



**REPÚBLICA DE CUBA  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO  
Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ  
FACULTAD METALURGIA ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO. INGENIERIA MECÁNICA**

**TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

***Dominios magnéticos en piezas de acero AISI 4340  
soldado con electrodos revestidos***

***Autor: Antonio Iván Ruiz Magaña***

***Tutores: Dr. C. Tomás Fernández Columbié  
Lic. Gelayssi Moreno Vega***

***Curso 2014 – 2015  
“Año 57 de la Revolución”  
MoA 2014***



***Declaración de autoridad***

**Yo:** Antonio Iván Ruiz Magaña

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

-----  
Antonio Iván Ruiz Magaña

-----  
Dr. C. Tomás Fernández Columbié

-----  
Lic. Gelayssi Moreno Vega



## **Agradecimientos**

***A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el desempeño de mi carrera.***

***A mis tutores por confiar en mí en la realización de este trabajo, el Dr. C. Tomás Fernández Columbié y la Lic. Gelayssi Moreno Vega.***

***A mis familiares que me apoyaron en los momentos de mi vida en que más lo necesitaba.***

***A mis amigos que siempre creyeron en mí.***

***A los que de una forma u otra me apoyaron y ayudaron en la realización de este trabajo.***

***A la revolución, por darme la oportunidad de convertirme en profesional .***

***A todos***

***Muchas Gracias.***



## ***Dedicatoria***

***Quiero dedicar este trabajo a mis familiares.***

***A mi madre: Isabel Edith Magaña Haynes***

***A mi padre: Iraide Ruíz Sablón***

***A mi hermana: Rosabel Ruíz Magaña***

***A mi hermano: Ramón Antonio Ruíz Ruíz***

***A mis amigos***

***que estuvieron a mi lado durante los 5 años de mi  
carrera***

***A nuestra revolución, por las posibilidades que me  
ofrece***



## **Resumen**

El trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento del depósito de diferentes electrodos como el electrodo E – 7018 de diámetro 4 mm, el electrodo E – 312 – 16 de diámetro de 3,2 y el electrodo UTP 65 con diámetro de 3,2, empleados en la soldadura del acero AISI 4340, considerado como un acero del tipo cromo – níquel – molibdeno. Para determinar las propiedades mecánicas de cada uno de los electrodos se prepararon muestras del material con dimensiones de 100 x 50 mm, se sometieron a ensayo no destructivos (END) como el ruido magnético Barkhausen luego del ciclo térmico de soldadura. Las señales Barkhausen, así como las microestructuras obtenidas demuestran que la soldadura del acero AISI 4340 con electrodos del tipo E 7018 promueve la formación de la fase sigma a partir de la ferrita e introduce una dureza de 498,70 HV lo que la convierte en una estructura frágil. Siendo el más favorable el empleo de electrodo del tipo UTP 65 que origina espectro Barkhausen de menor intensidad, estructura del tipo Austenita – Ferrita con dureza de 315 HV. Por último se realiza la valoración económica y el impacto medio ambiental.



### **Abstract**

This paper has as objective to analyze the behaviour of the deposit of different electrodes like the electrode E 7018 of diameter 4 mm, the electrode E - 312 - 16 of diameter of 3,2 and the electrode UTP 65 with diameter of 3,2, employees in the welding of the steel AISI 4340, considered as a steel of the type chromium - nickel molybdenum. To determine the mechanical states of each one of the electrodes they got ready samples of the material with dimensions of 100 x 50 mm, they underwent non destructive rehearsal (END) as the magnetic noise Barkhausen after the thermal cycle of welding. The signs Barkhausen, as well as the obtained microstructures demonstrates that the welding of the steel AISI 4340 with electrodes of the type E 7018 promote the formation of the phase sigma starting from the ferrite and it introduces a hardness of 498,70 HV what transforms it into a fragile structure. Being the most favourable the employment of electrode of the type UTP 65 that it originates spectrum Barkhausen of smaller intensity, structures of the type Austenita - Ferrite with hardness of 315 HV. Lastly he is carried out the economic valuation and the half environmental impact.



**TABLA DE CONTENIDOS**

<b>SÍNTESIS</b>	<b>Pág</b>
<b>INTRODUCCIÓN.</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS</b>	
1.1. Introducción	5
1.2. Caracterización de ensayos no destructivos	5
1.3. Campo magnético, densidad de flujo magnético y magnetización	7
1.3.1. Lazo de histéresis	8
1.4. El efecto Barkhausen	9
1.4.1. Mediciones de Ruido Magnético Barkhausen	12
1.5. Dominios magnéticos	15
1.5.1. Rotación de los dominios y movimiento de las paredes de dominios	17
1.6. Proceso tecnológico de la soldadura	17
1.7. Aceros de baja aleación	19
1.7.1. Generalidades de las aleaciones de cromo	19
1.7.2. Influencia de los elementos de aleación en el proceso de soldadura	22
1.7.3. Influencia de los elementos de aleación en la templabilidad del acero	23
1.8. Agrietamiento en uniones soldadas	24
1.8.1. Control de calidad de la soldadura	27
1.9. Conclusiones del capítulo 1	28
<b>CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	
2.1 Introducción	29
2.2. Composición química del acero AISI 4340	29
2.3. Preparación de la junta	30
2.3.1. Características de los materiales de aporte	31
2.3.2. Cálculo del calor aportado	32
2.3.3. Diagrama de Schaeffler	33
2.4. Análisis microestructural	34
2.5. Caracterización de los equipos empleados en la experimentación	34
2.5.1. Ensayos de dureza	34
2.5.2. Microscopio óptico	35



2.5.3. Pulidora metalográfica	35
2.5.4. Máquina para soldar	36
2.5.5. Adquisición de la señal de ruido magnético Barkhausen	36
2.6. Preparación de las muestras para el análisis metalográfico	37
2.6.1. Corte	38
2.6.2. Desbaste	39
2.6.3. Ataque	39
2.6.4. Preparación de las muestras para la medición del RMB	40
2.6.5. Metodología para la medición del ruido Magnético Barkhausen	40
2.7. Conclusiones del capítulo 2	43
<b>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b>	
3.1. Introducción	44
3.2. Análisis de los regímenes de soldadura	44
3.2.1. Análisis del depósito por el diagrama de Schaeffler	45
3.3. Análisis de la microestructura	46
3.4. Análisis de la señal Barkhausen en las muestras soldadas	47
3.4.1. Análisis de la señal Barkhausen del depósito con electrodo E 7018	48
3.4.2. Análisis de la señal Barkhausen del electrodo E – 312 – 16	50
3.4.3. Análisis de la señal Barkhausen del depósito con electrodo UTP 65	51
3.3.4. Análisis de los lazos de histéresis	52
3.3.5. Análisis de la envolvente	54
3.4. Determinación de perfiles de microdurezas	55
3.5. Valoración económica	55
3.6. Valoración del impacto medio ambiental	57
3.7. Conclusiones del capítulo 3	59
<b>CONCLUSIONES GENERALES</b>	
<b>RECOMENDACIONES</b>	
<b>BIBLIOGRAFÍAS</b>	





## INTRODUCCIÓN

El propósito primario de la inspección no destructiva es la detección de discontinuidades que puedan afectar la vida segura de una estructura o elemento mecánico cualquiera, estos no deben tener discontinuidades que puedan ser la causa para el retiro del componente del servicio y menos aún de su falla.

La prueba no destructiva se ha practicado por muchas décadas, en principio con progresos rápidos en la instrumentación, estimulada por los avances tecnológicos que ocurrieron sobre todo desde la Segunda Guerra Mundial y el esfuerzo subsiguiente de la defensa. En respuesta a ésta necesidad, se han desarrollado técnicas cada vez más sofisticadas. Los campos de aplicación de los ENDs son muy variados e ideados para evaluar discontinuidades de distintos materiales, de distintas características y distintas ubicaciones y formas de discontinuidades.

En el proceso de fabricación de componentes soldados, es uno de los más exigentes y su calidad y fiabilidad está directamente relacionada a la integridad superficial. Las Tensiones Residuales (TR) han revelado ser un parámetro importante, ya que dependiendo de su naturaleza (tracción o compresión), el desempeño de la herramienta o capacidad para soportar un elevado número de ciclos térmicos y mecánicos puede ser mayor

La soldadura de arco o soldadura eléctrica es el proceso de más amplia aceptación como el mejor, el más económico, el más natural y el más práctico para unir metales. En el proceso de soldadura manual por arco, que es de uso más común, el soldador obtiene un electrodo adecuado, sujeta el cable de tierra a la pieza de trabajo, y ajusta la corriente eléctrica para "hacer saltar el arco", es decir para crear una corriente eléctrica intensa que salte entre el electrodo y el metal base.

En Cuba, como resultado de la inserción de nuevos procesos tecnológicos en las esferas de la ciencia y la técnica, principalmente a escala industrial, ha surgido la necesidad de investigar el por qué del agrietamiento en la zona fundida (ZF) y de influencia térmica (ZIT) en el acero empleado para la fabricación de ballestas en los automóviles.



La concentración de esfuerzos es la razón principal que causa la falla por fatiga de los materiales. Sin embargo, un daño prematuro de los materiales, es complicado de predecir y de poder generar una evaluación adecuada de su estado actual. La caracterización mecánica de los materiales es importante para poder determinar sus propiedades mecánicas como esfuerzo de cedencia, módulo de elasticidad, deformación máxima y parámetros de plasticidad.

La **situación problemática** de la investigación la constituye:

En las uniones soldadas de aceros al carbono se presenta una variación microestructural, como consecuencia de los ciclos térmicos, la cual debe ser controlada para garantizar el desempeño para el que fueron proyectados. Los cambios que ocurren en la zona fundida y en la zona de influencia térmica determinan la calidad de las uniones soldadas. Los cambios que se inducen en estas zonas provocan alteraciones, las cuales al estar tensionadas provocan un aumento del campo magnético aplicado, el aumento en la inducción se presenta de manera discontinua, como respuesta al movimiento de las paredes de dominio magnético. En las uniones soldadas con diferentes electrodos, estos dominios magnéticos varían según la influencia de la temperatura.

El **problema** a investigar lo constituye: la no caracterización de los dominios magnéticos en la zona fundida (ZF) y la zona de influencia térmica (ZIT) en el cordón de soldadura de un acero bajo aleado AISI 4340 con el empleo del Ruido Magnético de Barkhausen, luego del proceso de soldadura manual por arco eléctrico.

Como **objeto de la investigación** se establece: cordón de soldadura del acero AISI 4340 soldado con proceso de soldadura manual por arco eléctrico y electrodos revestidos.

**Campo de acción:** dominio magnético, la microestructura, la dureza en la zona fundida y en la zona de influencia térmica del acero AISI 4340 sometido a proceso de soldadura manual por arco eléctrico y electrodos revestidos.



Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis**

Al aplicar un campo magnético variable a un material ferromagnético como el acero AISI 4340 se puede generar un cambio en la densidad del flujo magnético y poder evaluar los defectos en la zona fundida y en la zona de influencia térmica en correspondencia con el movimiento de las paredes de dominio y los puntos de anclaje.

A partir de la hipótesis planteada, se define como **objetivo del trabajo**

Establecer a partir de los dominios magnéticos y las paredes de dominios, las variaciones superficiales y la microestructura en la zona fundida (ZF) y la zona de influencia térmica (ZIT) del acero AISI 4340 luego de ser sometido a proceso de soldadura manual por arco eléctrico y electrodos revestidos.

Y se definen los siguientes **objetivos específicos**

1. Definir las regularidades del comportamiento mecánico y microestructural de la Zona fundida (ZF) y Zona de Influencia Térmica (ZIT), del acero bajo aleado AISI 4340 luego del proceso de soldadura a través de emisión magnética.
2. Correlacionar la emisión magnética Barkhausen con los parámetros mecánicos metalúrgicos de la zona fundida (ZF) y de la zona de influencia térmica (ZIT) del acero AISI 4340 luego del proceso de soldadura manual por arco eléctrico.
3. Establecer a partir del efecto magnético Barkhausen, los dominios magnéticos y las paredes de dominio, así como el comportamiento microestructural y la dureza en la zona fundida (ZF) y la zona de influencia térmica (ZIT) del acero AISI 4340 soldado con proceso manual por arco eléctrico y electrodos revestidos.

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas de trabajo:**

1. Revisión bibliográfica relacionada con el objeto de estudio.
2. Obtención a través del efecto magnético Barkhausen el comportamiento mecánico y metalúrgico del acero AISI 4340 en la ZF y la ZIT sometido a proceso de soldadura.



3. Ejecución experimental para la determinación a través de la emisión magnética Barkhausen el comportamiento microestructural del acero en las Zona Fundida y la Zona de Influencia Térmica del acero AISI 4340, luego del proceso de soldadura.
4. Análisis de los resultados y fundamentación del mecanismo de obtención microestructural de la ZF y la ZIT del acero durante el proceso de soldadura con el empleo de la emisión magnética Barkhausen.
5. Planteamiento de las ventajas económicas de la aplicación de la metodología propuesta.

# Capítulo 1

## Marco teórico y antecedentes investigativos



## **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS**

### **1.1 Introducción**

En la actualidad existen aceros diferentes que sirven como materiales de construcción; los diseñadores pueden escoger el acero que mejor se comporte de acuerdo a las necesidades particulares. Estos materiales difieren no solo en su composición sino también en la forma como han sido manufacturados; lo que los hace más o menos soldables creándose, la necesidad de evaluar a fondo las formas disponibles para su soldadura.

En la fabricación de equipos y máquinas, es cada vez más frecuente las aplicaciones de soldaduras en aceros. Esto lleva a que se tenga que investigar y ensayar cuidadosamente con el fin de descubrir las mejores condiciones bajo las cuales se deban efectuar dichas uniones.

En el presente capítulo se establece como objetivo realizar un análisis de la bibliografía existente relacionada con los procesos de soldadura por arco eléctrico en aceros de baja aleación y la determinación de tensiones por medio de ensayos no destructivos.

### **1.2. Caracterización de ensayos no destructivos**

El acero se utiliza ampliamente para la fabricación de estructuras utilizadas en proyectos de gran escala en muchas áreas de la industria tales como: la petrolera, la ferroviaria y la construcción. La aplicación del acero en tantas áreas de la industria se debe a que este material posee buena elasticidad, plasticidad y alta resistencia mecánica (Jiles, 1991).

En tales aplicaciones alguna avería en las estructuras de acero puede causar serios accidentes provocando pérdidas humanas, económicas e incluso daños ecológicos. Los accidentes pueden ser evitados monitoreando el estado de la estructura de acero para detectar a tiempo las averías que pudieran causar las fallas de estas estructuras de acero.

En la actualidad existe una necesidad tecnológica para la inspección no destructiva de estructuras de acero. Con el paso de los años han surgido métodos



de evaluación no destructiva (END), con alto impacto industrial debido al beneficio económico que brindan.

La rentabilidad de solo retirar los componentes defectuosos y la posibilidad de evitar fallas potencialmente catastróficas monitoreando el estado de las estructuras de acero, son solo algunas de las posibilidades que proporcionan los métodos de evaluación no destructiva.

Los métodos de evaluación no destructiva más comunes se basan o utilizan radiación ionizante, ultrasonido, líquidos penetrantes. Algunos de los métodos de END pueden ser utilizados en aceros pero presentan el inconveniente de que no son rentables e incluso puede que no sean prácticos para usarse en instalaciones industriales. La limitación de estos métodos para detectar fatiga o degradación termomecánica ha llegado a ser un factor importante para el desarrollo de nuevos métodos de evaluación no destructiva en aceros basados en métodos magnéticos.

Los métodos magnéticos de evaluación no destructiva son únicos porque utilizan las propiedades magnéticas del acero y pueden ser empleados para detectar defectos en las estructuras de acero y evaluar las propiedades magnéticas del material. El desarrollo de métodos magnéticos de evaluación no destructiva requiere de un conocimiento profundo acerca de los fenómenos físicos involucrados. Hay que añadir que el un gran número de aceros diferentes hacen que la información sea muy dispersa y genere problemas en su análisis. A causa de lo anterior los métodos magnéticos no han sido completamente explotados en comparación, por ejemplo, con los métodos ultrasónicos.

La potencialidad de los métodos magnéticos para evaluar desde defectos hasta esfuerzos residuales en las estructuras de acero, han permitido que estos métodos ganen interés por parte de la industria, por lo que ahora es uno de los campos en desarrollo de evaluación no destructiva de materiales más importante (Jiles, 1991; Pérez-Benitez, 2008).

El ruido magnético Barkhausen es un fenómeno que ocurre en los materiales ferromagnéticos. Heinrich Barkhausen observó por primera vez en 1919 el fenómeno de cambios discontinuos en la magnetización de un material



ferromagnético al aplicarle una intensidad de campo magnético  $H$  variante en el tiempo Jiles, 1991). Los cambios discontinuos en la magnetización producen una señal que parece ruido que se le conoce, en honor a su descubridor, como ruido magnético Barkhausen (RMB).

Sin embargo, no fue hasta muchos años después de su descubrimiento que se comprendió su potencial como una herramienta de evaluación no destructiva, la cual se utiliza para investigar las propiedades magnéticas y mecánicas de los materiales ferromagnéticos. Los primeros intentos para usar el ruido magnético Barkhausen para determinar esfuerzos en estructuras de acero fueron hechos por Leep en 1967; pero no fue hasta que Pasley mostró distintas variaciones en la amplitud de la señal de ruido magnético Barkhausen debido a los esfuerzos residual y aplicado que el método comenzó a ganar aceptación como un método de evaluación no destructiva (Jiles, 1991).

Cuando los materiales ferromagnéticos se someten a campos magnéticos variables, el aumento en la inducción se presenta de manera discontinua, como respuesta al movimiento de las paredes de dominio magnético. Estos aumentos bruscos de inducción se conocen como Ruido Magnético de Barkhausen (RMB). La señal se detecta como un pulso de voltaje eléctrico cuando una bobina se coloca sobre la superficie de la muestra mientras está ocurriendo el movimiento de las paredes de dominio. El RMB es sensible a las características del material como la microestructura y los esfuerzos mecánicos aplicados. Esto hace que se potencialice como una herramienta de ensayo no destructivo.

Desde el punto de vista tecnológico, contar con un método de END que permita la detección de cualquier anomalía en las estructuras de acero y la evaluación de propiedades magnéticas de los aceros, tiene un gran impacto industrial en la mayoría de las áreas económicas en donde se utiliza este material.

### **1.3. Campo magnético, densidad de flujo magnético y magnetización**

El campo magnético ( $H$ ) está asociado con el movimiento de las cargas eléctricas, lo que significa que este solo se produce en presencia de corrientes eléctricas. Los imanes permanentes son otra fuente de campo magnético donde no intervienen



corrientes eléctricas. En el caso de los imanes permanentes el campo magnético se produce por el giro (spín) de los electrones. El "spín" del electrón es un efecto mecánico – cuántico. El electrón girando alrededor de su propio eje se puede considerar como una espira de corriente con un momento magnético  $m = I \cdot A$ , donde  $I$  y  $A$  son la corriente equivalente y el área de la espira, respectivamente.

### 1.3.1. Lazo de histéresis

Un material magnético puede ser representado de manera simple como un ensamblaje de momentos magnéticos permanentes de origen mecánico – cuántico. Los materiales ferromagnéticos exhiben una magnetización espontánea ( $M_e$ ) elevada para valores pequeños de intensidades de campo magnético debido a que los momentos magnéticos no son independientes entre sí. Dentro del material existen regiones llamadas dominios magnéticos. La diferencia entre el estado desmagnetizado y el estado magnetizado de un material ferromagnético radica en la configuración de los dominios dentro del material.

La figura 1.1 muestra los lazos de histéresis ( $B$  y  $M$ ) de una ferrita de bario tipo HF8/22, donde se representan los parámetros más importantes. Los materiales ferromagnéticos se clasifican como blandos o duros dependiendo del valor del campo coercitivo.

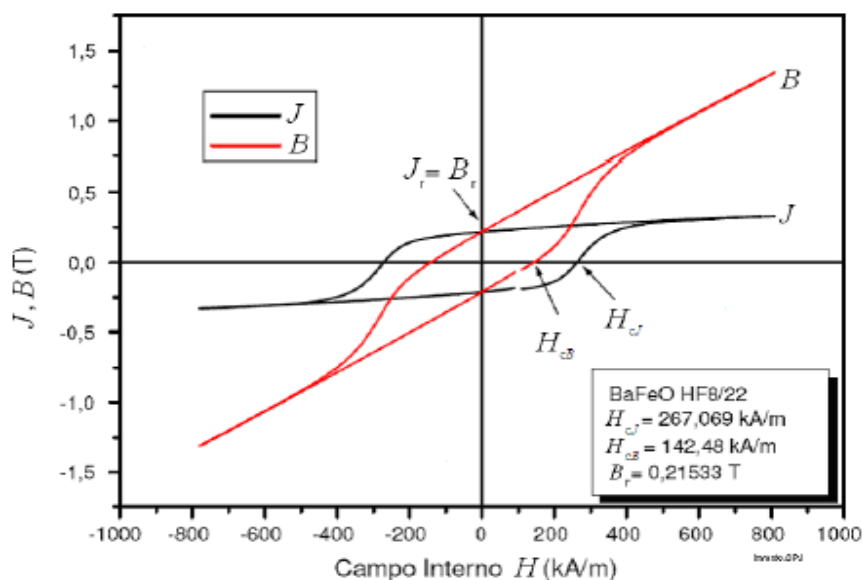


Figura 1.1. Lazo de histéresis de una ferrita de bario tipo HF8/22. Fuente: Espina (1989).



La forma más común de representar las propiedades magnéticas (permeabilidad, coercitividad, remanencia, pérdidas por histéresis) de un material ferromagnético es por medio de su lazo de histéresis. El lazo de histéresis se obtiene al graficar la densidad de flujo magnético  $B$  o la magnetización  $M$  para diferentes valores de intensidad de campo magnético  $H$ .

El origen del proceso de histéresis en los materiales magnéticos recae en la existencia de imperfecciones, tanto en forma de dislocaciones o impurezas en el material que incrementan las pérdidas energéticas durante el proceso de magnetización. La anisotropía magnetocristalina es otro de los mecanismos que ayudan en el proceso de histéresis. En los sólidos anisotrópicos, determinados ejes cristalográficos en el material favorecen a la orientación de los momentos magnéticos a lo largo de esas direcciones, lo que conlleva a un estado de menor energía y por lo tanto más estable. El resultado de este proceso es la rotación discontinua e irreversible de los momentos magnéticos que induce a cierta conmutación o salto (Espina, 1989).

#### **1.4. El efecto Barkhausen**

El efecto Barkhausen fue descubierto en 1919 por el físico Alemán Heinrich Barkhausen (Jiles, 1991). El efecto Barkhausen es un fenómeno que se aprecia como cambios discontinuos en la densidad de flujo magnético  $B$  dentro de un material ferromagnético cuando el campo magnético  $H$  varía en el tiempo. Este fenómeno fue observado por primera vez utilizando una pieza de hierro con una bobina enrollada a su alrededor que se conectó a una bocina como se muestra la figura 1.2 (a). A la pieza de hierro se le aplicó un campo magnético  $H$  que se incrementó lentamente.

El efecto de este experimento se apreció cuando se escucharon una serie de crujidos en la bobina. Los crujidos están asociados a pequeños pulsos de voltaje inducidos en la bobina enrollada alrededor del hierro. Los pulsos de voltaje son provocados por el efecto de la ley de inducción electromagnética, causados por pequeños cambios discontinuos en la densidad de flujo magnético  $B$  y de la

magnetización  $M$ , detectados a través de la bobina (Jiles, 1991), como se observa en la figura 1.2 (b).

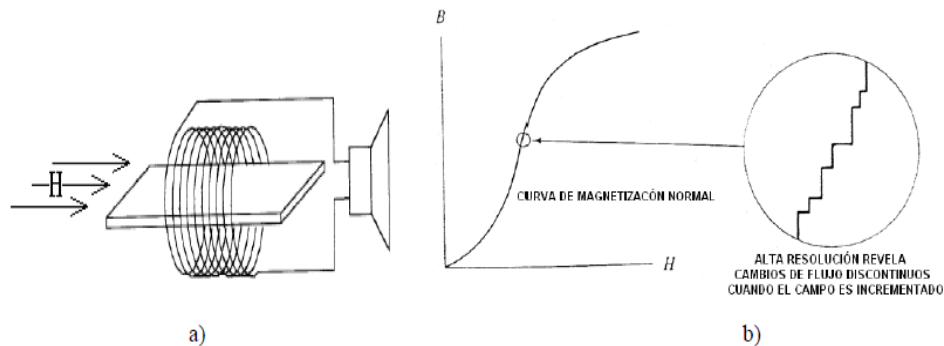


Figura 1.2 (a) Esquema del experimento de Barkhausen, b) Discontinuidades Barkhausen a lo largo de la curva de magnetización inicial observada tomando una pequeña porción de la curva. Fuente: Jiles (1991).

Las discontinuidades en la densidad de flujo magnético  $B$  se atribuyen inicialmente a la rotación discontinua de la dirección del momento magnético dentro de un dominio. Este mecanismo se conoce como rotación de dominio. Sin embargo, el factor que más contribuye en las emisiones Barkhausen es el movimiento discontinuo de las paredes de dominio (Jiles, 1991).

Las emisiones de ruido magnético Barkhausen (RMB) son afectadas por cambios en la microestructura del material, el esfuerzo aplicado y las deformaciones, lo que permite utilizar el RMB como una técnica de evaluación no destructiva de materiales.

En los materiales ferromagnéticos, las regiones en las cuales los momentos magnéticos están alineados en la dirección de magnetización espontánea, se conocen como dominios magnéticos. La dirección de alineación de los dominios magnéticos varía de dominio a dominio. La separación entre los dominios magnéticos son capas de transición que se conocen como paredes de dominio o paredes de Bloch. En materiales ferrosos éstas son de  $180^\circ$  o de  $90^\circ$ .

Al aplicar un campo magnético variable a un material ferromagnético, se ha observado que alrededor del campo coercitivo ( $H_c$ ), el aumento en la inducción ( $B$ ) como consecuencia del aumento del campo magnético aplicado ( $H$ ), sucede de

manera brusca, como pequeños saltos que se conocen como saltos de Barkhausen, como se muestra en la figura 1.3 (a). Esto se explica por la interacción del movimiento de las paredes de dominio y los puntos de anclaje que actúan como barreras al movimiento, los cuales son las imperfecciones del material como dislocaciones, límites de grano, precipitados (Jiles, 2000).

Las emisiones de Barkhausen generan una señal como la mostrada en la figura 1.3 (b) y se pueden detectar como pulsos de voltaje en una bobina colocada en la superficie de la muestra, mientras ocurre el movimiento de las paredes de dominio.

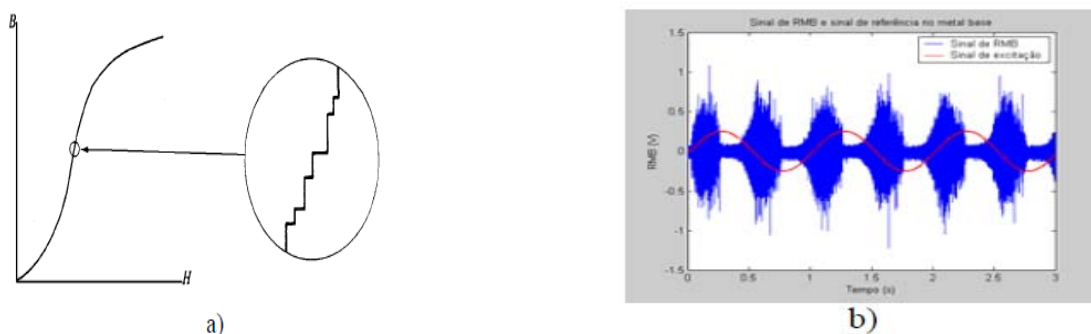


Figura 1.3 (a) curva de magnetización de un material ferromagnético. b) señal de RMB.

El RMB depende de los parámetros empleados para la magnetización, como la frecuencia (Jiles, 2000 y Moorthy *et al.*, 2003) y la intensidad de magnetización (Dhar y Atherton, 1992 y Padovese *et al.*, 2000). Depende también de las características del material como el tamaño de grano (Ranjan *et al.*, 1987 y Capó Sanchez *et al.*, 2002), el contenido de carbono (Kameda y Ranjan, 1987 y Capó-Sanchez *et al.*, 2004) y el estado de tensiones (Sipahi, 1994 y Anglada-Rivera *et al.*, 2001). Una de las potencialidades del RMB es su utilización en el monitoreo de uniones soldadas para identificar las variaciones estructurales, efectos de tratamientos térmicos o la presencia de defectos.

Algunos de los trabajos de RMB en soldaduras han sido realizados en microestructuras simuladas con tratamientos térmicos (Moorthy *et al.*, 1997 y Duck Gun-Park *et al.*, 2000) y otros han sido realizados en soldaduras reales para evaluar el efecto del tratamiento térmico después de la soldadura (Moorthy, 1997) o el desempeño de la unión soldada sometida a fatiga (Lachmann *et al.*, 2000).

El cambio en la magnetización de la muestra genera "saltos", diferentes a los de un movimiento suave y continuo (Stewart *et al.*, 2004). Estos saltos llegan a ser abruptos como lo muestra la figura 1.4 y son producto de los rápidos cambios discontinuos en la magnetización del material, los cuales son originados por cambios en el tamaño y orientación de los dominios magnéticos; dicho de otra forma, son las interacciones del movimiento entre las paredes de los dominios y los puntos de anclaje que actúan como barreras del movimiento, los cuales se interpretan como imperfecciones en el material (Serna y Rodríguez, 2007).

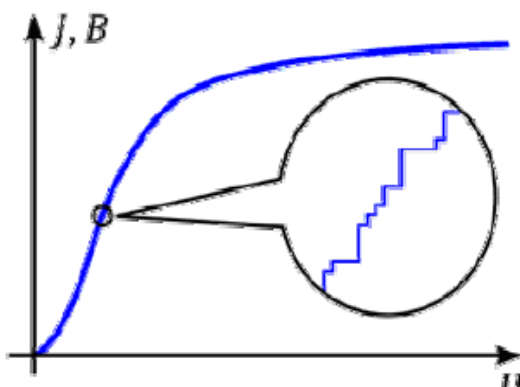


Figura 1.4. Curva típica de magnetización generada por la densidad de flujo magnético B vs Intensidad de campo H.

Los dominios magnéticos son arreglos microscópicos de dipolos magnéticos los cuales están acomodados aleatoriamente y que se ordenarán utilizando la menor cantidad de energía posible (Griffiths, 1999).

#### **1.4.1. Mediciones de Ruido Magnético Barkhausen**

Para realizar mediciones de ruido magnético Barkhausen se utiliza un arreglo experimental típico (Pérez-Benitez, 2008) como el que se muestra en la figura 1.5. Este arreglo experimental está formado por una herradura de un material magnético suave con alta permeabilidad que tiene una bobina para producir un campo magnético de excitación y un sensor inductivo colocado sobre la muestra o placa de material ferromagnético que se quiere estudiar.

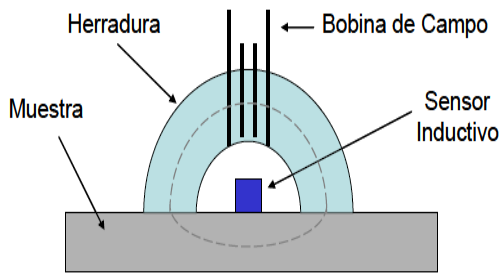


Figura 1.5. Arreglo experimental típico utilizado para realizar mediciones de ruido magnético Barkhausen.

La herradura y la muestra forman un circuito magnético cerrado como se aprecia en la figura 1.5. El flujo magnético producido por la bobina de campo estará contenido en el interior de la herradura y la muestra. Esto se cumple por la alta permeabilidad magnética que tienen la herradura y la muestra de material ferromagnético con respecto al aire.

Esta técnica de medición tiene grandes potencialidades como herramienta para la evaluación no destructiva de materiales ferromagnéticos, principalmente el acero, pero su aplicación práctica está limitada por el acoplamiento magnético entre los polos de la herradura y la superficie del material que se utiliza como muestra. La calidad de este acoplamiento magnético garantiza una buena sensibilidad. Para valores pequeños de separación entre los polos de la herradura y la superficie de la muestra, ocurren grandes cambios o variaciones en la permeabilidad del circuito magnético.

La figura 1.6 muestra en diagrama de bloques un sistema experimental típico para la medición de RMB. La forma de onda del campo magnético de excitación y su intensidad se seleccionan por medio de un generador de funciones. La fuente bipolar permite suministrar la corriente necesaria para producir el campo magnético deseado. El sensor inductivo se conecta a un pre-amplificador y posteriormente a un filtro pasa-bandas.

Se conoce que el espectro de la señal de RMB va desde la frecuencia del campo magnético de excitación hasta aproximadamente 1 MHz (Cardon, 2007). Por lo general la frecuencia de corte del filtro pasa altas se selecciona por encima de los

500 Hz para garantizar la eliminación de posibles componentes de ruido eléctrico asociado a la señal de excitación y la red de alimentación de AC. Por otro lado, la frecuencia de corte del filtro pasa-bajas se selecciona dependiendo de las características del sistema de medición utilizado.

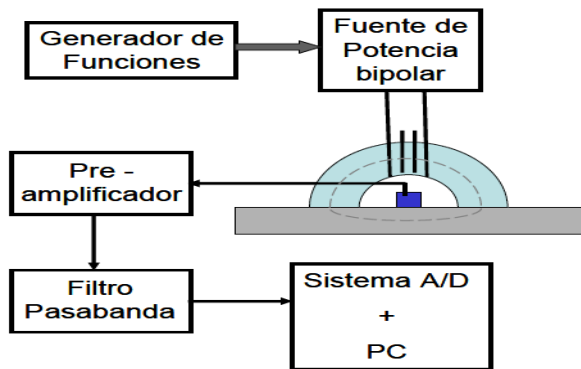


Figura 1.6. Diagrama de bloques de un sistema experimental típico para la medición de la señal de RMB.

La señal de RMB obtenida de un material ferromagnético por el sistema experimental comúnmente se procesa para obtener algunos parámetros cuantitativos y cualitativos que son empleados para relacionar sus valores con las propiedades del material. Los parámetros más comunes son el valor RMS, el valor de la energía y la envolvente de la señal de RMB (Pérez-Benitez, 2008).

El RMB se ha utilizado para estudiar el origen del eje de fácil magnetización en tuberías de acero que se utilizan para el transporte de hidrocarburos. Clapham *et al.* (1999) estudiaron la influencia de la textura cristalográfica, la microestructura, y la deformación plástica en la anisotropía magnética de aceros utilizados en tuberías. El filtro pasa-banda en el sistema de medición utilizado tiene frecuencias de corte de 3 y 200 kHz. El resultado de esta investigación reveló que el eje de fácil magnetización, que está a lo largo de la dirección longitudinal del tubo, se origina debido a los esfuerzos y las deformaciones a la que es sometido el material durante las etapas de procesamiento en frío en la producción de las tuberías.

Una de las aplicaciones más importantes de las mediciones de ruido magnético Barkhausen es que permite caracterizar el estado de deformación de un material.



Alberteris-Campos *et al.* (2008) caracterizaron las regiones de deformación plástica y elástica en un acero AISI/SAE 1070 utilizando el RMB. En este caso, el filtro pasa-banda tiene frecuencias de corte de 1 y 100 kHz. El resultado más importante de este trabajo es que a partir del coeficiente de anisotropía  $k$ , definido como la razón entre los valores de energía de la señal de RMB del eje de fácil magnetización (EFM) con respecto al mismo parámetro del eje de difícil magnetización (EDM), se logró definir exactamente cuando el material está deformado plásticamente.

En un trabajo reciente Capó-Sánchez y Padovese (2009) proponen la utilización de la resonancia de la bobina de detección de RMB como una nueva técnica de evaluación no destructiva de materiales ferromagnéticos. En este estudio se utilizó un filtro pasa-bandas con frecuencias de corte de 1 y 150 kHz. Se utilizaron varias bobinas con diferente número de vueltas con el propósito de sintonizar el sistema de detección a un determinado rango de frecuencias dentro del espectro de emisión de la señal de ruido magnético Barkhausen de dos tipos de aceros comerciales, el AISI/SAE 1050 y el 1070, que fueron sometidos a esfuerzos.

Esta nueva técnica se propone como una herramienta para estudiar y caracterizar estructuralmente a los materiales ferromagnéticos tomando en consideración la relación que existe entre la frecuencia y el efecto pelicular. De esta manera se puede lograr hacer una caracterización magnética y estructural del material a diferentes profundidades, teniendo en cuenta la banda de frecuencias que se amplifica por el efecto resonante de la bobina de detección.

### **1.5. Dominios magnéticos**

Weiss postuló, en 1906, que existe un poderoso campo molecular interno que actúa sobre los espines de los electrones individuales de las moléculas. El campo molecular orienta los espines paralelos entre sí en pequeños volúmenes llamados *dominios*. Los dominios tienen dimensiones del orden de  $10^{-3}$  a  $10^{-6}$  m o volúmenes del orden de  $10^{-9}$  a  $10^{-18}$  m<sup>3</sup>. Como resultado del fuerte campo molecular, hay una orientación bien definida de los espines dentro de cada dominio.



La orientación dentro del dominio es espontánea, es decir, no se necesita aplicar campos externos (Martin, 1994).

Todos los materiales ferromagnéticos no son imanes permanentes, aunque los imanes moleculares se orientan espontáneamente dentro de cada dominio. Los dominios están orientados al azar uno respecto al otro, lo que hace que en la muestra aparezcan paredes de dominios, como se muestra en la figura 1.7.

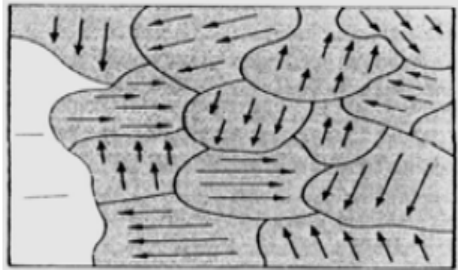


Figura 1.7. Estructura de dominios en un material ferromagnético policristalino. Fuente Martin (1994).

Otra propiedad peculiar pero extremadamente útil de los materiales ferromagnéticos es que la aplicación de un campo magnético  $H$  produce una orientación de los dominios. En un material ferromagnético la intensidad de campo magnético  $H$  aplicada solo orienta los momentos magnéticos de los dominios en el material dando como resultado una gran magnetización, ver figura 1.8.

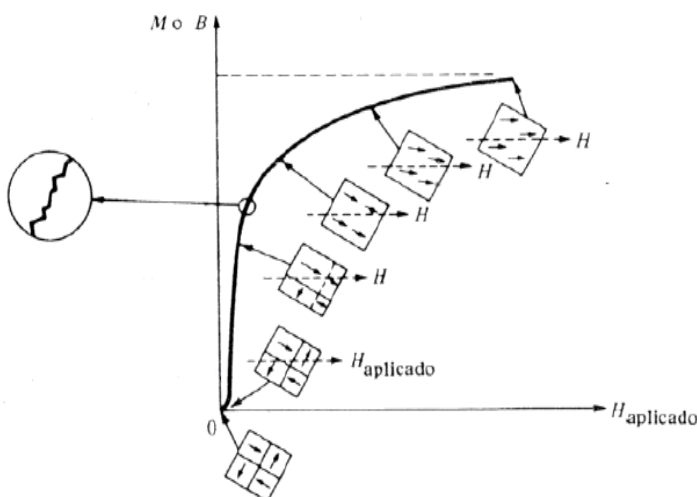


Figura 1.8. Representación esquemática del comportamiento de los dominios en un material ferromagnético durante el proceso de magnetización. La sección ampliada de la línea muestra el efecto Barkhausen. Fuente: Martin (1994).



Cada dipolo magnético básicamente es un átomo que actúa como un imán. En consecuencia del campo magnético aplicado, cada uno de los electrones de los átomos son afectados por momentos magnéticos originados por dos causas principales: la primera está relacionada con su movimiento orbital alrededor del núcleo, generando una carga de movimiento. El otro momento magnético es originado por el giro del electrón o "spin", que está dirigido a lo largo del eje de giro.

### **1.5.1. Rotación de los dominios y movimiento de las paredes de dominios**

Cuando se aplica un campo magnético  $H$  a un material ferromagnético, ocurre un cambio en la magnetización  $M$ . Los cambios en la magnetización son debido a la rotación de los dominios y al movimiento de las paredes de dominio. Para que un dominio rote, los momentos magnéticos tienen que pasar por orientaciones desfavorables que existen a lo largo de la dirección de magnetización. Al aumentar el campo magnético  $H$ , las paredes de dominios empiezan a encontrar varios obstáculos microscópicos tales como: inhomogeneidades, imperfecciones, impurezas y huecos.

Estos obstáculos actúan como sitios de anclaje para las paredes de dominios cuando estas se mueven debido a la influencia del campo magnético aplicado. Tal movimiento de las paredes va acompañado de bruscos cambios discontinuos de la magnetización llamados *saltos* Barkhausen. Estos saltos aparecen en la curva de magnetización como pequeños escalones.

### **1.6. Proceso tecnológico de la soldadura**

En la actualidad, uno de los métodos más importantes para la unión de piezas y conjuntos metálicos en general en las industrias que aportan al producto interno bruto y adelanto en infraestructura de países desarrollados y en vías de desarrollo es la soldadura y sus tecnologías (Camillero *et al.*, 2007; Wang y Liu, 2004; Méndez, 1999);

Es responsabilidad de las empresas fabricantes de productos soldados comprobar que la calidad de sus productos este de conformidad con los requerimientos del cliente y lo establecido en códigos y especificaciones de soldadura y un primer



paso para asegurar la calidad de sus productos y la idoneidad y habilidad de sus soldadores es elaborando procedimientos de soldadura que permitan garantizar la compatibilidad del metal de soldadura depositado con el metal base utilizado y calificando a sus soldadores y punteadores acorde con el procedimiento de soldadura calificado.

La evaluación de los soldadores es muy importante para la empresa, dado que permite garantizar el desarrollo de uniones soldadas de alta calidad y además garantiza, buen nombre y confiabilidad a la empresa como al soldador, responsables de la aplicación de soldadura.

Así mismo es importante que dentro del contexto de investigación, innovación y desarrollo de procesos mixtos e híbridos en soldadura, de nuevos materiales base y de aporte, y caracterización mecánica y microestructural de soldaduras y recubrimientos superficiales llevadas a cabo por instituciones tecnológicas, universidades y centros de investigación; las aplicaciones de soldadura (Bolaños *et al.*, 2006; Dunder, 2006; Baldomir *et al.*, 2005) estén soportadas además de personal capacitado, calificado y entrenado para tal fin debe estar soportado también por procedimientos de fabricación, ensamble y soldadura que garanticen la confiabilidad de los resultados obtenidos y por ende de las uniones soldadas.

Sin embargo, existen antecedentes (Niebles, 2007; SENA, 2006) que demuestran que en las empresas del sector metalmeccánico afines con la soldadura existe desconocimiento y poca evaluación e investigación de las tecnologías de soldadura, ingenieros con poco conocimiento del área de la soldadura que ocupen los cargos de supervisor e inspectores de control de calidad en esta área, y metodologías que faciliten el desarrollo y aseguramiento de calidad de sus productos soldados.

Es por tanto responsabilidad de la instituciones de nivel tecnológico y superior en las áreas de ingeniería afines con la tecnología de soldadura enseñarlas, facilitando la integración de la teoría y la práctica de la soldadura en el contexto integrador Universidad - Empresa que potencialice en el estudiante la autonomía, la creatividad y la construcción de su propio conocimiento en esta área.



## **1.7. Aceros de baja aleación**

Los aceros de baja aleación contienen adiciones menores de otros elementos tales como: níquel, cromo, manganeso, silicio, vanadio, columbio, aluminio, molibdeno y boro. La presencia de estos elementos en pequeñas cantidades da como resultado una marcada diferencia en sus propiedades mecánicas. Estos aceros de baja aleación generalmente son clasificados como aceros estructurales de alta resistencia y baja aleación, aceros para maquinaria y partes para automotores, aceros para servicio a baja temperatura, o aceros para servicio a elevada temperatura.

La influencia de los elementos aleantes se puede analizar desde el punto de vista del comportamiento de los aceros durante el revenido. Los elementos aleantes bien por su presencia en la ferrita o su influencia en la formación de carburos deben propiciar propiedades mecánicas más elevadas con la temperatura de revenido (Guliaev, 1983).

Según Tempering of Steel (2005) las propiedades mecánicas en función de la temperatura de revenido, para un tiempo constante, dependen de la concentración de los elementos de aleación. El efecto general de estos en el revenido es el retardo de la velocidad de ablandamiento, específicamente a temperaturas de revenido más altas. Siendo así, en los aceros aleados, alcanzar la dureza dada en un periodo de tiempo dado requiere temperaturas de revenido más altas que los aceros al carbono.

Plantea Porter (1981) que los elementos formadores de carburo (cromo, molibdeno, tungsteno, vanadio, tantalio, niobio y titanio) retardan los procesos de ablandamiento por la formación de carburos aleados. El efecto de los elementos formadores de carburo es mínimo a bajas temperaturas; sin embargo, a temperaturas más altas de revenido donde se forman  $Fe_3C$  y los carburos aleados, decrece la dureza suavemente.

### **1.7.1. Generalidades de las aleaciones de cromo**

El cromo es uno de los elementos especiales más empleados para la fabricación de aceros aleados. Se suele emplear en cantidades diversas, desde 0,3 a 30 %,



según los casos, aumenta la dureza y la resistencia de los aceros, mejora la templabilidad, disminuye las deformaciones en el temple, aumenta la resistencia al desgaste y la inoxidableidad (Smith, 1998).

En presencia de una cantidad suficiente de carbono, el cromo tiende a formar carburos y en cambio, cuando el acero es de muy bajo contenido en carbono, es soluble en la ferrita. Los carburos formados por este elemento no son siempre carburos simples; con bastante frecuencia se presentan asociados con el carburo de hierro y a veces, forman carburos complejos de dos o más elementos.

La naturaleza de estos compuestos depende del porcentaje de carbono y del contenido en elementos de aleación, los carburos que forman los diferentes elementos de aleación son duros y frágiles, y en especial los de cromo y vanadio son más duros y resistentes al desgaste que los demás (Apraiz, 1975).

El cromo, desde un 5 % en peso, aumenta la resistencia a la oxidación del hierro en atmósfera seca, por eso para un satisfactorio comportamiento en atmósferas oxidantes, a temperaturas de hasta 750 °C, los aceros utilizados suelen ser de alto contenido en cromo. Simultáneamente, contenidos crecientes de cromo en solución sólida en el hierro, disminuyen la conductividad térmica de él y por tanto le confieren refractariedad (Belzunce, 2001; Bedolla-Jacuinde *et al.*, 2003)

Callister (1999); Dogan *et al.*, (1997) plantean que la presencia del cromo en el acero, además al formar un film superficial de su óxido, modifica la posición del hierro en la serie electroquímica, así el hierro, que sin cromo es anódico, pasa a comportarse catódicamente en medios acuosos cuando el porcentaje de cromo es superior al 12 % en peso. Los aceros con más de 12 % de cromo reciben el nombre de aceros inoxidable, la resistencia a la corrosión resultará tanto peor cuando mayor sea el contenido de carbono debido a la presencia de carburos de cromo. En las zonas contiguas a estos carburos, disminuye el contenido de cromo (porcentajes inferiores al 12 %) formándose aureolas descromadas que pasan a ser anódica y son atacadas.

Otra cualidad interesante del cromo es su efecto sobre las temperaturas críticas de transformación del hierro, amplía la estabilidad del hierro delta y también



incrementa la temperatura de transformación del hierro  $\gamma$  en hierro  $\alpha$ , es decir, tiene un carácter alfégeno (Khanna, 2002).

Según Pero-Sanz (1994), el cromo tiene cierta incidencia en la templabilidad de la austenita, la hace más estable a las transformaciones durante el enfriamiento continuo, disminuyendo su temperatura de inicio de formación en martensita Ms.

Los aceros con altas proporciones de cromo, a pesar de ser enfriados lentamente, puede no tener lugar la transformación perlítica de la austenita, que requeriría descensos de temperatura aún más lentos y aquella austenita se transformará parcialmente en martensita y quedará, a temperatura ambiente, una cierta proporción de austenita residual sin transformar. El contenido en cromo, de las fundiciones ejerce una marcada influencia en su microestructura.

Según Tabrett (2000), son los carburos eutécticos presentes en su microestructura los responsables de esta buena resistencia que además mejora al aumentar su porcentaje, sin embargo, estos carburos influyen críticamente en el comportamiento a fractura y la tenacidad del material disminuye a medida que la fracción de carburos aumenta. La matriz austenítica, martensítica o mezcla de las dos actúa de soporte de los carburos, previniendo la fractura y el desconche de los mismos.

Tanto en aleaciones con matriz austenítica como martensítica, la fractura progresa también alrededor de los carburos secundarios presentes en la estructura de ambas matrices por lo que estos carburos secundarios son perjudiciales para la tenacidad de los materiales (Biner, 1985).

La dureza y microdureza tras los tratamientos de temple se ven modificadas en el curso de los dos tratamientos posteriores de revenido. En general, después del primer revenido tras un temple corto (5h), se produce un aumento de la dureza y microdureza en todo el rango de temperaturas de revenido con respecto a las obtenidas tras el temple en las dos calidades ensayadas. Esto es debido a la precipitación que tiene lugar durante el mantenimiento a la temperatura de revenido de un número considerable de carburos de pequeñas dimensiones en la



zona central de los granos y a la transformación de la austenita retenida en martensita que tiene lugar en el enfriamiento subsiguiente.

Verdeja (1994); Pero-Sanz (2000); Dogan y Hauk (1997), consideran que el cromo aumenta además la templabilidad, la resistencia a elevadas temperaturas, así como las temperaturas de temple, recocido y normalizado, disminuye ligeramente la tendencia al sobrecalentamiento y la ductilidad no siendo así para contenidos superiores al 1,5 %. En los aceros de baja aleación, en presencia de Ni y Mo, aumenta la templabilidad. Este elemento forma un óxido de alta temperatura de fusión y de difícil eliminación, reduce la velocidad de temple, disminuye el crecimiento del grano y retarda la descarburación periférica, dando mayor profundidad de temple.

Los componentes estructurales en general y los fabricados por soldadura en particular pueden experimentar fallas en servicio de distintos tipos. A veces estas fallas en servicio adquieren características catastróficas. La presencia de defectos en las uniones soldadas son muchas veces la razón de que se produzca una falla en servicio.

La naturaleza de la discontinuidad que corresponde al defecto, determina en general para condiciones de servicio dadas, el tipo de falla que puede favorecer, a veces, estas en servicio no obedecen a falencias de diseño sino a factores extrínsecos introducidos durante la fabricación del componente, particularmente a través de las operaciones de soldadura.

### **1.7.2. Influencia de los elementos de aleación en el proceso de soldadura**

Según Rodríguez (1983) y García (1983); plantean que la soldabilidad de un material está dada por tres factores, de ellos el factor material es el que se refiere a la influencia de la composición química, método de fusión, existencia de impurezas, grado de desoxidación y las operaciones precedentes (laminado, forja y tratamiento térmico), también depende de la relación de las impurezas, elementos de aleación y el carbono.

El grado de soldabilidad representa una característica cualitativa o cuantitativa, la cual muestra cuánto varían las propiedades del metal al soldar bajo determinadas



condiciones. Por ejemplo es posible establecer cuánto varían la resistencia, plasticidad, resiliencia y otras debido a la soldadura. Una de las características más sustanciales de la soldabilidad en aceros es la ausencia de grietas.

Los elementos de aleación tales como: el carbono, silicio, manganeso, cromo, molibdeno, níquel, entre otros, ejercen influencia en las propiedades mecánicas del material.

### **1.7.3. Influencia de los elementos de aleación en la templabilidad del acero**

La templabilidad, o capacidad para el temple, de un acero, se refiere a la facilidad con que se forma la martensita. Los aceros de bajo carbono tienen baja templabilidad, sólo muy altas velocidades de enfriamiento permiten, que toda la austenita se transforme en martensita. Los aceros aleados tienen una alta templabilidad - aún el enfriamiento al aire produce martensita. La templabilidad no se refiere a la dureza del acero. Un acero de bajo carbono y alta aleación puede formar martensita fácilmente, pero debido al bajo contenido de carbono, la martensita no es dura.

Con respecto a la valoración del grado relativo de influencia de los diversos elementos en la templabilidad, existen datos que divergen en su expresión cuantitativa. Los que más intensamente aumentan la templabilidad son: el cromo, el níquel, el molibdeno y el manganeso, razón por la cual figuran en la composición de la mayoría de los aceros aleados para construcción.

La templabilidad del acero puede aumentarse especialmente aleándolo con varios elementos a la vez. Esto ocurre, por ejemplo, cuando actúan conjuntamente el níquel y el cromo. El molibdeno actúa con mucha eficacia cuando se introduce en el acero al cromo- níquel.

Influyen de una forma especial en la cinética de la descomposición elementos formadores de carburos tan enérgicos como: el vanadio, el titanio, el niobio y parcialmente el wolframio. Como estos elementos forman carburos difíciles de disolver, a las temperaturas de temple ordinarias (800 - 900°C) permanecen enlazados en los carburos y no pasan a la austenita. Como resultado de esto la templabilidad del acero disminuye, ya que los carburos actúan como centros





preparados de cristalización de la perlita. Cuando es alta la temperatura de calentamiento para el temple, estos carburos se disuelven ya; la austenita contiene entonces estos elementos en disolución, lo que aumenta la templabilidad.

### **1.8. Agrietamiento en uniones soldadas**

La tendencia al agrietamiento es un factor que determina grandemente la soldabilidad de los aceros al carbono y de baja aleación. Durante la soldadura se producen fundamentalmente dos tipos de agrietamiento: agrietamiento en frío y agrietamiento en caliente. Las grietas constituyen los defectos más peligrosos en las uniones soldadas y se pueden presentar tanto como defectos externos o internos.

Algunos autores (EL - Hebeary *et al.*, 2004; Satoh *et al.*, 1975), plantean que el fenómeno del agrietamiento en frío se conoce como agrietamiento retardado o agrietamiento por hidrógeno.

Constituye un agrietamiento que se produce generalmente a temperaturas inferiores a los 930 °C inmediatamente después de culminada la soldadura, o luego de varias horas. Constituyen por su morfología roturas frágiles de poca abertura y poco ramificadas que se producen en la Zona Afectada por el Calor o en el metal de la costura y se orientan transversal o paralelamente al eje de la misma. En general las grietas en frío pueden ser externas o internas por su ubicación. La grieta en frío más frecuente se produce en la Zona Afectada por el Calor (ZAC) en la zona de sobrecalentamiento o de grano grueso.

Este tipo de agrietamiento en general es característico de la soldadura de los aceros de medio y alto carbono y algunos aceros de baja aleación.

La fractura inducida por hidrógeno (FIH) es atribuible a tres factores principales: microestructura, hidrógeno y esfuerzo (Lancaster, 1999). Los factores causales que gobiernan la ocurrencia de la FIH, en las juntas de soldadura de aceros ferríticos son:

- Microestructura endurecida sensible a la fisuración, conteniendo productos de transformación martensíticos y bainíticos.



- concentración localizada suficientemente alta de hidrógeno en términos del contenido de hidrógeno difusible de la soldadura (Maroef *et al.*, 2002).
- Esfuerzo elevado causado por la alta restricción estructural que es determinado por la rigidez del ensamble, es decir, espesores y altura del refuerzo del cordón de la soldadura.

La sensibilidad o susceptibilidad a la fractura inducida por hidrógeno de soldaduras se da por una combinación de estos tres factores primarios, (Pekka, 2003; Gangloff, 2003; Pitrun, 2004). El mecanismo de nucleación y crecimiento de este tipo de grietas se explica por el efecto fragilizante que tiene el hidrógeno en el acero, por su alta tasa de difusión y por la existencia de zonas con esfuerzos triaxiales máximos en el frente de una entalla concentrador de esfuerzos.

La ubicación de estas grietas, es decir si se presentan en el metal de soldadura o en la zona afectada por el calor (ZAC), se explica a través de las diferencias que presenta el acero en estado austenítico (estructura cúbica cara centrada) y en estado ferrítico (cúbico de cuerpo centrado) en cuanto a la solubilidad y difusividad de hidrógeno atómico, para lo cual la templabilidad relativa entre el metal base y el metal fundido se convierten en los factores fundamentales para poder predecir su localización en uniones soldadas (Giraldo y Chaves, 2004).

El hidrógeno se disuelve fácilmente en forma atómica hacia el baño de soldadura en estado líquido y a muy alta temperatura, y de aquí puede permanecer en la costura, pasar a la zona afectada por el calor (ZAC) o difundirse hacia la superficie y finalmente salir al medio.

Se pueden usar procedimientos de soldadura apropiados para reducir las fisuras y el agrietamiento. Por ejemplo, un bajo amperaje resulta benéfico, también lo puede ser un ligero movimiento zigzagueante al soldar, con el fin de promover el crecimiento celular del grano. Se recomienda seguir los procedimientos adecuados al apagar el arco, a fin de evitar las grietas de cráter (Wilson, 1974).

Los elementos que solo se disuelven en la ferrita o en la cementita sin formar carburos especiales sólo ejercen una influencia cuantitativa en los procesos de



transformación. Acelera la transformación (a este tipo de elementos sólo pertenece al cobalto) o la retardan (la mayoría de los elementos, entre ellos: el manganeso, el níquel, el cobre y otros).

Los elementos que forman carburos introducen variaciones no sólo cuantitativas, sino también cualitativas en la cinética de la transformación isotérmica. Así, los elementos de aleación que forman carburos solubles en la austenita, a diferentes temperaturas influyen de distinto modo en la velocidad de descomposición de la austenita: a 700 – 500 °C (formación de la perlita) retardan la transformación; a 500 – 400 °C la retardan mucho, y a 400 – 300 °C (formación de la bainita) la acelera.

Así, pues, en los aceros aleados con elementos formadores de carburos (cromo, molibdeno, wolframio) se observan dos máximos de la velocidad de descomposición isotérmica de la austenita, separados por una región de gran estabilidad de la austenita subenfriada. La descomposición isotérmica de la austenita tiene dos intervalos de transformación claramente definidos: la transformación en estructuras laminares (perlítica) y la transformación en estructuras aciculares (bainítica).

La propiedad más importante prácticamente de los elementos de aleación es la de ser capaces de retardar la velocidad de descomposición de la austenita en la región de la transformación perlítica, lo que se expresa por el desplazamiento de la línea hacia la derecha en el diagrama de la descomposición isotérmica de la austenita.

Esto contribuye a que la templabilidad sea mayor y el subenfriamiento de la austenita hasta el intervalo de la transformación martensítica siendo más lento el enfriamiento, por ejemplo, cuando se enfría en aceite o al aire, lo que , naturalmente va ligado a la disminución de la velocidad crítica de temple.

### **1.8.1. Control de calidad de la soldadura**

Un cordón de soldadura debe ser capaz de soportar los esfuerzos para los que ha sido diseñado. Obviamente es necesario realizar pruebas de esfuerzo para verificar si realmente la soldadura satisface los requerimientos deseados. Para



controlar la calidad durante el proceso y no alterar significativamente la integridad de la pieza se usan pruebas no destructivas, como son: inspección visual, uso de líquidos penetrantes, radiografías, ultrasonido (Welding Handbook, 1991).

Sin embargo, estos procedimientos no siempre son aplicables directamente en el área de trabajo, por lo que suelen realizarse pruebas con muestras pequeñas del metal soldado, o con pequeñas porciones de estas muestras, conocidas como probetas, a las que se les realizan los ensayos destructivos, como el de tracción. Las probetas son una muestra representativa del proceso, y reproducen las condiciones a las que fue sometida la pieza principal.

Los principales ensayos mecánicos miden las propiedades de las piezas soldadas. El comportamiento mecánico de un material es el reflejo de la relación entre su respuesta o deformación ante una fuerza o carga aplicada.



### **1.9. Conclusiones del capítulo 1**

- ✓ Las literaturas consultadas afirman que el Ruido Magnético Barkhausen es una técnica de medición que tiene grandes potencialidades como herramienta para la evaluación no destructiva de materiales ferromagnéticos, principalmente en el acero.
- ✓ Se pudo constatar que la emisión Magnético Barkhausen se ha empleado como técnica de ensayo no destructivo para evaluar el efecto del tratamiento térmico después de la soldadura.
- ✓ Las aleaciones de cromo pueden ser sometidas a ensayos no destructivos de emisión Magnético Barkhausen ya que son materiales ferromagnéticos porque en su naturaleza química presentan compuestos como el carbono.

# Capítulo 2

## Materiales y métodos

## CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Introducción

Al magnetizar un material ferromagnético, se logra una determinada dirección de magnetización privilegiada, haciendo que el dominio magnético apropiado sea cada vez más grande, moviéndose sus paredes. Las paredes de dominio se comportan como membranas elásticas cuando son sometidas a campos magnéticos, de tal manera que bajo la acción de campos pequeños, sufren una deformación reversible. Cuando el valor del campo magnético se aumenta, la fuerza sobre la pared de dominio excederá la fuerza restrictiva debido a los puntos de anclaje, estos provocan que el movimiento de la pared se torne rápido e irreversible, produciendo una discontinuidad en el cambio de la magnetización con el tiempo.

El objetivo del capítulo es establecer el procedimiento metodológico para determinar las tensiones del acero AISI 4340 con el empleo del ruido magnético Barkhausen, luego del proceso de soldadura manual por arco eléctrico y el empleo de diferentes electrodos revestidos.

### 2.2. Composición química del acero AISI 4340

La composición química estándar de esta aleación según Key to steel 2002, la American Society for testing Materials - ASTM y la SAE, se refleja en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Composición química del acero AISI 4340

C	Mn	Ni	Cr	Mo	Si
0,38 - 0,43	0,6 - 0,8	1,65 - 2	0,7 - 0,9	0,2 - 0,3	0,15 - 0,40

Por la composición química de este acero, se considera un acero grado maquinaria al Cromo-Níquel-Molibdeno de la más alta tenacidad por su alto contenido de níquel, tratado (bonificado), empleado para piezas y partes de maquinaria de las más severas exigencias para uso general. Se surte en estado recocido y tratado.

Por presentar un contenido de carbono desde 0,38 hasta 0,43 %, lo hace un material ferromagnético, por lo que el mismo puede ser sometido a ensayo no destructivo como el ruido magnético Barkhausen.

### 2.3. Preparación de la junta

Para determinar el comportamiento microestructural del material objeto de estudio se prepararon muestras de la ballesta, se cortaron 9 probetas las cuales fueron soldadas con diferentes tipos de electrodos del tipo E - 7018, UTP 65 y E - 312 – 16. Las muestras se prepararon según la figura 2.1, se emplearon los siguientes procedimientos:

1. Preparación del biselado en X previo a la soldadura.
2. Pre calentamiento del material.
3. Soldadura.

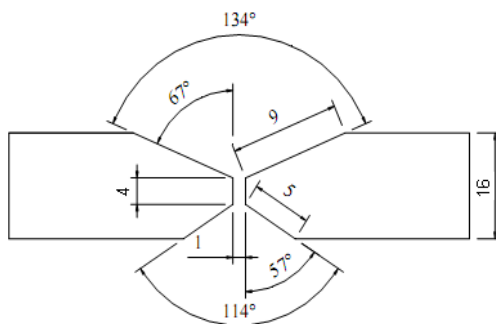


Figura 2.1. Preparación de la junta en las muestras para la soldadura

Para realizar el proceso de soldadura a ninguna de las muestras se le aplicó pre calentamiento. Los parámetros de soldadura empleados aparecen en la tabla 2.2, los mismos se seleccionaron a partir del tipo y del diámetro del electrodo.

Tabla 2.2. Parámetros para la soldadura de las probetas

No	Electrodo	Amp	Veloc (kg/h)	Tensión, U	Diámetro
1	E – 316 – 12	150	1,12	26	3,2
2	E – 316 – 12	150	1,12	26	3,2
3	E – 316 – 12	150	1,12	26	3,2
4	UTP 65	120	1,12	25	3,2
5	UTP 65	120	1,12	25	3,2
6	UTP 65	120	1,12	25	3,2
7	E – 7018	160	1,12	28	4,0
8	E – 7018	160	1,12	28	4,0
9	E – 7018	160	1,12	28	4,0

Las diferentes probetas se prepararon con longitud de 100 mm y un ancho de 50 mm, se cortaron longitudinalmente de la sección de la ballesta, después de cortada y antes de soldarla se procedió a puntearla en ambos extremos para de





esta forma evitar alabeo y distorsiones, fueron sometida a proceso de soldeo en diferentes condiciones, la selección de los diferentes electrodos se basa en buscar un material de aporte que en dependencia de la deposición, también pueda emplearse para atenuar los problemas que ocurren en el cordón de soldadura.

### **2.3.1. Características de los materiales de aporte**

El electrodo consta de un revestimiento a base de sustancias químicas que cumplen varias funciones y posee además un extremo no revestido que permite fijarlo en el portaelectrodo. La elección de los electrodos se realizó según recomendaciones (AWS-A5-28-79, ASME SFA 5.28, 2006)

#### **Electrodo UTP 65**

Electrodo especial austenítico ferrítico de excelentes características de soldabilidad y alta resistencia mecánica.

#### **DIN 8556 E 18 – 8 Mn R 26**

Electrodo especial austenítico ferrítico para trabajos críticos, con características mecánicas sobresalientes. Posee alta resistencia a la fisuración al soldar metales bases difíciles de soldar, como por ejemplo aceros austenítico y ferríticos, aceros al manganeso (Haffield) con aceros aleados y no aleados, aceros de alta resistencia, aceros aleados, aceros susceptibles de tratamiento térmico y acero de herramientas, ideal para soldar cordones de colchón en los materiales base mencionados anteriormente.

El UTP 65 tiene una gran variedad de aplicaciones en el mantenimiento y reparación, como por ejemplo en máquinas y partes retransmisión (ejes engranajes, cajas); sobre todo en el campo de maquinaria para construcción (obras públicas) donde se le prefiere debido a su aplicación segura y sin problemas. La composición del depósito es de: C, Cr, Mn, Ni, Fe, Mo y Si.

#### **Electrodo E – 7018**

Según la AWS se clasifica en:

INFRA 718, Básico de bajo hidrógeno.

Otras denominaciones

ASME SFA 5,1 E – 7018; AWS A 5,1 E – 7018

Es un nuevo electrodo con bajo nivel de hidrógeno y polvo de hierro en su revestimiento, sirve para soldar en todas posiciones, tiene excelentes propiedades mecánicas a temperaturas bajo cero, es recomendable para fabricación de tanques, tuberías, al no producir chisporroteo ni salpicaduras, su arco es sereno, por lo que es fácil su manipulación; también es muy utilizado para relleno rápido en obras de gran magnitud.

Se emplea para propósitos generales en la fabricación de tuberías y líneas de tuberías de alta presión, calderas, recipientes a presión, fundiciones de aceros, aceros templados y revenidos, construcción de embarcaciones. La composición del depósito es de C, Mn, Si, S y P. La penetración es escasa y hay poca pérdida.

### **Electrodo E – 312 - 16**

Se clasifica así según la AWS /ASME: SFA- 5.4, suelda en todas posiciones, excepto vertical descendente.

Electrodo que genera un arco suave de fácil encendido y reencendido con escasas salpicaduras, que deposita un cordón de soldadura con contornos suaves de superficie lisa, excelente acabado y fácil remoción de escoria. Las características notables de sus depósitos de soldadura son: alta resistencia a la corrosión, a la escamación hasta temperaturas de 1 100 °C, al agrietamiento y a la fluencia térmica (creep) hasta 850 °C.

Se utiliza en soldadura de aceros al carbono, de baja, media y alta aleación con o sin tratamiento térmico, aceros de composición desconocida, aceros para herramientas de alta sensibilidad al agrietamiento. Recomendable como recargue y unión de materiales sujetos a impacto, fricción, corrosión. Uniones disímiles entre aceros al carbono e inoxidable, puede usarse como capa de transición para depósito de aleaciones contra abrasión. Las aplicaciones más frecuentes están en la reparación de dientes de engranajes, tornillos sinfín, impelentes de bombas, asientos de válvulas, ballestas, herramientas como mandriles para trabajo en caliente, estampas, troqueles.

### **2.3.2. Cálculo del calor aportado**

Debido a las actuales exigencias de mejorar la productividad en la deposición

de recargues fue necesario estudiar el efecto de parámetros de soldadura y su resistencia al desgaste. El calor aportado se calculó mediante la ecuación 2.1.

$$Q = \frac{U_a \cdot I_s}{V_s} \quad (2.1)$$

Donde:

- $Q$  - calor aportado; kJ/mm
- $U_a$  - tensión del arco; V
- $I_s$  - corriente de soldadura; A
- $V_s$  - velocidad de soldadura; mm/s

### 2.3.3. Diagrama de Schaeffler

Cuando el acero contiene muchos elementos, el efecto global es una suma de los diferentes efectos individuales. Ahora bien, sabemos que los elementos más característicos de los aceros inoxidable son: el cromo, el molibdeno, el nitrógeno y el níquel, elementos alfégenos y gammágenos. Estos últimos elementos permiten por eso la coexistencia de ferrita y austenita en el seno del acero. La figura 2.2 resume el efecto de los dos elementos mayores (Cr y Ni) sobre las familias de los aceros (Kotecki y Siewert, 1992)

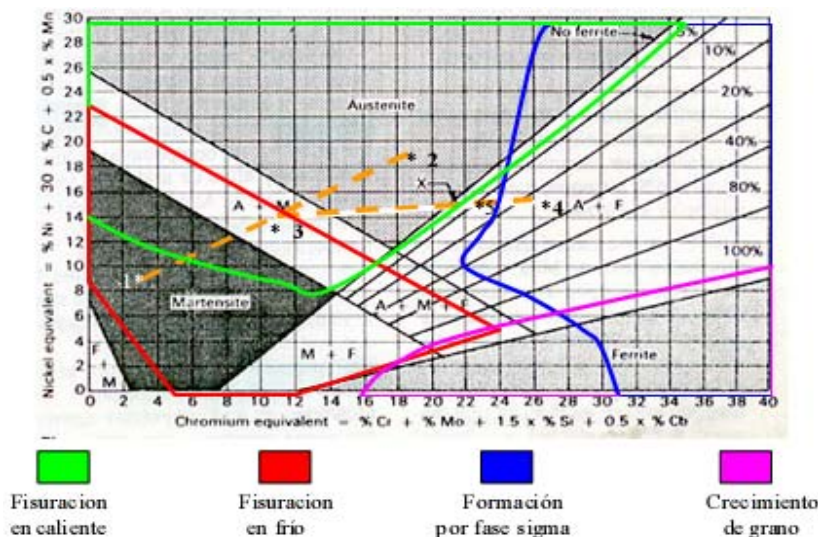


Figura 2.2. Diagrama de Schaeffler.

$$[Cr] = Cr\% + Mo\% + 1,5Si\% + 0,5Nb\% \quad (2.2)$$

$$[Ni] = Ni\% + Mo\% + 0,5.Mn\% \quad (2.3)$$

#### 2.4. Análisis microestructural

En la figura 2.3 se puede observar la microestructura de la muestra patrón del acero AISI 4340.

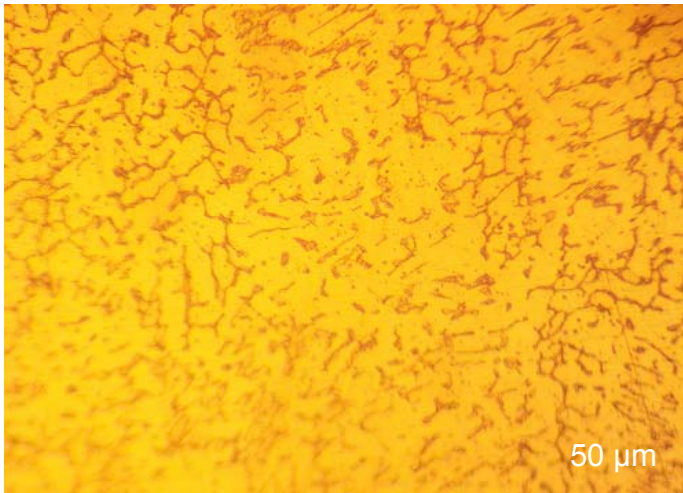


Figura 2.3. Estructura metalográfica del acero 4340.

La estructura que se observa es de cementita dispersa en ferrita, las etapas de transformación de la martensita durante el calentamiento conducen finalmente a una estructura de cementita y ferrita. Sin embargo, la diferencia está en el tamaño de los glóbulos de cementita.

#### 2.5. Caracterización de los equipos empleados en la experimentación

Dentro de los procesos de diseños, el corte de las muestras debe realizarse meticulosamente, tratando en lo posible de la selección adecuada de cada maquina, para ensayos microestructurales la no alteración de las propiedades de los materiales es de vital importancia ya que la alteración de la misma refleja una imagen distorsionada de lo que queremos obtener.

##### 2.5.1. Ensayos de dureza

Una manera de cuantificar la dureza de un material es medir la resistencia que opone la superficie de un material a ser penetrada por un objeto duro. Puede definirse como una medida de la resistencia de un material a la deformación plástica localizada. Existen distintos métodos para medir la dureza de los materiales, pero de acuerdo con la norma UNE 7 – 423 y ASTM E92, en este



Para eliminar los residuos de partículas, grasas y suciedades se limpió la superficie con agua.

#### **2.5.4. Máquina para soldar**

La máquina soldadora tipo transformador produce corriente alterna. La potencia es tomada directamente de una línea de fuerza eléctrica y transformada en un voltaje requerido para soldar. La figura 2.5 muestra la máquina empleada.



Figura 2.5. Máquina soldadora empleada.

El tamaño de la máquina soldadora por utilizar depende de la clase y cantidad de soldadura por hacer. La regulación de los parámetros se realizó modificando la velocidad de soldadura, actuando para ello sobre la corriente y la tensión de arco. Se soldó con corriente directa electrodo positivo.

#### **2.5.5. Adquisición de la señal de ruido magnético Barkhausen**

Para la medición de la señal de Barkhausen se utilizó la instalación experimental mostrada en la figura 2.6. Se muestra el panel frontal de la última aplicación del software del sistema de medición de RMB.

Esta aplicación cuenta con una opción empleada para fijar un nivel mínimo de amplitud de la señal de RMB para discriminar el ruido de fondo de las señales de RMB y poder analizar solo la señal de interés. Por medio de esta aplicación se da



la señal y se obtienen los parámetros de RMB como son el valor RMS y el de la energía.

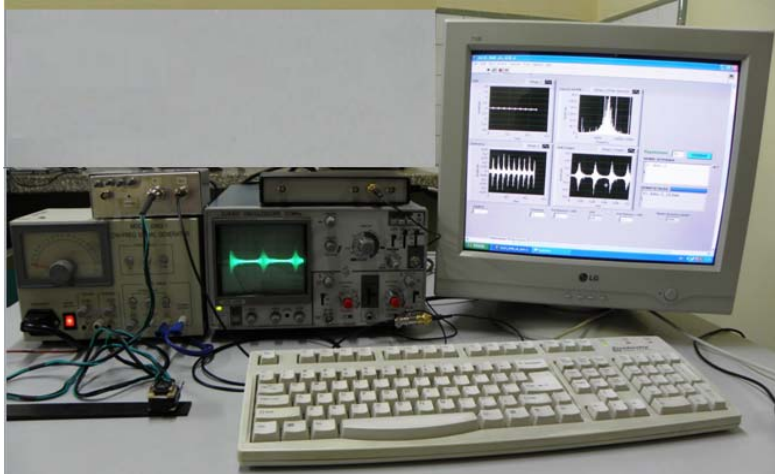


Figura 2.6 Instalación experimental usada para la medición del RMB.

La instalación está básicamente constituida por un circuito magnetizador capaz de suministrar una onda sinusoidal de 10 Hz a un amplificador de potencia que alimenta la sonda magnetizadora con un campo magnético de  $1,4 \times 10^4$  A/m, suficiente para alcanzar la saturación del material.

La señal del sensor de RMB es amplificada y filtrada por un filtro pasabanda de 1 kHz hasta 200 kHz. Las señales son visualizadas en un osciloscopio digital Tektronix TDS210 y una tarjeta National Instrument NI USB-6212xO adquiere los datos a una frecuencia de muestreo de 400 kHz. A través de un software de medición desarrollado por los usuarios en LabView se controla y almacenan los datos en una PC.

## **2.6. Preparación de las muestras para el análisis metalográfico**

Una superficie metálica en la que se van a observar unas fases microscópicas ha de ser plana y estar pulida, plana porque la pequeña profundidad de foco de los sistemas ópticos de observación a grandes aumentos no permitiría enfocar la imagen simultáneamente en planos situados a distintos niveles y estar debidamente pulida para que solo puedan aparecer en ella detalles propios de su estructura y no de circunstancias ajenas a ella que pudieran enmascararla.

Para conseguir ambas cosas, se realizan una serie de pasos consecutivos: corte, desbaste, pulido y ataque, que se describen a continuación:

### 2.6.1. Corte

Las muestras utilizadas presentan un tamaño de 100 x 50 (figura 2.7a y 2.7b), para ello se utilizó una fresadora vertical, en la que tras sujetar la muestra con las mordazas, se procedió a realizar el corte de la pieza, al mismo tiempo que se vierte un líquido refrigerante sobre la herramienta y la muestra, evitando el calentamiento excesivo de la probeta.

Los regímenes de corte seleccionados fueron  $n = 150 \text{ rev/min}$  y  $S = 25 \text{ mm/rev}$ .

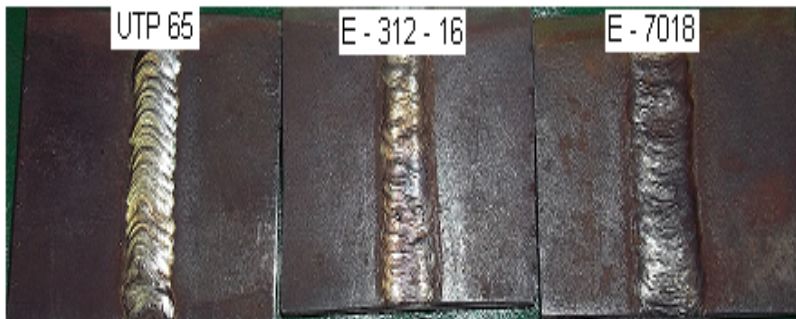


Figura 2.7a. Electrodo empleados en la soldadura.

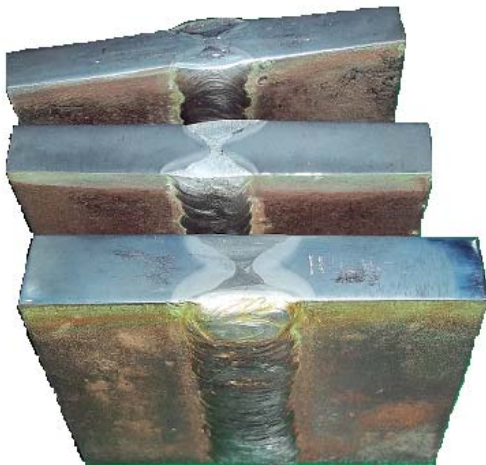


Figura 2.7b. Muestras seccionadas de la ballesta.

En la figura 2.5a se puede apreciar las características del depósito del cordón en correspondencia con electrodo empleado, en la figura 2.5b que se corresponde con la vista superior se observa la preparación del bisel en doble "V" empleado en la preparación de las probetas.



### **2.6.2. Desbaste**

La superficie a pulir, primero ha de ser desbasta pasándola sucesivamente por papeles con abrasivos de grano cada vez más fino. En el trabajo se empezó con lijas de grano 60, pasando sucesivamente por las de 120, 180, 240, 320, 400 y 600. Los papeles de lija se apoyan sobre una superficie plana (en este caso se ha utilizado una desbastadora de bandas) y la probeta se apoya sobre ellos por la cara a desbastar, frotándola en una dirección hasta que se observa en su superficie sólo marcas de desbaste correspondientes al papel que se está utilizando.

La dirección de desbaste se gira 90° al pasar de un papel al siguiente, habiendo previamente aclarado la probeta con un chorro de agua con el fin de eliminar las posibles virutas y restos de granos de la última lija utilizada.

La superficie de la probeta, desbastada hasta el grano más fino y limpia, se pasa por unos paños impregnados en algún abrasivo. El tipo de abrasivo y de paño dependen del material de la probeta. El utilizado en este caso fue pasta GOI en el pulido grueso y de 1 µm en el caso del segundo pulido y como paños se utilizó fieltro.

Los paños, siempre húmedos y con suficiente abrasivo, van sujetos a unos discos giratorios, aunque también pueden ir apoyados sobre una superficie plana y limpia. En nuestro caso para realizar el pulido nos hemos ayudado de una pulidora manual, marca MONTASUPAL. El disco gira, y la probeta, apoyada suavemente sobre él, se giró describiendo círculos en sentido contrario al del disco.

### **2.6.3. Ataque**

Una superficie pulida revela ya una serie de hechos interesantes, como pueden ser: grietas, inclusiones, fases (si su forma y color las hacen diferenciables), poro; pero normalmente la probeta hay que atacarla con un reactivo químico que actúa de forma selectiva sobre los diversos constituyentes estructurales (fases, límites de grano, impurezas, zonas deformadas).

Antes de atacar, la probeta ha de estar desengrasada y limpia, luego, es importante elegir un buen reactivo que ataque al material en cuestión. En este

caso, para atacar ambos materiales con alto contenido en cromo y níquel se ha elegido el reactivo ácido oxálico y nital al 5 %.

Preparado el reactivo, se vierte un poco en una cápsula en la que se introduce la probeta unos instantes, mojando la superficie pulida. Se detiene el ataque con agua y se observa la superficie. La operación se repite hasta que la superficie a examinar esté bien atacada. El tiempo de ataque es muy variable y solo la práctica o la observación repetida de la probeta al microscopio dirán cuándo debe darse por terminado.

Después del ataque se lavó la probeta de nuevo con abundante agua corriente, y se secó con alcohol (absoluto) y secada al aire.

#### 2.6.4. Preparación de las muestras para la medición del RMB

El RMB fue medido en las superficies de la unión soldada, con un barrido cada 1 mm a partir del metal base en la distancia de 40 mm hasta el centro del cordón, como se muestra en la figura 2.8.

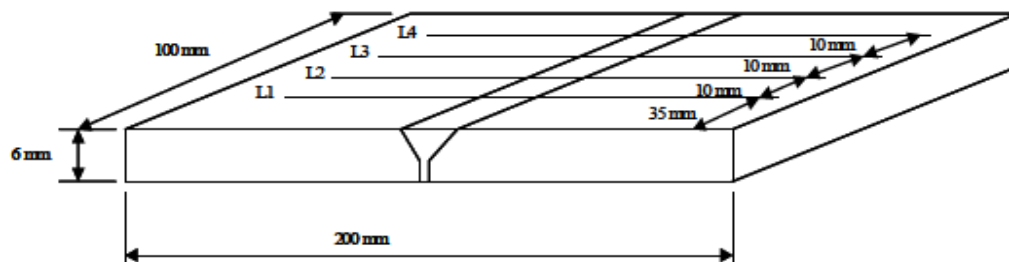


Figura 2.8. Esquema de mediciones de RMB en la superficie de la muestra.

Como se observa en la figura 2.6, fueron realizadas uniones soldadas a tope de uno, dos y tres pases, con preparación de bisel en V, utilizando el proceso SMAW con electrodo E 7018, el electrodo UTP 65 y el electrodo E – 312 – 16. En la tabla 2.2 epígrafe 2.3, se presentan los parámetros de soldadura. El refuerzo del cordón fue retirado mediante rectificado con pasos de 0,01 mm y usando suficiente fluido de refrigeración.

#### 2.6.5. Metodología para la medición del ruido Magnético Barkhausen

La señal de RMB obtenida de un material ferromagnético por el sistema experimental comúnmente se procesa para obtener algunos parámetros

cuantitativos y cualitativos que son empleados para relacionar sus valores con las propiedades del material. Los parámetros más comunes son el valor RMS, el valor de la energía y la envolvente de la señal de RMB. Los parámetros cuantitativos son el valor RMS y de energía y se definen según Pérez-Benitez (2008) como:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_{RMB}^2(t) dt} [V] \quad (2.4)$$

Donde T es el período de la señal de RMB y se denota a la señal de RMB por  $V(t)$  RMB como una función del tiempo.

$$Energía = \sum_i^n \left( \int_0^{T_i} V_i^2(t) dt \right) [V^2 \cdot S] \quad (2.5)$$

Donde  $n$  es el número de saltos Barkhausen que forman la señal de RMB e  $i$  indica el salto Barkhausen según Bruce (2007).

La forma de la envolvente es un parámetro cualitativo que forma una curva y se define como:

$$Env = (j = 1, \dots, N_p) = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_{\Delta T(j-1)}^{\Delta T \cdot j} V_{RMB}^2(t) dt} [V] \quad (2.6)$$

Donde se obtienen  $N_p$  puntos obtenidos cada uno obtenido en  $\Delta T = \frac{T}{N_p}$  segundos sobre el período T de la señal de RMB.

Para explicar estos procesos, partimos del modelo propuesto por Pérez *et al.*, (2005) y teniendo en cuenta que para el caso de los dominios de 90° grados Jiles dedujo otra expresión para el campo coercitivo que actúa sobre las paredes de estos dominios, la cual toma en cuenta la influencia que tienen las tensiones residuales que se generan en los bordes de grano producto de la magnetostricción, la cual esta dada por:

$$h_R = \frac{\pi \bar{T}}{\mu_o I_s d_g} \quad (2.7)$$

Donde  $\bar{T}$  es el valor medio de tensiones residuales presentes en el material,  $d_g$  es el diámetro del grano,  $I_s$  la magnetización de saturación.

Además, Chikazumi (1964) tomando en cuenta la influencia de la magnetostricción dedujo otra expresión para el ancho de los dominios de 90° dada por

$$D = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{\gamma d_g}{\lambda_{100} C_{11}}} \quad (2.8)$$

Donde  $\gamma$  es la energía por unidad de área de la pared,  $C_{11}$  es el módulo de elasticidad y  $\lambda_{100}$  es la magnetostricción en la dirección  $\langle 100 \rangle$ , en la cual se orientan los dominios en los monocristales de hierro; Se obtiene una ecuación que representa el voltaje RMB producido, en función del campo aplicado  $H$ , cuando las paredes de dominio se liberan de los sitios de anclaje debido a los bordes de grano y a las partículas de segunda fase.

Otra magnitud que se usa para estudiar la contribución de las diferentes frecuencias de la señal a la energía de la señal de RMB es la densidad espectral,  $DE$ , la cual se da por la expresión.

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2.9)$$

Donde  $R(\tau)$  es la función de autocorrelación temporal de la señal de RMB.

La raíz cuadrada de la media cuadrática de la señal y la amplitud máxima de la señal, también conocida como el máximo voltaje de pico ( $V_{rms}$  y  $MVP$  respectivamente), se definen de la siguiente manera:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_i V_i^2}{n}} \quad (2.10)$$

$$MVP = \max |V_i| \quad (2.11)$$

Donde  $V_i$  es el máximo de cada salto de la señal y  $n$  es la cantidad de saltos de RMB. El  $V_{rms}$  caracteriza lo que se suele denominar como "actividad de Barkhausen". Si el  $V_{rms}$  es alto, entonces la actividad de Barkhausen es alta.



## 2.7. Conclusiones del capítulo 2

- ✚ Quedan establecidas las técnicas experimentales que permitirán dar cumplimiento al desarrollo del trabajo, así como la caracterización de cada uno de los equipos y máquinas para validar los resultados.
- ✚ Para obtener la señal de Barkhausen, la muestra se magnetiza mediante un campo magnético variable aplicado sobre ella y con ayuda de un sensor se obtiene la señal del RMB, donde un salto en la señal de Barkhausen es descrito a través de las magnitudes: duración de la señal, el área bajo la curva y la energía de la señal.
- ✚ Las ecuaciones establecidas para el ruido magnético Barkhausen, permiten determinar las variaciones en las tensiones, así como el tamaño del grano en el acero AISI 4340 luego de ser sometido a proceso de soldadura manual por arco eléctrico con electrodos revestidos.

# CAPÍTULO 3

## Análisis de los resultados

## **CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

### **3.1. Introducción**

Algunos métodos no destructivos para determinar estos estados de concentración de esfuerzos son: la difracción de rayos X, la corriente de Eddy y el ruido magnético de Barkhausen (RMB), estos poseen excelentes capacidades para caracterización de materiales, la alta confiabilidad, la rápida velocidad de inspección; pero la capacidad para detectar cambios en las discontinuidades geométricas del material es relativamente baja. El uso de la técnica presentada sirve para correlacionar el comportamiento mecánico de los materiales ferromagnéticos, por medio de sus propiedades magnéticas sin llegar a cuantificarlos.

El objetivo del capítulo es determinar la caracterización magnética por medio del ruido magnético Barkhausen del acero 4340 luego de ser sometido a proceso de soldadura con electrodos revestidos de diferentes tipos.

### **3.2. Análisis de los regímenes de soldadura**

El calor aportado para cada cordón se determinó en correspondencia con los regímenes de soldadura. El acero 4340 presenta elementos en su composición química como por ejemplo el Cr que dificulta la soldadura y el C que a mayor cantidad de este se compromete la soldabilidad del acero. Ambos elementos provocan alteraciones tanto en la zona fundida (ZF) como en la zona de influencia térmica (ZIT).

A partir de la ecuación 2.1 y para una  $U_a$  de 25 Vols, una  $I_s$  de soldadura de 120 Amp y una  $V_s$  de 1,12 m/s, el electrodo UTP 65 tiene un calor aportado en la unión soldada de 2 678,5 kJ/mm. Para una  $U_a$  de 26 Vols, una  $I_s$  de soldadura de 150 Amp y una  $V_s$  de 1,12 m/s, el electrodo E 316 - 12 tiene un calor aportado en la unión soldada de 3 482 kJ/mm. Para una  $U_a$  de 28 Vols, una  $I_s$  de soldadura de 160 Amp y una  $V_s$  de 1,12 m/s, el electrodo E 7018 tiene un calor aportado en la unión soldada de 4 000 kJ/mm.

Según Mohamed (1998) para junta de pequeño espesor, como en nuestro caso, la penetración depende de la tensión de arco, la velocidad de avance y

principalmente de la corriente, la penetración varía alrededor de un valor inestimable con la velocidad y la tensión; sin embargo, con la corriente, la variación es lineal. Las funciones principales de la tensión (voltaje) son estabilizar el arco y proporcionar un cordón liso, sin salpicaduras. Por otro lado reporta Ghosh *et al.* (2004) que para electrodos de 3,2 y 4 mm, la tensión de arco no influye significativamente en el ancho del cordón; influye notablemente en el refuerzo.

### 3.2.1. Análisis del depósito por el diagrama de Schaeffler

Cuando se trata de unir materiales de la misma composición química, el punto correspondiente al metal depositado se encontrará entre la recta trazada por los puntos correspondientes al metal base y al electrodo. Su ubicación específica dependerá del grado de dilución con que se trabaje. En el proceso arco manual el valor típico es de 30%. Se empleó el diagrama para analizar el depósito de los electrodos E 312 – 16 y del electrodo UTP 65, tal y como se muestra en la figura 3.1, no se consideró el electrodo E 7018 ya que tanto el electrodo como el material base se consideran totalmente ferrítico.

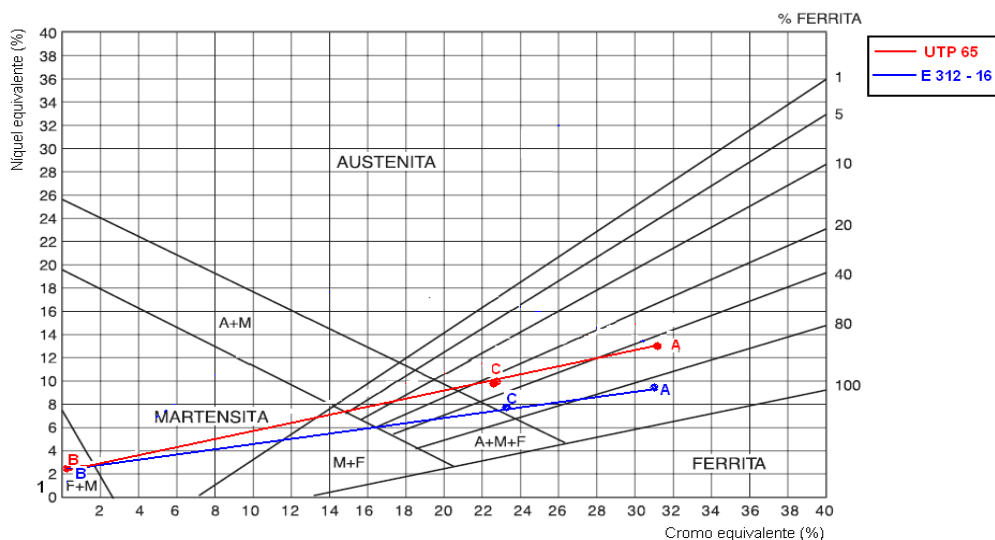


Figura 3.1. Depósito del electrodo UTP 65 y del electrodo E 312 – 16.

En la figura la línea roja representa el depósito del electrodo UTP 65 y la azul del electrodo E – 312 – 16, el punto B para ambas uniones, se corresponde con el material base, el cual se puede observar que se encuentra en el campo de F + M, ya que el  $[Cr]$  y  $[Ni]$  se encuentran ubicados en esta zona.



Para el electrodo UTP 65 se obtiene un 45 % aproximado de ferrita y para el electrodo E 312 – 16, se obtiene un aproximado de 83 % de ferrita, por lo que al realizar la unión soldada se van a obtener estructura generalmente del tipo ferrita, pero se requiere la aplicación de calentamiento para evitar el agrietamiento en frío, también el material aportado puede presentar estructuras: austenítica, con pequeñas cantidades de martensita, austenítico-ferrítica, con algún contenido de martensita y austenítico – ferrítica, lo que coincide con Neesen *et al.* (2008).

A partir de la composición química del material base (AISI 4340) y el material de aporte (E 7018), se considera que para garantizar una unión soldada libre de figuración, se debe realizar el cálculo de la temperatura de calentamiento para el electrodo, que para un carbono equivalente de 1,62 %, esta temperatura sería de 657 °C.

Para realizar el proceso de soldadura con el electrodo E – 7018 se requiere de la aplicación de una temperatura de precalentamiento de 657 °C, la misma evitará la fisuración del cordón luego de solidificado, existirá un mejor control en la precipitación de los carburos de cromo, lo que ha sido reportado por Mertinger *et al.* (2007).

### 3.3. Análisis de la microestructura

Las figuras 3.2 y 3.3 muestran las micrografías del cordón de relleno y la zona de crecimiento en el acero AISI 4340 luego de efectuado el proceso de soldadura.



Figura 3.2. Micrografía de la ZAT.



Figura 3.3. Zona de crecimiento.

Se comprobó mediante el análisis metalográfico, que el procedimiento que se llevó a cabo no fue el adecuado, ya que se obtuvo martensita en la zona de crecimiento de grano.

Aquí se pudo observar cómo se afecta térmicamente el material debido al calor de aporte generado por el proceso y cómo varía la zona afectada térmicamente de acuerdo al proceso, además de que la soldadura multipasadas realiza un efecto de tratamiento térmico sobre el cordón anterior por lo que disminuye la dureza de la ZAT en la zona de dicho cordón. Se puede observar la formación de martensita en la zona de crecimiento de grano, lo cual es indicativo de que la disminución de la velocidad de enfriamiento no fue la suficiente como para impedir la formación de la martensita, cuya presencia vuelve susceptible a la unión al agrietamiento en frío.

Sare (1979) indicó que la matriz juega un papel fundamental en la tenacidad al desgaste en los aceros, ya que dificulta la propagación de las grietas de unos carburos a otros, se considera además que las aleaciones de matriz austenítica poseen mayor tenacidad a fractura que las aleaciones de matriz martensítica (Zhang, 2001).

### 3.4. Análisis de la señal Barkhausen en las muestras soldadas

Se analizó la señal Barkhausen para el depósito con los diferentes electrodos (figura 3.3) con lo cual se puede apreciar el comportamiento de esta señal para cada uno de ellos.

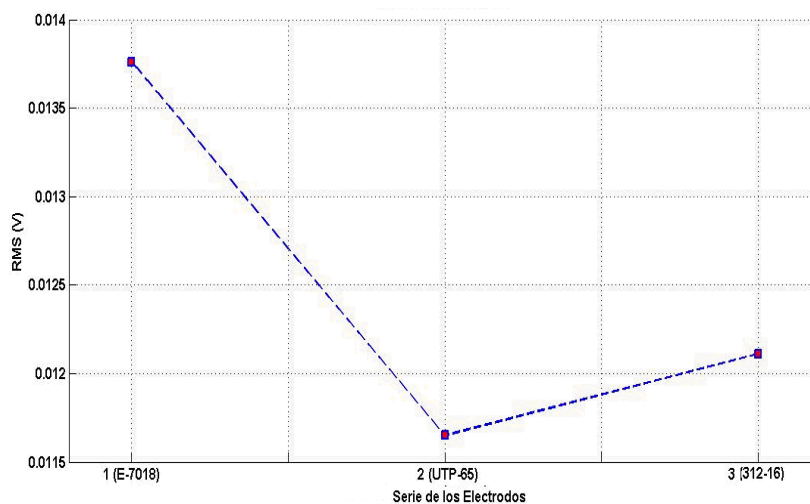


Figura 3.3. Señal Barkhausen para el depósito con los diferentes electrodos.

La dependencia obtenida en el análisis del depósito con los tres electrodos está influenciado por la magnetización del material, que tiene la característica de ser

ferromagnéticos, así como por el estado de tensiones del mismo a través de la magnetostricción, existe una señal más pronunciada para el electrodo E 7018, ya que la deformación plástica y el ciclo térmico impuesto, han aumentado las regiones con alta densidad de dislocaciones que impiden el movimiento de las paredes de dominio, producto al menor tamaño del grano, que induce mayor dureza en la unión soldada.

Se observa para el electrodo E 312 – 16 una menor densidad de dislocaciones y una menor señal Barkhausen con respecto al electrodo E 7018, lo cual también está asociado con cambios peculiares de la estructura de dominio, aunque en menor dominio, existe un menor tamaño de grano.

Para el electrodo UTP 65 se observa una disminución del salto Barkhausen, lo cual está influenciado por el crecimiento del tamaño del grano, lo que provoca que la envolvente se desplace hacia el campo coercitivo ( $H = 0$ ) y se produzcan cambios dimensionales en la nucleación del acero.

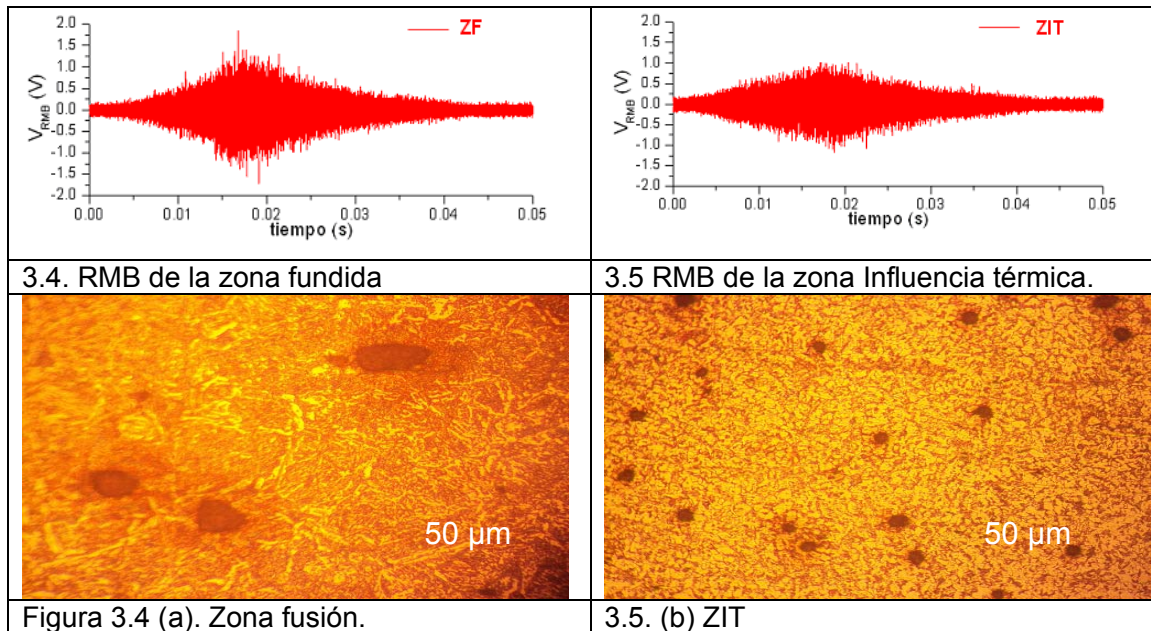
Los aceros, en general, presentan un coeficiente de magnetostricción positivo. Por esta razón, el vector de magnetización en los granos de acero se orienta generalmente en la dirección cristalográfica  $\langle 100 \rangle$ . Al aplicar una tensión mecánica a las muestras de acero, la estructura magnética de los dominios se modifica de manera que se minimice la energía total (mayormente constituida por la energía magnetostática, la magnetoelástica y la de anisotropía). A este proceso se le conoce como efecto magnetoelástico, lo que ha sido reportado por Martínez *et al.* (2010).

#### **3.4.1. Análisis de la señal Barkhausen del depósito con electrodo E 7018**

A diferencia del metal de soldadura, la zona afectada térmica solo es influenciada por los ciclos térmicos del proceso de soldadura, ya que la composición química se afecta notablemente debido a que no existe similitud con el metal de aporte y el acero 4340, lo cual está en función de las transformaciones en estado sólido.

Las micrografías 3.4 y 3.5 son las obtenidas durante el proceso de soldadura, realizadas con electrodos del tipo E – 7018. En ellas se representa la señal del

RMB en la ZF y la ZIT y las figuras 3.4 (a) y 3.4 (b) se corresponden con las estructuras de ambas zonas.



Las figuras 3.4 (a) y 3.5 (b) muestran la dependencia del número de saltos de RMB para el acero 4340 luego del proceso de soldadura en la zona fundida y en la zona de influencia térmica. En la figura 3.5 (b) se aprecia una disminución de la cantidad de saltos de RMB de todas las dimensiones, lo que ocurre con el incremento del tamaño de grano, además de disminuir la energía de las avalanchas. La presencia de menor cantidad de saltos está asociado a la soldadura multipasada, la cual se convierte en un tratamiento de recocido en la unión soldada que hace que exista un tamaño de grano normalizado.

La figura 3.5 (b) correspondiente a la zona de fusión se aprecia una frontera con una cantidad razonable de ferrita que incluso se extiende hacia la ZAC, esta ferrita ayuda a evitar el crecimiento de grano, pero al mismo tiempo podría promover el debilitamiento del material en esta zona por la formación de la fase sigma a partir de la ferrita.

En la microestructura de la figura 3.5 (b) se ha obtenido una mezcla de ferrita poligonal y perlita, la cual es resultado del enfriamiento lento, por lo que permite que los átomos de carbono encuentren lugares intersticiales en los bordes de la ferrita, entonces precipita en placas de cementita que crecen adjuntas a placas de

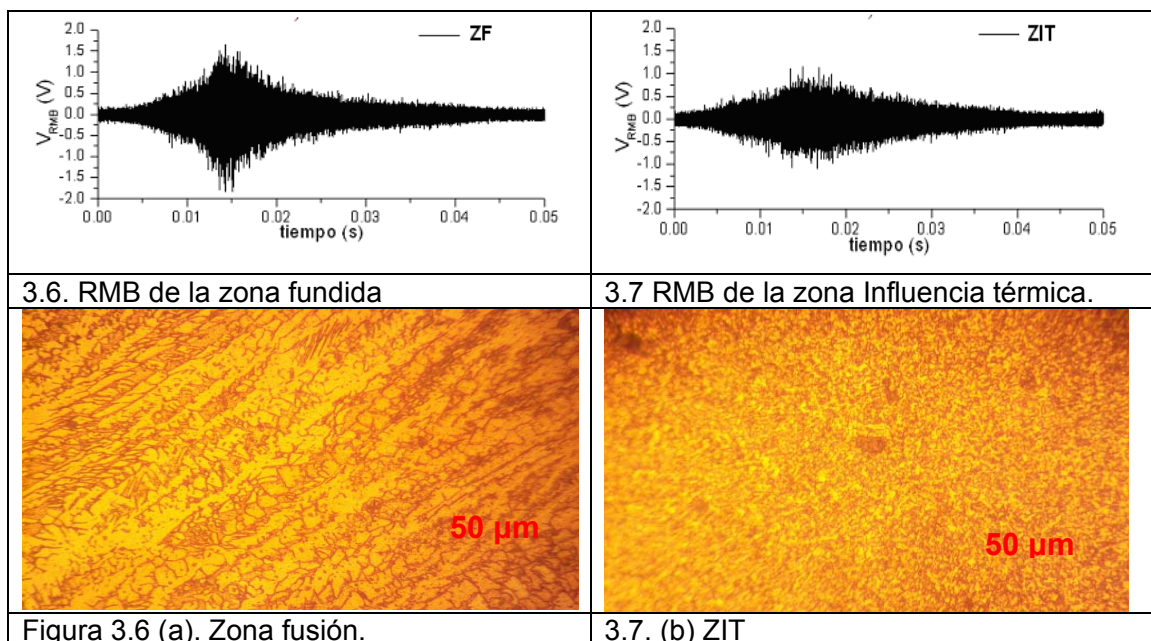


ferrita para formar el constituyente perlita dentro del rango de temperaturas de 550 °C a 720 °C.

El paso de relleno de la unión soldada presenta transformaciones de fase en la ZAT, diferentes a las encontradas en el paso de raíz, como lo es la bainita superior y ferrita Widmanstätten. Estas microestructuras se caracterizan por presentar un elevado contenido de carbono debido a las velocidades de enfriamiento a las que se forman. La bainita superior se origina a partir de placas de ferrita que tiene a su alrededor, una elevada concentración de carbono. Este carbono, cuando alcanza su máxima concentración transforma en cementita, lo cual brinda la morfología característica de plumas, mientras que la ferrita Widmanstätten, se caracteriza por contener una elevada concentración de carbono a los lados de sus placas

#### 3.4.2. Análisis de la señal Barkhausen del electrodo E – 312 – 16

El efecto de la soldadura en la unión soldada entre el acero 4340 y el electrodo E – 312 – 16, debe considerarse como una unión disímil, ambos materiales presentan composición química diferentes, acentuado por el elevado contenido del material base. En las figuras 3.6 y 37 se observan la señal del RMB en la ZF y la ZIT y las figuras 3.6 (a) y 3.6 (b) se corresponden con las microestructuras de la unión soldada con el electrodo E – 312 – 16.



En las figuras analizadas, se muestra una señal del salto de RMB muy similar a la obtenida con el electrodo E 7018, en la figura 3.6 que se corresponde con la zona fundida, sigue existiendo con este electrodo (E 312 -16) un incremento de la señal obtenida, la cual disminuye para la ZIT (3.7) asociado de igual manera a la soldadura multipasada.

En la figura 3.6 (a) se observa que al aplicar durante el proceso de soldadura temperaturas superiores a 900°C, en el acero 4340 con el electrodo E – 312 – 16, por la composición química que deposita el metal de aporte, se aprecia una disminución en el porcentaje de fase sigma y por lo tanto, el de ferrita aumenta, mientras que pequeñas islas de austenita secundaria vuelven a formarse bordeando el grano ferrítico.

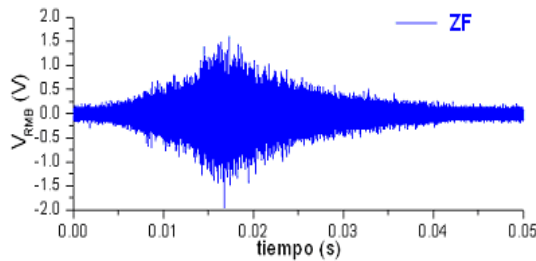
En la microestructura de la figura 3.7 (b) se presenta la ferrita de borde de grano, que es la primera morfología que se forma durante el enfriamiento, teniendo como ubicación preferencial los bordes de grano de austenita, aunque también puede localizarse dentro de los granos de la austenita, por lo que presenta una estructura bien definida. Durante la formación de ferrita, el carbono es expulsado, dando lugar a la formación de cementita (Fe C) así como a la generación de ferrita acicular a partir de inclusiones no metálicas.

Este cambio puede ser ocasionado por las elevadas temperaturas, en las cuales, la aleación experimenta la transformación austenita - ferrita hasta existir una totalidad de ferrita columnar aproximadamente antes de pasar a la fase líquida, por lo cual, todos los elementos alógenos son reincorporados a la matriz ferrita, afectando directamente a la fase sigma, que es principalmente formada por el Cr y el Mo.

### **3.4.3. Análisis de la señal Barkhausen del depósito con electrodo UTP 65**

Para las uniones soldadas con electrodo UTP 65, se estudiaron las transformaciones de fase de cada una de las aleaciones afectadas por los ciclos térmicos basados en la distribución de temperaturas, se utilizaron los mismos parámetros que se emplearían en la fabricación de las uniones soldadas disímiles.

En las figuras 3.8 y 3.9 aparecen la señal del RMB y las figuras 3.8 (a) y 3.9 (b) se corresponden con las microestructuras obtenidas.



3.8. RMB de la zona fundida

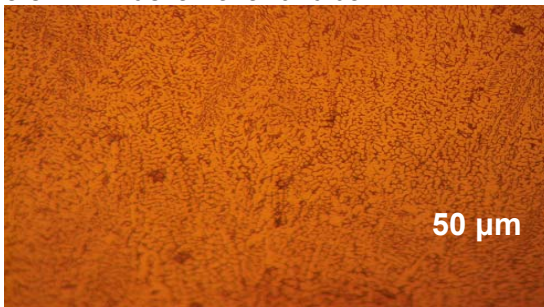
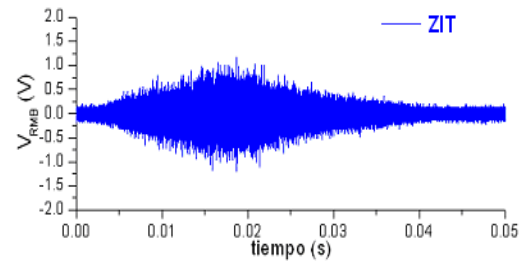
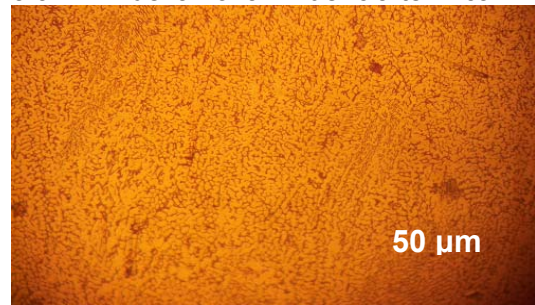


Figura 3.8 (a). Zona fusión.



3.9 RMB de la zona Influencia térmica.



3.9. (b) ZIT

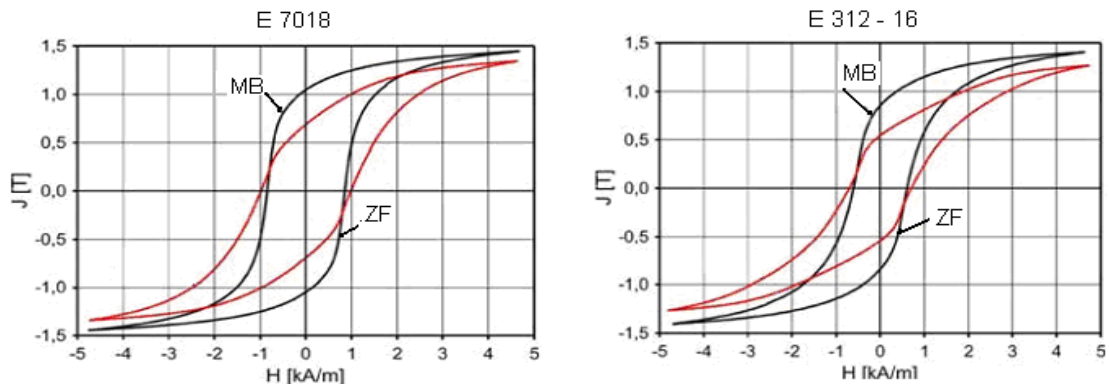
Se observa que con el electrodo UTP 65 se han obtenidos resultados en la señal del RMB de menor intensidad, lo cual queda demostrado en las microestructuras obtenidas, en las figuras 3.8 (a) y 3.9 (b), se puede observar una estructura de solidificación del tipo Austenita - Ferrita, es decir una ferrita eutéctica en una matriz austenítica, donde en la zona fundida se puede observar mayor cantidad de precipitados dentro de la matriz ferrítica y en la frontera de fusión.

Por otro lado, se mantiene un mayor balance de fases ferrita/austenita, el cual resulta de su elevado porcentaje de Cr y Mo como formadores de ferrita y el Ni como estabilizadores de la austenita, pues ayuda a mantener las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión, ya que es importante mantener el equilibrio de ambas fases.

### 3.3.4. Análisis de los lazos de histéresis

Los lazos de histéresis de los cuales se obtienen los valores de la coercitividad ( $H_c$ ) y de la polarización remanente ( $J_r$ ) del acero AISI 4340 soldado con diferentes electrodos (E 7018; E 312 – 16 y UTP 65) se muestran en la figura 3.10 (a, b y c). Para cada acero se muestra un par de lazos de histéresis obtenido a lo

largo de la dirección del eje de fácil magnetización. EFM (L-dirección longitudinal) y del eje de difícil magnetización. EDM (T-dirección transversal).



3.10 (a) Lazo electrodo E 7018.

3.10 (b) Lazo electrodo E 312 - 16.

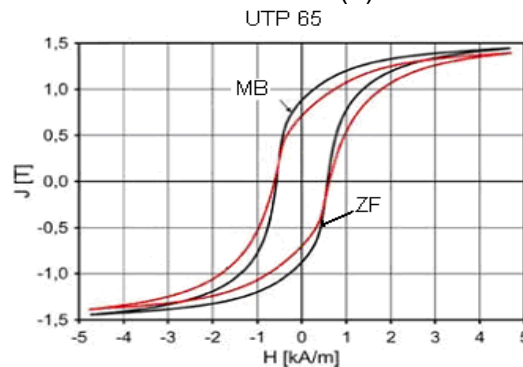


Figura 3.10 (c). Lazo electrodo UTP 65.

Figura 3.10. Lazos de histéresis obtenidos en la dirección del EFM (L-dirección longitudinal) y en la dirección del EDM (T-dirección transversal) del acero 4340 soldado con diferentes electrodos.

En estas figuras se puede apreciar el cizallamiento de los lazos de histéresis en la dirección del EDM. Esto demuestra la anisotropía magnética de estos aceros. El origen del proceso de histéresis en los materiales magnéticos recae en la existencia de imperfecciones, tanto en forma de dislocaciones o impurezas en el material que incrementan las pérdidas energéticas durante el proceso de magnetización. La anisotropía magnetocristalina es otro de los mecanismos que ayudan en el proceso de histéresis.

En los sólidos anisotrópicos, determinados ejes cristalográficos en el material favorecen a la orientación de los momentos magnéticos a lo largo de esas direcciones, lo que conlleva a un estado de menor energía y por lo tanto más estable. El resultado de este proceso es la rotación discontinua e irreversible de



los momentos magnéticos que induce a cierta conmutación o salto, reportado por Das *et al.* 2004.

### 3.3.5. Análisis de la envolvente

En la figura 3.11 se muestran las señales de la envolvente de RMB obtenidas a lo largo del EFM y del EDM del acero AISI 4340 soldada con los electrodos E 7018 y E 312 – 16. Se observa que existe una diferencia más notable en la forma de la señal envolvente de RMB para el EFM respecto al EDM de cada acero.

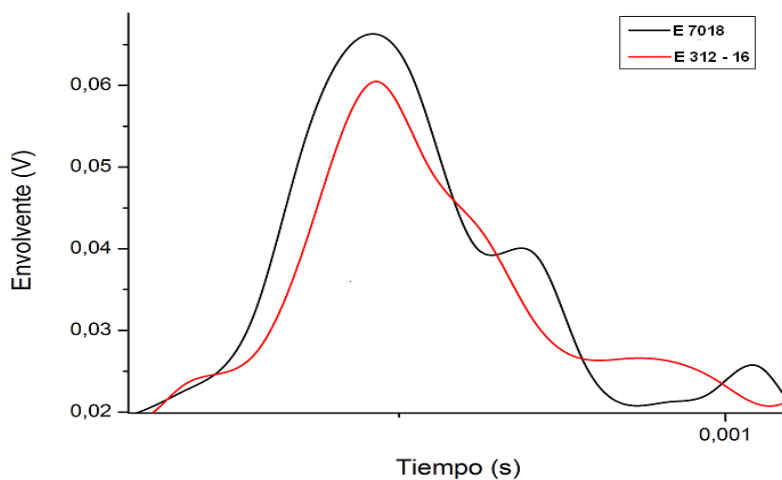


Figura 3.11. Señales de las envolventes para el electrodo E 7018 y E 312 – 16.

El valor máximo de la envolvente de la señal de RMB se reporta en cada una de las curvas de la figura 3.11. EFM con respecto al EDM. Los valores fueron obtenidos para cada una de las muestras soldadas a lo largo de los dos ejes de magnetización y promediados de tres mediciones.

Los valores máximos de la señal envolvente se muestra para la muestra soldada con el electrodo E 7018 y luego un ligero descenso para el electrodo E 312 – 16, las envolventes son ligeramente diferentes, lo que está relacionado con sus propiedades magnéticas, como pueden ser las variaciones del contenido de carbono en el electrodo E 7018 tiene una anisotropía magnética mayor, así como el cambio de fases al someterlo a tratamientos térmicos (ciclo de soldadura).

La soldadura con electrodo E 312 – 16 deposita una estructura del tipo austenítica, por el contenido del  $[Ni]$  que es de un 13 %, lo cual lo convierte en un material amagnético, no susceptible al ruido magnético Barkhausen.

### 3.4. Determinación de perfiles de microdurezas

Se realizaron mediciones de perfiles de microdurezas en correspondencia con los resultados obtenidos en el proceso de soldadura. Los ensayos se realizaron en cada una de las zonas analizadas (ZF y ZIT), la tabla 3.1 recoge estos resultados.

Tabla 3.1. Comportamiento de la microdureza y la dureza

Zona / E - 7018	Dureza HV	Dureza HRC
ZF	498,70	48,7
ZIT	325,37	32,8
Zona / E – 312-16	Dureza HV	Dureza HRC
ZF	494,42	49,5
ZIT	320,16	30,8
Zona / UTP 65	Dureza HV	Dureza HRC
ZF	315,12	30,25
ZIT	300	29,3

Se observa que en la zona afectada térmicamente en la región que corresponde a la zona de crecimiento de grano (ZIT), se rebasa de forma significativa la dureza desde 300 hasta 325 HV, lo cual es indicativo de la fuerte posibilidad de que se presente el problema de agrietamiento en frío.

Los resultados de la dureza Vickers son consistentes con los obtenidos en la aplicación del RMB, ya que como se observa hay una mayor dureza en el electrodo E 7018 (498,70 HV), precedido por el electrodo E 312 – 16 (494,42 HV) y por último el electrodo UTP 65 (315,12 HV).

El mayor valor de dureza está influenciado por la microestructura resultante obtenida ya que tanto el MB como el material de aporte presenta en su composición elevado contenido de carbono y cromo que propician el endurecimiento de esta zona producto al ciclo térmico de soldadura impuesto, por otro lado hay que significar que debido al depósito de los cordones presumiblemente haya existido un tratamiento de recocido el cual introdujera un recocido en la zona de fusión y la dureza tenga una disminución.

### 3.5. Valoración económica

Al abordar el aspecto económico con relación al proceso de recuperación de la ballesta se tuvo en cuenta también el precio de un elemento nuevo, este precio aparece en la tabla 3.2, el precio que se contempla es en USD.



Tabla 3.2. Precio de una ballesta de la arrastra

Código	Precio muelle delantero	
18 – 3806 66 C91 - P	539,41 USD	499,45 CUC

En los costos por recuperación se tuvo en cuenta:

**- Costos de producción**

Costos de energía para el electrodo E - 7018

$$CE = \frac{V.I.E}{1000} \quad (3.1)$$

**Donde:**

$CE$  – costo de la energía

$V$  – voltaje

$I$  – corriente

$t$  – tiempo

$E$  – valor de la energía

$$CE = \frac{28.160.2}{1000}$$

$$CE = 8,96 \text{ kWh}$$

**Para el E – 312 – 16**

$$CE = \frac{26.150.2}{1000}$$

$$CE = 7,8 \text{ kWh}$$

Para el UTP 65

$$CE = \frac{25.120.2}{1000}$$

$$CE = 6 \text{ kWh}$$

**- Costos de mano de obra**

$$CMO = MO.H \quad (3.2)$$

**Donde:**

$CMO$  – costo mano de obra

$MO$  – valor mano de obra

$H$  – horas trabajadas



$$CMO = 3,8 \cdot 2h$$

$$CMO = 7,6$$

$$CMO = 22,8 \text{ CUP}$$

#### - Costos de soldadura

$$CS = V \cdot h \quad (3.3)$$

#### Donde:

CS – costo de soldadura

V – valor de la soldadura

$$CS = 2 \cdot 2$$

$$CS = 4 \cdot 3$$

$$CS = 12$$

#### - Costos materia prima

Electrodo E – 7018; 6 electrodos utilizados = 6.1,70 = \$ 10,20.

Electrodo E – 312 – 16; 7 electrodos utilizados = 7. 1,227 \$c/u = \$ 8, 59.

Electrodo UTP 65; 7 electrodos utilizados = 7.2,24 \$c/u = \$ 15,68

El costo total sería entonces:

$$CT = CP + CMO + CS + CMP$$

$$CT = 91,83 \text{ CUP}$$

Si se comparan los costos relacionados con el precio de la compra de la ballesta y el los costos de la recuperación, es más factible esta última que comprar la misma.

### 3.6. Valoración del impacto medio ambiental

La problemática ambiental cubana está condicionada por una difícil situación económica, y caracterizada, por una aún insuficiente conciencia ambiental de los factores económicos y sociales, por ello se requiere de un manejo racional basado en la armonía entre la conservación de las conquistas sociales alcanzadas y la protección sostenible de nuestros recursos naturales, y para ello se necesita de una población capacitada, que conscientemente incorpore en su vida cotidiana la dimensión ambiental.

Toda soldadura entraña riesgos de incendio, quemaduras, calor radiante (radiación infrarroja) e inhalación de humos metálicos y otros contaminantes. Otros



riesgos inherentes a procesos de soldadura específicos son: los riesgos eléctricos, ruidos, radiación ultravioleta, ozono, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, fluoruros, botellas de gas a presión y explosiones.

Muchas soldaduras no se realizan en talleres donde, generalmente, pueden llevarse a cabo en condiciones controladas; sino sobre el terreno, en la construcción o reparación de grandes estructuras y maquinarias. Durante el proceso de soldadura se producen humos y se emiten radiaciones ultravioletas, infrarrojas, térmicas y electromagnéticas. Es importante para los soldadores proteger su vista contra las radiaciones nocivas, usar ropas protectoras para el calor y las salpicaduras. Pero en cambio la protección contra los humos no es una preocupación presente, a pesar de que se conoce que estos humos contienen sustancias contaminantes que pueden causar lesiones en las vías respiratorias, los pulmones, el sistema nervioso central y en algunos casos pueden llegar a ocasionar enfermedades crónicas como el asma y el cáncer.

Distintos factores como los mencionados anteriormente ocasionan determinadas enfermedades profesionales en los soldadores, lo que hace que estos se incluyan dentro de un grupo llamado de sobre-riesgo, con una elevada tasa de jubilación temprana, a causa de los padecimientos adquiridos en la ejecución de su labor.

También esto trae consigo la escasez de soldadores calificados, que se mantengan de forma estable en su trabajo, afectando seriamente el proceso de producción.

Otras afectaciones al medio están ocasionadas por los procesos de maquinado donde se produce gran cantidad de desechos sólidos, estos desechos en forma de virutas al ser depositados en un lugar específico alteran el equilibrio de ese pequeño ecosistema, ya que en su composición poseen elementos que pueden ser lixiviables, bajo la acción de las temperaturas altas y las lluvias, pasan a las aguas subterráneas contaminándolas. Además en el taller se consume una gran cantidad de energía eléctrica, la cual se toma de la red nacional convirtiéndose en gasto de combustible y contaminación atmosférica debido al proceso de combustión para generar energía.



### **3.7. Conclusiones del capítulo 3**

- Se determinó el calor aportado para cada uno de los electrodos empleados en el proceso de soldadura de la ballesta, considerando la temperatura de precalentamiento para el electrodo E – 7018 y las consideraciones de los electrodos UTP 65 y E – 316 – 12 por el diagrama de Schaeffler.
- Fueron analizadas las zonas fundidas y las zonas de influencia térmica de cada muestra soldada en correspondencia con los electrodos utilizados y el ciclo térmico impuesto.
- El análisis con el empleo del ruido magnético Barkhausen permitió caracterizar el efecto del ciclo térmico aplicado al acero AISI 4340 soldado con diferentes tipos de electrodos.



### Conclusiones generales

- ❖ Los resultados de la señal del ruido magnético Barkhausen, las micrografías observadas, la dureza de 498 HV permiten predecir una estructura con mayor fragilidad para el electrodo E 7018 por el debilitamiento del material en esta zona y por la formación de la fase sigma.
- ❖ Las afectaciones en la zona fundida y la zona de influencia térmica del depósito de los diferentes tipos de electrodos se aprecia una disminución de la cantidad de saltos de RMB promovido por el incremento del tamaño de grano, asociado a la soldadura multipasada, la cual se convierte en un tratamiento de recocido en la unión soldada que hace que exista un tamaño de grano normalizado.
- ❖ Los lazos de histéresis obtenidos en cada muestra demuestran la anisotropía magnética de los diferentes electrodos empleados, lo cual está asociado a la existencia de imperfecciones, tanto en forma de dislocaciones o impurezas en el material, menos pronunciada para el UTP 65 por su carácter amagnético en el depósito con un  $[Ni]$  de un 13 %.
- ❖ Los procesos de soldadura y maquinado provocan afectaciones a la salud del hombre y al medio ambiente; la primera por la emanación de radiaciones, gases humos y vapores y la segunda por el empleo de refrigerantes y desechos de las virutas.



### **Recomendaciones**

- ❖ Aplicar proceso de precalentamiento en el acero AISI 4340 en caso de que se vaya a emplear el electrodo E 7018 para la unión por proceso de soldadura con electrodo revestido.
- ❖ Considerar en futuras investigaciones la determinación de la dureza Vickers en cada uno de los microconstituyentes por lo que están formado las microestructuras obtenidas.
- ❖ Considerar otro proceso de soldadura como el de arco sumergido para realizar el proceso de soldadura del acero AISI 4340 en las requeridas condiciones.



# **BIBLIOGRAFÍAS**



## Bibliografías

1. Alberteris, M. Characterization of the elastic-plastic region in AISI/SAE 1070 steel by the magnetic Barkhausen noise. NDT&E Int 2008, doi:10.1016/j.ndteint.2008.03.003.
2. Anglada-Rivera, J.; L.R. Padovese, J Capó-Sánchez. Magnetic Barkhausen noise and hysteresis loop in commercial carbon steel: influence of applied tensile stress and grain size. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. V 231, pp 299-306, 2001.
3. Apraiz J. Aceros Especiales, Editorial Dossat S. A., Madrid, 1975.
4. Bedolla-Jacuinde, A.; Arias, L.; Hernandez, B., Kinetics of Secondary Carbides Precipitation in a High-Chromium White Iron Journal of Materials Engineering and Performance. 12 (4) 371 – 382, 2003.
5. Belzunce, F., Aceros y Fundiciones. Estructuras, Transformaciones, Tratamientos Térmicos y Aplicaciones. Universidad de Oviedo, 2001.
6. Biner, S.; Can, B., Metall. Q., 24 (7) 155 - 167, 1985.
7. Bruce, A.; Paul B. Crilly y Janet C. Rutledge. Sistemas de comunicación a Una introducción a las señales y el ruido en las comunicaciones eléctricas. 4 ed. MacGraw Hill 2007.
8. Callister, W., Ciencia e Ingeniería de los Materiales I. Ed. Reverté, S.A., 1999.
9. Callister, W., Materials Science and Engineering. An Introduction. Fifth Edition. Departament of Metallurgical Engineering. University of Utah. John Wiley & Sons, Inc. 8195 pp. 2000.
10. Capó-Sánchez, J. y L. Padovese. Magnetic Barkhausen noise measurement by resonant coil method. J. of Magnetism and Magnetic Materials, 321 2009. L57- L62.
11. Capó-Sánchez, J.; R. Padovese y C.P Serna-Giraldo,. Utilización del efecto Barkhausen en el análisis estructural de muestras de acero al carbono. **In:** II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. João Pessoa, Brasil, Agosto 2002.



12. Capó-Sanchez, J.; R. Padovese, C.P Serna-Giraldo. Medição do ruído magnético Barkhausen em aços carbono. **In:** 57 congressos anual da ABM Internacional. São Paulo, Brasil, julio de 2002.
13. Capó-Sanchez, J.; J.A. Perez Benitez, L.R Padovese y C.P Serna-Giraldo. Dependence of the Barkhausen Magnetic Emission with carbon content in commercial steel. *Journal of Materials Science*. V39, pp 1367-1370, 2004.
14. Cardon, M., The Marketing of Barkhausen Noise Analysis. The shot peener, pp 18-20. 2007.
15. Clapham, L.; C. Heald, T. Krause y L. Atherton. Origin of a magnetic easy axis in pipeline steel. *J. Appl. Phys.*, 86, 1574 1999.
16. Chikazumi, S. *Physics of Magnetism* (John Wiley and Sons, New York, 1964).
17. Das, S.; 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*, v. 37, pp. 243–248, 2004.
18. Dhar, A y L. Atherton. Influence of Magnetizing Parameters on the Magnetic Barkhausen Noise. *IEEE Transactions on Magnetics*. V28, N 6, pp 3363-3366, 1992.
19. Dogan, Ö.; Hauk, J., Laird II G Solidification Structure and Abrasion Resistance of High Chromium White Irons *Metallurgical and Materials Transactions A*; 28A (12) 25 – 30, 1997.
20. Duck Gun-Park, Cheol Gi Kim, Jun-Hwa Hong. Microstructural dependence of Barkhausen noise and magnetic relaxation in the weld HAZ of an RPV steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. V 215- 216, pp765-768, 2000.
21. Espina, J. Nueva técnica de medición para la caracterización de materiales magnéticos en campos pulsados”, PhD Tesis, Centro de materiales y reactivos (UH), Centro de investigación en microelectrónica (ISPJAE). D. C.
22. Guliaev AP. *Metalografía*. t.2. Moscú: Mir; 1983.
23. Griffiths, David J., *Introduction to Electrodynamics*,. Prentice Hall, New Jersey 1999.



24. Jiles, D. Introduction to Magnetism. Cambridge University Press, second edition, 1989.
25. Jiles, D. Introduction to Magnetism and Magnetic Materials. 1st ed. Chapman&Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN. 1991.
26. Jiles, D. Dynamics of domain magnetization and the Barkhausen effect. Czechoslovak Journal of Physics. V 50, n 8, pp 893-988, 2000.
27. Joo-Hag Kim, Duck-Gun Park, Chi-Il Ok, Eui-Pak Yoon, Jun-Hwa Hong. Effect of microstructure on magnetic Barkhausen noise level in the weld HAZ of an RPV steel. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. V 196-197, pp351-353, 1999.
28. Kameda, J.; R Ranjan. Nondestructive evaluation of steels using acoustic and magnetic Barkhausen signals- I. Effect of carbide precipitation and hardness. Acta Metallurgical. V35, n 7. pp 1515-26, 1987.
29. Khanna, A., High Temperature Oxidation and Corrosion ASM International, United States, 2002.
30. Lachmann, C.; TH Nitschke-Pagel, H. Wohlfahrt, Characterisation of residual stress Relaxation in Fatigue Loaded Welded Joints by X-Ray Diffraction and Barkhausen Noise Method. Materials Science Forum. V 347-349, .pp 374-379, 2000.
31. Neesen, F.; De Roy, L. Smitweld, Soldadura de alta productividad en la construcción naval." Soldadura y tecnologías de unión 2.008.
32. Martín, A. Electromagnetismo Aplicado. Reverte S.A., España. 1994.
33. Martínez, P.; J Espina, J. Hallen, R. Linares y Miranda, Caracterización de Aceros API-5L por Medio de la Medición de Ruido Magnético Barkhausen, ISSN 1665-0654 Científica. 14 (2) 2010. 81-87.
34. Mertinger, V.; E. Nagy, F. Tranta, J. S'olvom, Strain-induced martensitic transformation in textured austenitic stainless steels, Hungary, 15 February 2007.
35. Moorthy, V.; S. Vaidyanathan, K. Laha, K. Jayakumar, Bhanu Sankara Rao, K.; Baldev Raj. Evaluation of microstructures in 2,25Cr-1Mo and 9Cr-1 Mosteel



- weldments using magnetic Barkhausen noise. *Materials Science and Engineering*. A231, . Pp 98-104, 1997.
36. Moorthy, V, S. Vaidyanathan, T. Jayakumar; Baldev Raj. Evaluation of post-weld heat treatment in 2,25Cr-1Mo steel tube to tube sheet welded joints using magnetic Barkhausen noise measurement. *Materials Science and Technology*. V13, n.7. pp 614-617, 1997.
  37. Moorthy; V.; B.A Shaw y J.T Evans. Evaluation of tempering induced changes in the hardness profile of case-carburised EN steel using magnetic Barkhausen noise analysis. *NDT&E International*. V 36, pp 43-49. 2003.
  38. Padovese, L.; J Capo y J Anglada-Rivera,.Medio da tenso mecnica em año carbono através da emisso magnética de Barkhausen. In: XIX Congresso Nacional de Ensaio No Destrutivos. São Paulo, Brasil, agosto 2000.
  39. Pérez-Benítez, J. Estudio del ruido magnético Barkhausen en aceros al carbono, PhD Tesis, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba, 2007-2008.
  40. Pérez Benitez, J.; J. Capo Sánchez, J.; Anglada Rivera y L.R. Padovese. A model for the influence of microstructural defects on magnetic Barkhausen noise in plain steels", *J. Magn. Mater.* 288, 433-442 2005.
  41. Pero-Sanz, J.; Verdeja, J., Solidificación y Transformaciones en el Sistema Fe – C – Cr. Bases para el Diseño por Propiedades de sus Aceros y Fundiciones Ternarias RDM Revista de Minas, 1994.
  42. Porter AD, Easterling EK. Diffusionless Transformations. En: *Phase Transformations in Metals and Alloys*. Chapman and Hall; 1981.
  43. Ranjan, R.; D. Jiles, y P.K Rastogi,. Magnetic properties of decarburized steels: an investigation of the effects of grain size and carbon content. *IEEE transactions on magnetics*. Vol 23. n 3, . pp 1869-76, 1987.
  44. Sare, I., Abrasion Resistance and Fracture Toughness of White Cast Irons *Metals Technology* 412 – 419; November 1979.



45. Serna, G.; Padovese, L. El ruido magnético de Barkhausen: un método para monitorear microestructuras en uniones soldadas". *Scientia et Technica* Año XIII, No 36, Septiembre 2007. Universidad Tecnológica de Pereira.
46. Sipahi, L. Overview of applications of micromagnetic Barkhausen emissions as non-invasive material characterization technique. *Journal Applied Physics*. V70, n 10. pp 6978-80, May 1994.
47. Smith, W., *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales* Mc Graw Hill, Madrid, 1998.
48. Stewart, D.M.; K.J.Stevens, A.B. Kaiser Magnetic Barkhausen noise analysis of stress in steel". *Science direct*. Elsevier 2004. 304-311.
49. Tabrett, C.; Sare, I., Fracture Toughness of High-Chromium White Irons: Influence of Cast Structure *Journal of Materials Science*. 3 (2) 2069 – 2077, 2000.
50. Zhang, M.; Kelly, P.; Gates, J., The Effect of Heat Treatment on the Toughness, Hardness and Microstructure of Low Carbon White Cast Irons *Journal of Materials Science*. 36 (15) 3865 – 3875, 2001.