnéticas (Brown, 1963) [9] asumen continuas variaciones en los momentos magnéticos atómicos, y por lo tanto resultan difícilmente resolubles para un gran número de dominios. En la práctica, se utiliza una teoría de dominios menos compleja, que trata a los dominios como uniformemente magnetizados en saturación (es decir todos los momentos magnéticos atómicos de un dominio se encuentran paralelos y alineados, según ya vimos), con variaciones en la dirección ocurriendo solamente dentro de las paredes de los dominios (Hübner y Schäfer, 2000) [10]. Se supone de aquí en adelante que lejos de las paredes de los dominios la magnetización es la de "saturación" M_s , o también llamada magnetización "espontánea".

2.2 Evolución de la Estructura de Dominios aplicando un campo Magnético

2.2.1 Proceso de Magnetización en términos de la teoría de Dominios

Cuando un campo magnético H , se aplica a una muestra desmagnetizada, el balance de energía previamente existente es perturbado por la energía magneto estática adicional debida al campo. La estructura de dominios entonces debe reordenarse para minimizar la energía bajo la nueva condición.

A bajos campos ocurre el primer proceso en los dominios, que es el crecimiento de los dominios que están favorablemente orientados respecto del campo H aplicado, es decir con los vectores M , orientados aproximadamente paralelos a H , conforme con el criterio de la minimización de la energía $E = - \mu_0 H M_s$, y en consecuencia reduciendo el tamaño de los dominios que están orientados en dirección opuesta al campo, es decir desfavorablemente orientados, como se muestra en la Fig. 2.5 (b). Cuando el material es sometido a niveles de campo magnético externo moderados, comienza un segundo mecanismo que es la rotación de los dominios, en el cual los momentos magnéticos atómicos que están dentro de un dominio desfavorablemente orientado, sobrepasan la energía de anisotropía, y repentinamente rota desde su dirección original de magnetización a una de dirección cristalográfica de fácil magnetización, que está cercana a la dirección de la fuerza magnética externa Fig. 2.5 (c).

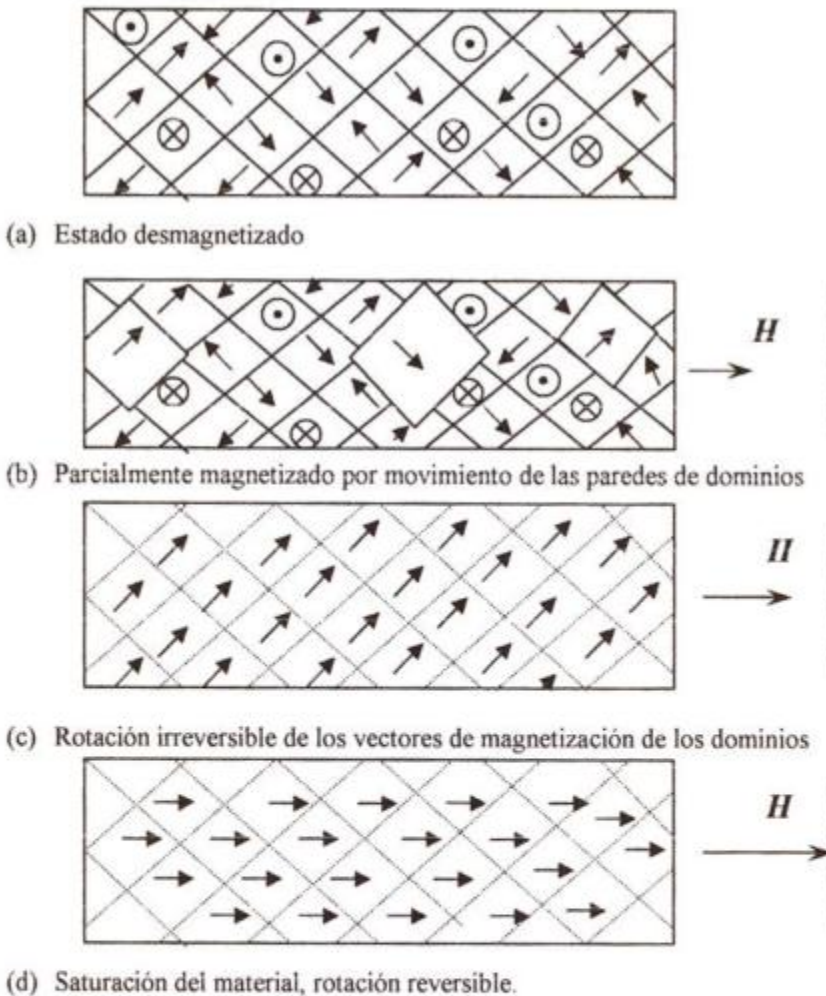


Fig. 2.5 Esquema de los Procesos en los Dominios desde el material desmagnetizado hasta saturación.

El proceso final que ocurre a altos campos magnéticos es el de la rotación coherente de los vectores de magnetización de los dominios Fig. 2.5 (d). En este proceso, en el que dichos momentos están alineados en la dirección de ejes cristalográficos de fácil magnetización muy cercanos a la dirección del campo externo, gradualmente rotan en la dirección en la que la fuerza magnética aumenta, dando como resultado un dominio magnético simple (mono dominio), es decir la saturación del material (Fig. 2.6).

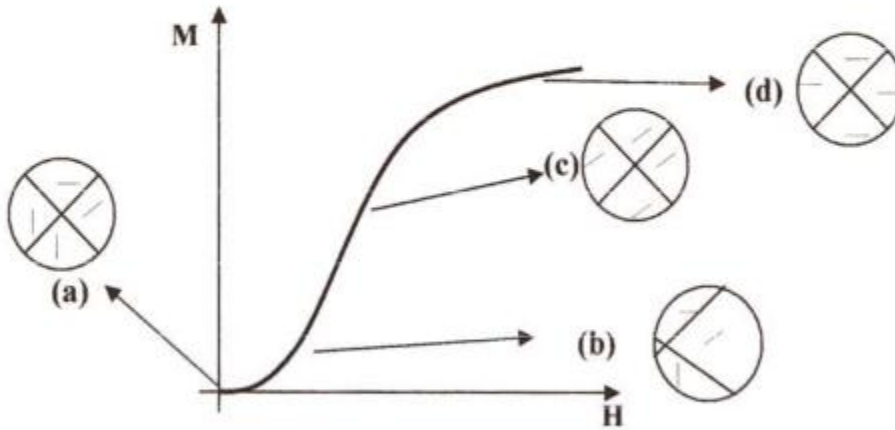


Fig. 2.6 Curva de magnetización inicial y diferentes estados (ver Fig. 2.5), para un campo aplicado en la dirección del eje H

Si llegado a este estado disminuimos la fuerza magnética H , los vectores magnéticos rotarán hasta sus ejes de fácil magnetización más cercanos a la dirección del campo externo. Disminuyendo aún más H , el mono dominio que se había formado se subdivide mediante la nucleación de dominios magnetizados en oposición a la dirección de M .

El proceso de crecimiento de los dominios no está muy afectado por la anisotropía, sin embargo si son afectados por la anisotropía cristalina los procesos de rotación incoherente (irreversibles) y rotación coherente (reversible) de los momentos magnéticos. La rotación de los dominios se puede considerar como una competencia entre la energía de anisotropía $E_a(\theta, \phi)$ y la energía del campo E_H dando una energía total E_{tot} de

$$E_{tot} = E_a(\theta, \phi) + E_H \quad (2.26)$$

$$\text{donde } E_H = -\mu_0 \mathbf{H} \cdot \mathbf{M}_s$$

$\mathbf{M}_s$ es la magnetización dentro del dominio que a los fines prácticos puede ser reemplazada por la magnetización en la saturación.

En el caso de materiales cúbicos puede ser usada como primera aproximación para el cálculo de E_a , la siguiente ecuación,

$$E_a = K_1 (\cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_2 \cos^2 \theta_3 + \cos^2 \theta_3 \cos^2 \theta_1) \quad (2.27)$$

donde $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ son los ángulos del vector magnetización con los ejes cristalográficos.

Como ejemplo el hierro tiene un alto valor de constante de anisotropía K_1 , por eso los procesos de rotación fuera de los ejes de fácil magnetización difícilmente ocurren, y para bajos campos de magnetización los cambios pueden ser atribuidos prácticamente al movimiento de las paredes de los dominios.

2.2.2 Movimiento de las Paredes de Dominios

Durante la discusión del proceso de magnetización, hemos mencionado la rotación de los momentos magnéticos dentro de los dominios como el resultado de la competencia de efectos entre la energía de anisotropía y la del campo. También hemos mencionado rápidamente la idea del crecimiento de los dominios orientados favorablemente sin explicar realmente lo que esto significa.

En efecto, en la aplicación de un campo los momentos magnéticos dentro de las paredes de los dominios pueden rotar más fácilmente, debido a que la dirección resultante de los momentos dentro de las paredes tiene un delicado balance entre la energía de anisotropía y de intercambio. Por lo tanto un cambio en la energía del campo $E = -\mu_0 \mathbf{m} \cdot \mathbf{H}$ puede alterar el balance causando la rotación de los momentos. Dentro del cuerpo principal del dominio, los momentos están fijados a una dirección particular debido a la interacción de intercambio por lo que un campo aplicado puede no alterar inmediatamente el balance de la energía a favor de otra dirección dentro del mismo.

Considerando por ejemplo la Fig. 2.3, si aplicamos un campo débil en la dirección hacia “arriba”, los momentos dentro del dominio hacia “abajo” no cambiarán su dirección porque ellos están en la parte más baja del valle de energía causada por su interacción a través de la energía de intercambio. Sin embargo en la pared del dominio, la energía introducida por el campo magnético puede inclinar el balance levemente a favor de la dirección hacia “arriba”.

El resultado neto es que los momentos dentro de la pared rotan levemente en la dirección del campo, a medida que el campo es incrementado. Para un observador, esto sin embargo aparece como un movimiento de la pared del dominio hacia el lado derecho. Este proceso es denominado movimiento de pared de dominio, pero en realidad no es un movimiento traslacional de toda la pared, sino más bien es como el de una onda, y en efecto autores como Kittel [5] y otros, la han considerado como el movimiento de una onda solitaria, o “solitón”.

Debido a que las paredes de los dominios tienen una energía asociada a ellos, la cual es proporcional a su área, y la cual debe ser minimizada, se puede considerar a las mismas en forma análoga a las superficies de líquidos y su tensión superficial. Esta analogía funciona bien cuando intentamos explicar el comportamiento de las paredes de los dominios, particularmente en los movimientos en forma de arco y reversibles de las mismas, bajo la acción de un campo magnético, y su tendencia a colocarse junto a partículas no magnéticas, impurezas o segundas fases dentro del sólido y en regiones donde existen deformaciones no homogéneas microscópicas.

Si un campo magnético es aplicado a un material ferromagnético, se produce primero el movimiento de las paredes de los dominios, de tal forma que los dominios que están favorablemente alineados con la dirección del campo crecen a expensas de aquellos alineados

desfavorablemente. La energía por unidad de volumen de tales dominios cuando es sujeta a un campo H es,

$$E_H = - \mu_0 \mathbf{H} \cdot \mathbf{M}_s$$

Por ejemplo, el cambio de energía causado por el desplazamiento de una pared de 180° a través de una distancia x es,

$$E = - 2 \mu_0 A x \mathbf{H} \cdot \mathbf{M}_s \quad (2.28)$$

donde A = área de la pared

Por lo tanto la fuerza por unidad de área sobre la pared es,

$$F = - (1/A) dE/dx = 2 \mu_0 \mathbf{H} \cdot \mathbf{M}_s \quad (2.29)$$

Para paredes con alta energía superficial tienden a permanecer planas. El movimiento de paredes de dominios planas ha sido considerado por Kersten [11]. El movimiento de paredes planas bajo la acción de un campo magnético en un espécimen de hierro puro se puede ver en la Fig. 2.4. La energía suministrada por un campo magnético H al material ferromagnético esta dada por,

$$E = - \mu_0 \int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{M}$$

Consecuentemente si una pared de 180° con un área transversal unitaria es movida una distancia dx , el cambio en la magnetización es,

$$dM = 2 M_s dx$$

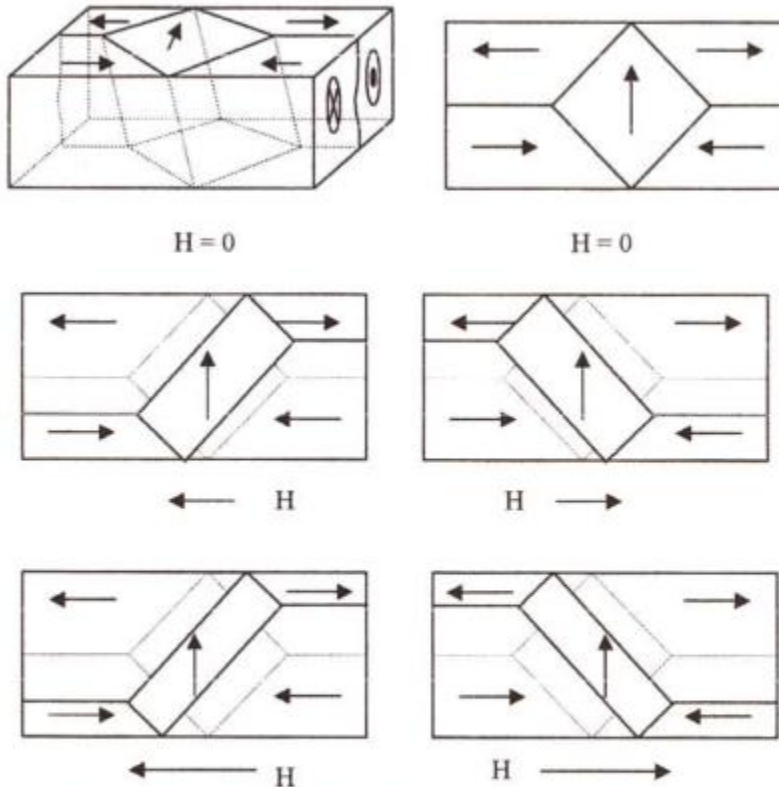


Fig. 2.4 Traslación plana de paredes de dominios en hierro de alta pureza.

Por lo tanto el cambio en la energía del campo es,

$$\Delta E_H = - \mu_0 \int H \cdot M_s dx = - 2 \mu_0 H \cdot M_s x \quad (2.30)$$

donde x = desplazamiento total de la pared.

Si la pared del dominio está sujeta a una energía potencial E_p dentro del material, entonces la energía total es,

$$E_{tot} = E_p - 2 \mu_0 H \cdot M_s x \quad (2.31)$$

La E_p varía a lo largo del sólido dado que los defectos dentro del sólido proveen los mínimos en la E_p , mientras que regiones de micro-tensiones no homogéneas, asociadas con dislocaciones pueden proveer mínimos o máximos dependiendo del signo de las tensiones y del coeficiente de magnetostricción. En general la forma del potencial es irregular como lo muestra la Fig. 2.5, donde se grafica la energía en función de los desplazamientos de la pared.

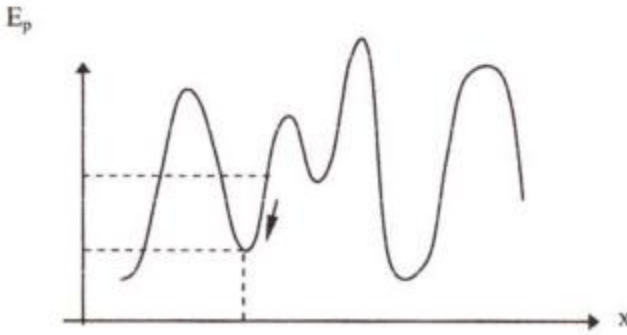


Fig. 2.5 Energía potencial en función de la posición de la pared de un dominio.

Vemos aquí que si estamos en un estadio de energía mínimo, pequeños desplazamientos, es decir la aplicación de pequeños campos, pueden ser completamente reversibles (ver Fig. 2.5).

Otro caso de estudio es también aquel en el que las energías de las paredes de dominios son bajas, entonces las mismas tienden a curvarse Fig.2.6. En la práctica, las paredes de dominios exhiben ambos procesos, es decir traslación reversible y curvado reversible, bajo la acción de pequeños campos magnéticos. Sin embargo aquellas paredes que tienen altas energías prácticamente no se curvan.

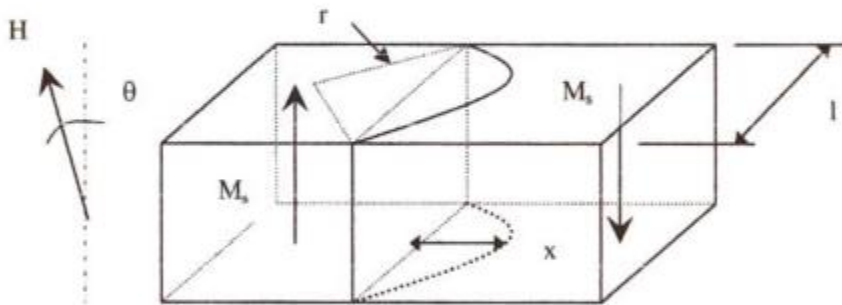


Fig. 2.6 Curvado de una pared de dominio bajo la acción de un campo. La pared es fijada en los bordes y se expande a la manera de una membrana elástica como lo describe Kersten [11] y Neel [12].

2.2.3 Procesos en Dominios

Cuando aplicamos un campo magnético a un material ferromagnético, los cambios en la magnetización pueden ser reversibles o irreversibles dependiendo del proceso de dominio involucrado. Un cambio reversible en la magnetización es aquel en el cual después de la remoción del campo magnético, la magnetización vuelve a su valor original. En materiales ferromagnéticos esto ocurre solamente cuando los campos se incrementan en valores muy pequeños [1].

Los cambios reversibles e irreversibles ocurren a menudo juntos, por cuanto al remover el campo la magnetización no vuelve su valor original. Si el campo magnético es cíclico, se observa una histéresis en M (o en B).

Los mecanismos de dominios que se discutirán serán la rotación y el movimiento de las paredes, ambos mecanismos pueden ser reversibles o irreversibles, y la transición entre ellos depende de la amplitud del campo magnético.

El movimiento de las paredes involucra dos efectos distintos, por un lado el curvado de las paredes de dominios y por otro la traslación. El curvado de las paredes es un proceso reversible para bajas amplitudes de campo. Las paredes de dominios se expanden entonces, como si fueran membranas elásticas bajo la acción de campos magnéticos. Cuando el campo es removido la pared retorna a su posición original. El curvado de las paredes se transforma en irreversible cuando las paredes son suficientemente deformadas, de tal forma que la expansión continúa sin incremento del campo. El curvado puede comenzar siendo reversible pero se transforma en irreversible si durante este proceso la pared encuentra sitios de fijación los cuales evitan la relajación (es decir su retorno) una vez que el campo es removido.

La traslación de pared de dominio es usualmente irreversible a menos que el material sea suficientemente puro, de tal forma que la pared del dominio pueda existir en una región del material libre de defectos. El desplazamiento plano de las paredes puede ser modelado usando un potencial de energía el cual fluctúa en función de la distancia. Existen dos posibles orígenes para las fluctuaciones de corto alcance del potencial, experimentado en las paredes de dominios. Estas son variaciones en deformaciones de corto alcance asociadas con dislocaciones dentro del material, y la presencia de partículas de segunda fase dentro de la matriz del material, por ejemplo la presencia de carburos en aceros. Estas fluctuaciones de energía son de naturaleza aleatoria.

La rotación de los momentos magnéticos dentro de un dominio ya ha sido discutida (ver 2.2.1). A bajas amplitudes de campo la dirección de los momentos magnéticos que corresponden al estado de energía mínimo se desplaza levemente de su eje cristalográfico de fácil magnetización hacia la dirección del campo externo. Esta rotación resulta ser reversible dentro del dominio. Cuando las amplitudes de los campos son intermedias, hay un mecanismo irreversible dentro del dominio cuando los momentos magnéticos rotan desde su eje de fácil magnetización a otro de fácil magnetización más cercano a la dirección del campo. Esto ocurre cuando la energía del campo sobrepasa la energía de anisotropía. En este caso una vez que el momento magnético ha rotado a un eje fácil diferente, los momentos permanecen dentro de este potencial alrededor de este eje de fácil magnetización si el campo se reduce. Cuando los campos magnéticos externos tienen altas amplitudes, la energía mínima del eje de fácil magnetización que está cercana a la del campo, se perturba por la energía del campo

hasta que queda en la dirección del campo. Esto produce una rotación reversible de los momentos magnéticos en la dirección del campo. Finalmente a muy altos campos, hay un cambio reversible en el que los momentos magnéticos dentro del espécimen, los cuales forman un único dominio, se alinean muy cercanamente con la dirección del campo. Esto ocurre porque los momentos magnéticos individuales tienen un movimiento de precesión alrededor de la dirección del campo debido a la energía térmica. Esta precesión no genera un momento magnético resultante en otra dirección pero reduce la componente de magnetización a lo largo de la dirección del campo. Cuando el campo se incrementa, la precesión se reduce. En forma similar, si la temperatura disminuye, el ángulo de precesión se reduce debido a la reducción de la energía térmica [1].

2.3 Teorías de interacción de las paredes de dominios

2.3.1 Inclusiones

Teoría de Inclusiones de Kersten

Una región aislada de un material de segunda fase con propiedades diferentes del material de la matriz se conoce como inclusión. Las inclusiones reducen la energía de las paredes de dominios cuando las mismas interceptan a las inclusiones y entonces las paredes de dominios son atraídas por las inclusiones las cuales efectivamente le impiden su movimiento.

La primera teoría sobre este proceso fue realizada por Kersten [13], suponiendo que las paredes de dominios se mueven en forma plana (ver 2.2.2), de tal manera que al interceptar una inclusión esférica, la reducción de energía de la pared de dominio por unidad de área (ver Fig.2.7),

$$E_{\text{tot pared}} = \pi r^2 \gamma \quad (2.32)$$

donde r = radio de la inclusión

γ = energía por unidad de área de la pared



Fig. 2.7 Reducción de energía de una pared de dominio por la intersección con una inclusión.

Teoría de Inclusiones de Néel

Néel [12] demostró que la energía de interacción entre las paredes de dominios y las inclusiones se ve afectada por los polos libres producidos debido a la presencia de segundas fases (campo de demagnetización propio). En general, las inclusiones tienen propiedades magnéticas diferentes a las de la matriz. Si la componente de magnetización es discontinua a través de la interfase matriz-inclusión, se produce una distribución de polos libres dando un campo de desmagnetización (ver Fig. 2.8). Cuando la pared del dominio intercepta la inclusión los polos libres de la matriz se redistribuyen y la energía de magnetización se divide. Esto produce una disminución de energía magneto estática.

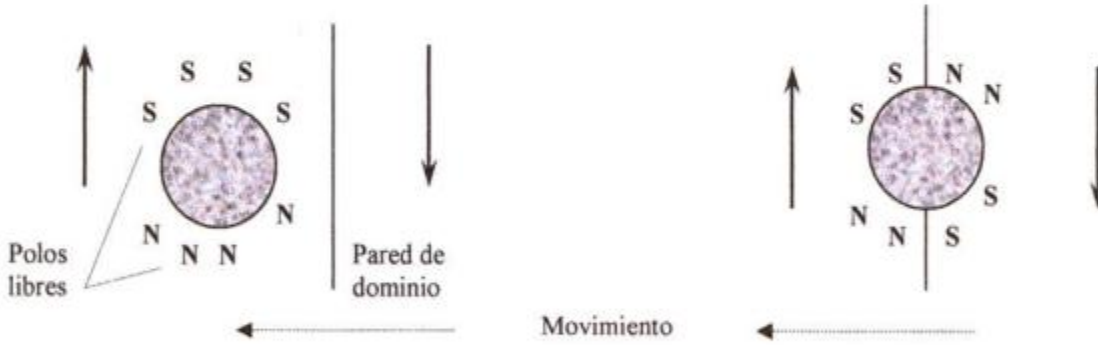


Fig. 2.8 Distribución de polos alrededor de una inclusión antes y después de la intersección con una pared de dominio.

Otra forma de comportamiento es la aparición de dominios de cierre en los alrededores de la inclusión, esto fue predicho por Néels [14] y observado por Williams (1947) [15] (ver Fig. 2.9).

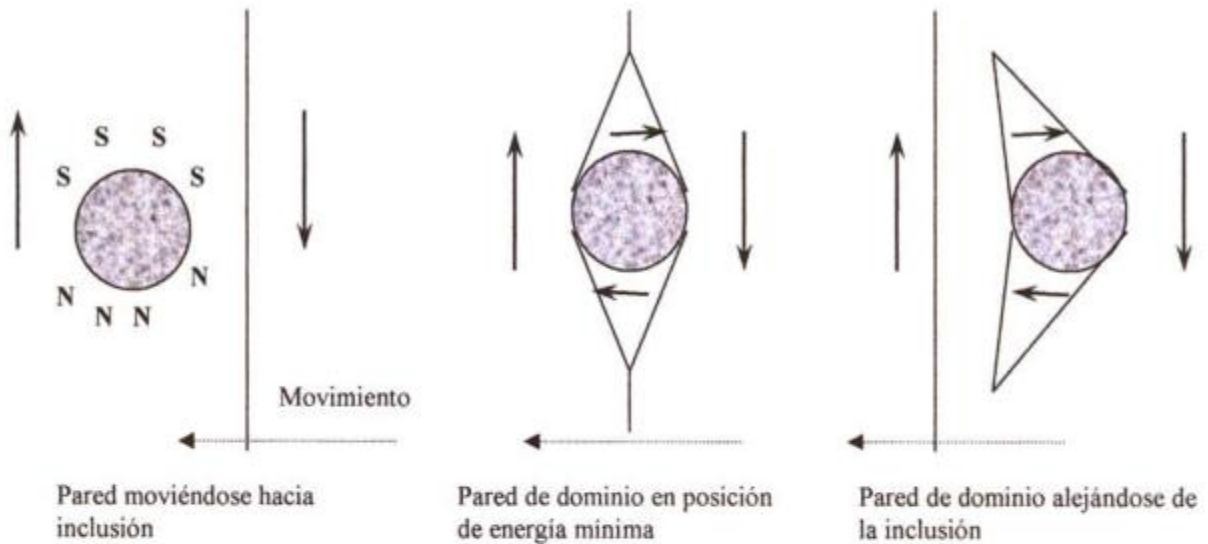


Fig. 2.9 Formación de dominios de cierre por la intersección de una pared de dominio con una inclusión.

2.3.2 Zonas de tensiones inhomogéneas

Las tensiones afectan las propiedades magnéticas mediante la variación de la energía magneto elástica como se vió en 2.1.2.1. Los campos de tensiones asociados con vacancias,

solutos y dislocaciones se extienden sobre unos pocos planos atómicos. Sin embargo si las dislocaciones son suficientemente numerosas, interactúan unas con otras formando redes y entrecruzamientos, creando así una compleja distribución de microtensiones. La interacción entre paredes de dominios y campo de tensiones depende del tipo de pared (Träuble, 1969) [16]. Las paredes del tipo 180° interactúan más fuertemente con los campos de tensiones que las paredes no de 180° . El estado de tensiones locales determina la posición y energía de las paredes de 180° , pero la posición de las no a 180° , permanecería inalterada (Cullity, 1972) [17]. Una interacción de largo alcance entre las paredes de 180° con los campos de tensiones las harían menos móviles, requiriéndose altos campos aplicados antes que éstas se muevan (Träuble, 1969). Por ello para bajos campos es esperable que ocurra predominantemente el movimiento de paredes no de 180° .

Con respecto a las tensiones aplicadas en un material ferromagnético, consideremos una muestra de hierro cuyos ejes de fácil magnetización $\langle 100 \rangle$, coinciden con la dirección de aplicación de una tensión de tracción. Esta tensión produce una disminución de la energía en la dirección $\langle 100 \rangle$, que no ocurre en las direcciones $\langle 010 \rangle$ y $\langle 001 \rangle$, los cuales están en un estado de equilibrio energético en el estado no tensionado. Sin embargo la energía de la dirección $\langle 100 \rangle$ se reduce en la misma cantidad que lo incrementado en la dirección $\langle 100 \rangle$. Consecuentemente, una pared de 180° separando dominios alineados a lo largo de esas direcciones no es afectada por las tensiones (ver Fig. 2.10). Si consideramos ahora una pared de 90° entre dominios a lo largo de las direcciones $\langle 100 \rangle$ y $\langle 010 \rangle$ las cuales en el Fe por ejemplo, son energéticamente iguales en el estado no tensionado, la aplicación de una tensión de tracción a lo largo de la dirección $\langle 100 \rangle$, causa que el dominio en la dirección $\langle 100 \rangle$ sea energéticamente favorecida, por lo que la pared de 90° se moverá bajo la acción de la tensión incrementando el volumen del dominio de $[100]$ a expensas del dominio de $[010]$. Esto demuestra que las paredes de dominios de 90° son sensibles a las tensiones [1] (ver Fig. 2.10).

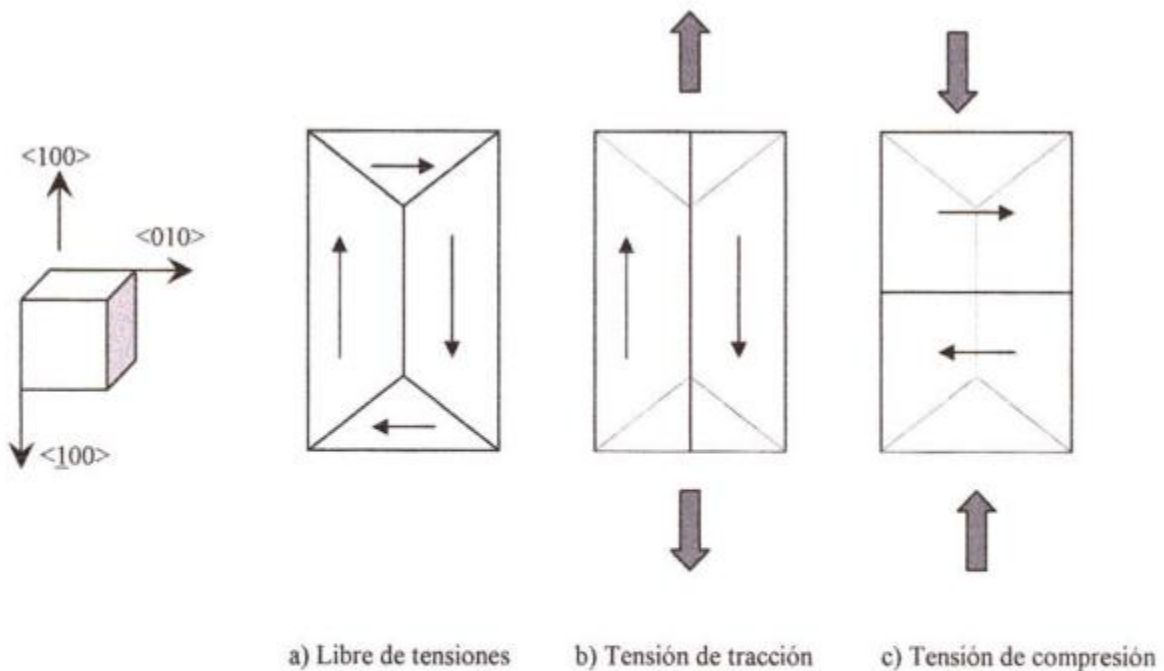


Fig. 2.10 Esquema de la microestructura de dominios magnéticos y el movimiento de las paredes de dominios según el tipo de tensión aplicado [18].

2.3.3 Bordos de grano

En general dos granos adyacentes a un borde de grano, están orientados arbitrariamente el uno respecto del otro, y sus direcciones de fácil magnetización no son paralelas. Si el campo aplicado no es suficiente como para hacer rotar el vector de magnetización del grano fuera de su dirección fácil, hay una discontinuidad en la componente de magnetización normal al borde de grano, y aparecen polos libres.

Se pueden llegar a formar dominios subsidiarios en el borde si la reducción de energía magneto estática alcanzada por éste es mayor que la energía requerida para el movimiento de la pared del dominio.

Todo esto produce junto con la deformación local en el borde de grano, impedimentos para el movimiento de las paredes de dominios.

REFERENCIAS

-
- [1] David Jiles, "Introduction to Magnetism and Magnetic Materials", Chapman & Hall, 1991.
 - [2] Weiss P., "Compt. Rend.", 143, 1136, 1906.
 - [3] Weiss P., "J. Phys.", 6, 661, 1907.
 - [4] Landau L. D., Lifshitz E. M., "Physik Z. Sowjetunion", 8, 135, 1935.
 - [5] Kittel C., Galt J. K., "Ferromagnetic domains", Solid State Physics, 3, 437, 1956.
 - [6] Brooks H., "Physical Review", 58, 909-918, 1940.
 - [7] Chikazumi S., "Physics of Ferromagnetism", 2nd ed.: Oxford University Press, 1997.
 - [8] Kittel C., "Physical theor of ferromagnetics domains", Revs. Mod. Phys., 21, 541, 1949.
 - [9] Brown W. F., Jr., "Micromagnetics", Willey, 1963.
 - [10] Hübert A., Schäfer R., "Magnetic Domains: The Analysis of Magnetic Microstructures", Springer, 2000.
 - [11] Kersten M., "Grundlagen einer Theorie der Ferromagnetischen Hysterese und der Koerzitivkraft", Hirzel, Leipzig, 1943.
 - [12] Neel L, Annales Univ. Grenoble, 22, 299, 1946.
 - [13] Kersten M., "Phys. Z., 44, 63, 1943.
 - [14] Neel L, "Cahiers de Physique", 25, 21, 1944.
 - [15] Williams H. J. "Physical Review", 10, 646-647, 1947.
 - [16] Träuble H., "Crystal Defects in Ferromagnetic Single Crystals", Magnetism and Metallurgy, ed. A. E. Berkowitz & E. Kellner, Academic Press, New York, 1969.
 - [17] Cullity B. D., "Introduction to Magnetic Materials", Addison-Wesley, 1972.
 - [18] Kleber X., Vincent A., "On the role of residual internal stresses and dislocations on Barkhausen noise in plastically deformed steel", NDT&E International, 37, 439-445, 2004.

Capítulo 3

Propiedades Magnéticas y Medición del Efecto Barkhausen

En este Capítulo se presentan las Propiedades Magnéticas de los materiales ferromagnéticos definiendo las constantes características de los materiales policristalinos ferromagnéticos a partir de su ciclo de histéresis. Se describe el Efecto Barkhausen, incluyendo algunos de los diferentes métodos para su estudio. Se hace un muy breve resumen de los métodos de análisis de las señales obtenidas en la medición del Efecto Barkhausen, bajo distintas condiciones del material, presentando a la Medición del Ruido Barkhausen y a la Emisión Magneto Acústica como Método de Ensayo No Destructivo. Finalmente se presenta la relación entre el Ruido Barkhausen, la Emisión Magneto Acústica y la microestructura de los materiales ferromagnéticos.

3.1 Propiedades Magnéticas

3.1.1 Ciclo de Histéresis Magnética

Cuando un campo magnético H se aplica a un medio, la respuesta de éste es su inducción magnética B , también llamada densidad de flujo. La relación entre la inducción magnética y el campo magnético es una propiedad denominada permeabilidad del medio [1].

$$B = \mu H \quad (3.1)$$

donde B = Inducción magnética [T]

μ = permeabilidad magnética a ese nivel de H de ese material [henries/m]

H = fuerza magnética [A/m].

La permeabilidad en la mayoría de los materiales ferromagnéticos no es constante y depende del valor del campo magnético o fuerza magnética H .

Otra forma de ver a la inducción magnética es considerar a ésta, como formada por la contribución de la inducción magnética en el espacio vacío, más la inducción generada por la Magnetización del material M , de la que ya se había hablado (ver 2.1.2).

Vemos entonces que la inducción magnética B , que es la respuesta del material a un campo magnético, está formada por dos componentes, una la inducción magnética en el vacío dada por $\mu_0 H$, y otra dada por la Magnetización del material definida como $\mu_0 M$. Entonces la inducción magnética es simplemente,

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (3.2)$$

donde B = Inducción magnética

μ_0 = permeabilidad magnética en el espacio vacío

H = fuerza magnética

M = magnetización en el material

La forma clásica de representar las propiedades magnéticas macroscópicas de un material ferromagnético es a través del gráfico de la inducción magnética B vs. H , la fuerza magnética (Fig. 3.1). Este gráfico muestra la aparición de una histéresis, es decir que al disminuir la fuerza H la inducción no disminuye en igual forma que al incrementarla. Este gráfico es comúnmente denominado ciclo de histéresis, y muestra las características magnéticas del material para su elección en sus diferentes aplicaciones.

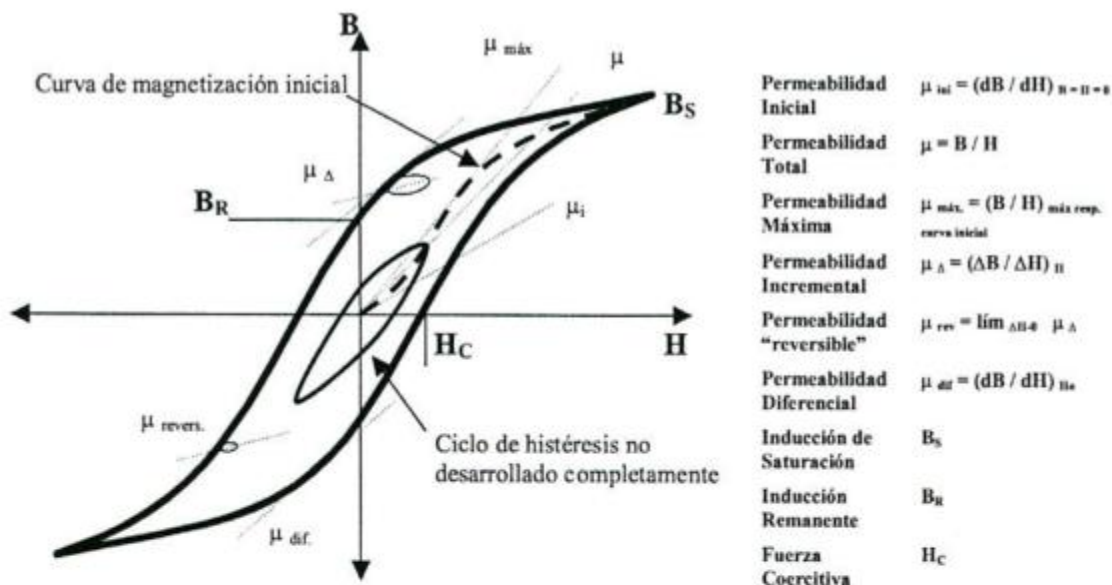


Fig. 3.1 Ciclo de histéresis típico de un material ferromagnético.

Se puede observar en el ciclo de histéresis que existe un nivel en el que si incrementamos indefinidamente la fuerza magnética H , la inducción magnética B no se incrementa notablemente. Este nivel de inducción se denomina de saturación B_s , y la magnetización del material M_s , magnetización de saturación. En este estado el material se considera en la condición en la que los dipolos magnéticos dentro del mismo están alineados con el campo magnético H .

Otro parámetro característico que se puede observar es la Inducción remanente o Remanencia B_R , y la Magnetización remanente M_R cuando la fuerza magnética H es cero.

$$B_R = \mu_0 M_R \quad (3.3)$$

donde B_R = Inducción magnética remanente [T]
 μ_0 = permeabilidad magnética en el espacio vacío [henries/m]
 M_R = magnetización remanente [A/m].

La inducción magnética puede hacerse cero aplicando un campo magnético inverso H_c . Esta fuerza magnética es denominada Fuerza Coercitiva del material. Se comprueba experimentalmente que la fuerza coercitiva se ve afectada por factores tales como los tratamientos térmicos o la deformación.

3.1.2 Variaciones de los parámetros determinados en el Ciclo de Histéresis

Los parámetros que son habitualmente determinados en un ciclo de histéresis incluyen la Inducción magnética en la Saturación B_S , Inducción remanente B_R , la Fuerza coercitiva H_C , la permeabilidad máxima $\mu_{m\acute{a}x}$ e inicial μ_{inic} y la pérdida por histéresis W_H ¹. Es bien conocido que estos parámetros son sensibles a factores como tensiones, deformaciones, tamaño de grano, tratamientos térmicos y presencia de precipitados o segundas fases [1]. En la Fig. 3.2 se pueden ver dos ciclos de histéresis del mismo material, uno su estado magnéticamente "blando", el otro después de un tratamiento en un estado magnéticamente "duro".

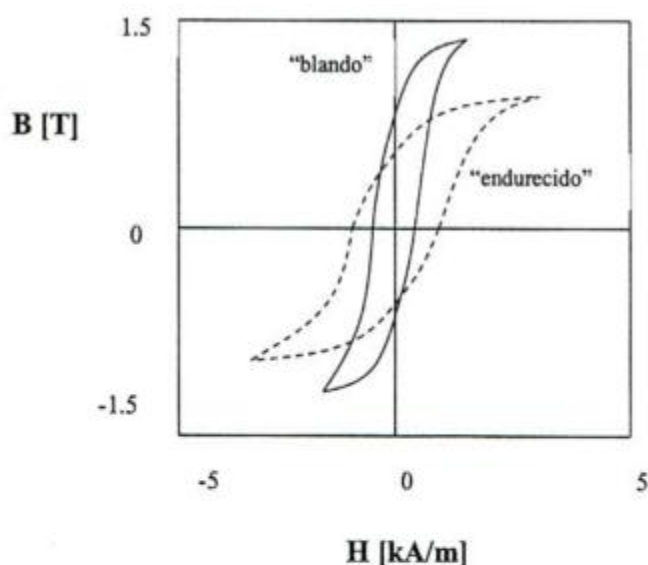


Fig. 3.2 Ciclo de histéresis de un hierro "blando" y uno "endurecido" por medio de adición de carbón, material no magnético o por trabajado en frío [1].

¹ La pérdida por histéresis W_H es el área encerrada por la curva de histéresis (ASTM A 340).

3.2 Discontinuidades en la Magnetización

3.2.1 Efecto Barkhausen y Ruido Barkhausen

La apariencia continua del ciclo de histéresis se debe a las propiedades del instrumental utilizado para determinarla. Si aumentamos suficientemente la resolución de la medición de la inducción magnética B , podríamos observar un cambio discontinuo de la misma a medida que aumentamos la fuerza magnética H como se muestra en la Fig. 3.3.

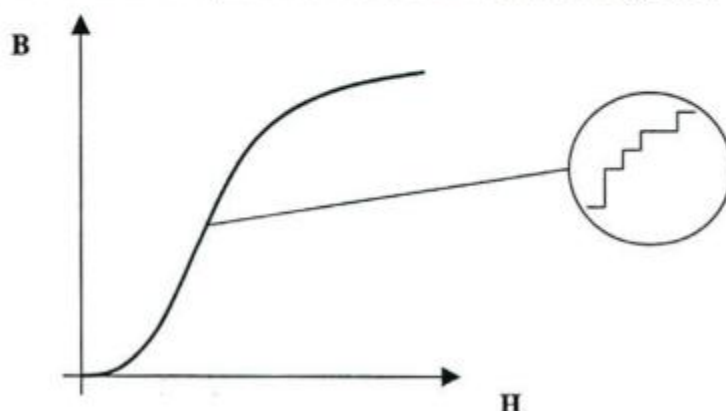


Fig. 3.3 Discontinuidades Barkhausen a lo largo de la curva de magnetización inicial

Este fenómeno fue observado por primera vez en 1919 por Heinrich Barkhausen [2], cuando una pieza de hierro rodeada por una bobina, la cual estaba conectada a un amplificador y este a un parlante, era magnetizada mediante una fuerza magnética H proveniente de un imán. Al acercar el imán, se podían escuchar una serie de “chasquidos” en el parlante, debido a pequeños pulsos de voltaje inducidos en la bobina. Estos pulsos de voltajes de acuerdo a la ley de Faraday, se debían a pequeños cambios en el flujo magnético que atravesaba la bobina, producido por cambios discontinuos en la magnetización M y por ende cambios discontinuos en la inducción B en el material (ver Fig. 3.4), es decir,

$$V = - N d\phi / dt \quad (3.4)$$

donde V = Voltaje inducido en la bobina [V]

ϕ = Flujo magnético = $B \cdot A$ [weber]

N = Número de vueltas en la bobina

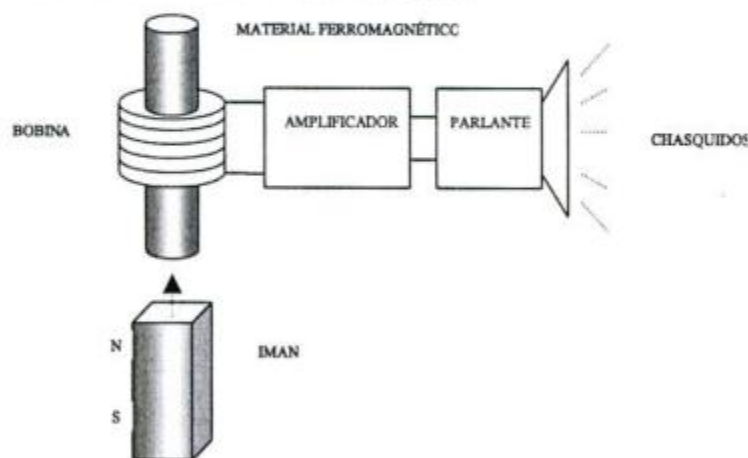


Fig. 3.4 Esquema de la experiencia realizada por H. Barkhausen (1919)

A estos pulsos de voltaje inducidos en una bobina se los denomina Ruido Barkhausen (RB), Ruido Barkhausen Magnético o Emisión Barkhausen magnética.

Barkhausen utilizó estos resultados para apoyar las hipótesis de los dominios magnéticos que predecía la teoría de Weiss (1906, 1907)[2].

La Emisión Barkhausen o Ruido Barkhausen (RB) se ve muy afectada por cambios en la microestructura de los materiales y también por tensiones, debido a que es el producto del movimiento de las paredes de dominios y la rotación de los vectores de magnetización de los mismos, procesos ya comentados en el Capítulo II. Los movimientos de un gran número de paredes de dominios, y/o la rotación de vectores de magnetización de dominios, se ven reflejados en la bobina, como los pulsos de voltaje, como ya se ha explicado. Todo esto ha impulsado al estudio de esta emisión con el objetivo de transformarlo en un método de Ensayo No Destructivo.

3.2.2 Emisión Magneto Acústica (EMA)

La Emisión Magneto Acústica (EMA) es producida por microscópicos cambios en la deformación debido a la magnetostricción, cuando se produce el movimiento irreversible de paredes de dominios no de 180° . Estos cambios microscópicos en la deformación producen ondas elásticas que pueden ser detectadas mediante un transductor piezoeléctrico acoplado a la pieza. La EMA fue observada por primera vez por Lord [3] en 1975.

El número relativo de paredes de dominios de 180° y las que no son de 180° se ve afectada por la aplicación de tensiones uniaxiales, por ello se la ha considerado como un medio interesante para detectar tensiones en materiales ferromagnéticos, como lo señalaron autores tales como Buttle y otros [4].

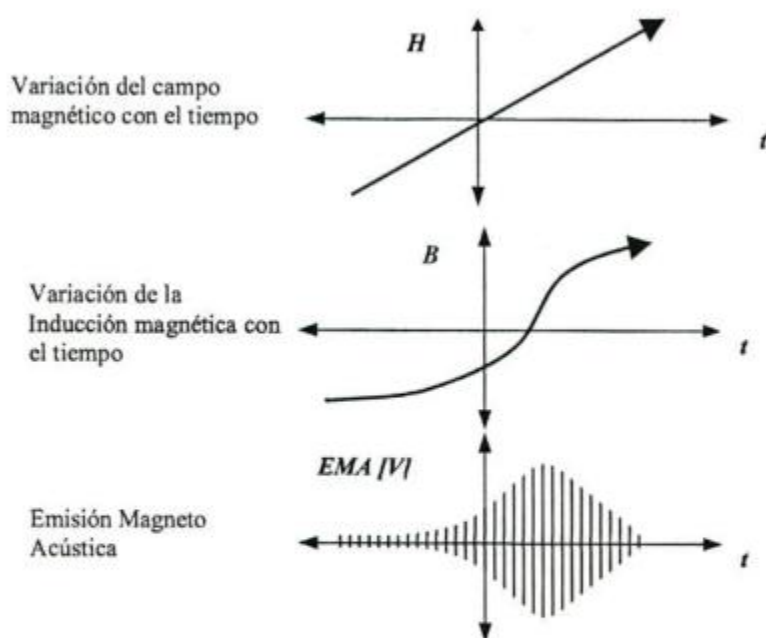


Fig. 3.5 Diagrama esquemático mostrando la fuerza magnética H en el tiempo, la inducción magnética B sobre la muestra en el mismo periodo, y la EMA detectada por un transductor.

La EMA depende inicialmente de la magnetostricción (λ_0), por lo que cuando $\lambda_0 = 0$ la EMA es cero, incrementándose a medida que aumenta λ_0 . También la amplitud de la EMA depende fuertemente de la frecuencia y amplitud de la fuerza magnética H aplicada. La Fig. 3.5 muestra esquemáticamente la EMA cuando se incrementa H en el tiempo.

3.2.3 Ruido Barkhausen, EMA y dominios magnéticos

Tanto el Ruido Barkhausen como la Emisión Magneto Acústica están relacionados con los cambios irreversibles en la magnetización (y reversibles en menor medida). Estos cambios irreversibles pueden ocurrir como resultado de movimientos irreversibles de las paredes, el despegue plano o no plano de las paredes de dominios desde sus sitios de fijación, o por la expansión discontinua de la pared de dominio una vez que su curvatura excede su valor crítico. La emisión Barkhausen puede ser también producto de la rotación discontinua de los momentos dentro del dominio desde su eje de fácil magnetización hasta una alineación cercana a la del campo externo aplicado. Sin embargo la contribución de este efecto en la práctica es menos significativa [1].

El Ruido Barkhausen puede ser causado por el movimiento de paredes de 180° como por las paredes no de 180° . Sin embargo la Emisión Magneto Acústica (EMA) es solamente causada por el movimiento discontinuo de paredes no de 180° , o por la rotación irreversible de dominios a través de ángulos diferentes a 180° . Esto se debe a que los pulsos acústicos se generan por cambios en las tensiones, y estos no se generan como resultado del movimiento de paredes de 180° o la rotación de los vectores de magnetización de estos dominios, debido a que la deformación a lo largo de un eje particular es independiente de la dirección del momento magnético, si los momentos están alineados con dicho eje [5] (ver también 2.3.2).

3.3 Medición del Efecto Barkhausen

Existen diferentes métodos para la medición de los cambios discontinuos en la magnetización, dentro de los cuales están los ópticos, los inductivos y los acústicos. Los primeros se basan en la aplicación del efecto Kerr y el efecto Faraday [1]. Los inductivos se fundan en la utilización de la ley de Faraday, al producirse un voltaje inducido cuando varía con el tiempo el flujo magnético dentro de una bobina. Por último los métodos acústicos se utilizan para detectar la EMA, mediante sensores acústicos en contacto con el material que es magnetizado.

3.3.1 Método Inductivo

Debido a que el efecto Barkhausen incluye cambios rápidos en el flujo magnético, el método más directo para su análisis reside en la medición de esta variación de flujo mediante el voltaje inducido en una bobina, como ya se explicó en 3.2.1. Existe una variedad de dispositivos para la medición del RB desde distintos puntos de vista como ser el estudio de la física de dominios, como Ensayo No Destructivo, etc. Dentro de la variedad de dispositivos que se encuentran en la literatura, uno de lo más utilizados (y el que se eligió para su construcción en esta Tesis) es el que se muestra en la Fig. 3.6. Este esquema es generalmente

adoptado por ser versatilidad para la medición de piezas de distintas formas, orientado al estudio como análisis no destructivo. El dispositivo cuenta con un yugo de material ferromagnético, al que se le arrolla una bobina, con el objeto de crear un campo magnético controlado. Este campo magnético es producido por el paso de una corriente que produce una fuerza magnética sobre el yugo. Dicha corriente será variable en el tiempo, con una forma de variación que generalmente es lineal o sinusoidal. La misma es provista por un alimentador de corriente capaz de suministrarla a baja frecuencia, para que puedan ser fácilmente observadas las discontinuidades Barkhausen. Este crecimiento lento de la corriente produce una lenta magnetización de la pieza en estudio, donde se producirá el RB. Para detectarlo, se coloca una bobina sensora en la superficie de la misma, en esta bobina se inducirá un voltaje, que luego deberá ser amplificado y filtrado para su análisis. Es entonces este voltaje inducido, variable en el tiempo, la señal que surge del dispositivo como producto del efecto Barkhausen. La señal es posteriormente analizada y correlacionada con la microestructura del material en el caso de utilizar este dispositivo como un método de Ensayo No Destructivo.

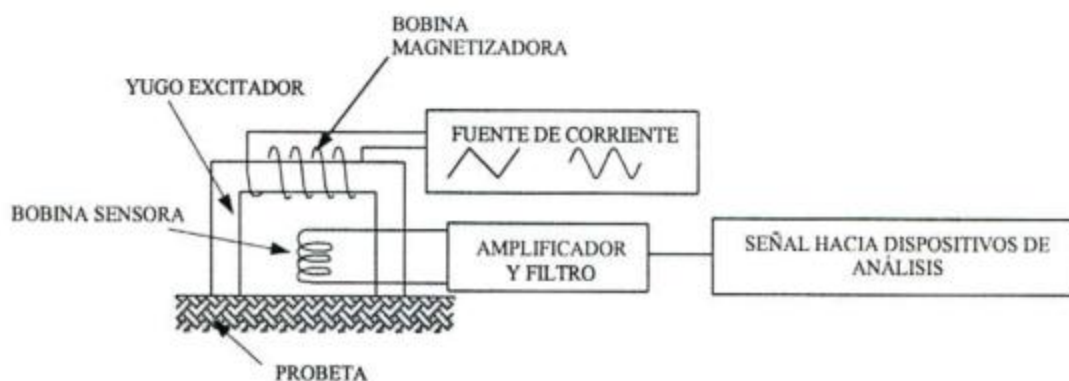


Fig. 3.6 Dispositivo típico para la medición del RB.

3.3.2 Método Acústico

Como ya se dijo la EMA aparece también durante la magnetización de un material ferromagnético. El dispositivo para la medición de la EMA, es similar al dispositivo para la medición del RB mediante el método inductivo, y se utiliza un transductor piezoeléctrico (sensor de Emisión Acústica). En la Fig. 3.7 se muestra en forma esquemática el dispositivo para la medición de la EMA.

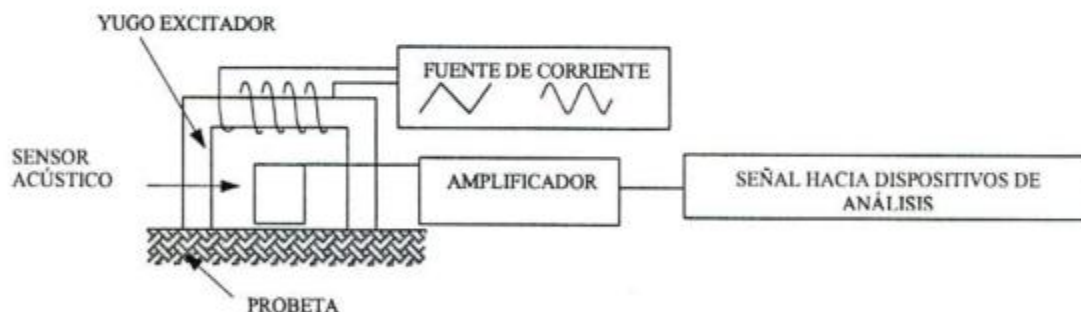


Fig. 3.7 Dispositivo elegido para la medición de la EMA

3.3.3 Otros Métodos

Existen algunas técnicas para la visualización de los dominios magnéticos durante el proceso en el que se produce el efecto Barkhausen. Como ya se explicó se basan en la aplicación del efecto Kerr y el efecto Faraday. En ambos casos la dirección de la magnetización afecta la orientación de la polarización de la luz transmitida (efecto Faraday) o luz reflejada (efecto Kerr) (ver Fig. 3.8) [6].

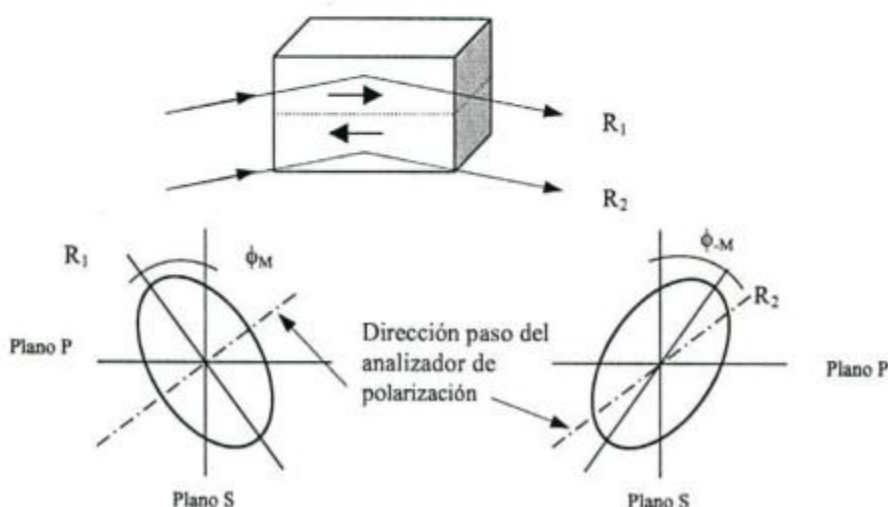


Fig. 3.8 Diagrama esquemático de la observación de los dominios magnéticos mediante el efecto Kerr.

Cabe aclarar que las características de las señales tanto en el método inductivo como en el acústico, están muy influenciadas por un gran número de factores experimentales como ser frecuencia de excitación, nivel de inducción sobre la probeta, forma del dispositivo de excitación y sensor, tipos de dispositivos de amplificación y filtrado, etc. Con respecto al procesamiento de las señales ocurre algo similar, existiendo en la literatura un considerable número de parámetros y tipos de procesamiento de las señales obtenidas. Todo esto dificulta la comparación e interpretación de los resultados de diferentes autores.

3.4 Métodos de Análisis de Señales

3.4.1 Ruido Barkhausen

El RB como ya se indicó, se genera cuando un material magnético es sometido a un campo magnético variable en el tiempo. Este es el resultado de los movimientos reversibles e irreversibles de las paredes de dominios de 180° y las no de 180° , o de la rotación súbita de los vectores de magnetización de un dominio magnético a altos campos [5]. Las señales obtenidas con el equipo descrito en 3.3.1, son pulsos de voltajes variables en el tiempo. En la Fig. 3.8 se indican un ciclo de histéresis de un material ferromagnético, y la señal RB.

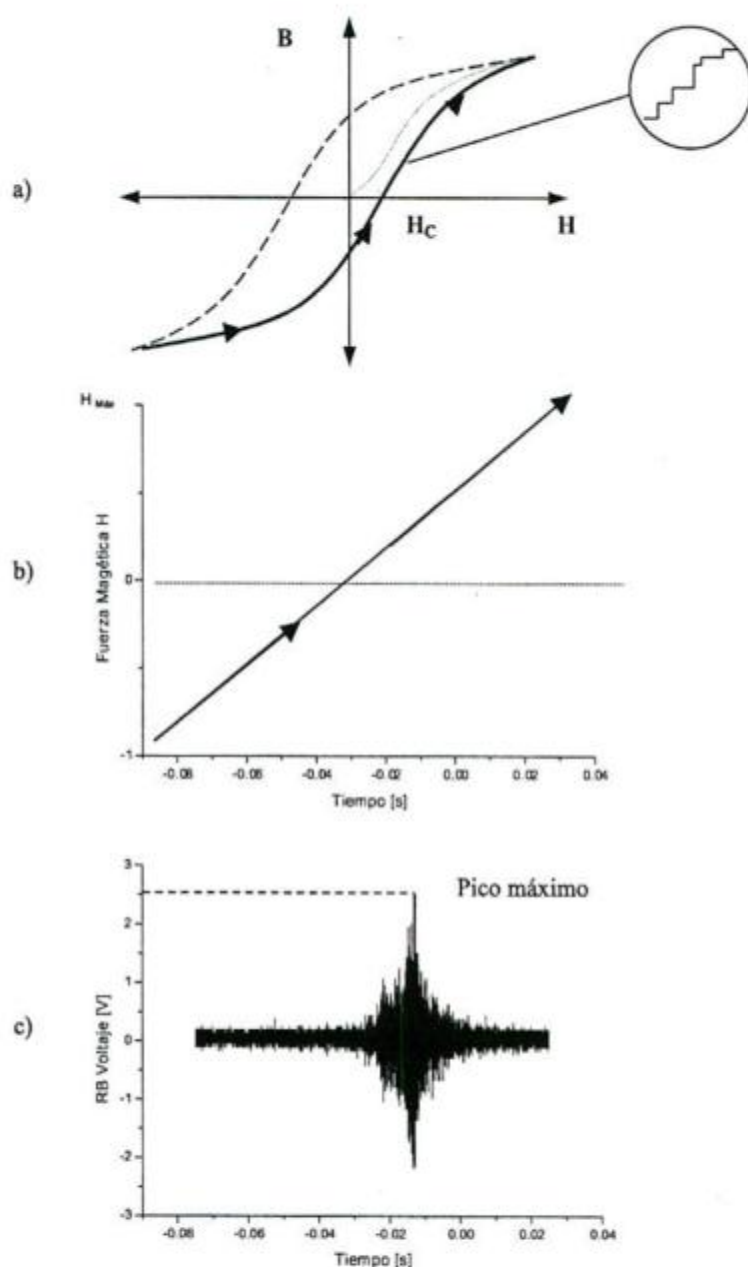


Fig. 3.8 Curva de histéresis (a) mostrando los saltos discontinuos en la magnetización, la fuerza magnética aplicada H (b), y señal obtenida como RB (c) [este trabajo].

Sobre la señal RB obtenida se pueden realizar una variedad de análisis. En este trabajo se comentarán muy brevemente los parámetros que se han utilizado para el mismo. Uno de ellos es el análisis de la señal de una de las ramas del ciclo de histéresis determinando el valor el Pico máximo de la señal. En la Fig. 3.8 se puede observar a modo de ejemplo una señal y su Pico máximo.

Otro es cálculo del RMS ("root-mean-square") de toda la señal, durante un tiempo que debe ser fijado previamente por el operador (por ejemplo durante el tiempo de muestreo como se muestra en la Fig. 3.8).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} v(t)^2 \cdot dt} \quad (3.5)$$

donde RMS = Valor cuadrático medio [V]
 $v(t)$ = voltaje de la señal, variable en el tiempo
 Δt = tiempo de integración

Si la señal es discretizada, el cálculo generalmente se realiza con un osciloscopio digital mediante,

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2} \quad (3.6)$$

donde RMS = Valor cuadrático medio [V] [7]
 v_i = voltaje de la señal, variable en el tiempo, valor discreto
 N = número de intervalos de discretización del osciloscopio (fijado por la frecuencia de muestreo)

En la Fig. 3.9 se pueden ver un ejemplo de señal RB con el tiempo total de integración y el valor de Pico máximo.

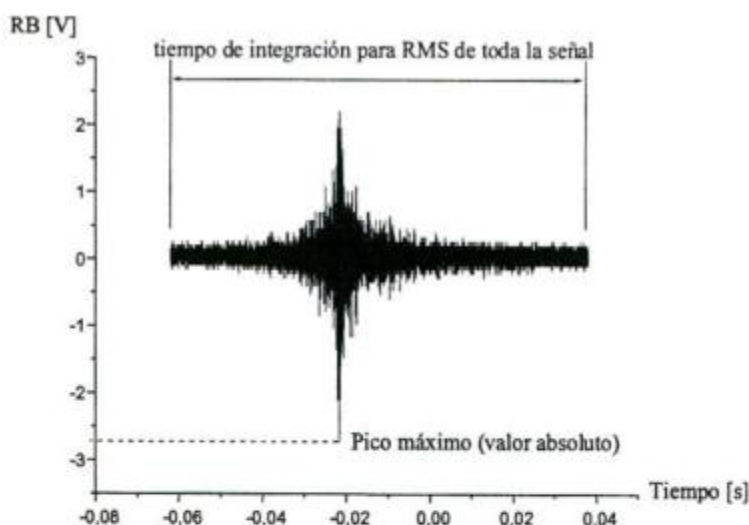


Fig. 3.9 Ejemplo de señal RB donde se indican el Pico máximo, y tiempo de integración para Valor RMS de toda la señal [este trabajo].

El análisis de las señales RB, a partir del RMS de la señal calculado en base a la constante de tiempo de integración dado por el equipamiento electrónico (Δt), es uno de los métodos actualmente más difundidos de análisis. La Fig. 3.10 b), muestra en línea llena la forma del RMS ($V_{RMS} = f(t)$) electrónicamente calculado para una constante de tiempo de integración muy pequeña (del orden de decenas de microsegundos) de una de las ramas del ciclo de histéresis; en línea a trazos se indica el RMS de la otra rama.

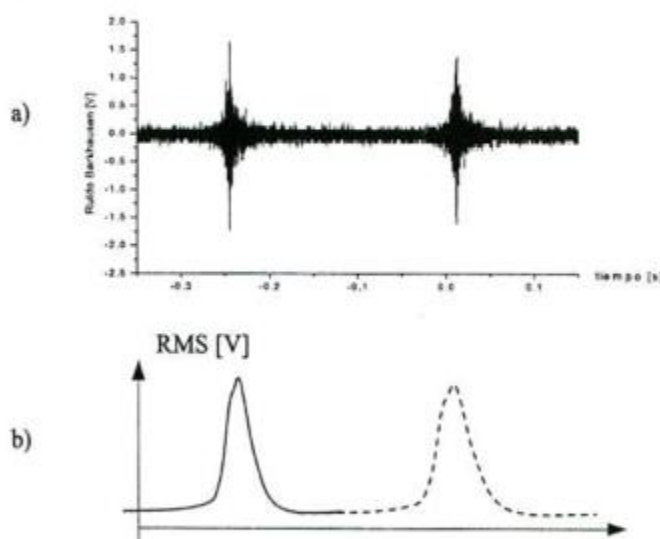


Fig. 3.10 a) Señal RB y b) RMS obtenido [este trabajo].

Otro análisis que se suele realizar es el estudio de Fourier de la señal [8]. El análisis se realiza sobre la señal discretizada, generalmente la señal de una de las ramas del ciclo de histéresis, mediante la implementación de un algoritmo rápido que calcula la Transformada de Fourier Discreta (en inglés con las siglas FFT, Fast Fourier Transform) [8,9]. La Transformada de Fourier sirve para procesos estacionarios, y debido a que el RB no lo es, se debería utilizar la Transforma de Fourier de corta duración o bien la Transformada Wavelet [10]. Sin considerar tiempos largos o sea sin considerar las bajas frecuencias, la FFT es una herramienta adecuada y esto explica que se utilice en muchos trabajos.

$$X_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cdot W^{nk} \quad (3.7)$$

donde x_k = vector complejo función de la forma de onda, de parte imaginaria cero

X_n = resultado del análisis, número complejo

$W = e^{-j 2\pi / N}$

N = numero de puntos en x_k y X_n [7].

El esquema típico del análisis de RB se muestra en la Fig. 3.11

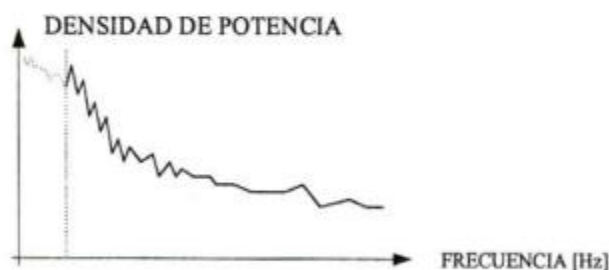


Fig. 3.11 Análisis de Fourier para una Señal RB.

También es posible encontrar en la literatura el estudio de la distribución de la amplitud de pulsos de una señal, en el que se determinan varios parámetros como amplitud máxima, número de pulsos en función del tiempo o campo aplicado, etc. En la Fig. 3.12 se muestra una distribución de pulsos típica para una señal RB.

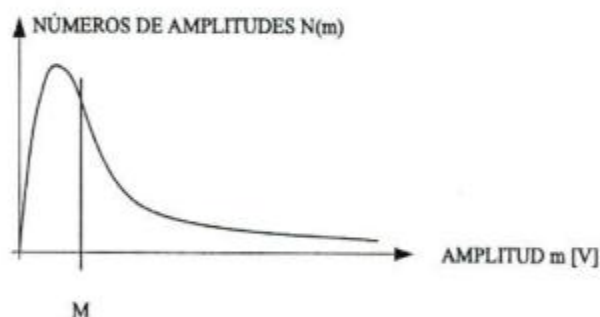


Fig. 3.12 Distribución de amplitud de pulsos para una Señal RB [6].

Se utilizará en este trabajo también el parámetro M definido por Tiitto [11], con el que se puede analizar cambios microestructurales en los materiales. Este parámetro toma en cuenta la amplitud media de una señal, y está definido por,

$$2 \cdot \int_0^M N(m) \cdot dm = \int_0^{\infty} N(m) \cdot dm \quad (3.8)$$

donde m = amplitud de picos de una señal

$N(m)$ = Número de pulsos pulsos de amplitud m

M = parámetro M que divide a la curva de distribución en dos superficies iguales.

3.4.2 Emisión Magneto Acústica

3.4.2.1 Emisión Acústica

La emisión acústica (EA), es un proceso dinámico de generación y propagación de ondas elásticas en sólidos, dentro de un rango de frecuencias ultrasónicas (20 kHz - 1 MHz). Las ondas son originadas por una rápida liberación de energía en zonas localizadas del sólido, involucrando un movimiento colectivo de átomos. Los mecanismos que producen EA tienden a minimizar la energía del sistema luego de producido algún desbalance. Es necesario que exista alguna perturbación que active las fuentes internas del material; por este motivo se diferencia a la EA de otras técnicas en donde se introducen externamente las ondas elásticas. En la Fig. 3.13, se muestra el rango de frecuencias involucrado.

Una vez liberada la energía elástica, la onda generada se propaga de acuerdo a la geometría, las condiciones de contorno y las características físicas del material.

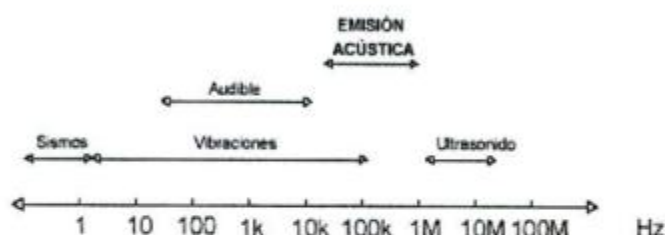


Fig. 3.13 Rango de frecuencias de la Emisión Acústica.

En los metales se han identificado como fuentes a movimientos de dislocaciones, crecimiento de fisuras, deslizamiento de borde de grano, fractura y separación de inclusiones, corrosión bajo tensión, rotura de recubrimientos e inicio y propagación de fisuras. Otros mecanismos posibles, menos estudiados hasta el presente, son transformaciones de fases sólidas, procesos de solidificación o licuefacción y movimiento de dominios magnéticos [12].

La medición de las ondas elásticas generadas (o una parte de ellas) se realiza mediante transductores colocados en la superficie de las muestras estudiadas. Dichos transductores miden los desplazamientos mecánicos que ocurren en la superficie y los transforman en magnitudes eléctricas (señales de Emisión Acústica) (ver 3.3.2); los más usados son los piezoelectricos.

3.4.2.2 Señal de Emisión Magneto Acústica EMA

La EMA se produce como ya se indicó, al magnetizar en forma continua un material ferromagnético (ver 3.2.2). La intensidad de la señal de EMA depende también de un gran número de factores entre los que se incluye la intensidad y frecuencia del campo magnético aplicado, las tensiones aplicadas o residuales, la composición química, la microestructura, los tratamientos térmicos, el trabajado en frío, y el rango de frecuencia de detección de la Emisión Acústica.

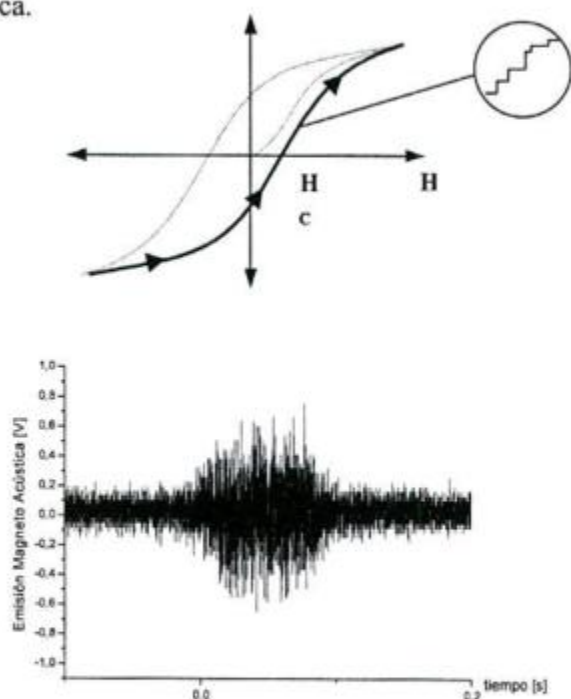


Fig. 3.14 Curva de histéresis mostrando los saltos discontinuos en la magnetización y señal obtenida como EMA.

Las señales obtenidas con el equipo descrito en 3.3.2, son pulsos de voltajes variables en el tiempo. En la Fig. 3.14 se indican un ciclo de histéresis de un material ferromagnético, y la señal EMA.

Existe una gran variedad de formas de análisis de las señales de Emisión Acústica, dentro de este amplio rango se detallarán aquí solamente las utilizadas en este trabajo.

El análisis habitual de la EMA en la bibliografía es el de la comparación del valor RMS de la señal, ya comentado en 3.4.1 para el RB. Como ya se explicó, el valor RMS de una señal puede ser dado como $V_{RMS}(t)$ cuando el tiempo de integración es suficientemente pequeño (ver Fig. 3.15).

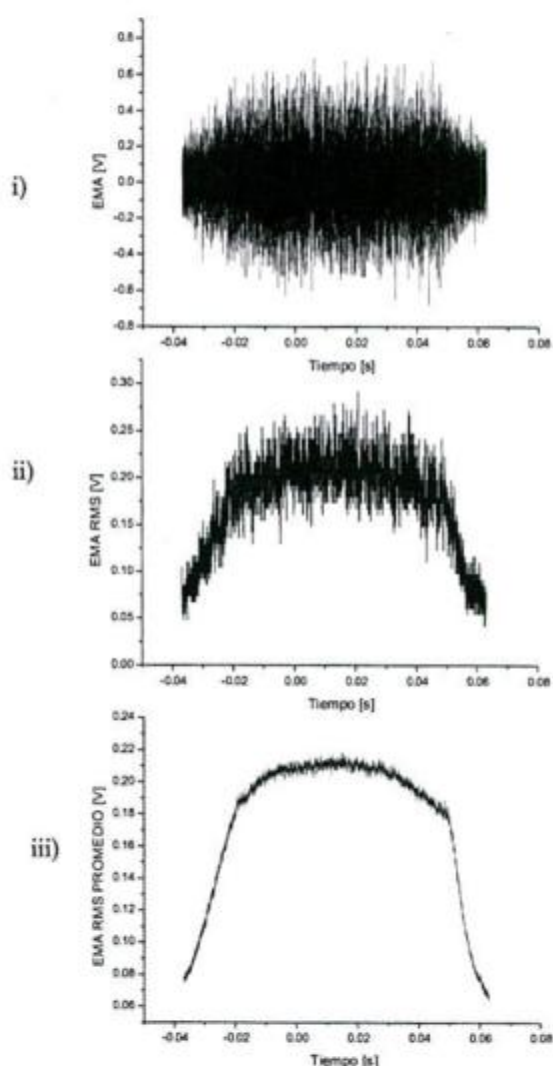


Fig. 3.15 Medición del RMS de la EMA para tiempos de integración muy pequeños, i) forma de onda original ii) RMS individual iii) RMS promedio calculado sobre un número N de señales.

De la misma manera que en el RB, la EMA puede ser analizada a partir de la Transformada de Fourier con las mismas aclaraciones. Cabe aclarar además de lo ya comentado, que este análisis dependerá muy particularmente del tipo de sensor que se esté utilizando para las mediciones, es decir si es de tipo banda ancha o del tipo resonante.

3.5 Relación entre microestructura, RB y EMA

Dado un material ferromagnético cualquiera con una determinada estructura de dominios, éste tendrá unas determinadas propiedades magnéticas particulares, que caracterizarán a ese material. Las propiedades magnéticas pueden ser divididas en dos categorías, i) propiedades insensibles a la estructura (magnetización de saturación, temperatura de Curie) ii) propiedades sensibles a la estructura (permeabilidad, pérdida por histéresis, fuerza coercitiva, inducción residual, RB, EMA) [13]. Por esta razón cualquier cambio en la microestructura del material podrá ser reflejado en los parámetros magnéticos sensibles a la estructura, con diferentes grados de resolución entre los mismos. Estos cambios en la microestructura pueden ser: cambios en los aleantes, en el tamaño de grano, en la densidad de dislocaciones, tipo, tamaño, forma, orientación y distribución de segundas fases, tensiones aplicadas y residuales, textura, daños por creep, daños por fatiga, daños por radiación, etc. Conociendo la variación de las propiedades magnéticas sensibles, pueden éstas ser correlacionadas con los cambios en la estructura con el fin de evaluar el material.

A partir de esto se puede deducir que un método de estudio de las propiedades de un material a partir de sus parámetros magnéticos, como lo son el RB y EMA, puede ser posible. La utilización de la medición del RB como Ensayo No Destructivo fue propuesto en la década del 60 (ver 3.5.5) con el objeto de medir tensiones. Debe tenerse muy en cuenta que la dificultad de comparación entre los diferentes autores y sus trabajos se relaciona no sólo con la diversidad de equipos utilizados y métodos de análisis empleados en cada uno de ellos, sino también con que el RB y la EMA dependen mucho del tipo de material ferromagnético que se esté estudiando. A continuación se describirán las variaciones que se producen en la medición del RB y la EMA, a partir de diferentes cambios microestructurales y de aplicación de tensiones sobre el material.

3.5.1 Tamaño de Grano

El tamaño de grano en el caso de aleaciones ferrítico-austeníticas, así como también en el caso de microestructuras martensíticas bainíticas, es un importante parámetro ingenieril debido a su influencia en propiedades mecánicas tales como las tensiones de fluencia, la resistencia a la fatiga y al creep. La metalografía in situ o la utilización de réplicas es ampliamente utilizada para la medición del tamaño de grano en componentes industriales en servicio. La principal limitación de esta técnica es el tiempo consumido para la caracterización de grandes componentes, es por esto que una alternativa posible es el estudio mediante RB y EMA.

Para materiales ferromagnéticos policristalinos libres de tensiones, se puede decir que los bordes de grano separan zonas de diferente orientación cristalográfica o direcciones de fácil magnetización, de tal manera que aparecen en estas zonas "polos libres" [13]. Se puede demostrar teóricamente que la energía magnetostática asociada con los polos libres del borde

de grano depende del volumen del grano y de la separación angular de los ejes de fácil magnetización respecto del grano adyacente. Los cambios en la energía magnetostática en el borde de grano definen el campo requerido para la formación de paredes de dominios que pueden moverse en los dos sentidos durante la aplicación de un campo magnético en un ciclo de histéresis, y definen también la resistencia que debe sobrepasarse en el mismo, para el movimiento de este tipo de paredes durante la magnetización cíclica. El incremento en la energía magnetostática con el incremento del tamaño de grano facilita el movimiento de las paredes de dominios durante la magnetización inversa. También el tamaño de grano define el desplazamiento promedio de las paredes de dominio.

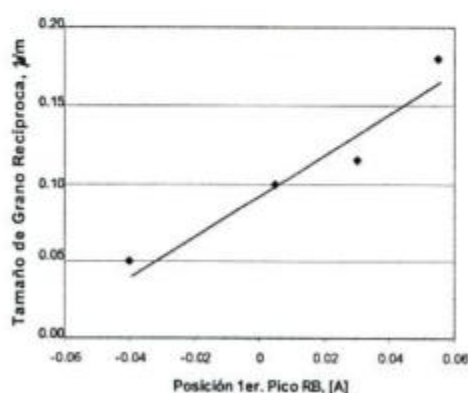


Fig. 3.16 Relación entre la posición del primer Pico de RB y el tamaño promedio de grano de un acero 0,2% C recocido (873 K) [6].

En las mediciones de RB mediante RMS, se ha observado que el primer pico del RB disminuye y que la posición del mismo se traslada hacia campos H menores con el incremento del tamaño de grano (ver figura 3.16). Algunos autores indican que existe una correlación lineal entre el parámetro M y el tamaño de grano, pero otros no lo han observado [13]. Se puede decir que esta medición se ve muy afectada por la aparición de tensiones, de segundas fases, inclusiones, etc. por lo que se debe tener muy presente estos temas en la medición y comparación de resultados.

3.5.2 Precipitados, crecimiento de segundas fases y contenido de Carbono

Se ha comentado anteriormente que las paredes de dominios son fijadas por efecto de la distorsión en la red cristalina debida a campos de deformaciones y la interacción de la energía magnetostática de segundas fases, produciendo esto la variación del RB y EMA respecto de muestras sin estas interacciones. En general la comparación del RB entre una muestra de hierro puro y una con contenido mayor de carbono formando ferrita y un precipitado de cementita, han demostrado la disminución del RMS de la señal. Esto demuestra que la fijación de las paredes de dominio resultan de la distorsión de la red cristalina asociada con los solutos intersticiales y los carburos precipitados [14].

De la misma manera, si en una matriz ferromagnética aparecen segundas fases, se podrá notar una variación en el RB, dependiendo del tipo, forma, tamaño y volumen de la misma.

Estudios realizados por Tiitto [11] demuestran que el RB aumenta con el incremento del tamaño de las colonias y el espaciado lamelar de la perlita, esto lo muestra midiendo el

parámetro M, indicando el crecimiento del mismo en función del tamaño de las colonias y el espaciamiento lamelar (ver Fig. 3.17).

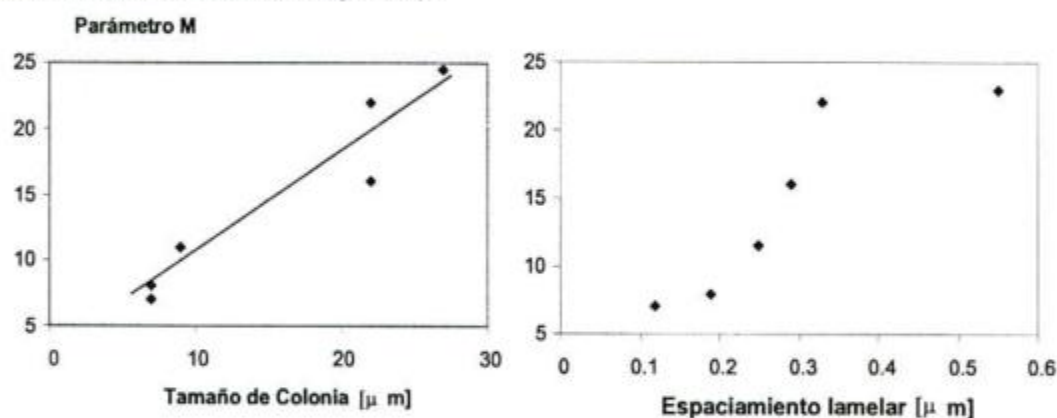


Fig. 3.17 Esquema de variación del parámetro M en función del tamaño de las colonias de perlita i), y el espaciamiento lamelar ii) [6].

Con respecto a otros análisis, como por ejemplo el RMS con tiempos de integración pequeños, diferentes autores obtienen diferentes resultados. Esto se debe a las diferencias en equipamientos y tiempos de integración que cada uno de ellos ha adoptado. Sin embargo se puede decir que muchos autores han encontrado en este tipo de estudios, una variedad de picos en la señal (hasta 3 picos), que estarían representando la aparición de nuevas fases, o algún proceso de fijación de las paredes de dominios diferente a las que tiene la matriz original (ver Fig. 3.18)[13].

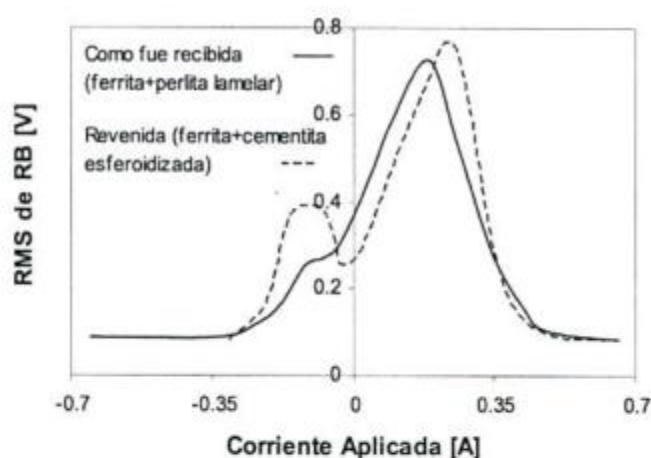


Fig. 3.18 Diferencia entre RMS en aleación de ferrita perlita lamelar y ferrita cementita esferoidal (Esquema ilustrativo) [13].

En cuanto al contenido de carbono en aleaciones de hierro algunos autores [6] han estudiado la variación del parámetro M en función del contenido de carbono, según se muestra en la Fig. 3.19. Se puede observar que existe una variación. Sin embargo la correlación es pobre en aleaciones ferríticas perlíticas.

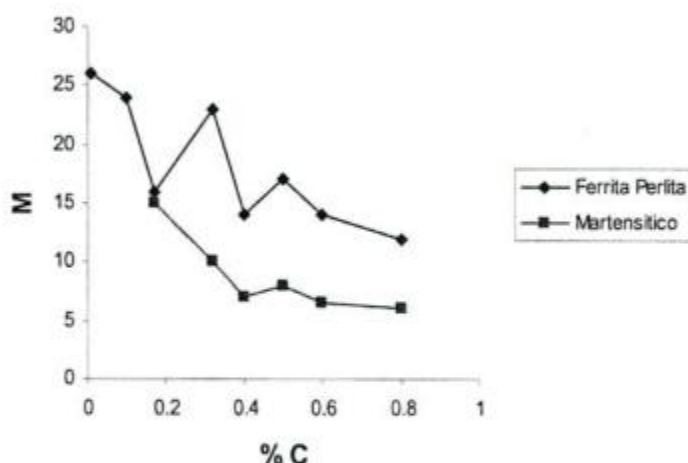


Fig. 3.19 Esquema de la variación de M en función del contenido de carbono en acero ferrítico perlítico y martensítico [6].

Respecto de la EMA Kanji Ono [15] ha estudiado entre otras cosas, la variación del RMS, y sus resultados se muestran en la Fig. 3.20.

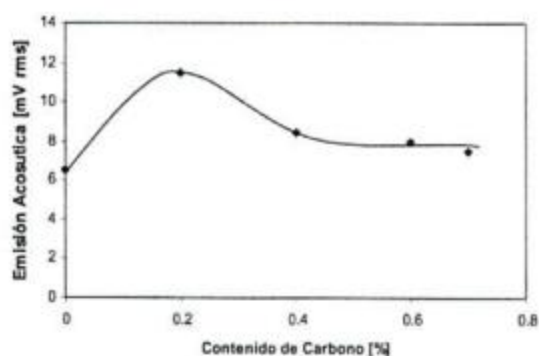


Fig. 3.20 Esquema de la variación de EMA RMS en función del contenido de carbono en aleaciones hierro carbono [15].

3.5.3 Trabajado en frío y deformación plástica

El RB se ve afectado por las deformaciones tanto plásticas como elásticas que se le realicen al material ferromagnético. El cambio en la densidad de dislocaciones y su subestructura, la formación de texturas, etc. influyen en el nivel del RB. Normalmente, un material ferromagnético que es trabajado en frío reduce su nivel de RB, debido al incremento de la densidad de dislocaciones, que dificultan el desplazamiento de las paredes de dominios. La subestructura de las dislocaciones también afecta al RB. En aleaciones de base hierro la textura preferida, $\langle 100 \rangle$, induce el alineamiento de dominios, intensificando el movimiento de las paredes de dominio en una estrecha dirección y disminuyendo el nivel del RB. Las variaciones en el nivel de RB medido en direcciones de rolado y transversal rotando el campo aplicado, indican la presencia de alguna textura.

Algunos autores [13], han medido el RB en aceros inoxidable con diferentes grados de trabajado en frío, observando el incremento del mismo por la aparición de una nueva fase ferromagnética (ver Fig. 3.21).

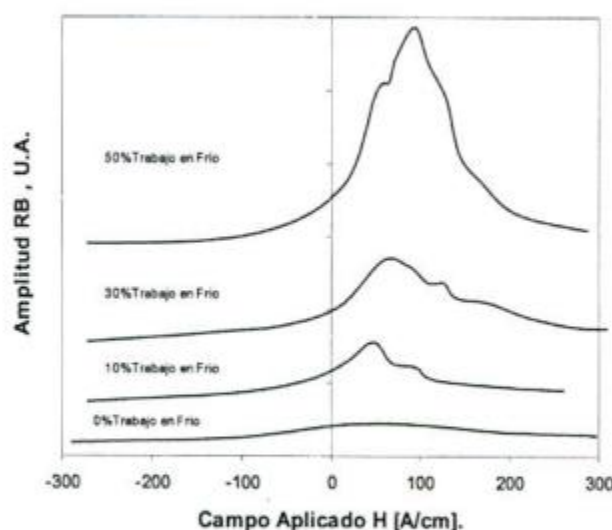


Fig. 3.21 Esquema de la variación de RB RMS en función del trabajado en frío en aceros inoxidables [13].

Shibata y Ono [16] han estudiado hierro trabajado en frío y recocido, dando como resultado lo mostrado en la Fig. 3.22. Se puede observar que para un mismo material la respuesta EMA puede ser diferente de la del RB, dependiendo del tipo de material, de la condición microestructural y del nivel de campo magnético o inducción aplicado.

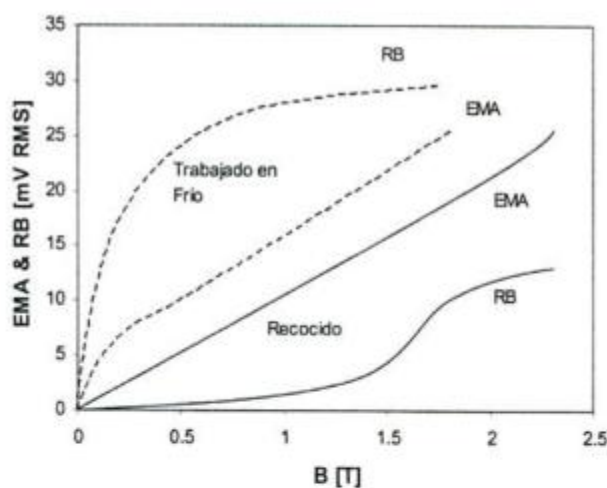


Fig. 3.22 Esquema de la variación de RB y EMA RMS para hierro trabajado en frío y recocido en función de la inducción máxima aplicada [16].

3.5.4 Daño por radiación

El daño por radiación de elementos en centrales nucleares debida a la exposición a altos niveles de radiación se origina debido a la modificación de la microestructura del material a nivel atómico. La microestructura afectada degrada las propiedades mecánicas del material, siendo algunas de ellas críticas para la integridad estructural de estos elementos. La principal

preocupación en este tema es la falla catastrófica de estos elementos debido a la fragilización del material [17].

Los cambios microestructurales debidos a la radiación afectan el movimiento de las paredes de dominios y consecuentemente se afecta la naturaleza y magnitud de los parámetros magnéticos [18]. Algunos de los parámetros afectados son la susceptibilidad inicial, la fuerza coercitiva y el RB así como la EMA. El impedimento del movimiento de las paredes de los dominios disminuye la amplitud del RB. Así, algunos autores han mostrado que la disminución de la amplitud del RB en probetas irradiadas con neutrones se atribuye al impedimento que producen defectos tipos clusters al movimiento de dichas paredes [19] (ver Fig. 3.23).

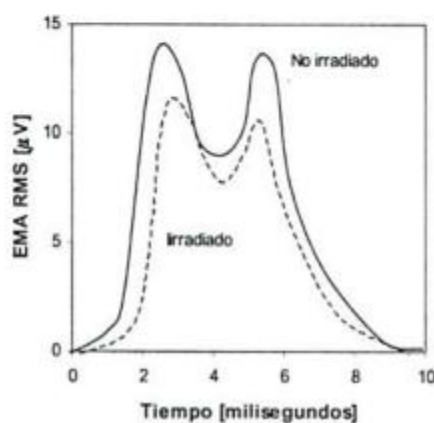


Fig. 3.23 Esquema de la variación de EMA RMS para acero irradiado y otro no irradiado [17].

3.5.5 Campo de Tensiones

Muchas de las propiedades de los materiales ferromagnéticos se ven influidas por su estado de tensiones [20]. La dificultad de la medición de las tensiones en materiales ferromagnéticos es de diversa índole, como por ejemplo la búsqueda de parámetros magnéticos a medir, la dificultad de mediciones en elementos de geometría compleja, y la dificultad de distinguir los efectos de las tensiones mecánicas de los efectos debidos a cambios microestructurales. Leep [21] sugirió en 1964 la medición de tensiones mediante el efecto Barkhausen, reconociendo la importancia del desarrollo de métodos no destructivos con esta intención. El resultado de años de investigación en este rubro, ha colocado a la medición del RB como una de las principales aplicaciones industriales de este efecto en relación con la medición de tensiones residuales en materiales ferromagnéticos cuando los cambios microestructurales no varían [22].

La técnica opera debido al hecho que las tensiones influyen en el comportamiento de las paredes de dominios mediante la interacción magneto elástica, y como resultado la señal de RB se modifica. Para materiales que tienen una magnetostricción positiva como el acero, las señales Barkhausen se incrementan cuando la dirección de la aplicación de tensiones de tracción coincide con la dirección del campo magnético aplicado, y disminuyen en esa dirección cuando las tensiones son de compresión. En general si el campo magnético es aplicado normal a la dirección de tracción se produce lo contrario (ver Fig. 3.24). Cuando los

materiales tienen magnetostricción negativa, (por ejemplo el níquel) el comportamiento frente a tensiones es el opuesto al que se explicó.

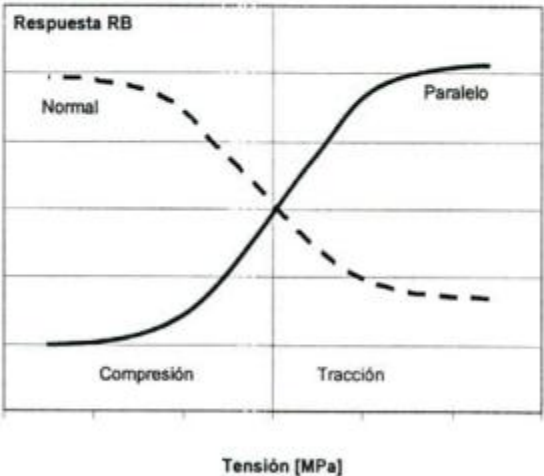


Fig. 3.24 Esquema de la variación de RB para un material con magnetostricción positiva en función de las tensiones aplicadas [22].

Un ejemplo de medición de tensiones residuales se muestra en la Fig. 3.25, en la que la presencia de estas tensiones, a lo largo de la dirección de rolado en una chapa de acero trabajada en frío, produce fuertes señales Barkhausen en esa dirección y más débiles en la dirección perpendicular. También se indica esquemáticamente la respuesta de las señales en distintos estados de deformación.

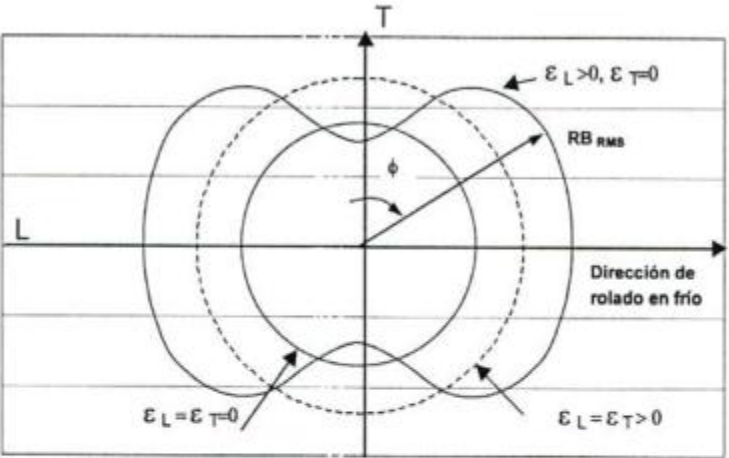


Fig. 3.25 Esquema de la variación de RB a lo largo de diferentes direcciones y en diferentes estados de deformación, para un material con magnetostricción positiva [5].

El rango usual de medición de tensiones usando el efecto Barkhausen según algunos autores [21], se extiende hasta alrededor del 50% de la tensión de fluencia con una resolución de 30 MPa, dependiendo del tipo de material. En cuanto a la profundidad en la que el método es sensible, distintos autores lo fijan entre 0,1 mm hasta algunos milímetros. Se han realizados

estudios comparativos entre los resultados de esta técnica con otras, dando valores consistentes [23].

3.5.6 Otras relaciones

Debido a que las características microestructurales afectan las propiedades macroscópicas mecánicas, y que dichos cambios microestructurales modifican las señales RB y EMA, muchos autores han trabajado en la correlación de estas señales con la variación de las propiedades mecánicas. Entre las propiedades que se han estudiado se encuentran la dureza del material superficial y a diferentes profundidades, resistencia estática a la tracción, alargamiento de rotura, tenacidad (Charpy), estados de tensiones y fractura, nivel de daño por creep, nivel de daño por fatiga, etc.[13].

REFERENCIAS

-
- [1] Jiles D., "Introduction to Magnetism and Magnetic Materials", 1995
 - [2] Barkhausen H. "Rauschen der Ferromagnetischen Materialien" Phys. Zetschrift. Vol. 20, 401-403, 1919
 - [3] Lord A. E., "Acoustic Emission" Physical Acoustic, Vol. XI Academic Press, New York, 1975
 - [4] Buttle D. J., Scruby C. B., Briggs G. A., Jakubovics J. P., "Proceeding Royal Society London" A 414, 469, 1987
 - [5] O'Sullivan D., Cotterell M., Tanner D.A., Mészáros I., "Characterisation of ferritic stainless steel by Barkhausen techniques", NDT&E International, Vol. 37, Issue 6, 489-496, 2004
 - [6] Matzkanin, G., Beissner R., Teller C., "The Barkhausen effect and its applications to nondestructive Evaluation", Nondestructive Testing Information Analysis Center, October 1979
 - [7] Le Croy, Operator's Manual Digital Oscilloscopes 9360, 1993
 - [8] Oppenheim A. V., Schafer R. W., "Tratamiento de señales en tiempo discreto", Prentice Hall, 2000
 - [9] Proakis J. G., Manolakis D. C., " Tratamiento digital de señales", Prentice Hall, 1998
 - [10] Papoulis A., Unnikrishna Pillai S., "Probability, Random Variables and Stochastic Processes", 2002
 - [11] Tiitto, S., "On the influence of Microestructure on Magnetization Transition in Steel", Acta Polytechnica Scandinavia, Applied Physics Series N° 119, 1977
 - [12] Mieza J. I., "Caracterización y Propagación de Ondas de Emisión Acústica en Probetas Tubulares de Acero", Tesis de Mestría IS, Universidad de San Martín, CNEA, Buenos Aires, 2004
 - [13] Baldev R., Moorthy V., Jayakumar T., Bhanu Sankara Rao K., "Assessment of microestructures and mechanical behaviour of metallic materials through non-destructive characterization", International Materials Reviews Vol.48 N°5, 273, 2003
 - [14] Gatelier-Rothea C., Fleischmann P., Chicois J., Fougères R., Nondestructive Testing Evaluation, 8-9, 591-602, 1992
 - [15] Kanji Ono, Shibata M., "Magnetomechanical Acoustic Emission of Iron and Steels", Material Evaluation, January, 1980

-
- [16] Kanji Ono, Shibata M., "MAE - New Method for Nondestructive Stress Measurement", NDT International, 5, 227-234, 1981
 - [17] Oh-Yang Kwon, Ono K., "Detection of irradiation effects on reactor vessel steels by magneto Acoustic Emission" Journal of Acoustic Emission, Vol. 9, N° 4, 1990
 - [18] Shong W. J., Williams J. G., Stubbiks J. F., "Interrogation of radiation effects in nuclear Pressure Vessel Steel using Magnetic Properties Measurement" ANS Transactions, pp 192, 1993
 - [19] Sim C.M., Park S-S., Song Y-Y., Park D-G., Chang Kee-O., "Harmonic frequency analysis of acoustic Barkhausen Noise on neutron irradiated material", 15th WCDT Roma 2000, 2000
 - [20] Bozort R. M., "Ferromagnetism" D. Vand Nostrand Co., Inc., Princeton, N J, Chapter 13, 1951
 - [21] Leep R. W., "The Barkhausen effect and its Aplication in Non Destructive Testing", Proceedings of the Symposium on Physics and Nondestructive Testing, Dayton, OH, 1964, Gordon and Breach, New York, pp 439-453, 1967
 - [22] Chester C. H. Lo, "A review of the Barkhausen effect and its Aplication to Nondestructive Testing", Materials Evaluation, July, 2004
 - [23] Schneider E., "Nondestructive Analysis of Stress States in Componentes using Micromagnetic and Ultrasonic Thecniques - An Overview", NDT.net, Vol. 3 N°11, 1998

Capítulo 4

Construcción del sistema para Medición del Ruido Barkhausen y Emisión Magneto Acústica

En este Capítulo se describirán todos los trabajos realizados para la construcción del sistema de Medición del RB y la EMA. Se presentarán los trabajos preliminares realizados, las pruebas con distintos elementos del equipo, las características de los equipos construidos y utilizados, y la justificación de su empleo.

4.1 Trabajos Iniciales

Como ya sea ha explicado, las señales de RB y EMA de un material ferromagnético pueden ser correlacionadas con su microestructura. Esta posibilidad como ya se ha mencionado, ha resultado en la utilización de estos métodos como Ensayo No Destructivo (END). Se ha mencionado también la dificultad de comparar resultados de diferentes autores, debido entre otras razones a la diferente configuración de los equipos de medición, a las distintas combinaciones de frecuencia de excitación-fuerza magnética máxima, a los diferentes parámetros utilizados, etc. Sin embargo y de acuerdo con lo que se ha podido observar en numerosas publicaciones sobre este tema, se sigue investigando y avanzando debido a las distintas posibles aplicaciones. Dentro de estas aplicaciones, la medición de tensiones residuales ha alcanzado una importante notoriedad.

Por todo lo expuesto, se construyó un sistema para la medición del RB y EMA, atendiendo a la necesidad de medir cambios microestructurales en distintos tipos de acero, con especial interés en aceros de uso nuclear. La configuración del equipo que se eligió fue la dada en 3.3.1, debido a la versatilidad de la misma y a las posibilidades reales de conseguir los elementos necesarios.

4.1.1 Caracterización magnética de un acero de uso nuclear

Para realizar el equipo ya citado, es necesario conocer las características magnéticas más importantes del material ferromagnético a analizar, con el objeto de conocer el campo magnético máximo ($H_{\text{máx}}$) del ciclo de magnetización, que debe ser aplicado sobre el material para lograr la amplitud de señal RB y EMA, suficiente para los distintos análisis. Generalmente el incremento del campo magnético produce un aumento de la amplitud de la señal RB y EMA [1]. Además, debido a que el equipo podría ser utilizado en otros materiales, debe tener la posibilidad de aplicar un rango de campo magnético que cubra un importante número de aleaciones ferromagnéticas de interés.

Por estas razones, se eligió para caracterizar magnéticamente, un acero de uso nuclear del tipo ASTM 508 Clase 2, correspondiente al recipiente de presión de la Central Nuclear Atucha 1, identificado como colada 41.1, proporcionado por la CNEA. En la Tabla 4.1 se puede ver su composición química.

Tabla 4.1 Composición química porcentual en peso, ASTM 508 Clase 2 [2].

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
0.22	0.26	0.75	0.02	0.01	0.40	0.65	0.82	0.14

La caracterización magnética fue llevada a cabo en el Instituto Nacional de Tecnología Industrial INTI, Centro de Estudios de Materiales Magnéticos Córdoba CEMCOR. Allí se obtuvo el ciclo de histéresis de saturación y se determinó la Permeabilidad, la Inducción de Saturación, la Fuerza Coercitiva, etc. de acuerdo con la norma ASTM 773-80. Los resultados se pueden observar en la Tabla 4.2, y en la Fig. 4.1. En el ANEXO N°1 se encuentra el Informe respectivo completo.

Tabla 4.2. Características Magnéticas ASTM 508 Clase 2.

Inducción de Saturación B_S [T]	Campo Magnético en Saturación H_S [kA/m]	Remanencia B_R [T]	Coercitividad H_{CB} [kA/m]	Permeabilidad
2.248	208	428	1.659	206

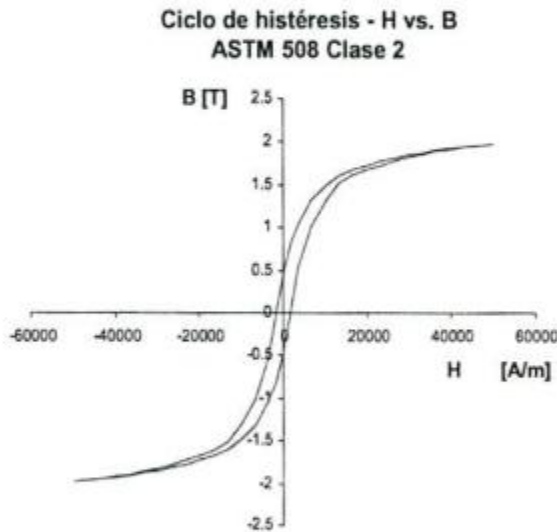


Fig. 4.1 Ciclo de histéresis del acero ASTM 508 Clase 2.

Sobre la base de estos resultados, se decidió que el equipo tuviera la capacidad de entregar una fuerza magnética mayor que 5 kA/m, con el objeto de superar el valor de la fuerza coercitiva de este tipo de acero (1,659 kA/m).

4.2 Instrumental construido para la medición de Ruido Barkhausen

4.2.1 Yugo excitador

Para la construcción del yugo excitador se utilizó una pieza en forma de “U”, construida con chapas de Fe-Si laminado, con el objeto de disminuir las pérdidas por calentamiento producidas por las corrientes parásitas. La forma en “U” permite que el yugo apoye sobre la superficie de la probeta o pieza a analizar, pudiendo adaptarse a numerosos tamaños y formas de las mismas. Este elemento comercial, tiene una inducción de saturación de 1.5 T, de acuerdo con lo informado por el proveedor. Las dimensiones del mismo se pueden observar en la Fig. 4.2.

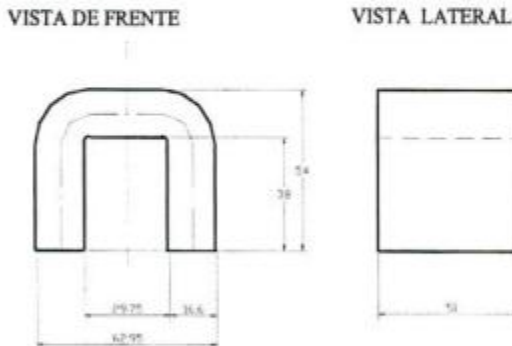


Fig. 4.2 Esquema de la pieza en “U” para el Yugo excitador, y sus dimensiones en mm.

La fuerza magnética es aplicada mediante un bobinado que se arrolla al yugo, con un número de vueltas tal que pueda producir el campo magnético requerido o de diseño. En nuestro caso se utilizó para el bobinado, un alambre de cobre esmaltado de 0.8 mm de diámetro. La elección del diámetro del alambre debe ser tal que la impedancia del bobinado no obligue a que la corriente suministrada sea excesiva, y que se produzca recalentamiento en el yugo. La alimentación del yugo se realiza mediante un cable conectado al alimentador de corriente, al cual se le ha puesto en serie una resistencia de bajo valor, con el objeto de medir forma, frecuencia y valor de la corriente que circula por el yugo. En la Fig. 4.3 se puede observar fotografías de la pieza terminada.

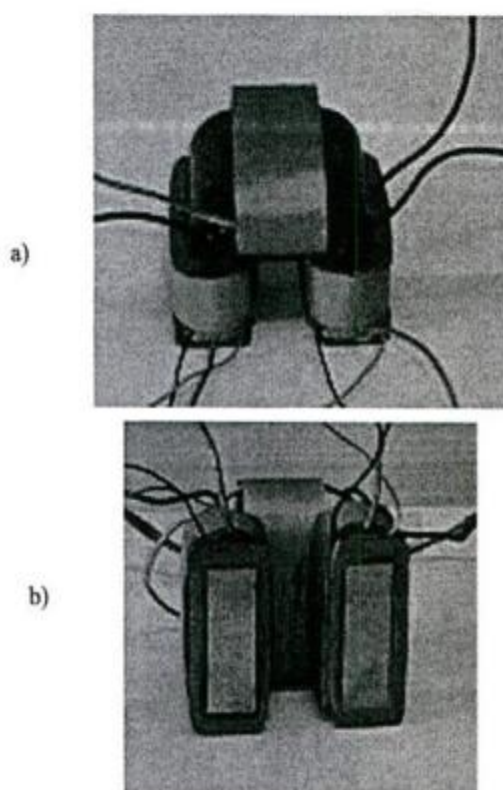


Fig. 4.3 Yugo excitador a) Vista general b) Vista inferior.

4.2.2 Alimentador de Corriente

Se fabricó un alimentador de corriente para suministrar corriente eléctrica al yugo, y con ella magnetizar la pieza en estudio. El mismo tiene una capacidad máxima de corriente de 3 A a 4 Hz, con la posibilidad de variar la corriente entre 0 y 3 A, y la frecuencia de excitación de 0 a 4 Hz. El equipo funciona con una tensión de 220 V CA, 50 Hz. Presenta una entrada de voltaje que debe ser conectada a un Generador de Funciones, y una salida que se conecta al bobinado del yugo magnetizador. El Generador de Funciones suministra al equipo un voltaje variable en el tiempo, siguiendo la forma de onda elegida (sinusoidal, triangular, etc), y el equipo Alimentador de Corriente suministra al yugo una corriente con la misma forma, frecuencia y valor numérico que la tensión suministrada por el Generador de Funciones. Es decir, el equipo es un convertidor de tensión a corriente, con una relación de conversión 1 V a 1 A.

De esta manera se logra incrementar la fuerza magnética tan lentamente como se desee, con el objeto de resolver adecuadamente los pulsos de inducción producidos por el efecto Barkhausen, detectados como RB y/o EMA. En la Fig. 4.4 se puede observar el Alimentador de Corriente construido.

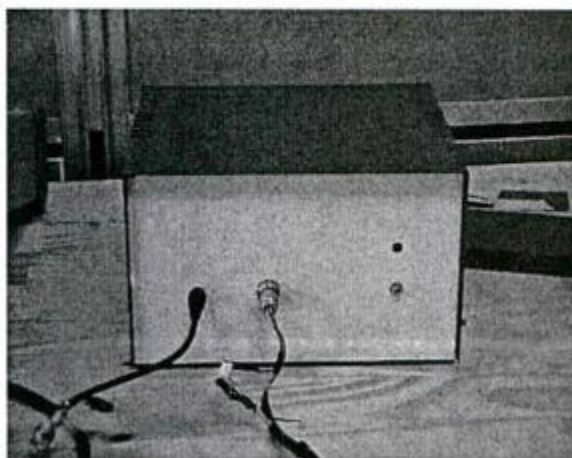


Fig. 4.4 Fotografía del Alimentador de corriente.

4.2.3 Bobinas sensoras

Como ya se ha mencionado, el RB está formado por pulsos de voltajes sensados mediante una bobina que está colocada sobre el material. La disposición de esta bobina sensora puede ser rodeando a la muestra o en su superficie. Esta última disposición es la que se adoptó para este trabajo, debido a las ventajas que conlleva y que ya fueran mencionadas (ver 3.3.1). Se construyeron bobinas sensoras de distintos tipos, de alambre de Liz (300 vueltas), de alambre esmaltado (1000 vueltas) y se probaron utilizar también cabezas lectoras de disqueteras de PC [3], que se muestran en la Fig. 4.5.

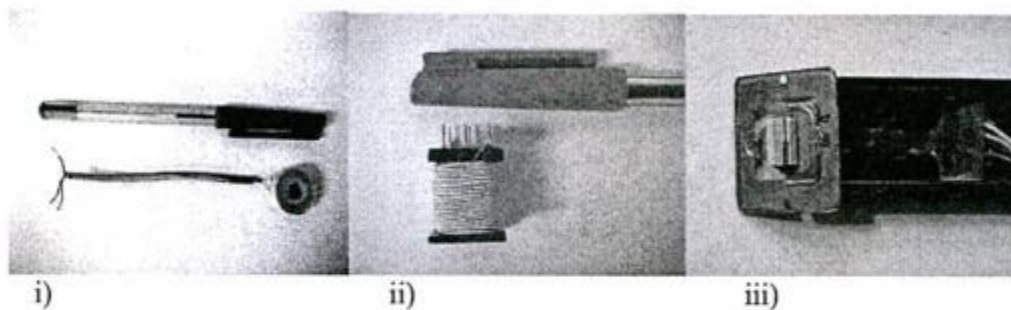


Fig. 4.5 Fotografías de bobinas sensoras construidas, i) Alambre esmaltado ii) Alambre de litz iii) Cabeza lectora de disquetera.

Se realizaron pruebas iniciales para la elección de la bobina más adecuada, sensando el RB sobre una muestra de acero al carbono, excitando a la misma con una corriente de 1 A, y una frecuencia de excitación de 2 Hz. La bobina de alambre de litz fue descartada pues no

presentaba una señal distinguible. Las señales obtenidas de las bobinas de alambre esmaltado y de la cabeza lectora, se pueden observar en la Fig. 4.6.

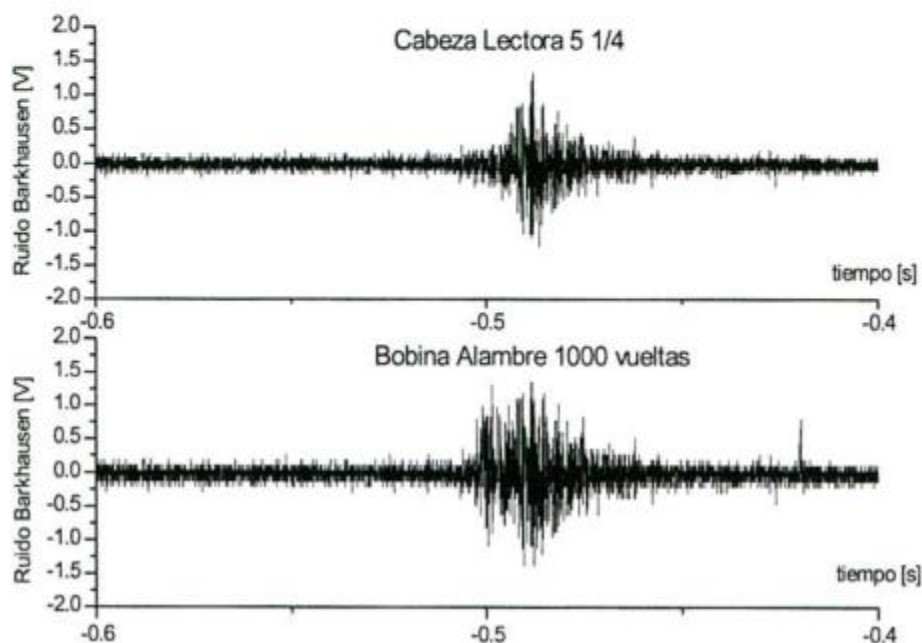


Fig. 4.6 Señales de RB obtenidos sobre las Bobinas sensoras construidas, i) Alambre esmaltado ii) Cabeza lectora de disquetera 5 1/4.

Como se puede observar, la cabeza lectora presenta una muy buena resolución al RB. Esto se debe a que la misma está construida mediante un pequeño yugo en “U” de ferrite (de aproximadamente 4 mm de largo por 3 mm de alto), y una muy pequeña bobina que rodea a una de las “patas” de la “U”. Estas características le brindan una significativa sensibilidad a los cambios de flujo en la superficie. Sin embargo se eligió no utilizarla debido a que el ferrite no podía ser caracterizado en ese momento y no se sabía qué influencias podía tener en la respuesta RB del material.

Finalmente se eligió la bobina de alambre esmaltado, debido a que presentaba una buena amplificación de la señal RB y no presentaba elementos que en el futuro no se pudieran caracterizar. La misma cuenta con 1000 vueltas de alambre de cobre esmaltado, (diámetro interno 12 mm, diámetro externo 25.4 mm y altura 9 mm). La bobina sensora, de acuerdo con lo comentado anteriormente, se dispone entre las “patas” del yugo, apoyada directamente sobre la superficie del material. Debido a las dimensiones del yugo y de la bobina sensora, esta última queda en el dispositivo firmemente fijada al yugo, y haciendo buen contacto con la superficie del material. En la Fig. 4.7 se puede ver esquemáticamente la disposición final de la bobina sensora y el yugo excitador.

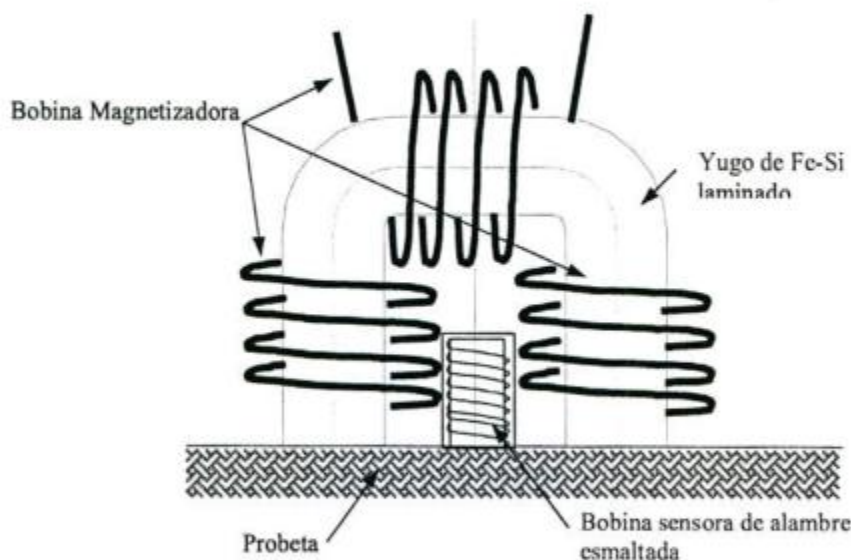


Fig. 4.7 Esquema de la bobina sensora y el yugo excitador.

4.2.4 Amplificador y Filtro de frecuencia de señal RB

Los cambios de flujo producidos por los movimientos de los dominios son detectados por la bobina sensora, y producen pequeños pulsos de voltaje de salida, éste precisamente es el RB. Para llegar a detectar estos pulsos se construyó un amplificador y filtro de frecuencias, siendo ésta una parte fundamental del equipo de medición de RB. Este filtro y amplificador es de bajo ruido, con ganancia de 500 a 5000. Es un filtro pasa alto de 20 kHz, y alimentación independiente de la línea. Cabe aclarar que el RB se presenta con frecuencias que superan los kHz, o sea mucho mayores que la frecuencia de excitación del yugo (en nuestro estudio 2 Hz). En la Fig. 4.8 se puede observar el equipo terminado.



Fig. 4.8 Amplificador y Filtro de Frecuencias de las señales RB.

4.2.5 Otros equipos utilizados

Se utilizó un Generador de Funciones HP 33120A, para producir las diferentes formas y frecuencias para el suministro de corriente para el yugo.

Las señales amplificadas y filtradas por el Amplificador y Filtro de Frecuencias fueron enviadas a un osciloscopio digital LeCroy 9360, con capacidad para visualización, digitalización, y el cálculo de diferentes parámetros. La velocidad máxima de muestreo es de 5 GigaMuestras/segundo, con un Ancho de Banda de 300 MHz, resolución vertical 11 bits, conversor AD de 8 bit, uno por canal, memoria de 25K puntos por canal.

4.3 Instrumental utilizado para la medición de EMA

Para la medición de la Emisión Magneto Acústica (EMA) se utilizó el equipamiento perteneciente al Grupo Ondas Elásticas, de la UA ENDE, CNEA, cuyos integrantes cuentan con amplia experiencia en el área de la Emisión Acústica [4, 5, 6, 7, 8, 9].

4.3.1 Amplificador de Emisión Acústica y medidor RMS

Se utilizó un amplificador de emisión acústica construido en la CNEA, modelo CNEA K390 [10], con ganancia variable de hasta 55 dB, tensión umbral variable (máximo 2.5 V en pasos de 50 mV), ruido equivalente en la entrada menor a 20 μ V rms.

Con el objeto de la evaluación del RMS de las señales EMA y RB, se utilizó un Medidor de RMS del mismo origen que el amplificador, Mod. CNEA T680, con salida logarítmica y lineal, tiempo característico de integración de 25 microsegundos, y tensión máxima de entrada ± 12 V. Estos equipos fueron alimentados por una Fuente Alimentación CNEA T340/341.

4.3.2 Sensores

Se utilizaron sensores piezoeléctricos de banda ancha (100 – 1000 kHz), PAC AE 65 modelo WD. En el ANEXO N°2, se muestra la curva de atenuación en función de la frecuencia para el sensor utilizado.

El acoplamiento acústico entre los sensores y la superficie del material se hizo con vaselina sólida.

4.3.3 Preamplificador

A la salida de los sensores de Emisión Acústica, se ubicó el preamplificador Energy Saber PA 01 N°19, con una ganancia fija de 40 dB (100x). La alimentación de 24 Vcc (tensión continua) fue provista por los módulos de amplificación del equipo de parametrización (ver 4.3.1).

La señal ingresó desde el lado del sensor por un conector diferencial polarizado y la salida fue conducida por un conector BNC estándar. El ancho de banda de los amplificadores fue de 50-1000 kHz.

4.4 Sistema completo de medición de RB y EMA

Para este estudio, y con el equipamiento antes descrito se ha adoptado la configuración del instrumental que se ilustra en la Fig. 4.8. En el esquema se puede observar, la probeta en estudio, el yugo magnetizador, la fuente de alimentación de corriente, el generador de onda, los sensores acústicos y magnéticos con sus respectivos amplificadores, la conexión a un osciloscopio para la visualización de las señales y la forma de la excitación.

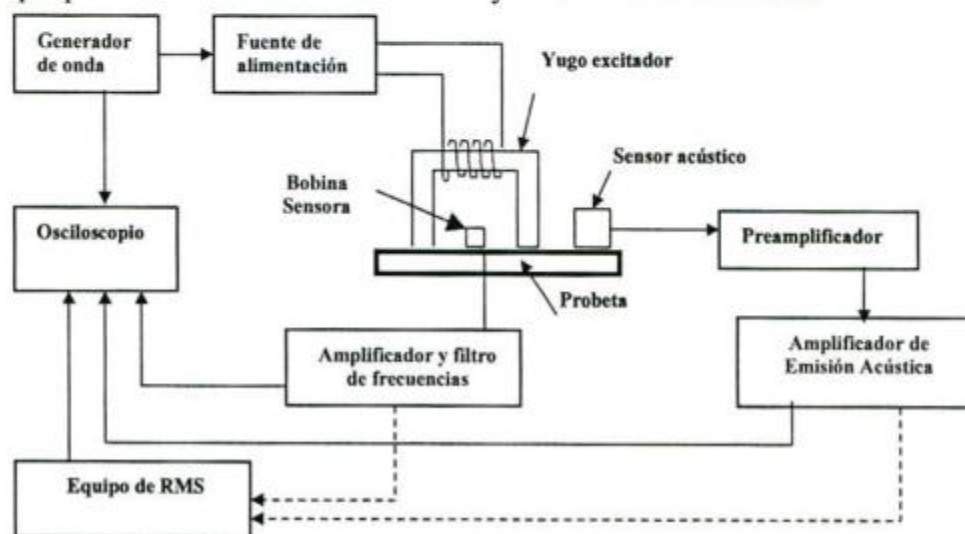


Fig. 4.8 Esquema del Sistema de medición de Ruido Barkhausen y Emisión Magneto Acústica.

En las Fig. 4.9 y 4.10 se pueden ver fotografías del equipo y detalles de los instrumentos utilizados.

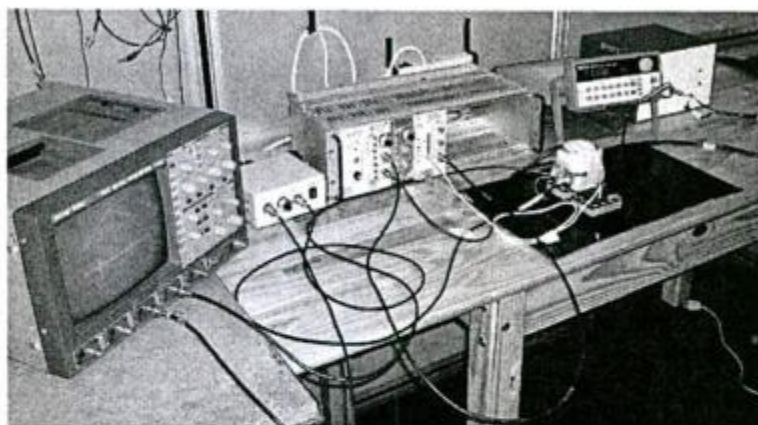


Fig. 4.9 Sistema de medición de Ruido Barkhausen y Emisión Magneto Acústica.

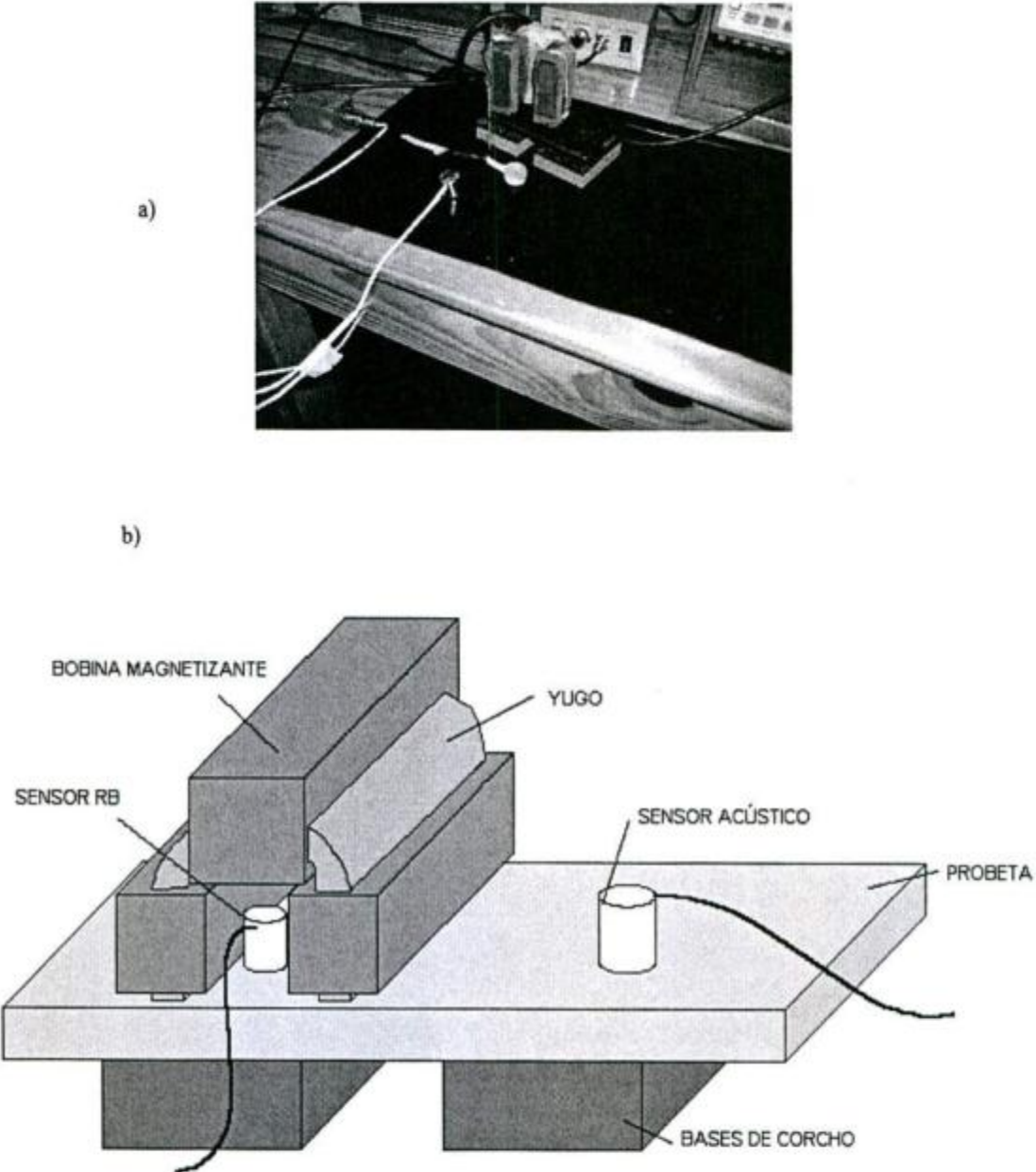


Fig. 4.10 a) Detalles de sensores y probeta; b) Disposición experimental para el ensayo

REFERENCIAS

- [1] Kanji Ono, Shibata M., "MAE - New Method for Nondestructive Stress Measurement", NDT International, 5, 227-234, 1981
- [2] Comunicación personal Dr. Versaci, e mail, fecha 23/02/04
- [3] Krause T. W., Atherthon D. L., "High resolution magnetic Barkhausen noise measurements", NDT & e International, 4, Vol. 207, 201-207
- [4] Ruzzante J., Paparo G., Piotrkowski R., Armeite M., Gregori G., López Pumarega M.I., "Proyecto Peteroa, primera estación de emisión acústica en un volcán de los Andes", Revista Española de Física, Vol. 1 (19), No. 1, pág. 12-18, 2005
- [5] Piotrkowski R., Gallego A., . Castro E, García-Hernández M.T., Ruzzante J.E., "Ti and Cr nitride coating/steel adherence assessed by acoustic emission wavelet analysis", Non Destructive Testing and Evaluation (NDT and E) International, Edit: Elsevier, ISSN: 0963-8695, Vol. 8, N° 4, pp. 260-267, May 2005
- [6] Piotrkowski R, Lopez Pumarega M.I., "The status of Acoustic Emission in Argentina", J. E. Ruzzante, Insigth, Vol. 46, No. 12, pp.733-735, December 2004
- [7] Piotrkowski R., López Pumarega M.I., Armeite M., M. Oliveto E., Mieza J. I., Ruzzante J., "Methods for Signal Analysis in Ultrasonic Waves", "Eight World Multi-Conference on Systemics Cybernetic and Informatics, SCI2004", ISBN: 980-6560-13-2, Orlando, EEUU, Vol. VI, pág. 150-155, 18-21 de Julio de 2004
- [8] López Sánchez R., López Pumarega M. I., Armeite M., Piotrkowski R., Ruzzante J. E., "Barkhausen Effect and Acoustic Emission in a Metallic Glass, Preliminary Results", , "30th Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (30th QNDE)", 27 de Julio-1 de agosto, 2003, Green Bay, Wisconsin, EEUU, AIP Conference Proceedings, ISSN: 0094-243X, ISBN: 07354-0173-X Set., Vol. 23B, pp. 1328-1335, 2004
- [9] López Pumarega M.I., Armeite M., Ruzzante J. E., Piotrkowski R., "Relation Between Amplitude and Duration of Acoustic Emission Signals", , "29th. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (29th QNDE)", AIP Conference Proceedings, ISBN: 0-7354-0117-9, Set., ISSN: 0094-243X , Vol. 22B, pp.1431-1438, 2003
- [10] Verrastro C, Hofer C., Matatgui E., Unidad de Actividad Reactores y Centrales Nucleares, CNEA

Capítulo 5

Preparación de muestras y experimentación

En este Capítulo se describe la preparación de muestras utilizadas, con sus tratamientos térmicos, metalografías, etc. Se indica el método utilizado para la medición de RB y EMA sobre muestras con tratamientos termo-mecánicos e irradiadas. Se detalla también, el procedimiento de aplicación de cargas sobre una muestra de otro material ferromagnético y la medición de RB y EMA bajo distintos estados de sollicitaciones.

5.1 Preparación de Muestras

Se utilizó un acero comercial (AISI 1020) para la realización de las probetas, debido a la imposibilidad de conseguir suficiente material de acero ASTM 508 Clase 2, (con el cuál se diseñó el sistema de medición a partir de su caracterización magnética (ver 4.1.1)).

A partir de este material (acero AISI 1020), se prepararon probetas para de medir RB y EMA y comparar las señales en forma cuali-cuantitativa. La composición química estándar es la mostrada en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Composición Acero SAE/AISI 1020 [1]

Comp. en peso [%]	C	Mn	P máx.	S máx.	Si
SAE/AISI	0.18-0.23	0.30-0.60	0.040	0.050	0.15-0.30

El material presentó un tamaño de grano heterogéneo, ASTM 8 a 9 (22 a 16 μm), según ASTM E 112, método comparativo.

5.1.1 Muestras con tratamientos termo-mecánicos e irradiación

Con el material descripto se realizaron, cuatro probetas de 57 mm x 118 mm x 8 mm, y se las sometió a diferentes tratamientos termo-mecánicos. Una de las probetas se analizó tal cual había sido provista (probeta testigo), a otra se la sometió a un proceso de decarburación

superficial, a una tercera se le hizo crecer el grano y la última fue sometida a una deformación plástica permanente.

Con el objeto de verificar la sensibilidad de la medición del RB y EMA frente a los cambios microestructurales debidos a daño por radiación (ver 3.5.4), se realizaron dos probetas del material original con dimensiones 130 mm x 28.5 mm x 8 mm. La necesidad de la disminución del tamaño de las probetas, fue debido a que el canal de irradiación del reactor sólo permitía las medidas elegidas y para disminuir la masa de la misma, con lo que disminuye la activación de la muestra. Se identificaron como P1.1 y P1.2.

Las probetas P1 y P1.1, es decir el material en su estado original, se las tomó como base de comparación, la metalografía del material puede observarse en la Fig. 5.1 (a). En la Tabla 5.2 se muestra la denominación de las probetas y los tratamientos aplicados.

Tabla 5.2 Denominación de probetas, procesos aplicados y dimensiones.

Probeta	Proceso	Dimensiones
P1	Sin tratamiento, probeta testigo	57 mm x 118 mm x 8 mm
P2	Decarburizada	57 mm x 118 mm x 8 mm
P3	Grano crecido	57 mm x 118 mm x 8 mm
P4	Deformada en Frío	57 mm x 118 mm x 8 mm
P1.1	Sin tratamiento, probeta testigo	28.5 mm x 130 mm x 8 mm
P1.2	Irradiada	28.5 mm x 130 mm x 8 mm

5.1.1.1 Tratamientos Térmicos

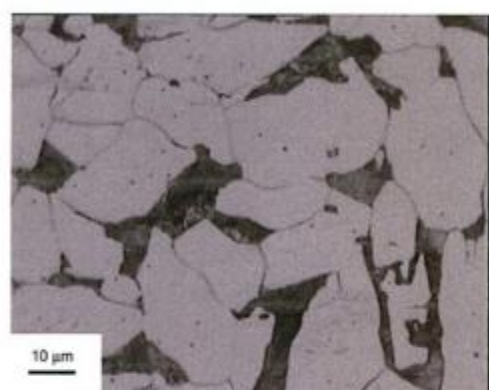
Las probetas P2 y P3 fueron tratadas térmicamente mediante un horno Lindberg tipo mufla, sometiéndolas a un ciclo térmico según lo indica la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Ciclo Térmico en Probetas P2 y P3.

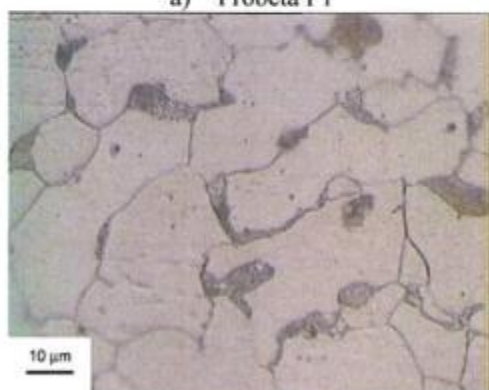
Probeta	Ciclo de Calentamiento	Atmósfera	Resultado
P2	735°C, 4 hs. Enfriada en horno	Sin atmósfera desoxidante	Decarburización superficial
P3	975 °C, 3 hs. Enfriada en horno	Desoxidante exotérmica (CO ₂ , N ₂ , H ₂ , Vapor de agua)	Crecimiento de grano

El resultado de estos tratamientos fue:

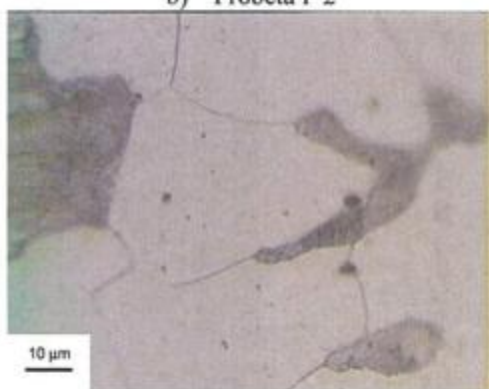
- Probeta P 2, decarburizada superficialmente hasta una profundidad de 200 µm, con crecimiento superficial de grano tamaño ASTM 4 (90 µm), luego prosigue con el tamaño de grano original (ver Fig. 5.2 y Fig. 5.1 b).
- Probeta P 3, grano crecido de ASTM 8 a 9 (estado original) (22 a 16 µm), hasta tamaño de grano homogéneo ASTM 6 (45 µm) (ver Fig. 5.1 c).



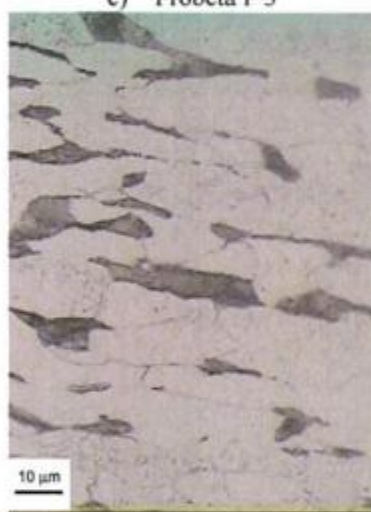
a) Probeta P1



b) Probeta P 2



c) Probeta P 3



d) Probeta P 4

Fig. 5.1 Metalografías de Probetas P1, P2, P3 y P4.

Para realizar las mediciones de RB y EMA, la probeta P2 (decarburrizada) fue limpiada superficialmente para retirar la capa externa de carbono y óxidos, adherido a la misma, mediante cepillo de acero. Las otras probetas fueron ensayadas, tal cual salieron del tratamiento térmico o mecánico. Las metalografías de dichas probetas (P3 y P4) pueden ser observadas en la Fig. 5.1 (b) y (c).

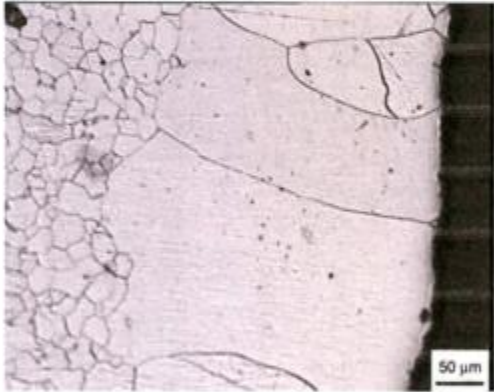


Fig. 5.2 Detalle de decarburización superficial de Probeta P 2.

5.1.1.2 Tratamientos Mecánicos

La probeta P4, fue deformada en frío, mediante un martinete C. Arrigón 100 kg, produciéndole una deformación plástica del 23% en la dirección de su espesor. El proceso de deformación fue en tres capas o pasadas de aproximadamente 8% de deformación permanente cada una. No se realizó ningún tratamiento superficial posterior. La micrografía de este estado se puede observar en la Fig. 5.1 (d).

5.1.1.3 Determinaciones de Dureza sobre probetas con tratamientos termo-mecánicos

Se determinaron las durezas de las probetas P1 a P4, con el objeto de tener algún parámetro mecánico antes y después de los tratamientos. Se evaluó la dureza mediante el método Brinell, con un durómetro Vickers-ARMSTRONGS N° Serie 253756, con bolilla de acero templado relación $F/D^2 = 30$. Los resultados se muestran en la Tabla 5.4

Tabla 5.4 Dureza Brinell promedio de las probetas en estudio.

	P1 (P1.1)	P2	P3	P4
HB	150 ± 4	134 ± 23	128 ± 3	186 ± 5

La probeta P1.2 (irradiada) no fue analizada por precaución, para evitar la manipulación de material activado por radiación.

5.1.2 Muestras para Irradiación

La probeta P1.1, fue medida en su estado original, mientras que la P1.2 fue sometida a un flujo de radiación neutrónica, en el reactor experimental RA1 del Centro Atómico Constituyentes (CAC) CNEA. La probeta estuvo sometida a una dosis de neutrones rápidos de $3.6 \cdot 10^{15} \text{ n/cm}^2$ ⁽ⁱ⁾. Con el objeto de poder ensayar la probeta irradiada, se dejó que su actividad decayera naturalmente durante un período de 3 meses aproximadamente, y fue medida cuando su nivel de radiación era menor de 10^{-2} Gy ($< 1 \text{ mrad}$).

Cabe aclarar que sobre la probeta P1.2 no se realizaron metalografías debido a que se quería evitar la manipulación de material activado por radiación.

5.1.3 Muestras para medición de RB y EMA solicitada por tensiones

Con el objeto de verificar el comportamiento de las señales de RB y EMA, en un material ferromagnético al que se le aplicaran tensiones, se utilizó una planchuela de acero comercial no identificada, de medidas 50 mm por 253 mm por 3 mm de espesor ⁱⁱ.

5.2 Experimentación

En esta sección se describen los ensayos realizados sobre las distintas probetas, la metodología utilizada para las mediciones, la disposición de los equipos y dispositivos auxiliares, etc.

5.2.1 Medición del RB y EMA en probetas con tratamientos termo-mecánicos

5.2.1.1 Disposición del Sistema para medición de RB y ajuste de parámetros

Para la medición del RB, las probetas P1, P2, P3 y P4 fueron apoyadas sobre tacos de goma y corcho con el objeto de aislarlas de la mesa de trabajo. Sobre la probeta se apoyó el yugo excitador (ver 4.2.1) a una distancia aproximada de 1 cm de un borde. Entre las “patas” del yugo se colocó la bobina sensora elegida de alambre de cobre esmaltada (ver 4.2.3), directamente sobre la superficie de la probeta. La bobina sensora fue conectada al Amplificador y Filtro de frecuencias (4.2.3), con una ganancia de 590 (0.20 en la perilla selectora).

La fuerza magnética H es generada en el yugo por el paso de una corriente variable en el tiempo; esta corriente es provista por el Alimentador de Corriente (ver 4.2.2). Este último fue conectado al generador de funciones HP 33120A. En los ensayos que se realizaron, el generador de funciones entregaba al alimentador de corriente una onda triangular de 1.6 V de voltaje máximo, a una frecuencia de 2 Hz. Por lo que el alimentador de corriente convertía la misma en corriente suministrada al yugo, con un valor máximo de 1.6 A a 2 Hz de frecuencia para una onda de forma triangular.

ⁱ Este trabajo fue ejecutado por la Dra. Ana María Fortis, del sector Daño por Radiación con la colaboración del sector Reactores y el sector de Seguridad Radiológica.

ⁱⁱ Esta planchuela, como el equipo de sujeción fueron facilitados por E.E.C.E., CAC, CNEA.

Al osciloscopio LeCroy 9360 fueron conectados en los canales de medición y en el disparador (“trigger”) respectivamente, la salida de la bobina sensora, la conexión en paralelo sobre el circuito del yugo para medir la corriente, y la salida del generador de funciones. El objeto fue medir y digitalizar la señal RB y controlar los parámetros de alimentación sobre el yugo. Para la digitalización del RB se utilizaron distintas frecuencias de muestreo, dependiendo del tipo de análisis de la señal realizada (ver 3.4.1).

Es importante aclarar que el nivel de amplitud de la señal de RB depende en gran medida de la distancia de la bobina sensora a la superficie del material; y por lo tanto es deseable asegurarse un máximo contacto. En este trabajo se colocó la bobina sensora en la superficie de la probeta, de tal manera de lograr la mayor señal posible.

En la Fig. 5.3 se pueden observar a modo de ejemplo, la variación de la tensión suministrada por el generador de funciones, la corriente entregada al yugo y el RB sensado.

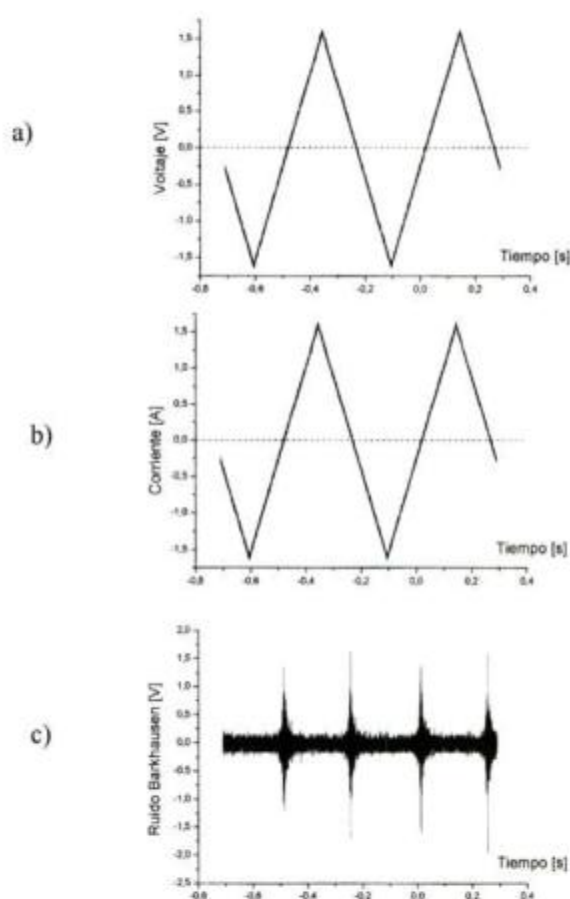


Fig. 5.3 Ejemplo de voltaje suministrado por el generador de funciones (a), Corriente entregada al yugo por el Alimentador de Corriente (b) y RB sensado (c).

El estudio de la señal RB que se realizó en este trabajo se basó en el análisis de los siguientes valores:

- ✓ Pico máximo (valor absoluto) (medido mediante el osciloscopio Le Croy 9360)
- ✓ Cálculo del parámetro M (ver 3.4.1)

- ✓ Valor RMS de toda la señal (RB de un semi ciclo) (calculado mediante el osciloscopio Le Croy 9360)
- ✓ RMS de la señal (integración electrónica según tiempo característico de integración mediante equipo Medidor de RMS Mod. CNEA T680, ver 4.3.1)
- ✓ Análisis de Fourier (calculado mediante el osciloscopio Le Croy 9360)

Para el análisis de Pico máximo, Valor RMS de toda la señal (ver 3.4.1), y cálculo del parámetro M, se eligió para la digitalización una frecuencia de muestreo de 250 ksamples/segundo = 250 Ks/s (250 kHz = 250 000 Hz).

El osciloscopio LeCroy 9360 permite el análisis automático del Valor Pico máximo y del valor RMS de toda la señal cada vez que adquiere una, y cuenta con la posibilidad de hacer un análisis estadístico de estos parámetros. Cabe aclarar que las señales de todas las probetas fueron digitalizadas con la misma base de tiempo para poder así compararlas correctamente. En los casos que esto no fue así se aclaran oportunamente.

Con respecto al cálculo del parámetro M (ver 3.4.1), una vez digitalizada la señal a una frecuencia de muestreo de 250 ks/s, se traduce el archivo que produce el osciloscopio, mediante el programa LeCroy Scope Explorer a formato ASCII. Con este archivo, se pueden utilizar distintos programas para realizar el análisis estadístico de la amplitud de voltajes del RB. En este trabajo se ha utilizado los programas Matlab 5.2.1. En el ANEXO 3 se encuentra el programa realizado para el cálculo de M.

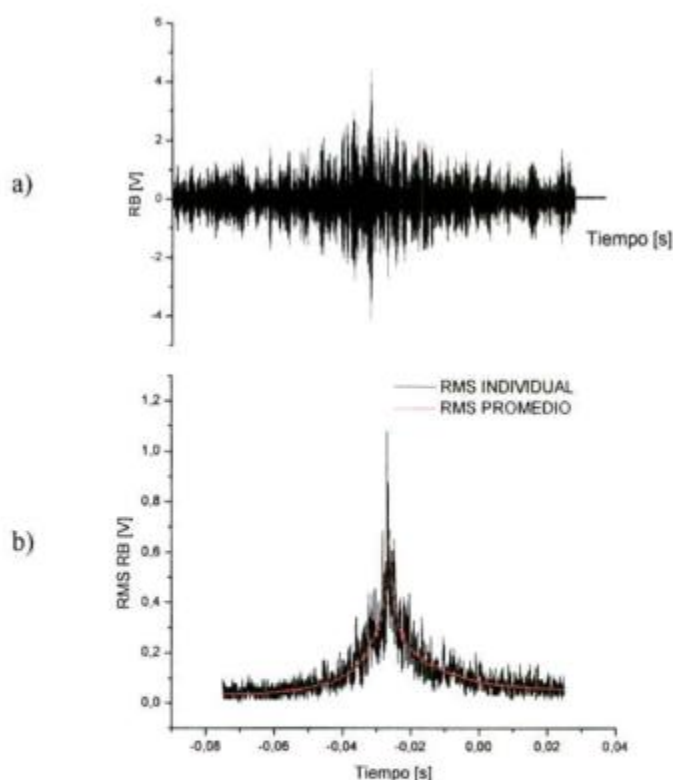


Fig. 5.4 Señal RB (a) y RMS instantáneo (calculado electrónicamente con el Medidor de RMS) y RMS promedio de N señales (calculado mediante el osciloscopio digital) (b).

El cálculo del RMS de la señal mediante la integración electrónica según un tiempo característico se realiza como ya se indicó mediante el equipo descrito en 4.3.1. Una vez que la señal es amplificada y filtrada, se conecta la salida del Amplificador y filtro de frecuencias a la entrada del medidor RMS (Mod. CNEA T680). Finalmente la salida del Medidor RMS se conecta al osciloscopio digital para visualizar, digitalizar y realizar los cálculos estadísticos de las señales. La frecuencia de muestreo fue de 250 ks/s. En la Fig. 5.4 se pueden ver a modo de ejemplo la señal RB y su correspondiente RMS instantáneo, y promedio de un número N (número total de mediciones para el cálculo estadístico) de señales analizadas.

El análisis de Fourier de la señal original, de acuerdo con lo ya comentado en 3.4.1, se realizó mediante el osciloscopio digital LeCroy 9360. La frecuencia de muestreo utilizada fue de 1 Ms/s (1 MHz), para obtener un rango de análisis de frecuencias de la señal de 20 kHz a 500 kHz. Mediante la opción matemática del mismo osciloscopio se realizó un análisis estadístico de los espectros de potencia de las señales recibidas, la cantidad de señales RB individuales digitalizadas para la realización del análisis estadístico se informarán oportunamente.

5.2.1.2 Disposición del equipo para medición de EMA y ajuste de parámetros

Para la medición de la EMA, se ha utilizado la disposición del yugo y demás equipos alimentadores de electricidad que producen la excitación magnética, como se indica en 5.2.1. En cuanto a la disposición de equipos específicos para la medición de EMA, se colocó un sensor piezoeléctrico de emisión acústica (ver 4.3.2), a aproximadamente 1.5 cm de distancia de una de las “patas” del yugo, con vaselina sólida que hace a las veces de acoplante, y fijada firmemente mediante una cinta adhesiva tomada a la probeta. El sensor se conectó al preamplificador, ya descrito en 4.3.3. El preamplificador se conecta al Amplificador de Emisión acústica y de éste a un Medidor de RMS (ver 4.3.1). El Amplificador de Emisión Acústica fue utilizado con un nivel de amplificación de 45 dB, en todo este trabajo. Las salidas del Amplificador de Emisión acústica y del Medidor de RMS, se conectaron al osciloscopio digital para visualizar, digitalizar y realizar los cálculos estadísticos.

Los análisis que se realizaron a la señal EMA fueron:

- ✓ RMS de la señal (integración electrónica según tiempo característico de integración)
- ✓ Análisis de frecuencias de Fourier

La señal de Emisión Acústica se digitalizó a una frecuencia de muestreo de 2.5 Ms/s, para el cálculo de la Transformada de Fourier; se aclara que debido a la longitud temporal de la señal de Emisión Acústica (del orden de los 100 ms), para este análisis se optó tomar la parte central de la señal en un intervalo de 10 ms. La señal de RMS se digitalizó en forma completa, a una frecuencia de 250 ks/s.

5.2.2 Medición de RB y EMA en probeta irradiada

Tanto el equipo de medición de RB, como el de medición de Emisión Acústica fueron los mismos que los ya comentados en 4.2.1. La diferencia en el tamaño de la probeta ya fue comentado en 4.1.3. Esto modificó el apoyo del yugo, la posición de la bobina sensora de RB y el sensor acústico, como se indica en la Fig. 5.5. Si bien el ancho del yugo fue más grande que el ancho de la probeta, esto no ofreció dificultad para la medición. Sin embargo el diferente tamaño de las probetas respecto de la serie P1 a P4, obligaron a realizar una nueva probeta de comparación (P 1.1), debido a que en esta etapa del trabajo se desconocía la influencia del tamaño de la probeta frente a la señal de RB y EMA medidos.

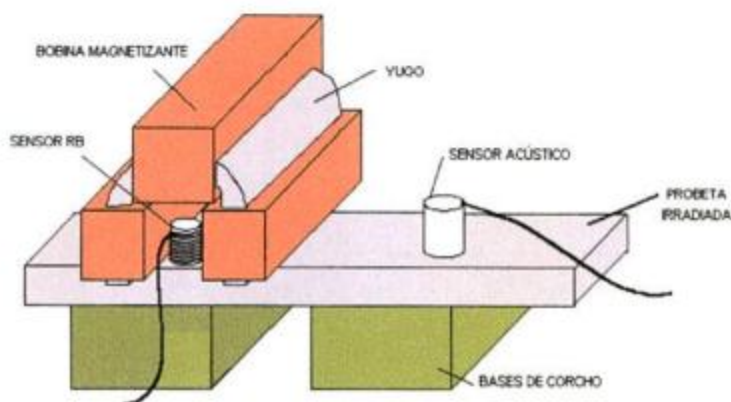


Fig. 5.5 Disposición de yugo excitador, sensor Rb y sensor acústico para probeta irradiada.

5.2.3 Medición de RB en probetas tensionadas

5.2.3.1 Disposición del equipo para aplicar tensión sobre la probeta

Con el objetivo de observar variaciones en las señales de RB a diferentes niveles de tensiones sobre un material ferromagnético, se ha utilizado un dispositivo que toma a la probeta descrita en 5.1.3 desde uno de sus extremos mediante dos tornillos. A su vez el dispositivo se fija al tablero de la mesa de trabajo mediante otro tornillo. Las fuerzas que provocan las tensiones se aplican en el otro extremo de la planchuela, mediante pesas colgadas en el mismo. El esquema de sujeción permite modelar la planchuela como si fuera una viga en voladizo, con una luz libre de 21.5 cm. Se puede ver en la Fig. 5.6 el esquema de cálculo.

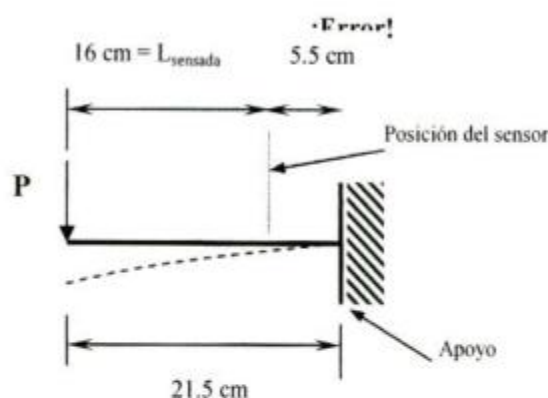


Fig. 5.6 Esquema de viga en voladizo del ensayo de RB vs. Tensiones.

Las tensiones fueron evaluadas en la misma posición en la que se midió el RB. Las tensiones máximas en esta posición, despreciando el peso propio de la planchuela, fueron calculadas según la ecuación,

$$\sigma_{\text{máx}} = P \cdot L_{\text{sensada}} / (b \cdot h^2/6) \quad (5.1)$$

donde $\sigma_{\text{máx}}$ = tensión máxima (fibra superficial) sobre la zona de medición RB [2]

P = carga aplicada

L_{sensada} = distancia entre la posición del sensor y la carga

b = ancho de la planchuela

h = espesor de la planchuela

Se aplican cargas a la probeta cargas con dirección vertical, hacia abajo y hacia arriba. Las primeras y como se indica en la Fig. 5.6, producen tensiones de tracción en la superficie superior de la planchuela, las segundas producen tensiones de compresión en la misma posición.

5.2.3.2 Disposición del equipo para medición del RB ajuste de parámetros

De acuerdo a como se describió en 5.2.3.1, la zona de medición de RB fue determinada por las dimensiones del yugo excitador. El mismo se colocó lo más cerca posible del apoyo para obtener las mayores tensiones posibles en la zona de medición magnética. Para la medición del RB se ubicó la bobina sensora entre las “patas” del yugo a una distancia L_{sensada} de la carga. El yugo excitador fue firmemente asegurado a la probeta mediante una cinta adhesiva. Los equipos utilizados, los parámetros de excitación y amplificación, fueron los mismos que los descritos en 4.2.1. En la Fig. 5.7 se muestra el esquema de ensayo incluyendo los elementos de excitación y medición.

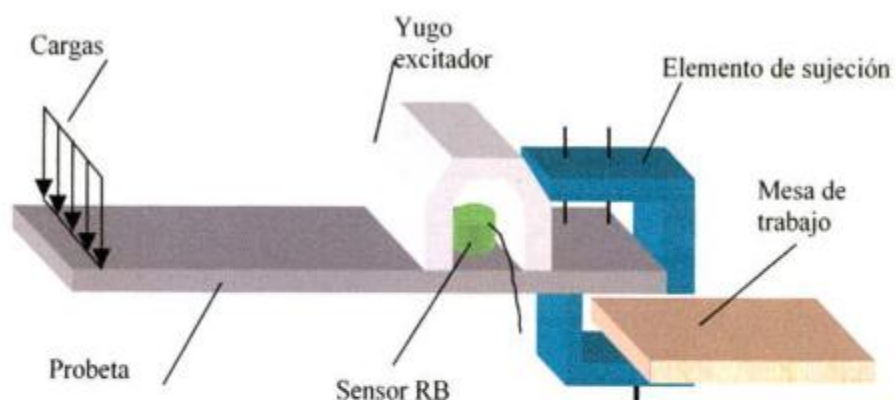


Fig. 5.7 Esquema de la ubicación de los sensores de medición de RB y EMA y el yugo excitador.

Los análisis de la señal RB que se realizaron en esta etapa fueron,

- ✓ Pico máximo (valor absoluto)
- ✓ Valor RMS de toda la señal (RB de un semi ciclo (ver 3.4.1))

La frecuencia de muestreo de la señal digitalizada fue de 1 Ms/s.

REFERENCIAS

- [1] Metal Handbook ASM 8 th Edition, 1973
- [2] Timoshenko S. P., Gere J. M., “Mecánica de Materiales”, 2000

Capítulo 6

Resultados y discusión

En este Capítulo se informan los resultados de los ensayos realizados y se realizan las discusiones a partir de los mismos.

6.1 Mediciones en probetas con tratamientos termo-mecánicos

Las probetas reunidas en este grupo son las que se indican en la Tabla 6.1. A ellas se les midió el RB y la EMA, y los parámetros que se indican a continuación. La elección de los parámetros de control de los equipos fue explicado en el Capítulo V, sin embargo se harán las aclaraciones pertinentes en cada ítem de medición.

Tabla 6.1 Denominación de las probetas y cambios micro estructurales efectuados

Probeta	Proceso
P1	Sin tratamiento, testigo
P2	Decarburizada
P3	Crecimiento de grano
P4	Deformada en Frío

6.1.1 Resultados de RB

Los parámetros que fueron medidos en el RB sobre las probetas con tratamientos termo-mecánicos (ver 5.2.1.1) fueron:

- I. Pico máximo (valor absoluto) y Valor RMS de toda la señal (RB de un semiciclo)
- II. Cálculo del parámetro M
- III. RMS de la señal (integración electrónica según tiempo característico de integración)
- IV. Análisis de Fourier

I. Pico máximo (valor absoluto) y Valor RMS de toda la señal para el RB de un semiciclo)

Se realizaron 400 mediciones de la señal para obtener el análisis estadístico de los parámetros ya descriptos en 5.2.1.1. La frecuencia de muestreo de la señal fue de 250 ks/s. A continuación se informan y discuten los resultados de cada probeta comparándolas con la probeta testigo (P1)

a) Resultados de la probeta P1

Los resultados se observan en la Tabla 6.1. En la Fig. 6.1 se pueden ver a modo de ejemplo, tres señales del mismo semiciclo, obtenidas sobre la probeta P1.

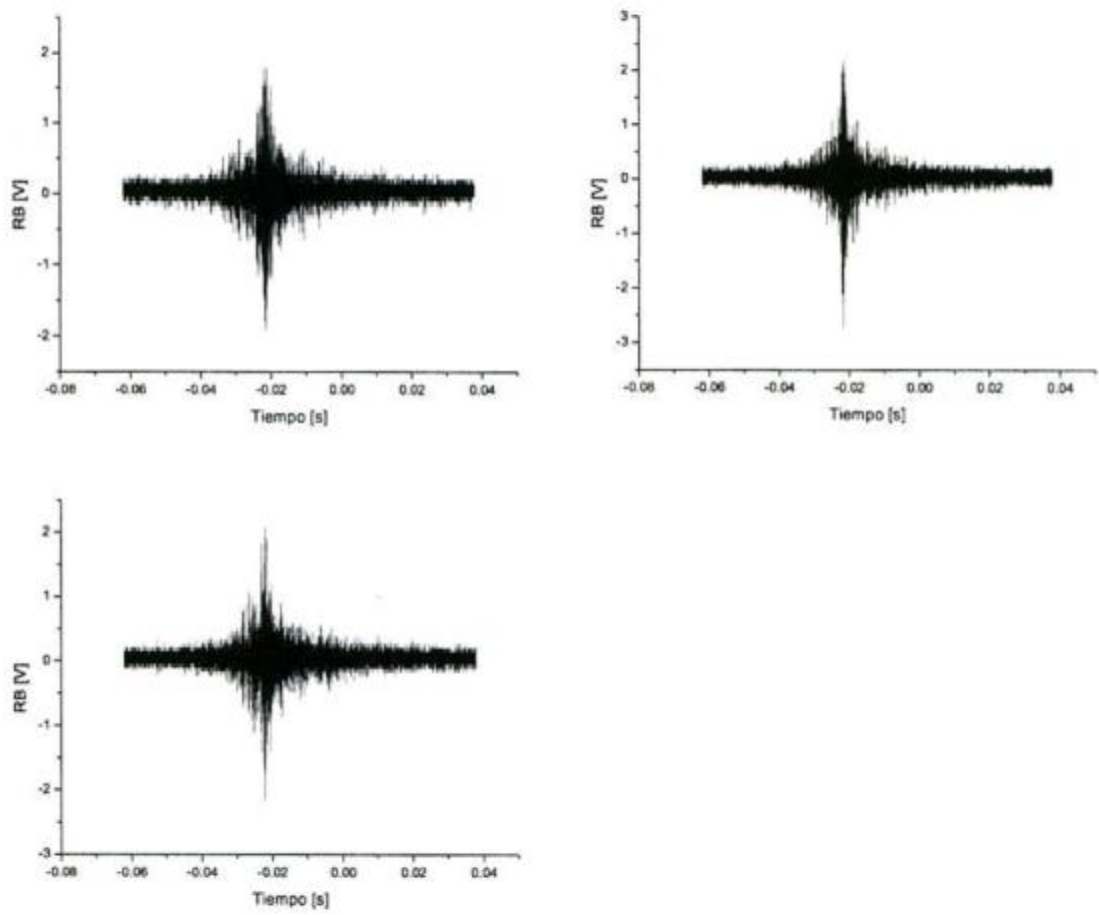


Fig. 6.1 Ejemplo de tres señales de RB correspondientes a un semiciclo de la probeta P1.

Tabla 6.1 Resultados promedios de Pico máximo y RMS de toda la señal.

Probeta	Pico máximo promedio [V]	RMS promedio de toda la señal [mV]
P1	3.759 ± 0.500	167.88 ± 6.84

b) Resultados de la probeta P2

Los resultados se observan en la Tabla 6.2. En la Fig. 6.2 se pueden ver a modo de ejemplo, una señal obtenida de la probeta P2 y en la Fig. 6.3 su comparación con la señal de obtenida de la probeta P1.

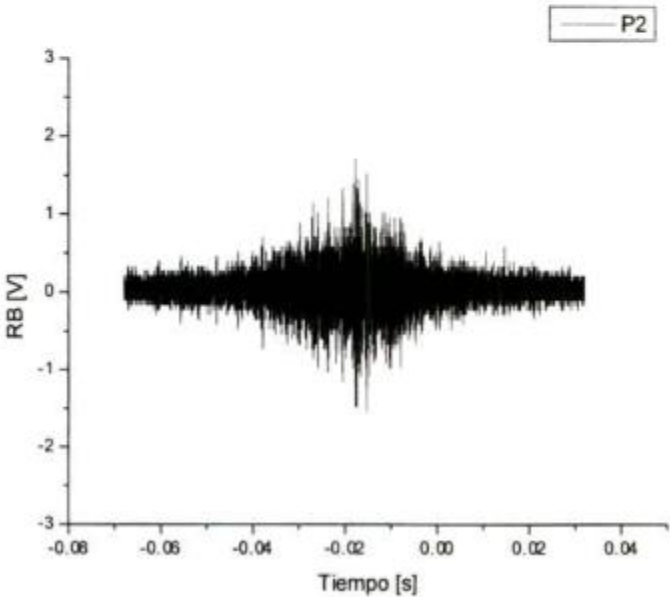


Fig. 6.2 Ejemplo de señal de RB correspondientes a un semiciclo de la probeta P2

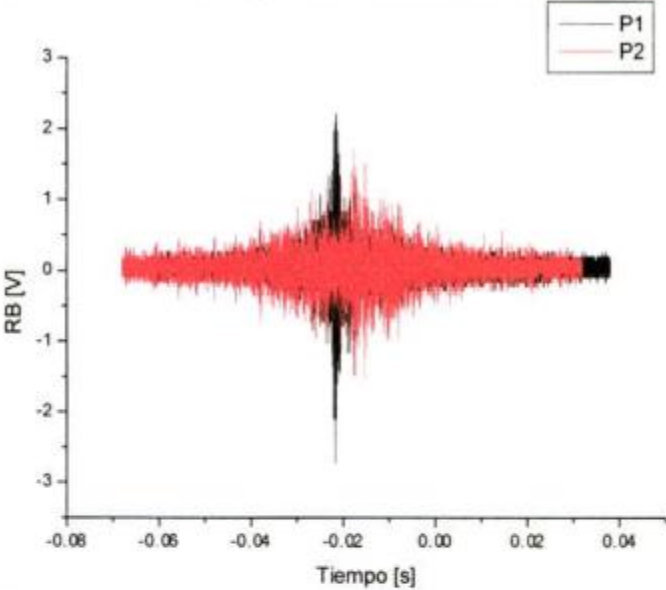


Fig. 6.3 Comparación de señales P1-P2

Tabla 6.2 Resultados promedios Pico máximo y RMS de toda la señal.

Probeta	Pico máximo [V]	RMS de toda la señal [mV]
P2	2.634 ± 0.28	195.95 ± 4.59

c) Resultados de la probeta P3

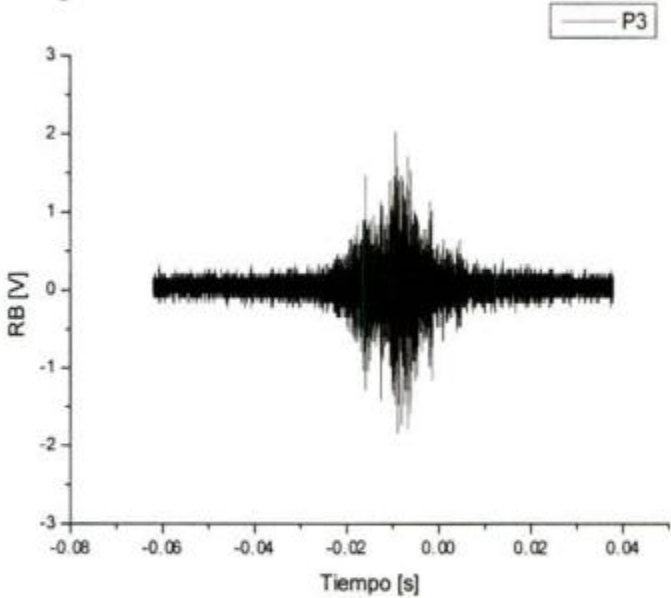


Fig. 6.4 Señal tipo RB de P3

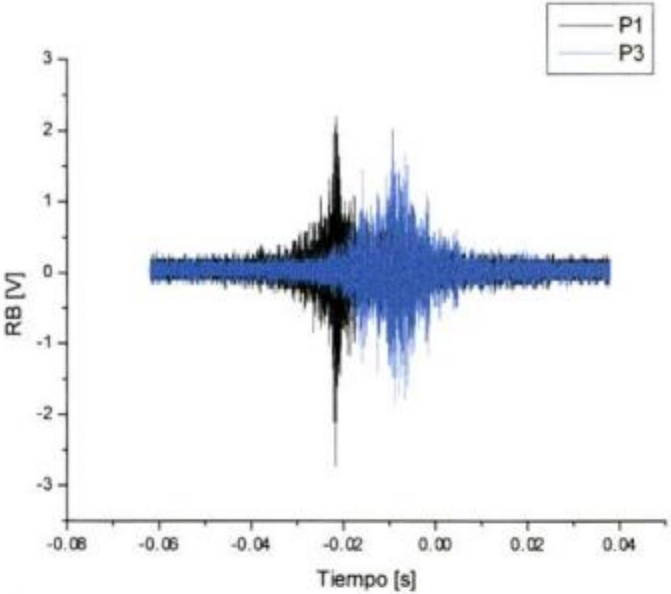


Fig. 6.5 Comparación de señales P1-P3

Los resultados se observan en la Tabla 6.3. En la Fig. 6.4 se pueden ver a modo de ejemplo, una señal proveniente de la probeta P3 y en la Fig. 6.5 su comparación con la probeta P1.

Tabla 6.3 Resultados promedios Pico máximo y RMS de toda la señal.

Probeta	Pico máximo [V]	RMS de toda la señal [mV]
P3	5.335 ± 0.630	245.77 ± 10.82

d) Resultados de la probeta P4

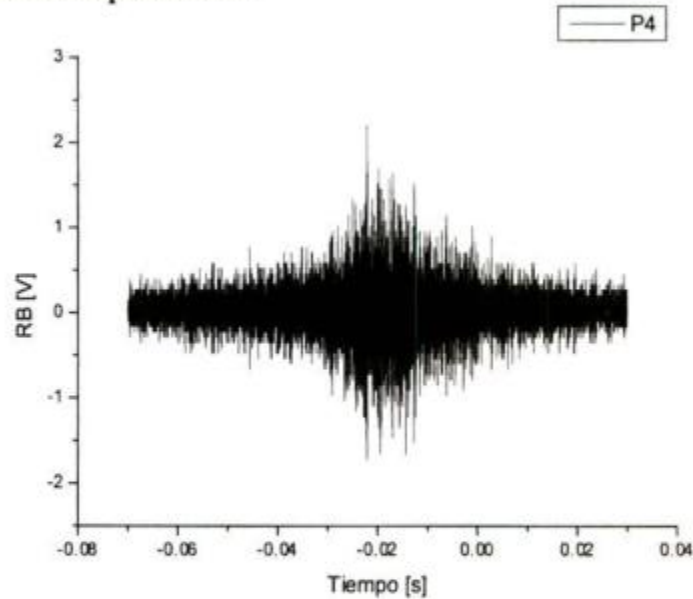


Fig. 6.6 Señal tipo RB de P4

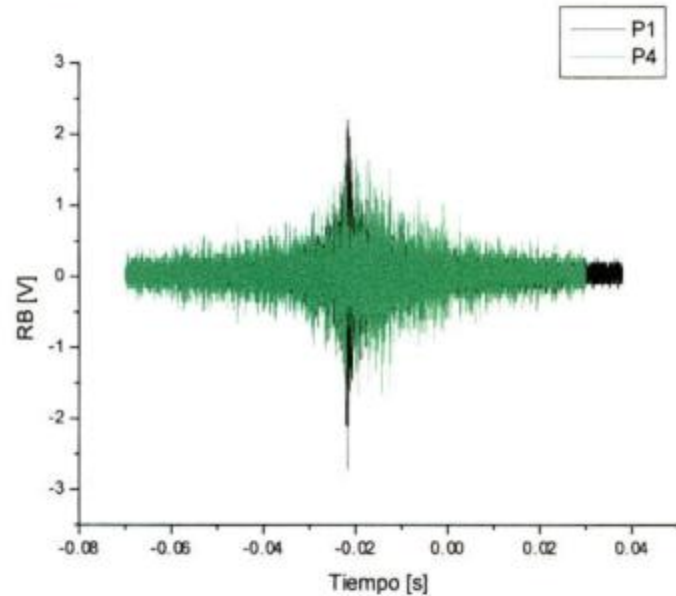


Fig. 6.7 Comparación de señales P1 P4

Los resultados se observan en la Tabla 6.4. En la Fig. 6.6 se pueden ver a modo de ejemplo, una señal proveniente de la probeta P4 y en la Fig. 6.7 su comparación con la probeta P1.

Tabla 6.4 Resultados promedios Pico máximo y RMS de toda la señal.

Probeta	Pico máximo [V]	RMS de toda la señal [mV]
P4	3.437 ± 0.337	265.95 ± 9.32

Discusión de resultados

A partir de todos los resultados obtenidos, se hará la comparación de ellos con la probeta P1 (probeta testigo), representando el estado original. Cabe aclarar que la comparación es cuali-cuantitativa, y en algunos casos se dará la justificación del fenómeno físico que se traduce en los resultados de los parámetros de las señales.

Se pueden observar en la Tabla 6.5 los valores de pico máximo y RMS de toda la señal, de todas las probetas ensayadas. Allí se ve claramente las diferencias en los parámetros de las señales RB de las diferentes probetas.

Tabla 6.5 Picos máximos y RMS de toda la señal de las probetas P1, P2, P3 y P4.

Probeta	Pico máximo [V]	RMS de toda la señal [mV]
P1	3.759 ± 0.500	167.88 ± 6.84
P2	2.634 ± 0.280	195.95 ± 4.59
P3	5.335 ± 0.630	245.77 ± 10.82
P4	3.437 ± 0.337	265.95 ± 9.32

La probeta P2 presenta respecto a la probeta P1 un menor pico máximo y un mayor RMS de toda la señal. Esto demuestra que las señales de P2 son más extendidas en el tiempo y con menor amplitud como se puede observar en las señales individuales (Fig. 6.3). Este comportamiento se explicaría debido a la menor obstaculización al movimiento de las paredes de los dominios debida a los bordes de granos en la superficie y al menor contenido de perlita. Como primera aproximación se podría decir que el movimiento de los dominios en la Probeta P2 comienza a campos H menores que en la P1, dado que se verifica que la señal RB comienza a crecer antes que la señal de la probeta P1.

La probeta P3 presenta respecto de la probeta P1 mayor pico máximo y mayor RMS de toda la señal, pero en ambos casos una mayor dispersión de resultados (ver también Fig. 6.5). Esto podría deberse a que los dominios magnéticos se mueven con mayor facilidad, hasta un nivel de campo magnético en el que los dominios se liberarían y se produciría este pico máximo mayor. El mayor valor del RMS de toda la señal se justificada debido a que los picos mayores influyen mucho más sobre el valor del RMS de toda la señal [1].

La probeta P4 presenta respecto de la probeta P1 un pico máximo levemente menor y mayor RMS de toda la señal, mayor inclusive que el que corresponde a la P3 (ver también Fig. 6.7). Podría explicarse esto debido a que la deformación en frío produce un aumento de los puntos de fijación de las paredes de dominios [2] (aumento de la densidad de dislocaciones) y hace disminuir el valor de pico máximo de la señal. Respecto del aumento del RMS, podría deberse a una mayor cantidad de obstáculos finamente dispersos, pero con menor eficiencia de fijación de las paredes de dominios.

En general se observa que el valor del pico máximo y del RMS de toda la señal son parámetros que pueden relacionarse con la micro estructura. Sin embargo se puede apreciar

que la disminución o aumento de los parámetros pueden producirse por más de un cambio micro estructural, esto se debe tener en cuenta en caso de utilizar este sistema como END. Futuras investigaciones deberán verificar cuál de estos parámetros es el más adecuado para los diferentes cambios micro estructurales.

II. Parámetro M

En base a las señales digitalizadas, a partir de lo explicado en 3.4.1 y utilizando el procedimiento detallado en 5.2.1.1 se calculó el parámetro M. Cabe aclarar que el valor m es la amplitud de cada pico de la señal RB y que M es el valor que divide a la gráfica de distribución en dos áreas iguales. La frecuencia de muestreo utilizada para la digitalización de la señal RB para el cálculo de este parámetro fue en todos los casos de 1Ms/s. Se informa además el valor promedio de M, del análisis de 5 señales de cada probeta.

a) Resultados de la probeta P1

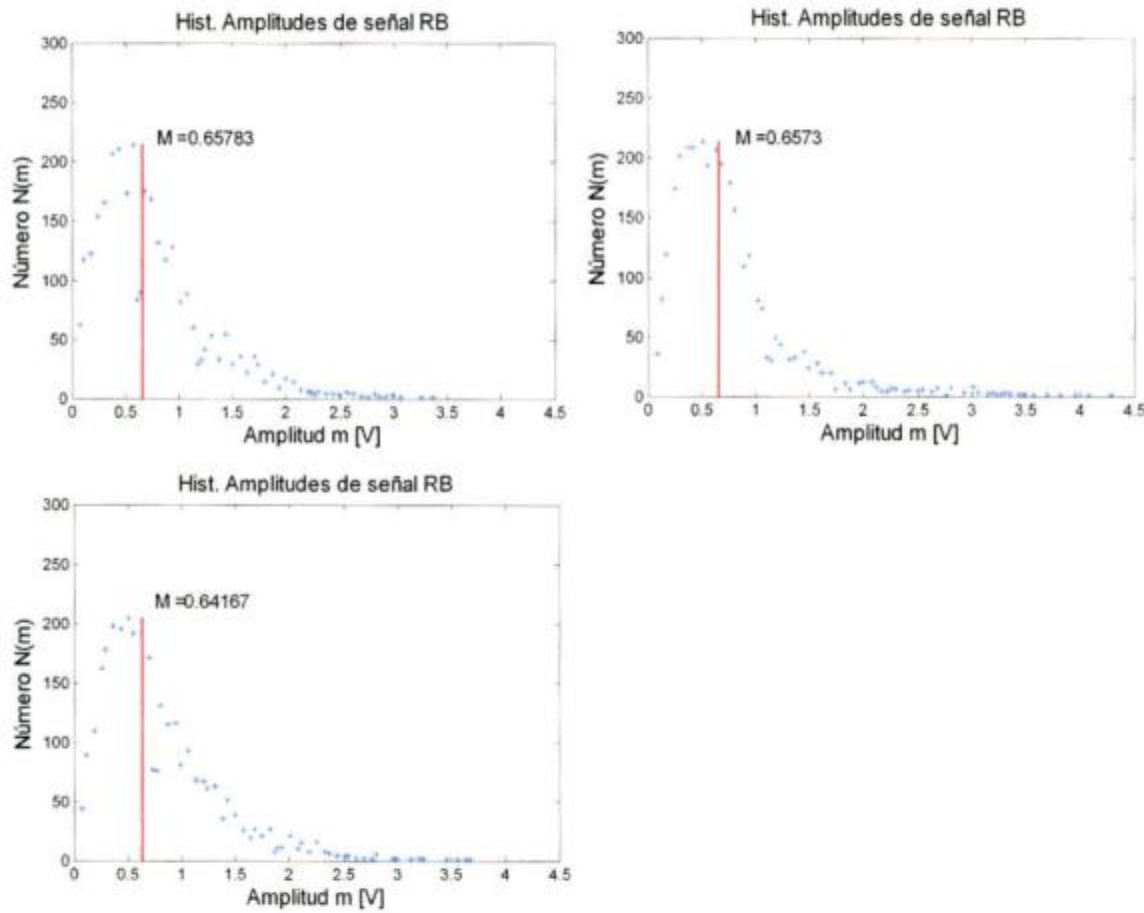


Fig. 6.8 Ejemplos de distribución de amplitudes de señales RB en probeta P1.

Se pueden observar a modo de ejemplo, en la Fig. 6.8 tres gráficas de distribución de amplitudes de diferentes señales de la misma probeta P1. Los resultados promedios se muestran en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6 Parámetro M de probeta P1.

Probeta	Parámetro M [V]
P1	0.6488 ± 0.0101

b) Resultados de la probeta P2

En la Fig. 6.9 se puede observar tres histogramas de amplitudes de diferentes señales de la misma probeta. Los resultados promedios se muestran en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7 Parámetro M de Probeta P2.

Probeta	Parámetro M [V]
P2	0.2212 ± 0.0107

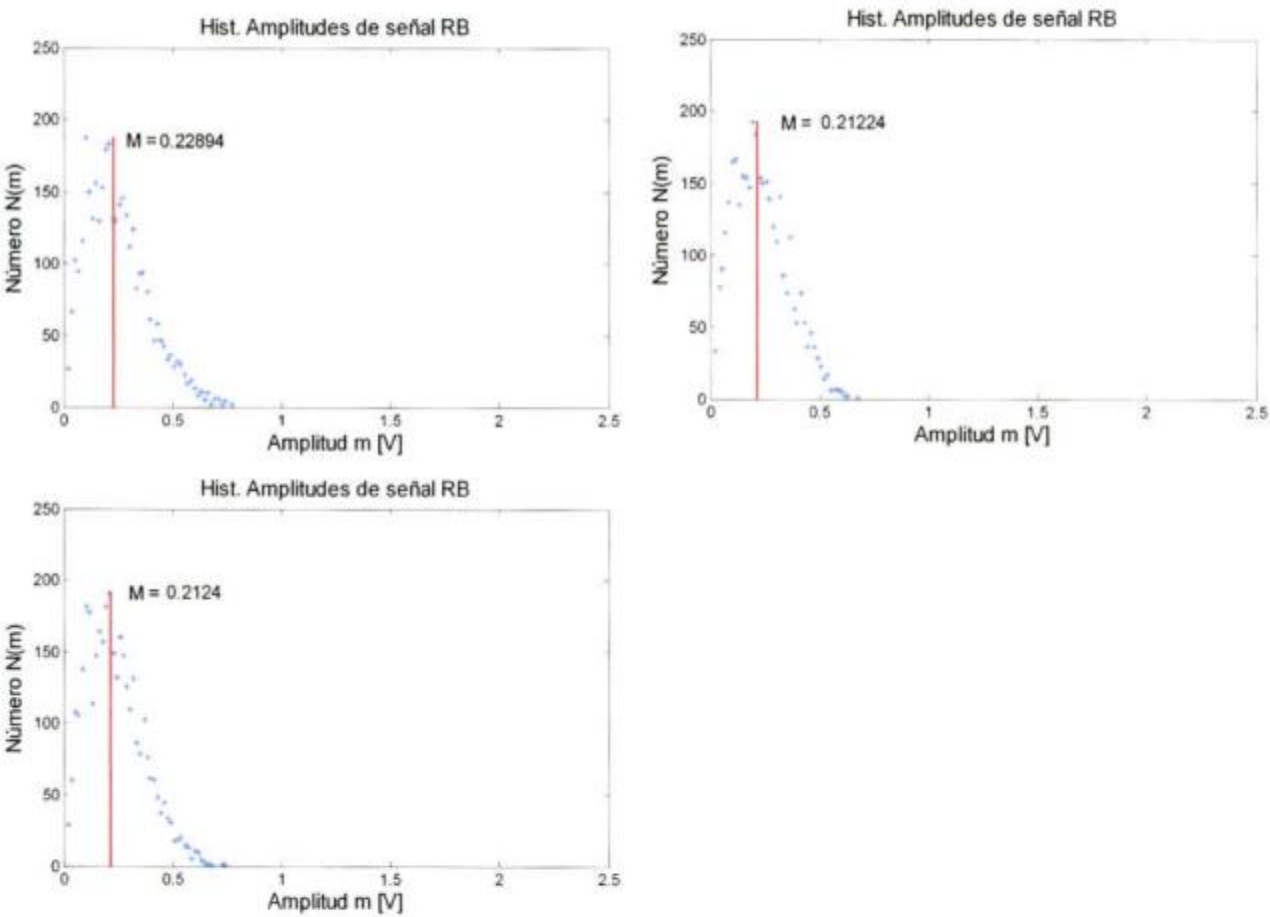


Fig. 6.9 Ejemplos de distribución de amplitudes de señales RB en probeta P2.

En la Fig. 6.10 se pueden observar las diferencias en la distribución de amplitudes de las señales provenientes de las probetas P1 y P2.

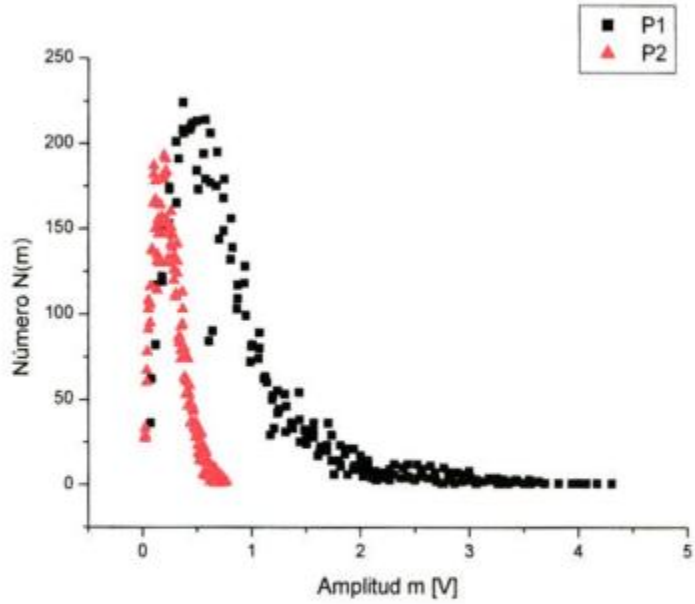


Fig. 6.10 Distribución de amplitudes comparadas probetas P1-P2

c) Resultados de la probeta P3

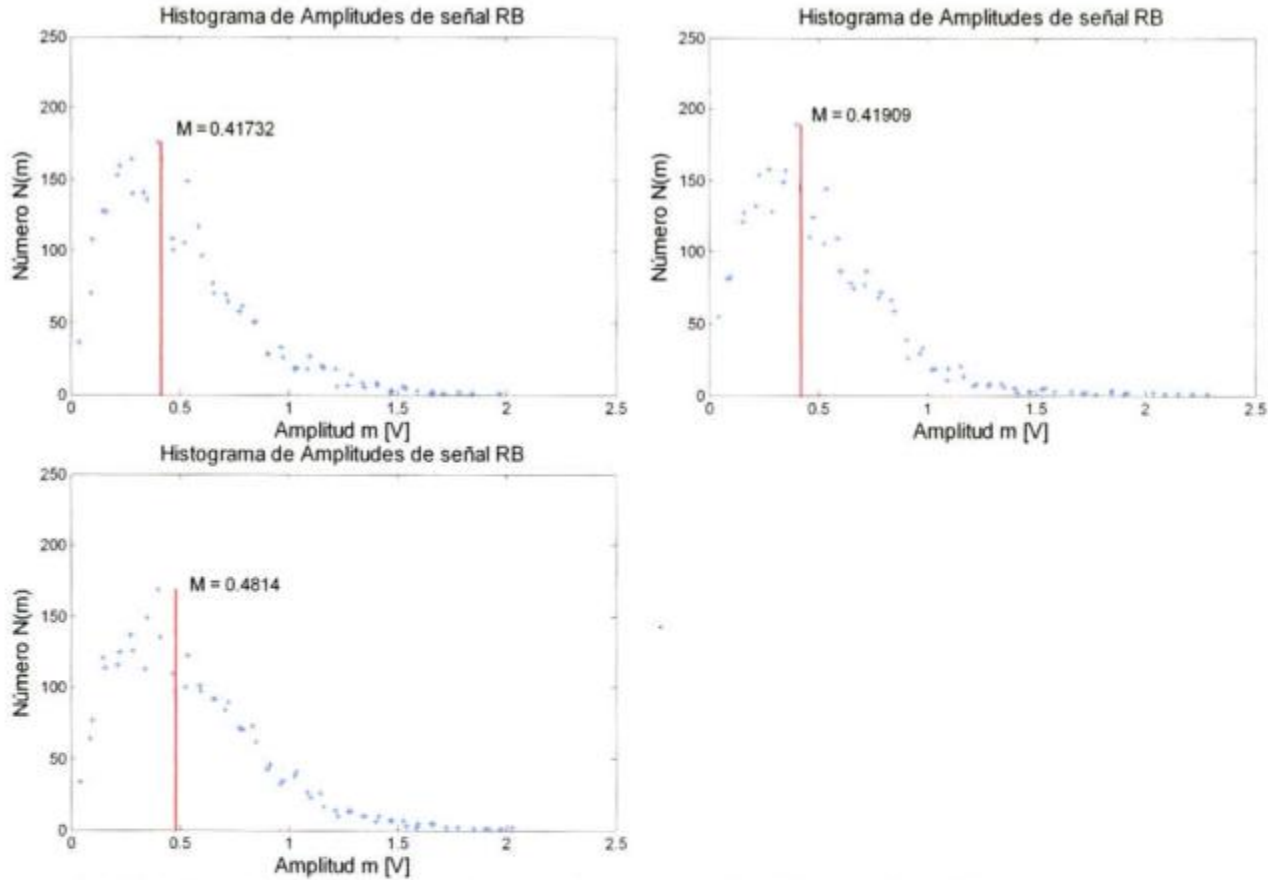


Fig. 6.11 Ejemplos de distribución de amplitudes de señales RB en probeta P3.

En la Fig. 6.11 se pueden observar tres histogramas de amplitudes de diferentes señales de la misma probeta. Los resultados promedios se muestran en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8 Parámetro M de Probeta P3.

Probeta	Parámetro M [V]
P3	0.4493 ± 0.0378

En la Fig. 6.12 se puede ver en forma comparativa la gráfica de distribución de amplitudes de las probetas P1 y P3.

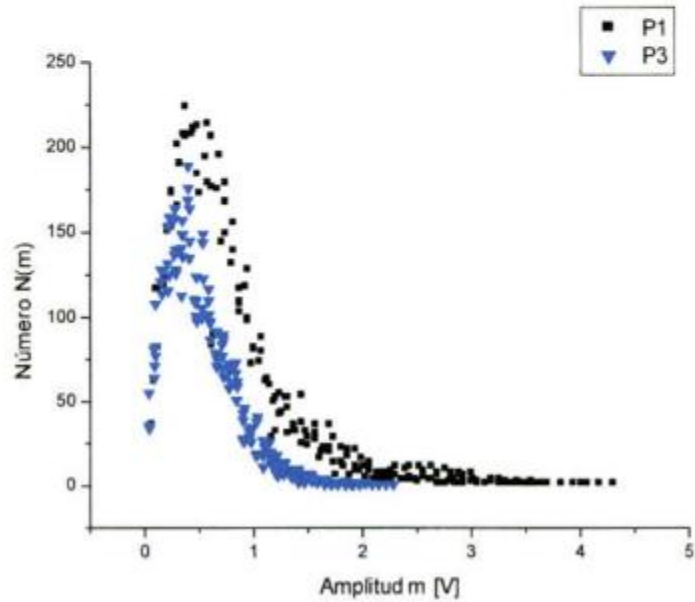


Fig. 6.12 Gráfica de distribución de amplitudes comparativa de las probetas P1-P3

d) Resultados de la probeta P4

En la Fig. 6.13 se puede observar tres histogramas de amplitudes de diferentes señales de la misma probeta. Los resultados promedios se muestran en la Tabla 6.9.

Tabla 6.9 Parámetro M de Probeta P4.

Probeta	Parámetro M [V]
P4	0.4749 ± 0.0067

En la Fig. 6.14 se puede observar en forma comparativa la distribución de amplitudes de las señales provenientes de la probeta P1 y P4.

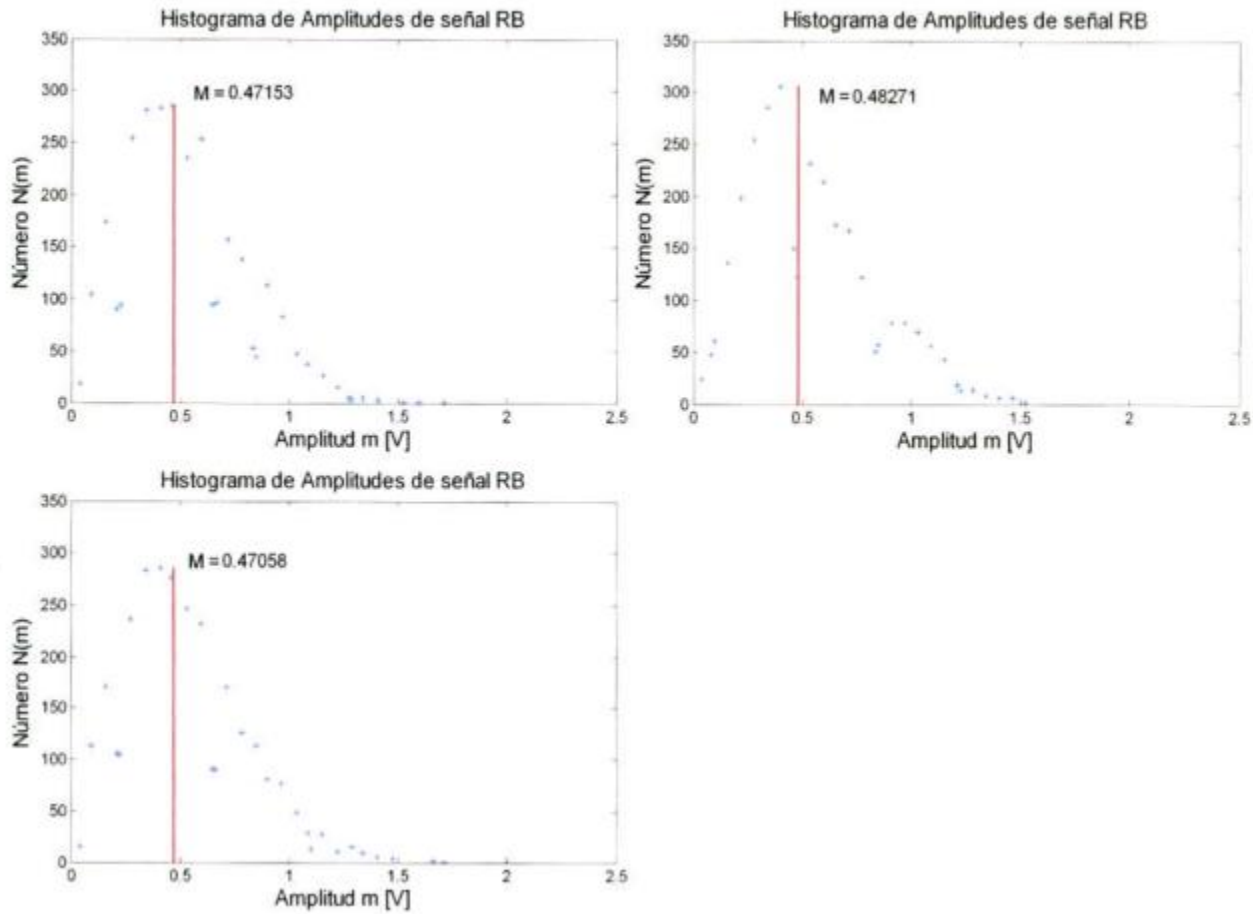


Fig. 6.13 Ejemplos de gráfica de distribución de amplitudes de señales RB en probeta P4.

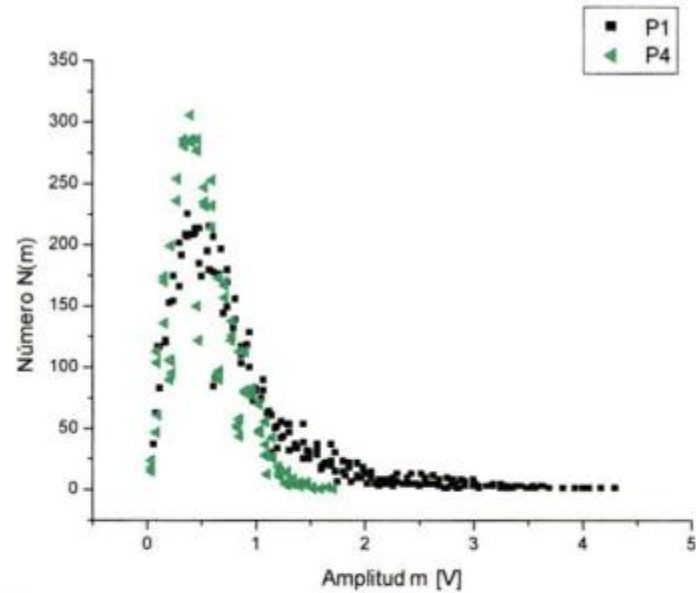


Fig. 6.14 Gráfica de distribución de amplitudes comparativo P1-P4

Discusión de resultados

En la Tabla 6.10 se pueden observar todos los valores del parámetro M de las probetas ensayadas, y las diferencias entre los valores entre sí.

Tabla 6.10 Parámetro M de probetas P1, P2, P3 y P4.

Probeta	Parámetro M [V]
P1	0.6488 ± 0.0101
P2	0.2212 ± 0.0107
P3	0.4493 ± 0.0378
P4	0.4749 ± 0.0067

Vemos a partir de la distribución de amplitudes (ver Fig.6.9 y 6.10) y del parámetro M, que la probeta P2 tiene respecto de la probeta P1, un gran número de picos de baja amplitud, esto podría deberse a que el movimiento de las paredes de dominios está levemente limitado.

De la tabla 6.10, vemos que la probeta P3 presenta un parámetro M menor a P1, y una mayor dispersión de resultados. Observamos de la distribución de amplitudes que presenta un mayor número de picos menores a 1 V (ver Fig. 6.12). De este trabajo surge la disminución del parámetro M con aumento del tamaño de grano. Este resultado según la literatura, se ve influido por el tipo de tratamiento termo-mecánico para el crecimiento de grano, la existencia de una textura (orientación preferencial) en el material, etc. [3].

La probeta P4 presenta un parámetro M menor que la P1, y vemos en la distribución de amplitudes un aumento del número de picos de bajo valor (menor a 0.5 V) respecto de la probeta P1 (ver Fig. 6.14). Además notamos una mayor discontinuidad en la gráfica de la distribución de amplitudes, en determinados intervalos de amplitud (ver 6.13).

En general observamos que el parámetro M ha resultado distinto en todos los casos medidos en estas probetas, que representan estados muy disímiles. Este también es un resultado satisfactorio, desde el punto de vista del método, considerando los desvíos estándares de los resultados obtenidos. Sin embargo para los casos en que los cambios microestructurales sean mas leves (no evaluados en este trabajo), es posible que los valores del parámetro M tomen valores similares con cambios microestructurales completamente diferentes (decarburiación parcial comparada con una deformación plástica menor, etc.). Por ello, las recomendaciones dadas a este respecto en la discusión sobre el valor del pico máximo y RMS de toda la señal, siguen siendo aquí válidas. Respecto de la distribución de amplitudes en cada probeta se puede observar que existen ciertas discontinuidades en la curva, y amplitudes “preferidas”. Los orígenes de dichas amplitudes y esquemas de distribución pueden ser por razones experimentales, y deben ser objeto de futuras investigaciones. Asimismo se recomienda estudiar en el futuro la relación entre el número de intervalos en el diagrama de distribución de amplitudes (la forma de la curva de distribución) y el valor del parámetro M.

III. **RMS de la señal (integración electrónica según tiempo característico de integración)**

Se realizaron 100 mediciones de RB y se determinó el RMS según lo explicado en 5.2.1.1 (integración electrónica según tiempo característico de integración del equipo Mod. CNEA T680), generando una curva promedio de RMS de las curvas instantáneas, mediante el osciloscopio digital Le Croy 9360. La frecuencia de muestreo utilizada para la digitalización de la señal RB para el cálculo de este parámetro fue en todos los casos de 250 ks/s. Cabe aclarar que los tiempos negativos mostrados en las gráficas son solamente la indicación del osciloscopio digital de la posición del “delay” (retraso empleado) del equipo, con valor 0 s.

a) **Resultados de la probeta P1**

En la Tabla 6.11 se puede observar el valor máximo del pico de RMS de las señales provenientes de la probeta P1 y su posición temporal, y en la Fig. 6.15 se puede observar la curva RMS promedio de la señal RB.

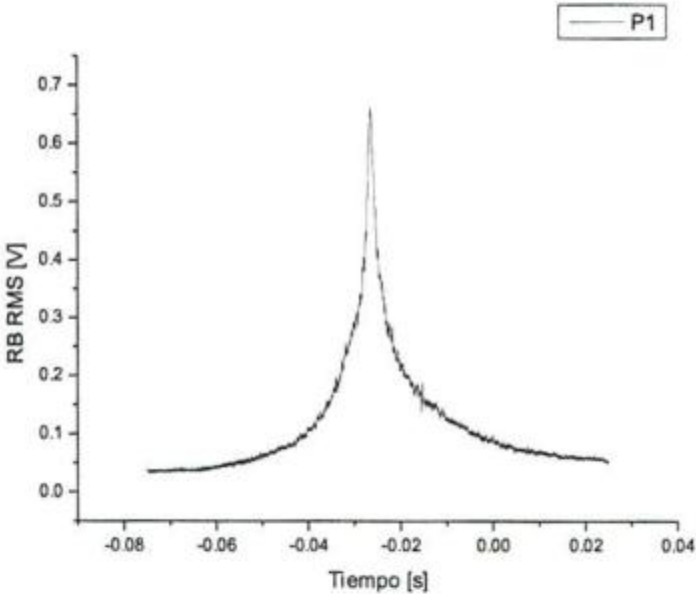


Fig. 6.15 RMS medio de 100 señales RB de probeta P1.

Tabla 6.11 Valor RMS máximo de la curva RMS de la señal RB.

Probeta	RMS máximo [V]	Posición temporal [s]
P1	0.66219	-0.02639

b) **Resultados de la probeta P2**

De la misma manera que con P1, sobre la probeta P2 se realizaron 100 mediciones de RMS calculándose un promedio de las gráficas RMS instantáneas. La curva promedio se puede observar en la Fig. 6.16, en ella se puede observar la aparición de dos picos en la señal

RMS. En la Tabla 6.12 se pueden observar los valores de picos máximo y su posición temporal.

Debido a la aparición de 2 picos, se utilizó el siguiente criterio para su denominación, se llamó Pico 1 al pico máximo, y Pico 2 al segundo máximo de la curva del RMS promedio.

Tabla 6.12 Valores máximos de RMS y posición temporal, probeta P2.

Probeta	RMS máximo Pico 2 [V]	Posición temporal [s]	RMS máximo Pico 1 [V]	Posición temporal [s]
P2	0.2443	-0.04293	0.25075	-0.02451

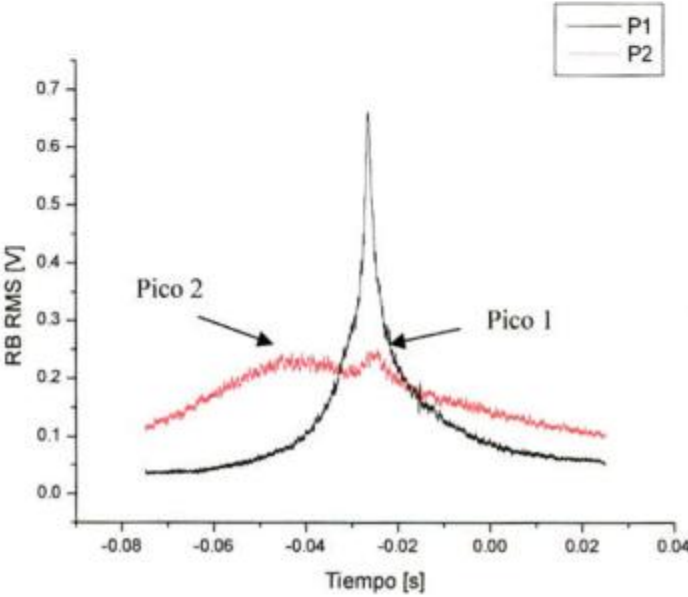


Fig. 6.16 RMS promedio comparativo P1-P2

c) Resultados de la probeta P3

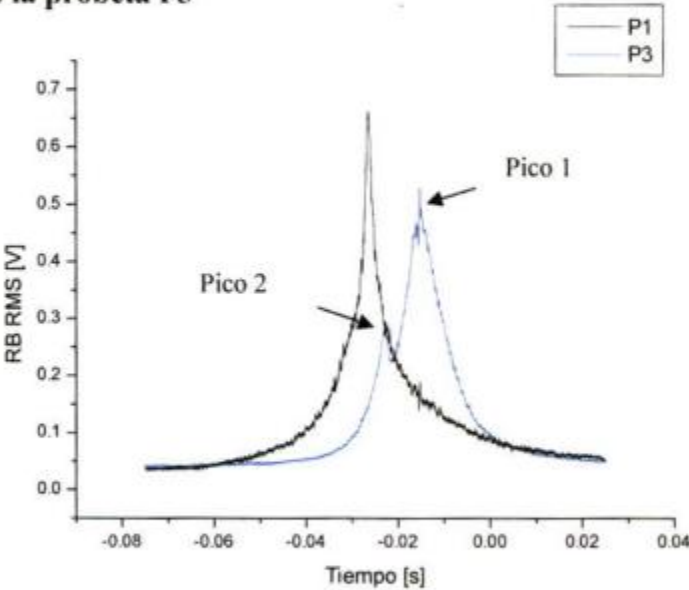


Fig. 6.17 RMS promedio comparativo P1 P3

La curva promedio de RMS de la señal, se puede observar en la Fig. 6.17. Se puede observar la aparición de dos picos en la gráfica de RMS promedio. En la Tabla 6.13 se pueden observar los valores de pico máximo y su posición temporal.

Tabla 6.13 Valores máximos de RMS y posición temporal, probeta P3.

Probeta	RMS máximo Pico 1 [V]	Posición temporal [s]	RMS máximo Pico 2 [V]	Posición temporal [s]
P3	0.52997	-0.01525	0.28217	-0.0227

d) Resultados de la probeta P4

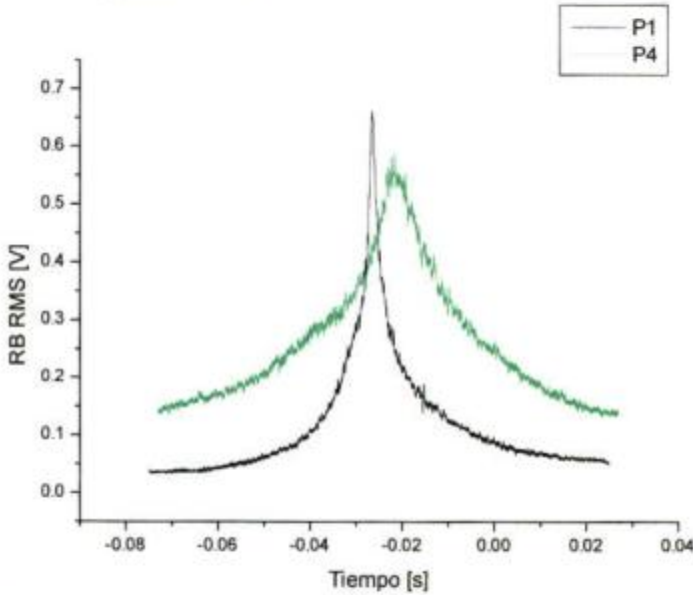


Fig. 6.18 RMS promedio comparativo P1-P4

Sobre la probeta P4 se realizaron las mediciones de RMS calculándose un promedio de las gráficas RMS instantáneas. La curva promedio se puede observar en la Fig. 6.18. En la Tabla 6.14 se pueden observar los valores de picos máximo y su posición temporal.

Tabla 6.14 Valores máximos de RMS y posición temporal, probeta P4.

Probeta	RMS máximo [V]	Posición temporal [s]
P4	0.59175	-0.02152

Discusión de resultados

A partir de todos los resultados obtenidos, se hará a continuación la comparación de ellos con la probeta P1 (probeta testigo), representando el estado original. Cabe aclarar que la comparación es cuali-cuantitativa.

Los resultados de picos máximos y ubicación temporal se pueden observar en la Tabla 6.15.

Tabla 6.15 Valores RMS máximos de las curvas promedios de las señales RB para probetas P1, P2, P3 y P4.

Probeta	Valor máximo Pico 1 [V]	Posición temporal Pico 1 [s]	Valor máximo Pico 2 [V]	Posición temporal Pico 2 [s]
P1	0.66219	-0.02639	-	-
P2	0.25075	-0.02451	0.2443	-0.04293
P3	0.52997	-0.01525	0.28217	-0.0227
P4	0.59175	-0.02152	-	-

Inicialmente podemos observar comparando la gráfica de RMS de la probeta P1 y P2 (superficialmente decarburizada) (ver Fig 6.16), que en la segunda aparecen dos picos y que el valor máximo de estos picos es menor que el pico aparecido en la probeta P1. El bajo valor de RMS está asociado como ya se comentó con la disminución general de la emisión RB en aceros de bajo contenido de carbono respecto de otros con mayor contenido de carbono (ver Discusión sobre Pico máximo y RMS de toda la señal). Cabe aclarar que los picos aparecidos en la probeta P2 también tienen una variación en la aparición temporal, adelantándose el primer pico máximo al obtenido en la probeta P1, es decir a menores nivel de fuerza magnética. La aparición de dos picos se podría explicar debido a la aparición de dos fenómenos en el movimiento de las paredes de dominios. En el primero, se produciría el movimiento de paredes de dominios hasta un elemento de fijación, luego al alcanzar un nivel de fuerza magnética que pueda superar esta barrera, se liberan dichas paredes y producen el segundo pico [4].

Respecto de la probeta P3 (grano crecido), nuevamente aparecen dos picos, sin embargo la posición de estos picos se retrasan respecto de la aparición del pico máximo en la probeta P1 (ver Fi. 6.17). Además el pico máximo en la probeta P3 aparece después de un pico menor, inversamente a lo ocurrido en la probeta P2. Esto estaría definiendo otro mecanismo que produce este tipo de picos. Probablemente al tener el grano mayor el primer pico corresponde al movimiento de los dominios en la ferrita, y el segundo pico correspondería al movimiento de los dominios en la perlita [5].

En la probeta P4 (deformada en frío, ver Fig. 6.18), podemos observar un solo pico en la gráfica del RMS, y un valor más bajo del máximo RMS promedio, además se puede observar un retraso respecto al estado original. Esto estaría de acuerdo con la dificultad que tiene el movimiento de los dominios debido al aumento de los puntos de fijación de las paredes, causados por el aumento de la densidad de dislocaciones (ver Discusión Valor pico máximo y RMS total de la señal, sobre la P4).

Con respecto al método en general, vemos que el estudio de la gráfica de RMS de la señal RB es un método muy sensible a los cambios micro estructurales, en particular a los

cambios en las fases del material. Podemos observar que tanto los valores de Picos máximos como su ubicación temporal difieren en las diferentes probetas. Deberá estudiarse en el futuro la relación existente entre la gráfica del RMS (integración bajo un tiempo característico muy pequeño), y la variación de los parámetros medidos de la señal, en particular la frecuencia de filtrado de la señal, tiempo característico de integración, etc. respecto de los cambios realizados en las probetas.

IV. Análisis de Fourier

Se obtuvo el Espectro de Potencia de las señales de acuerdo con lo ya explicado en 5.2.1.1. Se realizaron 500 mediciones instantáneas de la señal y sus respectivos análisis de frecuencias para finalmente calcular el promedio del Espectro de Potencia de las señales (mediante el osciloscopio digital LeCroy 9360). La frecuencia de muestreo fue de 1 Ms/s, para asegurar una frecuencia en estudio de hasta 500 KHz.

Se aclara además que el Espectro de Potencia está dado en dBm (unidad comparativa interna del osciloscopio) definida por,

$$dBm = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{M_n^2}{M_{ref}^2} \right)$$

donde $M_{ref} = 0.316 \text{ V}$ (referencia propia del osciloscopio Le Croy 9360)

$M_n = \sqrt{R_n'^2 + I_n'^2}$, siendo $R_n'^2$ e $I_n'^2$ partes real e imaginaria de X_n definida en 3.4.1

a) Resultados de la probeta P1

El Espectro de Potencia promedio es el que se muestra en la Fig. 6.19.

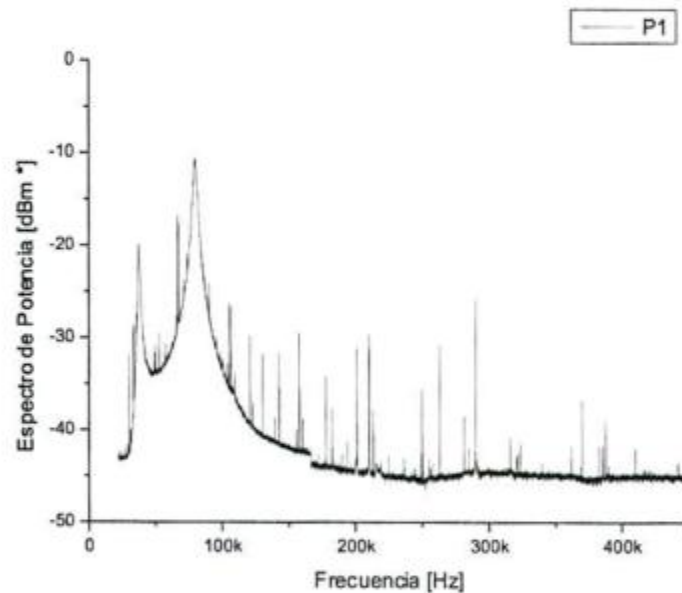


Fig. 6.19 Espectro de Potencia promedio probeta P1.

b) Resultados de la probeta P2

En la Fig. 6.20 se pueden observar en forma comparada los Espectros de Potencia promedios de las probetas P1 y P2.

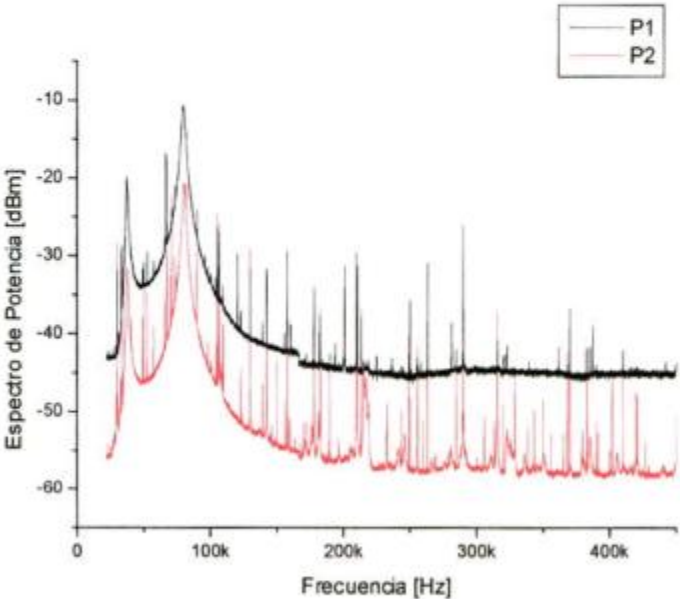


Fig. 6.20 Espectro de Potencia promedio comparativa probetas P1 y P2.

c) Resultados de la probeta P3

En la Fig. 6.21 se pueden observar en forma comparada los Espectros de Potencia promedios de las probetas P1 y P3.

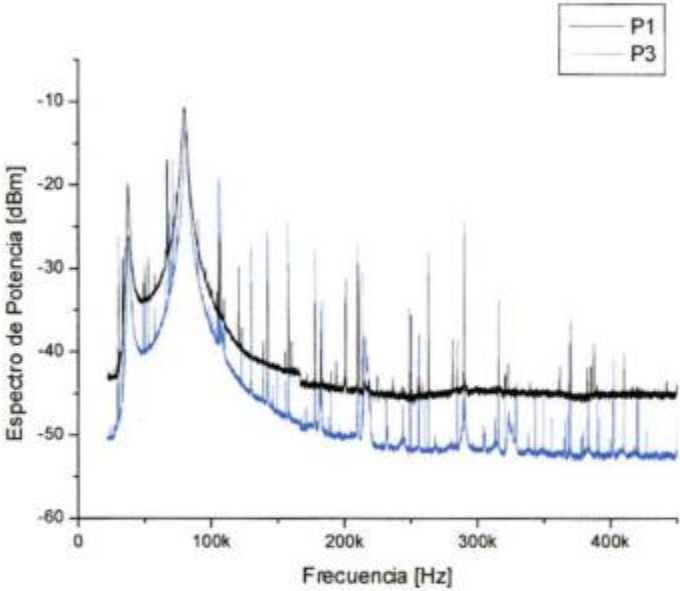


Fig. 6.21 Espectro de Potencia promedio comparativa probetas P1 y P3.

d) Resultados de la probeta P4

En la Fig. 6.22 se pueden observar en forma comparada los Espectros de Potencia promedios de las probetas P1 y P4.

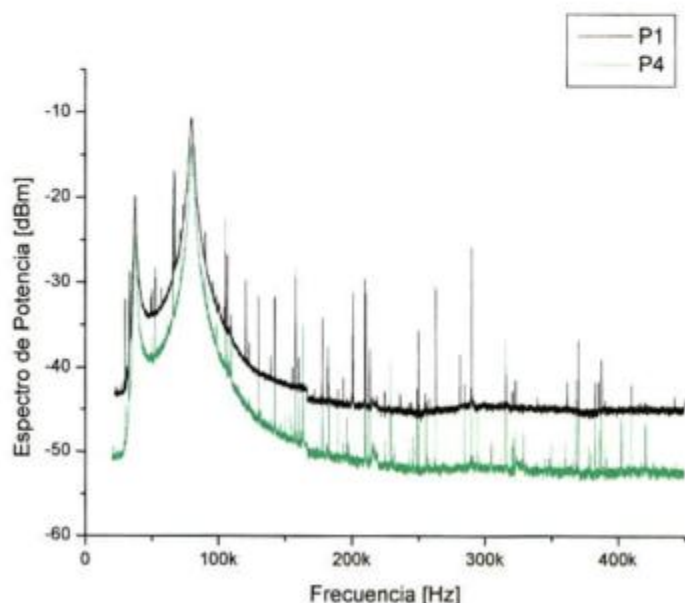


Fig. 6.22 Espectro de Potencia promedio comparativa probetas P1 y P4.

Discusión de los Resultados

A partir de todos los resultados obtenidos, se hará la comparación de ellos con la probeta P1 (probeta testigo), representando el estado original. Cabe aclarar que la comparación es cuali-cuantitativa.

Podemos observar que el espectro de Potencia de la probeta P2 respecto de la P1 (ver Fig. 6.20), no presenta frecuencias características especiales, desde el rango de 20 kHz hasta 200 kHz. A partir de ahí se pueden observar frecuencias particulares hasta los 500 kHz (rango máximo de medición). Vemos además que en toda la gráfica el nivel de Potencia es menor que con respecto a la probeta P1.

En el Espectro de Potencia de la probeta P3 (ver fig. 6.21), respecto de la P1, podemos ver que existen mayores amplitudes y aparición de nuevos picos en frecuencias a partir de los 100 kHz. El nivel de Potencia general es menor que respecto de la probeta P1.

En la probeta P4, vemos un Espectro de Potencia similar al de la probeta P1, apareciendo un pequeño número de frecuencias particulares a partir de los 300 kHz (ver Fig. 6.22).

En general el estudio del Espectro de Potencia de las señales RB presenta para todas las probetas una muy pequeña variación. Además se observa en todos los casos, dos picos a 30 y

80 kHz, que son propios del equipo de Amplificación y Filtro de frecuencias de la señal RB (ver 4.2.4), determinado por el análisis del ruido propio es decir sin excitación magnética (no informado en este trabajo). Para futuros estudios se deberán estudiar las razones de las distintas frecuencias nuevas, la relación entre las señales RB y el nivel de filtrado del equipo de amplificación, etc. Con respecto al equipo se deberá disminuir o eliminar las frecuencias características, que se consideraron propias del mismo. El análisis de las señales mediante otros métodos como “onditas”, fractales, etc. han sido ya encarados por distintos autores [6, 7], y este podría ser otro camino a seguir en el futuro.

6.1.2 Resultados de EMA

Los parámetros que fueron medidos en la EMA sobre las probetas con cambios debidos a tratamientos termo-mecánicos:

- I. RMS de la señal (integración electrónica según tiempo característico de integración) (ver 3.4.2.2 y 4.3.1).
- II. Análisis de Fourier.

A continuación se presentan los resultados de cada parámetro, para todas las probetas medidas, y la discusión a partir de los mismos.

I. RMS de la señal (integración electrónica según tiempo característico de integración)

Los resultados que se presentan son las curvas promedios de 100 determinaciones instantáneas, del RMS (integración de la señal para un tiempo característico muy pequeño, mediante el equipo Mod. CNEA T680) calculados a partir de la señal EMA. La frecuencia de muestreo fue de 250 ks/s, excepto en la probeta P4 que fue de 100 ks/s. A continuación se informan y discuten los resultados de cada probeta comparándolas con la probeta testigo (P1)

a) Resultados de la probeta P1

En la Fig. 6.23 a modo de ejemplo, se pueden observar la señal EMA, el RMS instantáneo de la señal y la curva promedio. Los resultados se resumen en la Tabla 6.16.

Tabla 6.16 Valor máximo del RMS de la EMA.

Probeta	RMS EMA máximo [V]
P1	0.21843

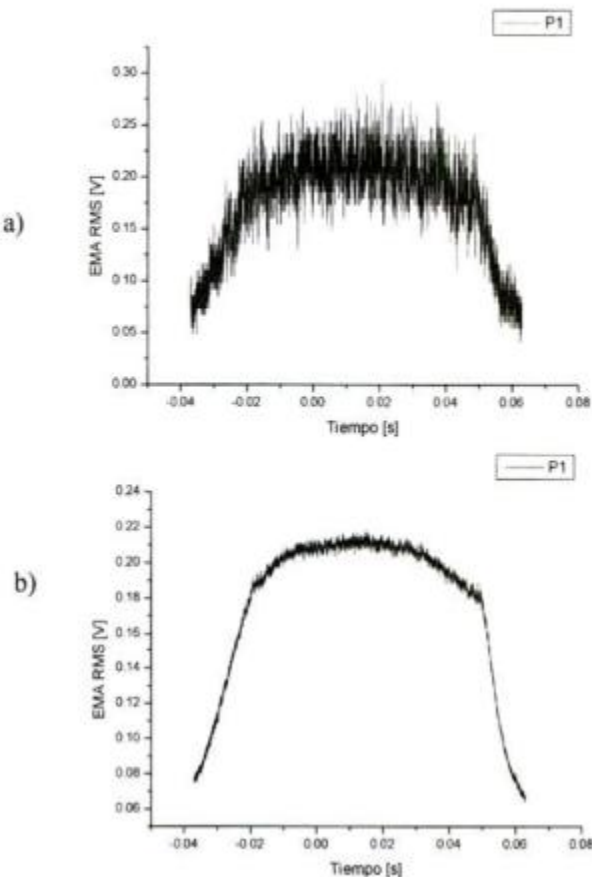


Fig. 6.23 a), RMS instantáneo, b) RMS promedio de 100 señales EMA de la probeta P1.

b) Resultados de la probeta P2

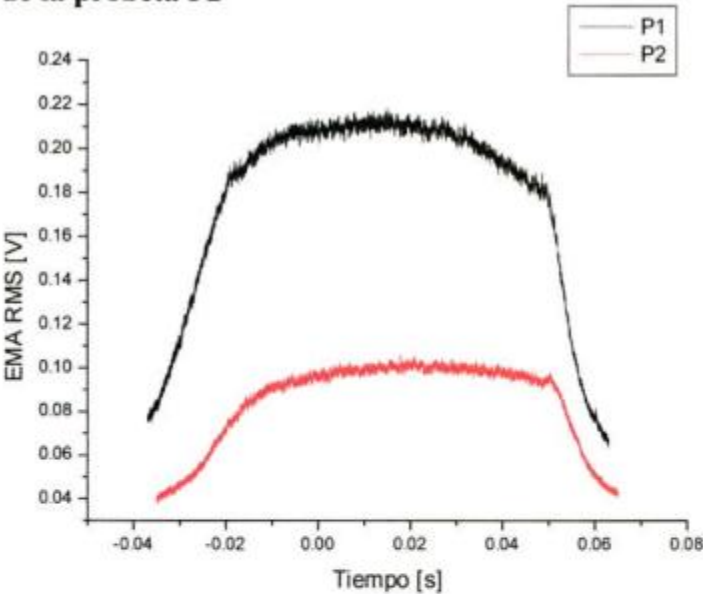


Fig. 6.26 RMS promedio comparativo señales EMA de las probetas P1 y P2.

En la Fig. 6.26 se puede observar la comparación de la gráficas RMS EMA promedio para las probetas P1 y P2, se puede observar un pequeño pico o codo antes de que comience la

caída de la señal EMA promedio de la probeta P2. En la Tabla 6.17 se puede observar el valor máximo del RMS de la EMA.

Tabla 6.17 Valor máximo de RMS en EMA probeta P2

Probeta	RMS EMA máximo [V]
P2	0.10611

c) Resultados de la probeta P3

En la Fig. 6.27 se puede observar la comparación de la misma para las probetas P1 y P3, donde se puede observar un pico antes de que comience la caída de la señal EMA para la probeta P3. En la Tabla 6.18 se puede observar el valor máximo del RMS de la EMA.

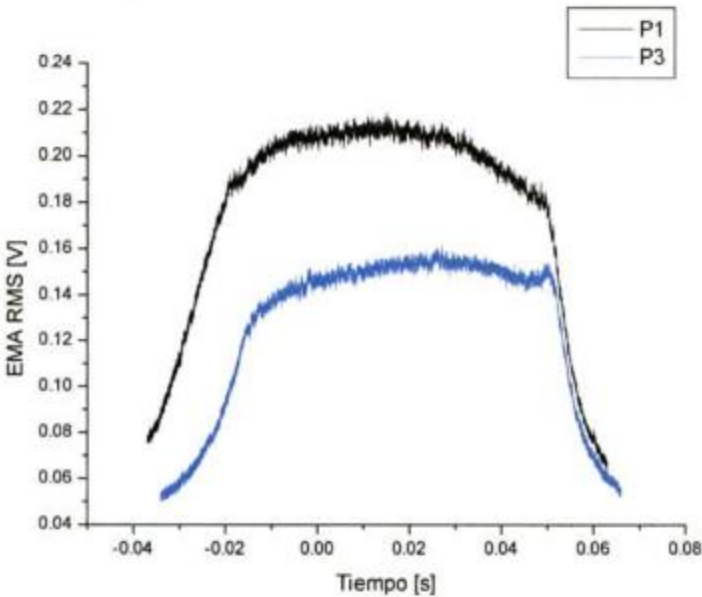


Fig. 6.27 RMS promedio comparativo señales EMA de las probetas P1 y P3.

Tabla 6.18 Valor máximo de RMS en EMA probeta P3

Probeta	EMA RMS máximo [V]
P3	0.16175

d) Resultados de la probeta P4

Se ha observado que la señal EMA de la probeta P4, era de mayor duración que el de la probeta P1, por ello se ha disminuido la frecuencia de muestreo de 250 ks/s a 100ks/s. Con ello la base de tiempo se ha aumentado y se puede observar toda la señal. Este cambio no afectaría demasiado la comparación de las señales en este trabajo, debido a que la

comparación se realiza sobre el valor máximo de la señal EMA RMS. En la Fig. 6.28 se pueden observar las señales EMA RMS de las probetas P1 y P4, apareciendo dos picos muy pronunciados. Finalmente en la Tabla 6.19 se pueden observar el valor de los picos máximos con el mismo criterio que el adoptado para el RB.

Tabla 6.19 Valor máximo de RMS en EMA probeta P4

Probeta	RMS EMA Pico 1[V]	RMS EMA Pico 2[V]
P4	0.14556	0.14452

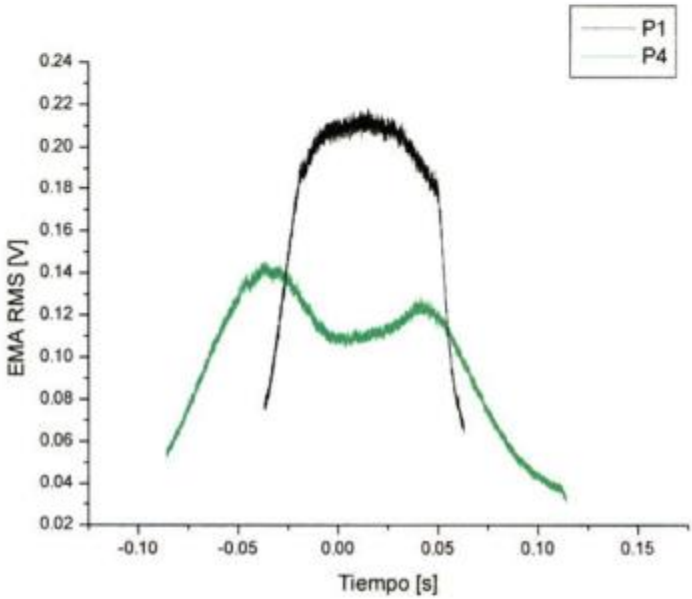


Fig. 6.28 RMS promedio comparativo señales EMA de las probetas P1 y P4.

Discusión de los Resultados

La probeta P2 (decarburiada) respecto de la probeta P1 (ver Fig. 6.26) presenta un nivel máximo de RMS menor. Se puede observar que la señal de la probeta P2 tiene una extensión temporal similar a la de la probeta P1, y que presenta un pequeño pico al finalizar la señal. La disminución de la EMA debido a disminución del contenido de carbono coincidiría con algunos autores [8].

La probeta P3 (crecimiento de grano) presenta un nivel de RMS máximo levemente menor que la probeta P1 (ver Fig. 6.27), también se puede apreciar un leve pico al final de la señal de la probeta P3. Distintos autores han encontrado que la EMA aumenta con el crecimiento del grano [9], sin embargo estos autores no estudian el mismo material que en este trabajo, por lo que estos resultados deberán corroborarse en trabajos futuros.

La probeta P4 presenta una mayor duración en la señal EMA que la probeta P1. Además en la gráfica RMS aparecen dos picos (ver Fig. 6.28). Trabajos futuros deberán estudiar las razones del mismo.

II. Análisis de Fourier

Los resultados que se informan, son los Espectros de Potencia promedios de un total de 400 mediciones y de acuerdo con lo descrito en 5.2.1.2, calculados a partir de los Espectros de Potencia instantáneos de las señales EMA, cálculo realizado mediante el osciloscopio LeCroy 9360. La frecuencia de muestreo fue de 2.5 Ms/s de tal manera de tener un rango de frecuencias de análisis del orden de 1 MHz, que es máximo del rango de frecuencias del sensor acústico. Como ya se explicó oportunamente, las señales EMA tienen aproximadamente una duración de 0,100 s, lo que resultaba un tiempo de digitalización demasiado grande para la frecuencia de muestreo elegida, por lo que se optó por analizar sólo la parte central de la misma.

a) Resultados de la probeta P1

En la Fig. 6.29 se puede observar el Espectro de Potencia de la probeta P1.

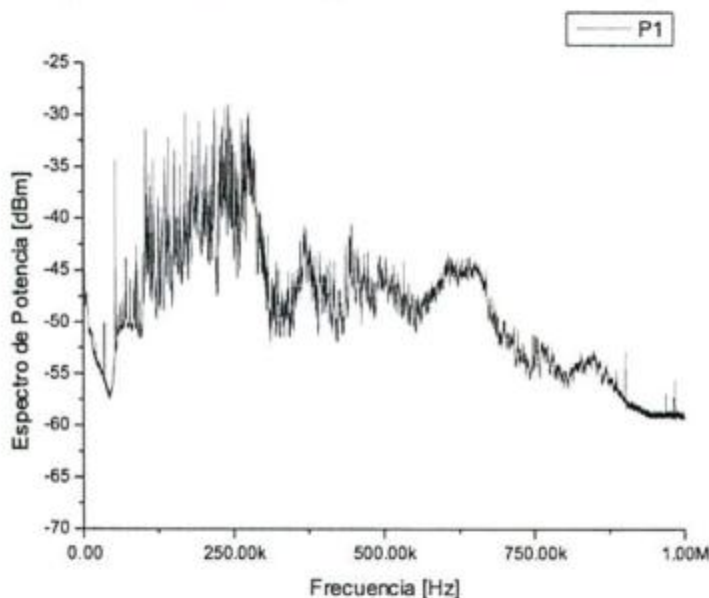


Fig. 6.29 Espectro de Potencia promedio de señal EMA de la probeta P1.

b) Resultados de la probeta P2

En la Fig. 6.30 se puede observar el Espectro de Potencia promedio comparativo de la probeta P2 y P1.

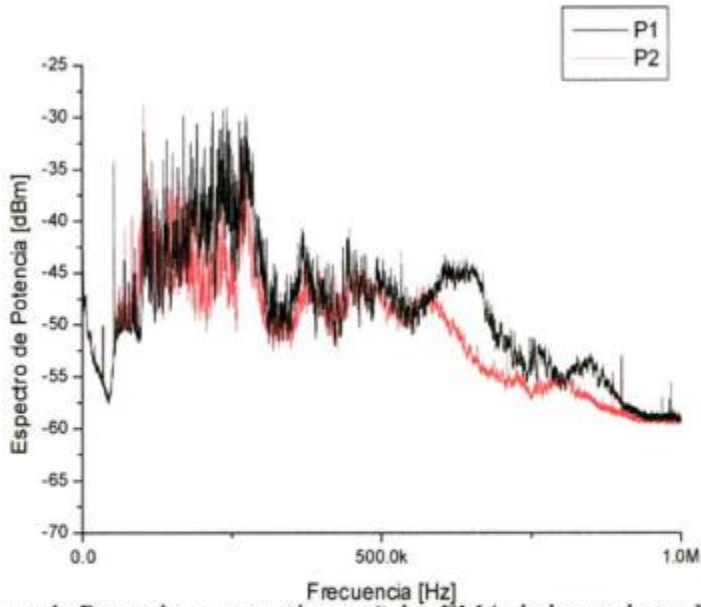


Fig. 6.30 Espectros de Potencia comparativo, señales EMA de las probetas P1 y P2.

c) Resultados de la probeta P3

En la fig. 6.31 se puede observar el Espectro de Potencia promedio de la probeta P3 y su comparación con el de la probeta P1.

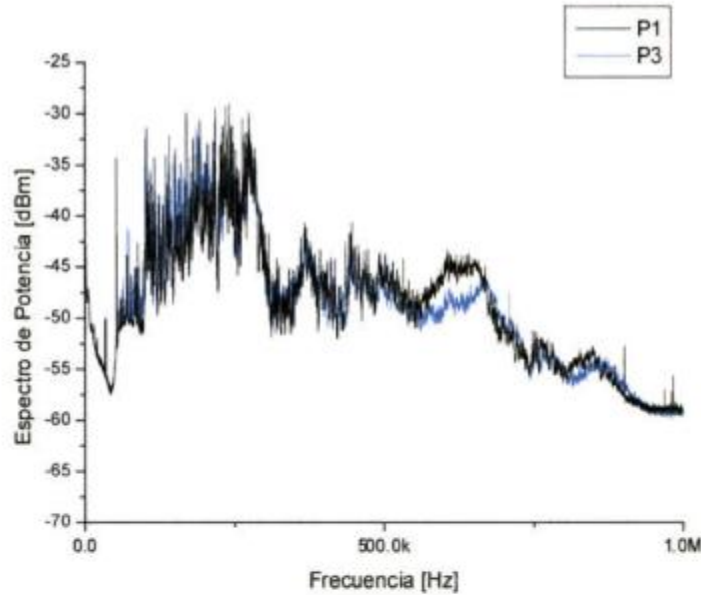


Fig. 6.31 Espectros de Potencia comparativo, señales EMA de las probetas P1 y P3.

d) Resultados de la probeta P4

En la Fig. 6.32 se puede observar en forma comparativa los Espectros de Potencia de las probetas P1 y P4.

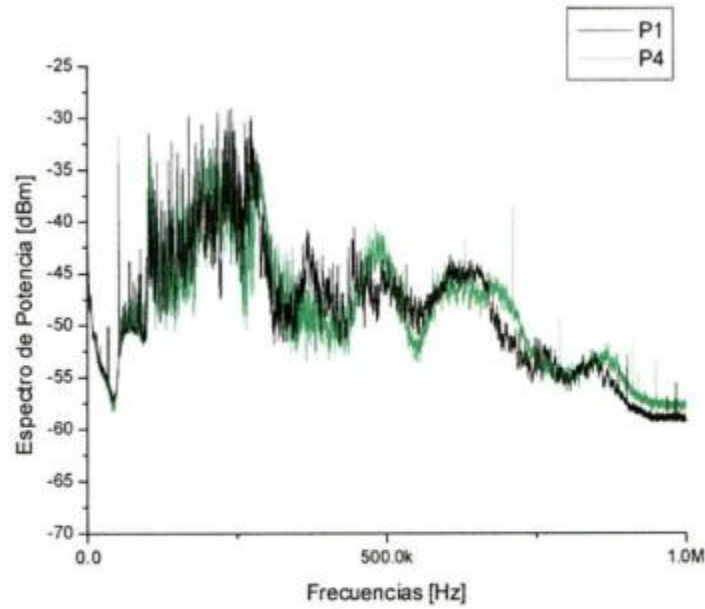


Fig. 6.32 Espectros de Potencia comparativo, señales EMA de las probetas P1 y P4.

Discusión de los Resultados

Las gráficas de Espectro de Potencia de todas las probetas presentan pocas diferencias significativas en sus frecuencias características. Hasta los 500 kHz, todas las probetas presentan la misma configuración. A partir de aquí la probeta P2 presenta una disminución de frecuencias en el rango de 500 kHz a 1 MHz, mayor que la probeta P1 (ver Fig. 6.30). La probeta P3 (ver Fig. 6.31) se mantiene similar a la probeta P1 en casi todo este rango superior a 500 kHz. Respecto de la probeta P4 (ver Fig. 6.32), mantiene también las características presentadas en la probeta P1.

En general el Espectro de Potencia de la EMA, no da variaciones significativas respecto de las variaciones microestructurales del material. Quedará por investigar en el futuro otras herramientas de análisis de señales, buscando parámetros que se modifiquen notablemente con estos cambios microestructurales, ya descriptos también en 6.1.1.1.

6.2 Resultados de la probeta irradiada y discusión

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en las mediciones de RB y EMA en una probeta irradiada y una del mismo material, en su estado original. La descripción de las mismas se ha realizado en 5.1.2. En la Tabla 6.19 se puede observar la denominación y el tratamiento de cada probeta.

Tabla 6.19 Denominación de probetas para ensayos de irradiación.

Probeta	Tratamiento
P1.1	Estado original
P1.2	Irradiada

6.2.1 Resultados de RB

I. Pico máximo (valor absoluto) y Valor RMS de toda la señal (RB de un semi ciclo)

Se realizaron 100 mediciones de la señal para hacer el análisis estadístico de los parámetros. Los resultados se observan en la Tabla 6.20. En la Fig. 6.33 y Fig. 6.34 se pueden ver a modo de ejemplo, una señal del mismo ciclo obtenidas sobre la probeta P1.1 y P1.2 respectivamente. La frecuencia de muestreo fue de 2.5 Ms/s.

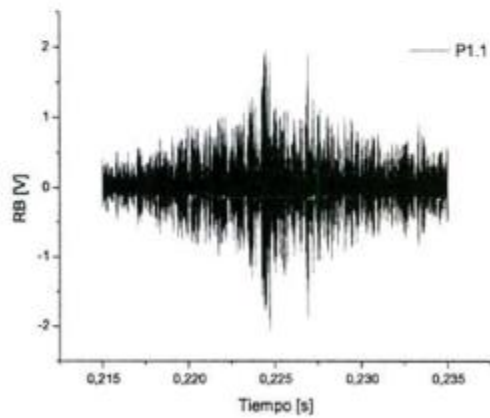


Fig. 6.33 Ejemplo de RB en probeta P 1.1.

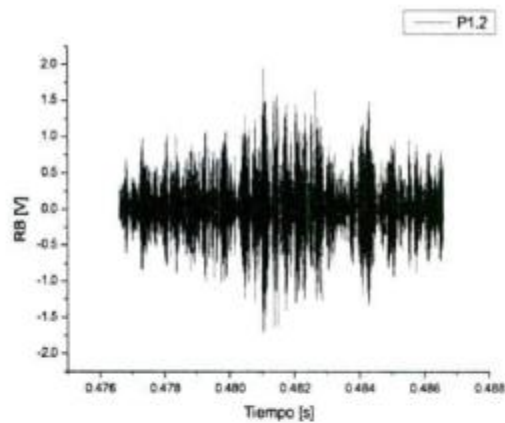


Fig. 6.34 Ejemplo de RB en probeta P 1.2.

Tabla 6.20 Resultados Pico máximo y RMS de toda la señal.

Probeta	Pico máximo [V]	RMS de toda la señal [mV]
P 1.1	3.909 ± 0.515	440.30 ± 25.09
P 1.2	3.815 ± 0.511	424.86 ± 23.93

Se puede observar que el pico máximo y el valor RMS de toda la señal es mayor para la probeta sin irradiación que para la irradiada. Esto podría ser debido a que la radiación produce “clusters”, agrupamiento de defectos que impedirían el movimiento de las paredes de dominios [10]. También observamos que los resultados, teniendo en cuenta sus dispersiones, se solapan en sus intervalos de validez, sólo pudiendo observarse una leve tendencia. De acuerdo con esto y teniendo en cuenta los bajos niveles de dosis alcanzado en la probeta P1.2, parecería promisorio el estudio del daño por radiación en materiales ferromagnéticos mediante RB, con mayores niveles de radiación.

II. Cálculo del parámetro M

Se realizó la medición del parámetro M, con una frecuencia de muestreo de 1 Ms/s. Los resultados se muestran en la Fig. 6.35 donde se muestra comparativamente la distribución de amplitudes de las señales en la probeta P1.1 y P1.2. Asimismo se puede observar en la Tabla 6.21 los resultados finales de dichos parámetros.

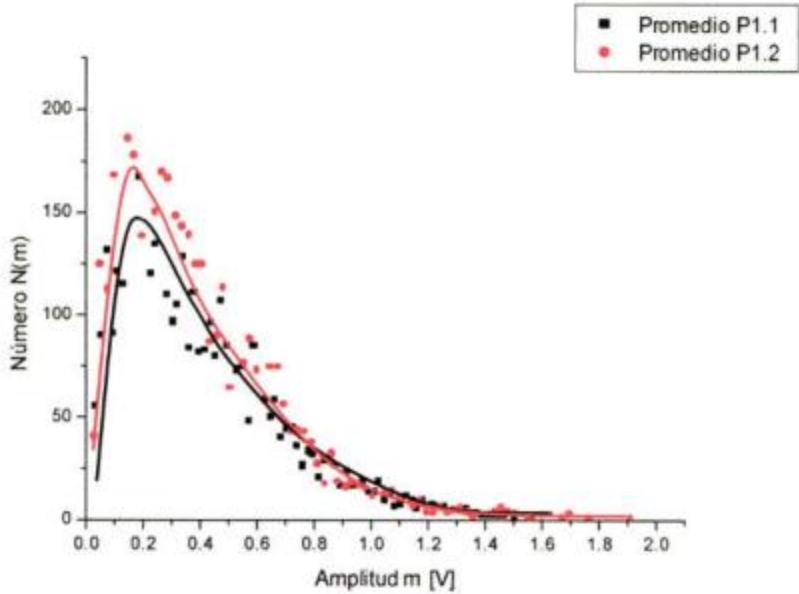


Fig. 6.35 Distribución de amplitudes de probetas P1.1 y P1.2.

Tabla 6.21 Parámetro M de probetas P1.1 y P1.2.

Probeta	M [V]
P1.1	0.3811 ± 0.0332
P1.2	0.3428 ± 0.0308

El parámetro M de la probeta no irradiada es menor al de la probeta irradiada. De la observación del gráfico de distribución de amplitudes, vemos que la probeta irradiada presenta un leve aumento en la dispersión de resultados en particular en la zona de bajas

amplitudes (menores a 0.5 V). Por todo esto es prematuro decir que el parámetro M es un valor de medida del comportamiento del material frente a la radiación.

III. RMS de la señal (integración electrónica según tiempo característico de integración)

Se realizó la medición de la señal mediante el equipo de cálculo electrónico RMS en las probetas P1.1 y P1.2. En la Fig. 6.36 se pueden observar las curvas promedios de 100 resultados de curva RMS instantáneas. Se muestran sin escala pues el “delay” (retraso) del osciloscopio es diferente en ambas mediciones, por esta razón sólo es posible comparar los valores máximos de dichas curvas, que se pueden observar en la Tabla 6.22.

Tabla 6.22 Valores máximos de RMS en probetas P1.1 y P1.2.

Probeta	Valor máximo RMS [V]
P1.1	0,58624
P1.2	0,68445

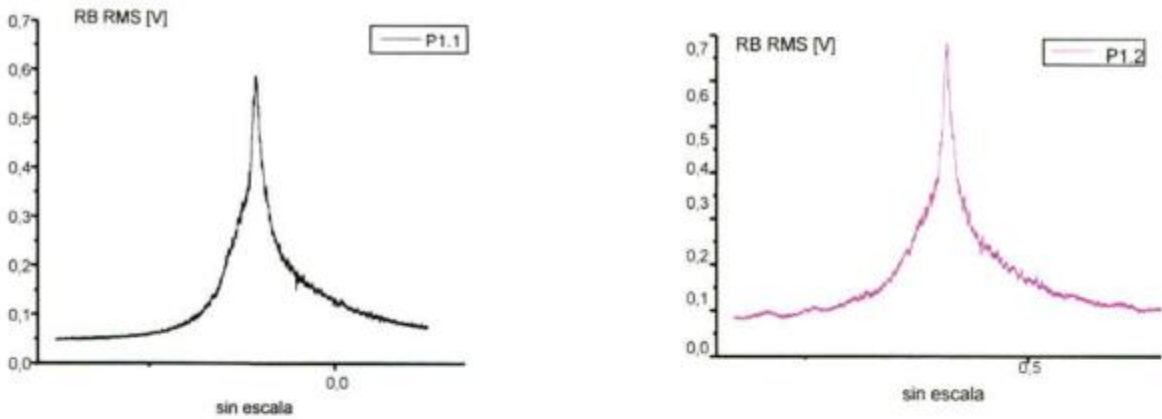


Fig. 6.36 RB RMS en probeta P1.1 y P1.2.

Se ve que las gráficas del valor RMS presenta un solo pico cada una, y el valor máximo del RMS lo tiene la probeta P1.2 (irradiada). Trabajos futuros requerirán el cálculo de la dispersión de la curva promedio, para una mayor compresión del fenómeno.

IV. Análisis de Fourier

Se realizó como anteriormente se explicó la medición de 400 señales RB, y de cada una de ellas se evaluó el Espectro de Potencia. Luego automáticamente el osciloscopio Le Croy 9360

calculó el promedio de los espectros. Se grafican en la Fig. 6.37 los Espectros de Potencia promedios de las probetas P1.1 y P1.2.

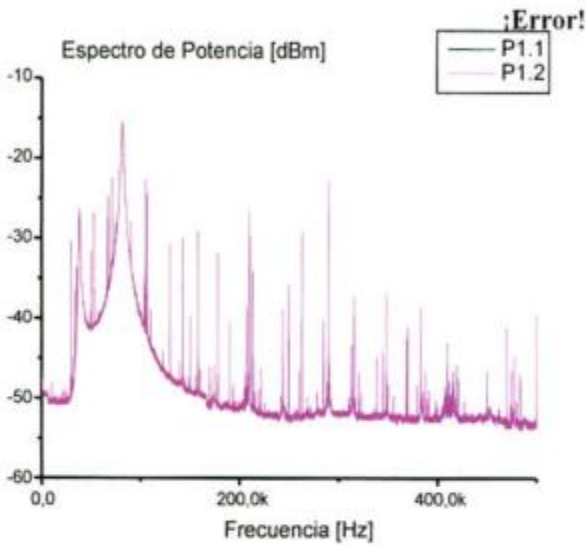


Fig. 6.37 Espectro de Potencia de probeta P1.1 y P1.2.

Como se puede observar en la Fig. 6.37, los espectros de Potencia de ambas probetas son idénticos, por lo que no se pueden realizar otros comentarios que para el nivel de dosis aplicado no se produjeron cambios en dicho análisis.

En general se deberá estudiar en el futuro otros niveles de dosis aplicados sobre las probetas, y ver en dichas condiciones las variaciones del RB y sus parámetros.

6.2.2 Resultados de EMA

Los parámetros que fueron medidos en la EMA sobre las probetas con cambios micro estructurales fueron RMS de la señal (integración electrónica según tiempo característico de integración) y Análisis de Fourier.

I. RMS de la señal (integración electrónica según tiempo característico de integración)

El procedimiento utilizado ya fue descripto, y el número de mediciones instantáneas de la señal EMA fue de 100. En la Fig. 6.38 se observan las curvas promedios de RMS de EMA de las probetas P1.1 y P1.2. En la Tabla 6.23 se pueden observar los valores máximos de EMA RMS obtenidos.

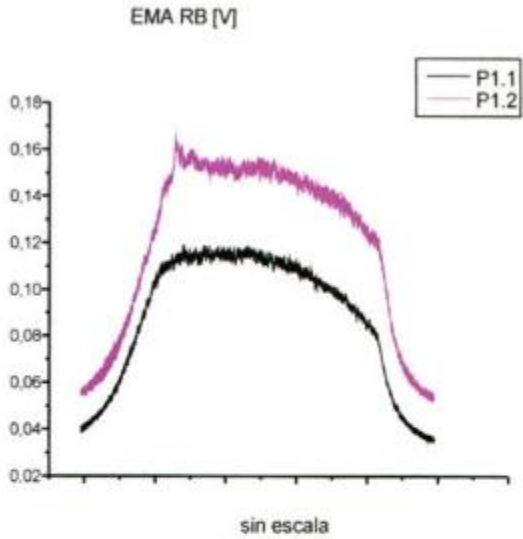


Fig. 6.38 EMA RMS promedios de probeta P1.1 y P1.2, esquema comparativo.

Tabla 6.23 Valores máximos EMA RMS probetas P1.1 y P1.2.

Probeta	Valor máximo EMA RMS [V]
P1.1	0,11917
P1.2	0,16764

En este trabajo se ha encontrado que el valor RMS máximo de la señal EMA es levemente mayor en la probeta irradiada que en la patrón. Además de la gráfica se puede observar un pico en el inicio de la señal de la probeta irradiada que no aparece en la probeta testigo, y dado que la curva que se presenta es un promedio de 100 determinaciones, resulta ser un pico sistemático de la señal. Este comportamiento deberá ser posteriormente analizado en sus causas y corroborado a partir de una cantidad de probetas irradiadas a diferentes niveles de radiación.

II. Análisis de Fourier

Se realizó el espectro de Frecuencia promedio de 400 mediciones y cálculo del Espectro de Potencia instantáneo de la señal EMA sobre las probetas P1.1 y P1.2. En la Fig. 6.39 se pueden observar las mismas.

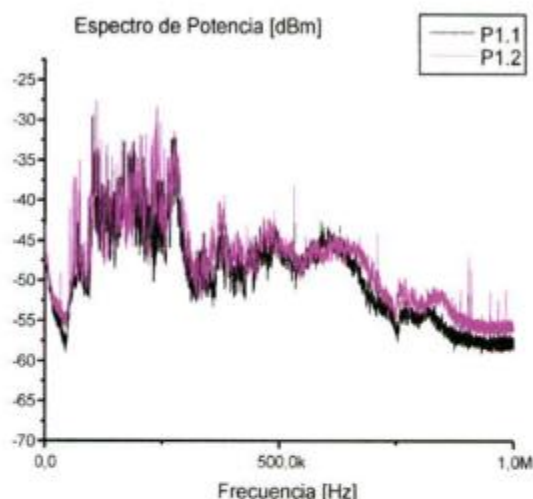


Fig. 6.39 EMA RMS promedios de probeta P1.1 y P1.2, esquema comparativo.

En cuanto al análisis de Fourier vemos que en ambas probetas el Espectro de Potencia es prácticamente el mismo, por lo que nuevamente, para estos niveles de radiación y mediante este método de análisis no se obtienen diferencias notables.

6.3 Resultados de experimentación en probeta tensionada

Se presentan los resultados de RB y EMA de la probeta ya descrita en 5.1.3, y realizando la experimentación de acuerdo con 5.2.3, con distintos niveles de cargas aplicadas a la probeta.

6.3.1 Resultados de RB

Por cada valor de carga se han tomado 100 señales y con ellas se ha realizado la estadística sobre los siguientes parámetros:

- I. Pico máximo (valor absoluto)
- II. Valor RMS de toda la señal (RB de un semiciclo)

A modo de ejemplo se pueden ver en la Fig. 6.40 la señal de RB para tres valores de carga diferentes. Se puede claramente observar el comportamiento diferente de las señales RB, medidos a diferentes estados de carga, notando un incremento de la señal RB con el aumento de la tracción.

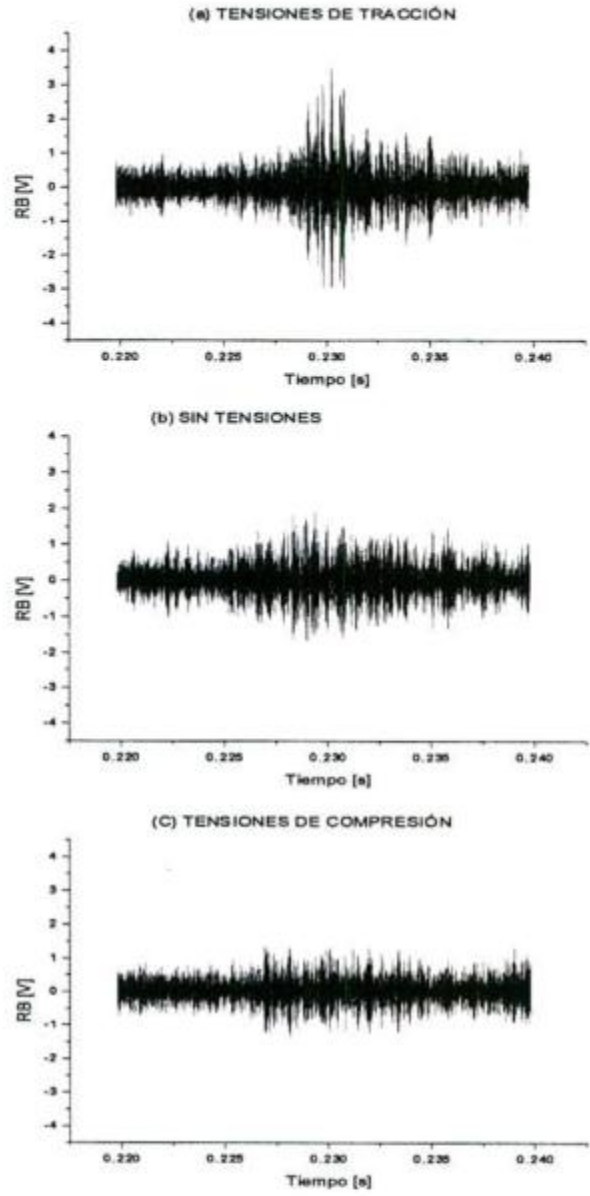


Fig. 6.40 Señales RB para una tracción (a), para el estado descargado (b) y para un estado de compresión (c).

Se puede ver en la Fig. 6.41 los resultados de valores máximos promedio de pico de la señal RB en función de la tensión en la superficie de la chapa en la posición de la medición del RB, para los 24 estados de cargas diferentes, con sus respectivas curvas de dispersión.

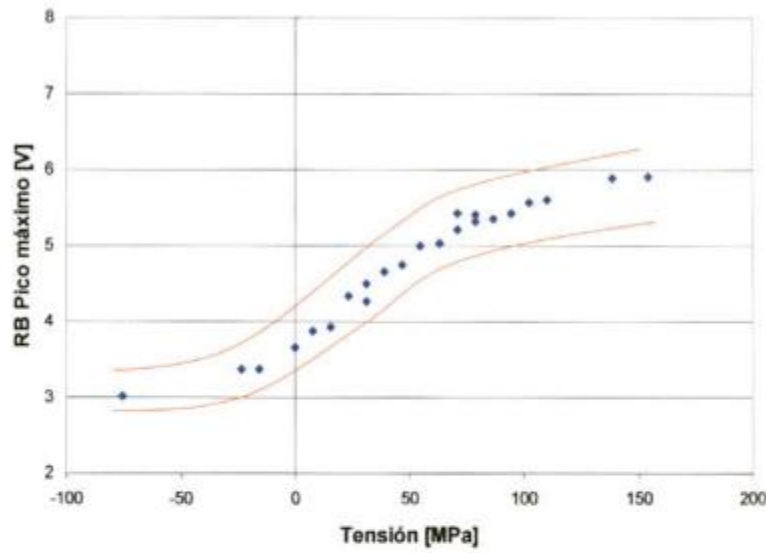


Fig. 6.41 Valor máximo de señal RB en función de la tensión.

Se puede ver en la Fig. 6.42 los resultados de RMS promedio de toda la señal RB, en función de la tensión en la superficie de la chapa (en la posición del sensor de RB).

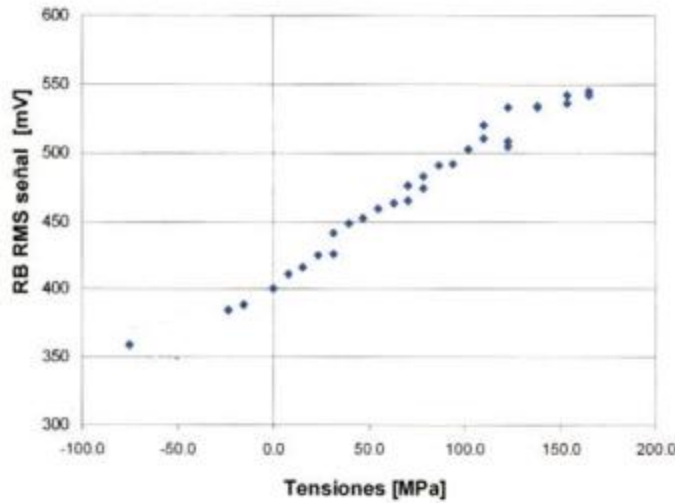


Fig. 6.42 Valor RMS de señal completa de RB en función de la tensión aplicada.

Como se ve claramente, tanto el Pico máximo de la señal como el valor RMS de toda la señal se pueden utilizar como parámetro para definir el estado de tensiones de la pieza en estudio. Se observa que la dispersión de resultados resulta considerablemente baja, a partir de las condiciones de medición con que se contó. Por otra parte vemos que para materiales ferromagnéticos con coeficiente de magnetostricción positivo, la señal de RB aumenta a medida que aumentan las tensiones de tracción, en correspondencia con lo informado con distintos autores [11,12].

Futuros trabajos deberán realizarse para determinar la influencia del tamaño de la probeta y del equipo de excitación y sensado sobre las señales RB, la influencia del filtrado de frecuencias sobre las señales RB, el estudio de las señales mediante métodos matemáticos avanzados, etc.

6.4 Resumen general de Resultados de medición de RB y EMA sobre probetas con tratamientos termo-mecánicos, sometidas a radiación y tensionadas.

En la Tabla 6.24 y a modo de resumen, se detallan los resultados numéricos obtenidos en las probetas con cambios microestructurales debidos a tratamientos termo-mecánicos y por efecto de la radiación.

Se puede observar que la medición del RB es un buen indicador de cambios microestructurales en general. Esto se demuestra debido a la variación en los diferentes parámetros y la diferencia entre las gráficas entre sí. En particular la medición del RMS de la señal a partir de un tiempo de integración pequeño (en nuestro caso 25 microsegundos), ha mostrado la posibilidad de distinguir distintos estados microestructurales, y distintos tipos de mecanismos de movimientos de paredes de dominios y su interacción con diferentes tipos de puntos de fijación, lo que resulta sumamente alentador el estudio en esta dirección.

En general la EMA es un método complementario al RB, que tiene la información del movimiento de las paredes no de 180° , como ya se explicó en 3.2.2. En este trabajo la medición de la EMA resultó más sensible a factores como contacto del piezoeléctrico en la probeta, acabado superficial de la probeta, etc., que se notó en la necesidad de mejorar el contacto del sensor para lograr la máxima señal y el más bajo ruido. Se puede ver que la EMA también resulta importante y se verifican cambios en la señal debido a los diferentes tratamientos termo-mecánicos analizados.

En cuanto a la medición de cambios microestructurales producto de la irradiación, podemos asegurar que si bien el nivel de dosis aplicado fue muy bajo, se perciben pequeñas modificaciones en las mediciones RB, teniendo en cuenta los resultados del Valor pico máximo y RMS de toda la señal, esto haría prometedor el estudio de esta técnica aplicada a materiales dañados por radiación de neutrones. La EMA presentó variaciones en el valor RMS (integración con un tiempo característico muy corto), pero ninguna variación en el Espectro de Potencia.

Tabla 6.24 Resumen de resultados obtenidos, sobre probetas de acero AISI 1020 con tratamientos termo-mecánicos y sometidas a radiación.

Probeta		P1	P2	P3	P4	P1.1	P1.2
Dimensiones [mm]		57x118x8	57x118x8	57x118x8	57x118x8	28.5x130x8	28.5x130x8
Tratamiento		Prob. Testigo	Decarburi- zada sup.	Grano crecido	Deform. en frío (23%)	Prob. Testigo	Irradiada ($3.6 \cdot 10^{15}$ n/cm ²)
Dureza [HB]		150 ± 4	134 ± 23	128 ± 3	186 ± 5	150 ± 4	-
Tamaño de Grano ASTM (µm)		8 a 9 (22 a 16)	4 (90)	6 (45)	-	8 a 9 (22 a 16)	-
R U I D O B A R K H A U S E N	Pico máximo promedio [V]	3.759 ± 0.500	2.634 ± 0.280	5.335 ± 0.630	3.437 ± 0.337	3.909 ± 0.515	3.815 ± 0.511
	RMS promedio de toda señal [mV]	167.88 ± 6.84	195.95 ± 4.59	245.77 ± 10.82	265.95 ± 9.32	440.30 ± 25.09	424.86 ± 23.93
	Parámetro M [V]	0.6488 ± 0.0101	0.2212 ± 0.0107	0.4493 ± 0.0378	0.4749 ± 0.0067	0.3811 ± 0.0332	0.3428 ± 0.0308
	RMS máximo Pico 1 [V]	0.66219	0.25075	0.52997	0.59175	0,58624	0,68445
	Posición temporal [s]	-0.02639	-0.02451	-0.01525	-0.02152	-	-
	RMS máximo Pico 2 [V]	-	0.2443	0.28217	-	-	-
	Posición temporal [s]	-	-0.04293	-0.0227	-	-	-
E M A	RMS EMA máximo Pico 1 [V]	0.21843	0.10611	0.16175	0.14556	0,11917	0,16764
	RMS EMA máximo Pico 2 [V]	-	-	-	0.14452	-	-

Debido a la relación entre la microestructura del material y sus características mecánicas, es posible utilizar la medición de señales RB y EMA, como posible medio para predecir cambios en el comportamiento mecánico (como por ejemplo la dureza del material). Dicho análisis ha sido efectuado en forma indirecta al apreciar los cambios en la dureza del material a partir de los diferentes estados microestructurales (ver Tabla 6.24).

Con respecto a la verificación de niveles de tensión sobre materiales ferromagnéticos a partir de la medición del RB, se ha demostrado que tanto el valor Pico máximo de la señal y el valor RMS de toda la señal, son parámetros convenientes para medir dichos estados. Observamos que tales parámetros aumentan con el aumento de la tensión de tracción y disminuyen con tensiones de compresión, en forma continua y monótona, con niveles de dispersión aceptables para los equipos utilizados en este trabajo. Los resultados demuestran en forma convincente que el análisis del RB puede ser usado como método para la determinación de estados tensionales cuando estos son producidos por cargas. Sin embargo no debe descartarse la utilización del mismo para la medición de tensiones residuales por ejemplo. Por lo tanto, la aplicación en laboratorio o sobre piezas de material ferromagnético terminadas (elementos estructurales, perfiles laminados en frío, piezas de altas prestaciones, etc.) son casos prácticos de aplicación inmediata, donde las tensiones pueden comprometer la vida en servicio de los elementos con que se construyen los equipos o estructuras.

REFERENCIAS

- 1 Das S.K., Joarder A. , Mitra A., "Magnetic Barkhausen emissions and microstructural degradation study in 1.25 Cr-0.50 Mo steel during high temperature exposure", NDT&E International 37 243-248, 2004
- 2 Moorthy V., Vaidyanathan S., T. Jayakumar1, Baldev Raj, "Effect Of Tensile Deformation On Micromagnetic Parameters In 0.2% Carbon Steel And 2.25Cr±1Mo Steel", Acta Materialia, Vol. 47, No. 6, pp. 1869-1878, 1999
- 3 Tiitto S., "On the Influence of microestructure on Magnetization Transitions steel", Acta Polytechnica Scandinavia, Applied Physics Series No. 119, 1977
- 4 Ng D. H. L., Cho K. S., Wong M. L., "Study of microstructure mechanical properties, and magnetization process in low carbon steel bars by Barkhausen emission", Material Science & Engineering, A358, 186-198, 2003.
- 5 Moorthy V., Shaw B. A., "Evaluation of tempering induced changes in the hardness profile of case-carburised EN 36 steel using magnetic Barkhausen noise analysis", NDT&E international 36, 43-49, 2002
- 6 Leszek B. Magalas, "Application of the wavelet transform in mechanical spectroscopy and in Barkhausen noise analysis", Journal of Alloys and Compounds 310, 269-275, 2000
- 7 Durin G., A. Magni, G. Bertotti, "Fractal properties of the Barkhausen effect", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 140-144, 1835-1836, 1995
- 8 Ono K., "Magnetomechanical Acoustic Emission of Ferromagnetic Material at Low Magnetization Level (Type I Behavior)", J. Acoustic Emission, 3 (3) 144-148, 1984
- 9 Ranjan R., Jiles D., "Magnetic Properties of Decarburized steels: An investigation of effects of grain size and carbon content", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag 23, No. 3, 1869-1876, 1987.
- 10 Park D.G., Ok C.I., Jeong H.T., Kuk I.H., Hong J.H., "Nondestructive evaluation of irradiation effects in RPV steel using Barkhausen noise and magnetoacoustic emission signals", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 196-197 382-384, 1999
- 11 Gauthier J., Krause T. W., Atherton D. L., "Measurement of residual stress in steel using the magnetic Barkhausen noise technique", NDT&E International, Vol. 31, No. 1, pp. 23-31, 1998

-
- 12 Stefanita C., Atherton D L., Clapham L, "Plastic versus elastic deformation effects on magnetic barkhausen noise in steel", Acta Materialia 48, 3545-3551, 2000

Capítulo 7

Conclusiones y propuestas para investigaciones futuras

En este Capítulo se resumen los trabajos realizados y las conclusiones extraídas de este estudio, sugiriéndose futuros trabajos a emprender.

7.1 Conclusiones

Se construyeron distintos dispositivos (yugo magnético, fuente de corriente, amplificador y filtro de frecuencias y sensores RB), para la aplicación de un campo magnético controlado y la medición de RB y EMA, lográndose un sistema integral de medición de dichos fenómenos.

Con el objeto de corroborar la posibilidad de apreciar cambios microestructurales en un mismo material ferromagnético a partir del RB y EMA, se caracterizó un acero comercial de bajo contenido de carbono (AISI 1020). Se construyeron probetas de este material y se las sometió a distintos tratamientos termo-mecánicos. Los cambios analizados fueron: la decarburización superficial; el crecimiento del grano, y deformación plástica en frío. Los resultados que se obtuvieron de las probetas con diferentes tratamientos fueron comparados con los resultados obtenidos sobre la probeta sin tratamiento (testigo). Otro de los estudios encarados en este trabajo fue la medición de RB y EMA en probetas sometidas a un flujo de radiación neutrónica, produciéndole daños a la misma. Dichos daños afectan el movimiento de los dominios magnéticos y con ello se producen cambios en las señales RB y EMA. Con ese fin se fabricaron probetas idénticas de un acero comercial (AISI 1020), pero de menor tamaño que las anteriores, dejando una como probeta testigo y la otra fue sometida a una dosis baja de neutrones rápidos ($3.6 \cdot 10^{15}$ n/cm²). Se midieron en ambos casos los mismos parámetros ya descriptos y se compararon.

Finalmente se analizó el RB de otro material ferromagnético que fue sometido a diferentes estados de tensión.

- I. A partir del estudio de la señal RB, se concluye para cada probeta y ensayo,

1) Probeta Decarburizada

La disminución de carbono en un acero comercial como el descrito, produjo una disminución en las señales de RB. Tanto el valor del pico máximo como el RMS de toda la señal disminuyeron respecto de la probeta sin tratamiento. La distribución de amplitudes y el parámetro M de la señal RB disminuyeron respecto de la probeta original. El análisis de la señal RB a partir del RMS (calculado a partir de un tiempo de integración muy pequeño) muestra la aparición de dos picos, diferenciándose de la probeta sin tratamiento con un solo pico. En cuanto al Espectro de Potencia de la señal, se vieron pequeñas diferencias a partir de una frecuencia del orden de 200 KHz y hasta 500 KHz.

2) Probeta con grano crecido

Se observó que el valor del pico máximo y el RMS de toda la señal era mayor que el correspondiente a la probeta testigo, sin embargo aparece en ambos parámetros una mayor dispersión. La distribución de amplitudes y el parámetro M se modifican respecto de la probeta testigo, disminuyendo el valor del parámetro M. Con respecto al RMS calculado electrónicamente con un tiempo de integración característico, vemos la aparición de dos picos retrasados respecto de la probeta testigo. Los picos aparecidos resultan ser menores al pico del material original. Este resultado muestra un mecanismo diferente del movimiento de las paredes de dominios, distinto al encontrado en otras probetas. Con respecto al análisis del Espectro de Potencia vemos la aparición de nuevos picos de frecuencia a partir de los 100 KHz.

3) Probeta con deformación plástica en frío

El valor del pico máximo de la señal es similar al del estado original, sin embargo el valor RMS de toda la señal es claramente superior. Se observó la disminución del parámetro M, y en la distribución de amplitudes un aumento notable del número de picos de bajo valor respecto a la probeta testigo. Con respecto al análisis del RMS (tiempo de integración corto), vemos la aparición de un solo pico y el retraso leve del mismo hacia campos mayores. El análisis del Espectro de Potencia muestra que es similar al de la probeta sin tratamiento, excepto a partir de los 300 KHz donde aparecen algunas frecuencias particulares.

4) Probeta irradiada

Las conclusiones de las mediciones RB fueron: el pico máximo y el valor RMS de toda la señal es mayor para la probeta sin irradiación que irradiada; el parámetro M de la probeta no irradiada es menor al de la probeta irradiada. La distribución de amplitudes en la probeta irradiada presenta una mayor dispersión de resultados en particular en la zona de bajas amplitudes (menores a 0.5 V). Las gráficas del valor RMS (integración electrónica a partir de un tiempo característico corto) presentan un solo pico, y el valor máximo del RMS lo tiene la probeta irradiada. Los espectros de Potencia de ambas probetas son idénticos, por lo que no se pueden realizar otros comentarios más, que con el nivel de dosis aplicado no se produjeron cambios en dicho análisis. De acuerdo con esto y teniendo en cuenta el bajo nivel de dosis alcanzado en la probeta irradiada, parecería promisorio el estudio del daño por radiación en materiales ferromagnéticos mediante RB.

5) Probeta tensionada

Se mostró que el valor máximo de Pico de señal y el RMS de toda la señal Barkhausen puede servir para la medición o extrapolación de valores de tensiones superficiales en el material en estudio. Se pudo observar un crecimiento continuo de los parámetros con el crecimiento de la aplicación de cargas. Se ha demostrado la factibilidad de medición de tensiones mediante este método.

II. A partir del estudio de la señal EMA, se concluye para cada probeta,

1) Probeta Decarburizada

La probeta Decarburizada respecto de la probeta testigo, presenta un nivel máximo de RMS (por integración electrónica a partir de un tiempo característico) claramente menor. El análisis del Espectro de Potencia de frecuencias no presenta diferencias notables.

2) Probeta con grano crecido

El nivel máximo de RMS medido es levemente menor que la probeta original y el espectro de Potencia de Frecuencias se mantiene similar a la probeta testigo en casi todo este rango superior a 500 KHz, con leves diferencias fuera de él.

3) Probeta con deformación plástica en frío

La probeta P4 presenta una mayor duración en la señal EMA que la probeta testigo. Además en la gráfica RMS aparecen dos picos. Respecto del espectro de Potencia, mantiene las características presentadas en la probeta sin tratamiento.

4) Probeta irradiada

Las conclusiones de las mediciones EMA en la probeta irradiada fueron, el valor RMS máximo de la señal EMA es levemente mayor en la probeta irradiada que en la patrón. En cuanto al análisis de Fourier se puede ver que el Espectro de Potencia es prácticamente el mismo, con lo que se concluye que para estos niveles de radiación y mediante este método de análisis no se obtienen diferencias notables. En general podemos asegurar que si bien el nivel de dosis aplicado fue muy bajo, se perciben pequeñas modificaciones en los parámetros Valor pico máximo del RMS de la señal EMA, esto haría prometedor el estudio de esta técnica aplicada a materiales dañados por radiación de neutrones.

Todo cuanto se dijo demuestra que el análisis de las señales RB y EMA pueden ser utilizadas como herramientas de caracterización de material ferromagnéticos. Especial atención debemos poner en el análisis de RB mediante el RMS calculado mediante un tiempo de integración pequeño (del orden de las decenas de microsegundos), debido a que con este método inicialmente podemos apreciar cambios significativos en las señales, y la aparición de picos con su correspondiente ubicación temporal, que se presuponen producto de distintos mecanismos de fijación de las paredes de dominios.

Resulta claro la posibilidad de utilizar el Sistema de Medición construido en este trabajo, como método de Ensayo No Destructivo, luego de la calibración de las señales con

elementos testigos de distinto grado de cambio microestructural, de acuerdo al rango que se desee evaluar.

7.2 Futuras líneas de trabajo

La construcción de un Sistema de Medición de RB y EMA ha abierto una ventana para el estudio y mejoramiento del equipo, con el objeto de aumentar la resolución, lograr nuevas aplicaciones y sistematizar las mediciones para la comparación de resultados. Por ello se proponen las siguientes líneas de investigación a desarrollar en el futuro:

- Estudio de nuevos sensores RB, caracterización de los mismos respecto de sus frecuencias características, niveles de amplificación real de bobinas con y sin núcleo de material ferromagnético, la influencia de dichos materiales en la medición de señales, miniaturización de sensores, etc.
- Estudio y construcción de nuevos elementos magnetizadores, con nuevos materiales de más fácil magnetización, dispositivos intercambiables de magnetización y sensado para medición de distintas formas y tamaños de elementos a medir, etc.
- Estudio y construcción de equipos de amplificación y filtrado de frecuencias de las señales RB, con capacidad de variación en el nivel de frecuencias filtradas, disminución de ruidos propios, etc.
- Estudio y construcción de un dispositivo integral de medición, con capacidad para medir simultáneamente RB y EMA. Esto haría posible la comparación en tiempo real de fenómenos complementarios, como ser el movimiento de paredes de dominios de 180° y las que no son de 180° , etc.
- Estudio y construcción de dispositivos de adquisición, digitalización y grabado de señales RB y EMA, con versatilidad para el manejo independiente de señales mediante programas externos preelaborados, y la visualización inmediata de parámetros ya estudiados para hacer del sistema un equipo portátil para su aplicación industrial y de laboratorio.
- Incorporación de medidores de campo magnético en el sistema de medición, para correlacionar las señales RB y EMA con el campo magnético aplicado.

Todo lo expuesto en este trabajo, demuestra la capacidad del Sistema de Medición construido para percibir cambios en las señales RB y EMA, debido a diferencias microestructurales y/o a tensiones aplicadas en el material en estudio. Sin embargo y como se ha mostrado, las señales pueden disminuir o aumentar en el mismo nivel con diferentes tratamientos termo-mecánicos, por irradiación o por aplicación de tensiones, u otros cambios no estudiados aquí. Esto sugiere la necesidad de calibración del equipo, contrastación de este método con otros métodos ya calibrados, el estudio del parámetro más conveniente de la señal para cada tipo de cambio microestructural, etc. Por estas razones se sugieren para futuras investigaciones:

- El estudio de la influencia de cambios microestructurales termo-mecánicos, con distintos niveles graduales de los mismos
- El estudio de la influencia de cambios microestructurales debidas a la radiación neutrónica a partir de distintos niveles de dosis aplicadas.
- El estudio de distintos parámetros de la señal para distinguir unívocamente dichos cambios microestructurales, y la utilización de herramientas matemáticas más potentes y adecuadas para este tipo de señal.
- El estudio de la relación entre el RB y EMA con la variación de las propiedades mecánicas de materiales ferromagnéticos frente a cambios microestructurales.
- El estudio de la influencia en las señales RB y EMA, de la forma de las probetas, el nivel de magnetización, etc.
- El estudio de las señales a partir de diferentes frecuencias de filtrado.
- El estudio de las señales RB y EMA en materiales no ferromagnéticos que por algún tratamiento termo-mecánico puedan originar fases ferromagnéticas.
- La medición de tensiones residuales mediante RB y EMA, y su comparación con otros métodos.

Si bien existen algunos modelos que describen la forma de las señales RB y EMA, al momento no hay elaborada una teoría completa de todo el fenómeno. Se sugiere entonces para trabajos posteriores, el estudio de modelos que puedan predecir el tipo de señales sensadas en el Sistema de Medición, a partir de diferentes cambios microestructurales, aplicación de tensiones, medición de tensiones residuales, etc.

Capítulo 7

Conclusiones y propuestas para investigaciones futuras

En este Capítulo se resumen los trabajos realizados y las conclusiones extraídas de este estudio, sugiriéndose futuros trabajos a emprender.

7.1 Conclusiones

Se construyeron distintos dispositivos (yugo magnético, fuente de corriente, amplificador y filtro de frecuencias y sensores RB), para la aplicación de un campo magnético controlado y la medición de RB y EMA, lográndose un sistema integral de medición de dichos fenómenos.

Con el objeto de corroborar la posibilidad de apreciar cambios microestructurales en un mismo material ferromagnético a partir del RB y EMA, se caracterizó un acero comercial de bajo contenido de carbono (AISI 1020). Se construyeron probetas de este material y se las sometió a distintos tratamientos termo-mecánicos. Los cambios analizados fueron: la decarburización superficial; el crecimiento del grano, y deformación plástica en frío. Los resultados que se obtuvieron de las probetas con diferentes tratamientos fueron comparados con los resultados obtenidos sobre la probeta sin tratamiento (testigo). Otro de los estudios encarados en este trabajo fue la medición de RB y EMA en probetas sometidas a un flujo de radiación neutrónica, produciéndole daños a la misma. Dichos daños afectan el movimiento de los dominios magnéticos y con ello se producen cambios en las señales RB y EMA. Con ese fin se fabricaron probetas idénticas de un acero comercial (AISI 1020), pero de menor tamaño que las anteriores, dejando una como probeta testigo y la otra fue sometida a una dosis baja de neutrones rápidos ($3.6 \cdot 10^{15} \text{ n/cm}^2$). Se midieron en ambos casos los mismos parámetros ya descriptos y se compararon.

Finalmente se analizó el RB de otro material ferromagnético que fue sometido a diferentes estados de tensión.

I. A partir del estudio de la señal RB, se concluye para cada probeta y ensayo,

1) Probeta Decarburizada

La disminución de carbono en un acero comercial como el descrito, produjo una disminución en las señales de RB. Tanto el valor del pico máximo como el RMS de toda la señal disminuyeron respecto de la probeta sin tratamiento. La distribución de amplitudes y el parámetro M de la señal RB disminuyeron respecto de la probeta original. El análisis de la señal RB a partir del RMS (calculado a partir de un tiempo de integración muy pequeño) muestra la aparición de dos picos, diferenciándose de la probeta sin tratamiento con un solo pico. En cuanto al Espectro de Potencia de la señal, se vieron pequeñas diferencias a partir de una frecuencia del orden de 200 KHz y hasta 500 KHz.

2) Probeta con grano crecido

Se observó que el valor del pico máximo y el RMS de toda la señal era mayor que el correspondiente a la probeta testigo, sin embargo aparece en ambos parámetros una mayor dispersión. La distribución de amplitudes y el parámetro M se modifican respecto de la probeta testigo, disminuyendo el valor del parámetro M. Con respecto al RMS calculado electrónicamente con un tiempo de integración característico, vemos la aparición de dos picos retrasados respecto de la probeta testigo. Los picos aparecidos resultan ser menores al pico del material original. Este resultado muestra un mecanismo diferente del movimiento de las paredes de dominios, distinto al encontrado en otras probetas. Con respecto al análisis del Espectro de Potencia vemos la aparición de nuevos picos de frecuencia a partir de los 100 KHz.

3) Probeta con deformación plástica en frío

El valor del pico máximo de la señal es similar al del estado original, sin embargo el valor RMS de toda la señal es claramente superior. Se observó la disminución del parámetro M, y en la distribución de amplitudes un aumento notable del número de picos de bajo valor respecto a la probeta testigo. Con respecto al análisis del RMS (tiempo de integración corto), vemos la aparición de un solo pico y el retraso leve del mismo hacia campos mayores. El análisis del Espectro de Potencia muestra que es similar al de la probeta sin tratamiento, excepto a partir de los 300 KHz donde aparecen algunas frecuencias particulares.

4) Probeta irradiada

Las conclusiones de las mediciones RB fueron: el pico máximo y el valor RMS de toda la señal es mayor para la probeta sin irradiación que irradiada; el parámetro M de la probeta no irradiada es menor al de la probeta irradiada. La distribución de amplitudes en la probeta irradiada presenta una mayor dispersión de resultados en particular en la zona de bajas amplitudes (menores a 0.5 V). Las gráficas del valor RMS (integración electrónica a partir de un tiempo característico corto) presentan un solo pico, y el valor máximo del RMS lo tiene la probeta irradiada. Los espectros de Potencia de ambas probetas son idénticos, por lo que no se pueden realizar otros comentarios más, que con el nivel de dosis aplicado no se produjeron cambios en dicho análisis. De acuerdo con esto y teniendo en cuenta el bajo nivel de dosis alcanzado en la probeta irradiada, parecería promisorio el estudio del daño por radiación en materiales ferromagnéticos mediante RB.

5) Probeta tensionada

Se mostró que el valor máximo de Pico de señal y el RMS de toda la señal Barkhausen puede servir para la medición o extrapolación de valores de tensiones superficiales en el material en estudio. Se pudo observar un crecimiento continuo de los parámetros con el crecimiento de la aplicación de cargas. Se ha demostrado la factibilidad de medición de tensiones mediante este método.

II. A partir del estudio de la señal EMA, se concluye para cada probeta,

1) Probeta Decarburizada

La probeta Decarburizada respecto de la probeta testigo, presenta un nivel máximo de RMS (por integración electrónica a partir de un tiempo característico) claramente menor. El análisis del Espectro de Potencia de frecuencias no presenta diferencias notables.

2) Probeta con grano crecido

El nivel máximo de RMS medido es levemente menor que la probeta original y el espectro de Potencia de Frecuencias se mantiene similar a la probeta testigo en casi todo este rango superior a 500 KHz, con leves diferencias fuera de él.

3) Probeta con deformación plástica en frío

La probeta P4 presenta una mayor duración en la señal EMA que la probeta testigo. Además en la gráfica RMS aparecen dos picos. Respecto del espectro de Potencia, mantiene las características presentadas en la probeta sin tratamiento.

4) Probeta irradiada

Las conclusiones de las mediciones EMA en la probeta irradiada fueron, el valor RMS máximo de la señal EMA es levemente mayor en la probeta irradiada que en la patrón. En cuanto al análisis de Fourier se puede ver que el Espectro de Potencia es prácticamente el mismo, con lo que se concluye que para estos niveles de radiación y mediante este método de análisis no se obtienen diferencias notables. En general podemos asegurar que si bien el nivel de dosis aplicado fue muy bajo, se perciben pequeñas modificaciones en los parámetros Valor pico máximo del RMS de la señal EMA, esto haría prometedor el estudio de esta técnica aplicada a materiales dañados por radiación de neutrones.

Todo cuanto se dijo demuestra que el análisis de las señales RB y EMA pueden ser utilizadas como herramientas de caracterización de material ferromagnéticos. Especial atención debemos poner en el análisis de RB mediante el RMS calculado mediante un tiempo de integración pequeño (del orden de las decenas de microsegundos), debido a que con este método inicialmente podemos apreciar cambios significativos en las señales, y la aparición de picos con su correspondiente ubicación temporal, que se presuponen producto de distintos mecanismos de fijación de las paredes de dominios.

Resulta claro la posibilidad de utilizar el Sistema de Medición construido en este trabajo, como método de Ensayo No Destructivo, luego de la calibración de las señales con

elementos testigos de distinto grado de cambio microestructural, de acuerdo al rango que se desee evaluar.

7.2 Futuras líneas de trabajo

La construcción de un Sistema de Medición de RB y EMA ha abierto una ventana para el estudio y mejoramiento del equipo, con el objeto de aumentar la resolución, lograr nuevas aplicaciones y sistematizar las mediciones para la comparación de resultados. Por ello se proponen las siguientes líneas de investigación a desarrollar en el futuro:

- Estudio de nuevos sensores RB, caracterización de los mismos respecto de sus frecuencias características, niveles de amplificación real de bobinas con y sin núcleo de material ferromagnético, la influencia de dichos materiales en la medición de señales, miniaturización de sensores, etc.
- Estudio y construcción de nuevos elementos magnetizadores, con nuevos materiales de más fácil magnetización, dispositivos intercambiables de magnetización y sensado para medición de distintas formas y tamaños de elementos a medir, etc.
- Estudio y construcción de equipos de amplificación y filtrado de frecuencias de las señales RB, con capacidad de variación en el nivel de frecuencias filtradas, disminución de ruidos propios, etc.
- Estudio y construcción de un dispositivo integral de medición, con capacidad para medir simultáneamente RB y EMA. Esto haría posible la comparación en tiempo real de fenómenos complementarios, como ser el movimiento de paredes de dominios de 180° y las que no son de 180° , etc.
- Estudio y construcción de dispositivos de adquisición, digitalización y grabado de señales RB y EMA, con versatilidad para el manejo independiente de señales mediante programas externos preelaborados, y la visualización inmediata de parámetros ya estudiados para hacer del sistema un equipo portátil para su aplicación industrial y de laboratorio.
- Incorporación de medidores de campo magnético en el sistema de medición, para correlacionar las señales RB y EMA con el campo magnético aplicado.

Todo lo expuesto en este trabajo, demuestra la capacidad del Sistema de Medición construido para percibir cambios en las señales RB y EMA, debido a diferencias microestructurales y/o a tensiones aplicadas en el material en estudio. Sin embargo y como se ha mostrado, las señales pueden disminuir o aumentar en el mismo nivel con diferentes tratamientos termo-mecánicos, por irradiación o por aplicación de tensiones, u otros cambios no estudiados aquí. Esto sugiere la necesidad de calibración del equipo, contrastación de este método con otros métodos ya calibrados, el estudio del parámetro más conveniente de la señal para cada tipo de cambio microestructural, etc. Por estas razones se sugieren para futuras investigaciones:

- El estudio de la influencia de cambios microestructurales termo-mecánicos, con distintos niveles graduales de los mismos
- El estudio de la influencia de cambios microestructurales debidas a la radiación neutrónica a partir de distintos niveles de dosis aplicadas.
- El estudio de distintos parámetros de la señal para distinguir unívocamente dichos cambios microestructurales, y la utilización de herramientas matemáticas más potentes y adecuadas para este tipo de señal.
- El estudio de la relación entre el RB y EMA con la variación de las propiedades mecánicas de materiales ferromagnéticos frente a cambios microestructurales.
- El estudio de la influencia en las señales RB y EMA, de la forma de las probetas, el nivel de magnetización, etc.
- El estudio de las señales a partir de diferentes frecuencias de filtrado.
- El estudio de las señales RB y EMA en materiales no ferromagnéticos que por algún tratamiento termo-mecánico puedan originar fases ferromagnéticas.
- La medición de tensiones residuales mediante RB y EMA, y su comparación con otros métodos.

Si bien existen algunos modelos que describen la forma de las señales RB y EMA, al momento no hay elaborada una teoría completa de todo el fenómeno. Se sugiere entonces para trabajos posteriores, el estudio de modelos que puedan predecir el tipo de señales sensadas en el Sistema de Medición, a partir de diferentes cambios microestructurales, aplicación de tensiones, medición de tensiones residuales, etc.