



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN METALURGIA Y MATERIALES

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN  
METALURGIA Y CIENCIAS DE LOS  
MATERIALES

**MEJORAMIENTO DEL GRADO DE SOLDABILIDAD DEL ACERO 9840 UNIDO POR  
MEDIO DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO E INTERACCIÓN  
ELECTROMAGNETICA**

Tesis para obtener el Grado de Maestro en Metalurgia y Ciencias de los Materiales

**Presenta:**  
**ITM. PAOLA MONTSERRAT FLORES MORALES**

Director de Tesis

**DR. FRANCISCO FERNANDO CURIEL LÓPEZ.**

MORELIA, MICHOACÁN, SEPTIEMBRE 2023.

**“MEJORAMIENTO DEL GRADO DE SOLDABILIDAD DEL  
ACERO 9840 UNIDO POR MEDIO DE SOLDADURA POR ARCO  
SUMERGIDO E INTERACCIÓN ELECTROMAGNETICA”.**

## **OFICIO DE ASIGNACIÓN DE MESA SINODAL**

## AGRADECIMIENTOS

Primero que nada, agradezco a Dios por la vida, por permitirme cumplir con mis sueños y anhelos de mi corazón, por guiarme y no dejarme sola, por las fuerzas y la salud para culminar este proyecto más de mi vida.

A mi madre por ser ese pilar en mi vida y ejemplo de lucha, por jamás dejarme sola y animarme a continuar cada día.

A mi padre por enseñarme que no hay mejor herencia en esta vida que el estar preparados profesionalmente, que no es que no nos quiera a su lado si no que tenemos que volar.

A mi viejita adorada por la fuerza, por cada oración y por aguantar a mi próximo regreso, te amo mamita Yoli, ojalá nunca me faltes.

A Julio César, por apoyarme de manera profesional y personal, por enseñarme que siempre podemos dar más, por tenerme paciencia, por compartir conmigo de su conocimiento, por extender sus alas como el ángel que es para mi vida, para protegerme y cuidarme durante este camino llamado VIDA, ¡gracias!

A mis hermanos, a mis primitos, a mis tíos, por apoyarme siempre, por su amor incondicional y por cada recibimiento cada que nos vemos.

A la maestra Anita y al señor Ángel, por cuidarme, por abrirme la puerta de su hogar y su corazón.

Al Doctor Ariosto, por darnos la oportunidad, el seguimiento y su apoyo en el proceso hacia la maestría.

Al Doctor Curiel como asesor, por su apoyo incondicional para poder sacar adelante este proyecto.

A los Doctores que conforman mi comité, por su trabajo en equipo para poder culminar este proceso de formación.

Al Doctor Ricardo Ambriz, por permitir realizar una estancia en el CIITEC y poder tomar la materia de elemento finito.

Al IIMM por ser mi casa de estudios durante mi formación como maestrante.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (Conahcyt), por el apoyo de la beca para mi manutención durante la maestría.

## **DEDICATORIA**

A Dios porque sin el yo no soy nada, porque mi vida está en manos de él y todo lo que hago es en nombre suyo, para gloria y honra de él.

A mi angelito que está en el cielo, que todo haya valido la pena, seré mejor cada día por ti, para que nuestro próximo encuentro estés tan orgullo de mí.

A mi madre, por todo su amor, por ser mi mejor amiga.

A mi mamita Yoli, por su amor, por esperarme cada día.

A Julio César, por ser mi compañero de vida y porque vamos por más éxitos.

A mi familia, porque los amo y extraño tanto, cada logro y éxito es por y para ellos.

A mí misma, por ser valiente, por salir de mi zona de confort y querer ser mejor cada día.

## ÍNDICE

Resumen .....	XIII
Abstract.....	XIV
Capítulo 1 .....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo general .....	2
1.3.2 Objetivos específicos .....	2
1.4 Hipótesis .....	3
Capítulo 2. ....	4
Marco teórico y estado del arte.....	4
2.1 Metales base .....	4
2.2 Aceros aleados.....	4
2.2.1 Aceros de alta resistencia y baja aleación .....	5
2.2.2 Acero AISI 9840.....	5
2.2.3 Propiedades mecánicas y aplicaciones típicas.....	6
2.2.4 Propósitos de incorporar elementos de aleación a los aceros .....	7
2.2.4.1 Formadores de carburos.....	7
2.2.4.2 Cromo .....	7
2.2.4.3 Níquel .....	8
2.2.4.4 Molibdeno.....	8
2.3. Soldadura .....	8
2.3.1 Proceso de soldadura por arco sumergido (submerged arc welding-SAW, por sus siglas en inglés). ....	9
2.3.2 Equipo.....	11
2.3.3 Clasificación de los metales base. ....	11
2.3.4 Tipos de electrodos y fundentes. ....	12
2.3.5 Fundentes.....	12
2.3.7 Electrodo y fundentes de acero al carbono .....	13

2.3.7.1 Electrodos y fundentes para aceros de baja aleación.....	13
2.3.7.2 Aplicaciones generales del proceso SAW .....	13
2.3.8 Soldabilidad del acero 9840 .....	14
2.4 Electricidad y magnetismo .....	15
2.4.1 Campos eléctricos.....	16
2.4.1.1 Líneas de campo eléctrico .....	17
2.4.2 Campos magnéticos.....	17
2.4.3 Propiedades magnéticas de los materiales.....	19
2.4.3.1 Ferromagnetismo .....	19
2.4.3.2 Diamagnetismo .....	20
2.4.3.3 Paramagnetismo.....	20
2.4.3.4 Histéresis .....	21
2.4.3.4 Temperatura de Curie .....	21
2.4.4 Inducción de campos electromagnéticos durante el proceso de soldadura .....	22
2.5 Metalurgia de la Soldadura.....	27
2.5.1 Solidificación del metal base de soldadura.....	27
2.5.2 Efecto de los parámetros de soldadura en la estructura de los granos.....	28
2.5.3. Fragmentación dendrítica .....	29
2.5.4. Efectos de los parámetros de soldadura en la nucleación heterogénea .....	30
2.5.5. Transformación ferrítica a partir de la austenita, en soldadura de aceros al carbono .....	31
2.5.6. Mecanismos de la ferrita acicular en el cordón de soldadura.....	31
2.5.6.1 Crecimiento de ferrita acicular .....	32
Capítulo 3 .....	33
Desarrollo experimental .....	33
3.1 Metodología de la investigación.....	33
3.1.1 Caracterización del material base .....	34
3.1. Preparación de la junta y unión por medio del proceso SAW .....	35
Análisis y discusión de resultados .....	45
4.1. Caracterización y propiedades mecánicas del material base .....	45
4.1.2 <i>Microdureza Vickers</i> .....	46

<i>4.1.3 Ensayo de tensión uniaxial</i> .....	47
<i>4.1.4 Ensayo de impacto charpy</i> .....	48
4.2 Caracterización de uniones soldadas .....	50
4.3 Microdureza Vickers .....	56
4.4 Efecto de los campos electromagnéticos en la soldadura.....	58
4.5 Comportamiento de la soldadura sin campo magnético .....	68
Conclusiones.....	72
Referencias bibliográficas .....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

2.1 Micrografía del acero 9840.....	5
2.2 Unión de placas mediante un proceso de soldadura por arco.....	8
2.3 Esquema de soldadura por arco sumergido.....	10
2.4 Proceso de soldadura por arco sumergido.....	10
2.5 Esquema del equipo del proceso SAW.....	11
2.6 Aceros al carbono soldados mediante el proceso SAW.....	12
2.7 Diagrama Granville para ubicar el grado de soldabilidad.....	15
2.8 Campo magnético.....	16
2.9 Líneas de campo eléctrico.....	17
2.10 Líneas de campo magnético.....	18
2.11 Flujo de las líneas del campo magnético.....	18
2.12 Efecto del campo magnético en el material.....	19
2.13 Dominios magnéticos.....	20
2.14 Ciclo de histéresis.....	21
2.15 Sentido y dirección de la fuerza de Lorentz por medio de la regla de la mano derecha.....	22
2.16 Fuerza de Lorentz en un arco eléctrico en un proceso GTAW.....	23
2.17 Macroestructura en la superficie del cordón de soldadura de un acero inoxidable ferrítico 410: a) sin aplicación de campo electromagnético externo y b) aplicación de campo electromagnético externo.....	24
2.18 Campo magnético externo durante el proceso de soldadura.....	25
2.19 Campo electromagnético aplicado durante el proceso de soldadura GMAW.....	25
2.20 Micrografías de la junta soldada con una intensidad de 3Mt.....	26
2.21 Perfiles transversales de las uniones.....	26
2.22 Modos básicos de solidificación: (a) la solidificación planar tetrabromuro de carbono, (b) la solidificación celular de tetrabromuro de carbono con una pequeña cantidad de impureza, (c) la solidificación dendrítica columnar de tetrabromuro de carbono con la impureza varios puntos porcentuales, (d) la solidificación equiaxial dendrítico de ciclohexanol con la impureza.....	28

2.23 Soldadura de arco de gas-tungsteno de 99.96% de pureza, en aluminio: (a) 1000 mm/min velocidad de soldadura; (b) 250 mm/min velocidad de soldadura.....	29
2.24 Mecanismo de nucleación durante la soldadura: (a) vistas de arriba (b) vista lateral.....	30
2.25 Efecto de los parámetros de soldadura en la nucleación heterogénea (a) bajo sobreenfriamiento constitucional en la velocidad de soldadura y baja entrada de calor, (b) nucleación heterogénea con la ayuda del sobreenfriamiento constitucional, con una alta velocidad de soldadura y alto calor de entrada.....	31
2.26 Micrografía óptica de muestras del metal de soldadura Fe-Cr-C sometida a una transformación isotérmica de ferrita acicular.....	32
3.1 Diagrama de flujo de la metodología experimental.....	33
3.2 Esquema de las dimensiones y seccionamiento de la junta a soldar.....	35
3.3 Orientación de las bobinas durante el proceso de soldadura.....	36
3.4 Soldadura sin la interacción de los campos electromagnéticos.....	38
3.5 Soldadura con la interacción de los campos electromagnéticos.....	38
3.6 Evaluación de la soldadura por medio de líquidos penetrantes.....	38
3.7 Trazo de placas para probetas de ensayos mecánico.....	39
3.8 Probeta para ensayos de microdureza Vickers.....	39
3.9 Diseño de probetas para los ensayos de tensión uniaxial.....	40
3.10 Probetas para los ensayos de tensión uniaxial.....	40
3.11 Diseño para las probetas de impacto bajo la norma ASTM E23.....	41
3.12 Equipo para realizar los ensayos de impacto.....	41
3.13 Medición del tamaño de grano del material base.....	42
4.1 Diagrama CTT del acero AISI 9840.....	45
4.2 Micrografía del acero AISI 9840.....	46
4.3 Perfil de microdurezas Hv del metal base.....	47
4.4 Diagrama esfuerzo-deformación del metal base.....	48
4.5 Diagrama del ensayo Charpy material base.....	49
4.6 Probeta del ensayo de Charpy.....	49
4.7 Uniones soldadas a) CIEM, b) SIEM.....	50

4.8 Macrografías de las uniones soldadas a) CIEM, b) SIEM.....	51
4.9 Microestructura de la interface de la soldadura con campo y sin campo a) interface de soldadura parte de inicio CIM, a) <sup>1</sup> interface de soldadura parte de inicio SIM, b) interface de soldadura parte media CIM, b) <sup>1</sup> interface de soldadura parte media SIM, c) interface de soldadura parte final CIM, c) <sup>1</sup> interface de soldadura parte final SIM.....	53
4.10 Microestructura comparativa del cordón de soldadura con campo y sin campo a) cordón de soldadura parte de inicio CIM, a) <sup>1</sup> cordón de soldadura parte de inicio SIM, b) cordón de soldadura parte media CIM, b) <sup>1</sup> cordón de soldadura parte media SIM, c) cordón de soldadura parte final CIM, c) <sup>1</sup> cordón de soldadura parte final SIM.....	55
4.11 Perfil de dureza de la unión CIEM, a) parte inicio, b) parte media, c) parte final.....	57
4.12 Perfil de dureza de la unión SIEM, a) parte inicio, b) parte media, c) parte final.....	58
4.13 Macrografía de la soldadura CIEM.....	59
4.14 Micrografía de la soldadura a) CIEM, b) SIEM.....	60
4.15 Curva esfuerzo-deformación del material base 9840, unión soldada con campo y sin campo .....	61
4.16 Superficie de fractura por tracción uniaxial de unión con campo.....	62
4.17 Superficie de fractura por tracción uniaxial de unión sin campo.....	63
4.18 EDS de % e.p. de Mns en la a) soldadura con campo y b) soldadura sin campo.....	64
4.19 MnS en ZAC de superficie de fractura de probetas ensayadas por tracción uniaxial.....	65
4.20 Curva fuerza-tiempo de ensayo de impacto en material base, con entalla en soldadura con campo y sin campo.....	66
4.21 Fractografía de probetas ensayadas por medio de ensayo de impacto.....	67
4.22 Perfil de microdurezas de las uniones soldadas con campo y sin campo.....	68
4.23 Grietas en las uniones sin campo.....	69
4.24 EDS de la grieta en la ZAC.....	70
4.25 Defectos en la soldadura sin campos.....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Composición química % e.p.....	6
Tabla 2.2 Temperatura para tratamientos térmicos.....	6
Tabla 2.3 Propiedades mecánicas del acero AISI 9840.....	7
Tabla 3.1 Composición química del acero 9840 (%e.p).....	34
Tabla 3.2 Composición química del fundente aglomerado.....	36
Tabla 3.3 Propiedades mecánicas de soldadura en combinación con el fundente y el electrodo.....	36
Tabla 3.4 Composición química del electrodo ER70S-6.....	37
Tabla 3.5 Propiedades mecánicas del metal depositado con un electrodo ER70S-6.....	37
Tabla 3.6 Variables de soldadura empleadas en el proceso de unión.....	37
Tabla 3.7 Muestreo de intersecciones para la medición del tamaño de grano del material base.....	43
Tabla 4.1 Microdurezas promedio del material base.....	46
Tabla 4.2 Propiedades mecánicas del material base 9840, unión soldadas CIEM y SIEM.....	61
Tabla 4.3 Resultados obtenidos de los ensayos de impacto del material base, soldadura SIEM y CIEM.....	65

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

<i><b>Término</b></i>	<i><b>Definición</b></i>
<b>AISI</b>	Instituto Americano del Hierro y Acero
<b>HB</b>	Dureza Brinell
<b>% e.p.</b>	Porcentaje en peso
<b>°F</b>	Grados Fahrenheit
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>Lb/in<sup>2</sup></b>	Libra sobre pulgada cuadrada
<b>MPa</b>	MegaPascales
<b>In</b>	Pulgada
<b>AWS</b>	Sociedad americana de soldadura
<b>CC</b>	Corriente continua
<b>CA</b>	Corriente alterna
<b>1G</b>	Posición de soldadura plana
<b>5G</b>	Posición de soldadura horizontal
<b>C.E.</b>	Carbono equivalente
<b>(<math>N C^{-1}</math>)</b>	Campo eléctrico medido en newtons por culombios
<b><math>\rightarrow(E)</math></b>	Campo eléctrico
<b><math>B^{\rightarrow}</math></b>	Campo magnético
<b>F</b>	Fuerza magnética
<b>(J)</b>	Corriente eléctrica
<b><math>\rightarrow F</math></b>	Fuerza de Lorentz
<b>GTAW</b>	Gas Tungsten Arc Welding
<b>GMAW</b>	Gas Metal Arc Welding
<b>mT</b>	Militesla
<b>ZF</b>	Zona de fusión
<b><math>\Delta G</math></b>	Energía libre
<b>(<math>\theta</math>)</b>	Angulo de contacto
<b>FCC</b>	Cubica centrada en las caras
<b>BCC</b>	Cubica centrada en el cuerpo
<b>V</b>	Voltaje
<b>A</b>	Amperios
<b>cm</b>	Centímetro
<b>Vel.</b>	Velocidad
<b>s</b>	Segundo
<b>MB</b>	Material base
<b>mm/s</b>	Milímetro sobre segundo

<b>CCT</b>	Transformación bajo enfriamiento continuo
<b>CIEM</b>	Con interacción electromagnética
<b>SIEM</b>	Sin interacción electromagnética
<b>HV</b>	Dureza Vickers
<b>P.S.</b>	Parte superior
<b>P.M.</b>	Parte media
<b>P.I.</b>	Parte inferior
<b>Fgy/kN</b>	Fuerza necesaria
<b>Fin/kN</b>	Fuerza requerida para el inicio de la grieta
<b>Fm/ kN</b>	Fuerza máxima
<b>FIU/ kN</b>	Fuerza al inicio del crecimiento inestable de la grieta
<b>ASTM</b>	Sociedad estadounidense para pruebas y materiales
<b>EDS</b>	Espectroscopia de rayos X por dispersión de energía
<b>ms</b>	Milisegundos
<b>µm</b>	Micrómetros

## Resumen

En este proyecto de investigación se presentan los resultados obtenidos de la unión de un acero AISI 9840 unido mediante el proceso de soldadura de arco sumergido con y sin la interacción de campos electromagnéticos durante la realización de la soldadura.

Considerando que este es un acero con un grado de baja soldabilidad debido a su alto porcentaje de carbono equivalente, para poder unirlo mediante cualquier proceso de soldadura es necesario realizar tratamientos térmicos del tipo de precalentamiento y postcalentamiento. Por lo cual se realizó las uniones con dos bobinas externas que interactúan entre sí y además estén orientados en contra de la dirección de crecimiento de grano. Con la implementación de estas bobinas, sí se pueden realizar uniones sin la necesidad de realizar tratamientos previos ni posteriores a la soldadura, de igual manera con la orientación adecuada del campo electromagnético se puede impedir la movilidad atómica para generar el principio de desorientación y activar el mecanismo de nucleación heterogénea y minimizar el crecimiento de grano columnar, obteniendo un refinamiento de grano en el cordón de soldadura, lo que hace posible la obtención de microestructuras de tipo de ferrita acicular la cual evita la propagación de grietas en este tipo de aceros y esto es comprobado de acuerdo a la caracterización microestructural de estas uniones. Con base a los resultados de los ensayos mecánicos se encontró un mejoramiento de sus propiedades de la junta soldada del metal base. Los mejores resultados se obtuvieron en las soldaduras con la interacción magnética de la parte media de la placa soldada.

Se concluye que, de acuerdo a la implementación de dos bobinas externas durante el proceso de soldadura, ya no es necesario realizar tratamientos térmicos antes ni después de realizar las uniones esto se comprueba con el juego de cupones que fueron soldados sin la interacción de estas bobinas, ya que presentan defectos en la soldadura (poros, inclusiones, socavaciones y falta de penetración) en la zona afectada por calor (ZAC) se presentan grietas, se comprueba que se mejoró el grado de soldabilidad ya que los cupones soldados con la interacción electromagnética están libres de defectos, existe un refinamiento de grano y disminución de microdurezas en la ZAC.

**Palabras clave:** Soldabilidad, campo electromagnético, refinamiento, soldadura, microestructura.

## **Abstract**

In this research project, the results obtained from the joining of an AISI 9840 steel welded by the submerged arc welding process with and without the interaction of electromagnetic fields are presented.

Considering that this is a steel with a low degree of weldability due to its high percentage of equivalent carbon, in order to join it by any welding process it is necessary to carry out preheating and postheating heat treatments. Therefore, the welds were performed with two external coils that interact with each other and are also oriented against the direction of grain growth. The implementation of these coils, the joints can be made without the need for pre- or postwelding treatments, in the same way, with the proper orientation of the electromagnetic field, atomic mobility can be prevented to generate the principle of disorientation and activate the nucleation mechanism and minimize grain growth, obtaining grain refinement in the weld bead, which makes it possible to obtain microstructures of the acicular ferrite type which prevents the propagation of cracks in this type of steels and this is verified according to the microstructural characterization of these joints. Based on the mechanical tests, the expected results were obtained since there is an improvement in its properties with reference to the base metal, the best results were obtained in the welds with the magnetic interaction of the middle part.

It is concluded that, according to the implementation of two external coils during the welding process, it is no longer necessary to carry out heat treatments before or after welding, this is verified with the set of coupons that were welded without the interaction of these coils, since they present defects in the welding (pores, inclusions, undercuts and lack of penetration) in the HAZ there are cracks, it is verified that the degree of weldability was improved since the coupons welded with the electromagnetic interaction are free of defects.

**Keywords:** Weldability, electromagnetic field, refinement, welding, microstructure.

## Capítulo 1

### 1.1 Introducción

Actualmente, el acero 9840 es junto con el acero 4340, uno de los aceros más utilizados en la industria para la fabricación de partes que suelen someterse a severos esfuerzos como son: engranes, flechas, pernos de alta resistencia, cigüeñales y árboles de leva, los cuales deben presentar una alta resistencia, ductilidad y templabilidad. Este acero suele someterse a tratamientos térmicos de recocido con temperaturas de entre 780° y 840° C, un normalizado que va desde los 870° a 925° C y revenido en el rango de 200° a 650° C [1]. Así mismo, presenta contenidos en carbono que van desde 0.38 hasta 0.43 % en peso que, aunado con los contenidos de Ni, Cr, Mo, Si y Mn que se encuentran embebidos en la matriz de Fe, generan un contenido en carbono equivalente C.E. de 0.81 [2]. Este contenido de C.E. muestra que este acero tiene baja soldabilidad y que normalmente suele disminuir al someter las juntas a procesos de soldadura donde se alcanzan temperaturas de precalentamiento superiores a los 425° C, manteniendo esta temperatura durante la transferencia del metal de aporte, para posteriormente dar un enfriamiento lento a la unión soldada y finalmente aplicar un relevado de esfuerzos a una temperatura de 540 °C con la finalidad de que la resistencia máxima a la tensión y dureza de la unión soldada sea semejante a la del material base, evitándose así, el inicio de la transformación martensítica, altos gradientes de dureza en la ZAC y en la piletta de soldadura e incluso agrietamiento en caliente o en frío [3]. Estos procedimientos suelen generar diferentes fases en el metal aportado como son: ferrita alotriomórfica, ferrita idiomórfica, ferrita widmanstätten primaria y secundaria, las cuales no suelen ser las benéficas en la soldadura, así mismo, también suele presentarse la disminución del % e.p. de C debido a la difusión del C durante el tratamiento de relevados esfuerzos [4]. Como alternativa a estos procedimientos, algunas investigaciones han inducido campos electromagnéticos durante la aplicación del metal de aporte, a fin de homogenizar y refinar el tamaño de grano en la soldadura y disminuir el gradiente de dureza en la ZAC utilizando aceros inoxidable con buena soldabilidad sin éxito alguno [4]. Su uso ha sido aplicado para disminuir el grado de sensibilización en aceros inoxidable austeníticos y dúplex logrando contrarrestar el proceso de corrosión en la zona afectada por el calor [5]. Por otro lado, se ha aplicado con éxito en la mejora de las propiedades mecánicas en revestimientos de acero API con inoxidable [6]. Su uso en aceros API ha demostrado que la ZAC y la piletta de soldadura se

pueden mejorar debido a la reorientación de las fases secundarias durante el proceso de enfriamiento en la soldadura [7]. En el actual proyecto de investigación se pretende mejorar la soldabilidad de un acero AISI 9840 mediante la inducción de dos campos electromagnéticos durante la aplicación de la soldadura en una junta de acero AISI 9840, con la finalidad de generar refinamiento de grano en la soldadura y disminuir de los gradientes de dureza en la ZAC, para finalmente evaluar las uniones soldadas mediante técnicas de caracterización y ensayos mecánicos.

## **1.2 Justificación**

De acuerdo con la clasificación de los aceros por medio del porcentaje de carbono en peso, se tiene que el acero AISI 9840 contiene un carbono equivalente de 0.89, lo cual lo ubica en la zona III del diagrama de Granville. Por lo tanto, se recomienda realizar un precalentamiento y postcalentamiento. Por otro lado, durante el proceso de solidificación en el enfriamiento el crecimiento columnar y la solidificación epitaxial pueden favorecer el agrietamiento en caliente en la zona fundida. La presencia de un campo electromagnético externo genera vibración en la pileta de la soldadura lo cual podrá mejorar el grado de soldabilidad, obtener un refinamiento de grano en el proceso de solidificación del cordón de soldadura y también una disminución de microdureza en la ZAC, con ello mejorando sus propiedades mecánicas y prolongando la vida útil de los futuros componentes manufacturados con este tipo de material.

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo general***

Mejorar el grado de soldabilidad del acero 9840 mediante la aplicación de campos electromagnéticos durante su unión mediante el proceso de soldadura con arco sumergido (SAW).

### ***1.3.2 Objetivos específicos***

- ❖ Evitar la formación de fases martésíticas

- ❖ Disminuir los gradientes de durezas en la ZAC con la interacción de dos campos electromagnéticos con una intensidad de 4.3 mT.
- ❖ Favorecer el refinamiento del grano mediante la vibración generada por la interacción de dos campos electromagnéticos y los elementos inoculantes presentes en el fundente.
- ❖ Corroborar el refinamiento y homogeneidad del grano mediante técnicas de caracterización metalográficas para medir el tamaño de grano.
- ❖ Corroborar el mejoramiento de la soldabilidad mediante ensayos mecánicos como; perfiles de microdurezas, tracción uniaxial y ensayo de impacto.

#### **1.4 Hipótesis**

Con la aplicación de dos campos electromagnéticos con una intensidad de 4.3 mT de manera externa durante el proceso de soldadura que interactúan entre sí y además estén orientados en contra de la dirección de crecimiento de grano se puede llevar a cabo uniones de aquellos aceros que presentan un bajo grado de soldabilidad sin necesidad de un proceso de precalentamiento y postcalentamiento, obteniendo soldaduras de alta calidad libre de defectos, con microestructura que evitan la propagación de grietas, obteniendo que se mantenga o mejore sus propiedades mecánicas, esto debido a que el campo electromagnético genera una vibración y con ello se puede impedir la movilidad atómica para generar el principio de desorientación y activar el mecanismo de nucleación heterogénea y minimizar el crecimiento de grano columnar, obteniendo un refinamiento de grano en el cordón de soldadura y logrando disminuir los valores de microdureza en la zona afectada por calor.

## **Capítulo 2.**

### **Marco teórico y estado del arte**

#### **2.1 Metales base**

En la actualidad los aceros al carbono en todas sus clasificaciones representan el 95% de los metales de construcción y fabricación utilizados, la mayoría representan en su matriz una microestructura ferrítica, buenas propiedades mecánicas, son de medio costo, fácil fabricación, su soldabilidad varía de acuerdo a la clasificación en la que se encuentren [8]. También existen los aceros de baja aleación, son aquellos que son parte de los aceros aleados, se caracterizan por contener medio y alto contenido de carbono, pero para ser soldable se necesitan tratamientos de precalentamiento y postsoldadura sin perder su resistencia, estos se caracterizan por su buena resistencia, alta formabilidad, resistentes al calor y alta tenacidad a bajas temperaturas, es por ello que a continuación se retoma el tema de aceros aleados ya que es el metal base con el que se trabajó en este proyecto.

#### **2.2 Aceros aleados.**

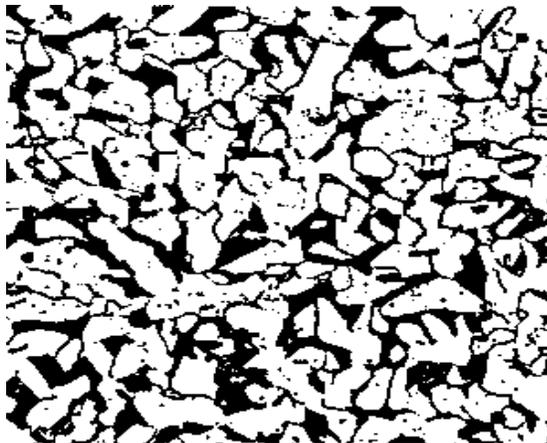
Son aquellos que aparte de contener carbono contienen elementos como Ni, Cr, Mo, V, Si, Cu, Al, W, Ti, Co, Zr, Pb, B y otros, estos son añadidos al acero para mejorar propiedades, si el contenido total de estos elementos es inferior al 5% en peso, se habla de aceros al carbono y aceros de baja aleación. La mayoría de las aleaciones férricas son aceros al carbono y de baja aleación, esto es consecuencia de su moderado precio debido a la ausencia de grandes cantidades de elementos aleantes y que poseen, además suficiente ductilidad para ser conformados fácilmente obteniendo de ellos productos resistentes y duraderos. Las aplicaciones de estos aceros van desde cojinetes de bolas hasta carrocerías de los automóviles, sin dejar a un lado el mundo de la construcción. Para estos aceros se utilizan una designación la cual es AISI (Instituto Americano del Hierro y el Acero, por sus siglas en inglés AISI)- SAE (Sociedad de Ingenieros de Automoción, por sus siglas en inglés SAE), en donde las dos primeras cifras indican el tipo de elementos aleantes del acero y las dos otras últimas cifras corresponden con el contenido medio en carbono [9].

### ***2.2.1 Aceros de alta resistencia y baja aleación***

Son llamados así ya que son aceros microaleados que surgieron de la necesidad de reducir el peso de los vehículos. Son aceros con muy bajo carbono (típicamente por debajo del 0.2 por ciento en peso de C), y alrededor de un 1% en peso o menos de elementos tales como Mn, P, Si, Cr, Ni, Mo, y pequeñas cantidades de Nb, V y Ti. Estos aceros son laminados en caliente de forma controlada para obtener una estructura de grano muy fino, con valores elevados de límite elástico y la resistencia, junto con una baja temperatura de transición dúctil-frágil [10].

### ***2.2.2 Acero AISI 9840***

El acero AISI 9840 es un acero de baja aleación y de contenido medio de carbono, tiene características similares al acero grado AISI 4340. Este acero no envejece, las propiedades del acero AISI 9840 se limitan a aquellas que, antes de la nitruración, se producen mediante temple y revenido convencionales. Se puede desarrollar una dureza menor que la de los aceros de níquel aluminio, dependiendo del tratamiento térmico previo y del ciclo de nitruración. Este acero tiene una dureza 280 a 361 HB, este acero presenta una microestructura ferrítica, con pequeñas islas de perlita. Se muestra en la figura 2.1.



**Figura 2.1** Micrografía del acero 9840 [11].

El acero AISI 9840 está disponible como stock de calidad aeronáutica; material de forja; barras, alambres y alambres laminados en caliente y con acabado en frío; y tubería mecánica sin costura [10].

En la tabla 2.1 se presenta la composición química del acero AISI 9840.

**Tabla 2.1** Composición química % e.p. [10].

Grado AISI	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
9840	0.38-0.43	0.70-0.90	0.035	0.040	0.15-0.30	0.85-1.15	0.70-0.90	0.20-0.30

En la tabla 2.2 se muestran las temperaturas a las cuales se pueden llevar a cabo los siguientes tratamientos térmicos.

**Tabla 2.2** Temperatura para tratamientos térmicos [10].

Tratamiento térmico	Temperaturas e indicaciones
<b>Recocido</b>	Austenizar y enfriar lentamente 693 a 649°C, para obtener una estructura de perlita gruesa para una maquinabilidad óptima.
<b>Templado</b>	540-680°C
<b>Normalizado</b>	Seguido de un enfriamiento al aire.

### ***2.2.3 Propiedades mecánicas y aplicaciones típicas.***

Este acero es utilizado para manufacturar partes de maquinaria pesada, trenes de aterrizaje, partes de camiones, tuberías de grandes espesores; debido a su buena resistencia y alta dureza, en la tabla 2.3 se muestran valores de sus propiedades mecánicas.

**Tabla 2.3** Propiedades mecánicas del acero AISI 9840 [10].

<b>Número AISI- SAE de aleación</b>	<b>Resistencia a la tensión MPa</b>	<b>Limite elástico MPa</b>	<b>% de elongación en 5.08 cm</b>	<b>Dureza HB</b>
9840	750	690	13	180

#### ***2.2.4 Propósitos de incorporar elementos de aleación a los aceros***

Se busca que al incorporar este tipo de elementos al material tenga un incremento en la templabilidad, mejore sus propiedades mecánicas, sea un material con mejor tenacidad, que al ser sometido a esfuerzos tenga una mejor resistencia al desgaste, incremente su resistencia a la corrosión.

##### ***2.2.4.1 Formadores de carburos***

Estos influyen en el endurecimiento del acero y reducen los tiempos de templabilidad. Los carburos de Cr y V son por excelencia elementos endurecedores e incrementan la resistencia al desgaste. W, Mo, Nb, Cr, V, Ni y Co son los principales formadores de carburos.

El acero 9840 también es conocido como acero al Cr, Ni y Mo, por tener las características que estos elementos están presentes en mayor porcentaje.

##### ***2.2.4.2 Cromo***

Incrementa la resistencia mecánica por formación de carburos y eleva la resistencia a la corrosión. Sin embargo, a temperaturas de 750° a 900°C forma una fase fragilizadora (fase sigma) ocasionando agrietamiento y fragilidad de la zona unida.

### 2.2.4.3 Níquel

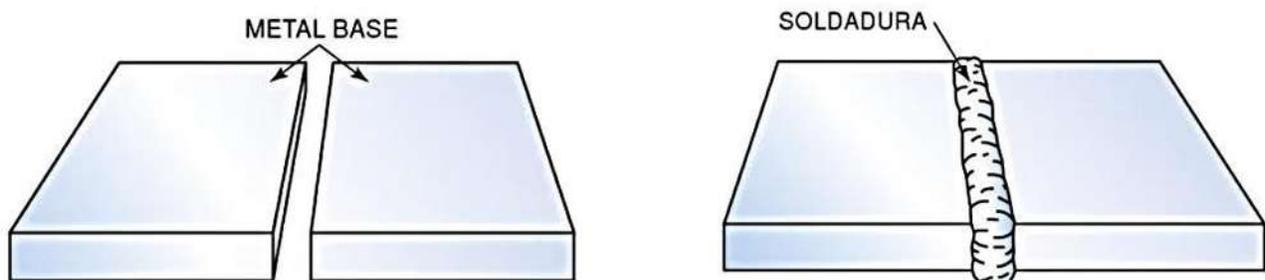
Este elemento incrementa el endurecimiento. En las uniones mejora la tenacidad y ductilidad del acero. Aún con el mejoramiento de la dureza y resistencia. En contraste, el Ni en las soldaduras a velocidad de enfriamiento lento forma estructuras fragilizadoras: eutécticos e intermetálicos.

### 2.2.4.4 Molibdeno

Es fuerte formador de carburos y los contenidos usualmente en los aceros es de 1%. Este se adiciona para incrementar endurecimiento y resistencia a alta temperatura. En los aceros inoxidable reduce el efecto de corrosión por cavitación. El modo de falla de los aceros de alta velocidad, es el engrosamiento de carburos o la descarburización [11].

## 2.3. Soldadura

Se conoce como un proceso de unión que produce la coalescencia de materiales calentándolos a la temperatura de soldadura con o sin la aplicación de presión sola y con o sin el uso de metal de aporte. Cuando es necesario se agrega material de aporte para formar una soldadura completa en dicha junta. Se lleva a cabo a una temperatura suficientemente alta como para causar ablandamiento o fusión y de tal modo unir las piezas [12].



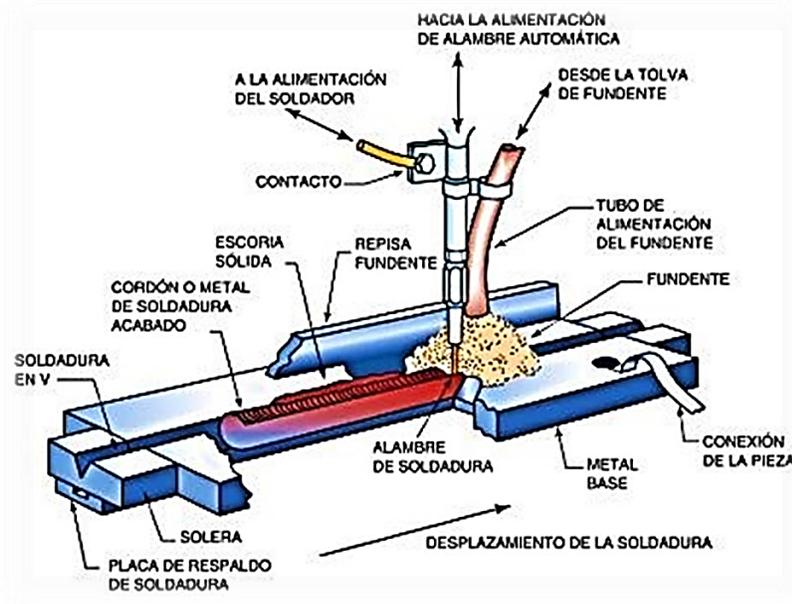
**Figura 2.2** Unión de placas mediante un proceso de soldadura por arco [13].

### **2.3.1 Proceso de soldadura por arco sumergido (submerged arc welding-SAW, por sus siglas en inglés).**

La soldadura por arco sumergido, es un proceso de soldadura que produce coalescencia de metales calentándolos con un arco entre un electrodo de metal y la pieza de trabajo. El arco y el metal derretido están “sumergidos” en una capa de fundente granular fusible sobre la pieza de trabajo. No se aplica presión, y el metal de aporte se obtiene del electrodo y en ocasiones de un suministro complementario como una varilla para soldar o gránulos metálicos. En la soldadura de arco sumergido, el arco está cubierto por fundente, el cual desempeña un papel importante porque [14] la estabilidad del arco depende del fundente, [15] las propiedades mecánicas y físicas del depósito de soldadura final se pueden controlar con el fundente y [16] la calidad de la soldadura puede ser afectada por la forma como se maneja el fundente. La soldadura por arco sumergido es un proceso de soldadura de producción versátil capaz de soldar con corrientes hasta de 2000 amperes de corriente alterna (CA) o corriente continua (CC) empleando uno o varios alambres. Es posible usar fuentes de potencia tanto de (CA) como de (CC) en la misma soldadura [17].

Al iniciarse la operación de soldadura, el extremo del alambre (electrodo) toca la pieza de trabajo, el fundente granular procedente de la tolva cubre el área a soldar y se inicia el arco, el electrodo se alimenta a velocidad controlada por medio de un alimentador de alambre, el arco y el charco de soldadura siempre permanecen cubiertos por el fundente, por lo que el arco no es visible y la soldadura se realiza sin la radiación intensa característica de los procesos de arco abierto y genera muy poco humo. Aunque el fundente líquido puede conducir algo de corriente entre el alambre y el metal base y generar calor debido a la resistencia eléctrica, la principal fuente de calor la suministra el arco, el cual progresivamente funde una parte del fundente, el extremo del alambre y los bordes adyacentes del metal base debajo de la capa de escoria líquida.

El fundente o escoria líquida flota sobre el metal fundido y protege de la atmósfera a la zona de la soldadura, disuelve las impurezas del metal base y del electrodo y las hace flotar sobre la superficie. Este puede adicionar o remover algunos elementos de aleación, cuando el metal de soldadura y el fundente líquido solidifican, se forma el cordón y una capa de escoria protectora [18], como se muestra en la figura 2.3.



**Figura 2.3** Esquema proceso de soldadura por arco sumergido [18].

El proceso de arco sumergido es principalmente llevado a cabo con equipo totalmente automático, aunque hay algunas pistolas de mano para el proceso. Para incrementar la productividad puede ser implementado un arreglo con varios electrodos o multi-alambre. Por su alto poder de deposición de metal de aporte, es particularmente conveniente para las soldaduras rectas de gran longitud con excelente calidad en posición de piso, siendo muy usado en la fabricación de grandes tanques, tuberías, plantas químicas, pesadas estructuras y en la industria de la fabricación y reparación de barcos [19], en la figura 2.4 se aprecia la unión de una tubería por medio del proceso SAW.



**2.4** Procesos de soldadura por arco sumergido [19].

### 2.3.2 Equipo

El equipo requerido para cada proceso de soldadura es fundamental y único; en la figura 2.5 se aprecian los componentes necesarios para que este proceso se lleve a cabo, a continuación, se enlistan algunos por mencionar.

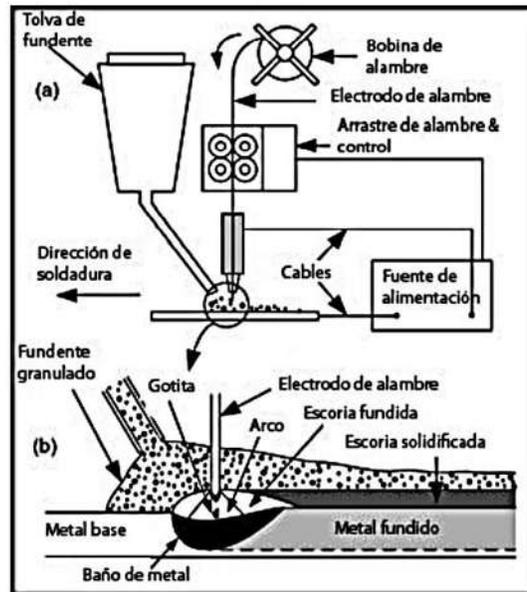
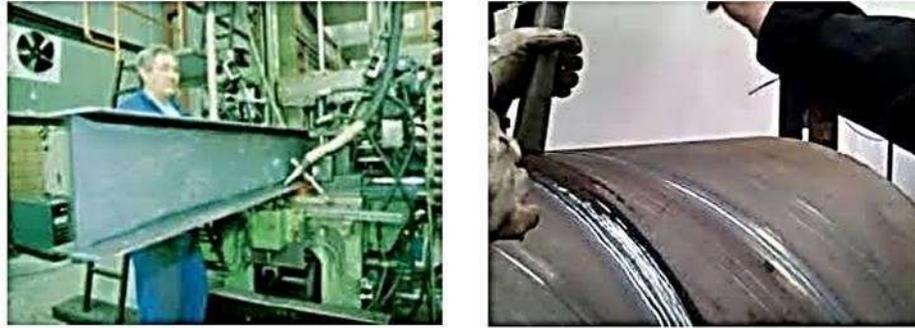


Figura 2.5 Esquema del proceso SAW [20].

### 2.3.3 Clasificación de los metales base.

El proceso de soldadura por arco sumergido es utilizado para fabricar ensambles de casi todos los materiales empleados en la actualidad (fig. 2.6), desde aceros al carbono hasta superaleaciones con base níquel. La mayor parte de los aceros convencionales y aleaciones se pueden soldar fácilmente con alambres y fundentes comerciales, aunque algunos metales requieren alambres de electrodo especiales de composición química precisa y fundentes especiales diseñados para conferir a la unión soldada propiedades específicas [21].



**Figura 2.6** Aceros al carbono soldados mediante SAW [21].

### ***2.3.4 Tipos de electrodos y fundentes.***

Los electrodos para arco sumergido producen depósitos de soldadura que coinciden con los metales base de acero al carbono, aceros de baja aleación, aceros alto carbono, aceros de aleación especial, aceros inoxidable, aleaciones de níquel y aleaciones especiales para aplicaciones de recubrimiento. Estos electrodos se suministran como alambre sólido desnudo y como electrodos compuestos con núcleo metálico. Los electrodos de acero suelen estar recubiertos de cobre, excepto los destinados a materiales resistentes a la corrosión o ciertas aplicaciones nucleares. El recubrimiento de cobre prolonga la vida en almacenamiento, reduce el desgaste por rozamiento con el tubo de contacto y mejora la conductividad eléctrica. El diámetro de los electrodos para soldadura por arco sumergido varía de 1.6 a 6.4 mm [22].

### ***2.3.5 Fundentes***

Los fundentes protegen el charco de soldadura de la atmósfera al cubrir el metal con escoria. Los fundentes limpian el charco de soldadura, modifican la composición química del metal de soldadura e influyen en la forma que adquirirá el cordón de soldadura y las propiedades mecánicas que tendrá. Los fundentes están granulados a un tamaño controlado y pueden ser de tipo fundido, aglomerado o sinterizado. Anteriormente se utilizaban fundentes fundidos, machacados y calibrados; atribuyéndoseles las ventajas de estar totalmente libres de humedad, tanto la composición química como el estado de división de los fundentes tienen una importante influencia sobre la forma de comportarse en la soldadura. Los fundentes aglomerados se hacen mezclando los constituyentes, finamente pulverizados, con una solución acuosa de un aglomerante tal como silicato sódico; la finalidad es producir partículas de unos pocos milímetros de diámetro formados por una masa de

partículas más finas de los componentes minerales. Después de la aglomeración el fundente se seca a temperatura de hasta 800 °C [23].

### ***2.3.7 Electrodo y fundentes de acero al carbono***

La especificación AWS A.5.17 describe los requisitos que deben cumplir los electrodos y fundentes para soldadura por arco sumergido de aceros al carbono. Los electrodos sólidos se clasifican según la composición química del depósito. Los fundentes se clasifican con base en las propiedades del metal de soldadura que se obtienen cuando se usan con electrodos específicos [18]. La selección de los consumibles de SAW dependerá de las propiedades químicas y mecánicas que deba tener el componente que se fabrica, de la posición de soldadura (1G, 5G), y de la preparación que deba recibir la superficie del acero para soldar.

#### ***2.3.7.1 Electrodo y fundentes para aceros de baja aleación.***

El metal de soldadura de acero de baja aleación puede depositarse con electrodos sólidos de acero de aleación, fundentes que contienen los elementos de aleación y los electrodos compuestos cuyo núcleo contiene los elementos de aleación. Los electrodos de acero de aleación y electrodos compuestos normalmente se sueldan bajo un fundente neutral. Los fundentes con elementos de aleación generalmente se usan con electrodos de acero al carbono para depositar metal de soldadura aleado.

La especificación ANSI/AWS A5.23 prescribe requisitos para los electrodos sólidos y compuestos y los fundentes que se usan para soldar aceros de baja aleación. Los fundentes se clasifican de acuerdo de acuerdo con las propiedades del metal de soldadura que se obtienen cuando se usan con electrodos específicos.

#### ***2.3.7.2 Aplicaciones generales del proceso SAW***

El proceso de arco sumergido se usa ampliamente en los trabajos de fabricación en placas de acero pesado. Esto incluye la soldadura de forma estructurales, la costura longitudinal de tubos con diámetro grande, la manufactura de componentes de máquinas para todos los tipos de industria pesada, la manufactura de recipientes y tanques a presión y usos de almacenamiento.

Se utiliza ampliamente en la industria de construcción de barcos en empalmes y en la fabricación de sub-ensambles, así como en muchas otras industrias donde los aceros se usan en espesores de tamaño mediano a grande. Las posiciones son limitadas debido al gran charco de metal fundido, el cual es muy fluido, la escoria también es muy fluida y tenderá a salirse de la unión. El proceso no se realiza uniones en posición vertical y sobrecabeza [24]. Es por ello que se emplea para soldar uniones a tope en posición plana, para soldaduras de filete en las posiciones plana y horizontal, y para recubrimientos en la posición plana. Si se cuenta con herramental y fijaciones especiales, es posible soldar uniones traslapadas y a tope en la posición horizontal [17].

### **2.3.8 Soldabilidad del acero 9840**

Para los aceros aleados como lo es el acero 9840 se deben de tomar ciertas consideraciones antes y durante el proceso de soldadura debido a que los contenidos de estos elementos tales como el Ni, Cr y Mo, provocan que sea un acero de difícil soldabilidad ya que al estar presentes hacen que sea de bajo grado de soldabilidad.

Se define soldabilidad como aquella propiedad del material, para poder ser unido con otro y que establezca una buena compatibilidad, esto varía de acuerdo a composición química, propiedades mecánicas y contenido de carbono en el material.

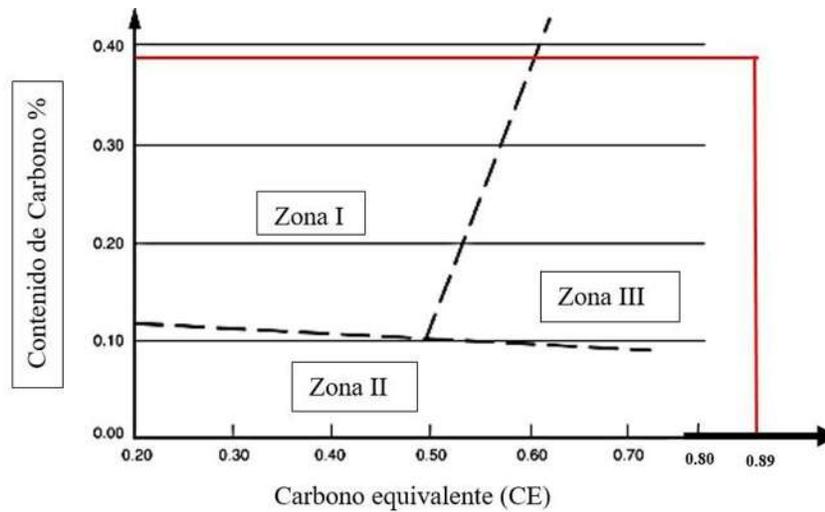
El alto contenido de carbono en los aceros eleva su resistencia a la tracción, incrementando su índice de fragilidad en frío y como consecuencia se disminuye su tenacidad y ductilidad. Esto a su vez disminuye el grado de soldabilidad haciendo que algunos aceros sean prácticamente insoldables.

Un parámetro que determina si un acero al carbono es soldable es el C.E., el cual dicta en medida el grado de soldabilidad en un acero.

El grado de soldabilidad se calcula por medio del carbono equivalente (CE) utilizando la siguiente ecuación [8].

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \dots\dots\dots\text{Ecuación 1.}$$

Una vez determinado el C.E. empleando el diagrama de Granville es posible ubicar la zona de soldabilidad del acero en estudio. En la figura 2.7 se aprecia el diagrama antes mencionado.



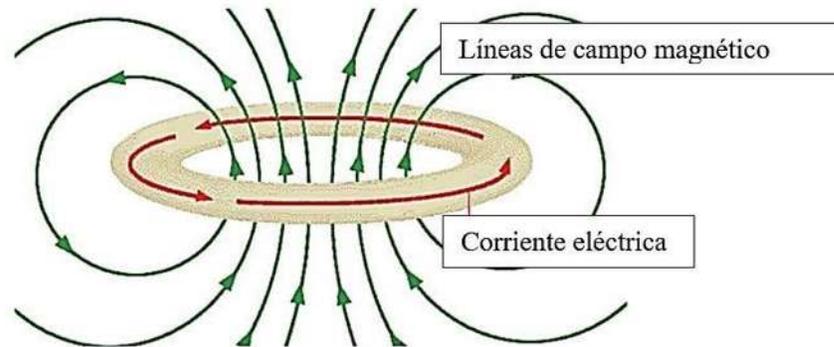
**Figura 2.7** Diagrama de Granville [25].

De acuerdo con lo antes mencionado y en base a la composición química del acero 9840 su CE es de 0.89% por lo que, este acero se ubica en la zona III, por lo tanto, se determina que tiene un bajo grado de soldabilidad, con base en lo establecido en el código de AWS D1.1; se determina que se debe de dar un pre-calentamiento mínimo al metal base de 700K a fin de evitar la aparición de fases adifusionales [25]. En los últimos años se han llevado a cabo trabajos donde ha sido sustituido técnicas de tratamientos térmicos pre y post soldadura por la innovación de colocar bobinas electromagnéticas de manera externas de con el fin de obtener mejores propiedades mecánicas y

## 2.4 Electricidad y magnetismo

Años atrás el hombre se dio cuenta de que el mineral magnetita o imán (un óxido de hierro) tenía la propiedad peculiar de atraer el hierro. Tales de Mileto, Platón y Sócrates escribieron acerca de este hecho. En los años de 1807 el profesor Hans Christian Oersted inicio sus investigaciones sobre los efectos de la electricidad en la aguja magnética de una brújula, donde varias investigaciones y experimentaciones lo llevaban a decir que la electricidad y el magnetismo no se deberían estudiar por separado ya que son fenómenos que están relacionados entre sí, todas sus investigaciones de estos fenómenos se basaban en la creencia de la unidad de todas las fuerzas presentes en la naturaleza. Más tarde da a conocer sus conclusiones a través de su experimentación donde dice que una corriente eléctrica produce un efecto magnético y que este no puede quedar atrapado, sino que

tiene que ser esparcido en todo su alrededor creando un campo magnético, en la figura 2.8 se presenta el campo y la corriente eléctrica actuando en un mismo fenómeno.



**Figura 2.8** Campo magnético [26].

André-Marie Amperé, decidió continuar con la investigación del profesor Hans ya que, para él, el fenómeno no estaba bien, ya que mencionaba que una importante variable era el efecto del magnetismo natural de la tierra, Amperé diseñó entonces un experimento en el que éste fuera neutralizado. Así encontró el verdadero efecto que tenía la corriente eléctrica sobre la aguja imantada; ésta siempre se alinea en una dirección perpendicular a la dirección de la corriente eléctrica ya que conducen electricidad ejerciendo una fuerza entre sí, determinando que estas fuerzas ejercidas son debido a efectos magnéticos.

Todas estas son predicciones que se basan en magnitudes físicas vectoriales dependientes de la posición en el espacio y del tiempo. El electromagnetismo describe los fenómenos físicos macroscópicos en los cuales intervienen cargas eléctricas en reposo y en movimiento, usando para ello campos eléctricos y magnéticos y sus efectos sobre las sustancias sólidas, líquidas y gaseosas. Por ser una teoría macroscópica, es decir, aplicable sólo a un número muy grande de partículas y a distancias grandes respecto de las dimensiones de éstas, el electromagnetismo no describe los fenómenos atómicos y moleculares, para los que es necesario usar la mecánica cuántica [27].

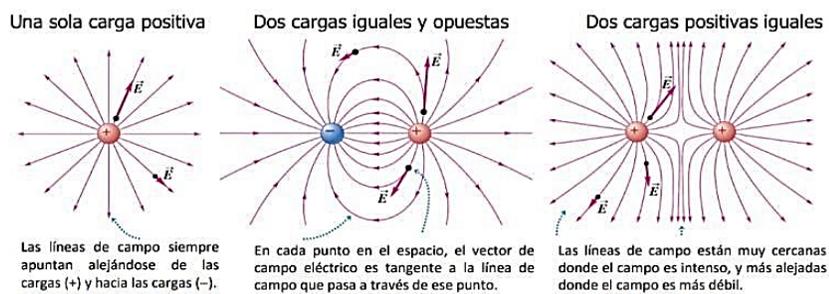
### ***2.4.1 Campos eléctricos***

James Clerk Maxwell, define que el "campo eléctrico es la porción del espacio, en la vecindad de los cuerpos electrizados, en la cual se manifiestan fenómenos eléctricos"; al cuerpo eléctrico se le atribuyen propiedades necesarias para que produzca los fenómenos eléctricos [27]. Este es producido por la presencia de cargas eléctricas, las cuales crean una fuerza, según la ecuación,

donde:  $q$  es la carga eléctrica medida en coulomb y  $mbs$  es el campo eléctrico medido en Newtons por Culombios ( $N C^{-1}$ ). Esta fuerza eléctrica es la responsable de la electricidad estática y dirige el flujo de carga eléctrica en un área determinada (corriente eléctrica) [28]. Las cargas eléctricas generan en torno a ellas, un campo eléctrico de carácter vectorial que disminuye con la distancia. Este campo produce una fuerza eléctrica sobre una carga que se ubique en algún punto de él [29].

### 2.4.1.1 Líneas de campo eléctrico

Es posible representar el campo eléctrico ( $E \vec{}$ ) gráficamente a través de las líneas de campo o de fuerzas las que indican la dirección, el sentido y la intensidad del campo. Estas líneas se dibujan de modo que en cada punto sean tangentes a la dirección del campo eléctrico en dicho punto. Las líneas de campo eléctrico señalan o representan las posibles trayectorias que describiría una carga de prueba positiva liberada en distintos puntos en presencia de una carga generadora, estas se muestran en la figura 2.9.

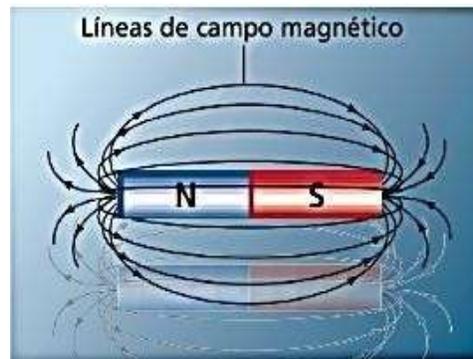


**Figura 2.9** Líneas de campo eléctrico [30].

### 2.4.2 Campos magnéticos

El campo magnético se origina por el movimiento de las cargas eléctricas. Por esto, alrededor de un cable conductor por el que circula una corriente se crea un campo magnético que se puede representar mediante líneas circulares. Análogamente, una carga en movimiento en un campo magnético experimentará una fuerza magnética. Una carga o corriente móvil crea un campo magnético en el espacio circundante (además de su campo eléctrico). El campo magnético ejerce una fuerza sobre cualquier otra carga o corriente en movimiento presente en el campo. El símbolo  $B \vec{}$  ha sido utilizado para representar el campo magnético [30]. El fenómeno del magnetismo es una

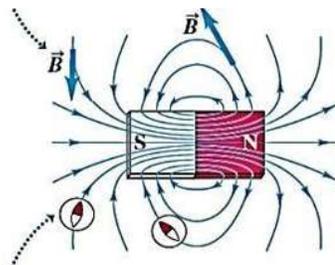
propiedad que se manifiesta en forma natural en ciertas sustancias como el hierro, cobalto y níquel, principalmente, y que se caracteriza por la aparición de fuerzas de atracción o de repulsión entre imanes. Esto sugiere que existen dos zonas magnéticas llamadas polo norte y sur; concepto que introdujo en 1600, el físico William Gilbert. Al igual que una carga crea un campo eléctrico en su entorno y una masa crea un campo gravitatorio, un imán crea un campo magnético a su alrededor, que se detecta por la aparición de fuerzas magnéticas, y que se puede representar mediante líneas de campo magnético o de fuerza magnética (véase en las figuras 2.10 y 2.11) [29].



**Figura 2.10** Líneas de campo magnético [29].

En cada punto, la línea de campo es tangente al vector del campo magnético ( $\vec{B}$ )

Cuanto más saturadas estén las líneas de campo, más intenso será el campo en ese punto.



En cada punto, las líneas de campo apuntan en la misma dirección en que lo haría una brújula.

Por lo tanto, las líneas de campo magnético siempre señalan hacia afuera de los polos N y en dirección a los polos S

**Figura 2.11** Flujo de las líneas del campo magnético [29].

### 2.4.3 Propiedades magnéticas de los materiales

Se tiene conocimiento que no existe un material que sea “no magnético”, todos los materiales responden a los campos magnéticos, cuando a un material se le es aplicado un campo magnético estos experimentan varios tipos de comportamientos como se aprecia en la figura 2.12 [31].

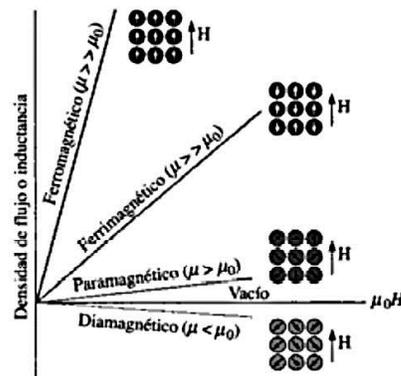


Figura 2.12 Efecto del campo magnético en el material [31].

#### 2.4.3.1 Ferromagnetismo

Las sustancias ferromagnéticas como el hierro, cobalto y níquel y aleaciones de estos metales entre sí, contienen momentos magnéticos atómicos que pueden alinearse fácilmente con la dirección de un campo magnético externo, aunque este sea débil. Incluso puede persistir la alineación, aunque no exista el campo magnetizante externo, en algunos casos. Esto es debido a que los momentos magnéticos de los átomos de estas sustancias ejercen fuerzas intensas sobre sus vecinos de modo que en una pequeña región del espacio los momentos se alinean entre sí incluso en ausencia de campos externos. A estas regiones en las cuales los momentos magnéticos están alineados, se las denomina dominios.

Los dominios son regiones dentro del material en las cuales todos los dipolos están alineados en cierta dirección, en un material que jamás haya sido expuesto a un campo magnético, los dominios individuales tienen orientaciones al azar, véase en la figura 2.13 [31].

En un material en bruto, los dominios normalmente se cancelan dejando el material desmagnetizado.



Campo magnético aplicado externa



El hierro se magnetizará en la dirección del campo magnético aplicado. Esta magnetización producirá en el hierro un polo magnético opuesto al polo que tiene más cerca, de modo que el hierro será atraído por cualquier polo de un imán.

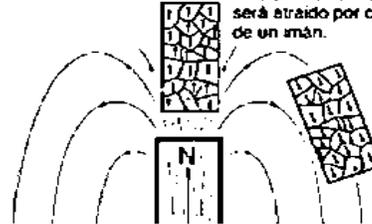


Figura 2.13 Dominios magnéticos [31].

El ferromagnetismo, igual que el paramagnetismo, se observa en materiales cuyos átomos tienen momentos dipolares permanentes. Lo que distingue fundamentalmente de los materiales paramagnéticos, es que los ferromagnéticos muestran una fuerte interacción entre los átomos cercanos, que conservan alineados sus momentos dipolares aun cuando se elimine el campo magnético externo. La permeabilidad de las sustancias ferromagnéticas disminuye al aumentar la temperatura. La permeabilidad relativa desciende prácticamente a la unidad a una temperatura propia de cada sustancia, llamada esta como temperatura de Curie. Por encima de esta temperatura, el hierro es paramagnético, pero no ferromagnético [32].

#### 2.4.3.2 Diamagnetismo

Al actuar sobre cualquier átomo, un campo magnético induce un dipolo magnético sobre todo el átomo, influyendo sobre el momento magnético causado por los electrones en sus orbitas, estos dipolos se oponen al campo magnético, haciendo que la magnetización sea menor que cero, este comportamiento aporta una permeabilidad relativa de 0.99995.

#### 2.4.3.3 Paramagnetismo

Cuando los materiales tienen electrones no apareados, se asocia a cada átomo un momento magnético neto debido al giro de los electrones. Al aplicárseles un campo magnético, los dipolos se alinean con el campo, causando una magnetización positiva. Sin embargo, dado que los dipolos no interactúan entre sí, se requieren campos magnéticos extremadamente grandes para alinear todos los dipolos, además este efecto se pierde en cuanto se elimina el campo magnético [32].

### 2.4.3.4 Histéresis

Cuando se magnetiza en una dirección un material ferromagnético, no vuelve de nuevo a magnetización cero cuando cesa el campo magnético impulsor. Debe ser impulsado hacia atrás de nuevo a cero mediante un campo con dirección opuesta. Si se aplica al material un campo magnético alterno, su magnetización trazará un bucle llamado ciclo de histéresis. La falta de trazabilidad de la curva de magnetización es la propiedad llamada histéresis (véase figura 2.14) y se relaciona con la existencia de dominios magnéticos en el material. Una vez que los dominios magnéticos se reorientan, se necesita un poco de energía para volverlo de nuevo hacia atrás. Esta característica de los materiales ferromagnéticos es de utilidad como "memoria magnética". Algunas composiciones de materiales ferromagnéticos, retienen la magnetización impuesta indefinidamente, y son útiles como "imanes permanentes". Las características de memoria magnéticas de los óxidos de hierro y cromo, lo hacen útiles para la grabación de cintas y para el almacenamiento magnético de datos en discos de ordenador.

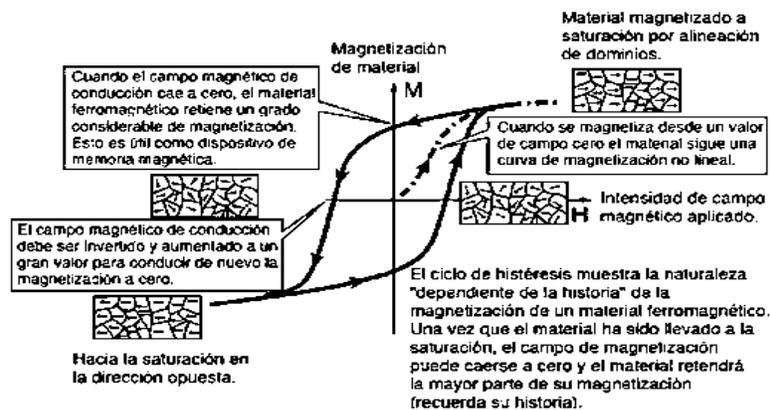


Figura 2.14 Ciclo de histéresis [31].

### 2.4.3.4 Temperatura de Curie

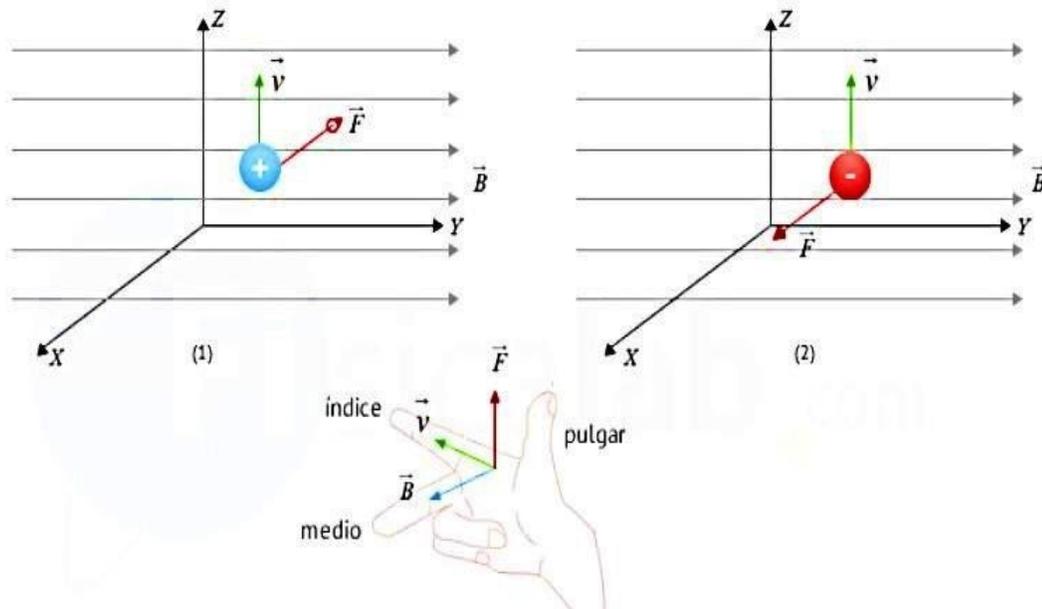
En un material ferromagnético dado, el orden de largo alcance desaparece abruptamente a una cierta temperatura, que se llama temperatura de Curie del material. La temperatura de Curie del hierro es de unos 1043°K. La temperatura de Curie da una idea de la cantidad de energía que se necesita para romper la ordenación de largo alcance en el material. A 1043°K, la energía térmica es aproximadamente 0,135 eV en comparación con alrededor de 0,04 eV a temperatura ambiente [31].

### 2.4.4 Inducción de campos electromagnéticos durante el proceso de soldadura

Se reporta en la literatura que desde los años 60's se utiliza la inducción de campos electromagnéticos en el proceso de soldadura [30]. Donde comentan la importancia del principio de la fuerza magnética generada por la fuerza de flujo magnético (B), esto debido al paso de corriente eléctrica (J) a través de un conductor, esta fuerza es conocida como fuerza de Lorentz, la cual establece que una partícula cargada  $q$  que circula a una velocidad  $v$  por un punto en el que existe una intensidad de campo magnético  $B \rightarrow$  sufrirá la acción de una fuerza  $F \rightarrow$  (fuerza de Lorentz) cuyo valor es proporcional al valor de  $q$ ,  $B \rightarrow$  y  $v$  se obtiene por medio de la siguiente expresión ec.2. [34]

$$\vec{F} = q \cdot v \times B \rightarrow \dots \dots \dots \text{Ecuación 2}$$

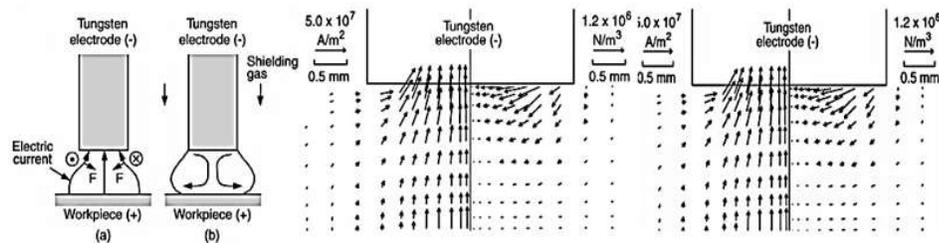
Existe una forma gráfica de poder determinar la dirección y sentido de la fuerza de Lorentz y es por medio de la regla de la mano derecha, en la figura 2.15 puede verse lo antes dicho.



**Figura 2.15** Sentido y dirección de la fuerza de Lorentz por medio de la regla de la mano derecha [34].

Para ser más específico la fuerza de Lorentz se trata de la fuerza electromagnética que pasa como flujo a través del arco cuando se lleva a cabo la soldadura, donde como antes se mencionó J es el vector de densidad de corriente y B es la fuerza magnética del vector de flujo. El vector de densidad

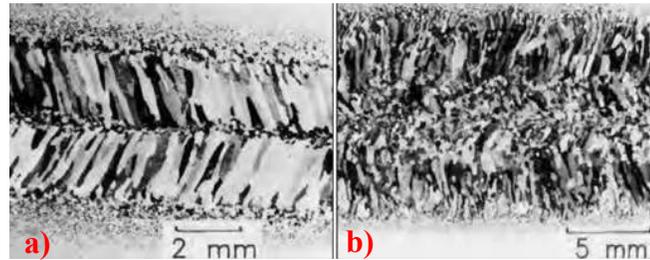
de corriente  $J$  está en la dirección de la corriente eléctrica esta fluye de acuerdo con la regla de la mano derecha para el campo magnético (fig. 2.15), si el pulgar apunta en la dirección de la corriente, el vector de flujo magnético  $B$  está en la dirección en que los dedos se enroscan alrededor de la trayectoria de la corriente. Vectores  $F$ ,  $J$  y  $B$  son perpendiculares entre sí. De acuerdo con la regla de la mano derecha para la fuerza electromagnética,  $F$  está en la dirección fuera y perpendicular a la palma de la mano, si el pulgar apunta en la dirección de  $J$  y los dedos se estiran y apuntan en dirección a  $B$ . De tal modo que es considerada la velocidad del flujo de carga eléctrica ( $E$ ) esta produce un efecto de agitación electromagnética en la pileta líquida durante el proceso de soldadura [35]. En base a la literatura se ha estudiado como simplemente al realizar una soldadura se está generando un campo magnético y como viaja ese flujo de corriente a través del arco eléctrico es por ello que se dice que la corriente eléctrica converge desde la pieza de trabajo más grande hacia la punta del electrodo más pequeña. Tiende a ser perpendicular a la superficie de la punta del electrodo y la superficie de la pieza de trabajo. El campo magnético y el campo de corriente eléctrica convergente juntos producen una fuerza  $F$  hacia abajo y hacia adentro para empujar el gas iónico a lo largo de la superficie cónica de la punta del electrodo, esto en conjunto se dice que es un campo electromagnético esto se ve en la figura 2.16 representado en un proceso de soldadura GTAW [36].



**Figura 2.16** Fuerza de Lorentz en un arco eléctrico en un proceso GTAW [37].

Villafuerte y Kerr [38] dan a conocer que, en base al uso de campos electromagnéticos en la soldadura, específicamente en la pileta líquida se genera fuerzas Lorentz, teniendo un efecto en el arco de plasma y una agitación del metal líquido. El propósito de realizar soldadura con campos magnéticos externos es para generar un cambio en la microestructura y con ello mejorar las propiedades mecánicas, mediante un refinamiento de grano e inducir un cambio en la morfología y reducción de la zona afectada térmicamente. De acuerdo con lo que ellos encontraron se observó

que existe un rompimiento de granos columnares estos lo que ocasionan es que exista una mayor nucleación de granos equiaxiales, como se puede ver en la figura 2.17.



**2.17** Macroestructura en la superficie del cordón de soldadura de un acero 4091: a) sin aplicación de campo electromagnético externo y b) aplicación de campo electromagnético externo [38].

García y col. [39] realizaron un estudio sobre el efecto que produce la interacción de campos magnéticos sobre el refinamiento de grano, ya que el proceso de soldadura por sí mismo genera un campo electromagnético debido a la corriente de soldadura y en conjunto con el gradiente térmico generado por el arco eléctrico produce una microestructura columnar.

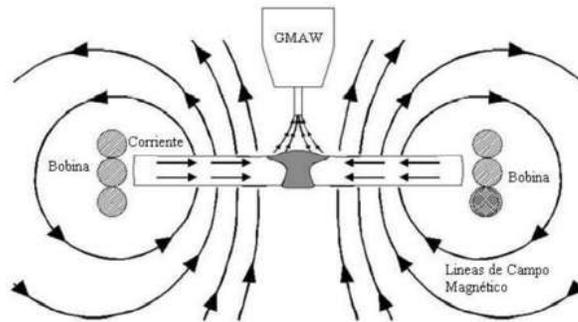
Generando una distorsión en las fuerzas electromagnéticas y con ello se modifica el fenómeno de solidificación, dando como resultado un refinamiento de la microestructura en todo el cordón de soldadura, ya que en el centro del cordón también se presentó un refinamiento de grano, puesto que hay la primera fase de solidificación de un acero es la ferrita delta, la cual es magnética.

David y col. [40] Concluyen que el uso de campos magnéticos en la soldadura presenta refinamiento de grano mejorando con esto las propiedades mecánicas del material, y se alcanza una disminución de la dureza en las uniones.

Resultados similares han sido reportados por diferentes autores [41-42], ya que se ha observado que la oscilación del arco eléctrico con este método mejora las características microestructurales del metal de soldadura debido a los cambios en la longitud del arco, los cuales repercuten en incrementos de voltaje locales que cambian el frente de solidificación. El uso de esta técnica se ha extendido además en aleaciones base Ni observando que la oscilación magnética del arco eléctrico refina la estructura de grano gracias a estos cambios de solidificación local [43]

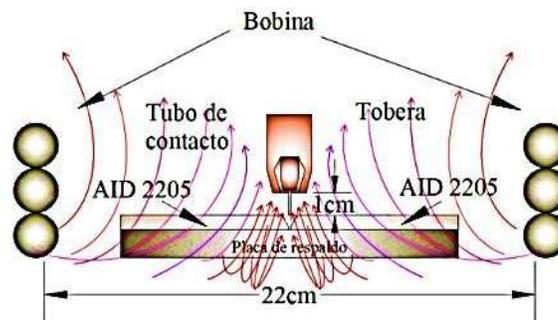
En la actualidad se han reportado trabajos donde Curiel y col. [44] y García [39] reportan resultados de la experimentación en uniones soldadas con la implementación de campos electromagnéticos para generar una agitación electromagnética con el fin de generar una perturbación en la

transferencia del metal de aporte y modificar el modo de solidificación, como se aprecia en la figura 2.18.



**Figura 2.18** Campo magnético externo durante el proceso soldadura [44].

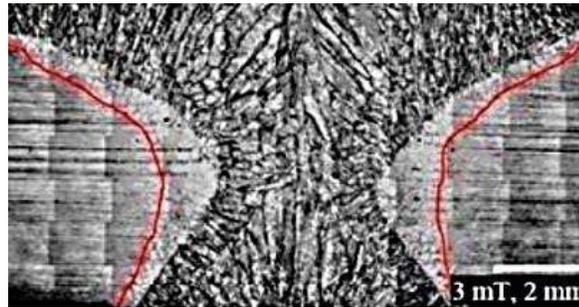
Mencionan que la orientación del campo es de gran importancia este debe de ir paralelo al eje del electrodo y transversal a la dirección de la soldadura, otros trabajos por mencionar el de Saúl y col. [45] llegan a la conclusión que al aplicar campos electromagnéticos en un proceso de soldadura modificó la microestructura del metal base, hubo una reducción de hasta el 18% de microdureza en la ZAT y un crecimiento irregular de los granos en la ZAT mejorando la resistencia en la soldadura. Otros investigadores como lo es Rentería y col. [5] del mismo modo experimentó con los campos electromagnéticos en un acero inoxidable dúplex, usando una variedad de intensidades, pero para la aportación de este proyecto se enfocó en analizar la intensidad de 3 mT, con lo cual se determinó la orientación de los campos la cual fue en forma axial empleando un proceso GMAW figura 2.19.



**Figura 2.19** Campo electromagnético aplicado durante el proceso de soldadura GMAW [46].

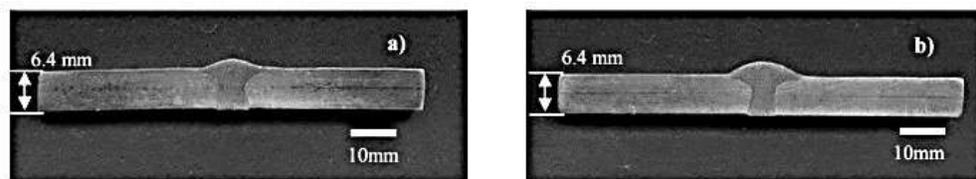
Una vez realizada la unión se puede comprobar de acuerdo a la microestructura que es notable el crecimiento de grano ferrítico y cómo se comporta de acuerdo al ancho de la ZAT, como bien se mencionó en un inicio las soldaduras que cumplen los criterios de calidad son aquellas que se realizaron con una intensidad de 3mT, las cuales dan como resultado una reducción en la longitud

de granos columnares, dando a conocer que estos ya no crecieron hasta el centro de la zona de fusión sino que se bloquean por la aparición de nuevos granos en el centro de la zona de fusión, figura 2.20.



**Figura 2.20** Micrografía de la junta soldada con una intensidad de 3 mT [47].

En base a la soldadura mencionada de 3mT, en esta junta se dieron los mejores resultados en tanto a propiedades mecánicas ya que se presenta un incremento en la resistencia a la tensión, aunque indica que existe una disminución en la ductilidad, pero estos resultados al relacionarlos bien con la literatura arrojan que se correlacionan con el refinamiento de grano ferrítico, entonces concluyen que aplicando una baja intensidad en el campo electromagnético es posible refinar el tamaño de grano el cual se verá reflejado en las propiedades mecánicas al llevarse a cabo los ensayos correspondientes y finalmente dan a conocer que el incremento de la convección de la pileta se relaciona a las fuerzas de Lorentz al interactuar con un campo externo durante la soldadura [47]. Mendoza en su redacción de tesis de igual manera trabajo con la interacción de campos usando estos de forma axial con baja intensidad en un acero inoxidable dando como conclusión que si tiene gran efecto la interacción de estos campos ya que se ve como en comparación con una soldadura sin campos, la soldadura con campos tiene una notable reducción de ZAT figura 2.21 y si existe modificación en el tamaño de grano, concluyendo que esto se debe ya que al aplicar un campo externo incrementa la fuerza de Lorentz y esta provoca una agitación electromagnética ayudando a cumplir el objetivo de mejorar la microestructura, propiedades mecánicas y disminución del tamaño de grano en la zona de fusión [47].



**Figura 2.21** Perfiles transversales de las uniones soldadas; a) sin campo y b) con un campo magnético de 3.2mT [47].

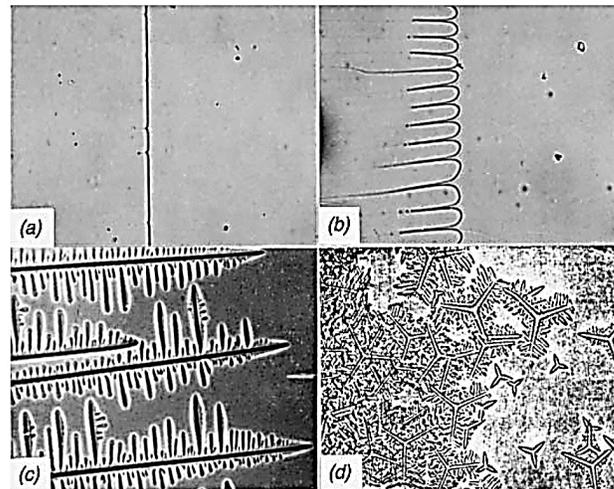
En base a la literatura se concluye que la aplicación de campos electromagnéticos a aceros ferromagnéticos provoca que se lleve a cabo la movilidad atómica, esto hace que materiales que se han demostrado que son difíciles de soldar puedan ser soldados, debido al movimiento de sus dominios, y con ello no existe necesidad de aplicarle un tratamiento de pre-calentamiento al material base. Sin embargo, Sugiyama [48] habla sobre el cambio de orientación por imposición de un alto campo magnético, este dice que el efecto del campo magnético estará basado en la anisotropía magnética que tenga el material con el cual se va a trabajar, esto hace que se haga presente durante a lo largo de una dirección preferencial, el cual se conoce como eje preferencial de imantación, este es energéticamente favorable a la alineación del momento magnético, lo cual nos dice que de igual manera es de gran ayuda la baja densidad del material así como la dirección del campo que se usará ya que ayudará a generar la orientación preferencial, el cual se basó en el estudio de aceros no magnéticos que también pueden ser soldados con uso de los campos magnéticos externos [48].

## **2.5 Metalurgia de la Soldadura**

Se enfoca en el análisis de los procesos de calentamiento, fusión, solidificación y enfriamiento que giran en torno a la soldadura, estos fenómenos metalúrgicos suceden durante la realización de una soldadura ya que ocurre fusión, solidificación, reacciones de gas-metal, fenómenos de superficie, reacciones en estado sólido al momento de solidificar se empieza a formar diferentes estructuras cristalografías donde a través de análisis metalográficos se puede apreciar el resultado microestructural de estos fenómenos.

### ***2.5.1 Solidificación del metal base de soldadura***

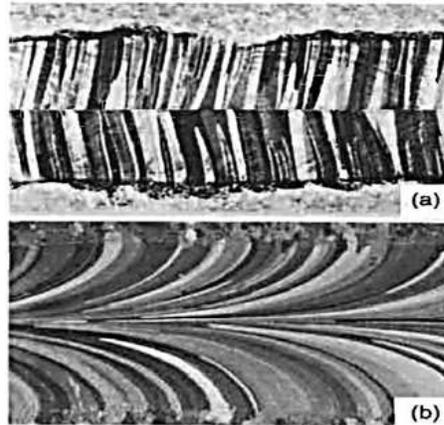
De acuerdo a los estudios que se han realizado se reportan resultados de lo que sucede durante la solidificación de un metal, estos indican que existen diferentes tipos de solidificación en la interfaz sólido-líquido suele ser plana, celular, dendrítica columnar y dendrítica equiaxial estas se muestran en la figura 2.22 [36].



**Figura 2.22** Modos básicos de solidificación: (a) la solidificación planar tetrabromuro de carbono [46], (b) la solidificación celular de tetrabromuro de carbono con una pequeña cantidad de impureza [47], (c) la solidificación dendrítica columnar de tetrabromuro de carbono con la impureza varios puntos porcentuales, (d) la solidificación equiaxial dendrítico de ciclohexanol con la impureza [36].

### ***2.5.2 Efecto de los parámetros de soldadura en la estructura de los granos***

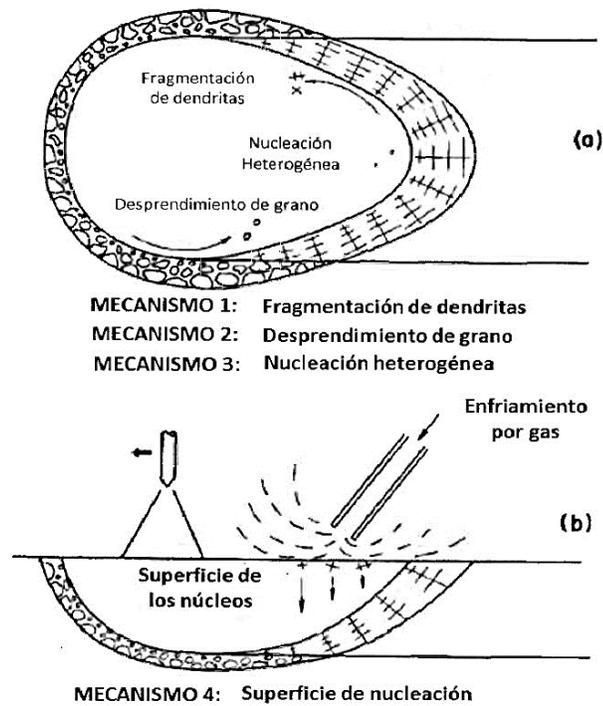
Al empezar a soldar si consideramos que la velocidad de desplazamiento es muy rápida, el charco de soldadura al ir solidificando, formará un crecimiento columnar que se unirán en el centro y si la velocidad es baja, tendrá una forma elíptica, como se muestra en la figura 2.23a. Una soldadura por arco de tungsteno con un gas de alta pureza (99.96%) de aluminio y con una velocidad de soldadura de 1000mm/min, formara granos columnares que apuntan a la línea central, mientras que los granos columnares curvos apunta en dirección de la soldadura con una velocidad de 250mm/min. figura 2.23b. También puede haber granos axiales que inician desde el límite de fusión en el punto de partida de la soldadura y continúan a lo largo de esta y chocan con los granos columnares. Los granos axiales tienden a crecer perpendicular al cordón de la soldadura y en forma estrecha.



**Figura 2.23** Soldadura de arco de gas-tungsteno de 99.96% de pureza, en aluminio: (a) 1000 mm/min velocidad de soldadura; (b) 250 mm/min velocidad de soldadura [36].

### ***2.5.3. Fragmentación dendrítica***

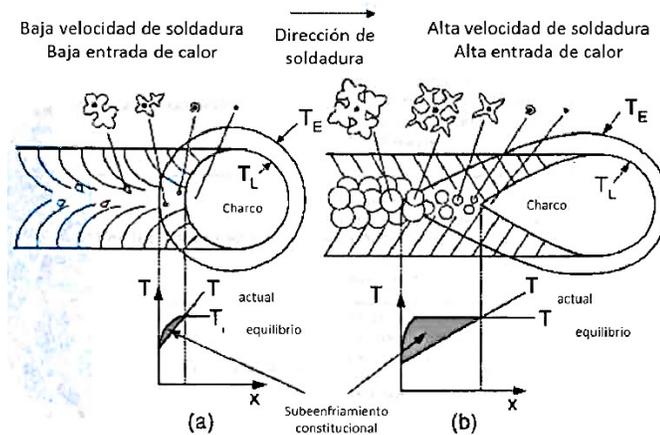
Existen cuatro mecanismos de nucleación: 1. Fragmentación de dendrita. En el charco de soldadura en la zona pastosa, se desprenden fragmentos de granos y si sobreviven a las altas temperaturas dentro del charco de soldadura pueden actuar como nuevos núcleos para formar nuevos granos. Ver figura 2.24 a. Desprendimiento de grano. También en el charco de soldadura se pueden desprender granos parcialmente fundidos, igualmente pueden servir para formar nuevos núcleos en el cordón de soldadura. Nucleación heterogénea. Pueden ser partículas extrañas presentes en el charco de soldadura y pueden actuar como nucleantes heterogéneos o pueden ser microaleantes como el titanio que tiene altos grados de fusión. Superficie de nucleación. Es cuando la superficie del charco de soldadura puede ser sobreenfriada térmicamente para inducir la nucleación superficial por la exposición a una corriente de gas de enfriamiento y los núcleos se pueden formar en nuevos granos que caen como cascadas hacia el interior del charco, como se ilustra en la figura 2.24b.



**Figura 2.24** Mecanismo de nucleación durante la soldadura: (a) vistas de arriba (b) vista lateral [36].

#### **2.5.4. Efectos de los parámetros de soldadura en la nucleación heterogénea**

La formación de granos equiaxiales está reforzada por mayores entradas de calor y velocidades de soldadura. Los granos pueden formar una banda a lo largo de la línea central de la soldadura, como la entrada de calor y la velocidad de soldadura se aumentan, el gradiente de temperatura ( $G$ ) al final del baño se reduce. Los granos equiaxiales además del sobreenfriamiento constitucional, cantidades significativas de ferrita acicular se forman con los microaleantes en aleaciones de más de 0.01% en peso y 0.10% en peso. Como se muestra la figura 2.30. El diagrama de equilibrio Hierro-Carbono tal como se muestra en figura 2.16 nos muestra el comportamiento de los aceros en conexión con los ciclos térmicos de soldadura sobre la forma de utilizar el calor. El hierro y el carbono forman un compuesto conocido como carburo de hierro ( $Fe_3C$ ) o llamado también cementita.



**Figura 2.25** Efecto de los parámetros de soldadura en la nucleación heterogénea (a) bajo sobreenfriamiento constitucional en la velocidad de soldadura y baja entrada de calor, (b) nucleación heterogénea con la ayuda del sobreenfriamiento constitucional, con una alta velocidad de soldadura y alto calor de entrada [36].

### 2.5.5. Transformación ferrítica a partir de la austenita, en soldadura de aceros al carbono

Este tipo de ferrita alotriomórfica se encuentra cuando se enfría desde temperatura altas transformando a ferrita (a) y esta nuclea en el límite de grano creciendo hacia dentro del mismo grano y no tiene una forma regular, la ferrita Widmanstätten crece en temperaturas más bajas, si se presenta en un crecimiento planar esta disminuye en el contorno del grano dando forma de agujas. Una de las ferritas que se busca obtener en las soldaduras es la ferrita acicular ya que mejora las propiedades mecánicas, esta se presenta en temperaturas aún más bajas que la ferrita Windmanstätten, nuclea a partir de inclusiones dentro del grano [49]

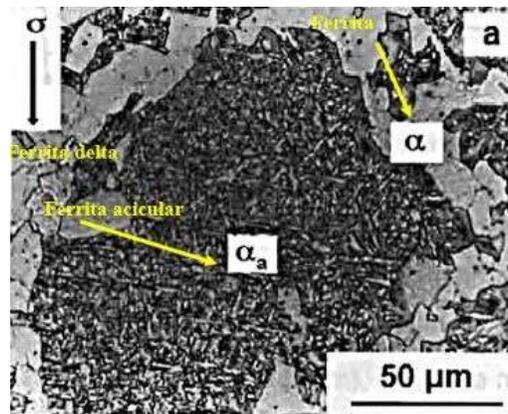
### 2.5.6. Mecanismos de la ferrita acicular en el cordón de soldadura

Estudios recientes han mostrado que la presencia de ferrita acicular en el metal de soldadura se debe a la descomposición de la austenita, esto mejora la resistencia mecánica y la tenacidad.

A finales de 1970 se destacó la importancia de la microestructura de la ferrita acicular y su relación con las inclusiones de óxido en el metal de soldadura, la templabilidad y las condiciones de enfriamiento [50].

### 2.5.6.1 Crecimiento de ferrita acicular

El crecimiento de la ferrita acicular, empieza por un crecimiento repetido de subunidades de ferrita, donde se realiza un desplazamiento de transformación, sin la participación del carbono, mientras que el carbono enriquece la austenita y el crecimiento continuo de ferrita acicular, alcanza un límite crítico, hasta que llega a ser imposible el desplazamiento, para la formación de la ferrita acicular. Esta concentración de carbono crítico, sucede cuando la energía libre de la austenita es igual a la de la ferrita, en este punto se detiene la transformación y se conoce como transformación incompleta, sin embargo, si la densidad del número de sitios de nucleación es menos potente, puede ser posible la formación de placas de ferrita similar a la bainita como se muestra en la figura 2.26.



**Figura 2.26** Micrografía óptica de muestras del metal de soldadura Fe-Cr-C sometida a una transformación isotérmica de ferrita acicular [51].

Se concluyó la importancia de las inclusiones como sitios de nucleación para la formación de ferrita acicular en el metal de soldadura, así como conocer las fases presentes y los mecanismos de nucleación de la ferrita acicular. Los mecanismos más probables para nucleación en inclusiones son debido a la generación de tensiones térmicas en la austenita o la formación de soluto empobrecido en las regiones.

## Capítulo 3

### Desarrollo experimental

#### 3.1 Metodología de la investigación

En este capítulo se detalla de manera consecutiva el desarrollo del trabajo experimental y qué técnicas fueron utilizadas para analizar los resultados obtenidos.

La figura 3.1 muestra el diagrama de flujo para la metodología experimental realizada en el presente proyecto.

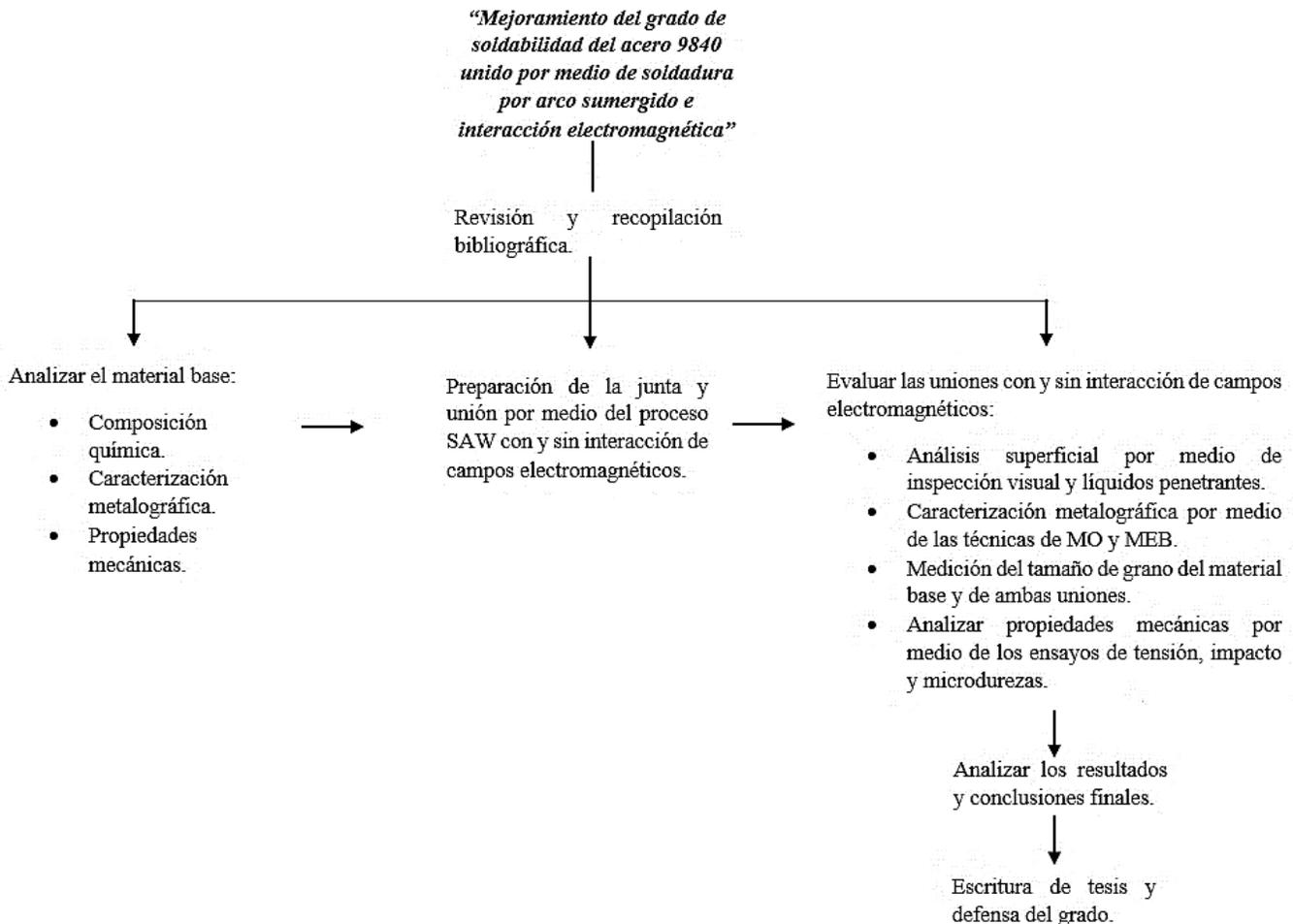


Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología experimental.

### 3.1.1 Caracterización del material base

Se realizó análisis químico en el acero AISI 9840 para conocer el porcentaje en peso de sus elementos aleantes y el resultado se presenta en la tabla 3.1, esto se realizó por medio de la técnica de espectrometría por emisión de chispa bajo el estándar B.S CA 316-2, seccionando el metal base a dimensiones de 25.4 mm x 25.4 mm. Con el análisis de composición química se sustituyeron los valores en la ecuación del carbono equivalente C.E., para determinar el grado de soldabilidad del acero del acero de baja de aleación, por medio de la siguiente ecuación 3, donde de acuerdo con el resultado indica que el acero tiene un bajo grado de soldabilidad [25].

**Tabla 3.1** Composición química del acero 9840 (% en peso) [48].

	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Mo</b>	<b>Cu</b>
9840	0.38	0.70	0.20	0.70	1.15	0.035	0.040	0.30	-
Proveedor									
9840	0.37	0.75	0.25	0.80	1.09	<0.001	<0.0005	0.26	0.26
Experimental									

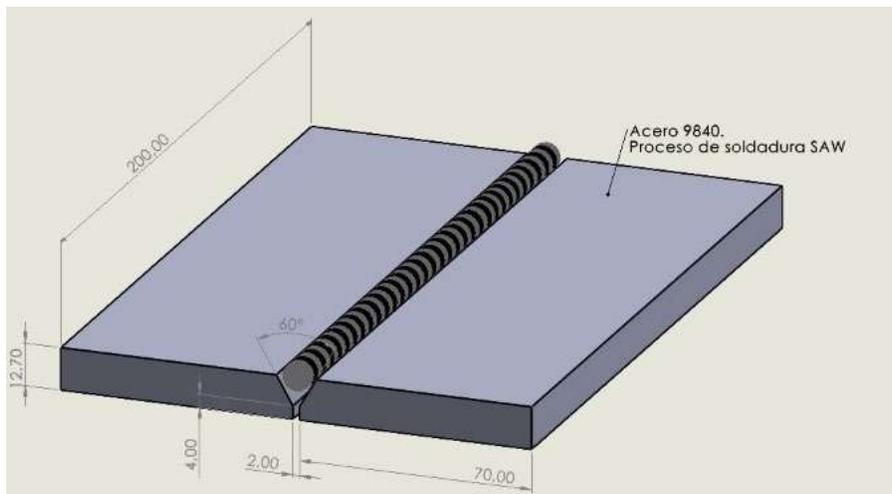
$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad \text{ecuación 3.}$$

$$CE = 0.371 + \frac{0.758}{6} + \frac{0.90 + 0.263 + 0.0005}{5} + \frac{1.097 + 0.260}{15} = 0.81$$

El análisis de la caracterización microestructural se realizó por medio de un corte del metal base de las siguientes dimensiones 2.5x2.5x12.7 mm, para desbastar la cara transversal de la probeta mediante desbaste con lija de carburo de silicio de diferente granulometría, y posteriormente se realizó un pulido fino con pasta de diamante de 3 y 1 micras humectado con alcohol etílico, para continuar en el banco metalográfico con un ataque químico con nital al 2%, para finalmente revelar la microestructura por medio de la técnica de microscopía óptica a diferentes magnificaciones de 50X a 1000X en un equipo marca Karl Zeiss Axio A1

### 3.1. Preparación de la junta y unión por medio del proceso SAW

Se seccionaron dos juegos de probetas del acero AISI 9840 usando una cierra cinta para los cortes, por consiguiente, se maquinaron con las dimensiones de 200 mm de largo, por 70 mm de ancho, con un espesor de 12.70 mm. La preparación de la junta fue a tope en simple V con un ángulo de ranura de  $60^\circ$  y una abertura de raíz de 2 mm, con un talón de 4 mm como se ilustra en la figura 3.2, agregándole una placa de arranque en cada extremo y también una placa de respaldo en la parte de la raíz.



**Figura 3.2** Esquema de las dimensiones y seccionamiento de la junta a soldar.

Se llevó a cabo la preparación de la junta para ser unida por medio del proceso SAW empleando una máquina marca Miller con una capacidad de 650 amperios, con un potencial de trabajo de 50 voltios, se empleó un fundente tipo aglomerado bajo la clasificación A5.17, tipo ED019589 ver tabla 3.2 donde se muestra su composición química y en la tabla 3.3 las propiedades mecánicas de soldadura en combinación con el fundente y electrodo. El fundente fue previamente calentado a una temperatura de  $200^\circ\text{C}$  durante dos horas con la finalidad de eliminar la humedad al fundente, bajo el código de AWS A5.18/A5.18M:2005 [52] se trabajó con un electrodo sólido ER70S-6 [53] con diámetro de 1.6 mm ver tabla 3.4 de composición química y la tabla 3.5 de sus propiedades mecánicas. Una vez depositado el metal de aporte, el cual se fijó con un stick out de 15mm, se usó para ambas soldaduras (una realizada con campo y la otra sin campo electromagnético).

Durante la soldadura, se generó un campo magnético de 4.3 mT medido con un gaussímetro, para obtener este campo electromagnético se realizaron dos bobinas cada una con un diámetro de 14 cm

para esto se utilizó una unidad de partículas magnéticas marca Parker con una capacidad de 1500 A. Finalmente, las bobinas se colocaron perpendicular a la placa con un ángulo de inclinación de 30° a la junta en sentido de la soldadura como se ilustra en la figura 3.3. Las soldaduras fueron realizadas bajo los siguientes parámetros plasmados en la tabla 3.6.



**Figura 3.3** Orientación de las bobinas durante el proceso de soldadura.

**Tabla 3.2** Composición química del fundente aglomerado % en peso [53].

Fundente	%SiO <sub>2</sub>	%MnO	%MgO	%CaF <sub>2</sub>	%Na <sub>2</sub> O	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%CaO	%TiO <sub>2</sub>	% aleaciones metálicas
ED019589	19	11	17	12	2	32	2	2	3 Máx.

**Tabla 3.3** Propiedades mecánicas de soldadura en combinación con el fundente y electrodo [54].

Resistencia a la tensión MPa	Esfuerzo a la cedencia MPa	Elongación en 50 mm
590	470	28%

**Tabla 3.4** Composición química del electrodo ER70S-6 % en peso [53].

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>S</b>	<b>P</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>Cu</b>
0.08	1.45	0.80	0.012	0.012	-	-	-	0.15

**Tabla 3.5** Propiedades mecánicas del metal depositado con un electrodo ER70S-6 [55].

<b>Límite Elástico MPa</b>	<b>Esfuerzo de Ruptura MPa</b>	<b>Elongación 5d (%)</b>
480	580	28

**Tabla 3.6** Variables de soldadura empleadas en el proceso de unión.

<b>Parámetros</b>	<b>Con campo</b>	<b>Sin campo</b>
<b>Configuración de la junta</b>	A tope en simple V, con un ángulo de ranura de 60°	A tope en simple V, con un ángulo de ranura de 60°
<b>Espesor</b>	12.70 mm	12.70 mm
<b>Voltaje</b>	30.4 V	30.4 V
<b>Amperaje</b>	380 A	380 A
<b>Vel. de alimentación</b>	350 mm/min	350 mm/min
<b>Vel. de avance</b>	2.66 mm/s	2.66 mm/s
<b>Stick out</b>	15 mm	15 mm
<b>Intensidad del campo electromagnético.</b>	4.3 mT	

En la figura 3.4 se muestra el arreglo experimental para la aplicación del campo electromagnético y en la figura 3.5 se puede ver la unión sin la interacción del campo electromagnético.

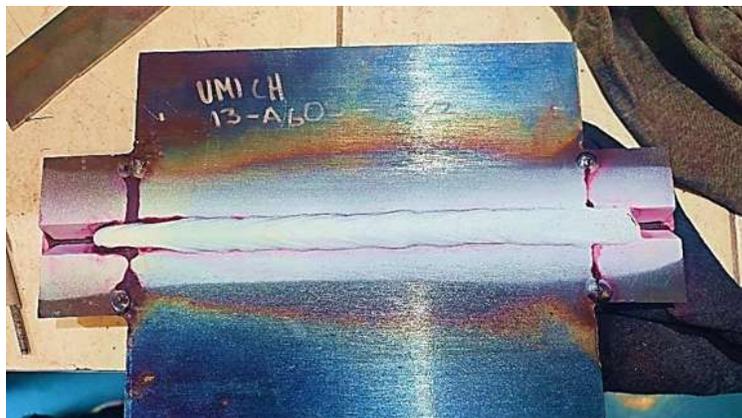


**Figura 3.4** Soldadura con la interacción de los campos electromagnéticos.



**Figura 3.5** Soldadura sin la interacción de los campos electromagnéticos.

Para verificar la sanidad de las juntas soldadas se realizó la evaluación superficial por medio de inspección visual y líquidos penetrantes, como se muestra en la figura 3.6.



**Figura 3.6** Evaluación por medio de la técnica de líquidos penetrantes.

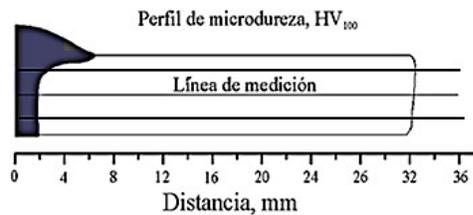
Las placas soldadas fueron seccionadas como se muestra en la figura 3.7 para realizar ensayos de tensión, ensayos de impacto y caracterización microestructural. Se cortaron muestras al inicio, intermedio y final del cordón de soldadura.



**Figura 3.7** Trazo de placas para probetas de ensayos mecánicos.

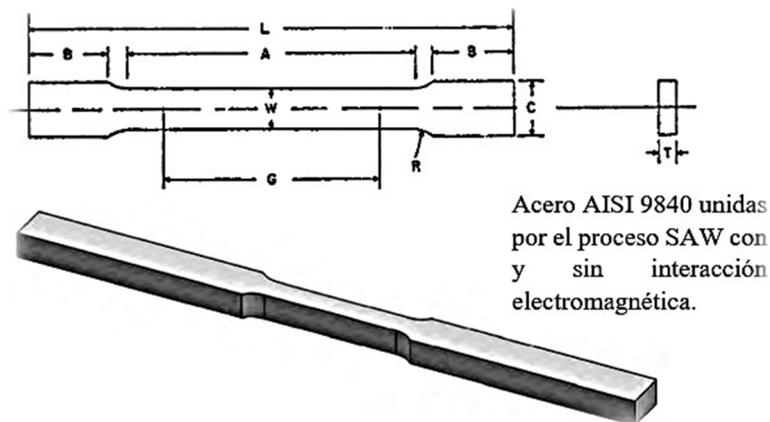
Se realizaron los cortes transversales para la preparación metalográfica, desbastando las probetas mediante una fresadora vertical, se llevó a cabo un desbaste con lijas de carburo de silicio, posteriormente se llevó a cabo un pulido fino con pasta de diamante de 5, 3 y 1  $\mu\text{m}$  respectivamente. Posteriormente se realizó un ataque químico con Nital al 2% durante 7 segundos. Finalmente se analizaron las muestras mediante la técnica de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido.

Se realizaron los perfiles de dureza bajo la norma ASTM E92 – 17 [56], en un microdurómetro marca Mitutoyo, se realizaron las improntas con una punta de diamante para las durezas Vickers, las mediciones se hicieron en sentido transversal a la soldadura, aplicando una carga de 100 g durante 15 s. Iniciando en el centro del cordón cada 0.25 mm, hacia la ZAC y MB, de modo repetitivo para todas las probetas, en la siguiente figura se puede observar cómo fueron los barridos.

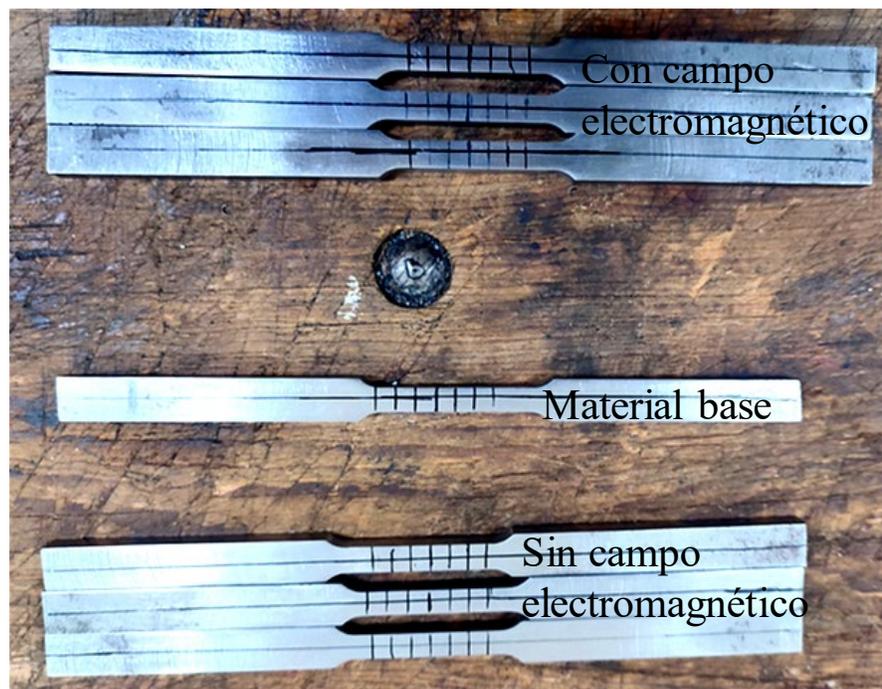


**Figura 3.8** Probeta para ensayos de dureza Vickers [47].

Se maquinaron las probetas de tensión bajo la norma ASTM E8/E8M – 09 de acuerdo a la geometría mostrada en la figura 3.9 [53], se realizaron los ensayos de tracción uniaxial con una velocidad de desplazamiento de 0.016 mm/s. Un juego se realizó del metal base en dirección longitudinal y transversal, el siguiente juego fue de la soldadura con interacción de los campos electromagnéticos de la parte de inicio, medio y fin de la placa, de la soldadura sin interacción de los campos se realizó el mismo seccionamiento con dimensiones. Las probetas maquinadas se presentan en la figura 3.10 bajo la norma de ASTM E8.

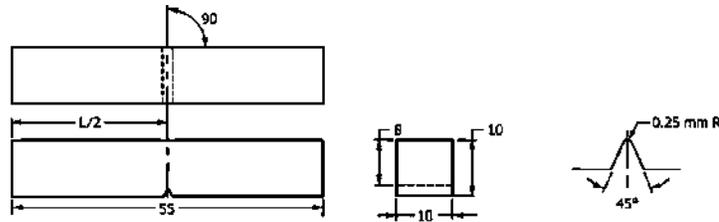


**Figura 3.9** Diseño de probetas para los ensayos de tensión uniaxial [57].



**Figura 3.10** Probetas para los ensayos de tensión uniaxial.

Se maquinaron probetas para el ensayo de impacto Charpy bajo la norma ASTM E23 – 12c [58] evaluando el cordón de soldadura y la zona afectada térmicamente. Se utilizó el péndulo instrumentado que se muestra en la figura 3.12 para realizar los ensayos Charpy.



**Figura 3.11** Diseño para las probetas de impacto bajo la norma ASTM E23 [58].



**Figura 3.12** Equipo para realizar los ensayos de impacto, péndulo instrumentado.

De acuerdo a la norma de ASTM E112, finalmente se llevó a cabo la medición de tamaño de grano para poder corroborar si había una disminución en el tamaño de grano con respecto al material base y en comparación de la soldadura con la interacción de campos electromagnéticos y sin la interacción de estos. Para esto la norma indica que existen diferentes métodos para la obtención de esta medición por lo cual se realizó en base al método de intercepción lineal, se eligieron micrografías del material base la cual se muestra en la figura 3.13, soldadura con la interacción de los campos y sin la interacción a una misma magnificación [59].

Se seleccionaron líneas de 60 μm cada una que serían las que interceptarían con los granos para realizar el conteo, se tomó una muestra de 20 líneas, este muestreo se plasmó en la tabla 3.7. Esto se realizó para ambas soldaduras.

Se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$N_L = \frac{Ni}{LT/\mu} \dots \dots \dots \text{Ecuación 4}$$

$$\bar{\ell} = \frac{1}{N_L} \dots \dots \dots \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$N_L$  = Número total de granos

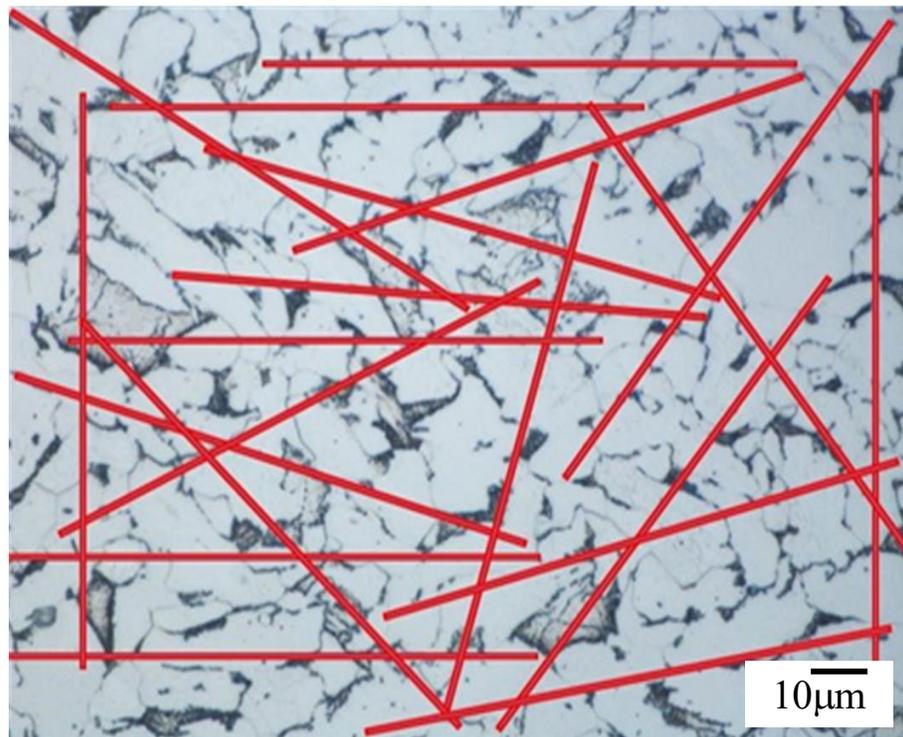
$N_i$  = Número de granos por  $\text{mm}^2$

$LT$  = Longitud total de distancia

$\bar{\ell}$  =  $\text{mm}$   
Longitud intercepción media

$\mu$  = Magnificación

**Material base**



**Figura 3.13** Medición del tamaño de grano del material base.

**Tabla 3.7** Muestreo de intersecciones para la medición de tamaño de grano del material base

Línea	Intersecciones
1	9
2	8
3	11
4	9
5	10
6	9
7	8
8	12
9	9
10	6
11	7
12	5
13	7
14	10
15	8
16	8
17	10
18	7
19	8
20	6

Donde se sustituyeron valores en las ecuaciones y de acuerdo a la tabla que proporciona la norma ASTM E112 poder corroborar el tamaño de grano.

$$N_L = \frac{Ni}{LT/\mu} = \frac{158}{\frac{1200}{100}} = 13.1mm$$

$$\bar{\ell} = \frac{1}{N_L} = \frac{1}{13 \cdot 16} = 0.0075$$

$$G = (-6.6467(\log_{10}L_3) - 3.298)$$

$$G = (-6.6467(\log_{10}0.075) - 3.298) = 4.1$$

El tamaño de grano del material base de acuerdo a ASTM E112 es aproximadamente de 4, de la misma manera se realizó la medición para las micrografías de las soldaduras con la interacción de campos donde se obtuvo un tamaño de grano ASTM 9 y la soldadura sin la interacción de los campos se obtuvo un tamaño de grano 6.

## Capítulo 4

### Análisis y discusión de resultados

En el presente capítulo se presentan el análisis y discusión de resultados obtenidos de las diferentes técnicas realizadas de caracterización microestructural y mecánica, tanto del material base 9840 como de las uniones soldadas con y sin aplicación de los campos electromagnéticos de manera externa durante el proceso de unión por medio del proceso SAW.

#### 4.1. Caracterización y propiedades mecánicas del material base

De acuerdo a la composición química obtenida en el desarrollo experimental, se determinaron las transformaciones de la austenita y con ello poder realizar una predicción de las microestructuras en el material base, para esto se utilizó el software JMatPro, obteniendo el diagrama de enfriamiento continuo (CCT por sus siglas en inglés).

La figura 4.1 muestra el diagrama de la predicción de las fases posibles en presentarse en el material base las cuales son: ferrita, perlita y pequeñas islas de bainita, el mismo diagrama nos proporciona los valores de microdureza vickers donde la ferrita presenta un rango de 126-293 cuando se da a una velocidad de enfriamiento de 0.001K/s a 1 K/s y la fase perlítica presenta una microdureza de 127 cuando se da a una velocidad de enfriamiento de 0.001 K/s.

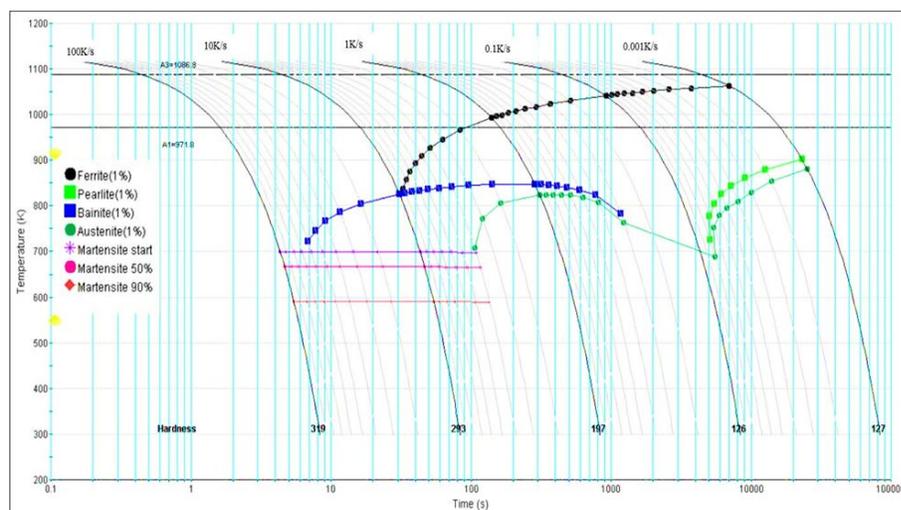
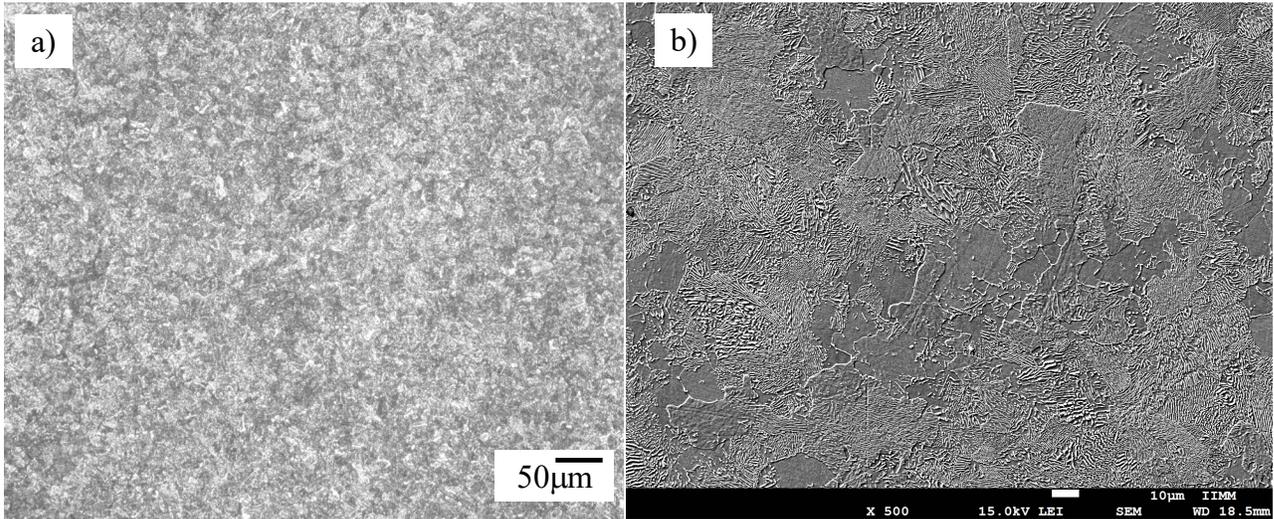


Figura 4.1 Diagrama CCT del acero AISI 9840.

Con base en la literatura [6] se sabe que un acero de medio contenido de carbono, tendrá porcentajes de ferrita delta y perlita. La figura 4.2a muestra la microestructura le acero 9840 observado por medio de microscopía óptica. Esta está constituida principalmente por ferrita (blanco) y perlita (gris). El análisis por microscopía electrónica de barrido (figura 4.2b) muestra que la perlita está distribuida en pequeñas plaquetas a través de los límites de grano.



**Figura 4.2** Micrografía del acero AISI 9840 a) por microscopía óptica y b) MEB.

#### 4.1.2 Microdureza Vickers

Respecto a la dureza del material base, se tenía como punto de partida el dato que el proveedor del material había proporcionado en el certificado de calidad siendo un valor de 189 en escala HB, en la tabla 4.1 tabla se muestran los valores reales de la dureza del acero 9840, para ello se realizaron indentaciones de microdureza vickers de manera longitudinal y transversal con una carga de 100 gr. Estos valores se encuentran dentro de los datos de dureza nominal para el acero 9840, como se puede apreciar en la figura 4.3.

**Tabla 4.1** Microdurezas promedio del material base

Hv <sub>100</sub>	Acero AISI 9840
<b>Promedio</b>	
Longitudinal	221.18
Transversal	227.43

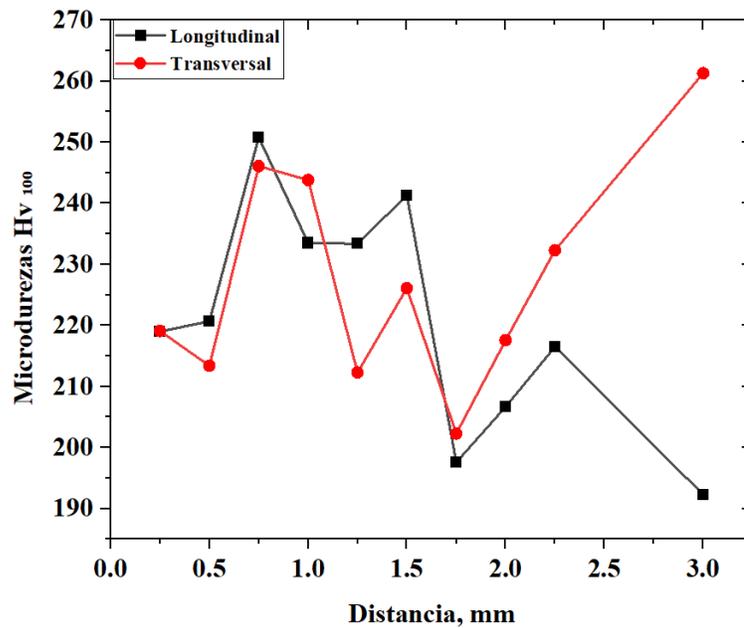


Figura 4.3 Perfil de microdurezas HV del material base.

#### 4.1.3 Ensayo de tensión uniaxial

De acuerdo con el ensayo de tensión realizado del material base, se observa que el esfuerzo máximo alcanzado fue de 800.56 MPa, el valor nominal corresponde a 750 MPa, el esfuerzo de fluencia es de 505.20 MPa, el porcentaje de deformación es de 10.73% y el esfuerzo de falla es de 789.55, con un módulo de Young de 157.34 GPa, como se puede ver en la figura 4.4, el material cumple con los valores nominales establecidos para este acero.

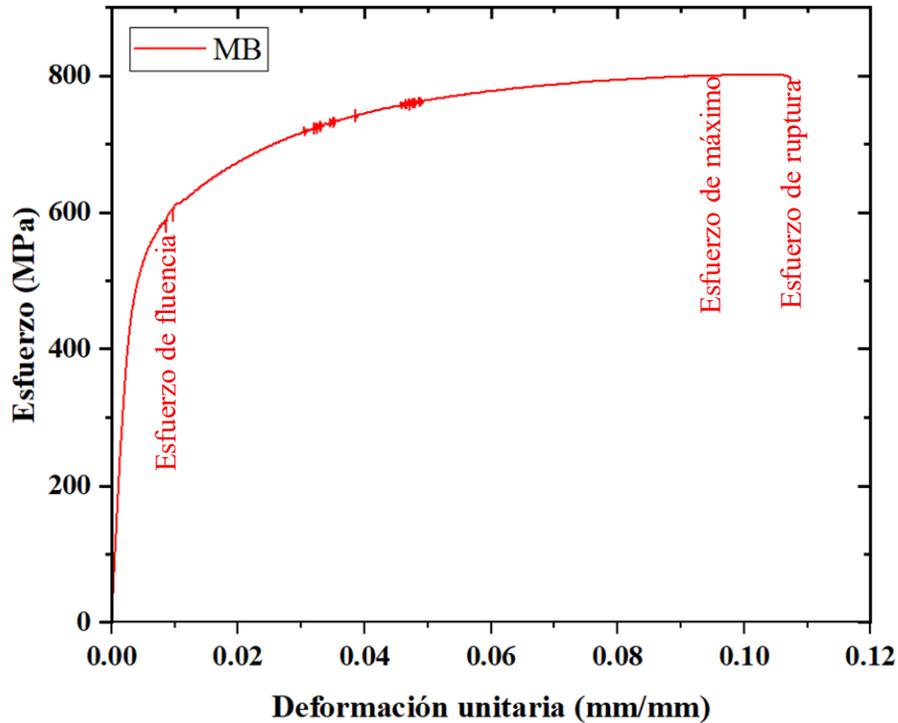


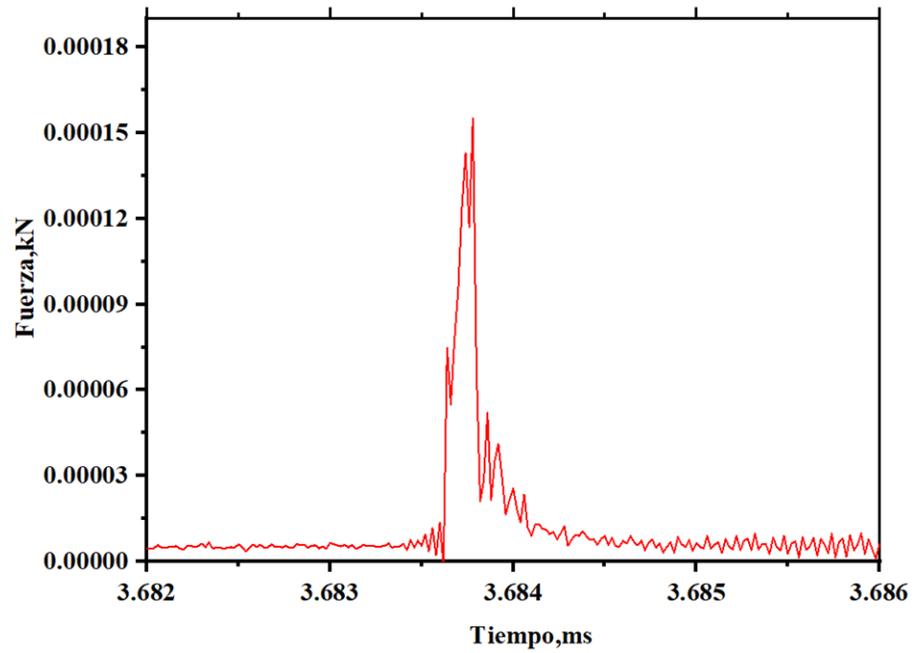
Figura 4.4 Diagrama esfuerzo-deformación del material base.

#### 4.1.4 Ensayo de impacto charpy

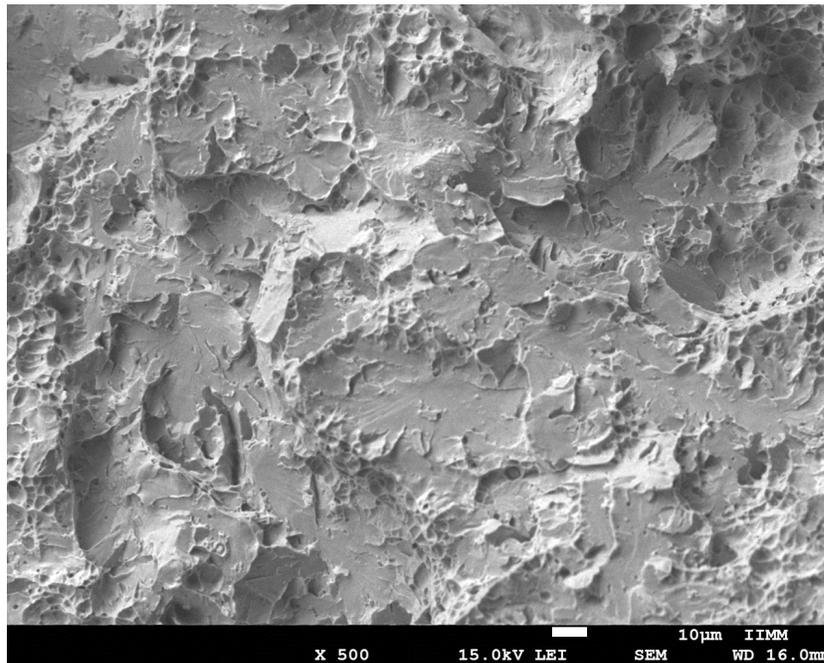
Las probetas para el ensayo de impacto Charpy se realizaron con el propósito de determinar la tenacidad del material al ser sometido al impacto.

En la gráfica, de la figura 4.5 se aprecia que a 0.001 milisegundos se propaga la grieta y la fractura con una fuerza de 0.0015 kN, absorbiendo una energía de 8.829 J. En la figura 4.6 se aprecia que esta probeta tiene como resultado una combinación de fractura mayormente frágil con algunos vestigios de deformación y comportamiento dúctil ya que presenta una morfología de hoyuelos donde en su interior existe presencia de segundas fases; presenta pequeñas zonas lisas que son características de zonas frágiles, esto se relaciona con el tipo de microestructura ferrítica y perlita que presenta el metal base [60].

La grieta progresa a través de los límites de grano. Este tipo de fractura evidencia un material débil, con problemas en el proceso de fabricación.



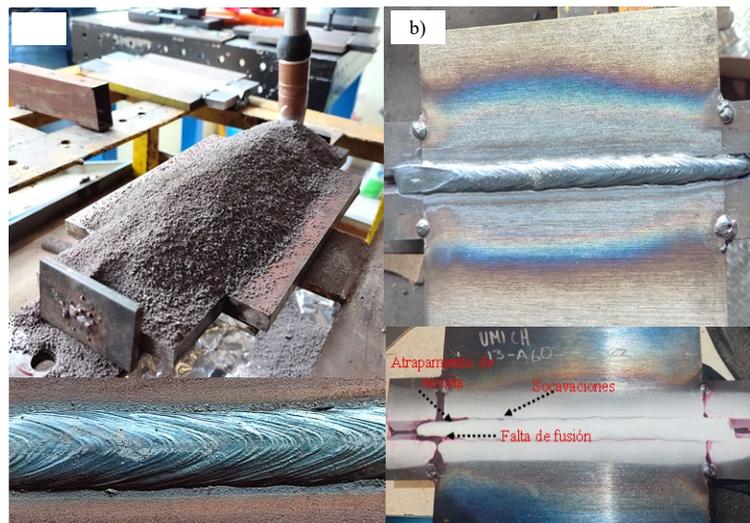
**Figura 4.5** Diagrama del ensayo impacto Charpy del material base.



**Figura 4.6** Micrografía por MEB del ensayo de impacto del material base.

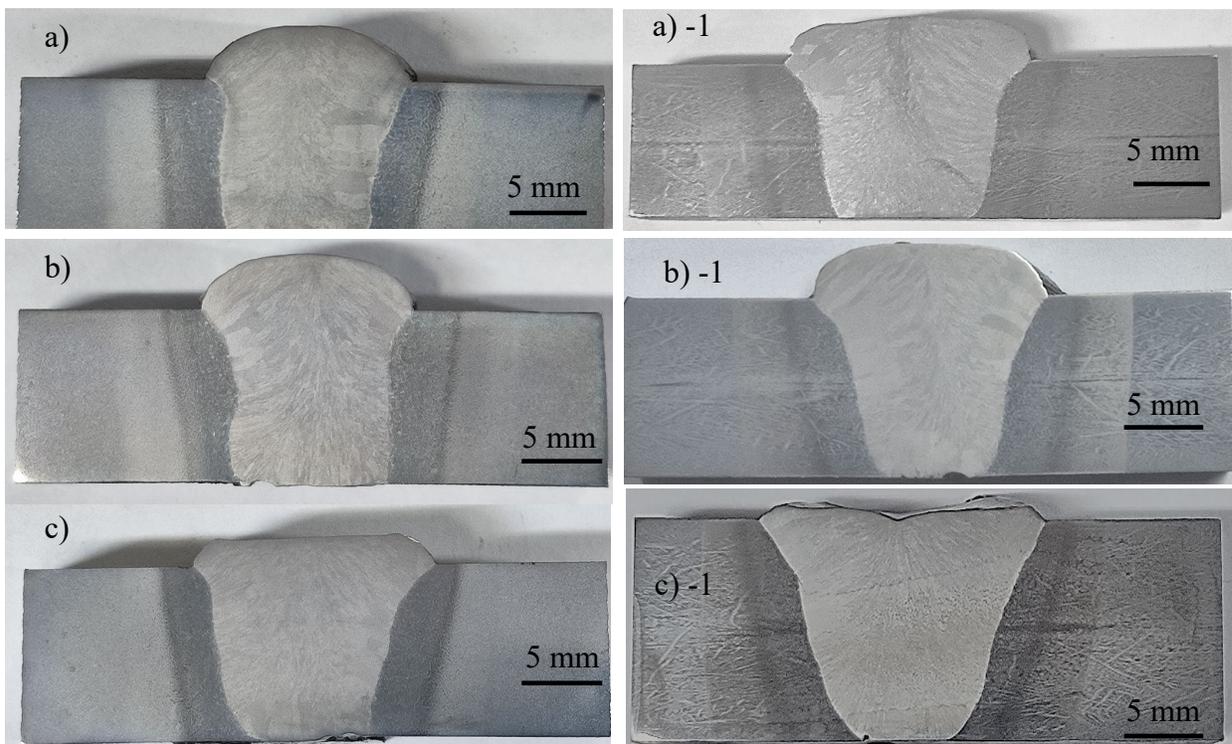
## 4.2 Caracterización de uniones soldadas

El valor del C.E. obtenido en el acero de estudio fue de 0.81 con lo cual se determinó que el material se encuentra en la zona III del diagrama de Granville [25], un acero en esta zona es considerado de baja soldabilidad, por lo que, para poder realizar uniones con este tipo de acero se requiere precalentamiento y tratamiento térmico postsoldadura. Sin embargo, con base a estudios previos realizados utilizando bobinas que generan un campo electromagnético, se ha determinado que su presencia refina el tamaño de grano en la zona fundida y la zona afectada por el calor evitando así un tratamiento térmico postsoldadura [39, 44]. La figura 4.7a muestra el proceso de soldadura y la cara de la soldadura donde se aprecia el crecimiento competitivo y la dirección de soldadura. La inspección por medio de líquidos penetrantes (figura 4.7b) muestra que en las soldaduras no se encuentran indicaciones de porosidad, falta de fusión, agrietamiento. En las macrografías de la figura ver figura 4.7 a), soldada sin campo magnético se aprecia un crecimiento competitivo y/o la solidificación epitaxial característica en el proceso de unión. En cambio, la soldadura que se realizó sin la interacción de los campos magnéticos presenta discontinuidades, al realizarse la técnica líquidos penetrantes, se detectaron socavaciones en el pie de soldadura de 0.079 cm, al inicio del cordón se presentó falta de relleno y atrapamiento de escoria y finalmente en la cara de la soldadura no presenta ninguna indicación, se ilustra en la figura 4.7 b).



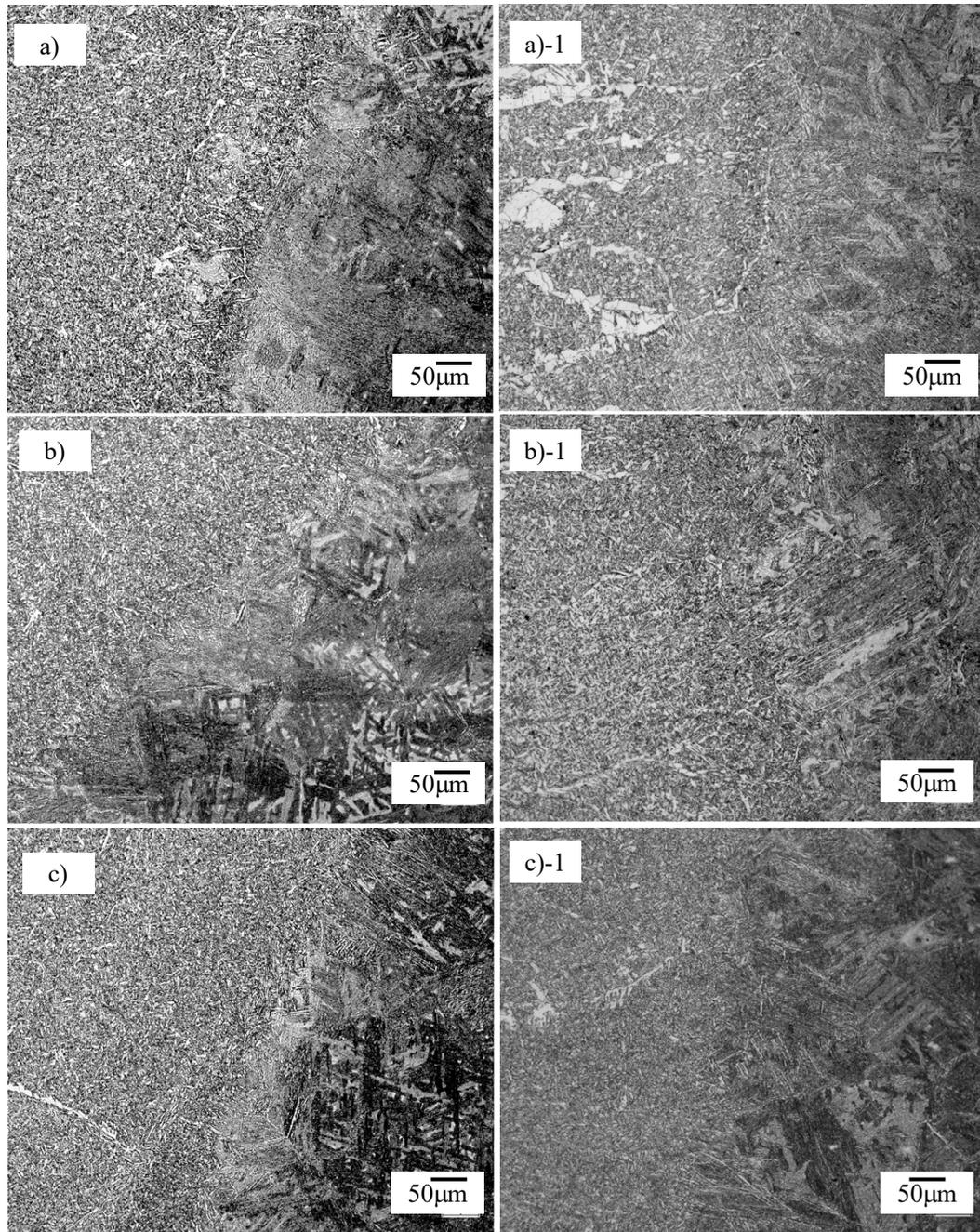
**Figura 4.7** Uniones soldadas a) Con la interacción de los campos electromagnéticos (CIEM), b) Sin la interacción de los campos electromagnéticos (SIEM).

La figura 4.8 muestra los perfiles transversales de las uniones CIEM y SIEM respectivamente. Las figuras 4.8 a), b) y c) muestran las características macroestructurales de los cordones de soldadura CIEM en la parte del inicio, medio y final de la placa soldada; se puede apreciar un crecimiento de grano columnar, el cual se rompe en el centro del cordón. Se observa refinamiento de grano hacia el centro del cordón y es más notable en la parte final donde la temperatura y la soldadura es más estable. Este comportamiento puede atribuirse a que el campo magnético rompe las dendritas generando nuevos sitios de nucleación. También, la corona de la soldadura se observa de mayor tamaño y el ancho del cordón es reducido. Por otro lado, en las uniones sin la interacción de los campos electromagnéticos se aprecia un grano más burdo dentro del cordón de soldadura en comparación a las uniones soldadas con la interacción de los campos electromagnéticos, como se ilustra en las figuras 4.8 a-1), b-1), y c-1) respectivamente.



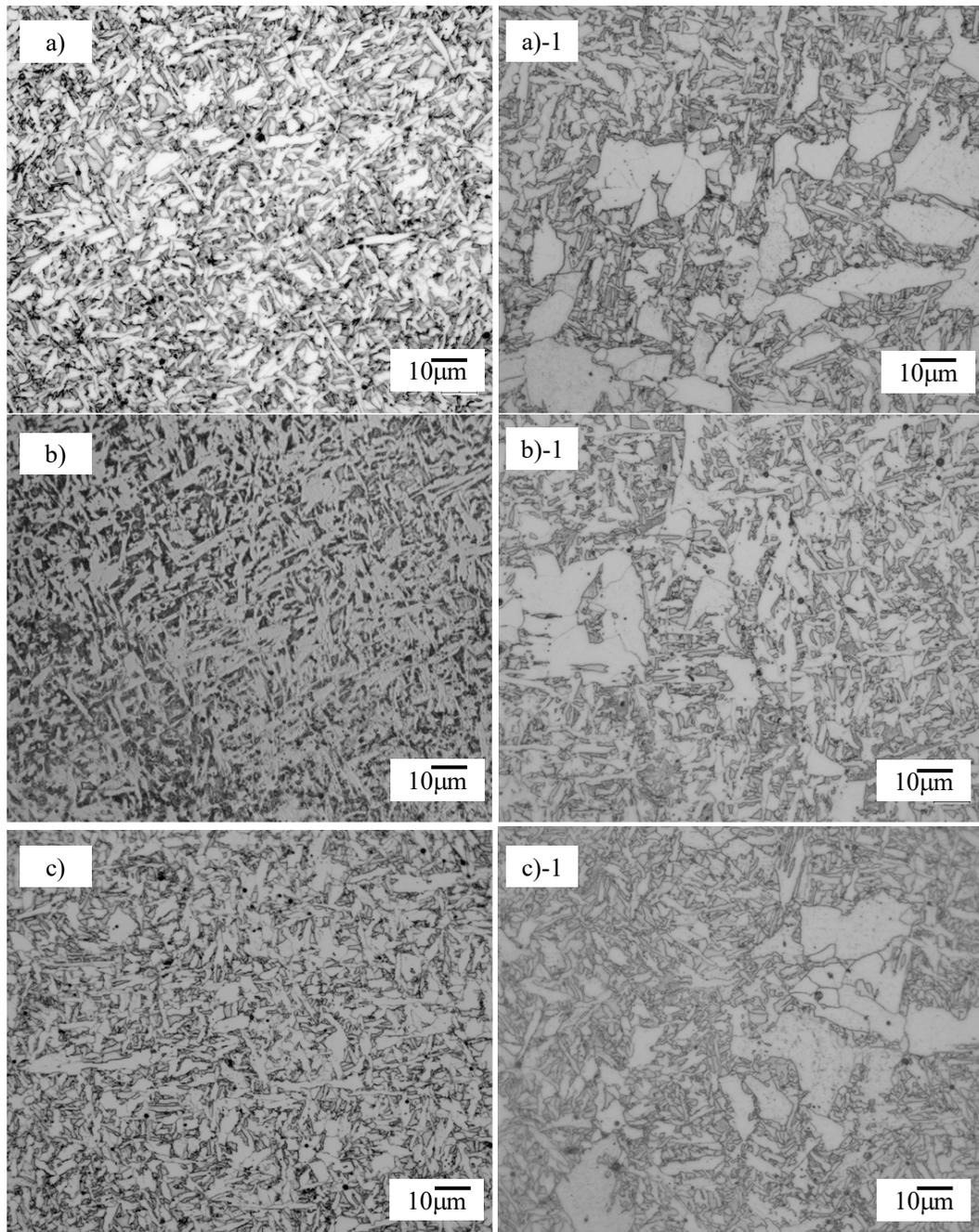
**Figura 4.8** Macrografías de las uniones soldadas; a) CIEM inicio b) CIEM medio, c) CIEM final, a-1) SIEM inicio, b-1) SIEM medio, c-1) SIEM final.

La figura 4.9 muestra la microestructura de la interface en las uniones soldadas con la aplicación de campo y sin la presencia del mismo. En la figura 4.9 a) al inicio del cordón se aprecia pequeños granos columnares que crecen desde la interface hacia el centro del cordón de soldadura y existe presencia de ferrita alotriomórfica este tipo de ferrita nuclea a partir de los límites de grano por su alta concentración de energía. Por otro lado, en la figura 4.9 a)-1 SIEM se aprecia granos columnares, ferrita poligonal presentándose de manera más burda. En la figura 4.9 b) en la región media del cordón de soldadura se observa la parte media de la soldadura presenta un tamaño de grano más homogéneo con presencia de ferrita poligonal, mientras que en la figura 4.9 b)-1 se aprecia granos columnares, ferrita poligonal presentándose más burda. Finalmente, en la figura 4.9 c)-1 en las micrografías sin campo el grano se aprecia un grano más burdo y aun se observa cierto porcentaje de mezcla hacia la zona afectada térmicamente. Por otro lado, en la figura 4.9 c) se determina que lo que genera la interacción de campo es homogenizar el grano, evitando la propagación de grietas. También se aprecia en las zonas afectadas por el calor de las soldaduras sin campo la presencia de martensita en forma de listones, este tipo de martensita es característica de los aceros de baja aleación.



**Figura 4.9** Micrografía de la interface de la soldadura con campo y sin campo a) interface de soldadura parte de inicio CIEM, a)-1 interface de soldadura parte de inicio SIEM, b) interface de soldadura parte media CIEM, b)-1 interface de soldadura parte media SIEM, c) interface de soldadura parte final CIEM, c)-1 interface de soldadura parte final SIEM.

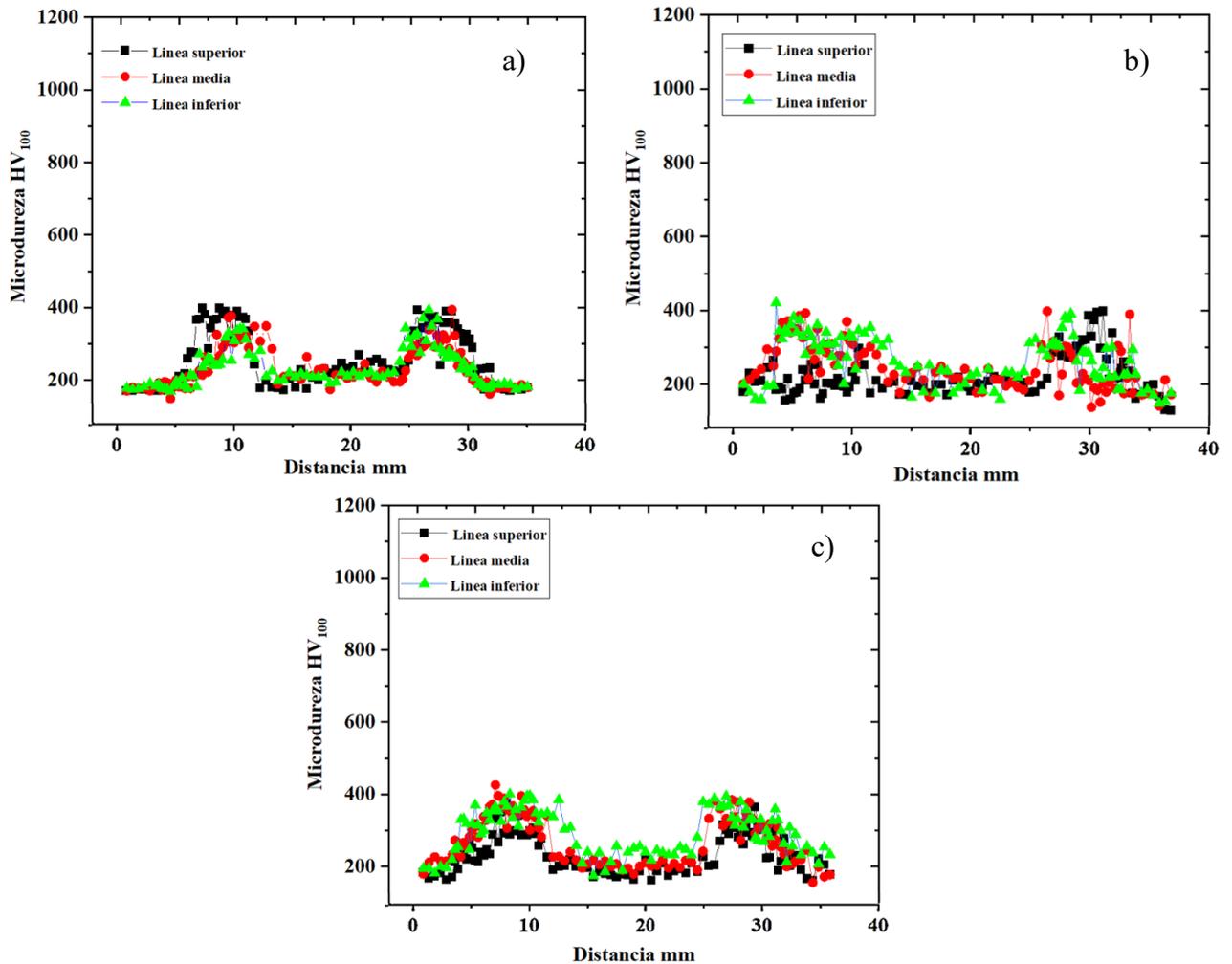
De acuerdo a la literatura [37, 51], se sabe que en soldaduras de aceros al carbono se puede presentar una variedad de microestructuras ferríticas, en este caso el metal base tiene como microestructura ferrita y perlita, en la micrografía de la figura 4.10 a), se aprecia un grano fino con ferrita idiomórfica, este tipo de ferrita se forma de manera intragranular y crece en las inclusiones. También existe presencia de ferrita acicular la cual se forma en el interior del grano austenítico en forma de placas entre cruzadas. Esta nuclea a partir de las inclusiones (sulfuros, óxidos o silicatos), se origina generalmente cerca de la zona afectada por el calor. En la figura 4.10 a)-1 se aprecia un grano burdo con una ferrita tipo poligonal e idiomórfica. En la figura 4.10 b) se observa que el refinamiento de grano por efecto del campo electromagnético puede ser debido a la fragmentación dendrítica que origina la agitación electromagnética en el metal fundido, por lo tanto, como resultado se aprecia ferrita acicular. Este tipo de microestructura es deseable ya que provee resistencia a la propagación de las grietas o a la fractura por clivaje. Por otra parte, en la figura 4.10 b)-1 existe una mezcla de diferentes granos y tamaños, están presentes ferrita idiomórfica, ferrita acicular en granos más burdos. En la figura 4.10 c) se aprecia ferrita acicular con ferrita idiomórfica, finalmente en la figura 4.10 c)-1 se logra observar granos más burdos en comparación a las demás micrografías.



**Figura 4.10** Microestructura comparativa de la soldadura con campo y sin campo a) cordón de soldadura parte de inicio CIEM, a)-1 cordón de soldadura parte de inicio SIEM, b) cordón de soldadura parte media CIEM, b)-1 cordón de soldadura parte media SIEM, c) cordón de soldadura parte final CIEM, c)-1 cordón de soldadura parte final SIEM.

### **4.3 Microdureza Vickers**

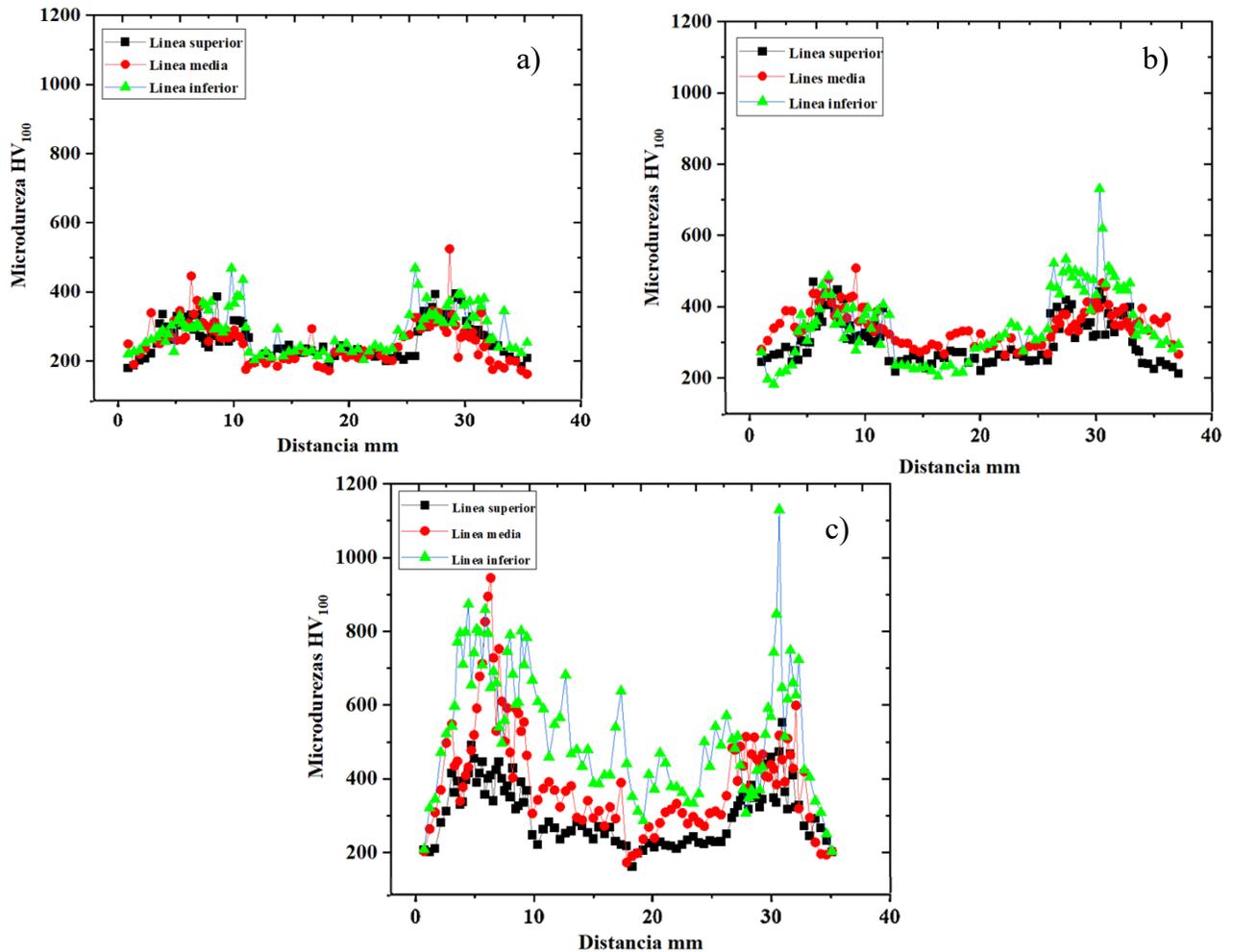
Las gráficas de la figura 4.11 muestran los perfiles de microdureza de la soldadura con el uso de los campos electromagnéticos. Con base en los valores obtenidos se puede observar que el endurecimiento en todas las soldaduras puede asociarse a la formación de martensita de medio contenido de carbono en la zona afectada por el calor ya que este tipo de martensita no tiene una alta dureza. El cordón de soldadura CIEM presenta una mezcla de granos de ferrita Windmastätten primaria intragranular que crecieron a partir de pequeños granos de ferrita idiomórfica, los cuales a su vez están mezclados con granos de ferrita acicular y se caracteriza por no tener altas durezas, esto se corroboró con los perfiles de dureza, también esto indica que dependiendo de la distancia, los valores de microdureza se mantienen aproximadamente constantes en valores de 280 HV aumentando en la zona afectada térmicamente (véase figura 4.11), mientras que en la zona afectada por calor se encuentran valores de entre 210 a 420 HV, estos los valores en la zona afectada disminuyeron en comparación con la soldadura sin la interacción de los campos esto debido a la vibración que ocasiona la interacción de los campos, donde a medida que la solidificación se acerca a la línea de fusión presenta una solidificación de granos columnares dendríticos [47].



**Figura 4.11** Perfiles de microdureza de la unión soldada CIEM, a) parte de inicio, b) parte media, c) parte final.

En cambio, los valores de dureza en la soldadura sin la interacción de campos son considerablemente altas, en la figura 4.12 se aprecia como los valores de dureza en la soldadura van desde 200 a 500 HV y en la zona afectada por calor sobre pasan los valores del metal base y de la soldadura con la interacción de los campos con rangos de 300 a 1050 HV. Este fenómeno puede ser asociado con las fases presentes en la ZAC ya que las posibles transformaciones que ocurren se debe a la presencia de martensita y vainita y en aquellos valores más altos se considera que la indentación penetrará en un carburo es por ello que su valor excede del rango. Se concluye que el campo electromagnético tiene un efecto visible en las microdurezas que existen gran variedad en los resultados obtenidos en las diferentes zonas de las soldaduras sin la interacción de

los campos, donde en comparación con la unión con la interacción disminuyo en gran porcentaje los valores en tanto en la soldadura como en la zona afecta por calor.

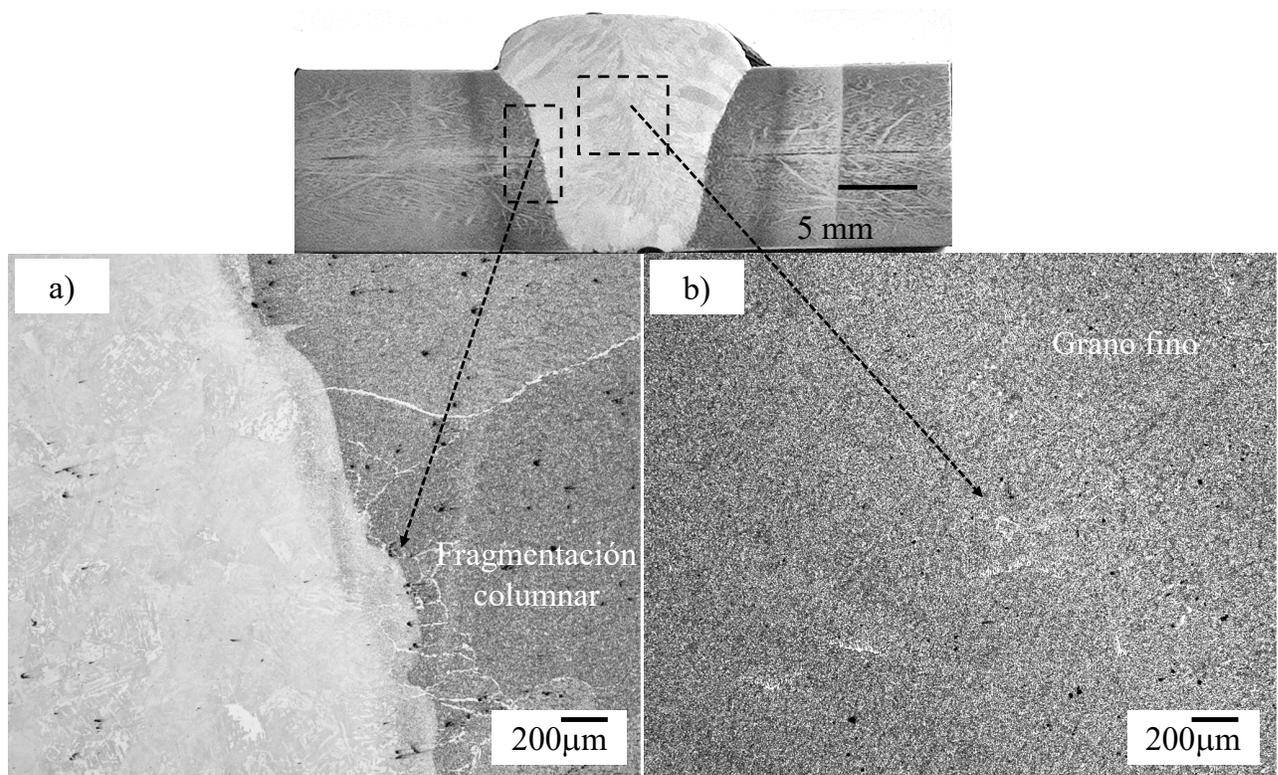


**Figura 4.12** Perfiles de microdureza de la unión soldada SIEM, a) parte de inicio, b) parte media, c) parte final.

#### 4.4 Efecto de los campos electromagnéticos en la soldadura

Con la aplicación de dos campos electromagnéticos con una intensidad de 4.3 mT de manera externa durante el proceso de soldadura SAW, generados por dos bobinas de tres vueltas cada una y una intensidad de corriente de 500 A, se favoreció la fragmentación de granos columnares cercanos a la interfaz como se observa en la figura 4.13 a), en la figura 4.13 b) se puede observar que también se llevó a cabo una fragmentación de granos, dejando una homogeneidad del grano,

esto debido a la vibración que ocasiona la aplicación de los campos electromagnéticos, Watanabe y col. [61], atribuyen este fenómeno a la fuerza de Lorentz, que es la fuerza que recibe una carga que se desplaza dentro de un campo magnético, dependiendo la dirección es como actuará la fuerza en el cordón de soldadura y en la zona afectada por calor, entre más grande es la magnitud del campo más fuerte es dicha fuerza, esto se comprobó en los valores de las microdureza de la soldadura con la interacción del campo en comparación de la soldadura a la cual no se le aplicó la interacción de campos magnéticos dando valores en la ZAC altos, ya que dicho fenómeno de fuerza de Lorentz y fragmentación dendrítica no fueron posibles dando lugar a un proceso de solidificación ordinario.

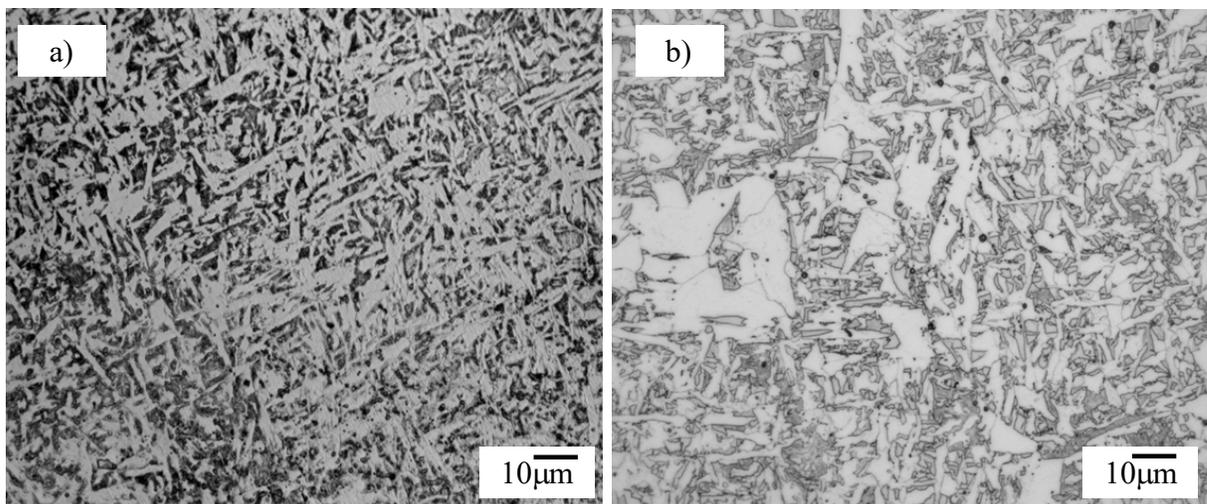


**Figura 4.13** Macrografía de la soldadura con la aplicación de campos electromagnéticos, a) micrografía de la interfaz de la soldadura, b) cordón de soldadura.

El análisis por microscopía óptica indicó que la soldadura con la interacción de campos electromagnéticos presenta una mezcla de granos de ferrita Windmástätten primaria intragranular que crecieron a partir de pequeños granos de ferrita idiomórfica, los cuales a su vez están mezclados con granos de ferrita acicular, presentando una homogeneidad en el tamaño de grano, véase en la figura 4.14 a). Estas microestructuras tienden a reducir el crecimiento de grietas intragranulares e incrementar la resistencia máxima a la tensión. Además, tienden a ser asociadas con la presencia

de elementos aleantes como Mn y Ti en el fundente, estos favorecen la formación de TiC y MnC, en tanto que el SiO<sub>2</sub>, MgO, CaF<sub>2</sub>, NaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> actuando como inoculantes. Estos en conjunto con la vibración resultante de la interacción entre los campos electromagnéticos favorecen la fragmentación dendrítica que da origen a granos finos ferríticos.

En tanto que la microestructura resultante en los granos columnares de la soldadura sin la interacción de los campos electromagnéticos, se presenta una mezcla de granos burdos y granos finos de ferrita idiomórfica que crecieron a partir de pequeñas inclusiones, con pequeños granos de ferrita alotriomórfica presentes en el límite de grano y pequeñas islas de perlita, como se observa en la figura 4.14 b), los cuales redujeron la resistencia máxima a la tensión.



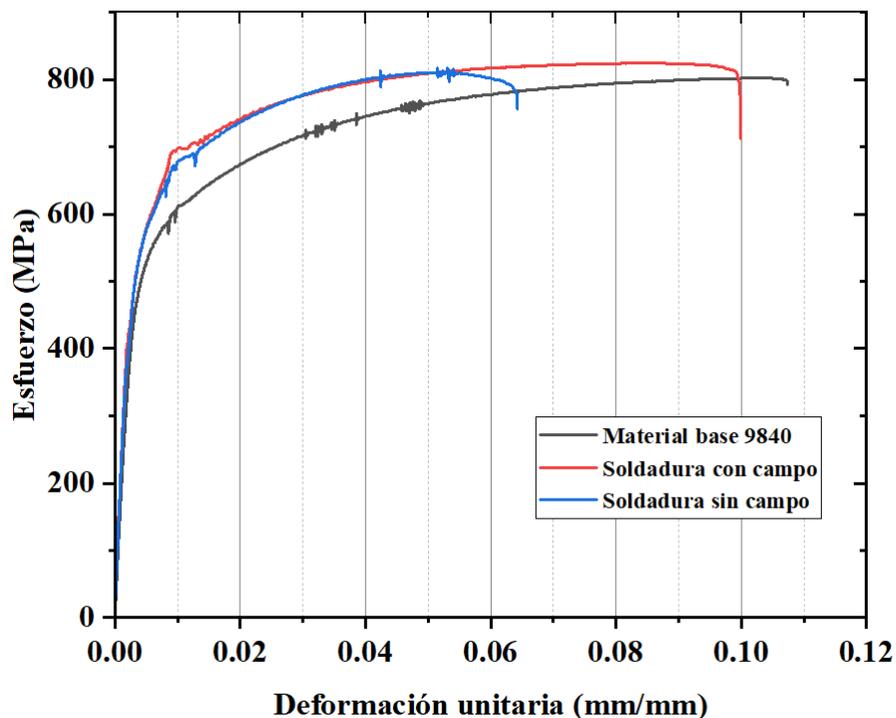
**Figura 4.14** Micrografías de la soldadura a) CIEM y b) SIEM.

Por otra parte, los resultados de los ensayos de tracción uniaxial muestran que la resistencia máxima de tensión de la soldadura con la interacción de los campos electromagnéticos supera los 823 MPa, que bien se atribuye a la homogeneidad en tamaño de grano [62], morfología y distribución de los granos ferríticos, en cambio, esta se redujo al valor de 811 MPa en la soldadura sin la interacción de campos electromagnéticos como se observa en la figura 4.15. Adicionalmente, tanto en la soldadura con campo y sin campo se presentó la falla en la ZAC lo cual indica que las soldaduras cumplen con los criterios de sanidad. Se evaluaron las propiedades mecánicas de las uniones soldadas, encontrando que la energía necesaria para deformar elásticamente la unión soldada con campo es de 1.6 MJ/m<sup>3</sup> con un módulo de Young de 177.63 GPa y este se disminuyó hasta 168.23

GPa con una energía elástica de  $1.5 \text{ MJ/m}^3$  para la unión soldada sin campo, con esfuerzos de cedencia de 561.19 MPa y 507 MPa respectivamente como se observa en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2** Propiedades mecánicas del material base 9840, unión soldada con campo y sin campo.

Propiedades mecánicas	MB 9840	Soldadura con campo	Soldadura sin campo
Esfuerzo máximo [MPa]	800.5	823.52	811
Esfuerzo de cedencia [MPa]	505.20	561.19	507
Esfuerzo de ruptura [MPa]	789.5	756.98	712.69
Energía elástica [ $\text{MJ/m}^3$ ]	2.0	1.6	1.5
Reducción de área	0.5	0.5	0.4
% de elongación	10.7.3	9.69	6.5

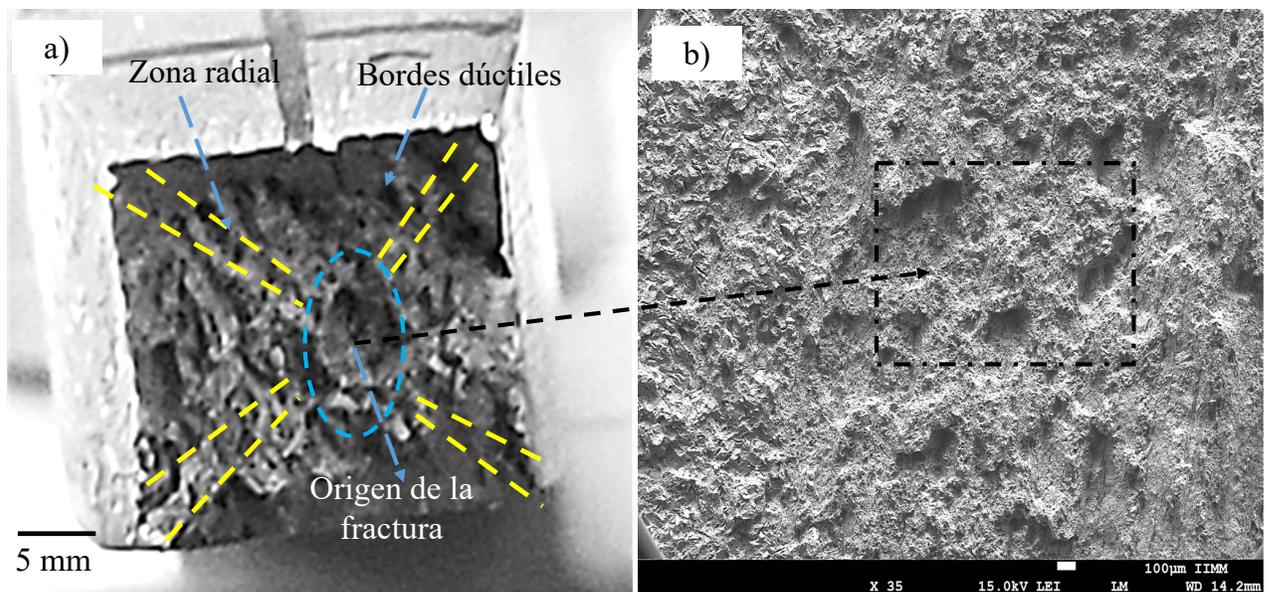


**Figura 4.15** Curvas esfuerzo deformación unitaria del metal base y uniones soldadas.

Tal como se puede observar en la figura 4.16, el origen de la falla se genera debido a la microestructura de granos presentes como última zona en solidificar durante el proceso de soldadura y por los elementos de aleación como el Mo localizadas en las regiones interdendríticas que no están en equilibrio y estas pueden funcionar o actuar como puntos concentradores de

esfuerzos que en presencia de cargas se vuelven zonas preferentes de inicio de falla, por lo cual reducen drásticamente la resistencia a la tracción y la ductilidad [63].

Se observa una zona fibrosa central, origen de la rotura, luego una zona radial, y finalmente los bordes dúctiles a  $45^\circ$  [64]. Se presenta una fractura frágil ocurre normalmente en varias etapas. Primero, antes de que comience la formación del cuello, pequeñas cavidades conocidas como microhuecos se forman en la sección transversal al centro de la probeta debido principalmente a la presencia de partículas ajenas al material; conforme la deformación continua, los microhuecos crecen hasta que se interconecta con otros huecos, es decir que coalescen para formar una grieta de forma elíptica que tiene su eje longitudinal perpendicular a la dirección del esfuerzo. La grieta continúa creciendo en dirección a su eje longitudinal hasta que finalmente la reducción de área transversal generada por la grieta interna concentra esfuerzos, esto provoca la rápida propagación de la grieta alrededor del perímetro del cuello por deformación cortante, dando lugar a la separación final [65].

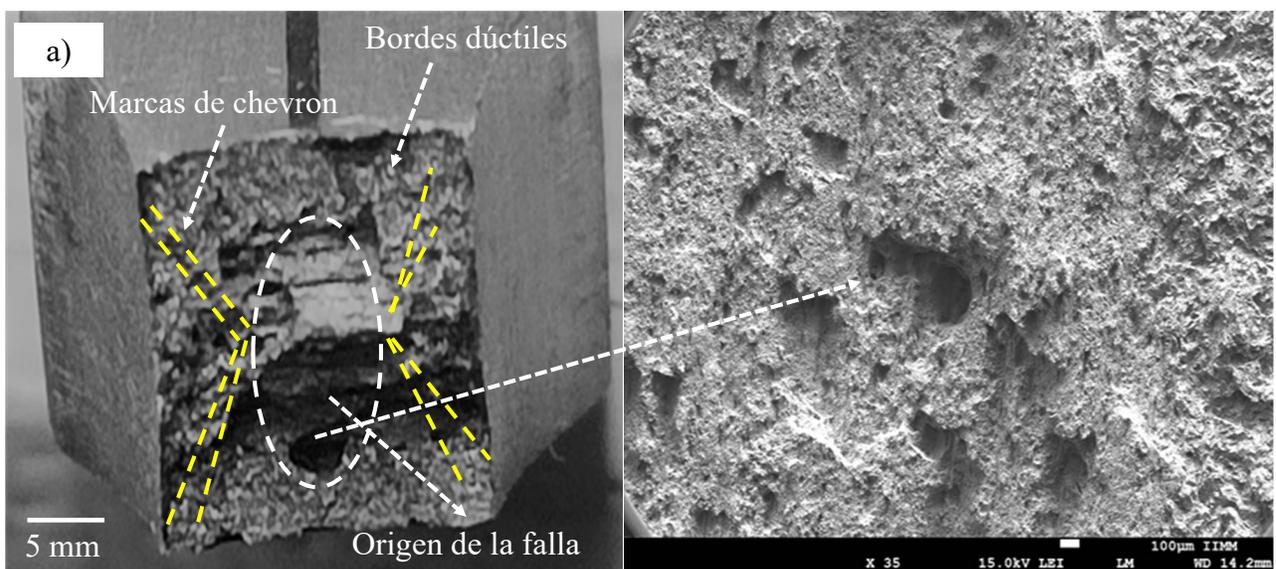


**Figura 4.16** Superficie de fractura por tracción uniaxial de unión con campos.

En la figura 4.17 se muestra la parte superficial de la fractura de la probeta de la unión sin campo, donde se aprecia una fractura frágil, la dirección de propagación de la grieta es regularmente perpendicular al eje de aplicación de carga, dando lugar a una superficie casi plana. El mecanismo de formación de este tipo de fractura puede ser debido a la ruptura directa de enlaces en un plano conocido como clivaje o bien por decohesión. Se considera que el proceso de clivaje (fractura

transgranular) se desarrolla en tres pasos: deformación plástica para producir un apilamiento de dislocaciones, iniciación de la grieta y propagación de la misma. En la descohesión (fractura intergranular), la fractura no ocurre por separación de planos, sino en fronteras de grano o de cualquier otro tipo de intercaras en el material cuya fuerza cohesiva es baja o ha sido debilitada por la acumulación de defectos. Por lo general ocurre en un tiempo significativo, ya que como se mencionó, requiere de la acumulación de defectos fragilicen el material. Las superficies de fractura de materiales que han fallado de manera frágil, pueden verse a simple vista con una apariencia granulosa y brillante [65].

La falla en la zona afectada por calor presentó un rango de durezas que van desde 275 a 525 HV, condición que generó una disminución en la elongación del 25% con respecto al material base, en cambio, la probeta con interacción de los campos electromagnéticos solo presentó una reducción en la elongación de 8% con respecto al material base, debido a que la ZAC presentó un rango de durezas que van desde 200 a 380 Hv.



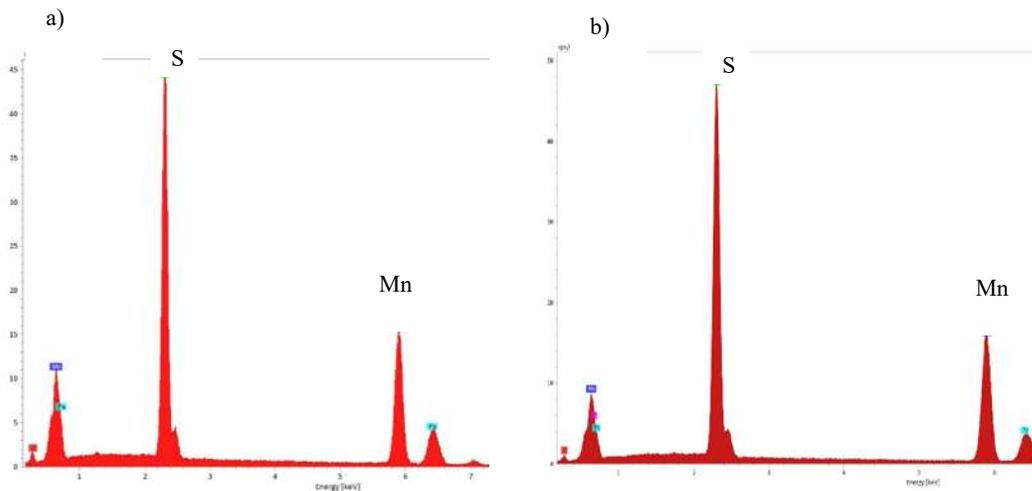
**Figura 4.17 a** Superficie de Fractura por tracción uniaxial de unión sin campos.

El análisis por medio de MEB muestra que las indicaciones lineales son sulfuros de manganeso (MnS), los cuales se forman por los agregados de % e.p. de Mn con la finalidad de inhibir la formación de FeS, y que tienden a tener una morfología característica de forma alargada por su alta ductilidad [66].

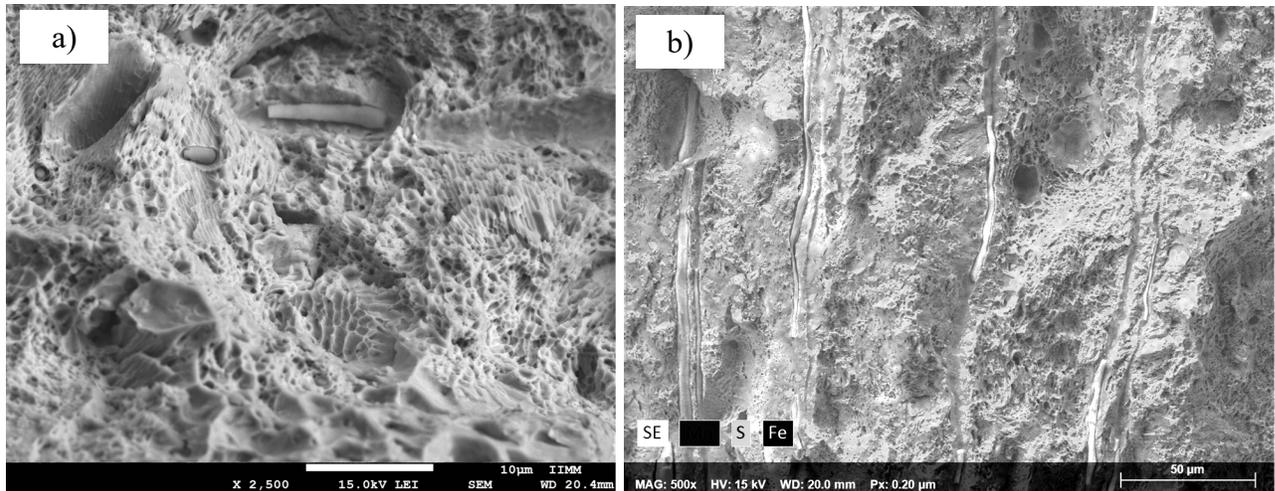
Por medio de mapeo elemental por EDS, figura 4.18, se identificó la presencia de segundas fases de sulfuro de manganeso como se observa en la figura 4.19 a) y b), además el análisis puntual por

EDS arrojó 48 % e.p. de S y 18 % e.p. Mn para la soldadura sin campos y para la soldadura con campos de 44% e.p. de S y 16 % e.p. de Mn. Estas inclusiones actúan como entallas que producen concentraciones de esfuerzos facilitando la iniciación de grietas por fatiga [64].

El sulfuro de manganeso entra dentro de la clasificación de las inclusiones no metálicas donde se encuentran los sulfuros, óxidos y silicatos. El volumen, tamaño, forma y distribución depende de la concentración de azufre, oxígeno, velocidades de solidificación, grado de deformación en caliente y en frío. Estas inclusiones son plásticas y generan zonas débiles. Específicamente el azufre disminuye la ductilidad, tenacidad y soldabilidad del acero, por lo general llega a tener una temperatura de fusión superior a los 2000°C impidiendo la formación de sulfuros de hierro que suelen presentarse por debajo de 1193°C [67].



**Figura 4.18** EDS de % e. p. de MnS de la a) soldadura con campo electromagnético y b) soldadura campo electromagnético.



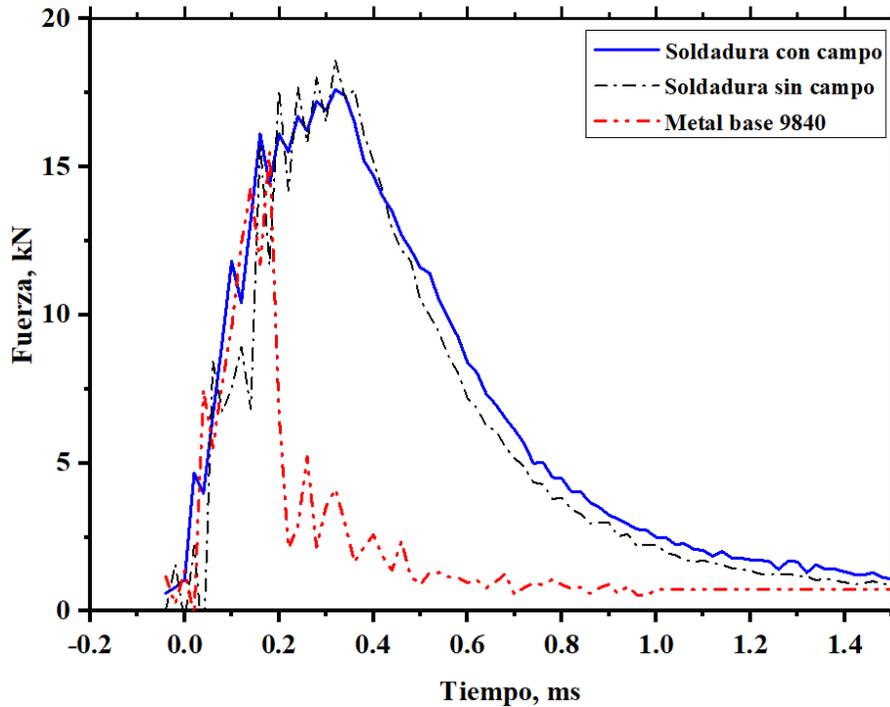
**Figura 4.19** MnS en ZAC de superficie de fractura de probetas ensayadas por tracción uniaxial, a) soldadura con la aplicación del campo electromagnético y b) soldadura sin la aplicación del campo electromagnético.

Los resultados del ensayo de impacto con el uso de un péndulo instrumentado permitieron corroborar la homogeneidad y refinamiento de los granos de ferrita Windmastätten primaria intragranular que crecieron a partir de pequeños granos de ferrita idiomórfica, los cuales a su vez están mezclados con granos de ferrita acicular, como se observa en la figura 4.20. Por otra parte, se observa que el tiempo de fractura para el material base es de 1 ms y este incrementa a 1.4 y 1.5 ms para las soldaduras SIEM y CIEM, con energías de 10.15 y 10.80 J respectivamente, donde  $F_{gy}/kN$  es la fuerza necesaria,  $F_{in}/kN$  fuerza requerida para el inicio de la grieta,  $F_m/kN$  fuerza máxima,  $F_{IU}/kN$  fuerza al inicio del crecimiento inestable de la grieta y  $F_a/kN$  fuerza final del crecimiento inestable de grietas como se observa en la tabla 4.3 [68].

**Tabla 4.3** Resultados obtenidos de los ensayos de impacto del material base, soldadura SIEM y CIEM.

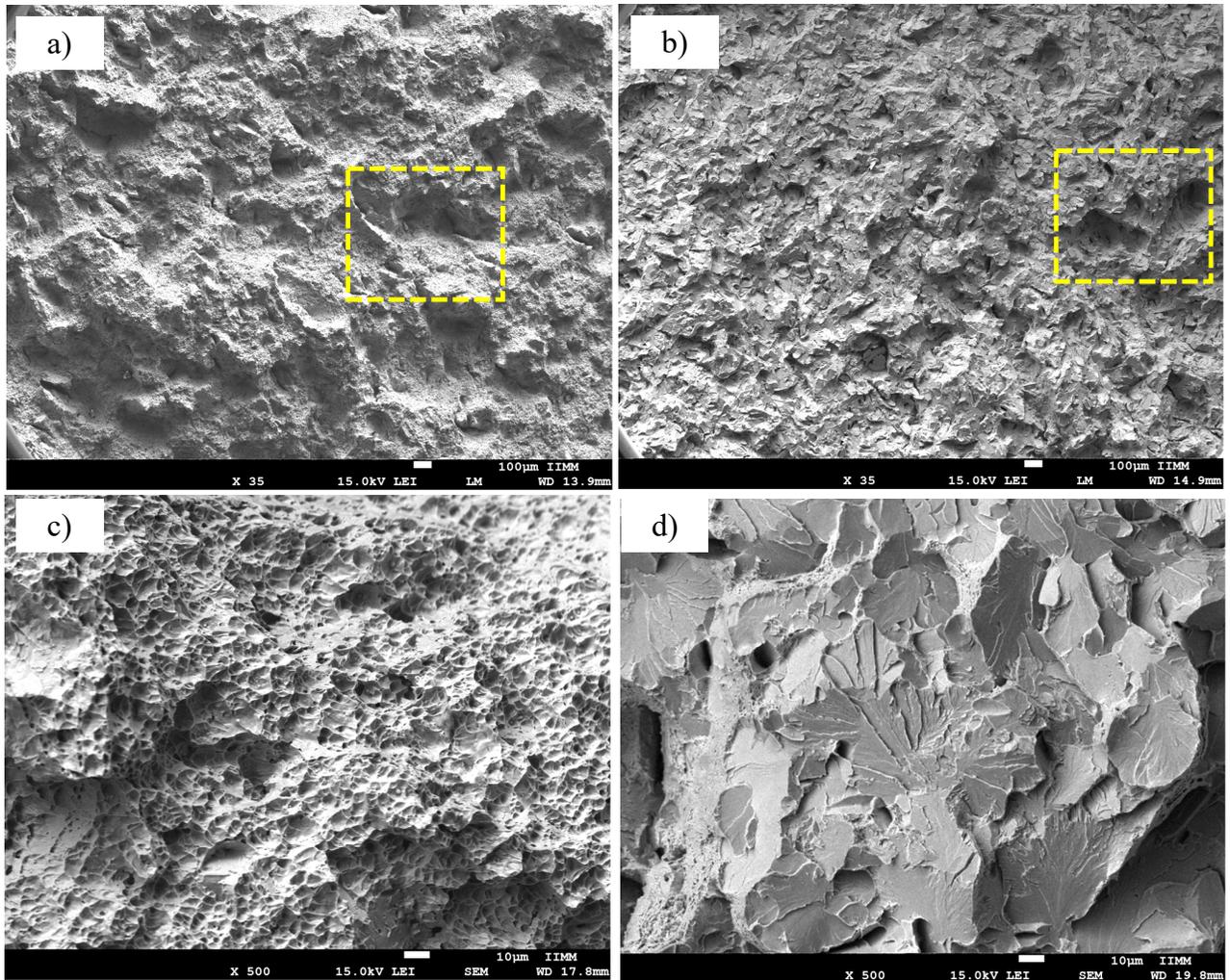
Probeta	$F_{gy}/kN$	$F_{in}/kN$	$F_m/kN$	$F_{IU}/kN$	$F_a/kN$	Tiempo de fractura/ms	Energía total J
MB	14.2	15.4	0	0	0	1	10.11
Soldadura CIE	16.1	16.7	17.1	17.6	4.9	1.5	10.15

Soldadura	15.28	17.4	17.8	18.5	4.5	1.4	10.80
SIE							



**Figura 4.20** Curva fuerza-tiempo de ensayo de impacto en material base, con entalla en soldadura con campo y sin campo.

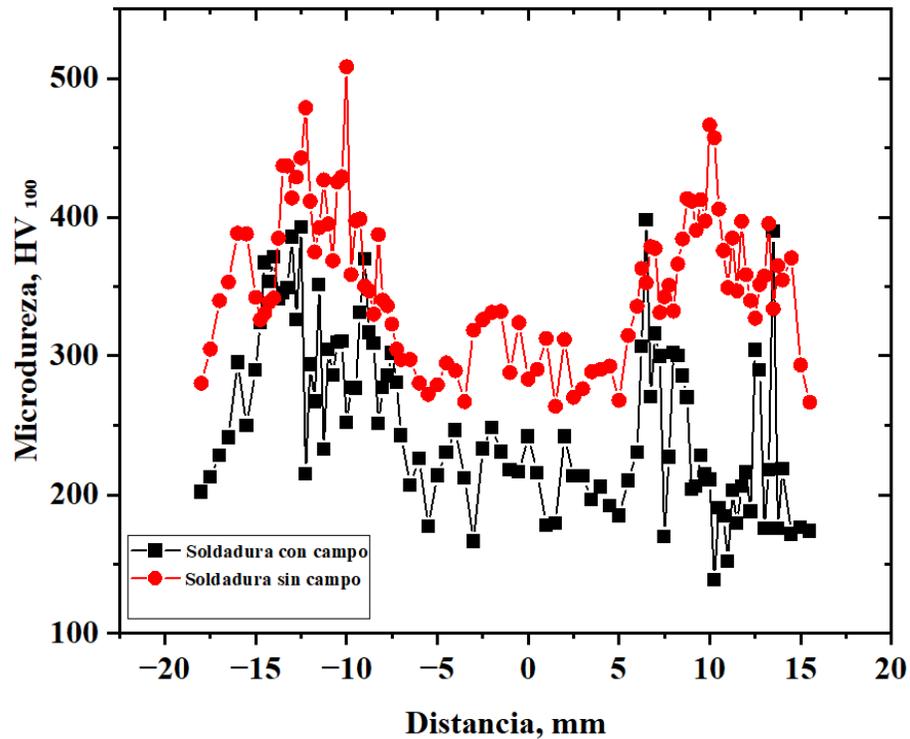
El análisis fractográfico de las probetas ensayadas por impacto muestra que en su mayoría su modo de fractura es dúctil para las soldaduras con interacción de campos electromagnéticos ya que presentan una morfología fibrosa con segundas fases en su interior (ver figura 4.21 a y c) , a diferencia de la soldadura sin interacción electromagnética que presenta una mezcla frágil en su mayoría, donde se observa morfologías por clivaje y cavidades copa como con morfologías esféricas en su interior, así como marcas de río y playa, como se observa en la figura 4.21 b) y d).



**Figura 4.21** Fractografía de probetas ensayadas por medio de ensayo de impacto, a) soldadura con la aplicación del campo electromagnético, b) soldadura sin la aplicación del campo electromagnético, c) ampliificación de CIEM, d) ampliificación de SIEM.

En la figura 4.22 se realizó un comparativo con respecto de los perfiles de microdureza, con lo cual se comprobó que la interacción de los campos electromagnéticos en la zona afectada por calor tiende a disminuir los gradientes de dureza. En la ZAC de la probeta soldada con la interacción de campos electromagnéticos se encuentra la presencia de granos bainíticos ya que esta puede ser inducida a nuclear intragranularmente debido a las inclusiones, en lugar de en el límite de grano austenítico, mediante la inoculación, en cambio en la ZAC de la probeta sin la interacción de los campos electromagnéticos se encuentra presente martensita lenticular la cual es de medio contenido de carbono y pequeños porcentajes de granos bainíticos, donde también se observa que en el cordón

de soldadura con interacción de los campos se mantiene constante en un rango de 225-250 HV en cambio en la soldadura sin la interacción de los campos es superior a este valor.



**Figura 4.22** Perfil de durezas de las uniones soldadas con campo y sin campo.

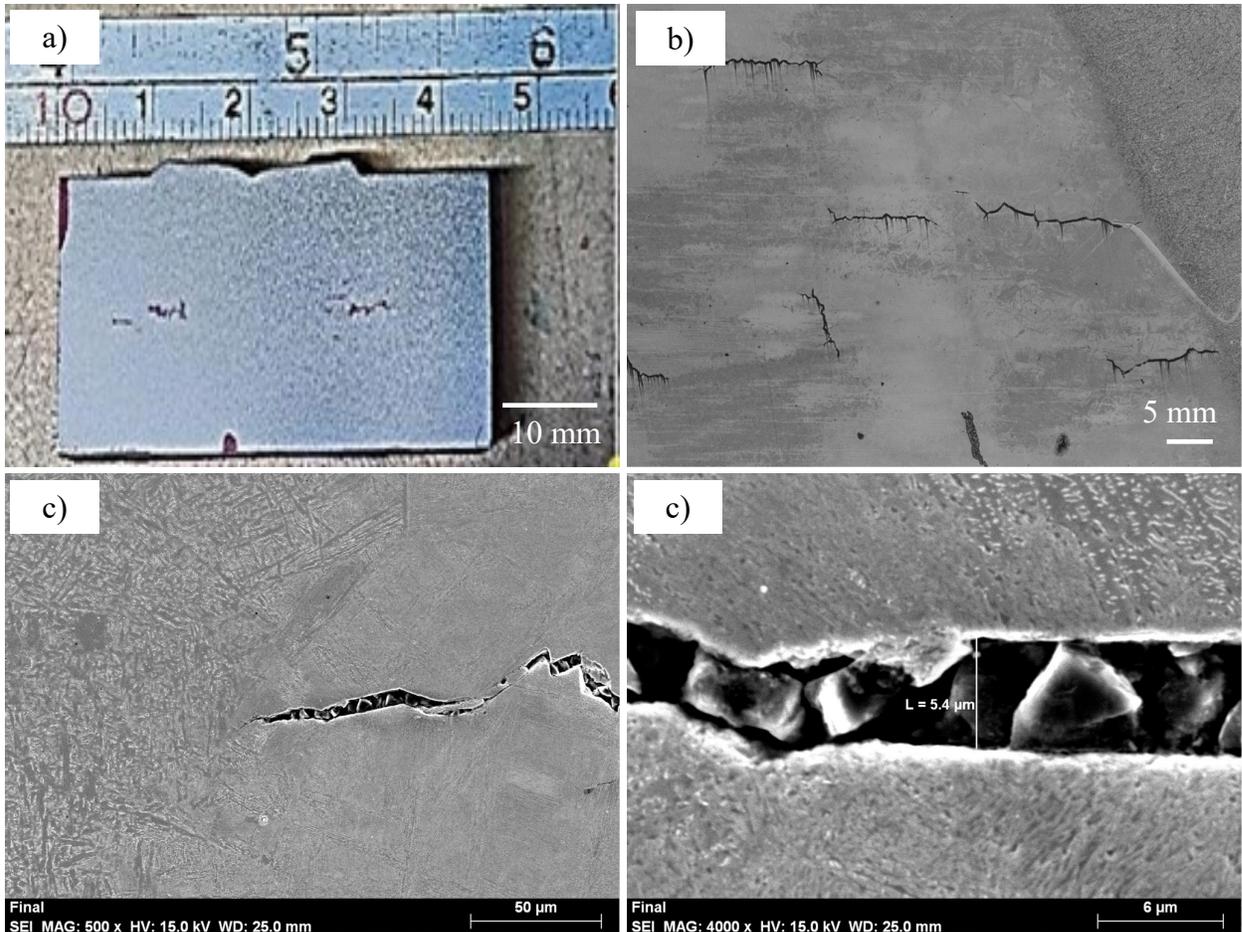
#### 4.5 Comportamiento de la soldadura sin campo magnético

En base a la literatura y código de AWS para la realización de estas uniones, sugieren llevar a cabo tratamientos térmicos de pre y pos calentamiento para evitar defectos o discontinuidades en la soldadura con este tipo de material.

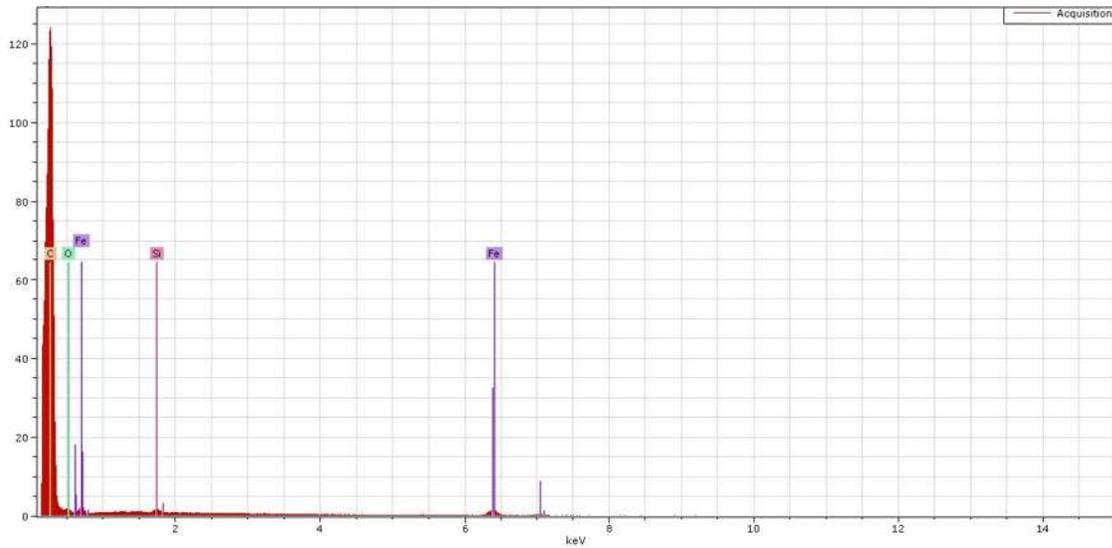
Al realizar la siguiente unión sin la interacción de los campos y sin un tratamiento térmico, el resultado en comparación con la unión soldada con interacción, existen diferencias notables que van desde el realizar los cortes de placa soldada de ambas. Por otra parte, el material base presentó indicaciones volumétricas que afectan, en la unión sin la interacción de los campos presentan varias indicaciones como lo son; poros, grietas, faltas de fusión, atrapamiento de escoria, socavaciones. Las grietas presentes en esta unión se aprecian en la zona afectada por el calor debido a la presencia de microestructuras duras, estas se relacionan con los altos porcentajes de concentración de esfuerzos y altos valores de dureza. En esa zona no existe una fase que evite la propagación de

grietas. Esto se ve afectado por el tipo de enfriamiento que ocurrió en la placa después de realizar el proceso de soldadura

La figura 4.23 a) y b) muestra la presencia de grietas en la ZAC y se realizó análisis por la técnica de microscopía electrónica de barrido (figura 4.23 b y d) seguido de un EDS (figura 4.24), para determinar la presencia de segundas fases fragilizadoras que puedan ocasionar el inicio de grietas. El análisis por EDS muestra que las partículas presentes en las grietas son ricas en Fe y Si.



**Figura 4.23** Grietas en las uniones sin campo.



**Figura 4.24** EDS de la grieta en la ZAC de la unión sin aplicación de campos electromagnéticos.

En la zona afectada por calor de la unión sin los campos se presentó porosidad y grietas (ver figuras 4.25 a, b, c y d), partiendo de la interfaz de la soldadura al largo de la zona afectada por calor, esto se debe al contenido en carbono o aleación que aumenta la pérdida de ductilidad en la zona afectada y a la velocidad que se enfrió la soldadura.

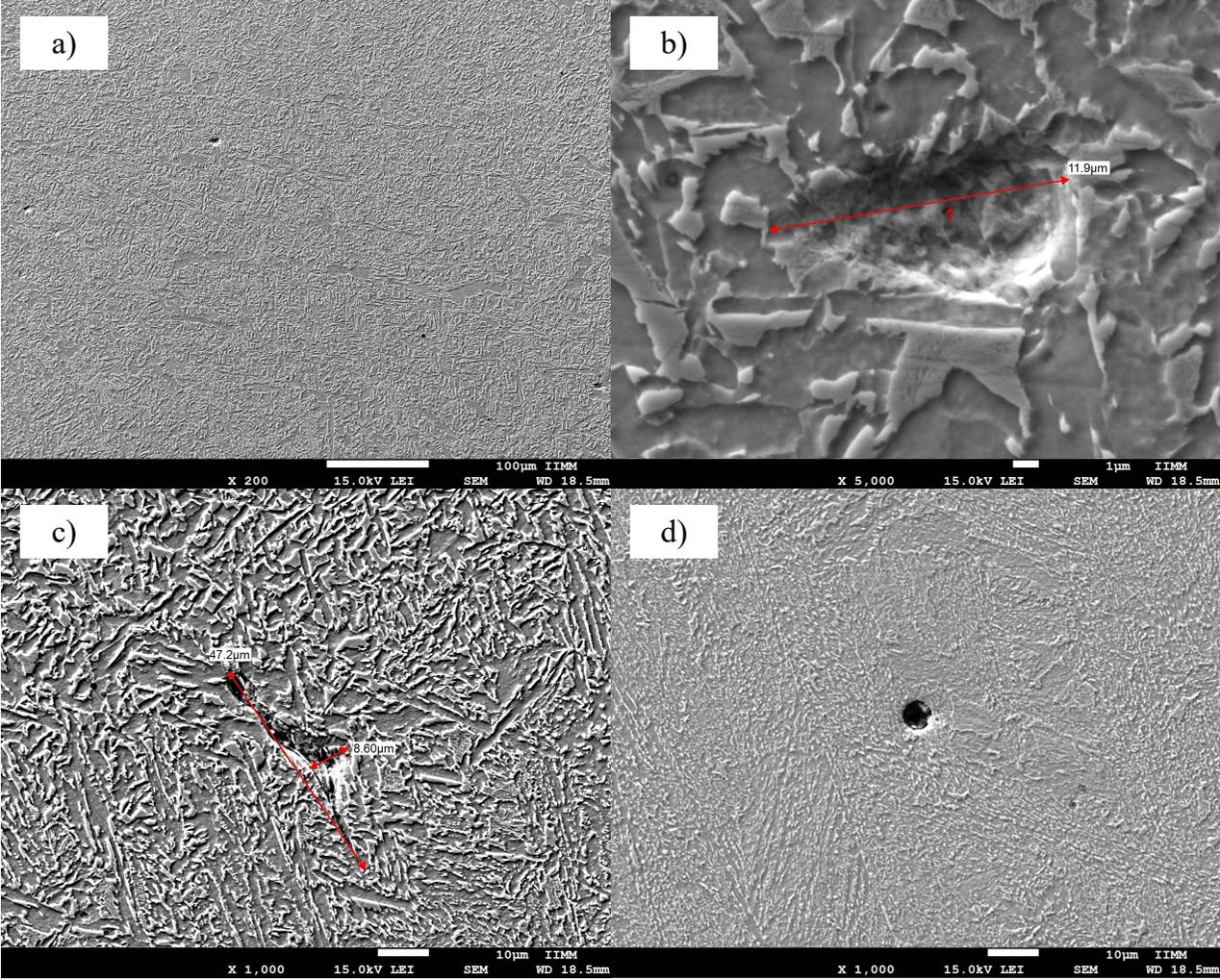


Figura 4.25 Defectos en la soldadura sin campos.

## Conclusiones

En este proyecto de investigación se estudió el mejoramiento del grado de soldabilidad del acero 9840 unido por un proceso SAW con y sin la interacción de un campo electromagnético externo y en base a los resultados obtenidos de manera experimental por medio de las técnicas microestructurales y de propiedades mecánicas, se tienen las siguientes conclusiones.

- ❖ Se establecieron adecuadamente los parámetros de operación del proceso de soldadura SAW para obtener soldaduras de un solo paso, con y sin la interacción de un campo electromagnético, obteniendo la soldadura con interacción del campo libre de defectos y con buena penetración cumpliendo con los requerimientos que califican una soldadura con respecto a AWS.
- ❖ En la soldadura con la interacción electromagnética se evitó la formación de fases martensíticas, esto se debe al empleo del proceso de soldadura SAW ya que con el uso del fundente se tiene una eficiencia térmica del 95% llevando a cabo una velocidad de enfriamiento controlada.
- ❖ La aplicación del campo magnético fragmenta el crecimiento columnar dendrítico en la zona fundida durante el proceso de soldadura, dando pie a la nucleación y crecimiento de nuevas fases ricas en ferrita.
- ❖ La influencia del campo fue notoria ya que se redujeron los gradientes de microdureza en con la implementación del uso externo de este con una intensidad de 4.3 mT, esto se hace presente en el cordón de soldadura y zona afectada por el calor respecto a la soldadura que se llevó a cabo sin el uso del campo electromagnético.
- ❖ Con la aplicación del campo electromagnético durante el proceso de soldadura se pudo observar una dilución más homogénea en zona de fusión, debido a la agitación electromagnética que ocasiona en la pileta líquida, promoviendo la nucleación heterogénea, causando refinamiento del tamaño de grano, esto también se les asocia a los elementos inoculantes que se encuentran presentes en el fundente.
- ❖ Se corroboró el mejoramiento de la soldabilidad del acero 9840 mediante ensayos mecánicos como lo son; microdureza, ensayo de tracción uniaxial y ensayo de impacto, esto es con respecto a la soldadura sin la aplicación del campo electromagnético, ya que con el uso del campo electromagnético se tiene la certeza que no es necesario un tratamiento térmico antes o después, ya que se evitó la formación de defectos superficiales y

volumétricos que prolongan la vida útil del material o componente a un futuro a realizar. Cabe resaltar que el proceso de soldadura por arco sumergido es realmente eficiente ya que el fundente proporciona esa protección para que se lleve a cabo un enfriamiento lento de acuerdo a la temperatura ambiente en la que se realice dicha unión.

## Referencias bibliográficas

- [1] Niebles. E. *Metodología para el estudio de la soldabilidad en uniones soldadas*, **Memorias** Universidad Autónoma del Caribe. 6-12. 2013.
- [2] Benitez. J A. *Estudio de la soldabilidad en piezas de gran tamaño de acero 9840 utilizando soldadura por arco eléctrico (SMAW)*. **Tesis** Universidad Autónoma de México, CDMX. 2019.
- [3] Houldcroft P. T. *Submerged arc welding*. **Woodhead Publishing Limited**. 1990.
- [4] Cheng. D K. *Fundamentos de Electromagnetismo para Ingeniería, USA: Addison-Wesley Publishing Company*. 1993.
- [5] Curiel. F., García. R., López. V., García. M. y Lemus. J. “*Transmission Electron Microscopy in the Heat Affected Zone of an AISI 304 Austenitic Stainless Steel Welded with the Application of a Magnetic Field of Low Intensity*”, *Materials Transactions*, Vol. 54, No. 1 (2013) pp. 122 to 125.
- [6] Pichardo B.A., López V., García. R., Salazar. M. “*MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA JUNTA SOLDADA DE PLACAS BICAPA API X60/316L*” ISSN 2594-018X Año 4, Núm.2, Vol.VII, Julio-Diciembre 2019, Edición Especial, pp. 135-145.
- [7] Natividad. C. “*Evaluación del agrietamiento inducido por corrosión en cordones de soldadura de acero API x-65*” Tesis para obtener el grado de Doctor en ingeniería, **Departamento de química-metalurgia, UNAM**, junio 2013 México.
- [8] *Welding handbook, Welding, Materials and applications part 1, edition 9, vol. 4, Miami 2011.*
- [9] Shackelford J F., *Introducción a la ciencia de los materiales para ingenieros, university of california* 6th edición editorial perason educación, 393-397. S.A. 2005, ISBN 84-205-4455.
- [10] Harvey P D, *Engineering properties of steel, American Society for metals*. Vol 2 231-233. ISBN 0-87170-144-8 1982.
- [11] Smith, W.F. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* 3ª edición, **McGraw-Hill**, Madrid 1998.
- [12] De Muñoz Arroyo R., *Metalurgia de la Soldadura. Documento de apuntes de metalurgia de la soldadura*. **Departamento de soldadura, COMIMSA, Saltillo, Coahuila**, 2019.

- [13] Larry. J. *Soldadura. Principios y aplicaciones. Welding Journal* Vol. 3. Editorial Paraninfo, 2009.
- [14] Dong. C.F. X.G. Li, Liu. Z.Y. Y.R. *Hydrogen-induced cracking and healing behaviour of X70 steel. Beijing. 2009.*
- [15] Larry. J. *Soldadura. Principios y aplicaciones. Vol. 3.* Editorial Paraninfo, 2009.
- [16] Addach, Berçot P., Rezrazi M. *Study of the electrochemical permeation of hydrogen in iron. Journal France.* 263-267. 2008.
- [17] Dong. C.F. Z.Y. Liu, X.G. Li, Chen. Y.F. *Effects of hydrogen-charging on the susceptibility of X100 pipeline steel to hydrogen-induced cracking.* 2009.
- [18] Xu, L., et al.,. *Fatigue strength improvement of stainless Steel using Weld toes dressing with low transformation temperatura welding wire.* Science and Technology of Welding and Joining, 2014. **19(8)**: p. 664-672.
- [19] WELDING HANDBOOK *Metallography and microstructures.* Vol. 4th, 7th Ed. AWS: p. 221-241.
- [20] SUBMERGED - ARC WELDING The Welding Institute, **Vol. 8th.** 2000.
- [21] Costa. P.S., Reyes. S., Saldaña. R., González. D., Delgado. E. *Optimización de los parámetros de soldadura por arco sumergido en acero AHSL; una aplicación para manufactura de tuberías de conducción de hidrocarburos. Soldagem & inspecao,* 2015; **20(4)**: 456-466.
- [22] Rivera. J., *Análisis tecno-económico de consumibles en los procesos de soldadura gmaw, saw para la fabricación de estructura metálicas de la empresa sedemi, “Trabajo para titulación* previa a la obtención de título de ingeniero mecánico. Escuela politécnica nacional, Quito, septiembre 2020.
- [23] Ankush C., Manoj K., Deepak. R U. *Experimental investigation and optimization of weld bead characteristics during submerged arc welding of AISI 1023 steel, Defence technology* **15**, 72-82.2019.
- [24] Vedia L. A. Svoboda. H. G. 2004. *Introducción a la Metalurgia de la soldadura.*
- [25] Cary. H.B., *Manual de soldadura moderna, tomo 2, editorial practice hall,* México, Df. 1992.
- [26] An American National Standard Approved by the American National Standards Institute, *AWS D1.1/D1.1M:2015 23rd Edition.* July 28, 2015.

- [27] De OSORIO H., *"TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA"*, **APUNTES PARA LA ASIGNATURA TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ECATEPEC DIRECCIÓN ACADÉMICA DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELEMÁTICA ACADEMIA DE COMUNICACIONES**, Ecatepec de Morelos, Estado de México, febrero del 2007.
- [28] Braun E., *Electromagnetismo: De la ciencia a la tecnología*, 7-225 **FONDO DE CULTURA ECONÓMICA (FCE)**, 3era edición, México 2003
- [29] Rojas H.B, E. Restrepo E., *FÍSICA Principios de Electricidad y Magnetismo*, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MANIZALES FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES NACIONAL Manizales, Colombia Julio de 2012. **I.S.B.N 978-958-761-283-7**.
- [30] Fraile J. *Electromagnetismo y circuitos eléctricos*, pp.848 editorial S.A MCGRAWHILL/interamericana de España, 2005, **ISBN:9788448198435**.
- [31] De Álvarez MC., *Fundamentos básicos de electricidad y magnetismo*, **texto Universitario** Universidad Autónoma San Francisco, 1-87, cercado Arequipa 2010.
- [32] Askeland D R., *Ciencia e ingeniería de los materiales*, **University of Missouri-rolla**, emeritus, Thomson 4ta edición, 850-1039.
- [33] Silvester S., *Propiedades magnéticas de la materia*, **Documento nº 15** Ministerio de educación Universidad Tecnológica Nacional, Facultad regional rosario, departamento de materias básicas.
- [34] Demiskii A., Dyatlov V.I., *Magnetic control during gas shielded arc welding with a consumable electrode*. **Welding Journal**, **4**: p. 67-68. 1963.
- [35] Moffatt H., *Electromagnetic stirring. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, **3(5)**: p. 1336-1343, 1991.
- [36] Sindo. K., *Weldy metallurgy*, 2nd ed. A wiley- interscience publication, pp.97-190, **ISBN-0471-43491-4**.
- [37] Fisher, G. J., and Maciag, R. J., *in Handbook of Stainless Steels*, Eds. D. Peckner and I. M. Bernstein, **McGraw-Hill**, New York, 1977, p. 1.
- [38] Villafuerte J. C., Kerr H.W., *Electromagnetic stirring and grain refinement in stainless steel GTA welds*. **Welding Journal**, p. 1-13. 1990.

- [39] García R., López. V.H, Lazaro. Y. Aguilera. J. *Refinamiento de grano en la soldadura por electrogas de aceros microaleados mediante la inducción de un campo magnético centrado*, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, **Soldagem insp.** Sao Paulo, Vol. 12 pp. 300-304, 2007.
- [40] S.A. D, Vitek J.M. *Correlation between solidification and weld microstructures.* International Materials Reviews, **34(5)** 213-245,1989.
- [41] Yoo C.D., Richardson W. R., *An experimental study on sensitivity and signal characteristics of weld pool oscillation.* Transactions of the Japan **Welding Society** **43(3)**, 54- 62. 24, 1993.
- [42] Kang Y.H., Na S.J., *A Study on the modeling of magnetic arc deflection and dynamic analysis of arc sensor.* **Welding Journal**, 8-13, 2002.
- [43] Lim Y.C., Yu X., Cho J.H., Sosa J., Farson D.F., Babu S.S., McCracken S., Flesner B. *Effect of magnetic stirring on grain structure refinement Part 2 – Nickel alloy weld overlays.* Science and Technology of Welding and Joining, **15(5)** 400-406, 2010.
- [44] Curiel. F.F, García. R., López. V.H. González-Sánchez. J. *Enhancing Corrosion Resistance of 304 Stainless Steel GMA Welds with Electromagnetic Interaction*, Materials transactions, **Vol. 52, no.8**, pp. 1701-1704, 2011.
- [45] Hernández S L., López V H, García R., García M A, Ruiz A, Verduzco J A. *Microestructura y propiedades mecánicas de la soldadura 2205/316L con la aplicación de campo electromagnético.* 13(1) Congreso estatal de ciencia y tecnología, 7mo.
- [46] García. M., López. V.H., García. R. *Efecto de la interacción electromagnética de baja intensidad en la microestructura y propiedades mecánicas de soldaduras de acero inoxidable dúplex.*, INGENIUS, revista de Ciencia y Tecnología, **DOI: 10.17163.ings.n12.2014.05.**
- [47] Mendoza. C. *Caracterización mecánica y resistencia a la corrosión de la ZAC de una unión de acero inoxidable 304 soldada bajo una interacción electromagnética*, **Tesis para obtener el grado de Maestro en metalurgia y ciencias de los materiales**, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de investigaciones metalúrgicas, Morelia, Michoacán, agosto 2012.
- [48] Sugiyama. T., M.T., Sassa. K., Asal. S., *The control of cristal orientation in Non-magnetic metals by imposition of a high magnetic fiel.* **ISIJ international**, **43**: pp. 855, 2003.
- [49] Nippes, E. F., Savage, W. F., and Paez, J. M., *Evaluation of microstructure and mechanical properties of dissimilar welds carbono Steel.* **Weld. J.**, **38**: 475s, 1959.

- [50] D'Andrea, M. M. Jr., and Adams, C. M. Jr., *Mechanical and Metallurgical studies in carbono Steel*. **Weld. J.**, **42**: 503s, 1963.
- [51] Sudarsanam S. B. *The mechanism of acicular ferrite in Weld deposits, Current Opinion in Solid State and Materials*. **Science 8** (2004) 267–278
- [52] Code AWS *A5.18/A5.18M:2005*
- [53] Composición química desde la pagina del proveedor del consumible [en línea] URL: [https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable\\_MIGGMAWwiresL-S-LS6/L-S6\\_ES-MX.pdf](https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWwiresL-S-LS6/L-S6_ES-MX.pdf).
- [54] Propiedades mecánicas del metal de aporte desde el catalogo del proveedor [ en línea] URL: [https://www.bonnet.es/catalogo/ficha\\_tecnica/varilla%20solda%20hierro%20ER%2070S-6.pdf](https://www.bonnet.es/catalogo/ficha_tecnica/varilla%20solda%20hierro%20ER%2070S-6.pdf)
- [55] *Fundente de arco sumergido*, Lincolnweld 860, **fundente serie 800**. [en línea].
- [56] Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials, Designation: E92 – 17.
- [57] Standard Test *Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, Designation: **E8/E8M – 09**.
- [58] Standard Test *Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*, esignation: **E23 – 12c**.
- [59] ASTM E112 *Medición de tamaño de grano*. **141980431 SP**
- [60] Ortega Y. *Prueba de impacto: ensayo Charpy* **Departamento de Física de Materiales**, Facultad de Ciencias Físicas Universidad Complutense de Madrid, 28040, Madrid, Espana. Recibido el 11 de mayo de 2005; aceptado el 27 de junio de 2005.
- [61] T. Watanabe, S.T., X. Zhao, L. Zuo, C. Esling, *A new challenge: Grain Boundary Enginnering for advanced materials by magnetic field aplication, materials science and engineeriing* (2006). **41**: p. 7747.
- [62] Dieter G. *Metalurgia mecánica*, jefe del **departamento de tecnología y metalúrgica** Drexel institute of technology, filadelfia.
- [63] Ipohorski M., Acuña R.J. *Fractografía, “Aplicaciones al análisis de falla”*, Comisión de energía atómica dependiente de la presencia de la nación. **B22.30 ISSN 0325-1403**. Republica Argentina, Buenos aires, 1988.

- [64] Ocampo C. “*Correlación entre la morfología de la superficie de fractura y las propiedades mecánicas en tensión de diferentes materiales metálicos*” **Tesis para obtener el grado de maestro en ingeniería metalúrgica**, ESIQUE IPN. Junio 2012.
- [65] J. Schijve, *Fatigue of structures and materials*, **Fatigue of welded joints**. 2009: p. 535-557.
- [66] F.C. Campbell, *Fatigue of weldments, in fatigue and fracture (understanding the basics)*. 2012, **ASM International**. P. 401-425.
- [67] M.A. Neri, C. Carreño y A. Martínez-Villafañe. *Análisis de falla de una cabeza de bomba de combustible agrietada internamente*. **Departamento de Física de Materiales**, Centro de Investigación en Materiales Avanzados S. C., Chihuahua, México. E-mail: [miguel.neri@cimav.edu.mx](mailto:miguel.neri@cimav.edu.mx).
- [68] R. R. Ambriz, D. Jaramillo, C. García, F. F. Curiel, *Fracture energy evaluation on 7075-T651 aluminum alloy welds determined by instrumented impact pendulum*, **Science direct, Trans. Nonferrous Met. Soc. China** 26(2016) 974–983.