



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
METALÚRGICAS

“Efecto de la Inducción de un Campo Magnético Axial en el Refinamiento de la Microestructura de la Soldadura del Acero para Tubería API-5L-X60 Soldado por Arco Sumergido (AS)”

TESIS:

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN METALURGIA Y CIENCIAS DE LOS MATERIALES

Presenta:

Ing. Alejandro Ulises López Melgarejo

Asesor de Tesis:

Dr. Rafael García Hernández

NOVIEMBRE 2010



ÍNDICE GENERAL

	Página
<i>Índice de Figuras</i>	V
<i>Índice de Tablas</i>	IX
<i>Resumen</i>	1
<i>Introducción</i>	2
<i>Justificación</i>	4
<i>Objetivo</i>	4
<i>Hipótesis</i>	5
<i>Capítulo I. Revisión Bibliográfica</i>	
1.1.Estado del Arte.	7
<i>Capítulo II. Características del Proceso de Soldadura por Arco Sumergido.</i>	
2.1. Proceso de Soldadura por Arco Sumergido.....	18
2.2. Principios de Funcionamiento.....	18
2.3. Métodos Generales.....	20
2.4. Soldadura Mecanizada.....	20
2.5. Equipo.....	20
2.6. Materiales Soldables.....	20
2.7. Electroodos.....	21
2.8. Fundentes.....	21
2.8.1. Fundentes Aglomerados.....	22
2.9. Electroodos y Fundentes de Acero al Carbono.....	23
2.10. Variables de Operación.....	24
2.10.1. Amperaje de Soldadura.....	24
2.10.2. Voltaje de Soldadura.....	25
2.10.3. Velocidad de Desplazamiento.....	26
2.11. Campo Magnético.....	28
2.12. Efecto Hall.....	29



2.13. El Espejo Magnético.....	31
2.14. El Par en una Espira de Corriente.....	32
2.15. Campo Magnético de un Solenoide.....	34
2.16. Ley de Biot-Savart y Ampère.....	37

Capítulo III. Procedimiento Experimental

3.1. Introducción.....	42
3.2. Aspectos Generales.....	43
3.3. Caracterización de materiales.....	45
3.3.1. Caracterización de API-5L-X60.....	45
3.3.2. Análisis Químicos.....	45
3.3.3. Magnetización de Materiales.....	46
3.4. Parámetros Operativos y Diseño de Junta del Proceso de Arco Sumergido....	49
3.5. Equipo de Soldadura Utilizado para el Proceso de Arco Sumergido.....	51
3.6. Generación de Campos Magnéticos en el Proceso SAW no Convencional	52
3.7. Medición de Corriente Eléctrica y Campo Magnético en el Proceso SAW.....	56
3.7.1. Multímetro Industrial Fluke 123/124.....	56
3.7.2. Amperímetro de Gancho Fluke 1800.....	57
3.7.3. Gaussímetro Lutron EMF-827.....	57
3.7.4. Sensor Melexis MLX.90215.....	58
3.8. Microindentación.	60

Capítulo IV. Análisis y Discusión de Resultados

4.1. Caracterización de API-5L-X60.....	62
4.2. Perfiles de Soldadura.....	63
4.3. Caracterización Microestructural de los Cordones de Soldadura.....	64
4.4. Microestructura del Centro de los Cordones de Soldadura.....	69
4.5. Microdureza en Cordones de Soldadura Sobre Placas de Acero al Carbono....	74
4.6. Microdureza en Uniones Soldadas con Doble Pasada.....	76



4.7. Cálculos Para la Medición del Flujo Magnético.....	78
4.8. Medición con Sensor de Campo Magnético MELEXIS.....	79
4.9. Corriente de Soldadura.....	81
4.10. Magnetización de Materiales.....	84
Conclusiones	86
Recomendaciones	87
Bibliografía	88
Anexos	91



ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Introducción	
Figura 1. Descripción gráfica del proceso de soldadura SAW.....	2
Figura 2. Unión de tubería con soldadura en doble “V” mostrando el típico crecimiento columnar.....	3
Capítulo I. Revisión Bibliográfica	
Figura 1.1. Equipo de campo magnético de baja frecuencia en un proceso de colada continua horizontal.....	8
Figura 1.2. Microestructuras de colada HDC. a) Sin campo electromagnético, b) con campo electromagnético.....	9
Figura 1.3. Arreglo experimental para el estudio de la aleación AZ61 con influencia de un campo magnético.....	10
Figura 1.4. Perfiles de temperatura e intensidad del campo magnético aplicados en el estudio de la aleación AZ61.....	10
Figura 1.5. Microestructuras de la aleación de magnesio AZ61 sin aplicación de campo magnético a) Sección transversal, b) Sección longitudinal.....	11
Figura 1.6. Microestructuras de la aleación AZ61 con la aplicación de un campo magnético de 10 T.....	12
Figura 1.7. Base de la bobina electromagnética.....	13
Figura 1.8. Equipo experimental utilizado para la aplicación de campo magnético en el proceso GTA.....	13
Figura 1.9. a) Sin la aplicación de campo se muestra una estructura columnar dendrítica y basta, b) crecimiento columnar interrumpido con formación de pequeños granos. $B=15$ mT, $F=5$ Hz.....	13
Figura 1.10. a) Magnificación en los granos centrales del cordón, b) formación de granos equiaxiales con la aplicación de campo.....	13
Figura 1.11. Comparación entre una placa de 10mm de espesor a) y una de 3mm espesor con las mismas condiciones de campo magnético $B=25$ mT y $F=7.5$ Hz.....	13
Figura 1.12. a) Muestra sin agitación magnética y sin adición de titanio, mostrando crecimiento columnar basto; b) muestra con adición de titanio 2.5% peso Mg y 0.011% peso Ti; c) estrechamiento de la zona de grano equiaxial con 2.5% peso Mg y 0.011% peso Ti con campo magnético $B=17$ mT y velocidad < 5 mm/s.....	15
Figura 1.13. Microestructuras en la transformación de una estructura bainítica. a) y c) sin aplicación de campo magnético, b) y d) campo magnético aplicado 30T. Micrografía utilizando microscopio electrónico de transmisión.....	16



Capítulo II. Características del Proceso de Soldadura por Arco Sumergido.

Figura 2.1. Arco eléctrico cubierto de una capa de fundente granular, el cual se funde para formar una cubierta protectora sobre el cordón de soldadura fundido.. 18

Figura 2.2. Esquema de proceso de soldadura por arco sumergido..... 19

Figura 2.3. Representación de un fundente aglomerado..... 22

Figura 2.4. Clasificación de fundente - electrodo..... 23

Figura 2.5. Efecto en la variación de amperaje sobre la forma y penetración del cordón de soldadura..... 25

Figura 2.6. Efecto de la variación de voltaje sobre la forma y penetración del cordón de soldadura..... 26

Figura 2.7. Efecto en la velocidad de desplazamiento sobre la forma y penetración del cordón de soldadura..... 27

Figura 2.8. Una tira de cobre en un campo magnético \vec{B} transporta una corriente i . a) Una vez el campo magnético activado, b) Equilibrio magnético..... 30

Figura 2.9. Una partícula con carga positiva que pasa por una región donde hay campos eléctricos y magnéticos perpendiculares entre sí, experimenta fuerzas eléctricas y magnéticas opuestas \vec{F}_E y \vec{F}_B 31

Figura 2.10. Partícula cargada en movimiento en espiral dentro de un campo magnético no uniforme. El campo es mayor en los extremos izquierdo y derecho de la región que en el centro. Las partículas pueden quedar atrapadas, oscilando en espiral entre las regiones del campo fuerte en los extremos..... 31

Figura 2.11. La espira transporta corriente eléctrica. Las fuerzas magnéticas en ambos lados producen un par que tiende a girarla en sentido de las manecillas del reloj, vista desde arriba..... 32

Figura 2.12. Espira rectangular de alambre en un campo magnético uniforme, a) Fuerzas en los cuatro lados, b) El par tiende a girar la espira de modo que el vector unitario \hat{n} gire para alinearse con \vec{B} 33

Figura 2.13. a) Solenoide. b) Un anillo delgado de ancho dz genera un campo magnético $d\vec{B}$ en el punto P sobre el eje z 35

Figura 2.14. Solenoide mostrando las líneas de campo magnético..... 36

Figura 2.15. Líneas de campo magnético de un solenoide..... 37

Figura 2.16. Campo magnético a través de un camino cerrado. Rectángulo abcd, para calcular el campo magnético de un solenoide ideal largo..... 38

Figura 2.17. Generación de un campo magnético transversal entre dos placas mostrando la dirección del flujo magnético a través del material depositado..... 39

Figura 2.18. Aplicación del campo magnético axial, mostrando las direcciones de flujo magnético diferente al de la polaridad de las placas..... 40

Figura 2.21. Flujo resultante debido a la interacción simultánea de los campos magnéticos transversal y axial en un proceso de soldadura por arco sumergido..... 40



Capítulo III. Procedimiento Experimental

Figura 3.1. Diagrama en el que se muestra el procedimiento experimental planteado para el desarrollo del presente proyecto de investigación.....	42
Figura 3.2. Dimensiones de las probetas para magnetómetro.....	43
Figura 3.3 a y b. Diseño de junta de placas para unión por proceso de arco sumergido.....	45
Figura 3.4. Magnetómetro utilizado para la medición de magnetización de los materiales.....	48
Figura 3.5. Esquema de la detección de campo magnético emitido por el material con el sensor de efecto Hall.....	48
Figura 3.6. Diseño de junta utilizada para pruebas de soldadura con aplicación de campo magnético.....	50
Figura 3.7. Placas unidas con proceso SAW utilizando bisel de 120°; con aplicación de 3 líneas de campo magnético.....	51
Figura 3.8. Aplicación de la bobina electromagnética; en proceso SAW, a) SAW convencional, b) SAW no convencional.....	52
Figura 3.9. Circuito eléctrico formado en el proceso de arco sumergido.....	53
Figura 3.10. Direcciones de flujos de corriente ilustradas con flechas en azul y de campo magnético con flechas en amarillo.....	54
Figura 3.11. Campo magnético generado en el electrodo.....	55
Figura 3.12. Flujo magnético producido en las placas biseladas.....	55
Figura 3.13. Colocación del Gaussímetro Lutron 827 dentro de la bobina de campo magnético con 6 vueltas en el proceso de arco sumergido no convencional.	58
Figura 3.14. Circuito eléctrico del sensor MLX-90215.....	59
Figura 3.15. Sensor MLX-90215, a) Montado en baquelita, b) Colocado sobre una varilla de vidrio delante de la antorcha de soldadura.....	59
Figura 3.16. Arreglo experimental de los diferentes sensores de medición de campo magnético dentro de la bobina de 6 líneas.....	60

Capítulo IV. Análisis y Discusión de Resultados

Figura 4.1. Fotomicrografía del material base de acero API-5L-X60, 200 X, atacada con nital al 5%.....	62
Figura 4.2. a) Perfil de soldado por proceso AS convencional observando la estructura de granos columnares. b) Perfil soldado por AS no convencional aplicando 1.8 mT donde se aprecia la disminución del tamaño de grano columnar.	63
Figura 4.3 a). Cordón de soldadura sin campo magnético. Línea de fusión izquierda. b). Cordón de soldadura sin campo magnético. Línea de fusión derecha.	64



c) Cordón de soldadura con campo magnético, 1.3 mT. Línea de fusión izquierda. d) Cordón de soldadura con campo magnético, 1.3 mT. Línea de fusión inferior. Todas las muestras fueron atacadas con nital al 5%.....	
Figura 4.4. Microestructura del centro de cordones de soldadura, atacadas con Nital 5%. a) Cordón sin aplicación de campo magnético. b). Cordón con aplicación de campo magnético, 1.3 mT. c) Cordón con aplicación de campo magnético, 1.8 mT.....	66
Figura 4.5 a) Probeta sin campo, línea de fusión derecha del cordón superior, b). Probeta sin campo, línea de fusión derecha del cordón superior, c) Probeta con campo magnético 1.3 mT, línea de fusión derecha del cordón superior, d) Probeta con campo magnético 1.3 mT, interfase entre los cordones de soldadura. Todas las muestras de acero API 5LX60 fueron atacadas con nital al 5%.....	67
Figura 4.6. Probetas API 5LX60, con campo magnético 1.8 mT, atacadas con nital al 5%. a) Fotografía de la intersección de unión de los cordones de soldadura. b) Fotografía del cordón de soldadura inferior izquierdo.....	68
Figura 4.7. Probetas API-5L-X60. a) Fotografía sin campo magnético del centro del cordón, b) Fotografía del centro del cordón de soldadura con campo magnético de 1.3 mT.....	69
Figura 4.8. Centro de cordones de soldadura. a) Micrografía óptica con campo magnético de 1.3 mT, b) Micrografía óptica con campo magnético de 1.8 mT.....	70
Figura 4.9. Metalografías comparativas en cordones aplicados sobre placas de acero al carbono sin y con la aplicación de campo magnético de 1.3 y 1.8 mT. Se muestran las interfases a 50 y 100X de los cordones de soldadura mientras que a 200X se observa el centro de los cordones.....	71
Figura 4.10. Metalografías comparativas en uniones soldadas en acero API-5L-X60 sin y con la aplicación de campo magnético de 1.3 y 1.8 mT. Se muestran las interfases a 100X y 200X en los cordones mientras que a 50X se observa el centro de los cordones.....	73
Figura 4.11. Mediciones de microdureza a lo ancho de cordones de soldadura sobre placas de acero al carbono. 100 µm de distancia entre indentación, Carga 50g. a) Sin campo magnético, b) Campo magnético de 1.3 mT, c) Campo magnético de 1.8 mT.....	75
Figura 4.12. Medición de microdureza a lo ancho del cordón de soldadura en una junta en doble “V” de acero API-5L-X60, 150 µm de distancia entre indentación, Carga 50g. a) Sin campo magnético, b) Campo magnético de 1.3 mT, c) Campo magnético de 1.8 mT.....	77
Figura 4.13. Lectura emitida por el sensor de campo magnético Melexis en el proceso de soldadura AS no convencional, a) Campo magnético emitido por la bobina de 3 espiras, 1.4 mT promedio, b) Campo magnético emitido por la bobina de 6 espiras, 1.8 mT promedio.....	80
Figura 4.14. Lectura de flujo eléctrico durante el proceso de soldadura AS no convencional, a) Para probeta soldada con 1.3 mT, 382 A promedio, b) Para probeta soldada con 1.8 mT, 420 A promedio.....	82



Figura 4.15. Curvas de histéresis obtenidas en magnetómetro. a) Electrodo EM 13K, presentando una inductancia de 350 emu, b) Acero API 5L X60, presentando una inductancia de 275 emu..... 85

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Capítulo I. Revisión Bibliográfica	
Tabla 1.1. Análisis químico de aleaciones de aluminio con diferentes adiciones de Ti en las que se vieron reflejadas el rompimiento dendrítico con campo magnético.	14
Capítulo II. Características del Proceso de Soldadura por Arco Sumergido.	
Tabla. 2.1 Clasificación de electrodos de acero al carbono utilizados para arco sumergido.....	23
Capítulo III. Procedimiento Experimental	
Tabla 3.1. Composición química cuantitativa de material base API-5L-X60 y electrodo EM 13K	46
Tabla 3.2. Parámetros operativos finales para el desarrollo de pruebas de soldadura SAW.....	50
Tabla 3.3. Especificaciones generales y ajustadas para la adquisición de datos de dos señales distintas.....	57



RESUMEN

En el presente trabajo de tesis, se describe el efecto que tiene la agitación electromagnética producida por un campo magnético externo, debido a la aplicación de una bobina de alambre de cobre de 35.56 cm de diámetro, durante la soldadura de un acero API 5LX60 soldado por arco sumergido. Esta agitación, conlleva al refinamiento de grano de la microestructura columnar del cordón de soldadura, la cual es producida por el alto aporte térmico del mismo proceso.

Durante la experimentación, se realizó un monitoreo del proceso mediante sensores de alta precisión de efecto Hall, con los cuales se obtuvo información directa e indirecta que nos determinan la influencia del campo magnético sobre el refinamiento de la microestructura de grano columnar.

Para poder llevar a cabo las uniones soldadas en dos pasadas se utilizó una preparación de junta en doble “V”, con un ángulo de apertura de 120° y un talón de 0.16 cm a tope, en donde se depositaron los cordones de soldadura aplicándose un campo magnético axial a cada uno de ellos durante el desplazamiento del electrodo, con lo que se obtuvo un refinamiento de la microestructura comparado con respecto a la soldadura tradicional.

Los parámetros operativos de soldadura fueron: un voltaje de 32 Volts, amperaje de 350 Amperes y una velocidad de avance de 19 cm/min. Estos parámetros operativos fueron programados al equipo de soldar para todas las pruebas de unión realizadas, por lo tanto, la única variable que se tuvo en dichas pruebas fue la intensidad de campo magnético de 1.3 mT y 1.8 mT generado por una bobina de 3 y 6 espiras respectivamente.

Éste crecimiento columnar ha sido modificado en la parte central del cordón de soldadura y en la línea de fusión principalmente, mediante la agitación electromagnética producida por el campo magnético externo. El mayor refinamiento de la estructura dendrítica es obtenido con la exposición electromagnética de 1.8 mT.

INTRODUCCIÓN

El proceso de soldadura por arco sumergido (AS) produce la coalescencia de metales mediante la fusión por arco eléctrico producido entre un electrodo continuo de metal desnudo y la pieza de trabajo, donde el arco eléctrico se encuentra protegido por una capa de fundente que se funde por el calor aportado del arco eléctrico [1]. El proceso no aplica presión y el metal de aporte es obtenido del electrodo utilizado, tal como se observa en la Figura 1.

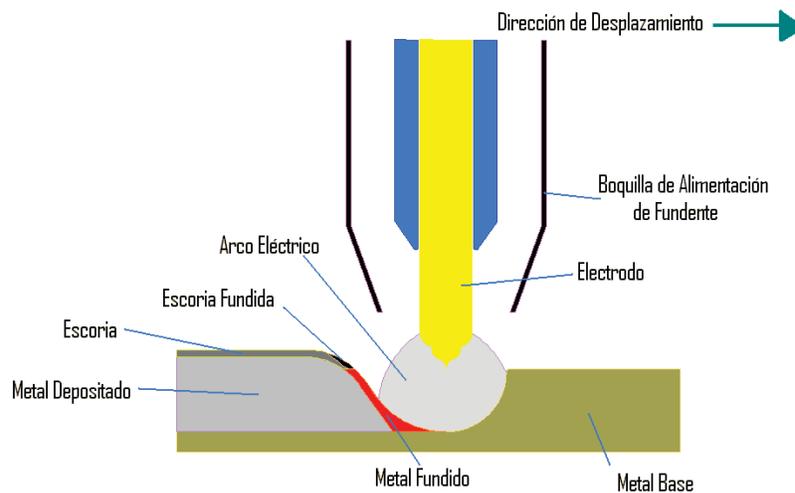


Figura 1. Descripción gráfica del proceso de soldadura SAW [2].

Es bien conocido que la cantidad de calor aportado en los procesos de soldadura por fusión y arco eléctrico, está determinado por el voltaje aplicado (U), la velocidad de avance de la fuente de calor (V), la eficiencia térmica del proceso (n) y la corriente del arco eléctrico (I).

$$\text{Calor de aporte, } CE = \frac{n \cdot U \cdot I}{V} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Típicamente, los procesos de soldadura de alto aporte térmico (electroescoria, electrogas y arco sumergido) producen una microestructura basta en el metal de la soldadura y uno de los procesos de mayor importancia en la soldadura de tuberías para el transporte de petróleo crudo es el proceso de arco sumergido (SAW), debido a sus buenas características de unión y buenas propiedades mecánicas obtenidas en las soldaduras. Sin embargo, existe un inconveniente, el cual es; que debido a su elevado calor de aporte, presenta una microestructura en la soldadura de granos columnares (Figura 2).

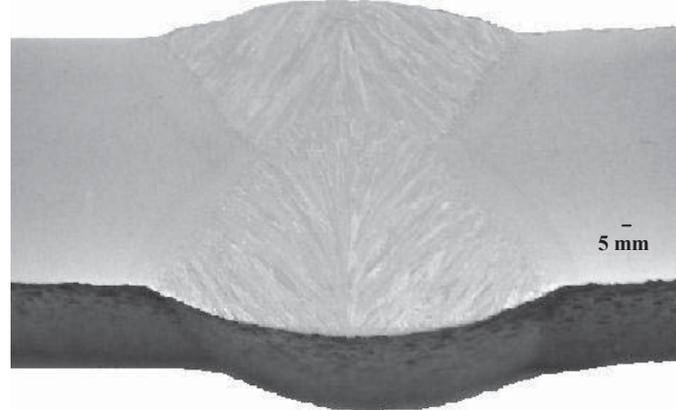


Figura 2. Unión de tubería con soldadura en doble “V” mostrando el típico crecimiento columnar [5].

El desarrollo del presente proyecto, está basado en la implementación de un campo magnético axial a la corriente de soldadura, el cual mediante la agitación electromagnética disminuye el tamaño de crecimiento columnar para obtener una estructura con granos más finos, tratando de mejorar así las propiedades mecánicas de la unión soldada.

El flujo magnético aplicado se obtiene mediante una bobina, la cual es montada con el mismo alambre de alimentación de corriente del equipo de soldadura. Esta bobina tiene un diámetro fijo de 35.56 cm, sin embargo; el número de vueltas del solenoide varía en 3 y 6 espiras, lo que produce un flujo magnético distinto de 1.3 y 1.8 mili Teslas promedio. Los flujos resultantes fueron comprobados con un gaussímetro, un sensor de efecto Hall y mediante la ecuación:

$$B = \mu_0 i n \quad \text{Ecuación 2.}$$

Los materiales utilizados fueron placas de acero al carbono y cortes de acero API-5L-X60 extraídas de tubería de 35.56 cm de diámetro y 1.27 cm de espesor.

Los resultados fueron los esperados, ya que en las probetas soldadas se obtuvo una disminución del crecimiento de grano columnar dendrítico.



JUSTIFICACIÓN

Una característica importante del proceso de soldadura por arco sumergido es la obtención de una estructura de grano columnar dendrítica, obtenida en la microestructura del cordón de soldadura debido al alto aporte térmico del proceso, por lo cual se obtienen granos bastos orientados en el sentido de la fuente de calor durante el proceso de solidificación, aunque el proceso de soldadura presenta buenas propiedades mecánicas en las uniones soldadas, estas pueden ser mejoradas aún más, obteniendo granos más finos.

Se sabe que una manera de incrementar las propiedades mecánicas de un acero sin agregar elementos de aleación o implementar un tratamiento térmico, es disminuyendo el tamaño de grano del material, lo cual se logra incrementando el número de núcleos en el proceso de solidificación y por lo tanto, esto se puede obtener mediante el rompimiento de los brazos dendríticos, debido a una agitación electromagnética producida por un campo electromagnético externo adicional al proceso de soldadura convencional.

La refinación de grano columnar dendrítico es el paso prioritario en el mejoramiento de las propiedades mecánicas y al cual se enfoca este proyecto de investigación; lo que es posible obtener al implementar una bobina utilizando los mismos cables de alimentación de corriente del proceso de arco sumergido, reduciendo costos en equipo adicional y también de procesos post soldadura como son los tratamientos térmicos.

OBJETIVO

Analizar el efecto que tiene la inducción de un flujo de campo magnético axial con intensidades de 1.3 mT y 1.8 mT generado por el paso de la corriente de soldadura en una bobina de alambre de cobre de 3 y 6 vueltas, sobre el crecimiento del grano columnar y el refinamiento de la microestructura, en la soldadura de un acero API-5L-X60 con doble pasada.



HIPÓTESIS

Se ha comprobado el refinamiento de grano en materiales que solidifican en estructuras dendríticas, mediante procesos de vibración mecánica, ultrasónica y agitación magnética; los cuales son utilizados durante el proceso de fabricación de aleaciones; sin embargo, no se ha llegado a utilizar en proceso de soldadura de alto aporte térmico como lo es el proceso de arco sumergido, por lo tanto, se cree que la aplicación de un campo magnético axial en un proceso de soldadura por arco sumergido es capaz de refinar la estructura dendrítica durante el proceso de solidificación. Este campo aplicado provoca una agitación (agitación electromagnética) la cual, al tiempo que van creciendo las dendritas, rompe las puntas de las mismas, las que actúan como agentes nucleantes para llevar a cabo una solidificación heterogénea en la pileta líquida de soldadura, y así, tener un grano mucho más fino en la solidificación final del proceso.



CAPÍTULO I

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA



1.1 ESTADO DEL ARTE

Para el desarrollo de este proyecto de investigación, la finalidad de aplicar un campo electromagnético axial externo a un proceso de soldadura convencional por arco sumergido; es poder lograr el refinamiento de grano columnar dendrítico en la microestructura de la unión soldada por efecto de una agitación electromagnética producida por una bobina. El refinamiento de grano en particular, lo ha implementado la industria metal-mecánica y de transformación con un proceso de tratamiento térmico postsoldadura, que consiste en aplicar un tratamiento de austenizado o revenido a toda la pieza que posteriormente es sometida a un proceso de enderezado, modificando así, la microestructura obtenida en el cordón de soldadura.

El flujo electromagnético generado y aplicado por la bobina, debe crear una agitación electromagnética suficiente para lograr en la pileta líquida de soldadura una turbulencia que impida o limite de cierta manera el crecimiento de las dendritas en la microestructura del cordón.

Durante el siglo pasado, se realizaron varios intentos por refinar la microestructura del cordón de soldadura producida por los procesos de alto aporte térmico, en los que se encuentra el de arco sumergido (SAW). Los métodos por los cuales se intento el refinamiento microestructural fueron:

- ⊕ Vibración mecánica
- ⊕ Vibración ultrasónica
- ⊕ *Agitación electromagnética*

Se tienen antecedentes de mejoramiento de la calidad en la colada continua de palanquillas [3] y microestructuras de aleaciones de aluminio 2024 [4] modificadas por la aplicación de campos magnéticos, en el caso de la palanquilla son dadas por la aplicación de flujos magnéticos producidos por una corriente eléctrica de 1200 A [5].

Aunque es bien sabido que en laboratorio no es sencillo obtener este flujo de corriente en un proceso de soldadura, las estructuras obtenidas en un proceso de colada continua y un proceso de soldadura por arco sumergido son similares; sin embargo, los resultados en las aleaciones de aluminio son más claras; ya que aplicando un campo magnético producido por una

corriente eléctrica de 200 A, se reduce la macro segregación en lingotes, aumenta la calidad superficial y la resistencia a la fractura [4].

Q. F. Zhu y colaboradores estudiaron el efecto de un campo electromagnético de baja frecuencia sobre el proceso de colada continua horizontal (Horizontal Direct Chill “HDC”) en lingotes de aleación de aluminio 2024 con sección transversal de 40 mm x 200 mm. Los resultados mostraron que el campo electromagnético de baja frecuencia puede refinar la microestructura y reducir la macrosegregación en el proceso de colada continua horizontal [6]. El equipo de HDC electromagnética que utilizaron es mostrado en la Figura 1.1. El molde del lingote de HDC está fabricado de aleación de aluminio y recubierto en el centro por un anillo de grafito. Una bobina de 60 espiras fabricada de cobre es colocada alrededor del molde.

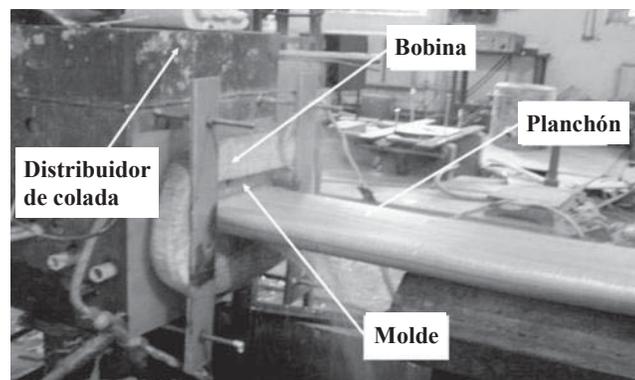


Figura 1.1. Equipo de campo magnético de baja frecuencia en un proceso de colada continua horizontal [6].

El procedimiento que utilizaron fue el siguiente: En un horno de resistencia eléctrica es fundido el aluminio, al cual se añaden Cu, Mn y Mg a una temperatura de 760 °C. El metal fundido se desgasifica, refina y limpio de escoria; es vaciado en el distribuidor del equipo, el cual después de 20 min, el metal se deja salir para producir planchón con y sin la aplicación de campo electromagnético; alternando una corriente de 40 Hz y 200 A en la bobina. A través de los experimentos mantuvieron una velocidad de colada de 240 mm/min y una temperatura de vaciado de 710 °C. Se utilizó aleación de aluminio 2024 con una composición química (wt pct) Cu 4.5, Mg 1.6 y Mn 0.6 y Al [6].

Bajo la influencia del campo electromagnético, los brazos dendríticos son rotos por la fuerza de convección, y las partículas rotas son centros de nucleación. Todo esto produce cambio en la microestructura mostrados en la Figura 1.2 [6].

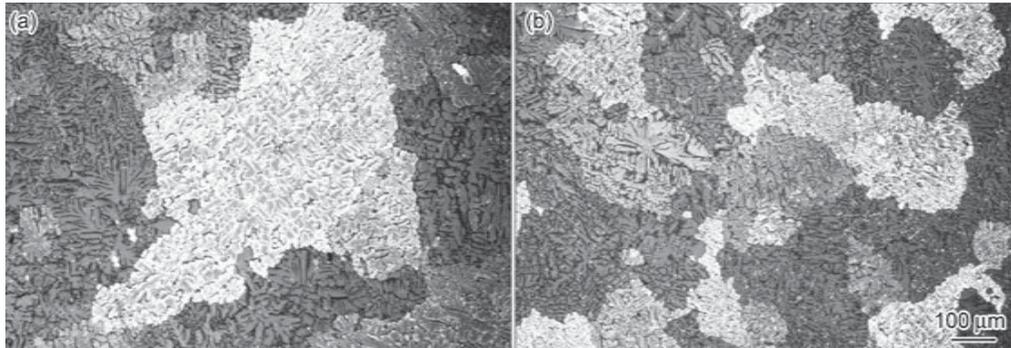


Figura 1.2. Microestructuras de colada HDC. a) Sin campo electromagnético, b) con campo electromagnético [6].

En los planchones del proceso HDC convencional se tienen granos grandes y más heterogéneos en la sección transversal, y los espacios interdendríticos son mucho más abiertos que en proceso con campo electromagnético. Estos efectos muestran que la aplicación de un campo magnético durante el proceso HDC refina la microestructura de colada [6].

Por otra parte el comportamiento de solidificación de una aleación de magnesio AZ61 fue estudiado bajo la influencia de un alto flujo de campo magnético por Canfeng Fang y colaboradores [4]. Los experimentos de solidificación fueron realizados bajo un campo magnético uniforme de 10 T, emitido por un superconductor magnético. La Figura 1.3 muestra esquemáticamente el arreglo experimental, formado por un material superconductor estático, un calentador, un crisol tipo tubo de ensaye, y un controlador de temperatura. En la posición vertical la densidad de flujo magnético pasa las 10 T, pero es controlado por la intensidad de corriente que se hace pasar al superconductor [4].

El calentador tiene 30 mm de diámetro interno y 460 mm de altura, es enfriado por una zapata haciendo circular agua en su interior. Las barras de aleación de magnesio AZ61 se maquinaron en especímenes de 9 mm de diámetro por 50 mm de longitud y fueron colocadas en crisoles para los experimentos. Los especímenes fueron colocados con sus ejes longitudinales paralelos

a la dirección del flujo magnético en el centro del superconductor magnético donde la densidad de flujo magnético es máxima y uniforme. La Figura 1.4 muestra que el calentamiento de los especímenes es de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ por encima del punto de fusión del metal de aleación, teniendo un tiempo de permanencia de 30 min, para después ser enfriados dentro del horno. La línea punteada muestra la variación de la densidad de flujo magnético durante los experimentos [4].

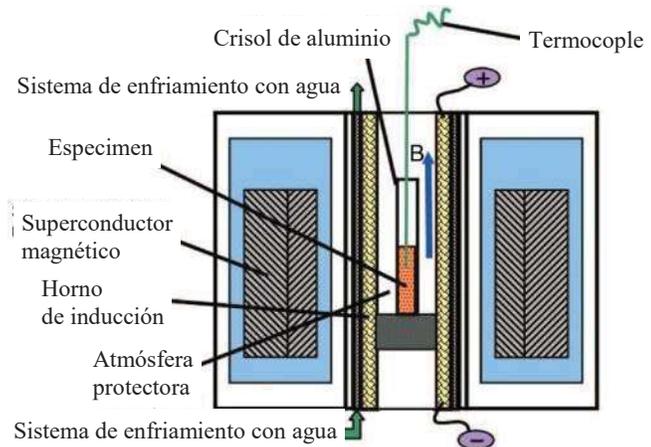


Figura 1.3. Arreglo experimental para el estudio de la aleación AZ61 con influencia de un campo magnético [4].

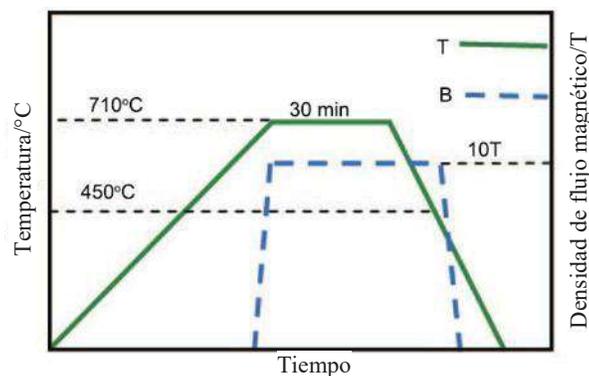


Figura 1.4. Perfiles de temperatura e intensidad del campo magnético aplicados en el estudio de la aleación AZ61 [4].

Bajo las condiciones sin campo magnético, el tamaño de grano es basto en la superficie y en toda la sección transversal, así como en la dirección longitudinal (Figura 1.5, a y b). Las microestructuras de aleación de magnesio AZ61 con la aplicación del campo magnético de 10 T (Figura 1.6) tienen un tamaño de grano relativamente pequeño en el centro de $158\text{ }\mu\text{m}$ hasta $208\text{ }\mu\text{m}$ en la superficie [4]. Este fenómeno es interpretado por un análisis de Wang [7], sobre la

nucleación homogénea dentro de un campo magnético. Esto es; que debido a la presencia de energía de un campo magnético, el valor absoluto de la energía libre de Gibbs del sistema y la energía de activación del sistema para la transferencia a través de la interface líquido-sólido es incrementado. Por esto se concluye que el porcentaje de nucleación se incrementa por la energía magnética [7].

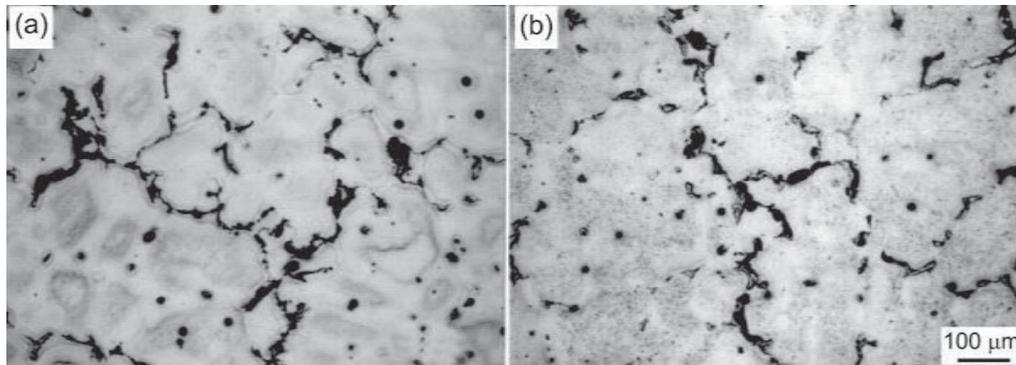


Figura 1.5. Microestructuras de la aleación de magnesio AZ61 sin aplicación de campo magnético a) Sección transversal, b) Sección longitudinal [4].

En lo referente a procesos de soldadura, se tienen estudios por M. G. Mousavi y colaboradores [8] en la aplicación de soldadura por arco de tungsteno y gas inerte (TIG) donde un campo electromagnético axial paralelo al eje del arco, genera fuerzas de Lorentz en la pileta líquida de soldadura como resultado de la interacción entre la corriente de soldadura y el flujo magnético. Esta fuerza externa aplicada, causa movimientos rotacionales en el metal líquido de la pileta de soldadura, los que pueden ser en el sentido de las manecillas del reloj o en contra, dependiendo de las direcciones del flujo magnético aplicado y la corriente de soldadura. El campo puede causar una mezcla sólido-líquido y permanecer con otras fracciones de sólido en el fluido, en el cual las dendritas equiaxiales comienzan a crecer [8].

Así también el fenómeno de fragmentación dendrítica en una soldadura GTA es resultado de la convección de la pileta líquida de soldadura, donde los brazos dendríticos pueden ser cortados por el flujo del fluido y arrastrados hacia la pileta líquida de soldadura; similarmente para el desprendimiento de granos, si no se disuelven, pueden actuar como sustratos para la nucleación de nuevos granos [9,10]. Para tal experimento se utilizó como pieza de trabajo una aleación de aluminio 6060 en forma de placas (25 X 10 cm) con espesores de 3 y 10 mm. La

composición nominal de esta aleación en % en peso es: 0.51 Mg, 0.38 Si, 0.21 Fe, 0.04 Cu, 0.02 Zn, 0.02 Ti [8]. Antes de efectuar la unión se llevó a cabo un proceso de tratamiento térmico T6, donde la bobina electromagnética consiste en un tubo de cobre de 25 mm de diámetro interno utilizado como carrete, en ambos extremos del tubo fueron soldadas placas de aleación de Al, mientras que un tubo de 8 mm de diámetro fue soldado alrededor de la placa inferior, haciendo fluir agua a través del tubo manteniendo la bobina fría protegiéndola del calor por radiación del arco (Figura 1.7) [8].

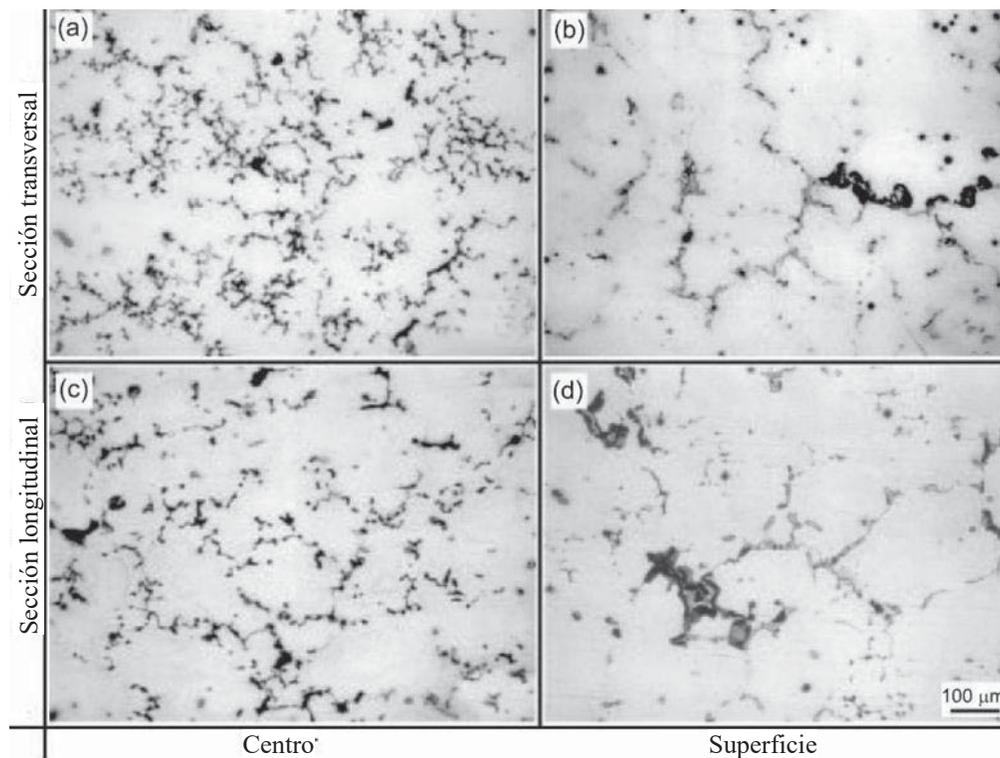


Figura 1.6. Microestructuras de la aleación AZ61 con la aplicación de un campo magnético de 10 T [4].

El tubo de 25 mm de diámetro fue recubierto con un material magnético para intensificar el campo magnético en la bobina. Un alambre de 5 mm de diámetro es enrollado alrededor del tubo de 25 mm el cual produce el campo magnético utilizando una fuente de potencia para proporcionar corriente alterna (Figura 1.8) [8].

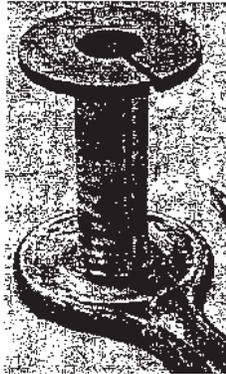


Figura 1.7. Base de la bobina electromagnética [8].

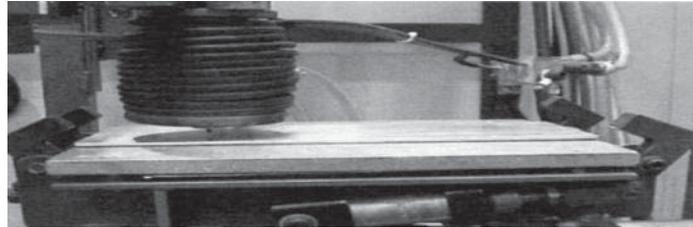


Figura 1.8. Equipo experimental utilizado para la aplicación de campo magnético en el proceso GTA [8].

Se utilizó una corriente de soldadura de 80 A para las placas de espesores delgados y de 120 A para los espesores de 10 mm. Para optimizar el refinamiento de grano por la aplicación del campo electromagnético se realizó una matriz de 5 x 5 [8].

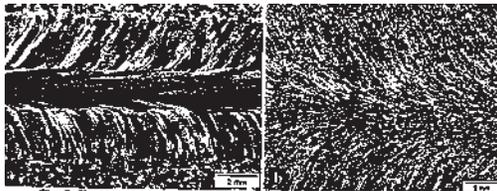


Figura 1.9. a) Sin la aplicación de campo se muestra una estructura columnar dendrítica y basta, b) crecimiento columnar interrumpido con formación de pequeños granos. $B=15$ mT, $F=5$ Hz [8].

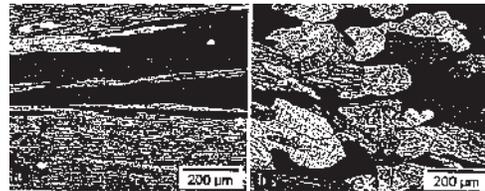


Figura 1.10. a) Magnificación en los granos centrales del cordón, b) formación de granos equiaxiales con la aplicación de campo [8].

Los mejores resultados en el refinamiento de grano fueron encontrados en placas de espesor de 3 mm, con aplicaciones de 5 Hz y 17 mT (Figura 1.9), ya que con aplicaciones menores de flujo magnético y frecuencias se llega a obtener casi la misma estructura columnar que la muestra sin campo. Sin embargo; se comparan las muestras de 3mm de espesor contra las de 10mm con los mismos parámetros de soldadura, encontrando menores efectos en el refinamiento de grano en las placas de 10mm de espesor (Figura 1.11) [8].

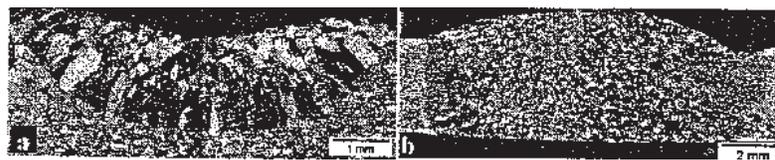


Figura 1.11. Comparación entre una placa de 10mm de espesor a) y una de 3mm espesor con las mismas condiciones de campo magnético $B=25$ mT y $F=7.5$ Hz [8].



En la misma línea de investigación B. P. Pearce y H. W. Kerr utilizaron tres muestras de una aleación de aluminio con 2.5 % Mg y diferentes concentraciones de Ti, destacando por sus resultados la muestra cuya composición química se presenta en la Tabla 1.1, cuyas dimensiones fueron de 50 x 125 mm x 1.5 mm de espesor [11].

Tabla 1.1. Análisis químico de aleaciones de aluminio con diferentes adiciones de Ti en las que se vieron reflejadas el rompimiento dendrítico con campo magnético [11].

% en peso							
Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	Al
<0.010	0.14	2.46	<0.010	<0.010	0.05	0.011	BA

Asimismo implementando el proceso GTA con corriente directa y el electrodo positivo de 4.5 mm de diámetro con un extremo hemisférico y argón como gas de protección con un flujo de 0.85 m³/h. La “tierra” estuvo siempre conectada a la pieza de trabajo donde inició el cordón de soldadura, tomando una posición del arco vertical con un espacio entre la pieza de trabajo y el electrodo de 1.5 mm, y velocidades de soldadura ajustadas para obtener una penetración completa; fue colocada una bobina debajo de la mesa de soldadura a lo largo del eje del cordón de soldadura. La energía de la bobina fue proporcionada por una fuente de potencia de frecuencia variable en conjunto con un amplificador de potencia, produce un campo magnético alterno paralelo al electrodo de soldadura [11].

El incremento de refinamiento de grano en las soldaduras GTA de aleaciones de aluminio; se deben a la adición de titanio el cual promueve una nucleación heterogénea en los granos de aluminio equiaxiales; demostrado que el ancho de la zona equiaxial incrementa cuando incrementa el contenido de titanio. El campo magnético produce un refinamiento parcial para un rango limitado bajo las condiciones de la soldadura, ya que con campo y sin campo magnético se producen granos columnares (Figura 1.12 a) [11]. Por lo tanto; la proporción en la adición de titanio y la aplicación del campo magnético axial producen diferentes grados de refinamiento de estructuras columnares en aleaciones de aluminio (Figura 1.12 b) [11].

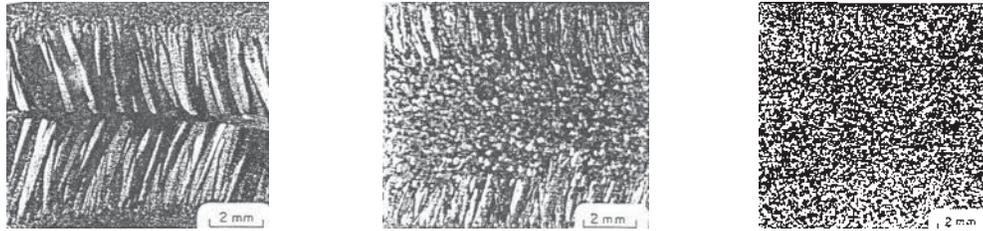


Figura 1.12. a) Muestra sin agitación magnética y sin adición de titanio, mostrando crecimiento columnar basto; b) muestra con adición de titanio 2.5% peso Mg y 0.011% peso Ti; c) estrechamiento de la zona de grano equiaxial con 2.5% peso Mg y 0.011% peso Ti con campo magnético $B= 17$ mT y velocidad < 5 mm/s [11].

R. A. Jaramillo y colaboradores [12] realizaron un estudio en el cambio microestructural en estado sólido de aceros bainíticos, los experimentos se implementaron mediante transformaciones continuas de enfriamiento con y sin aplicación de campo magnético. Los términos “FK” y “SK” se refieren a cinética rápida y lenta respectivamente (Fast – Slow Kinetic) [12]. El procedimiento experimental de dicha investigación consistió en llevar una transformación austenítica forzada imponiendo un campo magnético; basado en que la ferrita es ferromagnética por debajo de los 60°C y la austenita es paramagnética en aceros de baja aleación [12].

El campo magnético acelera la transformación austenítica, manifestándose de dos formas; promoviendo la formación de perlita (Figura 1.13, d) y la segunda, en alcanzar las temperaturas para la obtener martensita durante el enfriamiento (Figura 1.13, b) [12].

Los aceros se sometieron a un proceso de austenización completa a 1000°C y un proceso de enfriamiento continuo con aplicación magnética. Las dimensiones de los especímenes son de $12 \times 5 \times 2$ mm.

Para los experimentos se utilizó una resistencia magnética de 32 mm de diámetro produciendo un campo de 30 T controlado. Una de las claves del experimento fue la habilidad de calentar y enfriar las muestras dentro del campo magnético [12]. Las pruebas se realizaron en atmósfera controlada de argón para el proceso de calentamiento, y para el enfriamiento se introdujo gas helio para lograr el enfriamiento rápido [12].

Con la aplicación de campo magnético se obtuvo una transformación de la microestructura de bainita y martensita a perlita fina con un espaciado interlaminar de 50 nm aproximadamente (Figura 1.13, d) [12].

Se evaluó la microdureza de las muestras obteniendo en la aleación FK-NF 875 ± 51 HV (Figura 1.13, c), FK-30T 484 ± 13 HV, esto es porque la perlita es mucho más suave que la martensita. En la aleación SK-30T (875 ± 51 HV, (Figura 1.13, b) la dureza es ligeramente mayor que la aleación SK-NF (801 ± 54 HV, Figura 1.13, a) ya que las microestructuras son similares [12].

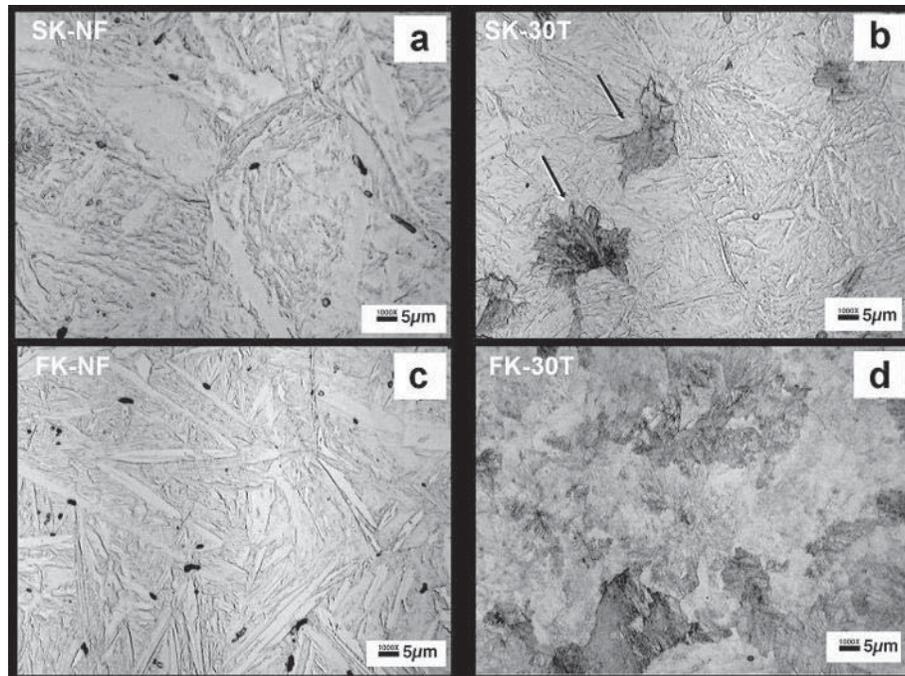


Figura 1.13. Microestructuras en la transformación de una estructura bainítica. a) y c) sin aplicación de campo magnético, b) y d) campo magnético aplicado 30T. Micrografía utilizando microscopio electrónico de transmisión [12].



CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO

2.1 PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO

La soldadura por arco sumergido (submerged arc welding; SAW) produce la coalescencia de metales mediante el arco producido entre un electrodo de metal desnudo y la pieza de trabajo. El metal en estado líquido depositado y el arco eléctrico, se encuentran “sumergidos” en una capa de fundente granular fusible sobre la pieza de trabajo. Este proceso no aplica presión, y el metal de aporte se obtiene del electrodo. El fundente desempeña un papel preponderante en la estabilidad del arco y las propiedades mecánicas y químicas del depósito de soldadura final se pueden controlar con el fundente. La calidad de la soldadura puede ser afectada por la forma como se maneja el fundente. En el proceso SAW es posible usar fuentes de potencia tanto de CA como de CC en la misma soldadura simultáneamente [1].

2.2. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

En la soldadura por arco sumergido el extremo de un electrodo continuo de alambre desnudo se inserta en una capa de fundente que cubre la unión que se va a soldar. Se inicia el arco mediante la técnica que consiste en que un tramo del electrodo que sobresale por el tubo de contacto y debido a la diferencia de potencial entre el electrodo y la placa a soldar, propicia el inicio del arco eléctrico, a este potencial se le conoce como potencial a circuito abierto, posteriormente la estabilidad del arco eléctrico se efectúa por los vapores del fundente y el voltaje de trabajo el cual es más bajo que el de circuito abierto. (Figura 2.1) [1, 13].

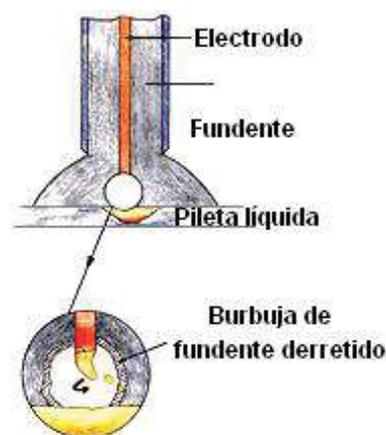


Figura 2.1. Arco eléctrico cubierto de una capa de fundente granular, el cual se funde para formar una cubierta protectora sobre el cordón de soldadura fundido. [13].

A continuación, el mecanismo alimentador del alambre se desplaza automáticamente a lo largo de la soldadura. En todo momento se alimenta fundente adicional delante del electrodo y a su alrededor, el cual se distribuye continuamente sobre la unión.

El calor producido por el arco eléctrico funde progresivamente parte del fundente, el extremo del alambre y los bordes adyacentes del metal base, creando así una pileta líquida debajo de una capa de escoria líquida. La pileta líquida cerca del arco presenta mucha turbulencia, y burbujas de gas que ascienden rápidamente a la superficie de la pileta líquida. El fundente flota sobre el metal fundido y protege por completo de la zona de soldadura. El manto de fundente que flota sobre la pileta líquida de soldadura evita que los gases atmosféricos contaminen el metal de soldadura y disuelve las impurezas del metal base y del electrodo que entonces flotan sobre la pileta líquida.

Al avanzar la soldadura a lo largo de la unión, el metal de soldadura primero y luego el fundente líquido se enfrían y solidifican, formando una franja de soldadura con una capa protectora de escoria encima.

Este proceso se ilustra en la Figura 2.2 [1].

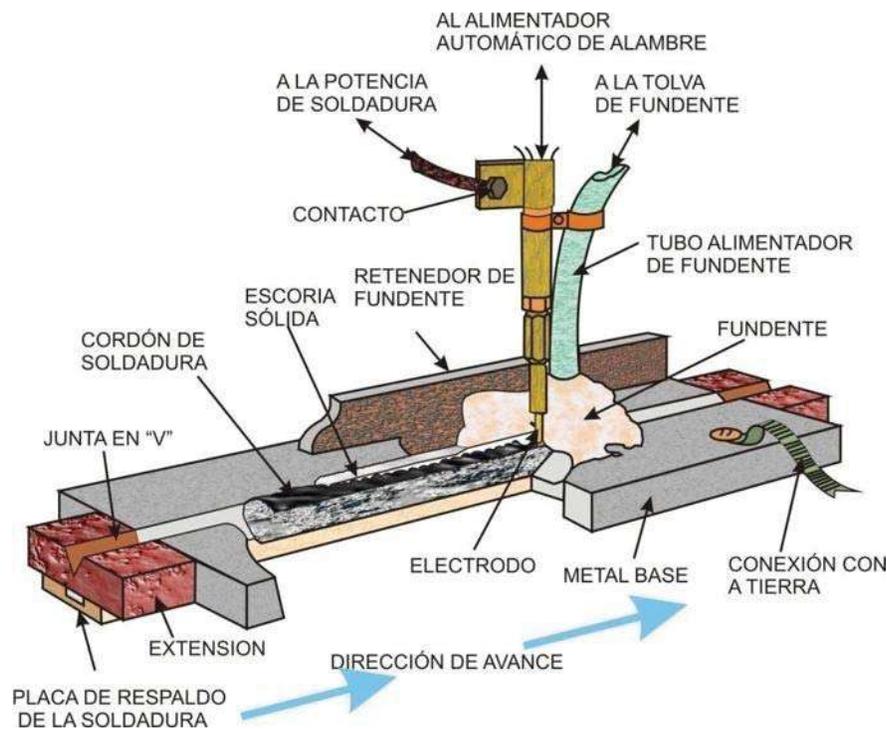


Figura 2.2. Esquema de proceso de soldadura por arco sumergido [1].



2.3. MÉTODOS GENERALES

La soldadura por arco sumergido se puede aplicar en tres modos distintos: automático, semiautomático y mecanizado, de los que solo se describe el último de éstos ya que fue el método implementado. En todos ellos es preciso colocar la pieza de trabajo de modo que el fundente y la piletta líquida de soldadura permanezcan en su sitio hasta solidificarse [1].

2.4. SOLDADURA MECANIZADA

Se emplea equipo que realiza toda la operación de soldadura, pero bajo la vigilancia de un operador que controla los parámetros de soldadura e inicia y finaliza la operación del equipo [1].

2.5. EQUIPO

El equipo requerido para arco sumergido consiste [1] en:

- ◆ Fuente de potencia.
- ◆ Sistema de suministro del electrodo.
- ◆ Sistema de distribución de fundente.
- ◆ Mecanismo de desplazamiento.
- ◆ Sistema de control de proceso.

2.6. MATERIALES SOLDABLES

La soldadura por arco sumergido se emplea para fabricar ensambles de casi todos los materiales ferrosos empleados en la actualidad, desde aceros al carbono hasta aleaciones especiales base níquel [1].

A continuación se muestran los materiales base que se pueden soldar:

Aceros al carbono; con contenido de carbono hasta de 0.29%.

Aceros de baja aleación (con resistencia máxima de hasta 690 MPa).

Aceros al cromo molibdeno (0.5% a 9% de Cr y 0.5% a 1% de Mo).

Aceros inoxidable.

Aleación con base níquel.



2.7. ELECTRODOS

Los electrodos para el proceso de soldadura por arco sumergido producen depósitos de soldadura que coinciden con los metales base de los diferentes tipos de aceros mencionados anteriormente. Estos electrodos son suministrados como alambre sólido desnudo y como electrodos compuestos de núcleo metálico, similares a los electrodos para soldadura por arco con núcleo de fundente [1].

Los electrodos de acero suelen estar cubiertos de cobre, excepto los destinados a materiales resistentes a la corrosión o a ciertas aplicaciones nucleares. Este recubrimiento prolonga la vida de almacenamiento, reduce el desgaste por rozamiento con el tubo de contacto y mejora la conductividad eléctrica [1].

El electrodo se selecciona conforme la influencia de las características mecánicas y/o la composición requerida del metal de soldadura.

Como elementos de aleación el carbono y el manganeso son los más comunes, adiciones de Si, Mo, Ni, Cr, Cu y otros son utilizados para incrementar la resistencia de la unión y controlar las características mecánicas bajas o de alta temperatura. Las adiciones del manganeso y del silicio ayudan a eliminar porosidad por CO [14].

2.8. FUNDENTES

Los fundentes protegen la pileta líquida de soldadura de la atmósfera al cubrir el metal con escoria fundida. Los fundentes limpian la pileta líquida de soldadura, modifican la composición química de la pileta líquida e influye en la forma en que adquirirá la forma de soldadura y en las propiedades mecánicas que tendrá [1, 13, 14].

Los fundentes son compuestos minerales granulares que se mezclan de acuerdo a diversas formulaciones y que dependiendo del método de fabricación elegido, los diferentes tipos de fundentes son aglomerados o mezclados por medios mecánicos [1].

Los fundentes de arco sumergido son seleccionados para satisfacer las propiedades mecánicas conjuntamente con un alambre en particular y también conociendo el funcionamiento para un uso en particular [14].

2.8.1. FUNDENTES AGLOMERADOS

En la fabricación de un fundente aglomerado, las materias primas se pulverizan, se mezclan en seco y se aglomeran con silicato de potasio, silicato de sodio o mezcla de ambos; una vez aglomerados (Figura 2.3), la mezcla húmeda se convierte en partículas y se aglomeran a una temperatura menor que la empleada con los fundentes fundidos. Las partículas se disgregan, se pasan por mallas para uniformar el tamaño [1, 13]. Este tipo de fundente puede contener partículas metálicas desoxidantes las que favorecen la buena operación sobre óxido y escamas metálicas [13].

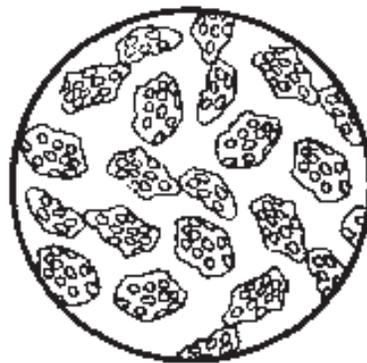


Figura 2.3. Representación de un fundente aglomerado [13].

Entre las ventajas de usar fundentes aglomerados son:

- ⊕ Fácil de añadir desoxidantes y elementos de aleación, estos últimos se agregan como ferroaleaciones o como metales elementales para producir aleaciones que no están fácilmente disponibles como electrodos, ó para jugar con la composición de la pileta líquida de soldadura.
- ⊕ El uso de una capa de fundente más gruesa al soldar.
- ⊕ Se pueden identificar por su color.

Algunas desventajas son:

- ⊕ Tendencia de algunos fundentes a absorber humedad.
- ⊕ Posible generación de gases a partir de la escoria fundida.
- ⊕ Posibles cambios en la composición del fundente debido a segregación o eliminación de partículas de grano fino.



2.9. ELECTRODOS Y FUNDENTES DE ACERO AL CARBONO

Los electrodos sólidos se clasifican con base a su composición química (Tabla 2.1); los fundentes se clasifican con base en sus propiedades del metal de soldadura que se obtienen cuando se usan con electrodos específicos.

Los aceros al carbono se definen como aceros que contienen adiciones de carbono de hasta 0.29%, de manganeso hasta 1.65%, de silicio de hasta 0.60% y de cobre hasta 0.60%, sin especificar intervalos para los otros elementos de aleación [1].

Según la AWS la clasificación de un fundente tiene la forma FXX- la cual es descrita en la Figura 2.4 donde se muestra el sistema de clasificación para las combinaciones fundente electrodo [14].

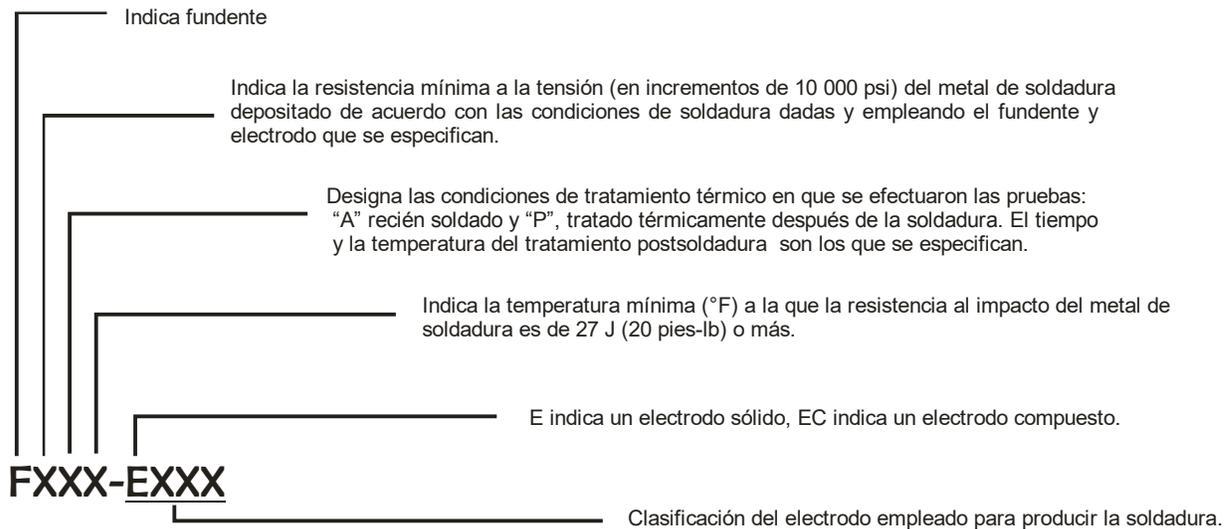


Figura 2.4. Sistema de clasificación para combinaciones fundente- electrodo [1].

Tabla. 2.1 Clasificación de electrodos de acero al carbono utilizados para arco sumergido [14].

ELECTRODOS DE ACERO AL CARBONO PARA SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO									
	ANÁLISIS QUÍMICO TÍPICO %							ESPECIFICACIONES APLICABLES	
	C	Mn	Si	S	P	Mo	OTROS	AWS/ASME	
								ESPECIFICACIÓN	CLASE
C Mn	0.11	1.00	0.45	0.025	0.015	---	---	A5. 17-69	EM 13K
	0.14	2.00	0.03	0.024	0.017	---	---	A5. 17-69	EH14
	0.11	0.45	0.03	0.024	0.017	---	---	A5. 17-69	EL12
	0.15	1.10	0.25	0.024	0.017	---	---	A5. 17-69 A5. 23-76	EM12K



2.10. VARIABLES DE OPERACIÓN

El control de las variables de operación en la soldadura por arco sumergido es indispensable para obtener tasas de producción elevadas y soldaduras de buena calidad. Las cuatro variables más importantes y en orden de importancia aproximado son [14]:

- ◆ Amperaje ó corriente de soldadura.
- ◆ Voltaje de soldadura.
- ◆ Velocidad de soldadura.
- ◆ Tipo de fundente.

El operador debe saber qué efecto tienen las variables sobre la acción de soldadura, y cómo deben ajustarse [1].

2.10.1. AMPERAJE DE SOLDADURA

El amperaje o corriente de soldadura; controla la rapidez con que se funde el electrodo, y por lo tanto la tasa de depositación, la profundidad de penetración y la cantidad de metal base fundido. Si la corriente es demasiado alta a una velocidad de desplazamiento determinada, la profundidad de fusión o penetración será excesiva. Una corriente alta también propicia el desperdicio de electrodos al reforzar demasiado la soldadura, lo que incrementa la contracción y causa mayores distorsiones [1, 14].

Si la corriente es demasiado baja, el resultado puede ser una penetración insuficiente o una fusión incompleta. El efecto de las variaciones de corriente se muestra en la Figura 2.5.

Tres reglas relativas a la corriente de soldadura son [1]:

- Si se incrementa la corriente aumenta la penetración y la tasa de fusión.
- Una corriente demasiado alta produce un arco que produce socavamiento; o una franja alta y angosta.
- Una corriente de soldadura demasiado baja produce un arco inestable.

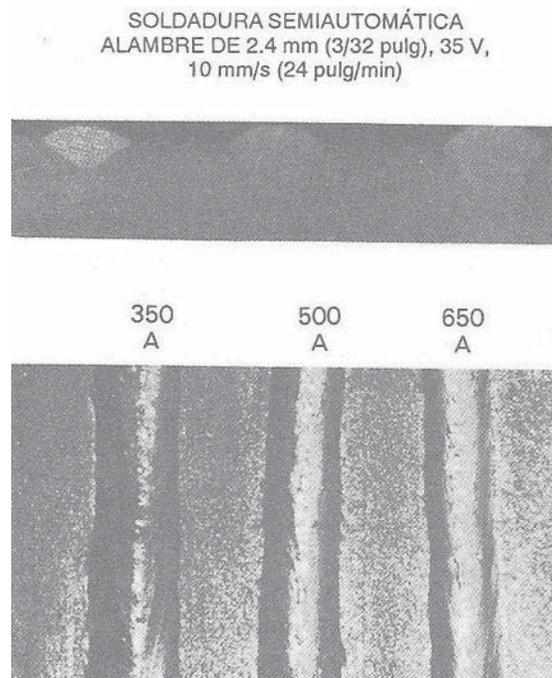


Figura 2.5. Efecto en la variación de amperaje sobre la forma y penetración del cordón de soldadura [1].

2.10.2. VOLTAJE DE SOLDADURA

El ajuste del voltaje de soldadura hace variar la longitud del arco entre el electrodo y el metal de soldadura fundido. Si se incrementa el voltaje global; la longitud del arco aumentará, si se reduce el voltaje global, el arco se hará más corto [1, 14].

El voltaje determina la sección transversal del cordón de soldadura y el aspecto externo del mismo (Figura 2.6). El voltaje determina principalmente la forma de la zona de fusión y refuerzo que tiene ésta [14].

Las consecuencias de incrementar el voltaje de soldadura manteniendo constantes la corriente y la velocidad de desplazamiento son:

- Un fondo de soldadura más plano y ancho.
- Mayor consumo de fundente.
- Tendencia a reducir la porosidad causada.
- Se realiza mejor una abertura de raíz excesiva cuando el acceso es deficiente.
- Mayor absorción de elementos de aleación de un fundente de aleación.

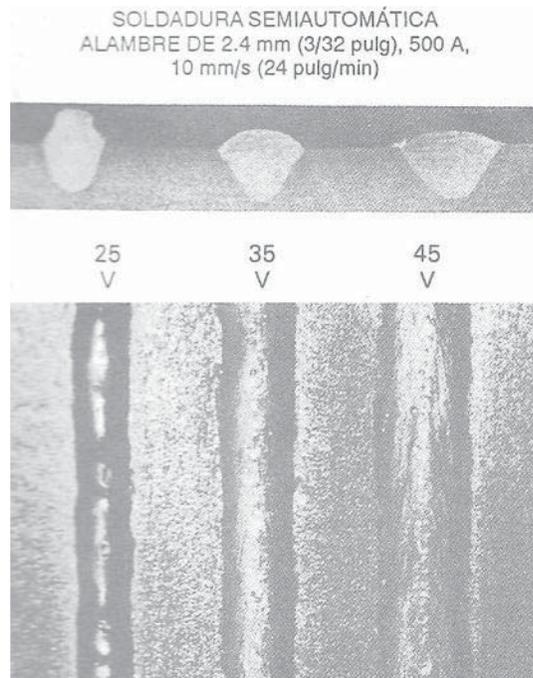


Figura 2.6. Efecto de la variación de voltaje sobre la forma y penetración del cordón de soldadura [1].

Las consecuencias de un voltaje de arco excesivo son:

- Cordón de soldadura ancho propenso al agrietamiento.
- Problemas para eliminar la escoria en las soldaduras.
- Soldadura cóncava que puede ser propensa al agrietamiento.
- Mayor socavamiento en los bordes de las soldaduras de filete.

Si se reduce el voltaje se obtiene un arco más rígido, con lo que se mejora la penetración en la soldadura y se reduce la tendencia al golpe de arco. Un voltaje demasiado bajo produce una franja alta y angosta que dificulta la eliminación de la escoria a lo largo de los bordes [1].

2.10.3. VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO

Con cualquier combinación de corriente y voltaje de soldadura, los efectos de alterar la velocidad de desplazamiento se ajustan a un patrón general.

Si se aumenta la velocidad [1, 14]:

- Se reduce el aporte térmico por unidad de longitud de soldadura.

- Se deposita menos metal de aporte por unidad de longitud de la soldadura, con lo que se reduce el refuerzo de esta última. De este modo, la franja de soldadura se hace más pequeña Figura 2.7.

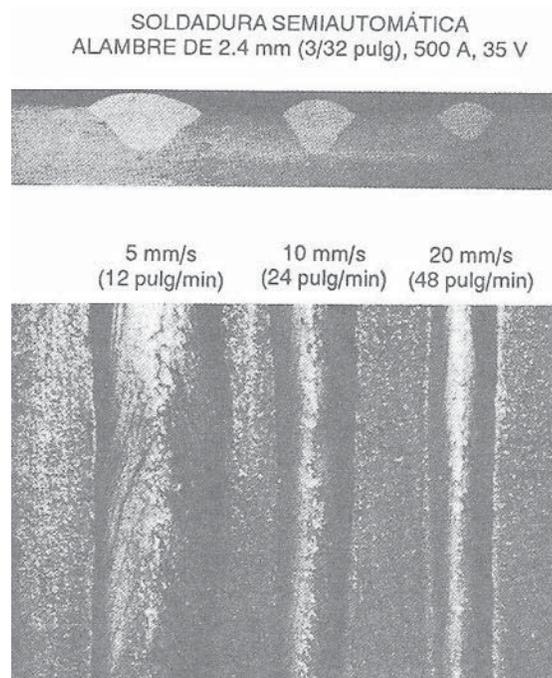


Figura 2.7. Efecto en la velocidad de desplazamiento sobre la forma y penetración del cordón de soldadura [1].

A velocidades excesivamente bajas; la fuerza de penetración del arco es amortiguada por el metal fundido. Una velocidad excesiva puede causar socavamiento [1].

Dentro de ciertos límites, la velocidad de recorrido puede ajustarse para controlar el tamaño y la penetración de la soldadura; en éste sentido está relacionado con la corriente y el tipo de fundente. Una velocidad de desplazamiento excesiva promueve el socavamiento, el golpe de arco, la porosidad y la irregularidad en la forma del cordón. Si la velocidad es relativamente baja, los gases tienen tiempo de escapar del metal fundido y se reduce la porosidad. Una velocidad demasiado alta produce:

- Una franja de forma convexa propensa al agrietamiento.
- Una exposición excesiva del arco.
- Una pileta líquida de soldadura grande que fluye alrededor del arco y produce una soldadura áspera con inclusiones de escoria.

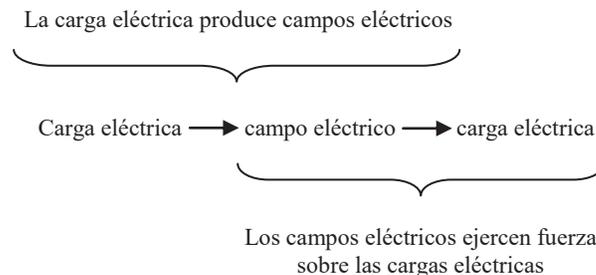


2.11. CAMPO MAGNÉTICO

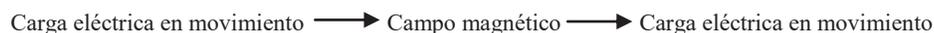
Realmente es difícil de explicar conjuntamente el fenómeno de un campo magnético y la influencia que tiene éste sobre la modificación microestructural de un material, haciendo que cambien las propiedades mecánicas de la unión.

Se define al proceso de arco sumergido **convencional**, a aquel proceso de soldadura que es aplicado sin campo magnético externo que influya directamente sobre la solidificación del metal de aporte; definiendo así al proceso de arco sumergido **no convencional**; a aquel proceso de soldadura al que se le aplica un campo magnético axial externo. Dentro del proceso de arco sumergido no convencional ocurren diferentes fenómenos físicos de carácter eléctrico, magnético y electromagnético los cuales son explicados de manera congruente a continuación.

Las cargas eléctricas generan un campo eléctrico, que ejerce una fuerza de origen eléctrico en otras cargas [15]:



De manera similar cargas eléctricas en movimiento generan un campo magnético y a su vez, el campo magnético ejerce una fuerza sobre ellas [15]:



No es tan simple determinar un campo magnético, ya que no es suficiente medir la fuerza magnética (\vec{F}) para una sola velocidad (\vec{v}), porque la dirección \vec{F} no indica la dirección del campo magnético representado por \vec{B} . Por lo que se obtiene primero la dirección del campo magnético \vec{B} , y una medición adicional es suficiente para calcular su magnitud [15].

La unidad en el SI es la tesla, de donde su sistema dimensional [15, 16]:



$$1\text{Tesla} = 1 \frac{\text{newton}}{\text{coulomb} \cdot \text{metro} / \text{segundo}} = \frac{\text{newton}}{\text{amper} \cdot \text{metro}}$$

Otra unidad más antigua es el Gauss y la cual no pertenece al SI, que sin embargo se sigue utilizando relacionado con la tesla por medio de [16]:

$$1\text{Tesla} = 10^4 \text{Gauss}$$

2.12. EFECTO HALL

En 1879 Edwin Hall demostró que los electrones de conducción en movimiento dentro de un conductor también pueden ser desviados por un campo magnético. El efecto Hall permite determinar tanto el signo y la densidad de los portadores de carga, así como también medir la magnitud de los campos magnéticos [15, 16].

Si se considera un material plano, con un ancho w que transporta una corriente i (Figura 2.8). La dirección de la corriente i es convencional, opuesta a la dirección de movimiento de los electrones. Se establece un campo magnético uniforme \vec{B} perpendicularmente al plano del material, colocándose entre los polos de un electroimán. Los portadores de carga (e^-) experimentan una fuerza magnética deflectora $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$ (Ec. 2.1). Nótese que las cargas positivas que se mueven en la dirección i experimentan una fuerza deflectora en la misma dirección [15].

La acumulación de carga a la derecha del material, que es el efecto Hall, produce un campo eléctrico a lo largo del material. En forma equivalente existe una diferencia de potencial $\Delta B_H = E_H \times w$ (Ec. 2.2); denominada diferencia potencial de Hall. El signo de ΔB_H nos da el signo de los portadores de carga y la magnitud de ΔB_H nos da su densidad (número por unidad de volumen). Por tanto, si los portadores son electrones, un exceso de cargas negativas se acumula a la derecha del material. Lo anterior puede parecer una conclusión obvia en el caso de los metales [15].

La conducción en el material se debe a los portadores de carga de determinado signo (+ ó -) que se mueven con la velocidad de deriva \vec{v}_d . A medida que los portadores se desplazan, son desviados a la derecha por la fuerza magnética. Al acumularse las cargas a la derecha, crean un campo eléctrico que opera dentro del conductor para oponerse al movimiento lateral de

portadores adicionales. Pronto se alcanza el equilibrio y el voltaje de Hall alcanza su máximo; la fuerza magnética lateral se equilibra por medio de la fuerza eléctrica lateral. En términos vectoriales la fuerza de Lorentz en los portadores de carga es cero [15].

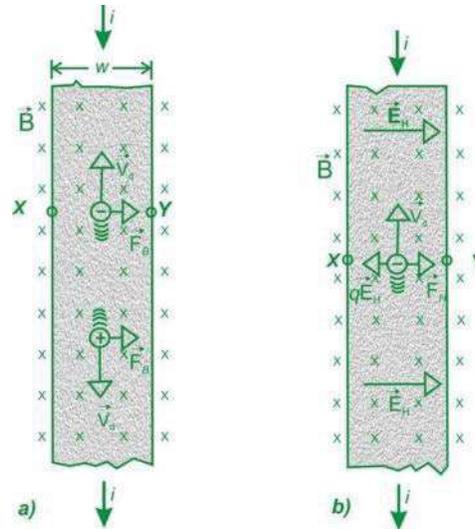


Figura 2.8. Una tira de cobre en un campo magnético \vec{B} transporta una corriente i . a) Una vez el campo magnético activado, b) Equilibrio magnético [15].

Si un campo eléctrico \vec{E} y campo magnético \vec{B} , actúan sobre una partícula cargada, la fuerza total en ella se expresa como $\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$ (Ec. 2.3); a esta fuerza se le llama fuerza de Lorentz. Esta es la suma de las fuerzas eléctrica y magnética que operan simultáneamente sobre una partícula cargada. La parte eléctrica actúa sobre cualquier partícula, sin importar si esta en reposo o en movimiento; la parte magnética actúa solo sobre partículas cargadas en movimiento [15, 16].

Una aplicación común de la fuerza de Lorentz ocurre cuando un haz de partículas con carga cruza una región donde los campos \vec{E} y \vec{B} son perpendiculares entre sí. Si \vec{E} , \vec{v} están orientados (Figura 2.9), la fuerza eléctrica $\vec{F}_E = q\vec{E}$ (Ec. 2.4), sigue la dirección contraria a la fuerza magnética $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$ (Ec. 2.5). Podemos ajustar los campos eléctrico y magnético hasta que la magnitud de las fuerzas sea igual, entonces de la fuerza de Lorentz será cero. [15]

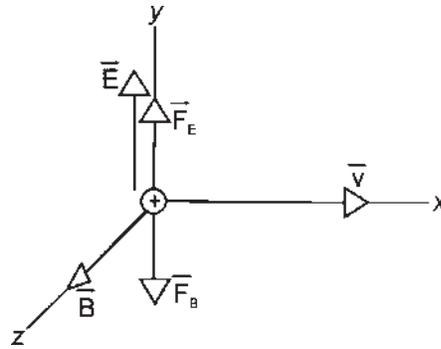


Figura 2.9. Una partícula con carga positiva que pasa por una región donde hay campos eléctricos y magnéticos perpendiculares entre sí, experimenta fuerzas eléctricas y magnéticas opuestas \vec{F}_E y \vec{F}_B [15].

2.13. EL ESPEJO MAGNÉTICO

Un campo magnético no uniforme puede emplearse para atrapar una partícula cargada en una región en el espacio (Figura 2.10). Las partículas cargadas tienden a moverse en círculos alrededor de la dirección del campo. Supóngase que empieza a desplazarse lateralmente hacia la derecha; así, el movimiento es el de una hélice, como un resorte enrollado. El campo aumenta cerca de los bordes de la “botella magnética” y la fuerza tiene un componente pequeño que apunta al centro de la región y que invierte la dirección del movimiento de las partículas haciendo que se muevan en espiral en dirección contraria, hasta que terminan por reflejarse en el extremo opuesto. Las partículas continúan oscilando confinadas entre las dos regiones del campo alto [15].

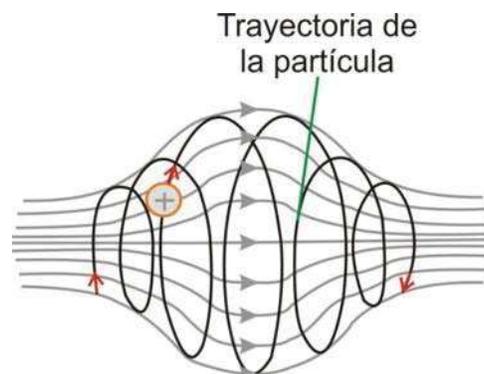


Figura 2.10. Partícula cargada en movimiento en espiral dentro de un campo magnético no uniforme. El campo es mayor en los extremos izquierdo y derecho de la región que en el centro. Las partículas pueden quedar atrapadas, oscilando en espiral entre las regiones del campo fuerte en los extremos [16].

2.14. EL PAR EN UNA ESPIRA DE CORRIENTE.

En un motor eléctrico, se pone una espira de alambre que transporta una corriente en un campo magnético (Figura 2.11). La espira puede girar alrededor de un eje vertical, cuando su orientación es tal que el campo se encuentre entre el plano de la espira, las fuerzas magnéticas en los extremos cortos son cero ya que \vec{B} y \vec{L} son paralelos. En los extremos largos, las fuerzas son iguales solo que apuntan en dirección contraria, de modo que la fuerza neta en la espira es cero. Sin embargo, hay un par neto que tiende a girarla alrededor de su eje en dirección de las manecillas del reloj cuando se ve desde arriba. En este modelo se muestra como la combinación de una corriente eléctrica y de un campo magnético puede producir el movimiento rotatorio del motor eléctrico [15].

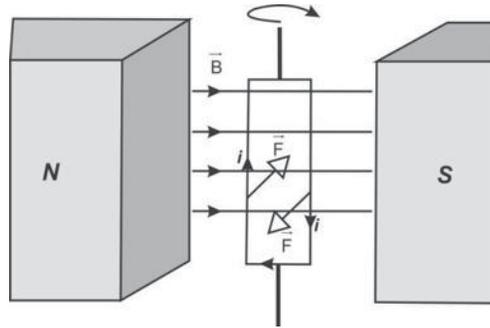


Figura 2.11. La espira transporta corriente eléctrica. Las fuerzas magnéticas en ambos lados producen un par que tiende a girarla en sentido de las manecillas del reloj, vista desde arriba [15].

En la Figura 2.12 se ve una espira rectangular de longitud a y de ancho b que lleva una corriente i . Su plano forma un ángulo θ con el eje x . Como un ejemplo simplificado se muestra solo la espira, no así los alambres necesarios para introducir y sacar la corriente de la espira. Suponiendo un campo magnético uniforme y que sigue la dirección y ; el eje z se halla en el plano de la espira. Se calcula la fuerza en ambos lados de la espira, para conocer la fuerza y el par neto sobre ella.

Los lados 1 y 3 son perpendiculares al campo; si decidimos que el vector \vec{L} sigue la dirección de la corriente, \vec{L} será perpendicular a \vec{B} . Empleando la siguiente ecuación para la magnitud de fuerzas [15]:

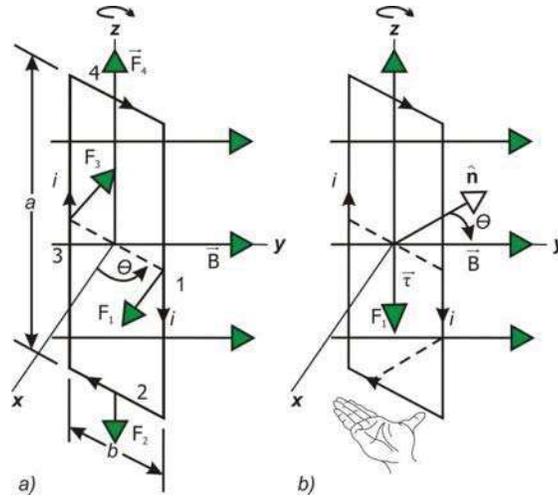


Figura 2.12. Espira rectangular de alambre en un campo magnético uniforme, a) Fuerzas en los cuatro lados, b) El par tiende a girar la espira de modo que el vector unitario \hat{n} gire para alinearse con \vec{B} [15].

$$F_1 = F_3 = iaB$$

Puesto que los lados 1 y 3 tienen la longitud a .

Las fuerzas son paralelas al eje x de la Figura 2.12, con \vec{F}_1 en la dirección x positiva y \vec{F}_3 en la dirección x negativa. El ángulo entre el lado 2 del alambre y \vec{B} es $\theta + 90^\circ$. Por medio de la siguiente ecuación se obtiene la fuerza en éste segmento la cual es:

$$F_2 = ibB\text{sen}(\theta + 90^\circ) = ibB\text{cos}\theta \quad \text{Ecuación 2.6}$$

En la dirección negativa z .

De manera similar, la fuerza del lado 4 es:

$$F_4 = ibB\text{sen}(90^\circ - \theta) = ibB\text{cos}\theta \quad \text{Ecuación 2.7}$$

En la dirección positiva z .

Para calcular la fuerza total en la espira sumamos las fuerzas de los cuatro lados, tomando en cuenta su magnitud y dirección. La suma de F_2 y F_4 es cero porque tienen la misma magnitud y dirección contraria, lo mismo sucede con F_1 y F_3 . La fuerza neta en la espira es cero, así que su centro de masa no se acelera bajo la acción de la fuerza magnética, por ser uniforme el campo, en caso de no serlo; el campo en parejas opuestas de los lados 1 y 3 o de los lados 2 y 4 podría tener diferente magnitud y la magnitud de las fuerzas entre ellos podría no ser igual.

Aun cuando la fuerza neta es cero, el par neto no lo es. Las fuerzas F_2 y F_4 se hallan a lo largo del eje z y, tienen la misma línea de acción, no contribuyen al par neto. Sin embargo, F_1 y F_3



no tienen la misma línea de acción y tienden a girar la espira en dirección de las manecillas del reloj alrededor del eje z , visto desde arriba. En relación con éste eje, las fuerzas F_1 y F_3 tienen brazos de momento de $(\frac{b}{2})\text{sen}\theta$, y por ello, la magnitud par total es:

$$\tau = 2(iaB)\left(\frac{b}{2}\right)\text{sen}\theta \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Donde entra el factor 2 porque ambas fuerzas contribuyen al par.

El par alcanza su magnitud máxima cuando la espira está orientada de modo que el campo magnético se encuentra en el plano de la espira ($\theta = 90^\circ$). El par es cero cuando el campo magnético es perpendicular al plano de la espira ($\theta = 0$).

Si la espira estuviera constituida como una bobina de N vueltas de alambre, la siguiente ecuación nos da el par en cada vuelta y par total de la bobina será:

$$\tau = NiA\text{Bsen}\theta \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Donde se ha sustituido por A , la superficie de la espira, en el producto ab . La ecuación 2.10 es válida para todas las espiras planas de superficie A , sean o no rectangulares.

La Figura 2.12 b es otra manera de interpretar el par en la espira actual. Por medio de la regla de la mano derecha, definimos un vector unitario \hat{n} perpendicular al plano de la espira. La dirección de \hat{n} se determina sosteniendo la mano derecha de modo que los dedos sigan la dirección de la corriente: el pulgar indica la dirección de \hat{n} . El par trata de girar la espira para que \hat{n} quede alineado con \vec{B} . El par que sigue la dirección negativa z (Figura 2.12 b), aparece en la dirección determinada por el producto cruz $\hat{n} \times \vec{B}$. Con $|\hat{n} \times \vec{B}| = B\text{sen}\theta$, podemos escribir la Ecuación 2.9 en la forma vectorial como [15]:

$$\vec{\tau} = NiA\hat{n} \times \vec{B} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

2.15. CAMPO MAGNÉTICO EN UN SOLENOIDE

Una manera práctica de conseguir un campo magnético uniforme consiste en servirse de un solenoide (Figura 2.13 a), que es un devanado helicoidal en un núcleo cilíndrico. El alambre transporta una corriente i y están enrollados en forma compacta, así que hay n devanados por unidad de longitud en el solenoide.

La Figura 2.13 b contiene la geometría con que se calcula el campo magnético en el eje. Suponemos que el eje de simetría es z , con el origen en el centro del solenoide. Para

determinar el campo en el punto P , que está a una distancia d del origen a lo largo del eje z y suponiendo que los devanados son tan estrechos que pueden considerarse espiras circulares de alambre paralelas al plano xy . El solenoide tiene N vueltas de alambre en una longitud L , de modo que el número de vueltas por unidad de longitud es $n = \frac{N}{L}$ [15].

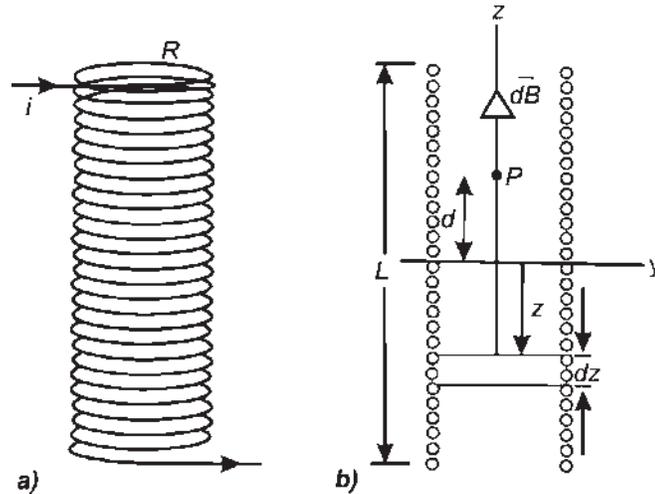


Figura 2.13. a) Solenoide. b) Un anillo delgado de ancho dz genera un campo magnético \overline{dB} en el punto P sobre el eje z [15].

Considerando un anillo delgado de ancho dz . El número de vueltas en ese anillo es $n dz$ y, por tanto la corriente total que transporta es $ni dz$, puesto que cada vuelta tiene una corriente i . Empleando la siguiente ecuación (Ec. 2.10) el campo P proveniente del anillo es [15]:

$$B = \frac{\mu_0(ni \cdot dz)R^2}{2[R^2 + (z-d)^2]^{3/2}} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Donde $z - d$ es la posición del anillo en relación con el punto P . Integrando la expresión de $z = -\frac{L}{2}$ a $z = +\frac{L}{2}$ se puede determinar el campo total producido por los anillos. La evaluación de la integral queda [15]:

$$B = \frac{\mu_0 ni R^2}{2} \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \frac{dz}{[R^2 + (z-d)^2]^{3/2}}$$

$$B = \frac{\mu_0 ni}{2} \left(\frac{\frac{L}{2} + d}{\sqrt{R^2 + (\frac{L}{2} + d)^2}} + \frac{\frac{L}{2} - d}{\sqrt{R^2 + (\frac{L}{2} - d)^2}} \right) \quad \text{Ecuación 2.12}$$



La expresión anterior indica el campo en el eje del solenoide a una distancia d de su centro, y es válida para todos los puntos del interior y el exterior del solenoide. La dirección del campo se determina aplicando la regla de la mano derecha [15, 16].

En un solenoide ideal, la longitud L es mucho mayor que el radio R . para este caso la ecuación 2.12 queda así:

$$B = \mu_0 ni \quad (\text{Solenoides ideal}) \quad \text{Ecuación 2.13}$$

La ecuación 2.13 ofrece el campo de un solenoide ideal en todos los puntos interiores, tanto fuera del eje como en él; el campo es cero en todos los que se encuentran fuera del solenoide.

El campo en el interior del solenoide se estudia en la Figura 2.14, donde se observa que muy cerca del alambre, el comportamiento magnético es casi el de un alambre largo y recto donde las líneas de campo forman círculos concéntricos cerca de él. El campo tiende a cancelarse cerca de los puntos situados entre alambres vecinos. La figura muestra que los campos provenientes de las espiras individuales del alambre se combinan para formar líneas que son más o menos paralelas al eje del solenoide en su interior. El campo se vuelve uniforme y paralelo al eje en el caso límite del solenoide ideal [15, 16].

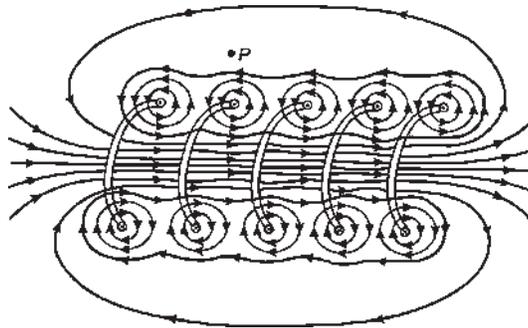


Figura 2.14. Solenoide mostrando las líneas de campo magnético [15, 16].

En los puntos exteriores, entre ellos el punto P en la Figura 2.14 el campo producido por la parte superior de las vueltas del solenoide (marcado \circ porque la corriente esta hacia afuera de la página) apunta a la izquierda y tiende a cancelar el campo debido a las vueltas de las partes inferiores del solenoide (marcada \bullet porque la corriente se dirige al interior de la página). El campo fuera del solenoide es cero en el caso límite del solenoide ideal. La Figura 2.15 muestra las líneas del campo magnético no ideal. En el espaciamiento de las líneas de campo se aprecia que el campo exterior al solenoide es mucho más débil que el que se halla en el interior, el cual es casi uniforme en la sección transversal [15, 16].

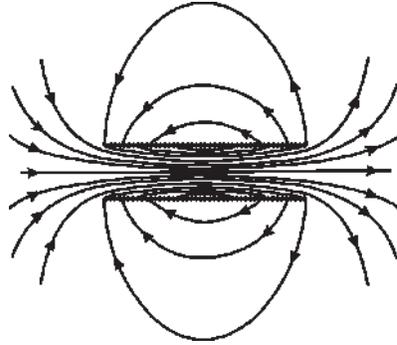


Figura 2.15. Líneas de campo magnético de un solenoide [15, 16].

2.16. LEY DE BIOT-SAVART Y AMPÈRE

El campo magnético es producido por la corriente eléctrica que circula por un conductor. Para determinar la expresión del campo magnético producido por una corriente se emplean dos leyes: la ley de Biot-Savart y la ley de Ampère.

La ley de Biot-Savart calcula el campo producido por un elemento dl de la corriente de intensidad I en un punto P distante r de dicho elemento [15, 17, 18].

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \oint \frac{\hat{u}_l \times \hat{u}_r}{r^2} dl \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Salvo en el caso de espira circular o de una corriente rectilínea, la aplicación de la ley de Biot-Savart es muy complicada. Mediante la ley de Biot-Savart se calcula el campo producido por una espira circular en un punto de su eje. Se supone que el solenoide de longitud L tiene N espiras muy apretadas, y luego, se calcula la contribución de todas las espiras al campo en un punto del eje del solenoide.

Si suponemos que el solenoide es muy largo y estrecho, el campo es aproximadamente uniforme y paralelo al eje en el interior del solenoide, y es nulo fuera del solenoide. En esta aproximación es aplicable la ley de Ampère [15, 17, 18].

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I \quad \text{Ecuación 2.15}$$

El primer miembro, es la circulación del campo magnético a lo largo de un camino cerrado, y en el segundo miembro el término I se refiere a la intensidad que atraviesa dicho camino cerrado.

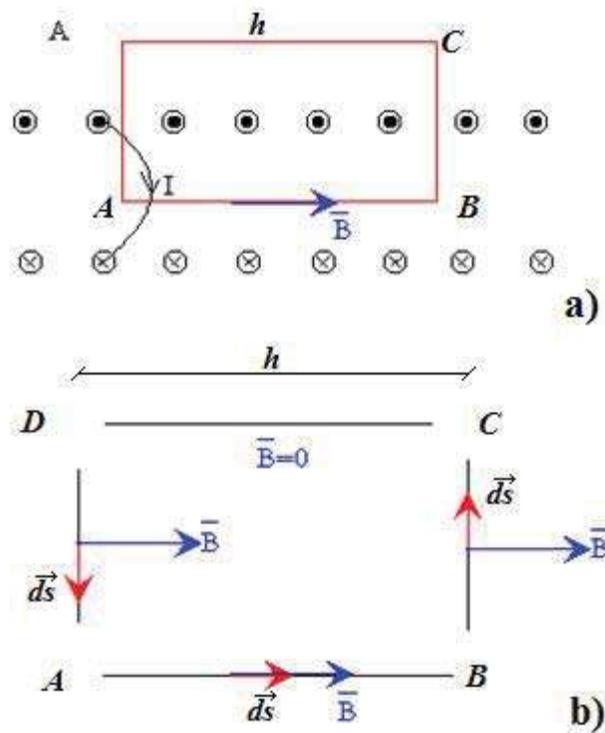


Figura 2.16. Campo magnético a través de un camino cerrado. Rectángulo $abcd$, para calcular el campo magnético de un solenoide ideal largo [15, 17, 18].

Para determinar el campo magnético, aplicando la ley de Ampère, tomamos un camino cerrado $ABCD$ (Figura 2.16) que sea atravesado por una corriente. La circulación es la suma de cuatro contribuciones, una por cada segmento de trayectoria [15, 17, 18].

$$\oint \vec{B} d\vec{s} = \int_A^B \vec{B} d\vec{s} + \int_B^C \vec{B} d\vec{s} + \int_C^D \vec{B} d\vec{s} + \int_D^A \vec{B} d\vec{s} \quad \text{Ecuación 2.16}$$

La primera integral de la derecha es Bh , donde B es la magnitud de \vec{B} en el interior del solenoide, y h la longitud arbitraria de la trayectoria de A a B . Nótese que la trayectoria AB es paralela al eje del solenoide, aunque no necesariamente coincide con él. La segunda y la cuarta integrales de la ecuación 2.16 son cero, porque en todos los elementos de estas trayectorias \vec{B} forma ángulos rectos con la trayectoria (en los puntos dentro del solenoide) o es cero (en los puntos afuera). En ambos casos, $\vec{B} \cdot d\vec{s}$ es cero y las integrales se cancelan. La tercera, que abarca la parte del rectángulo situada fuera del solenoide, es cero porque hemos tomado \vec{B} como cero en todos los puntos externos de un solenoide ideal [15, 17, 18].



En la totalidad de la trayectoria rectangular, $\oint \vec{B} * d\vec{s}$ tiene el valor Bh . La corriente neta i que pasa por la espira rectangular amperiana no es igual a la corriente en el solenoide, porque los devanados cruzan la espira más de una vez. Sea n el número de vueltas por unidad de longitud, entonces nh es el número de vueltas dentro de ella y la corriente total, que cruza la espira rectangular amperiana de la Figura 2.16, es nhi . Entonces la ley de Ampère se expresa así:

$$Bh = \mu_0 nhi \quad \text{ó} \quad Bh = \mu_0 ni \quad \text{Ecuación 2.17}$$

El resultado anterior (Ecuación 2.17) concuerda con la Ecuación 2.13, que se refería solo a los puntos en el eje central del solenoide. Podemos colocar la línea AB en la Figura 2.16, a cualquier distancia del eje, por ello, se concluye que el campo magnético dentro de un solenoide ideal es uniforme en su sección transversal [15, 17, 18].

En las siguientes figuras se describe como una interacción de un campo axial afecta a un campo magnético perpendicular en dirección a él.

En la Figura 2.17 se muestra el paso de un flujo magnético entre dos materiales que adquieren una polaridad Norte – Sur pasando por un tercer material situado en medio de los dos primeros, esto, aplicado al proceso de soldadura por arco sumergido, se puede representar como las dos placas biseladas adquiriendo polaridad una vez que se hace pasar corriente a través de ellas.

El material que se encuentra en medio de las placas está libre de movimiento y no necesariamente tiene que tener la forma anillada representada en la figura, por lo tanto, este anillo puede representar de cierta manera el material depositado en estado líquido, el cual por fracciones de segundo se encuentra libre de movimiento antes del inicio de la solidificación.

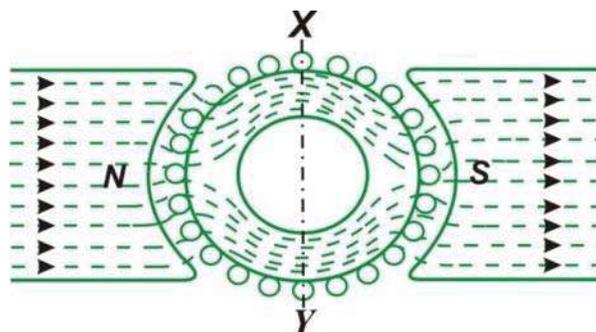


Figura 2.17. Generación de un campo magnético transversal entre dos placas mostrando la dirección del flujo magnético a través del material depositado [2,19].

Existen dos situaciones en la siguiente la Figura 2.18, una vez que se hace la depositación del material de aporte y el cual al mismo tiempo se encuentra generando un campo magnético axial; estas son:

Al momento de la depositación del material de aporte (material del electrodo), este, se encuentra con una carga eléctrica, lo que en sus átomos en estado líquido producen pequeños campos magnéticos.

Una vez que el flujo magnético pasa por el material líquido situado en medio de las placas (ilustrado como un anillo en la figura), éste trata de adquirir una orientación conforme a la polaridad de sus átomos.

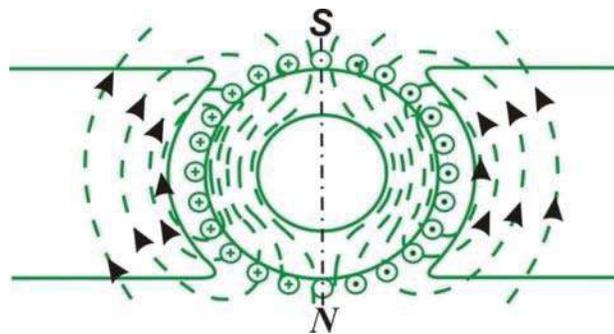


Figura 2.18. Aplicación del campo magnético axial, mostrando las direcciones de flujo magnético diferente al de la polaridad de las placas [2,19].

En la Figura 2.19 se esquematiza la interacción de dos campos magnéticos perpendiculares, ocasionando una distorsión en la dirección de los flujos magnéticos emitidos por los materiales involucrados, este cambio de dirección de flujo magnético ocasiona el movimiento del anillo mostrado en la figura, el cual trata de tomar la dirección del flujo magnético generado por las placas Norte-Sur.

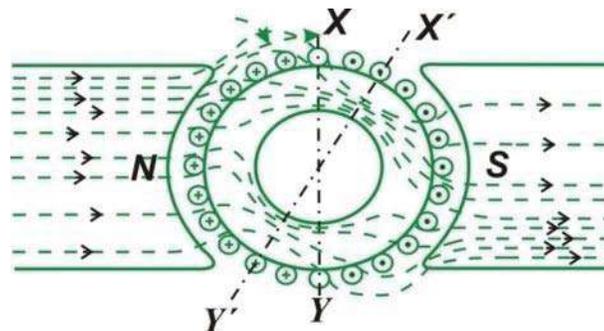


Figura 2.19. Flujo resultante debido a la interacción simultánea de los campos magnéticos transversal y axial en un proceso de soldadura por arco sumergido [2,19].



CAPÍTULO III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de este capítulo se describen los materiales, métodos y procedimientos que fueron utilizados para la realización del presente tema de investigación, el cual está enfocado en la generación de un menor tamaño de grano en el material depositado de un cordón de soldadura por el proceso de arco sumergido, aplicando un campo magnético axial con dos intensidades diferentes de flujo magnético. El planteamiento del análisis comienza con la estructuración general de los procedimientos secuenciales usados, los cuales son plasmados en el siguiente diagrama y descritos a continuación.

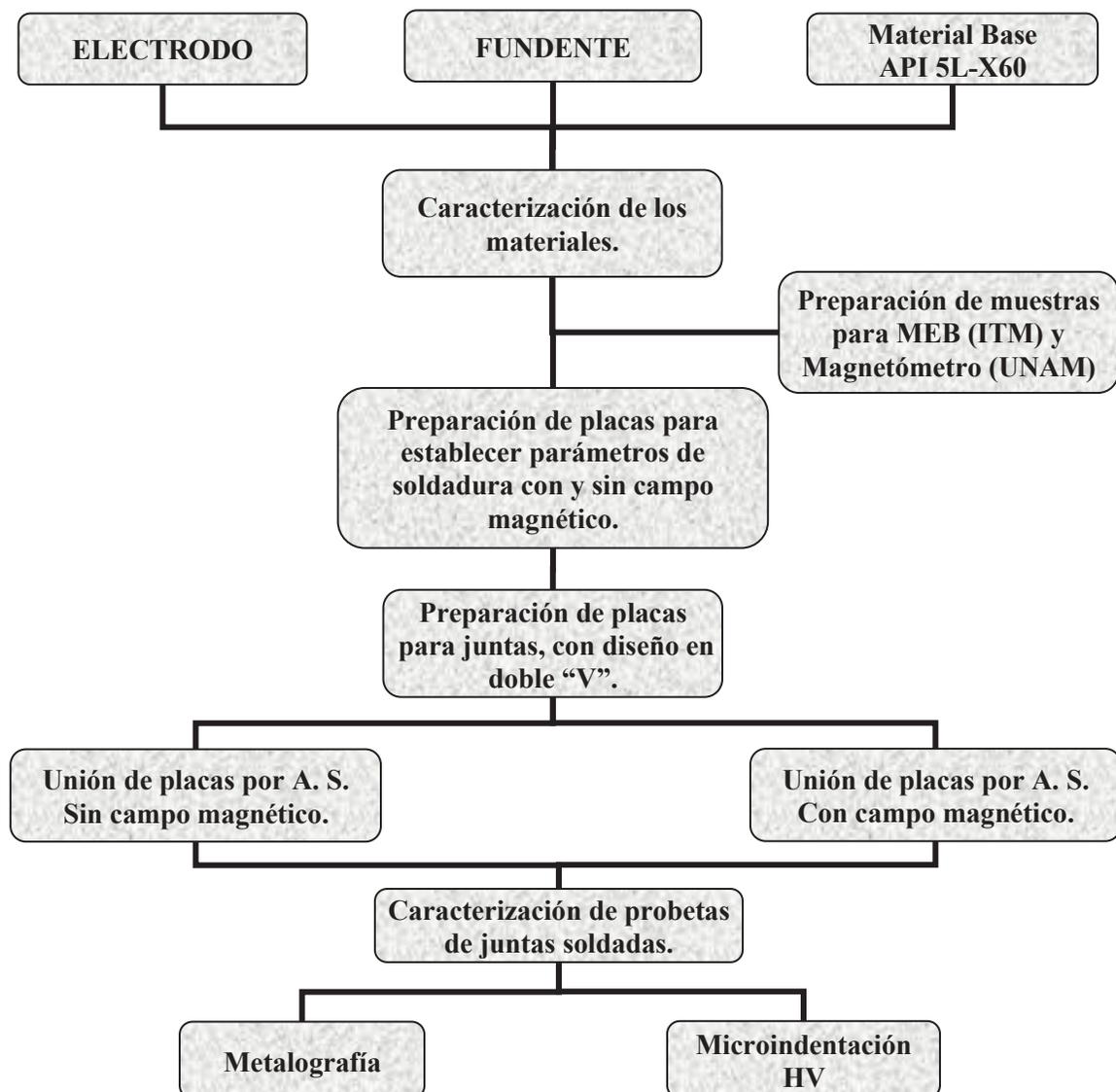


Figura 3.1. Procedimiento experimental con el que se desarrollo el presente proyecto de investigación [2].

3.2. ASPECTOS GENERALES

Para el desarrollo del proyecto se utilizaron dos tipos de aceros: acero al carbono (en placas de 15.24 cm X 20.32 cm) y acero API-5L-X60, en condición de laminado en caliente y normalizado en el área del cordón de soldadura en forma de tubería de 35.56 cm de diámetro y 1.27 cm.

Se sabe que los materiales a utilizar como materia prima, para llevar a cabo el proceso de arco sumergido son tres principalmente: material de aporte para el cordón de soldadura (electrodo), el fundente y las placas de material base donde se realiza la depositación de los cordones de soldadura o en las que se lleva a cabo la unión de éstas (placas biceladas).

Por lo tanto el primer paso del proyecto fue la obtención, preparación y caracterización de probetas en forma metalográfica del material base, de dimensiones de 2.54 cm x 2.54 cm x 3.81 cm de espesor.

Se realizó la preparación de probetas para determinar el grado de magnetización del electrodo, y las placas de acero al carbono y del material API-5L-X60.

Fueron preparadas 4 probetas del electrodo, dos de ellas del inicio y final del carrete del electrodo, mientras las otras dos, se cortaron con distancia de metro y medio a partir del inicio del alambre. Así también, se hicieron 2 probetas de acero al carbono y 6 de acero API. Estas probetas se realizaron apegadas a las dimensiones de 0.4 cm x 0.4 cm x 0.4 cm como máximo y no sobrepasando 1 gramo por peso de cada muestra (Figura 3.2). A las muestras se les realizó un desbaste hasta lija grado 600 por cada una de sus caras, para el caso de las muestras del electrodo, fue suficiente solo en las caras transversales.

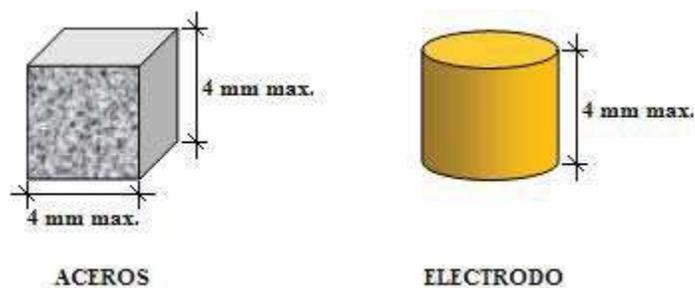


Figura 3.2. Dimensiones de las probetas para magnetómetro [2].



Una vez cortadas y con una preparación a espejo, las muestras del electrodo para el magnetómetro, se les realizó un análisis metalográfico en el microscopio electrónico de barrido; así como también se obtuvieron análisis químicos puntuales aleatorios en las diferentes muestras. Este tipo de análisis puntual, tiene una gran aproximación a un análisis químico implementado para especímenes de mayores dimensiones como fueron las muestras de material API-5L-X60 de 2.54 cm x 2.54 cm x 3.81 cm, se realizó el análisis químico cuantitativo mediante espectrometría de emisión óptica.

Se llevó a cabo el corte de placas de 15.24 cm x 20.32 cm y preparación de las mismas; la cual consistió en limpiar las placas en sus dos caras para que se mantuvieran libres de óxido. Las placas fueron utilizadas para depósitos de cordones de soldadura con y sin la aplicación de campo magnético, para establecer parámetros de soldadura que fueran iguales durante el proceso de unión.

A las placas con depositación de cordones de soldadura, se les realizó cortes transversales y una preparación metalográfica para su caracterización. En total se obtuvieron 3 placas con dos cordones de soldadura cada una, de las cuales en una placa se realizó la depositación de material sin la aplicación de campo magnético, mientras que en las otras dos se deposita el material de soldadura con la aplicación de campo magnético, una de ellas con intensidades de flujo magnético de 1.3 mT; mientras a la otra se aplica una intensidad de flujo magnético de 1.8 mT.

Se realizaron cortes en tubería API-5L-X60 de 35.56 cm de diámetro y 1.27 cm de espesor, obteniendo “placas cóncavas” con dimensiones de 10.16 cm x 15.24 cm, a las cuales se maquinó un bisel en doble “V” con ángulo de 120° y un talón de 0.16 cm a tope. Una vez hecho el bisel se realizó una limpieza superficial para eliminación de óxido y se procedió a unir las mediante puntos de soldadura en sus extremos (Figura 3.3).

Se obtuvieron 5 placas con cordones de una pasada en ambos lados, en los cuales se mantuvieron los mismos parámetros operativos de soldadura. En una de las placas se procedió a la unión de material API-5L-X60 sin la aplicación de campo magnético la cual fue usada como patrón de comparación inicial en juntas soldadas, mientras que en otras dos se llevó a cabo el proceso de soldadura con la aplicación de campo magnético en el que se suministra una corriente a una bobina de 6 espiras. Por último, en las dos placas restantes se utiliza en el proceso una bobina magnética de 3 espiras.

Como último paso, se realizaron cortes en todas las placas obtenidas, obteniendo muestras a las que se les realizó un análisis metalográfico y pruebas de microdureza.

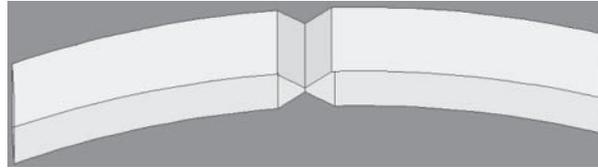


Figura 3.3. Diseño de junta de placas para unión por proceso de arco sumergido [2].

3.3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

3.3.1. CARACTERIZACIÓN DE API-5L-X60

La preparación de una probeta consiste en general, en obtener una superficie plana y semi pulida mediante papel de carburo de silicio de diferente granulometría, terminando con un pulido fino final con pasta de diamante de 3 y 1 μm .

El final de la operación es la obtención de una superficie pulida a espejo que es la requerida para después efectuar el ataque químico y observar adecuadamente la microestructura en un microscopio metalográfico. Bajo estas condiciones se realizó un ataque con solución de Nital al 5% por un periodo de 25 segundos, revelando así la estructura metalográfica de los cordones de soldadura [20].

Cabe mencionar que la caracterización de las microestructuras se llevó a cabo en un banco metalográfico de platina invertida Nikon EPIPHOT 300.

3.3.2. ANÁLISIS QUÍMICOS

La Tabla 3.1, muestra el análisis químico cuantitativo del acero utilizado como material base (acero de tubería y tubo AMHSA), de las cuales se realizó el diseño de junta para llevar a cabo la unión soldada. Dentro de esta tabla se agrega una composición química nominal que especifican las normas AWS [21] y API [22] correspondiente a esta categoría de acero, para fines



comparativos. Cabe mencionar que los cordones de soldadura depositados sobre placas fueron hechos en placas de acero al carbono, composición química que se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Composición química cuantitativa de material base API-5L-X60 y electrodo EM 13k.
API. 5LX –X60. % En peso del acero.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Co	Ti	V	Nb
C.Q. NOMINAL	0.26 Max	0.14	1.35 Max	0.04 Max	0.05 Max	0.05	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03 Min	0.02 Min	0.05
ACERO (2) AHMSA TUBERÍA	0.11	0.14	1.33	0.025	0.003	0.05	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	0.05
ACERO (1) AL CARBONO	0.35	0.25	0.85	0.04	0.04	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Composición química cuantitativa del electrodo EM13K. % En peso.														
ELECTRODO EM 13K	0.11	0.55	1.1	0.025	0.025					0.35				

Debido a que se tenían que comprobar los datos obtenidos fue necesario realizar un análisis químico en un espectrómetro de emisión óptica a las muestras de material base.

Para las placas biseladas y de unión de soldadura se obtuvo material de tubería API de la empresa Altos Hornos de México (acero 2, AHMSA).

Respecto al análisis químico del electrodo EM 13K, se muestra en la Tabla 3.1 la composición química nominal por la norma AWS A5.17, la cual es comparada por un análisis cuantitativo promedio de 12 muestras, de los que fueron obtenidos análisis puntuales en un microscopio electrónico de barrido.

3.3.3. MAGNETIZACIÓN DE MATERIALES

Para determinar la magnetización del electrodo y del acero API-5L-X60, se obtuvo primero el peso de cada una de las muestras que en total fueron 12. La medición fue hecha en una balanza digital.

La magnetización del material está en función de la masa y de las unidades electromagnéticas (emu electromagnetic units) obteniendo:



$$M = \frac{emu}{masa}$$

Donde, las emu pueden ser teslas u oesters, y la masa es expresada en gramos; por lo cual:

$$M = \frac{T.Oe}{g}$$

Por otro lado; la magnetización de un material (\bar{M}) esta expresado como:

$$\bar{M} = \frac{\text{número de momentos magnéticos}}{\text{unidad de volumen}} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Por lo tanto; en una unidad de volumen de un material, donde sus momentos magnéticos se encuentran orientados en una misma dirección, la magnetización de éste es máxima, por lo que la magnetización de un material está en función de su volumen teniendo que: “A mayor volumen del material, mayor magnetización del mismo” [23, 24].

Se utilizó un magnetómetro cuyo principio de funcionamiento es el siguiente:

Se hace pasar una corriente de 5000 amperes a través de un conductor, el cual forma dos bobinas magnéticas (Figura 3.4), generando esta un campo magnético total de 1.5 T. La muestra se expone a dicho campo centrada entre las dos bobinas donde la intensidad de campo magnético es la máxima. Este campo magnético se direcciona de la bobina 1 a la bobina 2, durante un lapso de tiempo de 30 segundos aproximadamente, durante el cual la muestra se hace vibrar a una frecuencia dada.

Mediante un software de computadora, se registran y grafican las mediciones del campo magnético emitido por el material expuesto entre las dos bobinas, obteniendo hasta esta parte del procedimiento la mitad de la gráfica de histéresis del material.

Una vez transcurrido el tiempo de exposición de la muestra, se realiza el mismo procedimiento direccionando, el campo magnético de la bobina 2 a la bobina 1, y concluyendo la gráfica de histéresis.



Figura 3.4. Magnetómetro utilizado para la medición de magnetización de los materiales [2].

Durante todo el procedimiento un sensor de efecto Hall se encuentra colocado detrás de la muestra, y su posición es específica para que solo detecte el campo emitido por la muestra y no el campo magnético total de la bobina. La muestra se adhiere a un material paramagnético (porta muestra de vidrio) que no distorsiona ni tampoco interfiere con el campo magnético de la muestra a estudiar (Figura 3.5).

Se realizaron 12 mediciones en total, 4 del material de electrodo, 6 de acero API y 2 de acero al carbono.

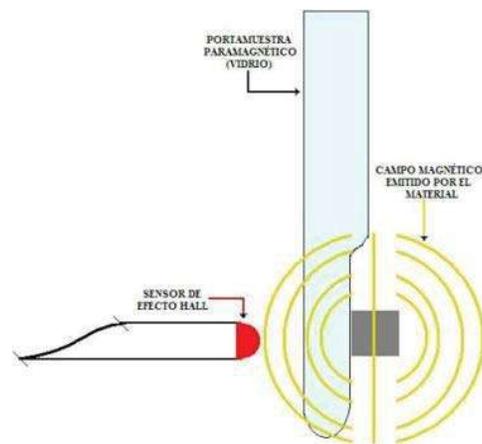


Figura 3.5. Esquema de la detección de campo magnético emitido por el material con el sensor de efecto Hall.



3.4. PARÁMETROS OPERATIVOS Y DISEÑO DE JUNTA DEL PROCESO DE ARCO SUMERGIDO

Los parámetros operativos se obtuvieron en función del diseño de junta a utilizar en el proceso de soldadura por arco sumergido y basados también en las sugerencias que marca la literatura consultada.

Como una primera prueba se realizó un diseño de junta en “V” con ángulo de 60° de apertura, talón de 0.9 cm y una separación de 0.3 cm entre placas. Se utilizó en el mismo diseño de junta un respaldo de solera de 0.3 cm de espesor, para evitar el escurrimiento del material depositado e iniciar el arco eléctrico.

En la aplicación del cordón sin campo magnético se obtuvo una buena penetración del material API-5L-X60, mientras que con la aplicación de campo magnético, el cordón de soldadura solo penetró hasta el inicio del talón de la junta; por lo que se realizaron pruebas en depositación de cordones sobre placas para ajustar los parámetros operativos y la cantidad de volumen de soldadura.

Se obtuvieron probetas metalográficas de estos cordones de soldadura depositados, éstos fueron caracterizados obteniendo resultados importantes; de las cuales, una de las placas contenía un cordón de soldadura sin campo magnético, mientras que las otras dos, se les depositó un cordón con el flujo magnético direccionado de arriba hacia abajo y perpendicular a la placa base. El flujo magnético aplicado durante este proceso fue el emitido por un flujo magnético de 1.3 mT. Se realizó la misma operación cambiando el sentido del campo magnético (perpendicular a la placa base, con dirección de abajo hacia arriba) y manteniendo las mismas variables operativas.

En una segunda placa se depositaron dos cordones de soldadura aplicando un flujo de campo magnético de 1.8 mT, siguiendo el mismo procedimiento anteriormente mencionado.

De estas pruebas anteriores, se obtuvieron los siguientes parámetros operativos del proceso de soldadura convencional (Tabla 3.2) y las variables operativas con las características de la bobina electromagnética para el proceso de soldadura no convencional los cuales fueron utilizados con el resto de experimentos.

Tabla 3.2. Parámetros operativos finales para el desarrollo de pruebas de soldadura SAW.

<i>Parámetros operativos en proceso SAW convencional y no convencional.</i>						
Muestra	Amperios A	Voltios V	Velocidad de alimentación v	Velocidad de avance v'	Campo magnético \vec{B}	Diámetro de bobina Θ
1	350	32	0.68 m/min	19 cm/min	---	---
2	350	32	0.68 m/min	19 cm/min	1.3 mT	35.56 cm
3	350	32	0.68 m/min	19 cm/min	1.8 mT	35.56 cm

Como una segunda prueba se llevó a cabo la unión de placas por el proceso de arco sumergido con la aplicación de campo magnético obteniendo los mismos resultados; una penetración nula en toda la sección del talón por lo que se cambió el diseño de junta en doble “V”, y la unión de placas por proceso de arco sumergido se realizaría en dos pasadas.

El material utilizado para la unión en el proceso de arco sumergido fueron cortes de tubería API-5L-X60 de 10.16 cm x 15.24 cm y 1.27 cm de espesor, maquinadas con el siguiente diseño de junta en el cual se utilizó un ángulo de apertura de 120° y un talón de 0.16 cm a tope mostrado en la Figura 3.6.

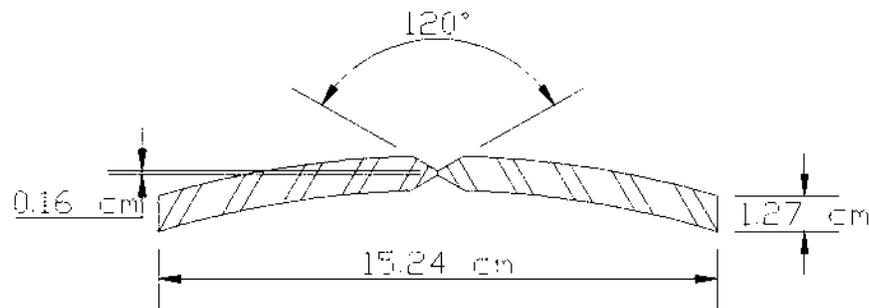


Figura 3.6. Diseño de junta utilizada para pruebas de soldadura con aplicación de campo magnético.

De las placas maquinadas con bisel de 120° , se obtuvieron 5, una sin la aplicación de campo, logrando una unión excelente de las placas; procediendo a la aplicación de campo magnético en cuatro de ellas, dos con intensidad de 1.3 mT y dos con intensidad de 1.8 mT de acuerdo a la configuración de la bobina mostrada en la Figura 3.7.



Figura 3.7. Placas unidas con proceso SAW utilizando bisel de 120°; con aplicación de 3 espiras en la bobina para el campo magnético.

3.5. EQUIPO DE SOLDADURA UTILIZADO PARA EL PROCESO SAW

Se utilizó una fuente de potencia constante modelo Miller 652 de voltaje constante y polaridad inversa, con un ciclo de trabajo del 60%, la cual, a cualquier variación de corriente el voltaje permanece constante es decir, que la misma máquina trata de regular el voltaje suministrado al proceso y el amperaje de alimentación de la bobina electromagnética.

El equipo cuenta con una tolva de almacenamiento de fundente y un carrete para electrodo, los que tienen un movimiento horizontal conforme el desplazamiento en que se deposita el cordón de soldadura regulado con un motor a pasos programable sobre un mecanismo de engranes, mientras que el sistema de alimentación de electrodo consiste en un mecanismo de alimentación continua, por el cual se hace pasar el electrodo de metal desnudo, y durante este paso, se endereza el alambre de electrodo llevándose a cabo la energización del mismo mediante un cable de calibre 0 conectado a la fuente de potencia, la velocidad de alimentación del electrodo es regulada mediante un control eléctrico, que hace revolucionar el sistema de engranes.

3.6. GENERACIÓN DE CAMPOS MAGNÉTICOS EN EL PROCESO SAW NO CONVENCIONAL

La bobina electromagnética es formada del cable de salida de corriente que proporciona la alimentación al proceso de soldadura por arco sumergido. El cable está fabricado de cobre calibre 0. A continuación se muestra la bobina electromagnética cuyo diámetro interno es de 35.56 centímetros (Figura 3.8 b); en su interior se colocan las placas a soldar conectando por uno de sus extremos el cable de corriente para llevar a cabo un mejor inicio de arco eléctrico.

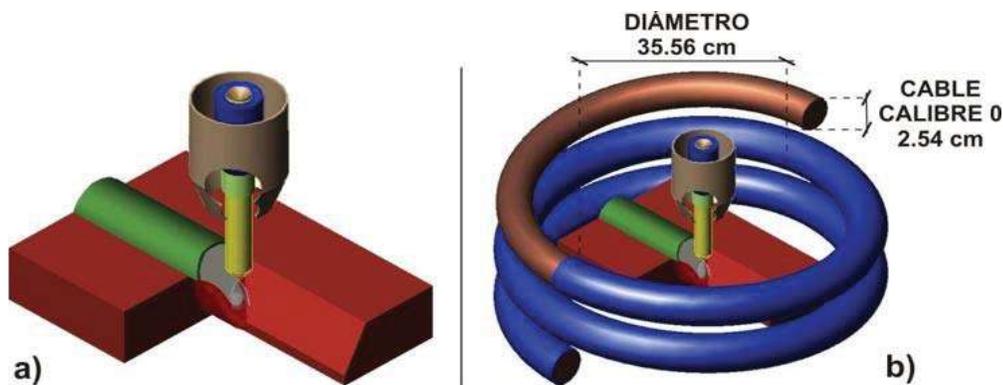


Figura 3.8. Aplicación de la bobina electromagnética; en proceso AS, a) AS convencional, b) AS no convencional.

En la Figura 3.9 se muestra esquemáticamente como se forma el circuito eléctrico en el proceso de soldadura por arco sumergido no convencional, comenzando por administrar la corriente eléctrica mediante un cable, con el cual es formada la bobina electromagnética de 3 y 6 espiras según sea el caso (1). Una vez que se forma la bobina, el extremo de salida de corriente es fijado con una prensa, a uno de los extremos de las placas biseladas a soldar, lo que permite que por ellas se transfiera un flujo de corriente (2).

El arco eléctrico inicia entre la punta del electrodo y las placas por las cuales se transfiere la corriente eléctrica (3).

Mediante otro cable, fijado al dispositivo de alimentación de electrodo, se transfiere la corriente eléctrica restante a la máquina de potencia, cerrando así el circuito eléctrico del proceso (4).

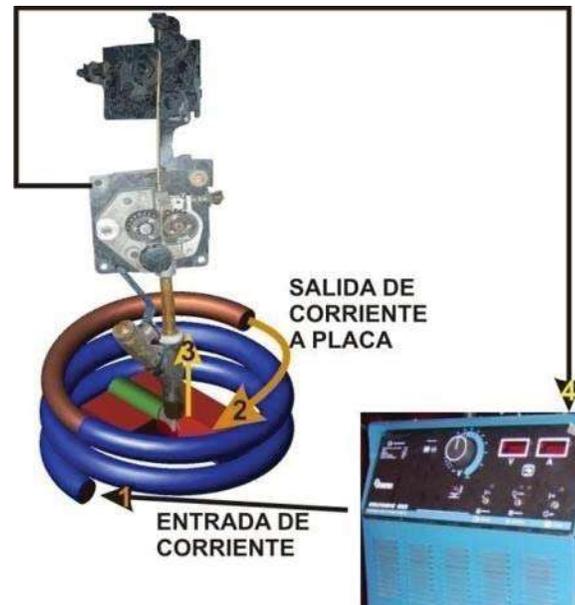


Figura 3.9. Circuito eléctrico formado en el proceso AS [2].

Una vez cerrado el circuito eléctrico en el proceso de soldadura, la bobina genera un campo magnético uniforme en el interior del solenoide donde la intensidad de flujo magnético es máxima (Ecuación 2.13 y Figuras 2.14 y 2.15, aunque en el desarrollo del capítulo II se explica la ecuación y las figuras para un solenoide ideal, las mediciones de los sensores implementados en diferentes puntos dentro de la bobina son muy similares), este flujo es proporcional a la intensidad de corriente eléctrica suministrada, por lo que el proceso tiene variaciones de flujo magnético durante la unión de las placas. Sin embargo, cabe resaltar que la intensidad máxima en el centro de la bobina, es reflejada en mayor magnitud conforme disminuye el diámetro del solenoide, por otra parte; con el diámetro utilizado, este comportamiento es diferente; ya que dentro de la bobina, la intensidad de campo magnético tiende a ser homogéneo (Ecuación 2.13, 2.15 y 2.17), esto nos permite en el proceso de soldadura, tener el mismo efecto de agitación magnética producida por el campo en la pileta líquida de soldadura.

Ahora bien, basándonos en la regla de la mano derecha, que es la que permite determinar en qué dirección se produce el flujo del campo magnético, se realiza la formación de la bobina, la cual emite un campo magnético direccionado de arriba hacia abajo y es perpendicular a la dirección en que se deposita el cordón de soldadura (Figura 3.10). Así también; la dirección de flujo de corriente eléctrica, indica el sentido en que se debe iniciar el apilamiento de las espiras

magnéticas del solenoide, que para nuestro caso; el inicio se puede dar de dos formas. Por mencionar la forma en que se construyeron las espiras de la bobina utilizada, se comenzó de izquierda a derecha, llevando a cabo el apilamiento de las espiras de abajo hacia arriba o viceversa, como se ilustra en la Figura 3.10, mientras que la segunda forma, es necesario cambiar el sentido de la corriente y consecuentemente, el inicio de construcción de la bobina también cambia, iniciando de derecha a izquierda, apilando las espiras de abajo hacia arriba o viceversa, esta última forma de construcción no fue implementada en el proceso de soldadura. Estas dos formas de construir la bobina electromagnética, nos permite direccionar el flujo de campo magnético de arriba hacia abajo.

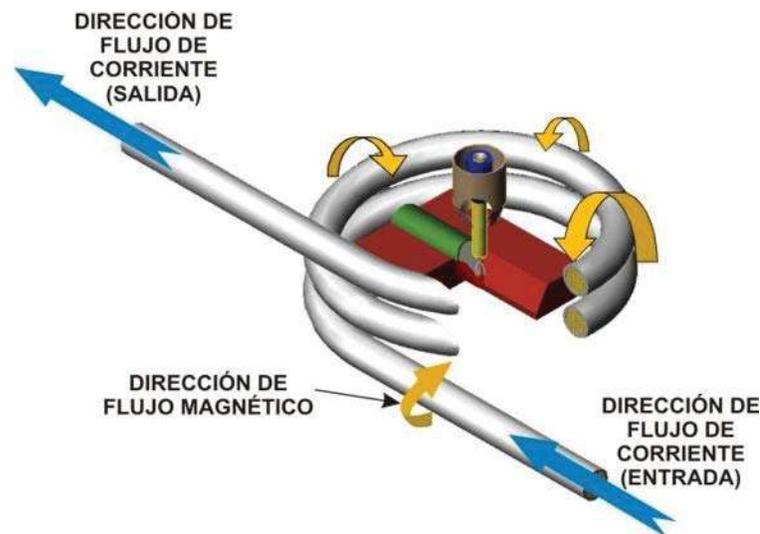


Figura 3.10. Direcciones de flujos de corriente ilustradas con flechas en azul y de campo magnético con flechas en amarillo [2].

Cabe mencionar que dentro del proceso de arco sumergido no convencional, existe la formación de dos campos magnéticos más, aparte del generado por la bobina electromagnética que sin duda alguna, es de mayor intensidad.

Uno de éstos, es formado a lo largo del electrodo una vez que se cierra el circuito y pasa a través de él el flujo de corriente eléctrica (Figura 3.11). Según se explicó anteriormente el flujo de la corriente, la dirección en que se genera el campo magnético es como lo indican las flechas en color rojo mostradas en la Figura 3.11.

Una vez más, otro campo magnético distinto al anterior es formado a lo largo del bisel de las placas. Teóricamente las placas se encuentran dentro de un campo magnético, éste campo formado por la bobina magnética, magnetiza las placas, emitiendo éstas por sí mismas un

campo magnético totalmente diferente, tanto en magnitud como en dirección; aparte, recordemos que a través de estas se hace circular una corriente eléctrica, lo que hace que los espines de los electrodos del material se orienten de manera preferente con dirección al flujo de la corriente eléctrica. Estas placas; teóricamente, forman un imán suave, en el cual el flujo magnético emitido tiene una dirección norte – sur hacia el centro del bisel (Figura 3.12).

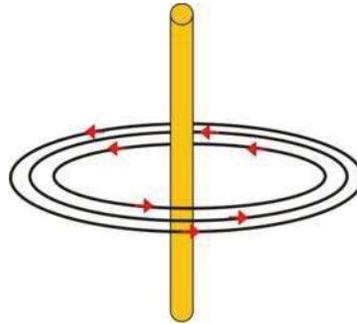


Figura 3.11. Campo magnético generado en el electrodo.

El campo magnético producido por las placas interactúa con el campo producido por la bobina magnética de manera positiva, ya que éstos dos prácticamente tienen la misma dirección, por lo que las magnitudes son sumadas; sin embargo, el campo magnético producido por el electrodo es perpendicular a la dirección de éstos últimos, por lo que en la pileta líquida de soldadura se tiene un campo magnético distorsionado, que probablemente conlleve a una agitación magnética mayor, y consecuentemente un refinamiento del grano columnar en la microestructura del cordón de soldadura.

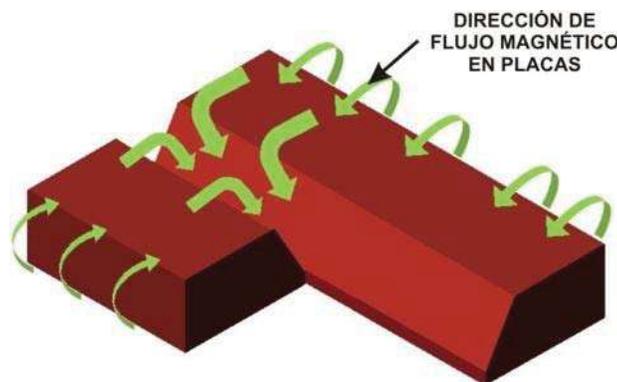


Figura 3.12. Flujo magnético producido en las placas biseladas.



3.7. MEDICIÓN DE CORRIENTE ELÉCTRICA Y CAMPO MAGNÉTICO EN EL PROCESO SAW

Es necesario cuantificar el campo magnético emitido por la bobina electromagnética, para saber cómo afecta la magnitud de flujo sobre la refinación de la microestructura del cordón de soldadura, por lo que fue necesario apoyarnos de sensores de efecto Hall. En realidad, se utilizaron tres tipos de sensores; apoyándonos en el procesamiento de datos por un multímetro industrial. Estos equipos y sensores fueron los siguientes:

- ⊕ Multímetro industrial Fluke 123/124.
- ⊕ Amperímetro de gancho Fluke i800.
- ⊕ Gaussímetro Lutron EMF-827.
- ⊕ Sensor Melexis MLX-90215.

Estos tres sensores corroboran los datos cuantitativos por comparación para determinar la magnitud del campo magnético aplicado por la bobina electromagnética, mientras que el multímetro industrial procesa los datos en tiempo real, almacenado una base de datos de las lecturas tomadas durante el proceso y permitiendo realizar la exportación de gráficos.

A continuación se realiza la descripción de cada uno de ellos con la forma y colocación utilizada en el equipo de soldadura por arco sumergido.

3.7.1. MULTÍMETRO INDUSTRIAL FLUKE 123/124.

Este multímetro digital permite realizar la transferencia de datos directamente a una computadora para manipulación de los mismos, lo cual reduce las posibilidades de errores humanos en la recolección, organización y realización de gráficos de datos obtenidos durante las mediciones, lo anterior se realiza programando el multímetro a los intervalos operacionales del proceso que uno requiera [25].

Esta herramienta digital contiene dos entradas hembras de 4mm para conexiones tipo banana (A y B) y una entrada hembra COM [26].



En la Tabla 334 se presentan las especificaciones más importantes del multímetro digital, de las que unas fueron ajustadas para la adquisición de datos durante la soldadura del proceso de arco sumergido.

Tabla 3.3. Especificaciones generales y ajustadas para la adquisición de datos de dos señales distintas [26].

Especificaciones generales	
Tiempo de lectura de una muestra	< 17.5 ns
Sensibilidad	5 mV a 500 V/div
Escala de lectura de pantalla completa	5000 muestras
Especificaciones para dos señales (A,B)	
Polaridad	DC
Rangos de voltaje	De 0 a 500 mV
Precisión	$\pm(0.5\% + 5 \text{ muestras})$

3.7.2. AMPERÍMETRO DE GANCHO FLUKE I800

Para el caso de la medición de la corriente eléctrica que suministra la fuente de poder al proceso de arco sumergido y que a la vez, suministra la bobina magnética que produce el campo magnético, se utilizó una pinza amperimétrica i800 marca FLUKE para CA/CC. Esta pinza permitió las mediciones exactas de la corriente alterna [27].

La sonda amperimétrica es colocada en torno al conductor energizado que se va a medir, asegurando que las mordazas de la sonda estén bien ajustadas en torno del conductor. Una vez realizada tal operación, la pinza es conectada al amperímetro compatible, tomando lecturas del instrumento de un milésimo de la corriente real presente en el conductor, así por ejemplo, una corriente de entrada de 10 mA se transformará en una corriente de salida de 10 A. Por lo tanto las lecturas mostradas en amperios (A) se deben multiplicar por 1000 para obtener los amperios de la corriente del conductor [27].

3.7.3. GAUSSÍMETRO LUTRON EMF-827

En el proceso de soldadura por arco sumergido fue aplicado el gaussímetro Lutron a la medición de la magnitud de campo magnético dentro de la bobina, colocándolo de tal manera

que la punta del sensor estuviera en la dirección del campo magnético emitido por dicha bobina (Figura 3.13).

Este equipo tiene un rango de medición de 20 a 2000 micro teslas.

Los resultados de los flujos magnéticos nos indican la intensidad del campo magnético en el interior del solenoide durante el proceso de soldadura sin embargo, existen fluctuaciones de corriente eléctrica debido a que la máquina de potencia suministra la corriente necesaria conforme estabiliza el arco eléctrico del proceso de soldadura, por lo cual; usando el gaussímetro como uno de los instrumentos de medición de campo magnético obtenemos lecturas oscilantes entre 0.9 mT y 1.4 mT para la aplicación de un solenoide con 3 espiras, mientras que durante el proceso de soldadura no convencional aplicando un solenoide con 6 espiras se produce un campo magnético que osciló entre 1.3 y 1.9 mT.

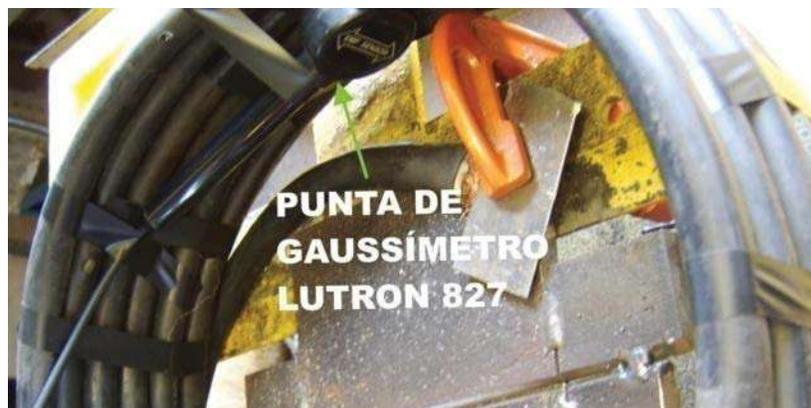


Figura 3.13. Colocación del Gaussímetro Lutron 827 dentro de la bobina de campo magnético con 6 vueltas en el proceso de arco sumergido no convencional [2].

3.7.4. SENSOR MELEXIS MLX-90215.

Se trabajó con el sensor lineal programable de efecto Hall MLX-90215. Dicho sensor está programado de tal manera que entrega 2.5 V cuando el campo magnético es cero, subiendo 1 mV para cada Tesla que se aplique, es decir; si un campo de 100 Teslas es aplicado, el rendimiento aumentará 100 mV [28, 29].

Para que el sensor funcione correctamente, es de suma importancia mantener el suministro de 5 V, regulado por una fuente de poder con salida de +5, -5 V.

El sensor Melexis tiene una sensibilidad en el voltaje de salida menor al 0.4% de error, en un rango de temperatura de 0 a 50 °C [28, 29].

En la Figura 3.14 se muestra el circuito utilizado para el funcionamiento del sensor Melexis, hecho sobre una placa de baquelita donde también fue conectado el sensor. Para un mejor desempeño del sensor, el circuito de baquelita fue cubierto de silicón resistente a altas temperaturas.

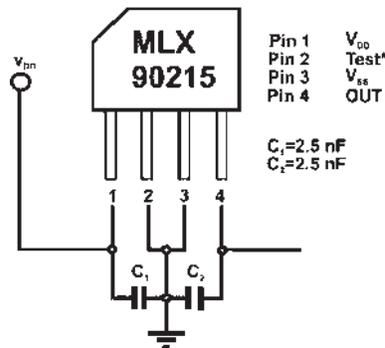


Figura 3.14. Circuito eléctrico del sensor MLX-90215 [28, 29].

Una vez montado el sensor en baquelita, éste se coloca en una varilla de soporte a una distancia aproximada de 5 cm delante del arco eléctrico, una vez iniciado el proceso (Figura 3.15 b). De esta manera, el sensor toma lecturas del campo magnético aplicado axialmente sin afectarle la temperatura generada por el arco eléctrico o la radiación emitida por las placas una vez soldadas.

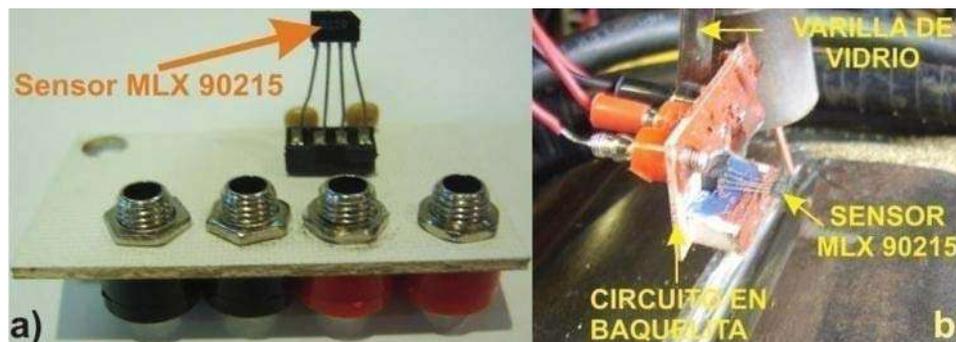


Figura 3.15. Sensor MLX-90215, a) Montado en baquelita, b) Colocado sobre una varilla de vidrio delante de la antorcha de soldadura [2].

En una forma general se muestra en la Figura 3.16 el arreglo de los diferentes instrumentos de medición de campo magnético en el proceso de arco sumergido no convencional.

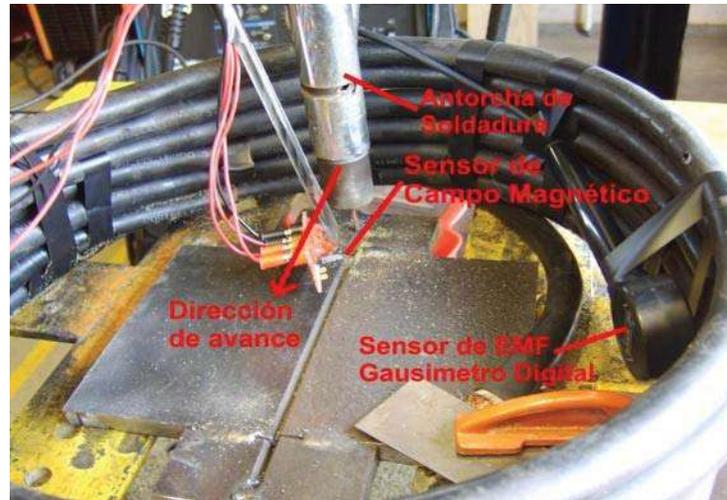


Figura 3.16. Arreglo experimental de los diferentes sensores de medición de campo magnético dentro de la bobina de 6 líneas [2].

3.8. MICROINDENTACIÓN

La prueba de microindentación Vickers fue realizada a muestras soldadas obtenidas de la experimentación del proceso de arco sumergido convencional y no convencional, con la ayuda de un equipo Mitutoyo MVK-HVL, en el cual se utilizó un lente objetivo de 40X, donde la carga aplicada de 50 g es aplicada suavemente sin impacto, forzando al indentador a penetrar en la pieza de prueba. El indentador se sostuvo en el lugar por un tiempo de espera de 3 segundos para asegurar que los índices de dureza sean exactos [30].

La determinación de la microdureza Vickers requirió de la preparación de la superficie de la muestra, la cual consistió en pulir la superficie, hasta lograr un acabado tipo espejo, previamente, las caras de apoyo y de medición fueron sometidas a un proceso de rectificado, con el objeto de que fueran paralelas, a fin de evitar posibles errores durante la medición.

Para llevar a cabo el ensayo de microindentación, se les marco a cada una de las probetas de soldadura una línea delgada con un material punzocortante paralela al ancho de la probeta, la que fue tomada como línea guía para realizar una indentación con una distancia de 150 micras entre cada una de las muescas a lo ancho del cordón de soldadura de la muestra.



CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el desarrollo del presente capítulo, se presentan y discuten los resultados obtenidos que se obtuvieron con la aplicación del campo magnético axial durante la soldadura por arco sumergido, así mismo toda una diversidad de micrografías de probetas soladas con diferentes intensidades de campo magnético, ensayos de microdureza y de magnetización que se relacionan para dar una explicación congruente y aplicada a los resultados que se obtuvieron.

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL ACERO API-5L-X60

En la Figura 4.1 se muestra la microestructura del acero API-5L-X60, en donde se puede observar que es una microestructura de grano fino ferrítico con poca perlita, la cual le proporciona sus propiedades mecánicas de tensión y tenacidad, así como sus características de soldabilidad.

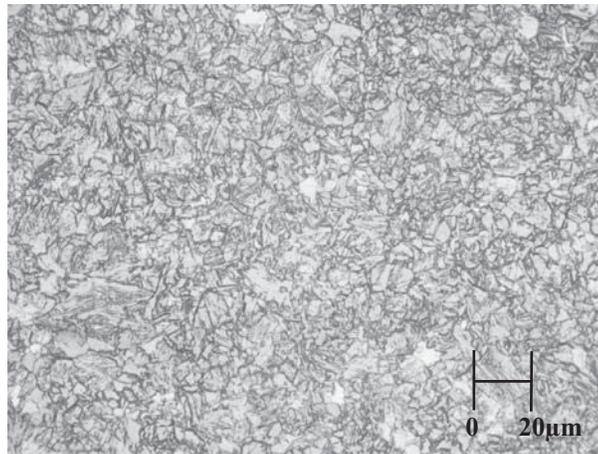


Figura 4.1. Fotomicrografía del material base de acero API-5L-X60, atacada con nital al 5%.

4.2 PERFILES DE SOLDADURA

En la Figura 4.2 se ilustran los perfiles de los cordones de soldadura obtenidos con el proceso tradicional, en donde se aprecia el crecimiento de grano columnar y la configuración de la ZAT (Figura 4.2 a), mientras que la Figura 4.2 b muestra el perfil del cordón de soldadura con la aplicación del campo magnético axial, con una intensidad de 1.8 mT, observándose que en éste perfil de soldadura no se observa un crecimiento de grano columnar, lo que indica el efecto de la interacción del campo magnético durante la solidificación sobre el rompimiento de las dendritas y la modificación del fenómeno de solidificación, minimizando al crecimiento de los granos columnares.

Esto se correlaciona con lo realizado por Rivera [31] quien utilizó el acero API 5L-X70 con un espesor de 2.54 cm y aplicó un campo magnético de 1.8 mT, obteniendo resultados similares a los obtenidos en este proyecto de tesis con un acero diferente. Existen trabajos reportados en donde se ha utilizado la aplicación de campos magnéticos para refinar la microestructura del cordón de soldadura en aceros inoxidable, utilizando el proceso de soldadura TIG, obteniendo resultados excelentes [32].

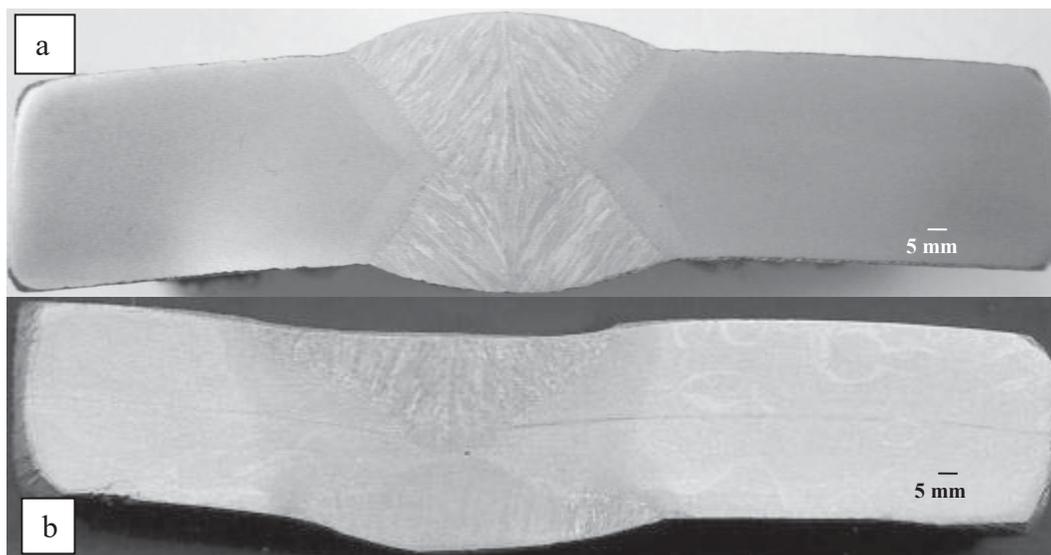


Figura 4.2. a) Perfil de soldado por proceso AS convencional observando la estructura de granos columnares^[3]. b) Perfil soldado por AS no convencional aplicando 1.8 mT donde se aprecia la disminución del tamaño de grano columnar [2].

4.3 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LOS CORDONES DE SOLDADURA

A continuación se muestran las caracterizaciones obtenidas en las interfases de los cordones de soldadura, aplicados sobre placas de acero al carbono, las cuales fueron utilizadas para encontrar los parámetros de soldadura que fueron usados en la soldadura por arco sumergido no convencional, y al igual para fines comparativos se agregan algunas fotomicrografías sin campo magnético.

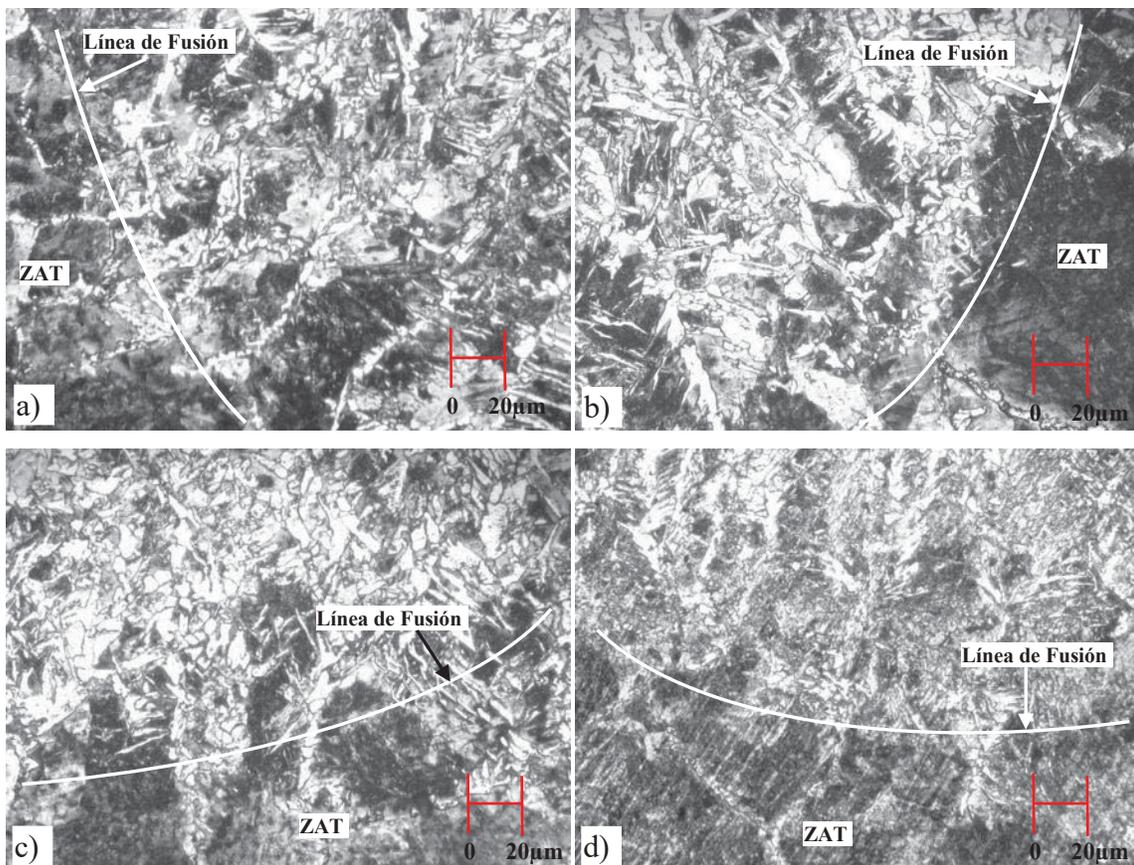


Figura 4.3 a). Cordon de soldadura sin campo magnético. Línea de fusión izquierda. b). Cordon de soldadura sin campo magnético. Línea de fusión derecha. c) Cordon de soldadura con campo magnético, 1.3 mT. Línea de fusión izquierda. d) Cordon de soldadura con campo magnético, 1.3 mT. Línea de fusión inferior. Todas las muestras fueron atacadas con nital al 5%.

Las Figuras 4.3 a y b, muestran las microestructuras del cordon de soldadura del acero al carbono, soldado con arco sumergido sin aplicación de campo magnético, en la interfase y



cordón de soldadura, observándose un crecimiento de grano columnar con formación de ferrita proeutectoide en el borde de grano, característica típica de los procesos de soldadura de elevado aporte térmico como es el arco sumergido. Mientras que las Figuras 4.3 c y d muestran la interfase de la unión del acero al carbono con la aplicación de campo magnético de 1.3 mT, en donde ya no se aprecia un crecimiento de grano columnar marcado, sino que se observa una microestructura de ferrita acicular en la matriz de los granos y con presencia de ferrita proeutectoide delimitando los pequeños granos columnares. Se puede apreciar el tamaño de grano columnar menor al de las metalografías sin campo magnético, lo que indica el beneficio de la aplicación del campo magnético axial durante la soldadura en el proceso de arco sumergido, en donde el fundente no tiene ninguna influencia por ser un material a base de óxidos metálicos.

Las características comparativas de la microestructura también se aprecian en el centro de los cordones de soldadura en donde se observa claramente la diferencia de la microestructura sin campo magnético y con campo magnético aplicado de 1.3 y 1.8 mT en las Figuras 4.4 a, b y c respectivamente, observándose que la microestructura en el centro del cordón depositado sin la aplicación de campo magnético, es más basta o gruesa con respecto a la obtenida con aplicación de campo magnético, las tres microestructuras presentan ferrita acicular pero las obtenidas con la intensidad de 1.3 y 1.8 mT son más finas que la obtenida sin campo, sin embargo haciendo una comparación visual cualitativa entre el tamaño de grano de la Figura 4.4 b y c, se aprecia un mayor refinamiento de grano en la aplicada con menor flujo magnético, resultados similares que obtuvieron Mousavi_[8] y colaboradores, donde al aplicar los cordones de soldadura con campos magnéticos de 1.2 mT y 1.7 mT en una aleación de aluminio AA6060 se presenta un refinamiento de grano muy similar, lo que es contradictorio ya que el movimiento electromagnético de la piletta líquida de soldadura ésta gobernado por las fuerzas de Lorentz_[32], así entre mayor sea la intensidad de flujo magnético mayor es la fuerza de Lorentz y por consiguiente mayor es el movimiento del material de la piletta de soldadura. Este fenómeno puede relacionarse aunque no sean materiales ni procesos similares, sin embargo se encuentra que en cordones con campo magnético sobre placas es posible que afecte el espesor de la misma, lo que se explica que en espesores pequeños la cantidad de material líquido en movimiento de la piletta de soldadura es menor que en placas utilizadas con

espesores grandes, lo que tiene relación con la profundidad de penetración de la soldadura en el metal base y la velocidad de enfriamiento de la unión.

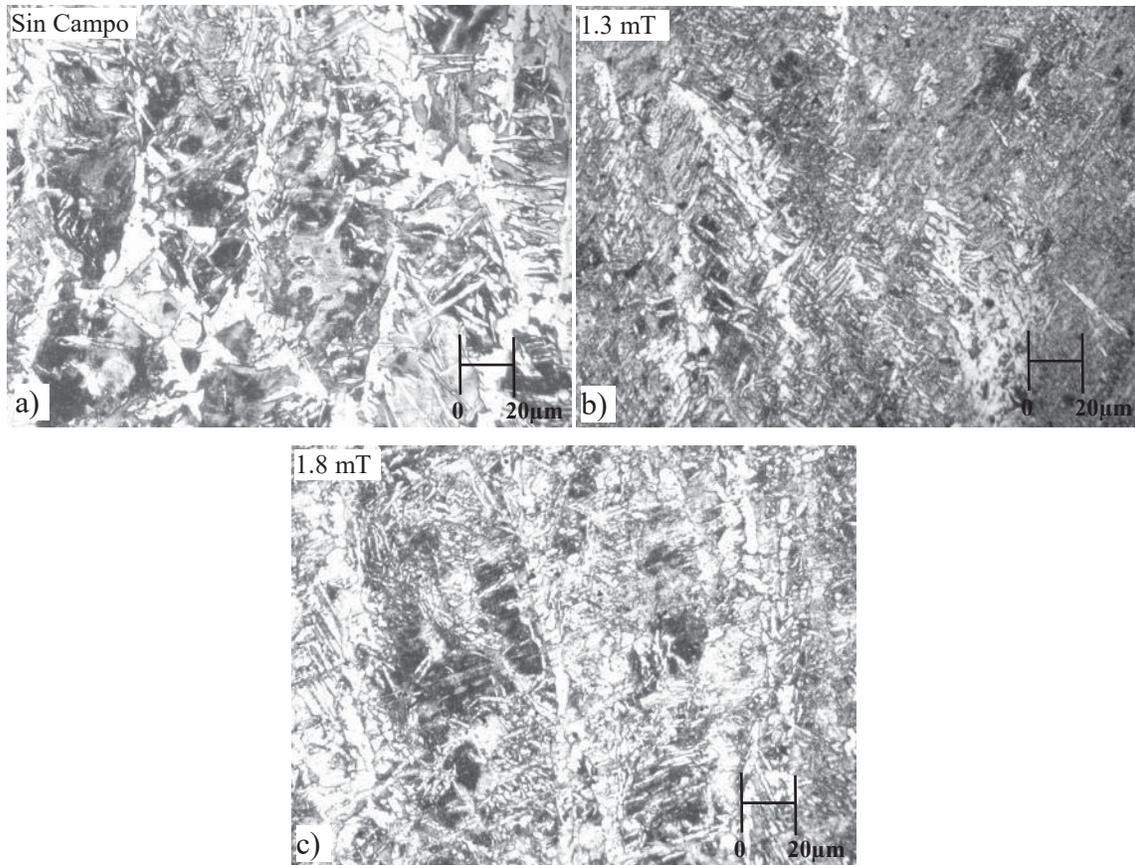


Figura 4.4. Microestructura del centro de cordones de soldadura, atacadas con Nital 5%. a) Cordón sin aplicación de campo magnético. b). Cordón con aplicación de campo magnético, 1.3 mT. c) Cordón con aplicación de campo magnético, 1.8 mT.

Cabe resaltar que todas las metalografías mostradas anteriormente son de cordones aplicados sobre placas de acero al carbono, por lo que a continuación se muestran los resultados obtenidos en la unión del material API-5L-X60 en secciones de tubería con un ángulo en el diseño de junta de 120° .

Las Figuras 4.5 a, b, c y d muestran las interfases de los cordones de soldadura depositados en el acero API-5L-X60, sin y con la aplicación de campo magnético de 1.3 mT. En ambos casos se observa el crecimiento de granos columnares, estructura típica de estos aceros soldados con el proceso de AS convencional. Se observa que aplicando el campo magnético de 1.3 mT en el

proceso de AS, se tiene el rompimiento del grano columnar bien definido e incluso los granos obtenidos en la zona afectada térmicamente son también refinados por el efecto del campo magnético aplicado (Figuras 4.5 d), los granos columnares en la probeta soldada sin campo magnético son más anchos, largos y consecutivos, mientras que ésta morfología es diferente en la probeta con campo de 1.3 mT, presentando un grano columnar delgado con una interrupción en el crecimiento longitudinal del mismo.

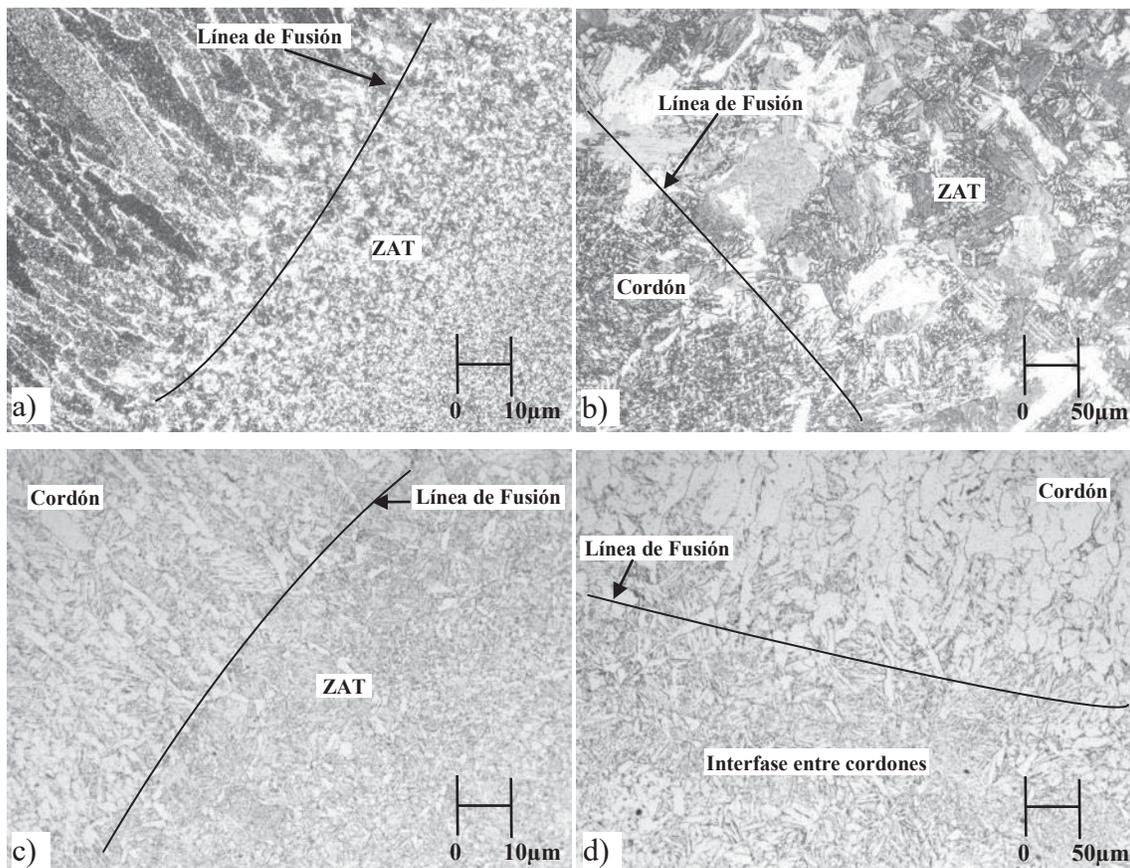


Figura 4.5 a) Probeta sin campo, línea de fusión derecha del cordón superior, b). Probeta sin campo, línea de fusión derecha del cordón superior, c) Probeta con campo magnético 1.3 mT, línea de fusión derecha del cordón superior, d) Probeta con campo magnético 1.3 mT, interfase entre los cordones de soldadura. Todas las muestras de acero API 5LX60 fueron atacadas con nital al 5%.

La microestructura se modifica por el efecto de la agitación electromagnética rompiendo el crecimiento de las dendritas e impidiendo el crecimiento de los granos en forma columnar tal como se observa en las Figuras 4.5 c y d en la interfase. Esto muestra el efecto del campo magnético axial en un proceso de soldadura que podría decirse que no sería efectivo por la

aplicación del mismo campo y por el uso del fundente, pero ya que el campo magnético se propaga a través del material base, independientemente de las capas del fundente utilizado para ocultar el arco eléctrico, es posible obtener efectos considerables en el proceso de solidificación del cordón de soldadura.

La Figura 4.6 a, ilustra la intersección de los cordones de soldadura de doble pasada del acero API-5L-X60 soldados con una aplicación de campo magnético de 1.8 mT, mostrando una microestructura de granos columnares finos que no se obtuvo sin la aplicación de campo magnético, mientras que en la Figura 4.6 b, muestra la interfase del segundo cordón depositado con una línea de fusión claramente definida y se aprecia un mayor refinamiento de los granos columnares. Los granos en la ZAT se presentan de una manera más homogénea desde las líneas de fusión de los cordones, ya que el tamaño de grano en un proceso de AS convencional tiende a presentar granos de mayor tamaño. Se observa en la Figura 4.6 a, un mayor refinamiento de grano en el primer cordón de soldadura, esto se debe al efecto del campo magnético seguido por un efecto de tratamiento térmico que modifica más la microestructura, debido a la transferencia de temperatura que origina el proceso de AS una vez que se aplica el segundo cordón de soldadura y es por esto que el segundo cordón de soldadura presenta granos columnares un poco más grandes que el primero.

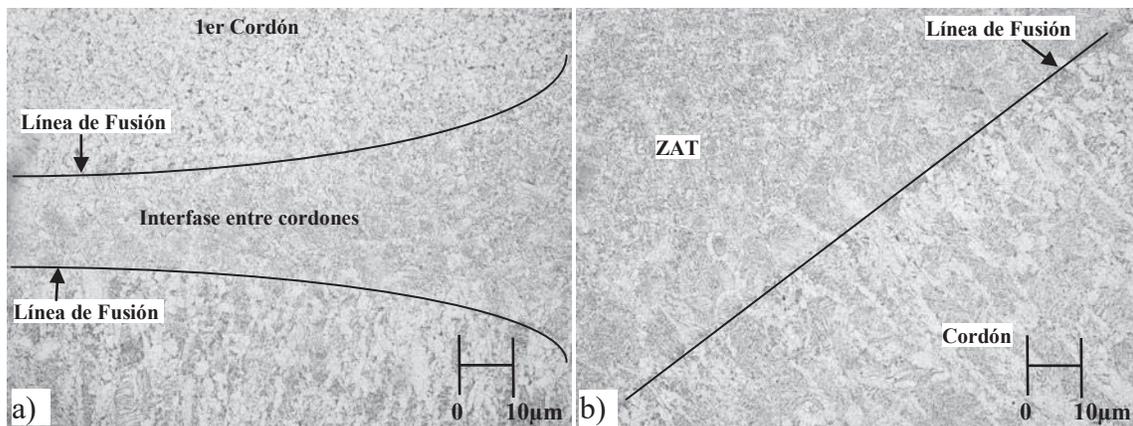


Figura 4.6. Probetas API 5LX60, con campo magnético 1.8 mT, atacadas con nital al 5%. a) Fotografía de la intersección de unión de los cordones de soldadura. b) Fotografía del cordón de soldadura inferior izquierdo.

4.4 MICROESTRUCTURA DEL CENTRO DE LOS CORDONES DE SOLDADURA

Las Figuras 4.7 a y b, muestran las microestructuras que presenta el cordón sin campo magnético y con campo de 1.3 mT respectivamente. La zona que presenta mayor refinamiento de grano columnar es el centro de los cordones donde el líquido rico en soluto solidifica en forma constitucional, y tomando como una referencia, el criterio de rompimiento dendrítico propuesto por Campanella^[9], donde durante el inicio del crecimiento columnar, las puntas de las dendritas en la interfase sólido-líquido son literalmente arrancadas por la acción del movimiento del líquido hacia el mismo, debido a un campo magnético externo. Estos fragmentos de sólido, sobreviven en el líquido y sirven como una superficie sólida para el inicio de solidificación del líquido o partículas nucleantes, este mecanismo es muy probable que ocurra en las soldaduras con campo magnético ya que en la Figura 4.7 b, se aprecia claramente que el crecimiento columnar no prevaleció hasta el centro del cordón de soldadura. Es de gran importancia señalar que los materiales y procesos utilizados por Campanella^[9] son totalmente diferentes al proceso de soldadura por AS, más sin embargo, el proceso de solidificación del metal parte de un sustrato sólido, que para nuestro caso es el acero API-5L-X60.

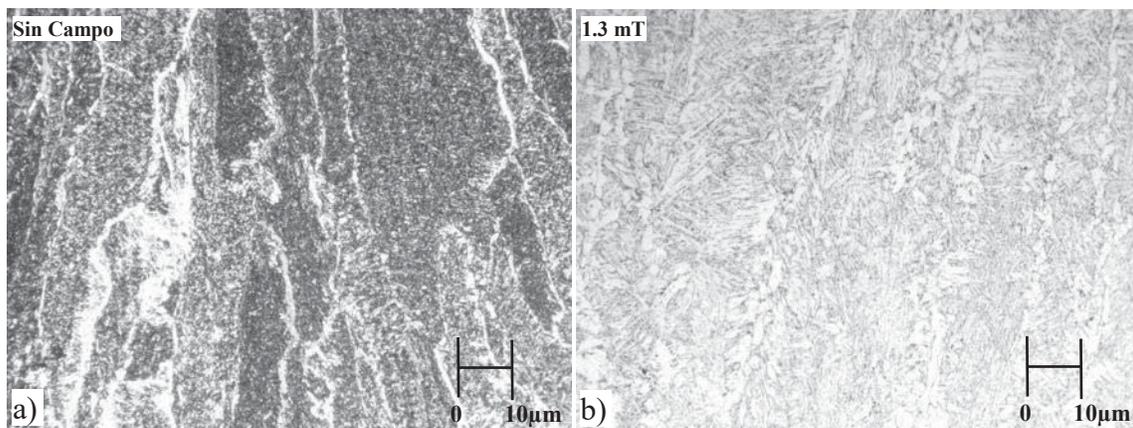


Figura 4.7. Probetas API-5L-X60. a) Fotografía sin campo magnético del centro del cordón, b) Fotografía del centro del cordón de soldadura con campo magnético de 1.3 mT.

Las Figuras 4.8 a y b muestran el centro de los cordones de soldadura con aplicación de campo magnético de 1.3 mT y 1.8 mT respectivamente. Las microestructuras presentan una diferencia en el tamaño de grano dendrítico, conforme se incrementa la intensidad del campo

magnético aplicado, por lo que los resultados mostrados en los cordones sobre placas de acero al carbono (Figuras 4.3 y 4.4) y los resultados obtenidos por Mousavi^[8], nos muestran que tanto los parámetros operativos en los procesos de soldadura, la intensidad del campo magnético aplicado y la geometría de la superficie sobre la que se deposita el cordón, influyen en la forma y microestructura del cordón de soldadura. Rivera^[31] consiguió el refinamiento de grano columnar con un flujo magnético de 1.8 mT, sin embargo, a pesar de haber llevado a cabo procedimientos similares en la soldadura por AS no convencional y la misma intensidad de campo aplicado, las uniones soldadas del acero API-5L-X60 presentan un menor tamaño de grano conforme al incremento de la intensidad del campo magnético aplicado, así de una forma comparativa se obtuvo una microestructura más fina en la probeta con campo magnético de 1.8 mT que en la aplicada con 1.3 mT.

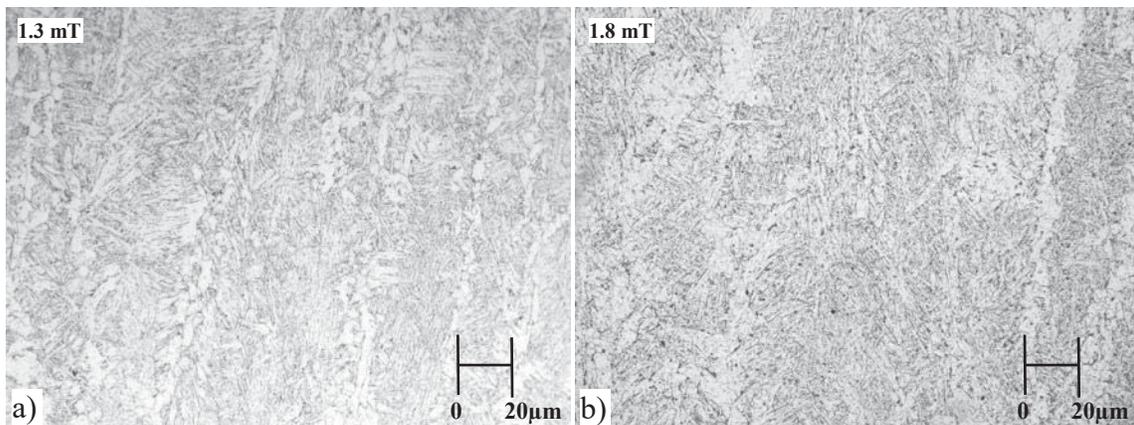


Figura 4.8. Centro de cordones de soldadura. a) Micrografía óptica con campo magnético de 1.3 mT, b) Micrografía óptica con campo magnético de 1.8 mT.

En las Figuras 4.9 y 4.10 se muestran los resultados comparativos de la aplicación de cordones de soldadura sobre placas de acero al carbono sin y con la aplicación de campo magnético.

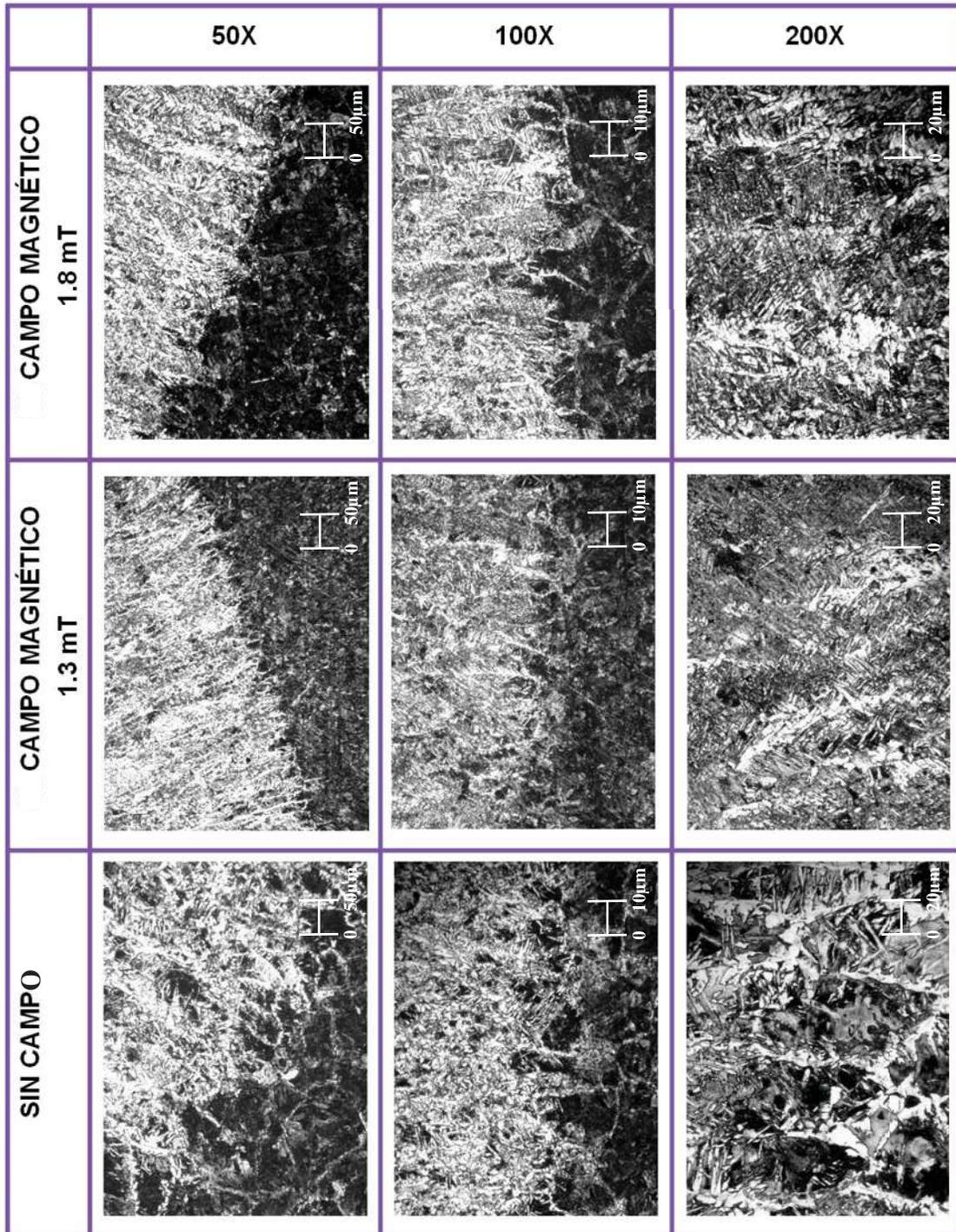


Figura 4.9. Metalografías comparativas en cordones aplicados sobre placas de acero al carbono sin y con la aplicación de campo magnético de 1.3 y 1.8 mT. Se muestran las interfases a 50 y 100X de los cordones de soldadura mientras que a 200X se observa el centro de los cordones.



Así como también se muestran las diferentes microestructuras que presenta las uniones soldadas del acero API 5L-X60 con el proceso de soldadura por arco sumergido convencional y no convencional en donde se resume el comportamiento microestructural tanto del acero al carbono, como del acero API 5L-X60, soldados sin y con la aplicación de campo magnético, observando lo ya descrito anteriormente por separado, y en este concentrado se resume la parte importante del presente proyecto de tesis, en cuanto a el refinamiento microestructural debido a la agitación electromagnética producida durante la soldadura mediante la agitación del campo magnético axial.

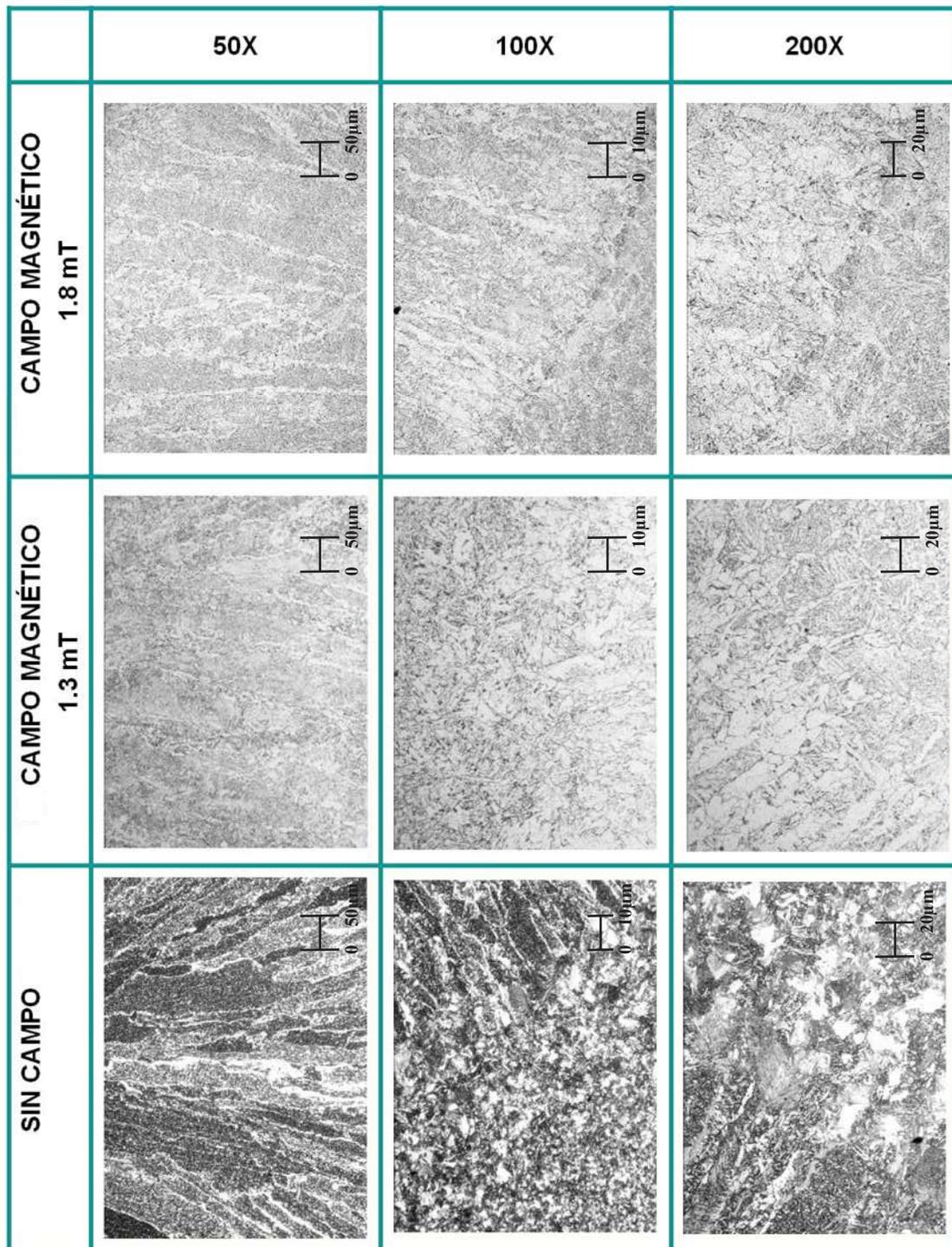


Figura 4.10. Metalografías comparativas en uniones soldadas en acero API-5L-X60 sin y con la aplicación de campo magnético de 1.3 y 1.8 mT. Se muestran las interfases a 100X y 200X en los cordones mientras que a 50X se observa el centro de los cordones.



4.5 MICRODUREZA EN CORDONES DE SOLDADURA SOBRE PLACAS DE ACERO AL CARBONO.

Los resultados presentados a continuación provienen del muestreo de indentación de microdureza Vickers, sobre líneas perpendiculares en las muestras obtenidas con depósitos de soldadura sobre placas de acero al carbono, estos son los siguientes:

En la Figura 4.11 a, se muestra el perfil de microdureza del cordón de soldadura del acero al carbono sin aplicación de campo magnético, en donde se aprecia la variación de esta microdureza, la cual es debido al tipo de microestructura que se originó tanto en el cordón de soldadura como en la zona afectada térmicamente, puesto que se tiene en el cordón de soldadura granos columnares rodeados por ferrita proeutectoide y en el centro de los granos se tiene una estructura de ferrita acicular, por lo que cuando la huella de la impronta cae sobre un grano de ferrita proeutectoide la microdureza decae, mientras que cuando la huella de la impronta cae sobre la ferrita acicular la microdureza incrementa, siendo esta la causa de la variación de las mediciones, puesto que la distancia entre medición y medición fue de 100 μm .

En el caso de las gráficas mostradas en las Figuras 4.11b y 4.11c, el rango de valores de las mediciones se encuentra entre los 215 y 275 Vickers, lo que nos indica que la variación de dureza se encuentra en el mismo rango que la unión soldada sin campo magnético, sin embargo, se puede apreciar una homogenización en los picos de las gráficas en la zona del cordón de soldadura en las mediciones con campo magnético, esta variación se debe a que en las probetas con aplicación de campo magnético se logra una reducción del grano columnar por lo que la huella de la impronta cae en fases de ferrita acicular homogenizando así los valores y las variaciones de los picos en los gráficos.

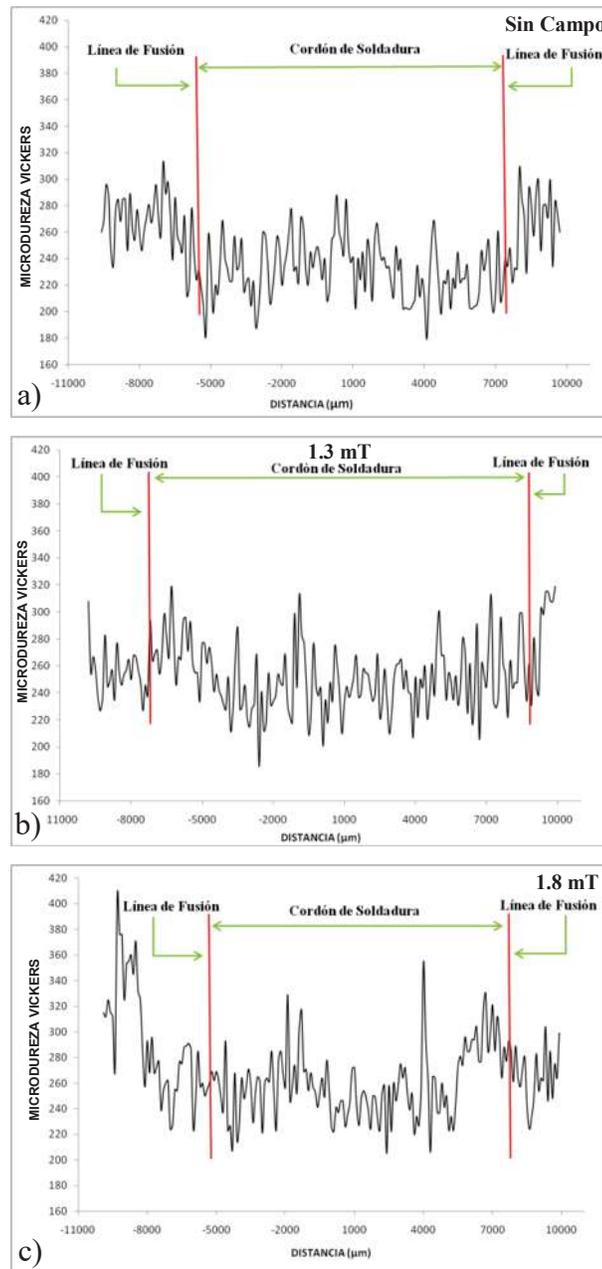


Figura 4.11. Mediciones de microdureza a lo ancho de cordones de soldadura sobre placas de acero al carbono. 100 μm de distancia entre indentación, Carga 50g. a) Sin campo magnético, b) Campo magnético de 1.3 mT, c) Campo magnético de 1.8 mT.



4.6 MICRODUREZA EN UNIONES SOLDADAS CON DOBLE PASADA

La Figura 4.12 muestra uno de los dos barridos de microindentación obtenidos de los dos cordones de soldadura aplicados en cada una de las probetas soldadas de material API-5L-X60 en junta de 120° en doble “V”, dado que éstos son los más importantes para fines comparativos, se agregan los barridos complementarios en el Anexo 1.

Se observa en la Figura 4.12 a, los resultados de microdureza HV del cordón de soldadura soldada con el proceso de soldadura de AS convencional donde en la parte del cordón se encuentran lecturas dispersas entre muchos de los puntos obtenidos, esto se debe a la diferencia de microdureza entre los granos columnares con fase de ferrita proeutectoide y ferrita acicular, la cual es posible identificar por su crecimiento típico en el interior de los granos.

Por la concentración del rango de valores en la zona del cordón de soldadura en la Figura 4.12 b, se puede valorar que tanto el tamaño de grano, como la fase de ferrita acicular son finos en el cordón de soldadura, ya que presenta valores más bajos alrededor de los 180 HV en promedio, esto puede interpretarse también como una recuperación elástica del material en esta fase después de retirar la carga aplicada, de esta manera se muestra una baja en la dureza del cordón de soldadura alrededor de 20 puntos HV respecto al cordón sin campo, observando este decremento más notoriamente en el centro del cordón de soldadura, el cual corresponde al segundo cordón de soldadura aplicado a la junta soldada, sin embargo, los valores entre cada una de las lecturas es más homogéneo entre las -7500 μ m y 7500 μ m con la aplicación de un flujo magnético de 1.3 mT que sin la aplicación de campo magnético. Por otra parte, también se puede deducir que debido al cambio drástico de microdureza de 280 a 180 HV, cerca de las -7500 μ m en el centro del cordón, ocurre una solidificación con nucleación heterogénea.

En la Figura 4.12 c se observa que las lecturas en donde se aplica un campo magnético de 1.8 mT son mucho más homogéneas a lo ancho de la probeta respecto a la ondulación de los puntos de microdureza sin la aplicación de campo magnético y a la muestra con aplicación de campo magnético de 1.3 mT, esto se debe a que los granos columnares son de menor tamaño

por el refinamiento de la microestructura, y por lo tanto las fases microestructurales se encuentran más distribuidas en la zona del cordón de soldadura.

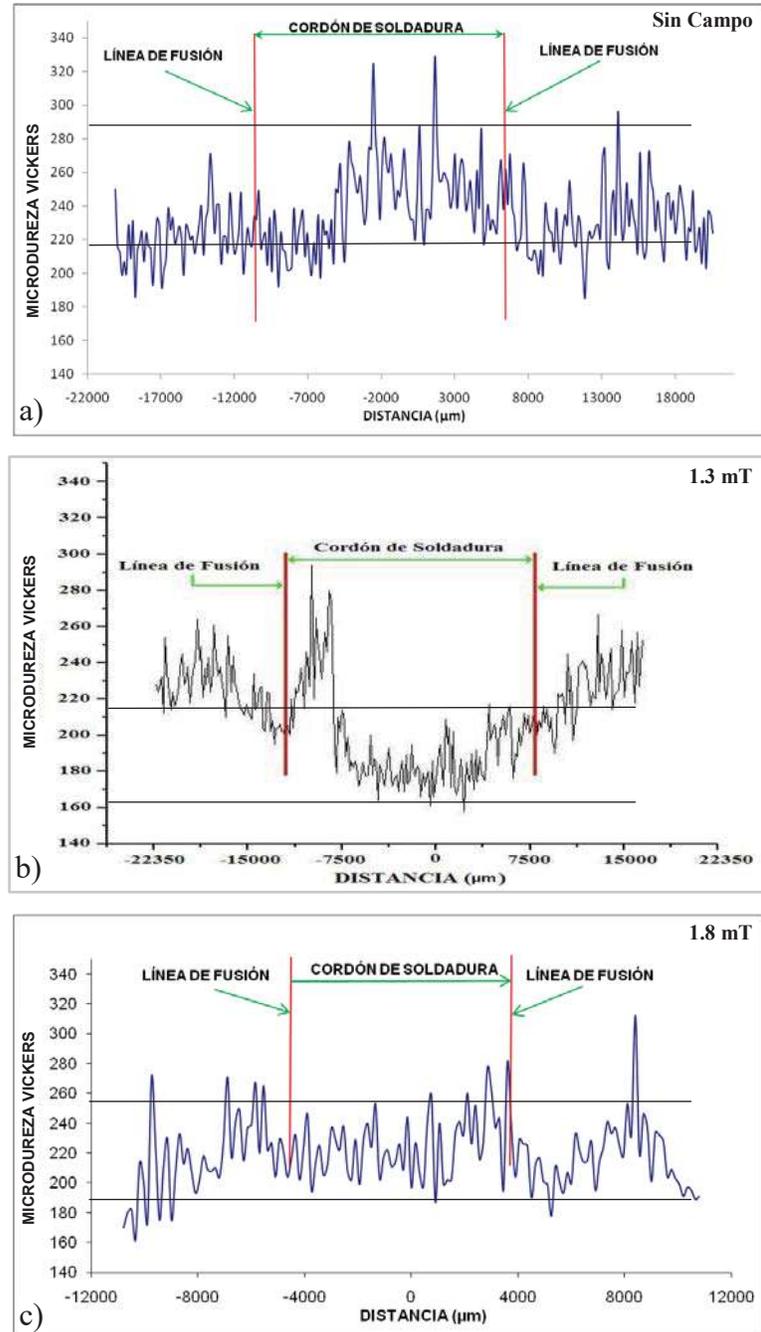


Figura 4.12. Medición de microdureza a lo ancho del cordón de soldadura en una junta en doble “V” de acero API-5L-X60, 150 μm de distancia entre indentación, Carga 50g. a) Sin campo magnético, b) Campo magnético de 1.3 mT, c) Campo magnético de 1.8 mT.



En la Figura 4.12 c, los valores de microdureza Vickers bajan alrededor de 20 puntos en el cordón de soldadura respecto a la probeta soldada por AS convencional, pero en la mayoría de estos se mantienen entre los 190 y 250 HV en todo lo ancho del cordón hasta la ZAT dando lecturas con mucho menor variación.

Es de suma importancia señalar que no existen trabajos reportados en la literatura investigada en este proyecto de tesis donde se aplique un campo magnético para refinar la microestructura de un material similar y que éste sea caracterizado por microindentación, ya que procesos por colada, soldadura de bajo aporte térmico, modificación estructural en estado sólido e incluso los resultados por Rivera^[31] que utilizó un proceso de AS no convencional, solo están enfocados en la diferencia de tamaño de grano obtenido.

4.7 CÁLCULOS PARA LA MEDICIÓN DEL FLUJO MAGNÉTICO

Para realizar los experimentos de las uniones soldadas con campo magnético, se realizaron en un principio cálculos fundamentales mediante la ecuación 2.13 (Pag. 36), la cual corresponde a la aplicación de un campo magnético en un solenoide ideal.

Con estos cálculos y algunos datos que se obtuvieron del proceso de soldadura por arco sumergido fue posible determinar el flujo de campo magnético durante el proceso de soldadura.

Estos cálculos son los siguientes:

$$B = \mu_0 n I \quad \text{Ecuación 2.13}$$

Donde:

B; es el flujo magnético en cualquier punto en el interior del solenoide y está dado en teslas como unidad dimensional.

μ_0 , es una constante llamada permeabilidad del espacio libre. Su valor es:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} T \cdot m/A$$

Donde $n = N/l$ es el número de vueltas por unidad de longitud.

Para el experimento empleado se aplicó por cada metro de cable calibre cero una vuelta en el solenoide.



Esta fue la única variable aplicable al proceso de soldadura con 3 y 6 espiras en el solenoide.

I , corriente total que pasa a través del material conductor, sus unidades son Amperes.

Aplicando una corriente total de 350 A.

Por tanto, llevando a cabo las sustituciones de los valores en la ecuación obtenemos:

Calculo teórico para determinar la intensidad de flujo magnético para el caso de 3 espiras en el solenoide,

$$B_3 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A} (3) \left(\frac{1}{1m} \right) (350A) \quad \text{Calculo teórico 1}$$

$$B_3 = 0.001319 T$$

$$B_3 = 1.319 mT$$

Calculo teórico para determinar la intensidad de flujo magnético en el caso de 6 espiras en el solenoide,

$$B_6 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A} (6) \left(\frac{1}{1m} \right) (350A) \quad \text{Calculo teórico 2}$$

$$B_6 = 0.002639 T$$

$$B_6 = 2.639 mT$$

La diferencia del valor calculado con respecto al medido esta en relación con la permeabilidad del recubrimiento del cable usado en la bobina inductora.

4.8 MEDICIÓN CON SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO MELEXIS

Los siguientes resultados de la Figura 4.13, muestran oscilaciones demasiado grandes en el flujo de campo magnético, los cuales no son registrados por el gaussímetro, ya que el sensor Melexis tiene una mayor sensibilidad permitiendo que el multímetro industrial tome una muestra por cada 17.5 nano segundos, las cuales son tomadas directamente de las señales



emitidas por el sensor y captadas por el multímetro industrial Fluke, el cual simultáneamente envía los datos a una computadora para ser editados.

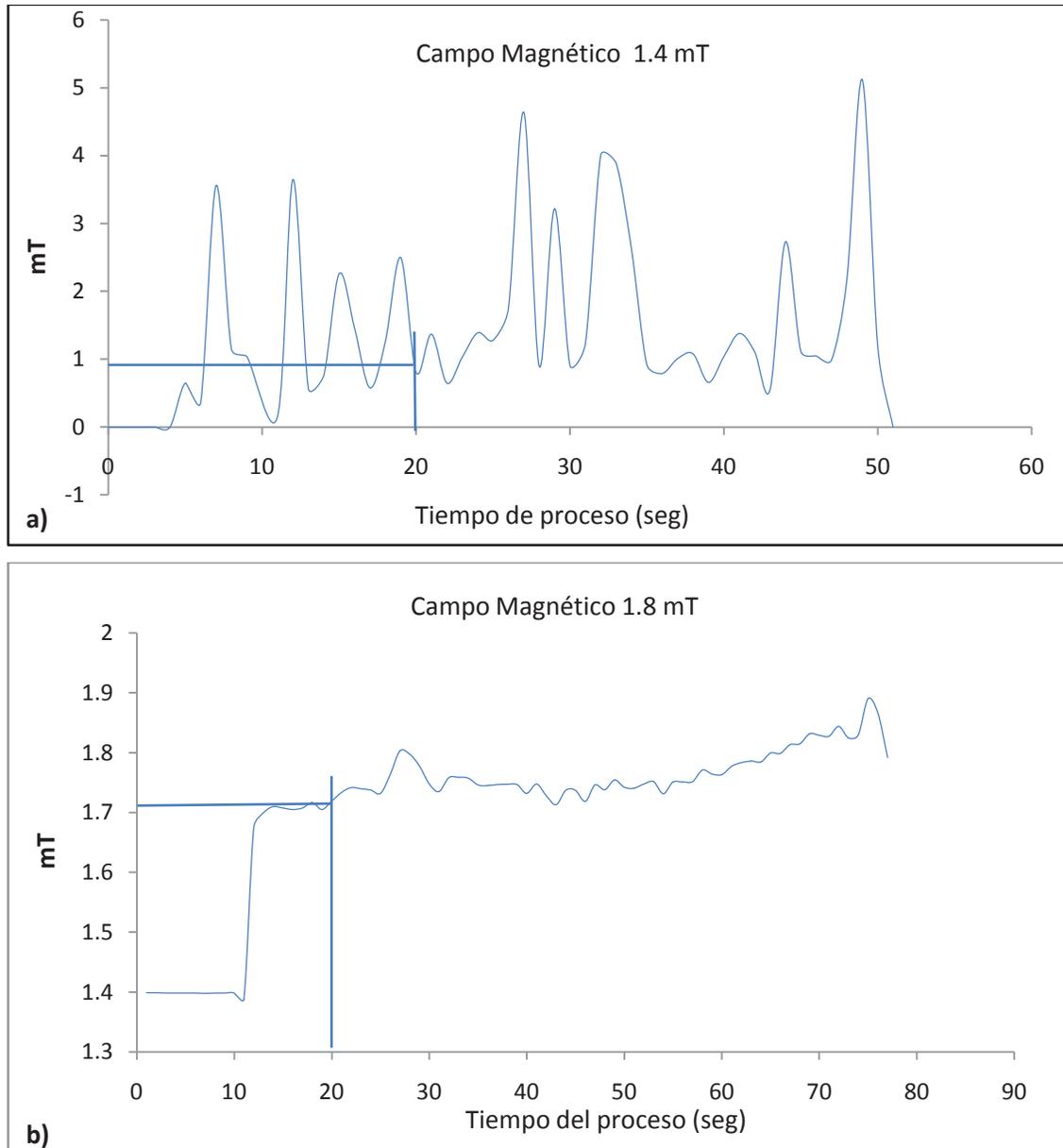


Figura 4.13. Lectura emitida por el sensor de campo magnético Melexis en el proceso de soldadura AS no convencional, a) Campo magnético emitido por la bobina de 3 espiras, 1.4 mT promedio, b) Campo magnético emitido por la bobina de 6 espiras, 1.8 mT promedio.

Con una aplicación de corriente de soldadura de 350 y 382 Amperes promedio, es posible obtener en lapsos de tiempo muy cortos, flujos de campo magnético de hasta 5 mT (Figura



4.13 a), lo que provoca una agitación magnética puntual mayor en esas lecturas, y con lo que se puede relacionar al comportamiento de microdureza tan variable en la probeta de 1.3 mT, ya que teniendo un control eficiente de la corriente, el campo magnético emitido por la bobina del proceso de AS no convencional es mucho más estable (Figura 4.13 b), a su vez es reflejado en el comportamiento microestructural del cordón de soldadura (Se agregan dos gráficos de campo magnético en el Anexo 2).

Investigadores han medido el campo magnético producido en bobinas con sensores de efecto Hall_[32] de manera indirecta, a partir de cálculos que parten de la corriente inducida a las espiras de la bobina_[6, 8, 9, 11, 12] o materiales superconductores_[4] que les arrojan valores preestablecidos, dependiendo del flujo de corriente que pasa a través del material, sin embargo, no hay reportes de mediciones de campo magnético durante un proceso de soldadura en tiempo real y con mucha exactitud como lo expresan las gráficas de las Figuras 4.13 a y b, dado que con el procedimiento y sensor utilizado, el error de medición es mínimo, esto es posible comprobarlo con los cálculos realizados en el apartado 4.7 donde los valores obtenidos se limitan a un valor fijo del flujo de corriente de soldadura, cuando en el proceso real existen fluctuaciones.

4.9 CORRIENTE DE SOLDADURA

Es ampliamente conocido que el flujo magnético depende del número de espiras o configuración de la bobina y de la corriente de soldadura suministrada al solenoide, la cual es generada por la fuente de potencia, que a su vez regula el flujo automáticamente dependiendo de la estabilidad del arco eléctrico, y ésta depende de la superficie del bisel y de la corriente aplicada al proceso depende el flujo magnético, la tasa de depositación y la profundidad de penetración principalmente. Cabe resaltar que la corriente generada por la fuente de potencia es la misma que se suministra al solenoide y al electrodo del proceso de arco sumergido no convencional.

Las mediciones de los gráficos en las Figuras 4.14, fueron tomadas con un amperímetro de gancho Fluke y procesadas por el mismo multímetro industrial Fluke del cual ya se mencionó el procesamiento de los datos.

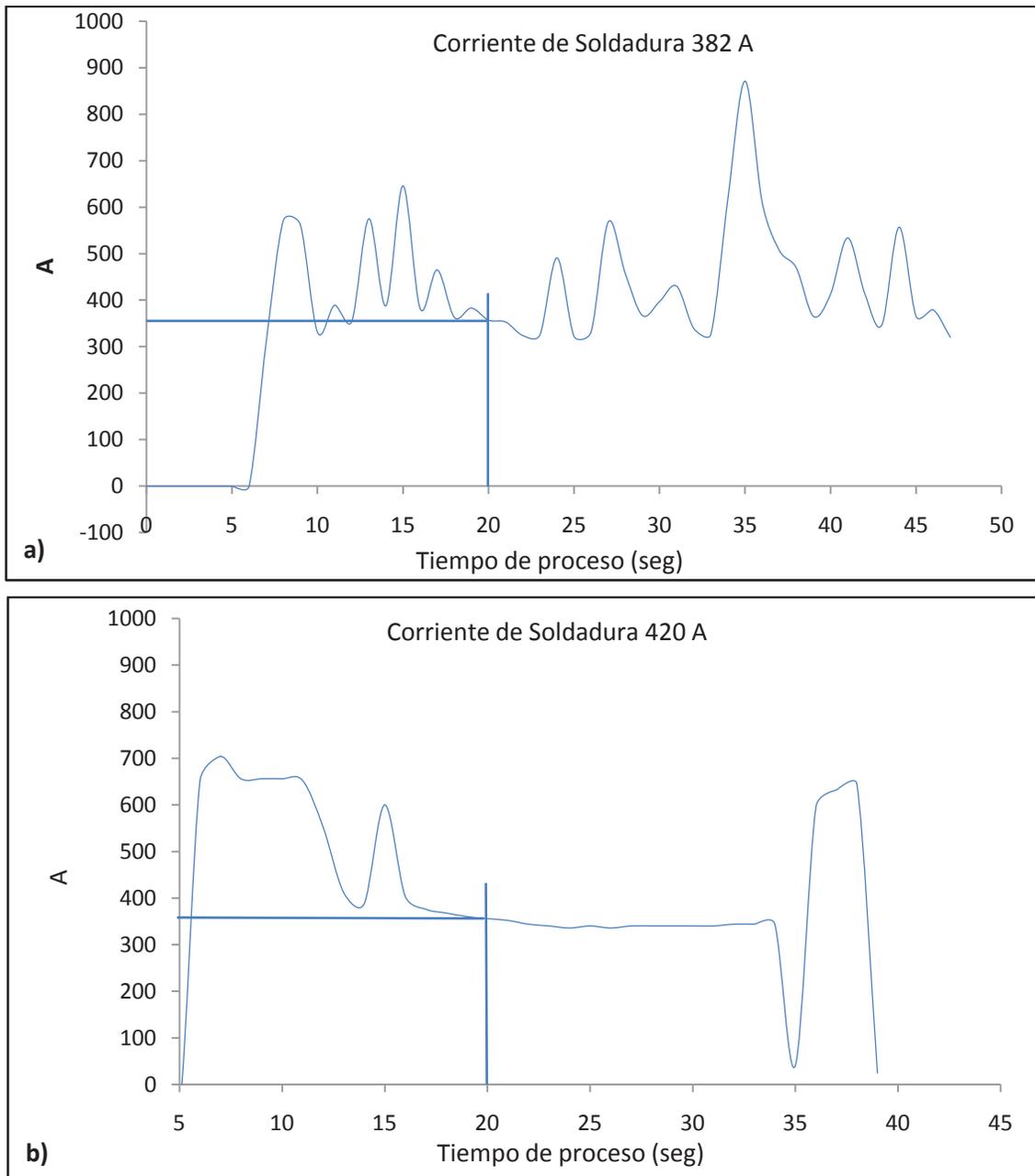


Figura 4.14. Lectura de flujo eléctrico durante el proceso de soldadura AS no convencional, a) Para probeta soldada con 1.3 mT, 382 A promedio, b) Para probeta soldada con 1.8 mT, 420 A promedio.

El comportamiento de la corriente de soldadura al aplicar el campo magnético de 1.3 mT (Figura 4.14 a), presenta variaciones en las lecturas de corriente que oscilan en su mayoría



entre los 350 y 550 A, provocando un flujo magnético en el solenoide que no es constante, el cual se puede observar en la gráfica de campo magnético correspondiente (Figura 4.13 a), con lo que es de suma importancia al aplicar campos magnéticos, el mayor control del flujo de corriente suministrada al solenoide para lograr la mayor homogeneidad en el refinamiento de la microestructura del cordón de soldadura, debido a la agitación magnética constante, como es para el cordón de soldadura con campo magnético aplicado de 1.8 mT (Figura 4.14 b), donde a partir de los 15 segundos del proceso se estabiliza alrededor de los 350 A, generando un campo magnético más estable y que se puede observar en la Figura 4.13b.

Durante el proceso de soldadura por AS no convencional, se observaron fenómenos como es el cambio del ruido del electrodo sin campo magnético a con campo, pero el más importante es que en la mayoría de los cordones realizados con proceso de soldadura por AS no convencional, la fuente de potencia, aumenta el flujo de corriente automáticamente alrededor de 400 A, pero este aumento no se ve reflejado proporcionalmente en la intensidad del campo magnético, sino que se encuentra por abajo del cálculo teórico 1 (Pag. 78), por ejemplo; recordando que las gráficas de campo magnético y corriente son lecturas tomadas en tiempo real, en la Figura 4.14 b, para un tiempo de 20 s, se tiene un registro de flujo de corriente de 356 A, mediante la ecuación 2.13 para una configuración de la bobina de 6 espiras el flujo magnético resultante es de 2.68 mT, lo que gráficamente en la Figura 4.13 b se tienen 1.7 mT. Esta diferencia de 1 mT, puede estar vinculada a factores que no se toman en cuenta en el proceso, como es por ejemplo, la permeabilidad del aislante protector del cable de corriente que puede disminuir el flujo magnético de la bobina, éste fenómeno fue observado también por Malinowski^[32] en soldaduras por proceso GTA. Lo anterior también ocurre para la probeta soldada con 1.3 mT, para un mismo tiempo (Figura 4.14 a) y una corriente de 357 A y 3 espiras, el valor calculado es de 1.3 mT, mientras que la gráfica registra 0.9 mT aproximadamente.



4.10 MAGNETIZACIÓN DE MATERIALES

Las siguientes curvas de magnetización presentan un comportamiento típico de un material ferromagnético, los cuales intensifican el campo magnético producido cuando se hace pasar una corriente eléctrica a través del material, por lo que el campo magnético producido puede llegar a hacer trabajo.

Entre algunas características de los imanes suaves, llamados así también son; una magnetización de saturación alta, que para el caso de los tres materiales es de 1.5 T (15000 Oe), donde los dipolos magnéticos del material llegan a tener la orientación en que es emitido el campo magnético. Una permeabilidad alta, la cual permite llegar a la saturación del material con pequeños campos magnéticos aplicados; esta se puede observar por la pendiente grande que tienen las tres curvas. Un campo coercitivo pequeño, el cual indica que se pueden reorientar los dominios con campos magnéticos pequeños. Las curvas de histéresis de los materiales caracterizados producen gráficas estrechas y tienen también una remanencia pequeña, de tal manera que al eliminar el campo externo no quede magnetización. Realmente estos materiales tienen un ciclo de histéresis pequeño, el cual reduce perdidas de energía. Estos imanes suaves tienen una rápida respuesta a los campos magnéticos, de tal manera que sus dipolos magnéticos pueden alinearse de manera rápida. Sin embargo, su resistividad eléctrica es alta, de tal manera que pueden perder energía por calentamiento si se producen corrientes de Eddy, ó induciendo corrientes eléctricas en el material magnético representado por el efecto Joule (I^2R) [23].

A pesar de que los tres materiales tienen una alta magnetización de saturación, la respuesta al campo magnético externo es un poco diferente, ya que se puede observar para el caso del electrodo (Figura 4.15 a) que llega a emitir 350 emu aproximadamente como una inductancia máxima en las cuatro muestras analizadas cuyas curvas se agregan en el Anexo 4 junto con las del acero al carbono y API-5L-X60.

A diferencia del electrodo, el acero API, en su completa magnetización emite 275 emu, también como un máximo en las 6 muestras analizadas, sin embargo la magnetización de éste



tipo de material presenta valores más homogéneos que el electrodo, estos son 275 emu, 180 emu, 250 emu, 270 emu, 250 emu, 180 emu.

a)

b)

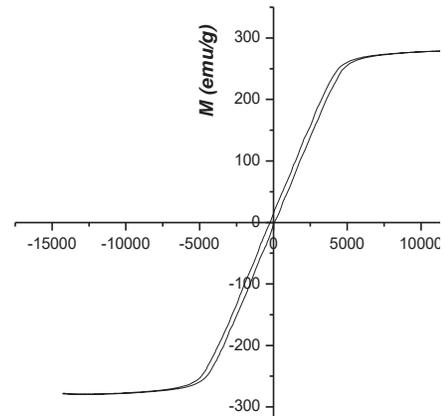


Figura 4.15. Curvas de histéresis obtenidas en magnetómetro. a) Electrodo EM 13K, presentando una inductancia de 350 emu, b) Acero API 5L X60, presentando una inductancia de 275 emu.

Por los resultados obtenidos, el electrodo es que puede llegar a emitir un campo magnético mayor cuando se hace pasar corriente a través de éste como es representado en la Figura 3.13, pero también no quiere decir que en el proceso de soldadura por AS no convencional, no influya el acero API, ya que es en este último donde al pasar la corriente de soldadura para cerrar el circuito eléctrico, llega a emitir campos magnéticos en el bisel (Figura 3.14), influyendo también este flujo magnético en la agitación magnética del material líquido y consecuentemente en la modificación microestructural del cordón soldado.



CONCLUSIONES

- Durante el desarrollo del actual trabajo de investigación se ha logrado reducir el crecimiento dendrítico de la microestructura en cordones de soldadura. Esto se observa en las líneas de fusión, así como en el centro de los cordones obtenidos por la aplicación de campos magnéticos de $1.3 \text{ mT} \approx$ y $1.8 \text{ mT} \approx$.
- Con la aplicación de un campo magnético de 1.8 mT se obtuvo un mejor refinamiento de grano en la estructura columnar, por lo que se puede asegurar que mientras mayor sea la aplicación del flujo de un campo magnético, mayor será el refinamiento de grano en la estructura.
- Las variaciones en los datos de microindentación se deben a dos factores importantes, el primero es la estructura columnar del cordón de soldadura que produce oscilaciones en los valores de microdureza mientras que en la parte del material base es alterada por el calor generado durante la aplicación del mismo cordón; la segunda, debido a las variaciones del campo magnético, es posible correlacionar que donde existe un mayor campo aplicado haya un mayor refinamiento y los valores de microdureza tienden a ser uniformes.
- Los datos obtenidos con los sensores Melexis y la sonda amperimétrica nos revelan datos continuos en tiempo real, lo cual nos permite la manipulación de una mejor manera. Con ello, fue posible observar que aplicando corrientes de 350 A y 32 V se puede obtener un flujo dentro del solenoide de hasta 6 mT de una manera discontinua.
- La variación del flujo magnético se debe a la misma variación de la corriente de soldadura, ya que la intensidad de campo magnético de la bobina es directamente proporcional a la intensidad de corriente y la configuración de la bobina.
- Los resultados de magnetización aplicados al material base API-5L-X60 permiten deducir la facilidad con que se magnetiza el material y al mismo tiempo poder explicar la generación de campos magnéticos emitidos por las piezas biseladas hacia dentro del proceso.



RECOMENDACIONES

- Para definir con mayor precisión la influencia que tiene un campo magnético en la modificación microestructural de una unión soldada, por el proceso de arco sumergido es recomendable utilizar un campo magnético externo fijo, que se pueda manipular de manera independiente a una fuente de potencia del proceso, sin embargo, no se reducirían los costos del proceso.



BIBLIOGRAFÍA

- 1) Manual de Soldadura 8ª Edición, Tomo I, American Weld Society; Ed. Prentice Hall Hispanoamericana, S. A., 8ª Edición, 1996, pp. 190-230.
- 2) Gráficos Realizados y Editados por el Autor de la Tesis “Efecto de la inducción de un Campo Magnético Axial en el Refinamiento de la Microestructura de una Soldadura por Proceso SAW en un Acero para Tubería API-5L-X60”. Ing. A. Ulises López M. 2010.
- 3) Romero Romero J. R., “Corrosión Inducida por Bacterias Sulfato Reductoras Termofilas de 60°C en la Unión Soldada del Acero API-5L-X60”, Tesis, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, UMSNH, 2009.
- 4) Canfeng Fang, Xingguo Zhang, Hai Hao, Shouhua Ji and Junze Jin. “Effects of High Magnetic Field on Solidification and Corrosion Behaviors of Magnesium Alloy” Department of Materials Processing Engineering, School of Material Science and Engineering, Dalian University of Technology, *J. Mater. Sci. Technol*, Vol 23, No.6, 2007, pp.806-810.
- 5) Joonpyo PARK, Hoyoung KIM, Heetae JEONG, Goohwa KIM, Myung Jong CHO, Jea-Sook CHUNG, Minsu YOON, Kyung Ryul KIM and Joo CHOI, “Continuous Casting of Steel Billet with High Frequency Electromagnetic Field”, *ISIJ International*, Vol. 43, 2003, No. 6, pp. 813–819.
- 6) Q. F. Zhu, Z. H. Zhao, J. Z. Cui, Y. B. Zuo and F. Qu. “Effect of Low – Frequency Electromagnetic Field on the As - Casting Microstructures and Mechanical Properties of HDC 2024 Aluminium Alloy”, *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*, Vol.21, 2008, No.3, pp.205-210.
- 7) Q. Wang, E. Wang, J. He, K. Hu, K. Takahashi and K. Watanabe: in Proc. 4th Int. Symp. On Electromagnetic Processing of Material (EPM2003), eds, by S. Asai, Y. Fautrelle, P. Gillon and F. Durand, Lyon, France, 2003, 464.
- 8) M. G. Mousavi, B. Y. Yudodibroto, M. J. M. Hermans and G. den Ouden, “Effect of Electromagnetic Stirring During GTA Welding on Grain Structure of AA6060”, 2001, pp. 185-190.
- 9) T. Campanella, C. Charbon, M. Rappaz; “Grain Refinement Induced by Electromagnetic Stirring: A Dendrite Fragmentation Criterion”; *Metallurgical and Materials Transactions*, 2004; Vol. 35A, pp. 3201-3210.
- 10) M. G. Mousavi, M. J. M. Hermans, I. M. Richardson and G. den Ouden, “Grain Refinement Due to Grain Detachment in Electromagnetically Stirred AA7020 Welds”, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2003, Vol. 8, No. 4, pp. 309- 312.



- 11) B. P. Pearce and H. W. Kerr, "Grain Refinement in Magnetically Stirred GTA Welds of Aluminum Alloy", *Metallurgical Transactions*, Vol. 12B, 1981, pp. 479-485.
- 12) R. A. Jaramillo, S. S. Babu, G. M. Ludtka, R. A. Kisner, J. B. Wilgen, G. Mackiewicz-Ludtka, D. M. Nicholson, "Effect of 30 Tesla Magnetic Field on Transformations in a Novel Bainitic Steel", *Scripta Materialia* 52, 2004, pp. 461-466
- 13) "www.drweld.com"; Soldadura por Arco Sumergido.
- 14) "Submerged Arc Welding Handbook"; Union Carbide Corporation Linde Division; Linde Reference Library, Welding Products, pp. 63-68, 85-94.
- 15) Robert Resnick, David Halliday y Kenneth Krane; "Física Vol. 2", Edit. CECSA; 5a Edición, pp. 725-765.
- 16) Raymond A. Serway, John W. Jewett Jr., *Electricidad y Magnetismo*, Sexta Edición, Editorial Thomson. pp. 995, 210, 206, 234-236, 284.
- 17) http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/teoria/A_Franco/elecma gnetico/cmagnetico.
- 18) Rincón Arce Alvarado, Rocha León Alonso, "ABC de Física" Editorial Herrero. 1986.
- 19) Lázaro Johnny, "Adaptación al Proceso de Soldadura MIG a Soldadura por Electrodeado", Tesis de Maestría, Morelia, México, 2005.
- 20) GEORGE L. Kehl, *Fundamentos de la Práctica Metalográfica*, Editorial Aguilar Madrid, 3ª Edición.
- 21) ASM Handbook Welding, Brazing and Soldering, ASM International, Vol. 6, 1993 pp. 416-428.
- 22) American Petroleum Institute, Specification for Line Pipe, API Specification 5L, 1987, pp. 8-9.
- 23) Donald R. Askeland; *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, 3ª Edición, 1998, Edit. International Thomson, pp. 625-641.
- 24) M. C. Santoyo Arreguin Ma. Teresita, *Física del Estado Sólido*, ITM Ingeniería en Materiales, 2003, pp. 188-207.
- 25) FlukeView Forms, Users Manual, September 2000, Rev. 2, 10/2002. Fluke Corporation, pp. 1, 7, 15-20.



- 26) Fluke 123/124, Industrial ScopeMeter. Users Manual. September 2002. Fluke Corporation, pp. 8-12, 14-15, 26, 28, 61-67.
- 27) Fluke i800, Manual de Usuario, 2007, Fluke Corporation, pp. 1-6.
- 28) MLX 90215, Precision Programmable Linear Hall Effect Sensor, Melexis, 2002, pp. 1, 2, 6-8.
- 29) Programmable Linear Hall ICs (Unprogrammed), Short Form Catalog, Melexis, pp. 9.
- 30) BUEHLER SUM-MET, The Science Behind Materials Preparation, A Guide to Materials Preparation and Analysis, 2007, pp. 45-47, 87-88.
- 31) Rivera Soto Eliseo, “Estudio Comparativo de la Soldadura por Arco Sumergido en el Acero X-70 con y sin Aplicación de Campo Magnético Axial”, Tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica, UMSNH, 2007, pp. 54-66.
- 32) M. Malinowski- Brodnicka, G. denOuden, W. J. P. Vink, “Effect of Electromagnetic Stirring on GTA Welds in Austenitic Stainless Steel”, Welding Research Supplement, 1990, pp. 52-59.



ANEXO 1

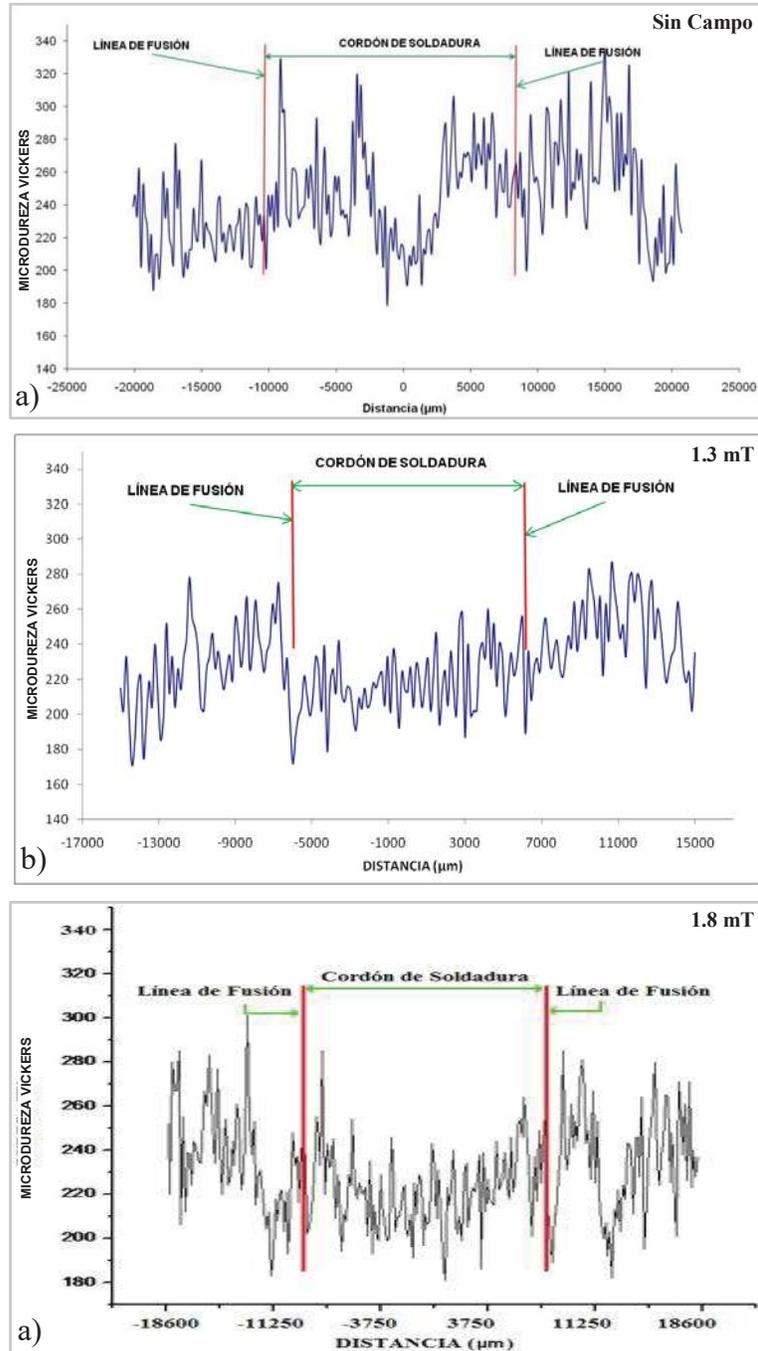


Figura A 1. Medición de microdureza a lo ancho del cordón de soldadura en una junta en doble “V” de acero API-5L-X60, 150 μm de distancia entre indentación, Carga 50g. a) Sin campo magnético, b) Campo magnético de 1.3 mT, c) Campo magnético de 1.8 mT.



ANEXO 2

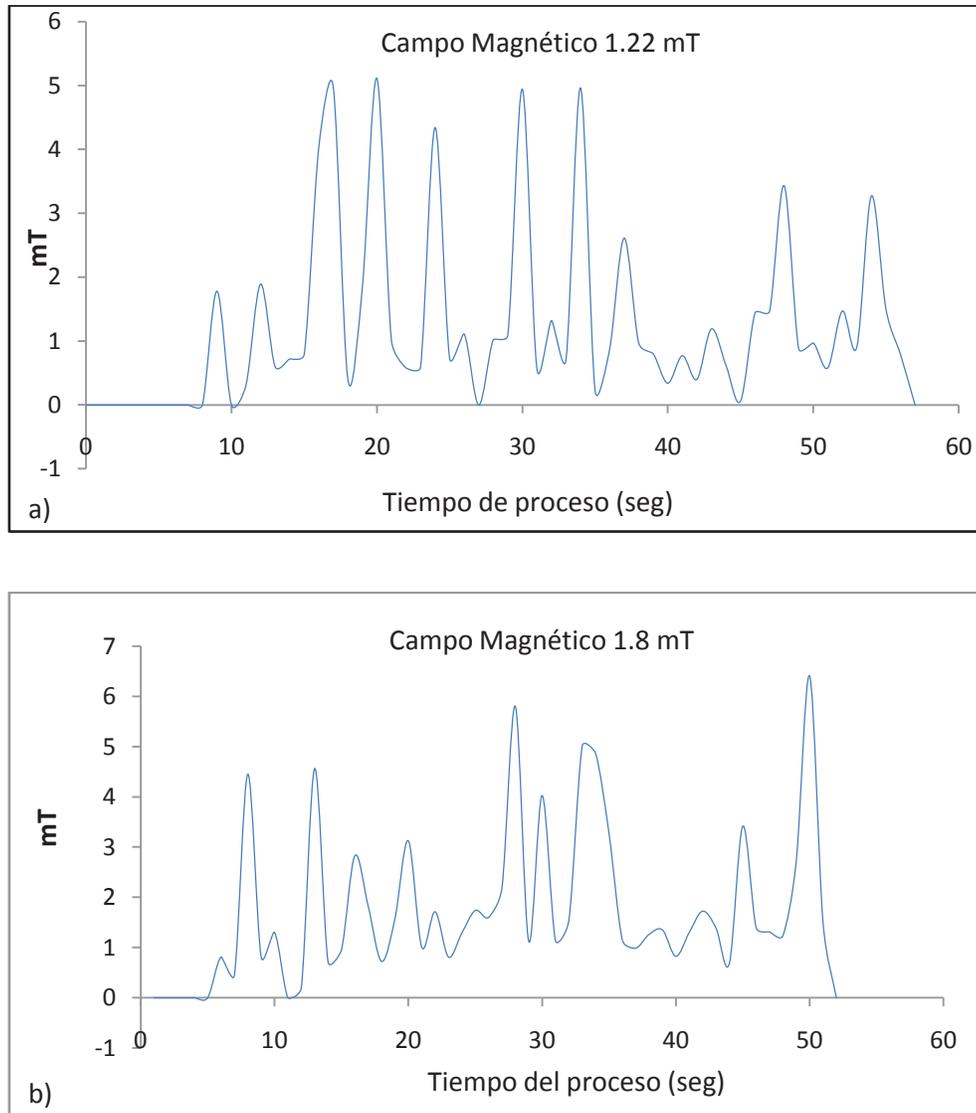


Figura A 2. Lectura emitida por el sensor de campo magnético Melexis en el proceso de soldadura AS no convencional, a) Campo magnético emitido por la bobina de 3 espiras, 1.4 mT promedio, b) Campo magnético emitido por la bobina de 6 espiras, 1.8 mT promedio.



ANEXO 3

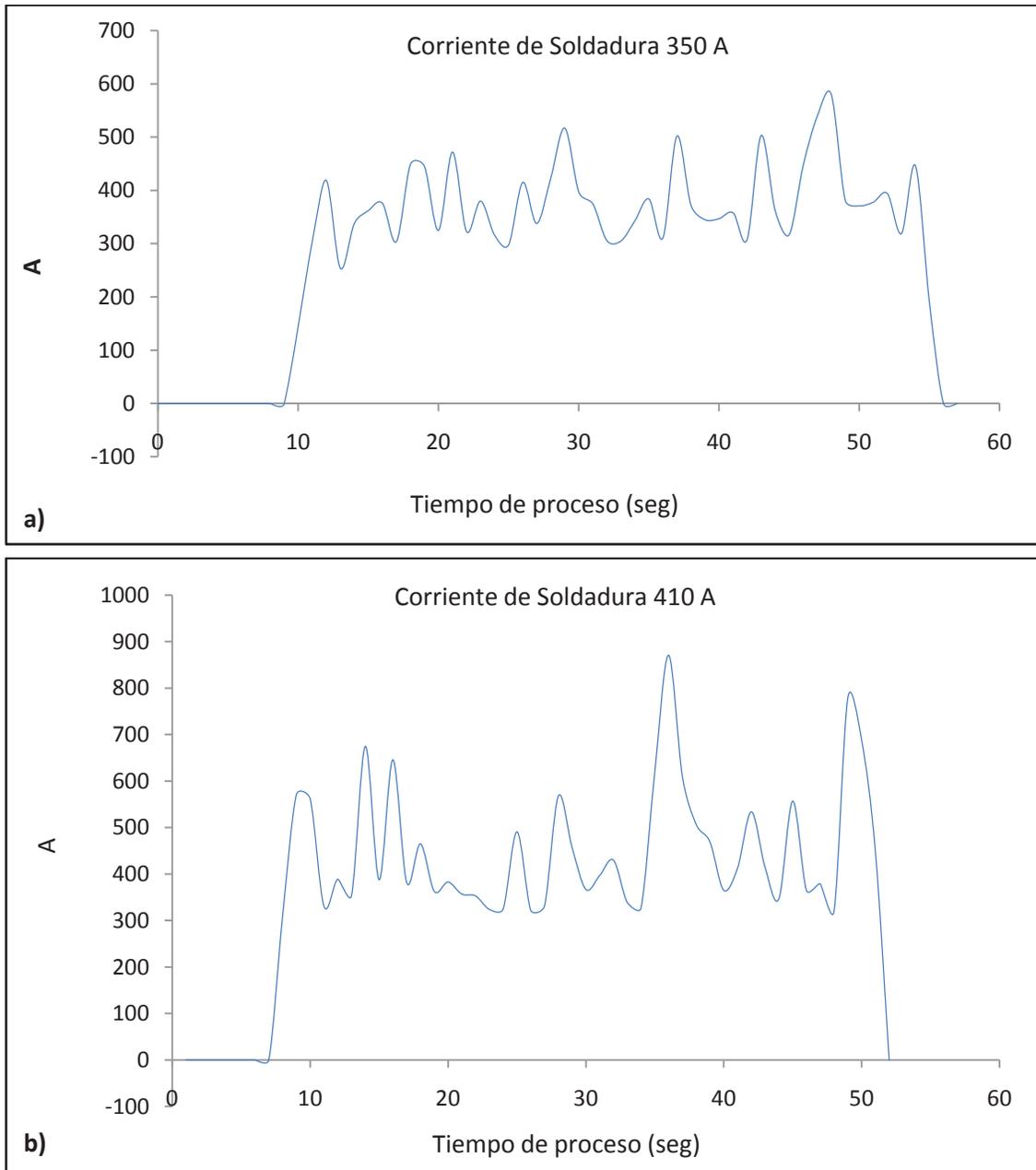


Figura A 3. Lectura de flujo eléctrico durante el proceso de soldadura AS no convencional, a) Para probeta soldada con 1.3 mT, 350 A promedio, b) Para probeta soldada con 1.8 mT, 410 A promedio.



ANEXO 4

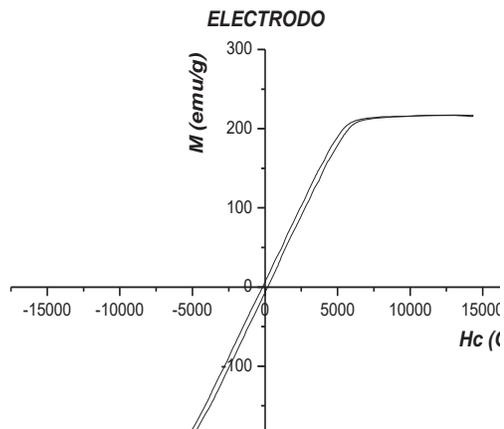


Figura A 4. Curvas de histéresis de electrodo EM 13K.

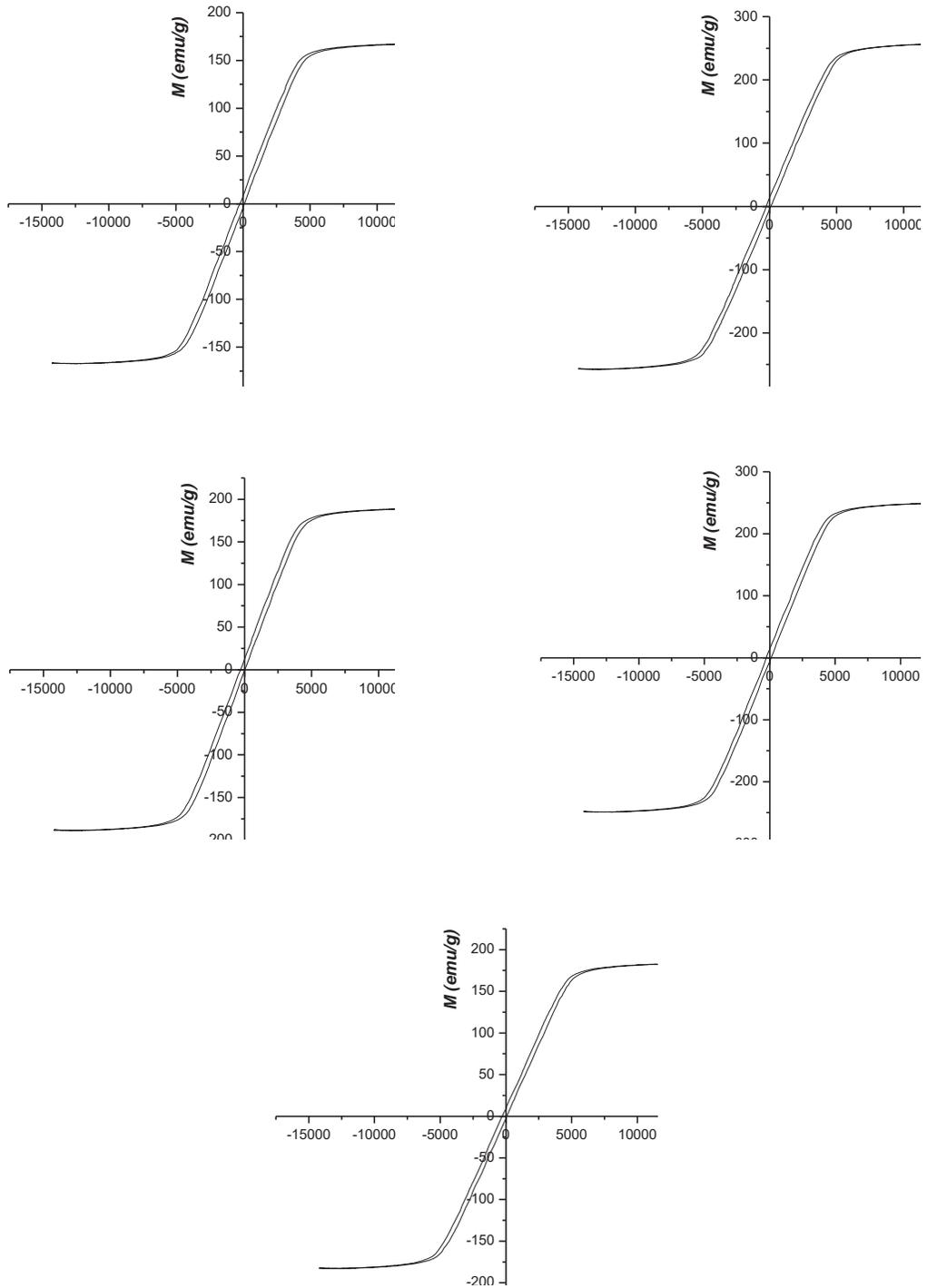


Figura A 5. Curvas de histéresis de acero API-5L-X60.

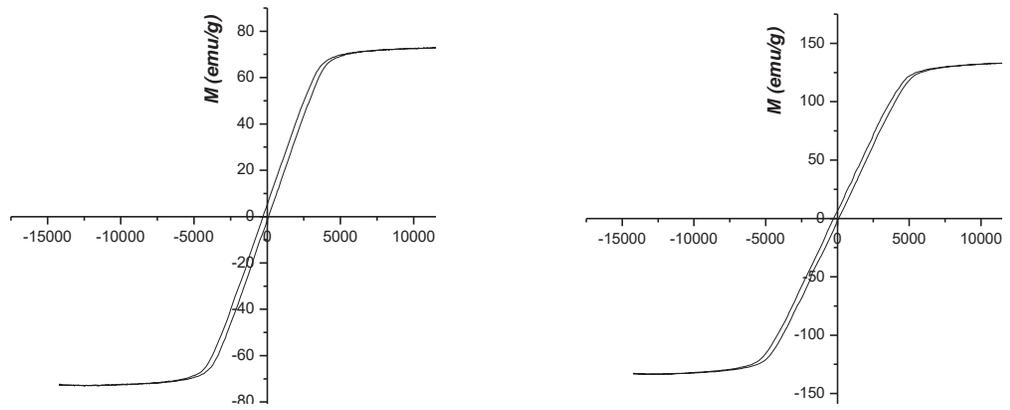


Figura A 6. Curvas de histéresis de acero al carbono.