



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN  
NICOLAS DE HIDALGO



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN METALURGIA Y MATERIALES

PROGRAMA DE MAESTRIA EN  
METALURGIA Y CIENCIAS DE LOS MATERIALES

EFECTO DEL CAMPO MAGNÉTICO PERPENDICULAR AL ARCO ELÉCTRICO EN LA  
SOLDADURA Y ZONA AFECTADA TERMICAMENTE DEL ACERO INOXIDABLE  
AUSTENÍTICO 304L PARA (6.3 mm)

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

Ing. Noé Pineda Sánchez

Director de Tesis:  
Dr. Rafael García Hernández

Morelia Michoacán, febrero de 2015.

## **Dedicatoria**

A mis padres, María Sánchez y Salvador Pineda que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis metas, por su paciencia y comprensión para motivarme y darme la mano siempre que tuve la necesidad de ella, con todo mi cariño esta tesis se las dedico a ustedes. Sin olvidarme de mi hermano Gilberto Pineda que también siempre ha estado presente brindándome su apoyo.

## **Agradecimientos**

En especial a mi asesor de tesis el Dr. Rafael García Hernández, que me brindo la confianza y el apoyo para que estudiara un posgrado y que esta tesis fuera posible.

Al Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, a todos aquellos que fueron participes y aportaron para que esta tesis fuera posible.

Finalmente a CONACYT por el apoyo económico de su programa de becas.

## Índice

Resumen.....	x
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 Introducción.....	12
1.2 Justificación.....	13
1.3 Objetivos.....	14
1.3.1 Objetivo general.....	14
1.3.2 Objetivos particulares.....	14
1.4 Hipótesis.....	15
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.....	16
2.1 Antecedentes.....	16
2.2 Problemática en la soldadura de los aceros inoxidable austeníticos.....	17
2.2.1 Principales carburos.....	18
2.3 Soluciones propuestas en la actualidad a la problemática de la corrosión intergranular de las uniones de los aceros inoxidable austeníticos.....	22
2.4 Principios de electromagnetismo.....	25
2.4.1 Movimiento de partículas con carga en un campo magnético.....	26
2.4.2 El magnetón de Bohr.....	29
2.4.3 Magnetización, permeabilidad y campo magnético.....	30
2.4.4 Materiales magnéticos.....	31
2.4.5 Fenómeno de Magnetostricción.....	32
2.5 Principios de operación del proceso de soldadura (GMAW).....	33
2.6 Influencia de los campos magnéticos en el arco eléctrico.....	35
2.6.1 Soplo magnético.....	36
2.7 Aplicación de campos magnéticos en el proceso de soldadura.....	38
CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	44

3.1 Desarrollo experimental. ....	44
3.2 Equipos. ....	45
3.3 Materiales. ....	45
3.4 Metodología. ....	47
3.5 Caracterización mecánica y metalúrgica del acero inoxidable austenítico comercial 304L. ....	51
3.6 Preparación de las uniones. ....	51
3.7 Procedimiento para la unión soldada. ....	52
3.8 Caracterización metalográfica y mecánica de las uniones soldadas. ....	53
3.9 Caracterización óptica. ....	54
3.10 Caracterización por microscopía óptica y de barrido. ....	55
3.11 Ensayo mecánico de tensión. ....	56
3.12 Ensayo de microdureza. ....	57
3.13 Ensayo de impacto. ....	57
3.14 Caracterización electroquímica de la ZAT. ....	58
<b>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS. ....</b>	<b>60</b>
4.1 Micrografías del material base. ....	60
4.2 Macrografías de los perfiles de soldadura. ....	61
4.3 Micrografías de las uniones. ....	64
4.4 Ensayo de tensión. ....	74
4.5 Perfiles de microdureza. ....	77
4.6 Análisis de fracturas por MEB. ....	80
4.7 Ensayo de impacto. ....	86
4.8 Caracterización electroquímica del material base y la ZAT de las uniones soldadas. ....	87
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES. ....</b>	<b>95</b>

TRABAJO FUTURO.....	97
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98

## Índice de Figuras.

<b>Figura 2.1</b> a) Zonas preferenciales en la precipitación de los carburos de Cr y b) Zonas empobrecidas de Cr, por la precipitación de los carburos [7].	20
<b>Figura 2.2</b> Tasas de precipitación para $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ como una función del contenido de carbono [7].	21
<b>Figura 2.3</b> Variación de la localización de la precipitación de carburos con el tiempo [7].	21
<b>Figura 2.4</b> La órbita de una partícula con campo magnético $B$ [22].	26
<b>Figura 2.5</b> Líneas de campo magnético creadas por varias fuentes comunes de campo magnético [22].	28
<b>Figura 2.6</b> Partícula con movimiento helicoidal en una botella magnética [22].	29
<b>Figura 2.7</b> Fuerza en el arco por el campo magnético inducido resultante de la localización del electrodo de la pieza [25].	37
<b>Figura 2.8</b> Soplo magnético en los extremos de una pieza de trabajo Ferromagnético [25].	37
<b>Figura 2.9</b> Efecto de las corrientes de Eddy en la neutralización del campo magnético inducido por corriente alterna [25].	38
<b>Figura 3.1</b> Esquema del desarrollo experimental.	44
<b>Figura 3.2</b> Diagrama de Schaeffler.	47
<b>Figura 3.3</b> Partícula con carga positiva que se mueve con una velocidad $v$ , que pasa por una región donde hay campos magnéticos y eléctricos perpendiculares entre sí.	48
<b>Figura 3.4</b> Trayectoria helicoidal de partícula cargada.	50
<b>Figura 3.5</b> Preparación en simple “V” con talón de 4.3 mm, cotas en mm.	51
<b>Figura 3.6</b> Preparación en simple “V” con talón de 2 mm, cotas en mm.	52
<b>Figura 3.7</b> Esquema del arreglo para aplicación de campo magnético perpendicular al arco eléctrico.	53
<b>Figura 3.8</b> Forma de cortar el material para la caracterización metalográfica.	55
<b>Figura 3.9</b> Probeta de tensión bajo la norma ASTM E8M-04.	56
<b>Figura 3.10</b> Representación esquemática de la zona donde se medirán los perfiles de microdureza.	57
<b>Figura 3.11</b> Probeta para ensayo de impacto bajo norma ASTM E23-02A.	58
<b>Figura 3.12</b> Ilustración del encapsulado de las muestras para la caracterización electroquímica (cotas en mm).	60

<b>Figura 4.1</b> Micro estructura del material base (acero inoxidable austenítico 304L): a) a 500X, b) a 1000X. ....	60
<b>Figura 4.2</b> Macrografías de las uniones soldadas; a) unión sin campo magnético, b) unión con campo magnético de 1 mT, c) unión con campo magnético de 2 mT, d) unión con campo magnético de 3 mT. ....	63
<b>Figura 4.3</b> Micrografías de las uniones en el centro del cordón, 200X; a) unión sin campo magnético, b) unión con campo magnético de 1 mT, c) unión con campo magnético de 2 mT, d) unión con campo magnético de 3 mT. ....	65
<b>Figura 4.4</b> Micrografías de las uniones en el centro del cordón, 500X; a) Unión sin campo magnético, b) unión con campo magnético de 1 mT, c) unión con campo magnético de 2 mT, d) unión con campo magnético de 3 mT. ....	67
<b>Figura 4.5</b> Micrografías de las uniones en la ZAT, 200X; a) unión sin campo magnético, b) unión con campo magnético de 1 mT, c) unión con campo magnético de 2 mT, d) unión con campo magnético de 3 mT.....	68
<b>Figura 4.6</b> Micrografías de las uniones en la interface, 200X; a) unión sin campo magnético, b) unión con campo magnético de 1 mT, c) unión con campo magnético de 2 mT, d) unión con campo magnético de 3 mT.....	70
<b>Figura 4.8</b> Micrografías de la interface de la unión con la aplicación de un campo magnético de 1 mT; a) 200X, b) 500X.....	71
<b>Figura 4.7</b> Micrografías de la interface de la unión sin la aplicación de un campo magnético; a) 200X, b) 500X. ....	71
<b>Figura 4.9</b> Micrografías de la interface de la unión con la aplicación de un campo magnético de 2 mT; a) 200X, b) 500X.....	72
<b>Figura 4.10</b> Micrografías de la interface de la unión con la aplicación de un campo magnético de 3 mT; a) 200X, b) 500X; c) ampliación de la micrografía b).....	73
<b>Figura 4.11</b> Ensayo de tensión; a) Material base, b) Unión sin campo magnético, c) Unión con campo magnético de 1 mT, d) Unión con campo magnético de 2 mT, e) Unión con campo magnético de 3 mT. ....	76
<b>Figura 4.12</b> Perfiles de microdureza de las cuatro condiciones de soldadura. ....	78
<b>Figura 4.13</b> Valores promedio de los datos obtenidos de los barrios de microdureza. ....	80

<b>Figura 4.14</b> Micrografías de las fracturas de las uniones a 50X; a) unión sin campo magnético, b) unión con campo magnético de 1 mT, c) unión con campo magnético de 2 mT, d) unión con campo magnético de 3 mT. ....	81
<b>Figura 4.15</b> Micrografías de las fracturas de las uniones a 1000X; a) unión sin campo magnético, b) unión con campo magnético de 1 mT, c) unión con campo magnético de 2 mT, d) unión con campo magnético de 3 mT. ....	82
<b>Figura 4.16</b> Micrografías de las fracturas de las uniones a 4000X; a) unión sin campo magnético, b) unión con campo magnético de 1 mT, c) unión con campo magnético de 2 mT, d) unión con campo magnético de 3 mT. ....	84
<b>Figura 4.17</b> Microanálisis de inclusiones en la unión sin aplicación de campo magnético. ....	85
<b>Figura 4.18</b> Microanálisis de inclusiones en la unión con aplicación de un campo magnético de 3 mT. ....	86
<b>Figura 4.19</b> Energía absorbida por las probetas en el ensayo de impacto. ....	86
<b>Figura 4.20</b> Curvas de polarización potenciodinámicas de doble ciclo de las diferentes condiciones de soldadura. ....	88
<b>Figura 4.21</b> Resultados del grado de sensibilidad obtenidos de las curvas DLEPR. ....	90
<b>Figura 4.22</b> Micrografías del ataque producido por la caracterización electroquímica del material base. ....	91
<b>Figura 4.23</b> Micrografías del ataque producido por la caracterización electroquímica en la ZAT de las diferentes condiciones de soldadura, a) sin campo magnético, b) con campo de 1mT, c) con campo de 2mT, d) con campo de 3mT. ....	93
<b>Figura 4.24</b> Figura 4.23 Micrografías del ataque producido por la caracterización electroquímica en la ZAT de las diferentes condiciones de soldadura, a) sin campo magnético, b) con campo de 1mT, c) con campo de 2mT, d) con campo de 3mT. ....	94

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Composición química de los materiales. ....	46
<b>Tabla 2</b> Variables operativas de cada condición de unión. ....	54
<b>Tabla 3</b> Dimensiones para las probetas para el ensayo de tensión. ....	56
<b>Tabla 4</b> Resultados de ensayos de tensión. ....	77
<b>Tabla 5</b> Porcentajes en peso del microanálisis realizado a inclusiones en la unión sin aplicación de campo magnético y con aplicación de campo magnético de 3 mT. ....	85
<b>Tabla 6</b> Energía absorbida por las probetas en el ensayo de impacto. ....	86
<b>Tabla 7</b> Resultados del grado de sensibilidad obtenidos de las curvas DLEPR. ....	89

## **Resumen.**

En el presente proyecto de investigación se realizó la soldadura del acero inoxidable austenítico 304L con un espesor de 6.3 mm, mediante el proceso de soldadura de arco metálico consumible y protección de gas (GMAW por sus siglas en inglés), utilizando diferentes intensidades (0, 1, 2 y 3 mT) en la aplicación de un campo magnético perpendicular opuesto a la dirección del cordón de soldadura. El objetivo de esta práctica fue analizar el efecto de la interacción electromagnética en el tipo de microestructura obtenida, tanto en el cordón de soldadura como en la zona afectada térmicamente (ZAT), así como su influencia en los perfiles de microdureza, resistencia a la tensión y comportamiento electroquímico, especialmente en la ZAT. El problema fundamental de los aceros inoxidables austeníticos al ser soldados, radica en la ZAT debido al ciclo térmico de soldadura experimentado, ya que este ciclo térmico ocasiona el fenómeno de sensibilidad, el cual consiste en la precipitación de carburos de cromo del tipo  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  o  $\text{M}_7\text{C}_3$ , los cuales precipitan y crecen en el rango de temperatura de 450 a 850 °C, independientemente si el acero es de bajo porcentaje de carbono o no. Utilizando la interacción electromagnética de baja intensidad durante la soldadura se pretende minimizar este problema, comparándolo con la soldadura tradicional. De acuerdo a lo anterior los resultados obtenidos han arrojado un comportamiento diferente entre la soldadura sin campo magnético y la soldadura realizada con aplicación de 2 mT, las cuales presentan un menor incremento de la microdureza en la zona afectada térmicamente y una morfología de los listones de ferrita  $\delta$  precipitados, respecto a las soldaduras depositadas con 1 y 3 mT, en donde se obtuvo un incremento de microdureza en la ZAT, así como una diferente morfología de la ferrita  $\delta$  precipitada. Además de presentar cambios benéficos en su comportamiento electroquímico.

**PALABRAS CLVE:** ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO 304L SOLDADURA INTERACCIÓN ELECTROMAGNETICA

## Abstract

Welding of 6.3 mm thick austenitic Steel plates was performed at the present investigation work, GMAW welding process was used to perform the joining. Different values of external magnetic field (0, 1, 2 and 3 mT) were used during the welding process in order to analyze its effects on the microstructure that was obtained both in the weld bead and the heat affected zone. Also the influence on the microhardness, electrochemical behavior and tensile strength were analyzed. Electrochemical behavior in the ZAT received special attention owing to the sensitization problems that are present in that area. Sensitization phenomenon produces chromium carbides of the kind  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  or  $\text{M}_7\text{C}_3$ , precipitate in the  $450^\circ$  to  $850^\circ$  C temperature range regardless of the content of carbon. By using low intensity electromagnetic interaction during welding it was intended to reduce the sensitization in comparison with a traditional process. According to above, obtained results show differences between the welding made in presence of an external magnetic field of 2 mT and the welding made without the magnetic field. The samples welded under the influence of a 2 mT presented lower micro hardness in the HAZ than the samples welded without the influence of an external magnetic field, also the morphology on the samples welded under the influence of an external magnetic field presented ferrite laths. Regarding to the samples welded under the influence of 1 and 3 mT magnetic field it was obtained an increase of microhardness and the morphology of the ferrite was really different, it is important to highlight that in this samples also was gained an improvement on the electrochemical behavior.

WORDS: WELDING STAINLESS STEEL 304L austenitic ELECTROMAGNETIC INTERACTION

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

### 1.1 Introducción.

Los aceros inoxidable austeníticos constituyen la familia o el grupo con el mayor número de aceros disponibles, son de gran uso y esto se debe a su buen grado de formabilidad y excelente resistencia a la corrosión. Así como entre sus principales características están: la resistencia a la corrosión, excelente grado de soldabilidad, un factor de higiene y limpieza adecuados, tienen la habilidad de ser funcionales en temperaturas criogénicas y altas temperaturas de 250 a 900 °C, dependiendo del tipo de industria en donde sean utilizados. Dentro de la familia de aceros inoxidable austeníticos se encuentra la serie 300 AISI, es la más extensa y está basada en aleaciones cromo-níquel, donde el cromo proporciona la resistencia a la corrosión, es aquí donde estos aceros presentan un problema, ya que el carbono tiene una gran afinidad con el cromo, problema enfatizado en la zona afectada térmicamente de la soldadura, en donde se forman carburos de cromo ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  y  $\text{M}_7\text{C}_3$ ), lo que propicia un empobrecimiento de cromo en esta zona y disminuye la resistencia a la corrosión, la cual es una de las propiedades más importantes para este tipo de aceros inoxidable.

De modo que el objetivo de este trabajo es lograr la soldadura de placas de 6.3 mm de espesor en una sola pasada, con lo cual hay una reducción del aporte térmico durante la realización de la soldadura de los aceros inoxidable austeníticos, aplicando un campo magnético externo, basado en el principio de la fuerza de Lorentz el cual dice que una partícula cargada eléctricamente puede ser manipulada. Esperando como resultado de estas medidas lograr la reducción del ancho de la zona afectada térmicamente y, como consecuencia, reducir la problemática de la precipitación de carburos de cromo en la ZAT, los cuales son los causantes del fenómeno de sensibilidad en los aceros austeníticos, además de que se espera propiciar cambios benéficos en la microestructura de la ZAT, tales como precipitación de la ferrita  $\delta$  y martensita  $\alpha'$ , que han demostrado tener un efecto benéfico en el fenómeno de sensibilidad de aceros austeníticos como el acero AISI 304 [1-3].

## **1.2 Justificación.**

Debido a los problemas presentados en la soldadura de los aceros inoxidable austeníticos, que conllevan a cambios microestructurales, que influyen en las cualidades de estos y en la disminución de ciertas propiedades tales como, la resistencia a la corrosión, ocasionada por el proceso de soldadura que propicia la precipitación de carburos de cromo, los cuales son los causantes de este problema en la ZAT, motivo por el que en la actualidad se han estado realizando diversas investigaciones que intentan dar solución a este problema y que las cualidades anticorrosivas de los aceros inoxidable austeníticos no se deterioren. En estos últimos años se han realizado diversos trabajos enfocados en dar solución a este problema tal como ha sido reportado [4, 5].

Las diversas investigaciones que se han realizado para dar soluciones a este tipo de problema, tales como, el uso de tratamientos termo-mecánicos aplicados antes o después de la soldadura, y entre estas opciones de solución algunos de ellos han utilizado la aplicación de campos magnéticos. En estos trabajos con interacción de campos magnéticos, se ha estudiado la modificación de la microestructura en el cordón de soldadura y escasamente en la zona afectada por el calor, así como el efecto producido en la difusión del carbono y cambios microestructurales en aceros al carbono, mas no en aceros inoxidable, cabe mencionar que en estos trabajos se ha usado intensidades de campo magnético desde 30 mT hasta 30 T. Denotando que en el presente trabajo las intensidades son demasiado pequeñas y en cierta medida han sido aplicadas mostrando que las uniones con interacción electromagnética si presentan cambios microestructurales. La interacción electromagnética presenta diversas ventajas, debido a que es aplicada durante el proceso de soldadura, implica un menor consumo de energía y tiempo con respecto a otras opciones y al ser de baja intensidad es fácil de aplicar, además de que el uso de interacción electromagnética de baja intensidad durante el proceso de soldadura es una innovación descubierta en el IIM de la UMSNH. Al ser una técnica reciente, solo hay unos pocos artículos acerca del tema, todos ellos producidos en el IIM.

### **1.3 Objetivos.**

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

El objetivo fundamental del presente proyecto de investigación es realizar la soldadura del acero inoxidable austenítico 304L de un espesor de 6.3 mm, en una sola pasada y con la aplicación de un campo magnético de baja intensidad perpendicular opuesto a la dirección de desplazamiento del arco eléctrico, esto con la finalidad de lograr una disminución de la zona afectada térmicamente, en el ancho del cordón de soldadura y la sobremonta, con lo que se pretende lograr una mejora en las propiedades físico-químicas y mecánicas de la ZAT, en las uniones de este tipo de acero.

#### **1.3.2 *Objetivos particulares.***

- Determinar la intensidad del campo magnético externo que genere cambios favorables en la microestructura de la unión soldada.
- Minimizar el ancho de la zona afectada térmicamente.
- Refinar la microestructura del cordón de soldadura.
- Incrementar las propiedades mecánicas de la soldadura.
- Mejorar la resistencia a la corrosión en la ZAT.

#### **1.4 Hipótesis.**

Si es conocido que un conductor por el que circula una corriente sufre una fuerza en presencia de un campo magnético, puesto que la corriente está constituida por cargas eléctricas en movimiento, al igual que el plasma formado en el arco eléctrico de una soldadura está compuesto por electrones que transportan la corriente.

Se sabe que los materiales que son susceptibles a la influencia de un campo magnético, tienen una propiedad que provoca cambios en la forma de su red cristalina en presencia de uno, conocida como magnetostricción, y además esto provoca una vibración a la frecuencia de las fluctuaciones del campo magnético.

Por lo cual de acuerdo a las características físicas del plasma en el arco eléctrico es posible manipularlo en función de la orientación de las líneas de flujo del campo magnético aplicado, al igual que la perturbación del movimiento de los electrones en el material metálico y la vibración de la red cristalina de este. Debido a la interacción electromagnética se espera minimizar el fenómeno de sensibilidad en la ZAT, a causa de la difusión de corto alcance de los átomos sustitucionales de cromo.

## **CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.**

### **2.1 Antecedentes.**

El acero inoxidable puede ser definido como un acero con un 11-12% de cromo y contenidos de carbón normalmente por debajo del 0.15%. Los aceros inoxidables austeníticos muestran ventajas marcadas particularmente con respecto a la resistencia y propiedades de soldabilidad. En los aceros inoxidables, la fase austenítica se produce generalmente mediante la aleación con níquel. Los aceros inoxidables austeníticos son los aceros inoxidables más utilizados de todos los tipos. Exhiben una estructura cristalina cúbica centrada en las caras (FCC) y esencialmente no son magnéticos en la condición de recocido, pero al ser trabajados en frío se genera un porcentaje de martensita que si es magnética. No pueden ser fortalecidos mediante tratamiento térmico, pero se pueden endurecer por trabajo en frío. Poseen una buena resistencia a la corrosión, excelente ductilidad, alta tenacidad y buena resistencia a la tensión. Estos aceros ofrecen excelentes propiedades criogénicas, así como una excelente resistencia a la oxidación a altas temperaturas [6].

Una de las propiedades más importantes de los aceros inoxidables austeníticos es su resistencia a la corrosión la cual está determinada en gran parte por la composición química de la aleación.

Para la mayoría de tipos de corrosión, un aumento en el contenido de cromo de la aleación por encima de 18% producirá una mejora en la resistencia a la corrosión. Una reducción en el contenido de carbono de 0,03% máximo o la adición de titanio o niobio aumentará la resistencia a la corrosión intergranular de estos aceros. Las adiciones de molibdeno mejoran principalmente la resistencia a la corrosión por picaduras y hendiduras. El aumento del contenido de níquel en una matriz austenítica aumentará la resistencia al agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo, especialmente en medios que contienen iones cloruro, en donde las aleaciones base níquel con un contenido de más de 40% de níquel dan muy buenos valores de resistencia a la corrosión, pero el nivel de dos principales elementos de aleación como el cromo y molibdeno, así como también el de niobio está limitado por la precipitación de fases intermetálicas (fase sigma, fase rica en cromo, molibdeno y niobio). Estas fases ejercen una influencia negativa sobre la resistencia a la corrosión, así como en las propiedades de tenacidad y a elevada temperatura [6].

El carbón normalmente se considera como una impureza indeseable en el acero inoxidable austenítico. Mientras que estabiliza la estructura austenítica, tiene una gran afinidad termodinámica con el cromo. Debido a esta afinidad, forman carburos de cromo,  $M_{23}C_6$ , cada vez que el carbono alcanza niveles de sobresaturación en la austenita, y las velocidades de difusión son suficientes como para segregar el carbón y cromo en precipitados. A temperatura ambiente, muy poco carbono es soluble en austenita y la ausencia de carburos en acero austenítico es debido a la lenta difusión del carbono y la difusión aún más lenta del cromo en austenita, pero factores como el aumento de tamaño de grano de la austenita, al igual que el trabajo en frío, acelera la precipitación, especialmente en el interior de los granos, donde la difusión se ve reforzada por el aumento de la densidad de defectos [7].

Bajo ciertas condiciones, piezas soldadas de acero inoxidable austenítico pueden someterse a la corrosión intergranular. Este comportamiento es particularmente frecuente en ambientes acuosos con iones cloruro, y por lo general, se caracteriza por el ataque acelerado en la ZAT. La base para que este ataque se presente, es a menudo referido como el fenómeno de sensibilización, por que consiste en la formación de carburos ricos en cromo ( $M_{23}C_6$ ) a lo largo de los límites de grano de austenita durante el enfriamiento lento en el intervalo de temperatura de 840°C a 450°C. Este rango de temperatura es comúnmente descrito como el rango de temperatura de sensibilización, ya que la exposición dentro de este rango hace que los aceros inoxidables austeníticos sean especialmente sensibles a la corrosión intergranular [7].

## **2.2 Problemática en la soldadura de los aceros inoxidables austeníticos.**

El acero inoxidable austenítico 304L es usado en diferentes plantas industriales tales como nucleares para producir energía, por su buena resistencia a la corrosión, así como su buena tenacidad a la fractura [8]. Sin embargo, estos aceros son susceptibles a la corrosión localizada (por picado, intergranular y corrosión bajo esfuerzos), especialmente en medios que contengan iones cloruro. Además cuando estos aceros son soldados por cualquier proceso de soldadura por fusión y solidificación, esta propicia en la ZAT cambios metalúrgicos y generación de esfuerzos residuales debido al ciclo térmico experimentado.

La corrosión bajo esfuerzo (SCC, “stress corrosión cracking”) presentada en los aceros inoxidable es un fenómeno de degradación importante que se presenta debido al ciclo térmico durante la soldadura de estos aceros en presencia de un medio ácido y la concentración de esfuerzos residuales en la ZAT y cordón de soldadura. La corrosión por picado es un proceso que se da en estos aceros después del proceso de pasivación cuando se encuentra en presencia de iones cloruro (agua de mar). La corrosión intergranular o también denominado fenómeno de sensibilidad se genera en la ZAT, debido a la precipitación de carburos de cromo y empobrecimiento de cromo alrededor de estos precipitados, ocasionando una zona de debilitamiento de la capa pasiva alrededor de los carburos en la ZAT [8].

Las soldaduras por lo general son indispensables en la mayoría de los componentes de aplicación industrial, en los cuales son utilizados los aceros inoxidable austeníticos y aunque pueden ser fácilmente soldados a través de varios procesos de soldadura de arco eléctrico que incluyen fusión y solidificación. Estos procesos tradicionales generan grandes cambios en la microestructura, especialmente en el área soldada, de modo que esta área es dividida en tres distintas zonas para su estudio, la zona de fusión (ZF), zona afectada por el calor (ZAC), y material base (MB). Los problemas de corrosión comúnmente asociados con la soldadura de aceros inoxidable austeníticos, aun y cuando estos son considerados con buen grado de soldabilidad, utilizando los procesos tradicionales de soldadura por fusión y solidificación. Estos problemas son causados por la precipitación de los diferentes carburos de cromo y estos a su vez se deben al problema de la microsegregación intergranular, la cual propicia la formación de estos carburos debido al ciclo térmico generado durante la soldadura [8, 9].

### **2.2.1 Principales carburos.**

a) Los carburos  $M_{23}C_6$  poseen una estructura cristalina tipo cúbica centrada en las caras (fcc). Su parámetro de red incrementa con el contenido de Mo y decrece con el contenido de Fe. El contenido de Ni de este carburo es normalmente menor al 5% en peso y su efecto en el parámetro de red no ha sido reportado. El historial térmico parece tener una gran influencia en la composición del carburo  $M_{23}C_6$ . De acuerdo con Goldschmidt [10], el carburo  $M_{23}C_6$  teóricamente puede disolver un 35% C en peso atómico de elementos metálicos. Philibert y colaboradores [11], han encontrado hasta un 45% Fe en el carburo en un acero de

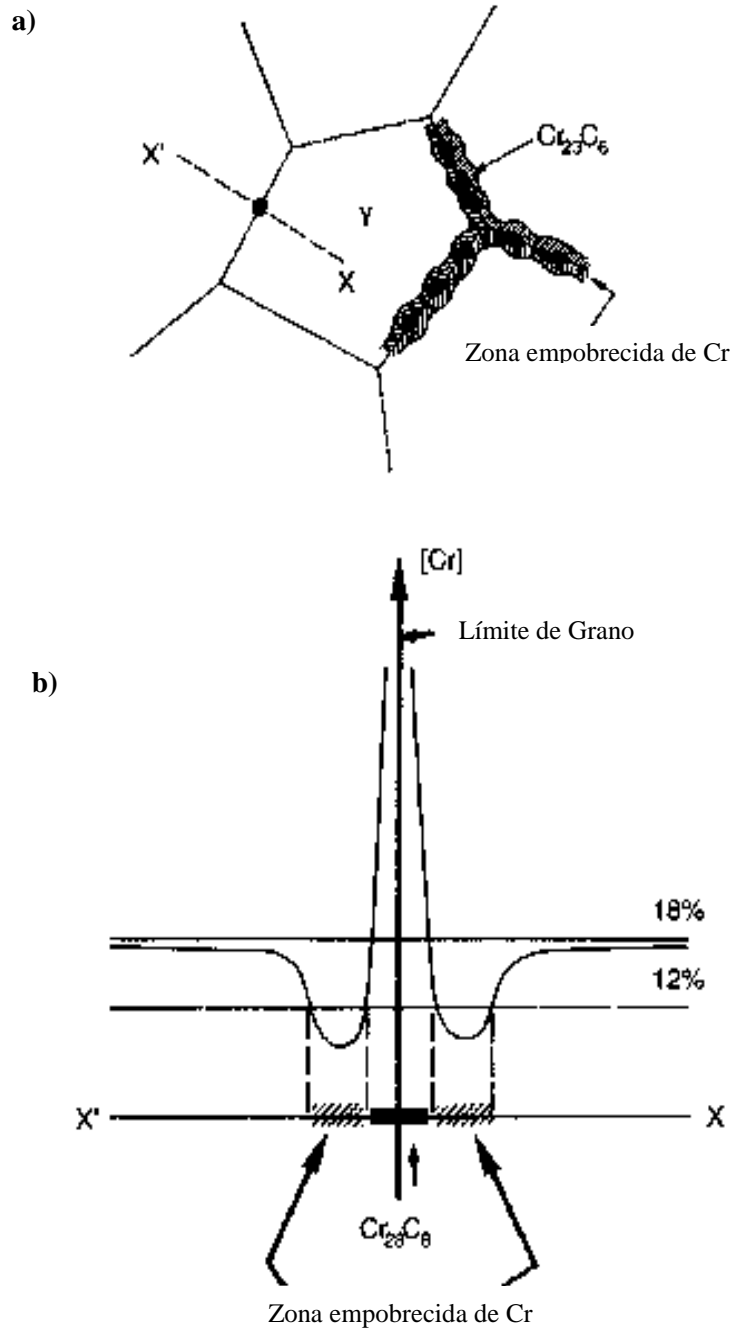
composición Fe-18%Cr, 8%Ni en peso, después de un corto tratamiento térmico a 750°C. Después de mantener la muestra por 24 horas a esta temperatura, el contenido de hierro disminuyó al 24%. Un comportamiento similar fue encontrado por Da Casa y colaboradores [12].

La presencia de nitrógeno en los aceros inoxidable austeníticos inhibe la precipitación de  $M_{23}C_6$ . Los sitios más favorables para la precipitación de los carburos  $M_{23}C_6$  son los límites de grano como se muestra en la **figura 2.1**, maclas coherentes e incoherentes y las dislocaciones dentro de los granos.

La tendencia de precipitación del carburo de cromo ( $M_{23}C_6$ ) depende fuertemente de la coincidencia de los límites de grano en una microestructura de granos gruesos en donde los límites de grano son más favorables a la precipitación de carburos que cuando existe un proceso de recristalización parcial, en donde se obtienen bajos ángulos de coincidencia entre los granos pequeños y los granos grandes a lo cual se le ha denominado límite de grano ingenieril, obtenido por un tratamiento termo-mecánico previo a un tratamiento térmico de recocido que propicia el fenómeno de recristalización parcial [13].

El  $M_{23}C_6$  es normalmente el primer carburo en formarse en los aceros inoxidable austeníticos. Dependiendo del contenido de carbono, una significativa cantidad de carburos se pueden formar después de algunos minutos entre 650 y 750 °C. Los carburos  $M_{23}C_6$  son indeseables debido a que están asociados a la corrosión intergranular, ya que empobrecen el contenido de Cr de la matriz disminuyendo su capacidad anticorrosiva alrededor de los carburos. Una técnica para evitar la presencia de carburos  $M_{23}C_6$  es la adición de elementos estabilizadores como el Ti, Nb y V, ya que éstos poseen más afinidad por el carbono y forman carburos del tipo  $MC$  [14]. Sin embargo, la adición de estabilizadores no inhibe completamente la precipitación de los carburos tipo  $M_{23}C_6$ .

En la **figura 2.2** se puede observar que la precipitación para  $Cr_{23}C_6$  como una función del contenido de carbono y la **figura 2.3** muestra los cambios de lugar de la precipitación con el tiempo y la temperatura.



**Figura 2.1** a) Zonas preferenciales en la precipitación de los carburos de Cr y b) Zonas empobrecidas de Cr, por la precipitación de los carburos [7].

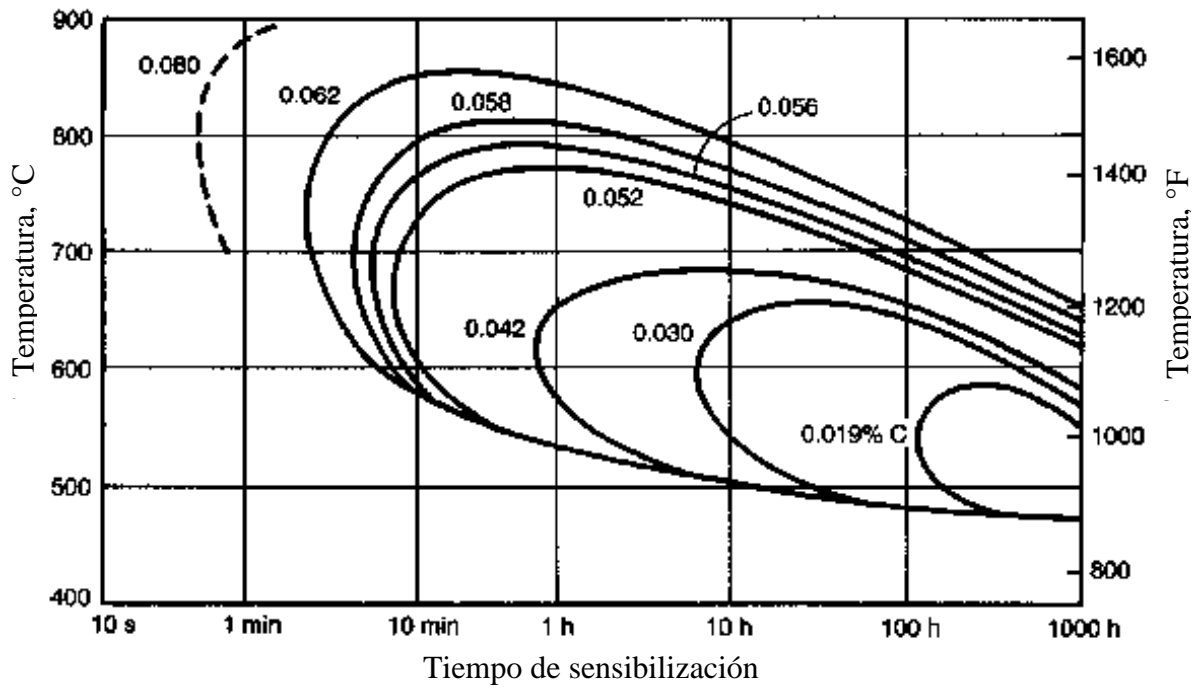


Figura 2.2 Tasas de precipitación para  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  como una función del contenido de carbono [7].

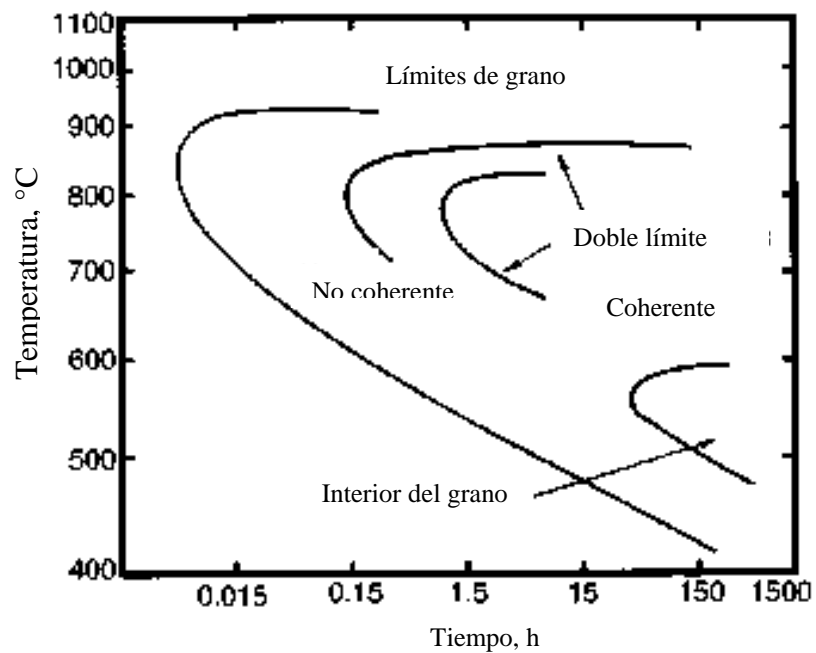


Figura 2.3 Variación de la localización de la precipitación de carburos con el tiempo [7].

b) Carburos  $M_7C_3$ : Este tipo de carburo posee una estructura cristalina pseudo hexagonal. Aunque se presentan en los sistemas Fe-Cr-C y Fe-Cr-Ni-C no encontrándose en los aceros inoxidables forjados de la serie 300, con un contenido usual de carbono. Los carburos  $M_7C_3$  solo se encuentran en aceros inoxidables austeníticos con grandes relaciones Carbono:Cromo, por ejemplo en el proceso de cementación. Durante la cementación superficial del acero inoxidable AISI 316, la región cercana a la superficie del acero contiene predominantemente carburos  $M_7C_3$ , donde el contenido local de carbono fue de cerca del 4% en peso [15]. La relación de las fases  $M_{23}C_6$  con  $M_7C_3$  incrementa a medida que el contenido de carbono disminuye, de la superficie al centro. Los carburos  $M_7C_3$  son importantes en fundiciones de hierro con alto contenido de Cr que son usadas tradicionalmente en aplicaciones donde se requiere alta resistencia a la abrasión. Dichas fundiciones contienen 11 a 30% Cr y 1.8 a 3.6% C en peso, así como adiciones de Mo, Mn, Ni y Cu. En el transcurso de la solidificación se forma un eutéctico de  $M_7C_3$  y austenita. Durante el servicio en el rango de 750 a 1000 °C el  $M_7C_3$  se transforma gradualmente en  $M_{23}C_6$  que es más estable [16].

### **2.3 Soluciones propuestas en la actualidad a la problemática de la corrosión intergranular de las uniones de los aceros inoxidables austeníticos.**

Durante el proceso de la soldadura de los aceros inoxidables austeníticos se tiene el problema, particularmente con los de alto contenido de carbono, teniendo la precipitación de carburos de cromo, lo que consecuentemente produce la sensibilidad de la zona afectada térmicamente, lo cual afecta en la disminución de la resistencia a la corrosión intergranular cuando se encuentran en servicio en ambientes corrosivos, tales como agua de mar y ácidos conteniendo iones cloruros o ácidos como sulfúrico, nítrico, etc [8].

La corrosión intergranular de los aceros inoxidables austeníticos proviene de la precipitación intergranular de carburos ricos en cromo en el rango de temperatura de 450-850 °C. La precipitación intergranular viene acompañada por el desarrollo de una zona empobrecida en cromo adyacente a los límites de grano. Esta condición se define como “sensibilidad” [17-19].

Otra de las soluciones propuestas a este problema de la precipitación de carburos de cromo es el trabajo realizado por Kaul y colaboradores [4], quienes realizaron un tratamiento pre-

soldadura utilizando el proceso de soldadura láser para fundir parcialmente la superficie de lo que se espera fuera la ZAT. Probandó que en aceros inoxidable austeníticos con bajo contenido de carbono el efecto de este tratamiento pre-soldadura no tenía una gran efectividad al suprimir la sensibilización, sin embargo, en aceros con contenidos de carbono elevados las mejoras eran notables. El porcentaje del grado de sensibilización en el metal base en condiciones de recocido era de 0.0003, mientras que en las superficies de la ZAT que no recibió el tratamiento de fusión parcial, el porcentaje del grado de sensibilización para la parte superior e inferior era del 12.38 % y 42 %, respectivamente; en contraste, el grado de sensibilización en la superficie de la ZAT que recibió el tratamiento permaneció en un nivel considerablemente bajo de 0.03 %.

La mejora en la resistencia contra la sensibilización se atribuye al aumento significativo en la fracción de límites de grano tipo  $\Sigma 1$  (de 0.536 en el metal base a 0.759 en la superficie tratada) debido al proceso de fusión y solidificación. Este tipo de granos con ángulos de desorientación bajos (0 a 15°) se caracterizan por su baja energía y propiedades de difusión lentas. Los límites de grano mencionados anteriormente, debido a su baja energía, son más resistentes a la nucleación de carburos de cromo.

Esta es una de las posibles soluciones propuestas en la problemática de las uniones soldadas de los aceros inoxidable austeníticos, aunque es relevante recordar que en el presente proyecto se pretende tratar con un acero inoxidable austenítico 304L de bajo contenido de carbono, el cual pertenece a un grupo que Kaul y colaboradores [4] determinaron que este tratamiento no propiciaría una mejora relevante. Además que se debe considerar que la soldadura de tipo láser es un proceso de alta concentración de energía, y si recordamos que la gran problemática de estos aceros es generada por un alto aporte térmico que propicia la precipitación de carburos de cromo, aunque no es mencionado, mediante este proceso, es posible que se cree una segunda zona afectada térmicamente adyacente a la comúnmente formada al proceso de soldadura.

Ya que la sensibilización depende fuertemente de la naturaleza cristalográfica y de la estructura atómica, y que los límites de grano de baja energía, tal como los CSL (coincidence site lattice), tienen una alta resistencia a la corrosión intergranular, se ha desarrollado el concepto de límites de grano ingenieriles (GBE por sus siglas en inglés) [20, 21], que consiste

en tratar de manipular características de los límites de grano para obtener ciertas propiedades benéficas.

Por otra parte Kokawa [5] realizó un experimento para tratar de producir límites de grano ingenieriles en un acero inoxidable austenítico 304, con el fin de obtener una alta resistencia a la corrosión intergranular que se presenta en la ZAT, debido al proceso de soldadura. En su experimento utilizó placas de acero inoxidable 304 y un proceso de soldadura TIG con una corriente de 300 A en modo DCEN a una velocidad de 4 cm/min sin material de aporte. Las placas fueron sometidas a un tratamiento térmico de solubilizado a 1050 °C por 0.5 hrs. El tratamiento termomecánico consistió en un laminado en frío seguido de un recocido. Los especímenes fueron recocidos a varias temperaturas desde 923 a 1327 °C y después fueron templados en agua. La tasa de reducción por laminado fue variada desde el 0 hasta el 60%. En el estudio los límites de grano con  $\Sigma \leq 29$ , fueron considerados como  $\Sigma$ CSL de baja energía. El material tratado y sin tratar, fueron soldados y se examinó la ZAT; la corrosión fue evaluada por la técnica DLEPR (curvas electroquímicas de doble ciclo) y la ZAT fue observada en un microscopio electrónico de barrido y de transmisión.

Este trabajo demostró que los límites más ordenados, es decir, con menores ángulos de desorientación, necesitan mayor tiempo para la precipitación de carburos y la subsecuente corrosión que presentan los granos que se encuentran menos ordenados. Posteriormente Kokawa [5], probó que la distribución óptima de frecuencia de CSL, fue lograda al tener un laminado con una tasa de reducción del 5%; el efecto de la temperatura y el tiempo fueron variados en el tratamiento para la anterior tasa de reducción, encontrándose como valor óptimo una temperatura de 1027 °C; temperaturas de 1127 °C o superiores no mostraron una mejora notable comparada con la lograda a 1027 °C.

El tratamiento termomecánico es otra posible solución a esta problemática ya que redujo la susceptibilidad a la corrosión intergranular debido al aumento de la frecuencia de los límites de grano CSL. Los segmentos de baja energía en la red de límites de grano producen una cadena discontinua de zonas empobrecidas en cromo y detienen la filtración de corrosión desde la superficie.

## 2.4 Principios de electromagnetismo.

Los aspectos más conocidos del magnetismo son los que asociamos con los imanes permanentes, los cuales atraen objetos de hierro no magnetizados y también atraen o repelen otros imanes. Una aguja que se alinea con el magnetismo de la tierra es un ejemplo de esta interacción. Pero la naturaleza fundamental del magnetismo es la interacción de cargas eléctricas en movimiento. A diferencia de las fuerzas eléctricas, que actúan sobre las cargas eléctricas ya sea que estén en movimiento o no, las fuerzas magnéticas actúan solo sobre cargas en movimiento. Las fuerzas magnéticas surgen en dos etapas; primero una carga en movimiento o un conjunto de cargas en movimiento (es decir, una corriente eléctrica) originan un campo magnético en el espacio circundante y a continuación, una segunda corriente o carga en movimiento, responde a este campo magnético, y de este modo experimenta una fuerza magnética  $\vec{F}$ .

El campo magnético es un campo vectorial, esto es una cantidad vectorial asociada con cada punto del espacio representado por  $\vec{B}$ . También la fuerza magnética depende de la velocidad de la partícula. En esto se distingue de la fuerza de campo eléctrico, que es la misma ya sea que la carga se mueva o no. Una partícula con carga en reposo no experimenta fuerza magnética alguna. Además se encontró experimentalmente que la fuerza magnética  $\vec{F}$  no tiene la misma dirección que el campo magnético  $\vec{B}$ , sino que siempre es perpendicular tanto a  $\vec{B}$  como a la velocidad  $\vec{v}$ , por lo que la fuerza sobre una carga  $q$  que se desplaza con velocidad  $\vec{v}$  en un campo magnético  $\vec{B}$  está dado tanto en términos de magnitud como de dirección [22].

La fuerza magnética sobre una partícula con carga en movimiento es:

$$\vec{F} = Q(\vec{v} \times \vec{B}) \dots \dots \dots (2.1)$$

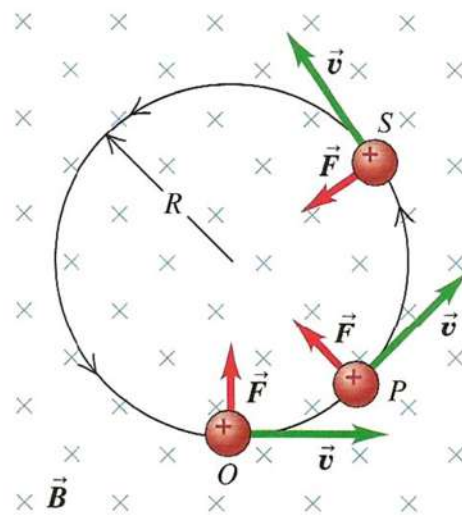
Esto se conoce como la fuerza de Lorentz [23]. En la presencia de ambos campos eléctricos y magnéticos, la fuerza neta sobre  $Q$  sería:

$$\vec{F} = Q[\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B})] \dots \dots \dots (2.2)$$

Donde la unidad para  $\vec{B}$  en SI es equivalente a 1 N·s/C·m, o bien, puesto que un amperio es un coulomb por segundo (1A = 1C/s), 1 N/A·m que es una unidad conocida como Tesla (T), otra unidad de uso común es el gauss (1 G = 10<sup>-4</sup> T).

La ecuación (2.1) es válida con respecto a cargas tanto positivas como negativas. Cuando  $q$  es negativa, la dirección de la fuerza  $\vec{F}$  es opuesta a  $\vec{v} \times \vec{B}$ . Si dos cargas de igual magnitud y signos opuestos se trasladan en el mismo campo  $\vec{B}$  con una misma velocidad, las fuerzas tienen igual magnitud y direcciones opuestas.

La **figura 2.4** muestra las líneas de campo magnético generadas por varias fuentes comunes de campo magnético. Ya que los modelos de campo magnético son tridimensionales, suele ser necesario dibujar líneas de campo magnético que apuntan hacia dentro a hacia afuera del plano de un dibujo. Para ello se emplea un punto ( $\bullet$ ) para representar un vector dirigido hacia afuera del plano, y una cruz ( $\times$ ) para representar un vector dirigido hacia el plano.

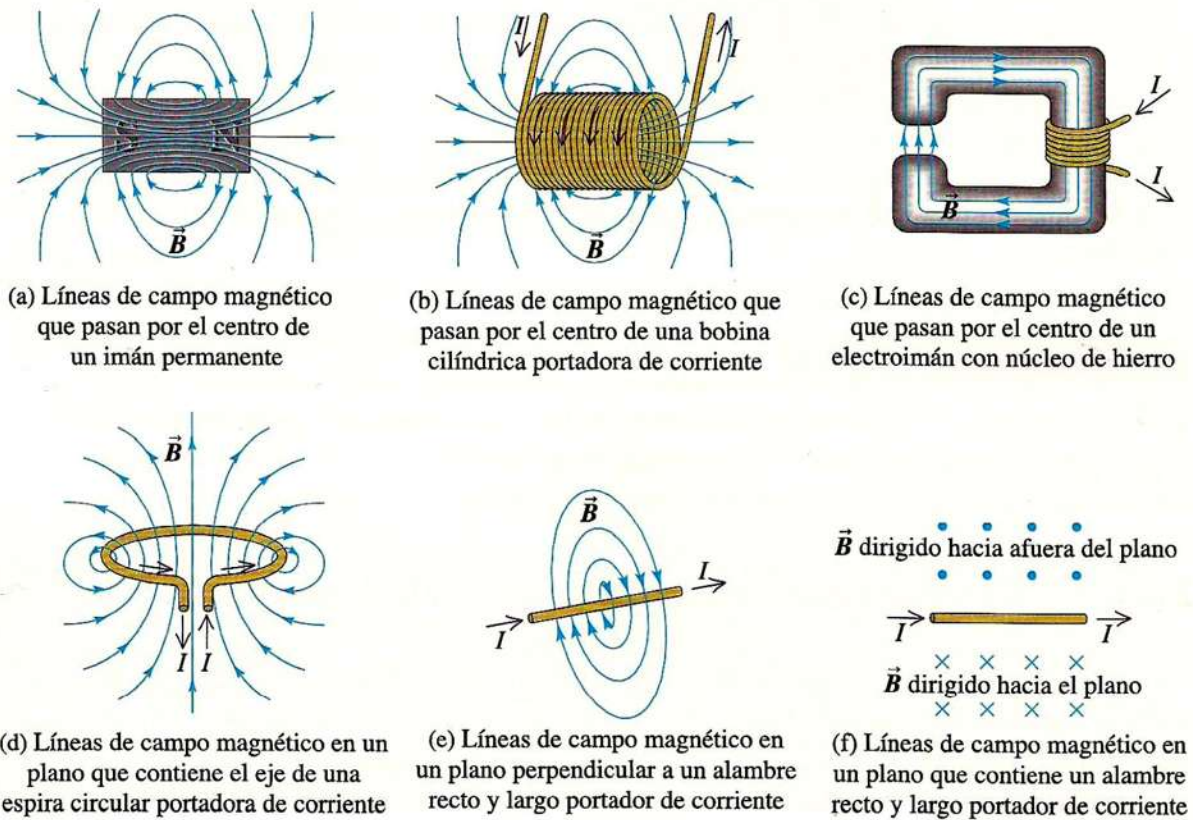


**Figura 2.4** La órbita de una partícula con campo magnético  $\vec{B}$  [22].

#### 2.4.1 *Movimiento de partículas con carga en un campo magnético.*

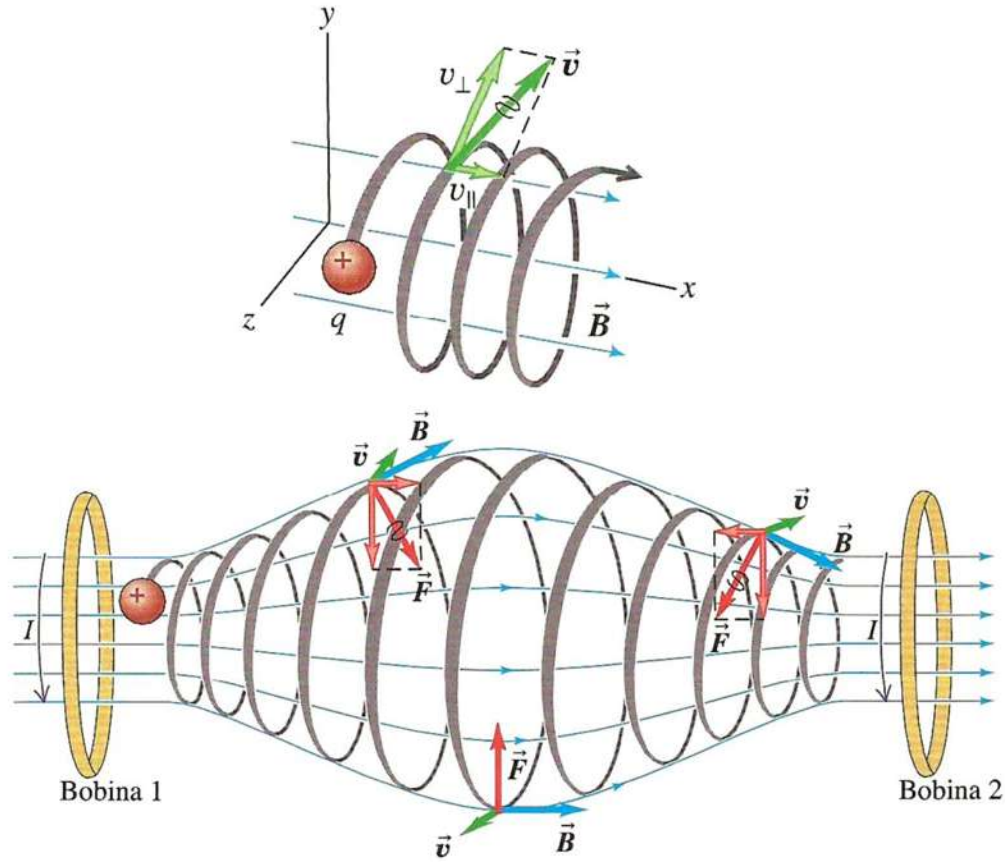
El movimiento de una partícula con carga bajo la sola influencia de un campo magnético siempre es con rapidez constante. Sobre este principio vemos que en la situación que se muestra en la **figura 2.5** las magnitudes tanto de  $\vec{F}$  como de  $\vec{v}$  son constantes. En puntos como en P y S las direcciones de la fuerza y la velocidad han cambiado como se indica, pero sus magnitudes respectivas son las mismas. Por consiguiente, la partícula se traslada bajo la influencia de una fuerza de magnitud constante que siempre forma un ángulo recto con la

velocidad de la partícula y vemos que la trayectoria de la partícula es un círculo, trazado con rapidez constante  $v$ .



**Figura 2.5** Líneas de campo magnético creadas por varias fuentes comunes de campo magnético [22].

De modo que cuando una partícula con carga tiene componentes de velocidad, tanto perpendiculares como paralelas a un campo magnético uniforme, la partícula describe una trayectoria helicoidal, además de que el campo magnético no realiza trabajo sobre la partícula y por lo tanto, la rapidez y la energía cinética de esta permanecen constantes, como se muestra en la **figura 2.6**. Para el caso del movimiento de una partícula con carga en un campo magnético no uniforme es más complejo muestra un campo producido por dos bobinas circundantes separadas por cierta distancia. Las partículas próximas a cualquiera de las bobinas experimentan una fuerza magnética hacia el centro de la región; las partículas que tienen la rapidez apropiada circulan repentinamente en espiral de un extremo de la región a otro y de regreso. Ya que las partículas con carga pueden quedar atrapadas en un campo magnético de este tipo, a este se le conoce como botella magnética. Esta técnica se utiliza para confinar plasmas muy calientes con temperaturas del orden de  $10^6$  K.



**Figura 2.6** Partícula con movimiento helicoidal en una botella magnética [22].

### 2.4.2 El magnetón de Bohr

El comportamiento magnético está determinado principalmente por la estructura electrónica del material, que es la que proporciona dipolos magnéticos, de manera que los átomos de los que se compone toda materia contienen electrones en movimiento, y estos electrones forman espiras de corriente microscópicas que producen campos magnéticos propios. En muchos materiales estas corrientes están orientadas al azar y no crean un campo magnético neto. Pero en ciertos materiales un campo externo (un campo generado por corrientes externas al material) puede provocar que estas espiras se orienten preferentemente con el campo, por lo que sus campos magnéticos se suman al campo externo y se dice entonces que el material está magnetizado [22].

La magnetización aumenta la influencia del campo magnético, permitiendo que se almacene mayor energía magnética que si el material no estuviera presente. Esta energía puede almacenarse permanentemente o temporalmente, y puede ser utilizada para realizar trabajo. Cada electrón en un átomo tiene dos momentos magnéticos, uno es simplemente la intensidad de campo magnético asociado con el electrón y es conocido como el magnetón de Bohr. Los momentos magnéticos se originan por el movimiento orbital del electrón alrededor del núcleo y por el giro del electrón sobre su propio eje o spin.

### **2.4.3 Magnetización, permeabilidad y campo magnético.**

Analizando la relación entre el campo magnético y la magnetización con una bobina de  $n$  vueltas, cuando pasa una corriente eléctrica a través de ésta, se produce un campo magnético  $H$  y la intensidad de este es dada por [24]:

$$H = \frac{nI}{l} \dots \dots \dots (2.3)$$

Donde  $n$  es el número de vueltas de la bobina,  $l$  es la longitud de la bobina (m) e  $I$  es la corriente (A). Las unidades de  $H$  son, por lo tanto, amperes-vuelta/m, o simplemente A/m.

Cuando se aplica un campo magnético en el vacío, se inducen líneas de flujo magnético. El número de líneas de flujo, conocido como intensidad de flujo o inductancia  $B$  está relacionado con el campo aplicado por:

$$B = \mu_0 H \dots \dots \dots (2.4)$$

Donde  $B$  es la inductancia,  $H$  el campo magnético y  $\mu_0$  es una constante conocida como la permeabilidad magnética en el vacío y sus unidades son 1 gauss/oersted o  $4\pi \times 10^{-7}$  weber/A·m (también conocida como Henry/m).

Cuando se coloca un material dentro de un campo magnético, la inductancia magnética se determina por la manera en la cual los dipolos magnéticos, inducidos y permanentes, interactúan con el campo. La inductancia es:

$$B = \mu H \dots \dots \dots (2.5)$$

Donde  $\mu$  es la permeabilidad del material en el campo. Si los momentos magnéticos refuerzan el campo aplicado, entonces  $\mu > \mu_0$ , creándose un mayor número de líneas de flujo que puedan realizar trabajo y se amplifica el campo magnético. Si los momentos magnéticos se oponen al campo, entonces  $\mu < \mu_0$ , de modo que es posible describir la influencia del material magnético en función de la permeabilidad relativa  $\mu_r$ , donde:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \dots \dots \dots (2.6)$$

La magnetización esta  $M$  representa el incremento en la inducción magnética debida al material del núcleo, por lo que podemos reescribir la inductancia de la siguiente forma:

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \dots \dots \dots (2.7)$$

La susceptibilidad magnética  $\chi$ , que es la relación entre la magnetización y el campo aplicado, proporciona la amplificación producida por el material:

$$\chi = \frac{M}{H} \dots \dots \dots (2.8)$$

#### 2.4.4 *Materiales magnéticos*

**Paramagnetismo:** En un átomo, la mayor parte de los momentos magnéticos orbitales y de espín de los electrones suman cero. De cualquier modo, en ciertos casos el átomo tiene un momento magnético neto. Cuando se coloca un material de esta clase en un campo magnético, el campo ejerce un momento de torsión sobre cada momento magnético y estos momentos de torsión tienden a alinear los momentos magnéticos con el campo, en la posición de energía potencial mínima. En esta posición. Las direcciones de las espiras de corriente son de tal naturaleza que se suman al campo magnético aplicado desde el exterior.

**Diamagnetismo:** Un campo magnético que actúa sobre un átomo, induce un dipolo magnético para todo el átomo, al influir en el momento magnético causado por los electrones en órbita. Estos dipolos se oponen al campo magnético, haciendo que la magnetización sea menor a cero. Este comportamiento, aporta una permeabilidad relativa de aproximadamente 0.99995 (o susceptibilidad negativa).

Ferromagnetismo: En estos materiales las intensas interacciones entre los momentos magnéticos atómicos los incitan a alinearse paralelamente unos a otros en regiones denominadas dominios magnéticos, incluso en ausencia de un campo externo. Cuando no existe un campo aplicado desde el exterior, las magnetizaciones están orientadas al azar. Pero cuando está presente un campo  $\vec{B}$  (generado por corrientes externas), los dominios tienden a orientarse paralelos al campo.

#### **2.4.5 Fenómeno de Magnetostricción.**

Si sobre un material ferromagnético en estado desmagnetizado se aplica un campo magnético, éste se magnetiza según la dirección de dicho campo. Simultáneamente al proceso de imanación, se produce un cambio de dimensiones del material, a este fenómeno se le conoce como magnetostricción.

Los cambios de dimensiones se producen en la dirección de aplicación de campo (magnetostricción longitudinal o de Joule), en la dirección perpendicular a la aplicación del campo (magnetostricción transversal) y cambios de volumen (magnetostricción de volumen).

El proceso de la magnetostricción está íntimamente ligado con el proceso de la magnetización; por lo tanto buscar el origen de la magnetostricción implica el estudio de la magnetización. Básicamente existen tres tipos de magnetostricción: magnetostricción espontánea, magnetostricción "ordinaria" y magnetostricción forzada [25].

##### **1. Magnetostricción espontánea**

La magnetostricción espontánea, corresponde con la etapa de magnetización espontánea y aparece cuando el material es enfriado por debajo del punto de Curie ( $T_c$ ), sin ningún campo magnético. Por encima de  $T_c$ , el material está en estado paramagnético y los spines están orientados aleatoriamente en el espacio. Debajo de  $T_c$  los spines de los átomos adyacentes se vuelven más o menos paralelos (magnetización espontánea). Al girar los spines, las órbitas de los electrones, que tienen una distorsión de la esfericidad, también lo hacen produciendo una deformación  $\Delta L$ , causando una magnetostricción espontánea con un valor igual a  $\Delta L/L$ , la magnetostricción espontánea es del orden de  $10^{-5}$ . Este fenómeno es debido al acoplamiento entre los spines y las órbitas de los electrones que les permiten girar al unísono.

## 2. Magnetostricción ordinaria

Si a un material en estado desmagnetizado se le aplica un campo magnético se produce una reorientación paulatina de los dominios en dirección del campo H exterior. Según aumenta H esta reorientación llega a ser total en el estado de saturación técnica. La deformación se produce fundamentalmente por dos mecanismos: el movimiento de las paredes de los dominios y rotación de los dominios; la mayor parte del cambio magnetostrictivo en longitud ocurre durante la rotación de dominios. A la deformación desde el estado desmagnetizado hasta el estado saturado se la conoce como magnetostricción ordinaria. Este tipo de magnetostricción no afecta a ningún cambio en el material, dado que el grado de orden del spin es el mismo, solo causa un reajuste de los dominios distorsionados por la magnetostricción espontánea.

## 3. Magnetostricción forzada

Si se sigue aumentando el campo H, se fuerza a los átomos a orientar su spin completamente en la dirección del campo. A esta etapa se la conoce como magnetostricción forzada y tendría un valor exactamente igual a la magnetostricción espontánea desde la temperatura ambiente hasta una temperatura del cero absoluto.

### **2.5 Principios de operación del proceso de soldadura (GMAW).**

El proceso GMAW puede ser operado con equipo semiautomático, o modos automáticos. Todos los metales comercialmente importantes tales como acero al carbono, acero de alta resistencia de baja aleación, acero inoxidable, aluminio, cobre, titanio, níquel y otras aleaciones se pueden soldar en todas las posiciones, con este proceso mediante la elección apropiada del gas de protección, el electrodo y las variables de soldadura.

Usos y ventajas: Las más importantes son las siguientes:

- (1) Es el único proceso de electrodo consumible que puede ser utilizado para soldar todos los metales y aleaciones comerciales.
- (2) GMAW supera la restricción de la longitud del electrodo limitada, encontrada con la soldadura por arco metálico protegido.

- (3) La soldadura se puede realizar en todas las posiciones, una característica que no se encuentra en la soldadura por arco sumergido.
- (4) Los índices de depósito son significativamente mayores que los obtenidos con la soldadura por arco metálico protegido.
- (5) Las velocidades de la soldadura son más altas que con la soldadura por arco metálico protegido, debido a la alimentación continua del electrodo y las tasas de deposición son más altas del metal de aporte.
- (6) Debido a que la alimentación de electrodo es continua, las soldaduras largas pueden ser depositadas sin paradas y arranques.
- (7) Cuando se utiliza la transferencia de rocío, una penetración más profunda es posible que con la soldadura por arco metálico protegido, lo que puede permitir el uso de pequeñas soldaduras de filete de resistencia equivalente.
- (8) La limpieza posterior a la soldadura que se requiere es mínima.

Limitaciones: Como en cualquier proceso de soldadura, existen ciertas limitaciones que restringen el uso de soldadura por GMAW. Algunas de éstas son las siguientes:

- (1) El equipo de soldadura es más complejo, más costoso, y menos portátil que la de SMAW.
- (2) GMAW es más difícil de utilizar en lugares difíciles de alcanzar porque la antorcha de soldadura es más grande que un soporte para (SMAW), y la antorcha de soldar debe estar cerca de la unión, entre 3/8 y 3/4 in. (10 y 19 mm), para asegurar que el metal de soldadura está adecuadamente protegido.
- (3) El arco de soldadura debe ser protegido contra corrientes de aire que dispersan el gas de protección. Esto limita las aplicaciones al aire libre a menos que mamparas protectoras se coloquen alrededor de la zona de soldadura.
- (4) Niveles relativamente altos de la intensidad del arco y calor irradiado, pueden resultar poco tolerables para el operario del proceso.

Con la protección rica en argón es posible producir un modo de transferencia muy estable de “rocío axial” libre de salpicaduras. Esto requiere el uso de corriente continua y un electrodo positivo (CDEP). El modo de transferencia por rocío resulta en un flujo altamente dirigido de

gotas discretas que son aceleradas por las fuerzas del arco a velocidades que superan los efectos de la gravedad. Debido a esto, el proceso, bajo ciertas condiciones, puede ser utilizado en cualquier posición. Debido a que las gotas son más pequeñas que la longitud del arco, no ocurren cortocircuitos, y las salpicaduras son insignificantes, si no totalmente eliminadas [26].

## **2.6 Influencia de los campos magnéticos en el arco eléctrico.**

El magnetismo tiene múltiples efectos en la soldadura por arco. Estos pueden ser beneficiosos o perjudiciales. Los campos magnéticos, ya sean inducidos o permanentes, interactúan con la corriente de arco para producir campos de fuerza que causan la desviación de arco, conocido comúnmente como soplo magnético. El soplo magnético, transferencia de plasma, y la transferencia de metal son algunas de las características del arco de soldadura que están fuertemente influenciadas por la presencia de campos magnéticos.

El flujo magnético es resultado de varias causas. Puede ser auto-inducido y asociado con la corriente de arco o producido por el magnetismo residual en el material que se está soldando. También puede ser producido por una fuente externa. Puesto que un arco de soldadura siempre tiene su propio campo magnético asociado, cualquier efecto de los campos magnéticos externos puede surgir como consecuencia de la interacción con el auto-campo.

Los efectos de los campos magnéticos externos sobre arcos de soldadura están determinados por la fuerza de Lorentz, que es proporcional al producto vectorial de la intensidad del campo externo y la corriente de arco. El efecto usual de los campos magnéticos externos en el arco eléctrico es causar la desviación del arco. En un sentido macroscópico y dentro de los límites de deflexión estable, un arco se comporta como un conductor flexible que tiene una rigidez elástica que resiste la fuerza de Lorentz en general. El arco se desvía en una curva suave desde un punto fijo en la punta del electrodo al metal base. La magnitud de la desviación del arco es proporcional a la intensidad del campo aplicado.

Campos magnéticos alternos causan que el arco oscile hacia atrás y adelante a través del eje de soldadura con una frecuencia igual a la del campo aplicado. Este fenómeno se utiliza ventajosamente en el proceso de soldadura por arco de tungsteno protegido por gas inerte del

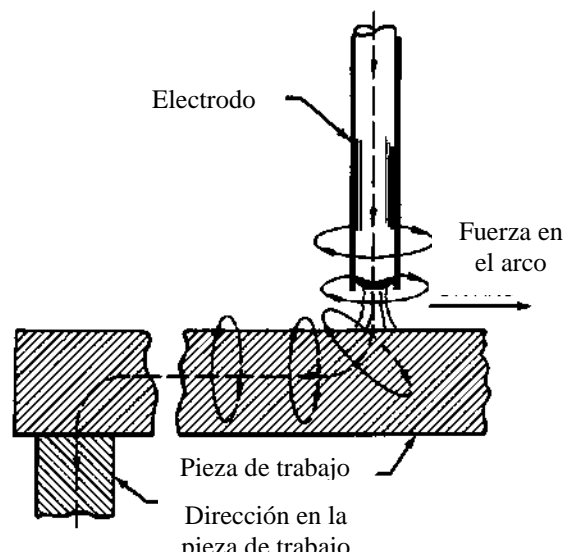
electrodo, en el que el arco se desvía de una manera controlada por el campo magnético alrededor del electrodo [27].

### 2.6.1 Soplo magnético

Bajo ciertas condiciones, el arco tiene una tendencia a ser dirigido por la fuerza desde el punto de soldadura, lo que hace difícil el producir una soldadura satisfactoria. Este fenómeno, denominado soplo magnético, es el resultado de perturbaciones magnéticas que rodean el arco de soldadura. En general, el soplo magnético es el resultado de las dos condiciones básicas siguientes:

1. El cambio en la dirección del flujo de corriente que entra en la pieza de trabajo y se dirige hacia el cable de trabajo.
2. La disposición asimétrica del material magnético alrededor del arco, una condición que existe normalmente cuando la soldadura se realiza cerca de los extremos de las piezas de trabajo ferromagnéticas.

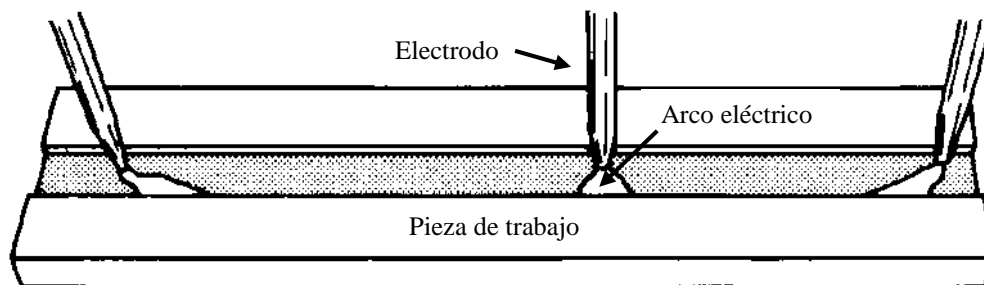
Aunque el soplo magnético no siempre puede ser eliminado, se puede controlar o reducir a un nivel aceptable mediante la adopción de estas dos condiciones en cuenta. La primera condición se ilustra en la **figura 2.7**. La línea de puntos traza la trayectoria de la corriente a través del electrodo, el arco y la pieza de trabajo. Líneas de fuerza magnética alrededor de la ruta actual. Las líneas de fuerza están representadas esquemáticamente como círculos concéntricos con el trayecto de la corriente. Se concentran en el interior de la curva en el recorrido de la corriente y son escasos en la curva exterior. En consecuencia, el campo magnético es mucho más fuerte en el lado del arco hacia la conexión de la pieza de trabajo que en el otro lado.



**Figura 2.7** Fuerza en el arco por el campo magnético inducido

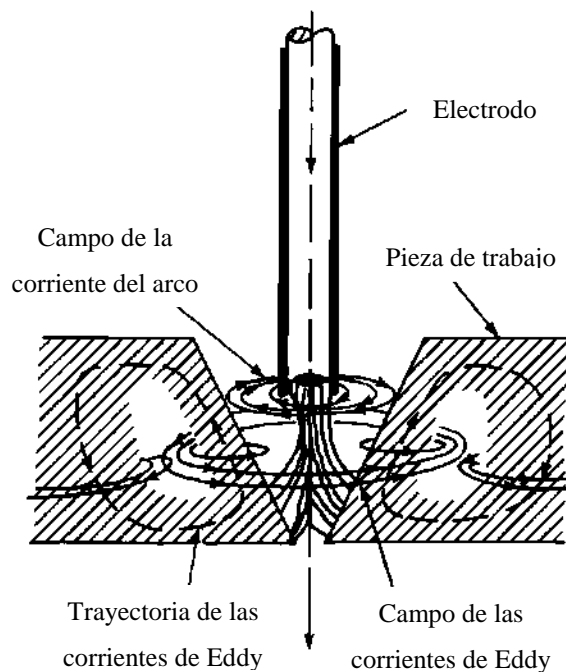
Además, según resultante de la localización del electrodo de la pieza [25]. está siempre en una dirección a de la conexión de la pieza produce una condición más favorable de soplo magnético hacia adelante.

La segunda condición nos dice que es mucho más fácil para el flujo magnético pasar a través de un material magnético que a través del aire. Por lo tanto, se concentra en el metal base de acero y tiene la distancia más corta de aire, que está entre los bordes biselados de la costura. Cuando el arco es cerca de un extremo de la costura, las líneas de flujo magnético se concentran más entre el arco y los extremos de las placas. El efecto resultante en el arco se muestra en la **figura 2.8**.



**Figura 2.8** Soplo magnético en los extremos de una pieza de trabajo Ferromagnético [25].

Como regla general, el material magnético alrededor del arco ejerce una fuerza sobre el arco hacia el mejor camino magnético. Durante la soldadura, la fuerza total que tiende a causar el soplo magnético es casi siempre una combinación de las dos fuerzas ilustradas en las **figuras 2.7 y 2.8**. Cuando se suelda con corriente alterna (CA), el efecto magnético sobre el arco se reduce por las corrientes parásitas inducidas en el trabajo, como se muestra en la **figura 2.9**. Resultados de baja tensión en un arco corto, más rígido que resiste arco golpe mejor que un arco largo voltaje más alto.



**Figura 2.9** Efecto de las corrientes de Eddy en la neutralización del campo magnético inducido por corriente alterna [25].

## 2.7 Aplicación de campos magnéticos en el proceso de soldadura.

Una de las soluciones recientes al problema que se ha estado abordando ha sido el efecto producido por campos magnéticos aplicados al arco eléctrico durante la soldadura de los aceros inoxidable austeníticos, estos campos han sido variados en intensidades desde 1 a 30 Teslas, pero también se han estudiado los efectos de campos magnéticos de baja intensidad en el rango de mT, los cuales también han reportado efectos interesantes y de relevancia en diversos aspectos de la soldadura de aceros inoxidable austeníticos así como en la transformación de fase en estado sólido. Watanabe y colaboradores [28], utilizando una soldadura por resistencia eléctrica y aplicando un campo magnético perpendicular a la

dirección del flujo de corriente, observaron que al aplicar la intensidad de campo magnético de 2T, encontraron salpicaduras alrededor del material fundido, atribullendole este fenómeno al exceso de corriente y a una insuficiente presión de los electrodos durante el proceso de soldadura.

Como anteriormente se describió, el efecto de dispersión fue causado por la interacción de campos magnéticos con el material fundido, tal interacción es conocida como fuerza de Lorentz, definiéndose como la fuerza ejercida sobre una partícula cargada en un campo magnético. La partícula experimentará una fuerza  $q[E]$  debido al campo eléctrico y una fuerza  $q[\vec{v} \times \vec{B}]$  debido al campo magnético. Las fuerzas combinadas dan la ecuación 1 correspondiente a la fuerza de Lorentz:

$$F_{EM} = q[\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}] \dots \dots \dots (2.9)$$

En el experimento realizado por Watanabe y colaboradores [28], en algunas muestras el campo magnético fue aplicado perpendicularmente a la dirección de la soldadura y en otros casos de manera paralela. En el caso de la aplicación perpendicular del campo, la fuerza de Lorentz resultante actuaba a lo largo de la superficie de la placa del material, mientras que cuando el campo se aplicaba de manera paralela la fuerza generada era muy pequeña, por lo que se considera despreciable.

De modo que en mayor o menor relevancia es importante observar que en la interacción de campos magnéticos, la forma en que es direccionado el campo magnético hacia el arco eléctrico genera diferentes efectos, ya sea aplicado de forma paralela, perpendicular o axial al arco eléctrico, aunque en el trabajo de Watanabe y colaboradores [28], determinaron que cuando se aplicó el campo magnético de manera perpendicular, el área del material líquido dispersado alrededor incrementaba a medida que lo hacia el campo magnético. En contraste al aplicar el campo de manera paralela, el área no se veía afectada, probando que dependiendo de la orientación del campo magnético se propician diversos resultados, de ello podemos identificar a la orientación del campo magnético como una variable importante en este tipo de investigaciones.

En resumen en todas las investigaciones actuales de interacción electromagnética, la fuerza de Lorentz es la piedra angular del fenómeno que afecta a la soldadura llevada a cabo bajo estas

condiciones de interacción electromagnética y ha generado toda una tendencia de investigación. A todas las técnicas encaminadas al control y mejora de la microestructura y propiedades de un material utilizando campos magnéticos se conocen como procesamiento electromagnético de materiales (EPM por sus siglas en inglés).

Ya que se aborda el fenómeno de la precipitación de carburos de cromo, como sus causas y efectos en la soldadura de aceros inoxidable austeníticos, y ya que se está hablando de soldadura, es relevante recordar que otro fenómeno que se presenta en este proceso y de gran importancia es la difusión que es uno de los factores dominantes en la formación de la microestructura. Sin embargo, la naturaleza de la difusión bajo la acción de un campo magnético no ha sido completamente comprendida. Debido a lo anterior, Fuji H. y colaboradores [29] llevaron a cabo un trabajo para determinar la difusividad del carbono en el hierro, de forma particular en el Fe- $\alpha$  bajo un campo magnético, ya que la difusión del carbono juega un papel sumamente importante en la conformación de la microestructura del acero, además de que el carbono y su gran afinidad por el cromo es el problema que se está tratando de solucionar.

Para llevar a cabo su experimento utilizaron un acoplamiento formado por una placa de hierro puro (99.9%) y una placa de acero eutectoide (Fe-0.87% C); ambas placas fueron sometidas a un tratamiento de recocido a 700 °C. El acoplamiento fue preparado utilizando soldadura por explosión. Posteriormente algunas muestras fueron introducidas en un horno eléctrico equipado con un magneto superconductor y se aplicó un tratamiento de recocido para propiciar la difusión. Las temperaturas del procedimiento fueron desde 577 hasta 927 °C, el campo magnético aplicado de 0-6 T. La dirección del campo magnético fue perpendicular a la interfase hierro-acero, es decir paralela a la dirección de difusión. Así que como se ha observado en la experimentación con campos magnéticos se reitera la relevancia en controlar la intensidad y orientación del campo magnético aplicado a la soldadura. Los perfiles de penetración del carbono del acero y el hierro fueron medidos por espectroscopía de masa por ionización secundaria (SIMS por sus siglas en inglés). La concentración de carbono de los conteos del análisis por SIMS fue evaluada como función de la distancia desde la interfase. Los coeficientes de difusión del carbono fueron determinados de acuerdo a la segunda ley de Fick:



campo magnético paralelo u axial, sin embargo, los resultados obtenidos con la aplicación de un campo magnético perpendicular son muy similares a los obtenidos mediante un modelo teórico.

Los átomos de carbono en Fe- $\gamma$  en fcc se sabe que solo ocupan los sitios octaédricos, a diferencia de Fe- $\alpha$  bcc. Por lo tanto, la configuración de la entropía de los átomos de carbono en el Fe- $\gamma$  no cambia aun si un campo magnético uniforme es aplicado. Los átomos vecinos para el carbono en el hierro están localizados en los sitios octaédricos a lo largo de la dirección (100) en el Fe- $\gamma$ . Sin embargo, la constante del volumen de la magnetostricción de las direcciones (100) Fe- $\gamma$  son conocidas y opuestas al Fe- $\alpha$ . En otras palabras, cuando un campo magnético uniforme es aplicado en una estructura fcc, esto tiene un efecto retardado en la difusión del carbono en el Fe- $\gamma$ .

Otro investigación dirigida a tratar de disminuir el efecto de sensibilización en los aceros inoxidables austeníticos debido a los procesos de soldadura fue el llevado a cabo por Curiel y colaboradores [1]. En tal trabajo se utilizaron placas de acero inoxidable 304 de 6 mm de espesor, tales placas fueron sometidas a un tratamiento de recocido de solubilizado a 1050 °C por una hora previo al procedimiento de soldadura. El tipo de soldadura fue GMAW y se utilizó un electrodo de aporte tipo ER309L. Además, algunas de las muestras fueron sometidas a campos magnéticos en el rango de 0 a 14.7 mT. La dirección del campo magnético aplicado fue paralela al electrodo. El grado de sensibilización ( $DOS=I_r/I_a$ ) fue obtenido mediante la técnica de ensayos electro químicos potenciostaticos de doble ciclo (DLEPR, por sus siglas en ingles).

Los resultados de las pruebas DLEPR mostraron que los especímenes soldados sin la presencia de un campo magnético presentaban mayores valores para la corriente de reactivación ( $I_r$ ), por lo tanto poseían un mayor grado de sensibilización. A medida que la intensidad del campo magnético aumentaba, el valor de  $I_r$  disminuía, y como consecuencia los valores del DOS también disminuían. Lo anterior indica claramente que la aplicación de un campo magnético de baja intensidad durante el proceso de soldadura GMAW reduce el DOS en la ZAT, objetivo que se desea lograr.

En un intento por entender las mejoras obtenidas en el estudio descrito anteriormente, es necesario tener en cuenta que en un proceso de soldadura con corriente directa electrodo

positivo o polaridad inversa, existe un campo magnético inherente que puede ser considerado perpendicular a la boquilla de soldadura. Si un campo magnético de baja intensidad es aplicado al mismo tiempo que se realiza la soldadura, en dirección paralela al electrodo de aporte, existirá una interacción electromagnética entre ambos campos magnéticos. Tal interacción producirá una vibración en los átomos, los cuales a su vez, se espera promoverán la difusión del cromo en distancias cortas. Adicionalmente, las maclas, las dislocaciones y la martensita  $\alpha'$  formadas durante el laminado en frío permiten una vía más rápida para la difusión del cromo.

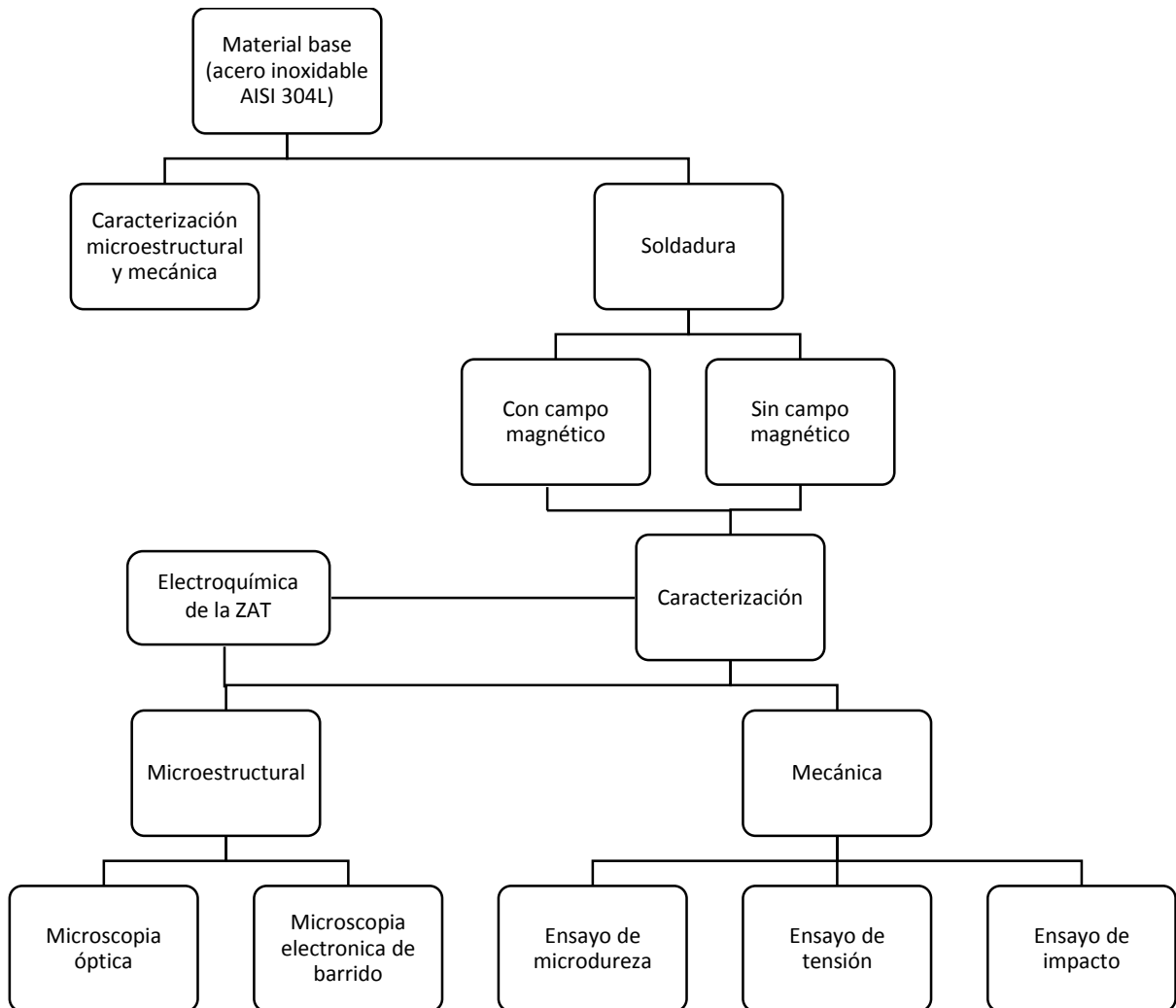
Otro aspecto importante que se debe tomar en cuenta es el efecto de la interacción electromagnética en los átomos de carbono. Es muy probable que la alta difusividad de los átomos de carbono también fuese mejorada por la vibración y se homogenizará la matriz de austenita, eliminando de esta forma la segregaciones de carbono en los límites de grano [1]. Aunque esto de momento aún es una teoría del fenómeno, ya que como se ha venido mencionando de momento aún no se comprende en su totalidad el fenómeno que propicia estos cambios en la aplicación del campo magnético perpendicular, pero la explicación propuesta por Curiel y colaboradores [1] sobre la disminución de la segregación de carbono en los límites de grano es similar a la dada por Fuji H. y colaboradores [29], sin embargo divergen sobre el papel del campo magnético en la difusión del carbono, pues Curiel y colaboradores sostienen que la difusividad del C se mejora contrario a lo propuesto por Fuji H. y colaboradores. No es posible hacer una comparación concluyente entre ambos trabajos pues la diferencia de magnitud entre los campos magnéticos aplicados es muy grande, tomando en cuenta que este es un factor de gran relevancia en la aplicación de campos magnéticos.

De esto se puede observar claramente que dentro de las variables más relevantes en la aplicación de campos magnéticos en la soldadura esta la intensidad y la orientación con la que son aplicados, y otro factor de interés para el presente trabajo en aceros inoxidable austeníticos es la cantidad de carbono presente, ya que su gran afinidad por el cromo es la causante de toda la problemática en la soldadura de estos aceros.

## CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

### 3.1 Desarrollo experimental.

La secuencia utilizada para llevar a cabo la fase experimental de este proyecto, fue de acuerdo a como se describe en la **figura 3.1** y a la subsecuente lista de actividades.



**Figura 3.1** Esquema del desarrollo experimental.

La siguiente lista enumera la secuencia de las principales actividades.

1. Caracterización mecánica y metalúrgica del acero comercial AISI 304L.
2. Preparación y soldadura del acero inoxidable 304L, aplicando un campo magnético perpendicular opuesto con intensidades de 1, 2, 3 mT, y sin campo.
3. Caracterización de las uniones soldadas mediante ensayos mecánicos y metalográficos.
  - a) Caracterización microestructural mediante microscopía óptica y de barrido.
  - b) Caracterización mecánica mediante microdureza, tensión e impacto.
  - c) Caracterización electroquímica de la ZAT de las uniones soldadas.

### 3.2 Equipos.

Los equipos más relevantes utilizados en la experimentación se enlistan a continuación.

- Banco metalográfico marca Nikon con una capacidad de 50, 100, 200, 500 y 1000 magnificaciones.
- Microscopio electrónico de barrido Jeol.
- Microdurómetro Vickers marca Mitutoyo Autovick HM-200.
- Máquina de soldar modelo DELTAMIG 652 marca Infra.
- Gausímetro manual con capacidad de 0 a 20 mT marca F.W. Bell 5100.
- Equipo de corriente alterna y corriente directa utilizado para detección de fallas superficiales mediante partículas magnéticas con una capacidad de corriente de 0 a 2000 A marca Parker.
- Máquina universal Zwick/ Roell Z100 con una capacidad máxima de 100 kN.
- Potenciostato Solartron SI1280B.

### 3.3 Materiales.

- Acero inoxidable austenítico AISI 304L de espesor medio (6.3 mm).
- Electrodo ER308LSi, de 1.6 mm de diámetro.

Las composición química nominal máxima y la composición reportada en el certificado de inspección entregado por el proveedor para el material base [30], así como la composición del electrodo de aporte se muestran en la **tabla 1**. Además en la **figura 3.2** se muestra el

diagrama de Schaeffler, en el cual introduciendo el Cr y Ni equivalente del material base y el electrodo utilizado, sabemos que el material base se encuentra en una zona donde se predice el % de ferrita  $\delta$  y el electrodo está en una región de austenita y ferrita.

**Tabla 1** Composición química de los materiales.

Materiales		Composición química de los materiales en % peso							
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
Nominal [9].	AISI 304L	0.03	2	0.045	0.03	1	18-20	8-12	-----
Certificado de inspección	AISI 304L	0.025	1.25	0.027	0.006	0.34	18.11	8.06	0.26
Electrodo	ER308LSi	0.03	1-2.5	0.03	0.03	0.95	19.5	9.5	0.75

Las ecuaciones para obtener el porcentaje de cromo y níquel equivalentes para identificar el contenido de ferrita en el diagrama de Schaeffler son las siguientes:

$$Ni_{Eq} = (Ni + 30C + 0.5Mn) \dots \dots \dots (3.1)$$

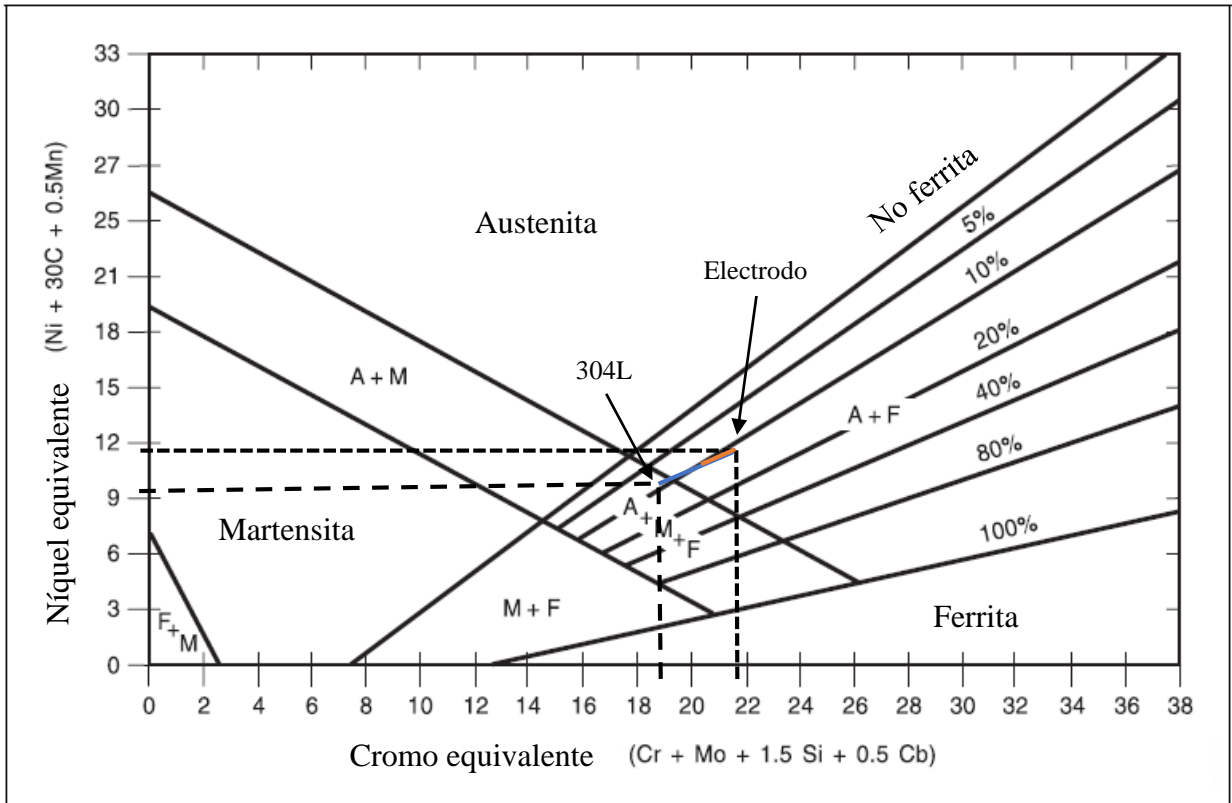
$$Cr_{Eq} = (Cr + Mo + 1.5Si + 0.5Nb) \dots \dots \dots (3.2)$$

Sustituyendo los datos requeridos en las ecuaciones se obtienen los valores siguientes:

Material base;  $Cr_{Eq} = 18.88$  y  $Ni_{Eq} = 21.6$ .

Electrodo;  $Cr_{Eq} = 21.68$  y  $Ni_{Eq} = 11.65$

De esta manera se puede predecir que la unión debe presentar ferrita en un rango de 10% dependiendo de la cantidad aportada por el material base y el electrodo, considerando un porcentaje de dilución de un 45% para el proceso de soldadura GMAW.



**Figura 3.2** Diagrama de Schaeffler.

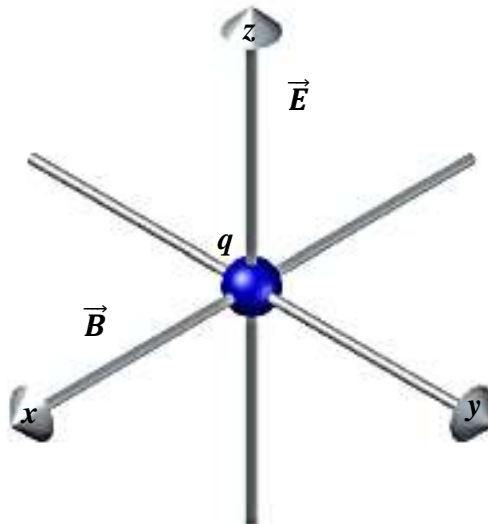
### 3.4 Metodología.

Previo al desarrollo experimental fue llevado a cabo un análisis para describir el principio físico en el cual está basado este proyecto de investigación, este trabajo es parte de un proyecto más amplio, que pretende estudiar el uso de la orientación de campos magnéticos de baja intensidad aplicados durante el proceso de soldadura, de modo que el desarrollo de las siguientes ecuaciones, propuestas para describir el comportamiento de los iones positivos en el proceso de soldadura fueron realizadas por Rafael Cortez y colaboradores [31] en el equipo de trabajo.

La fuerza de Lorentz se define como la fuerza que experimenta una partícula en movimiento debido a la influencia de un campo electromagnético, **figura 3.3**. Su representación matemática es la siguiente:

$$F_{EM} = q[\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}] \dots \dots \dots (3.3)$$

Donde  $F_{EM}$  (N) es la fuerza electromagnética,  $q$  (C) la carga de la partícula,  $\vec{E}$  (N/C ó V/m) el campo eléctrico,  $\vec{v}$  (m/s) la velocidad de la partícula y  $\vec{B}$  (mT) el campo magnético.



**Figura 3.3** Partícula con carga positiva que se mueve con una velocidad  $v$ , que pasa por una región donde hay campos magnéticos y eléctricos perpendiculares entre sí.

Realizando las operaciones correspondientes y desarrollando los productos vectoriales para una disposición como la de la **figura 3.3** se tiene:

$$F_{EM} = q \left[ Ei + \begin{vmatrix} i & j & k \\ 0 & v_y & v_z \\ -B & 0 & 0 \end{vmatrix} \right] \dots \dots \dots (3.4)$$

$$F_{EM} = q [Bv_zj + (E - Bv_y)k] \dots \dots \dots (3.5)$$

Igualando esta ecuación con la segunda ley de Newton se tiene:

$$m[a_{xi} + a_{yj} + a_{zk}] = q [Bv_zj + (E - Bv_y)k] \dots \dots \dots (3.6)$$

Igualando componente por componente:

$$ma_x = 0; \quad ma_y = qBv_z; \quad ma_z = q(E - Bv_y) \dots \dots \dots (3.7)$$

Resolviendo para la aceleración se tiene:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{qB}{m} \frac{\partial z}{\partial t} \dots \dots \dots (3.8)$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{qB}{m} \left[ \frac{E}{B} - \frac{\partial y}{\partial t} \right] \dots \dots \dots (3.9)$$

Donde  $w = \frac{qB}{m} = \text{frecuencia}$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = w \frac{\partial z}{\partial t} \dots \dots \dots (3.10)$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = w \left[ \frac{E}{B} - \frac{\partial y}{\partial t} \right] \dots \dots \dots (3.11)$$

Al derivar la ecuación 7.1 respecto del tiempo se tiene

$$\frac{\partial^3 z}{\partial t^3} = -w \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \dots \dots \dots (3.12)$$

Combinando ambas ecuaciones se obtiene:

$$\frac{\partial^3 z}{\partial t^3} + w^2 \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \dots \dots \dots (3.13)$$

Como se puede observar, es una ecuación diferencial lineal de tercer orden cuya solución general es:

$$z(t) = A \cos(wt) + C \sin(wt) + D \dots \dots \dots (3.14)$$

Derivando respecto del tiempo

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -A w \sin(wt) + C w \cos(wt) \dots \dots \dots (3.15)$$

Volviendo a derivar respecto del tiempo

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = -Aw^2 \cos(wt) - Cw^2 \sin(wt) \dots \dots \dots (3.16)$$

Sustituyendo este valor en (3.11) se tiene:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{E}{B} - \frac{1}{w} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{E}{B} + Aw \cos(wt) + Cw \sin(wt) \dots (3.17)$$

Integrando respecto del tiempo

$$y(t) = \frac{E}{B}t + A \sin(wt) - C \cos(wt) + F \dots \dots \dots (3.18)$$

Las constantes A,C,D y F se determinan de acuerdo a las condiciones de barrido y substituyen a en las soluciones y se obtiene:

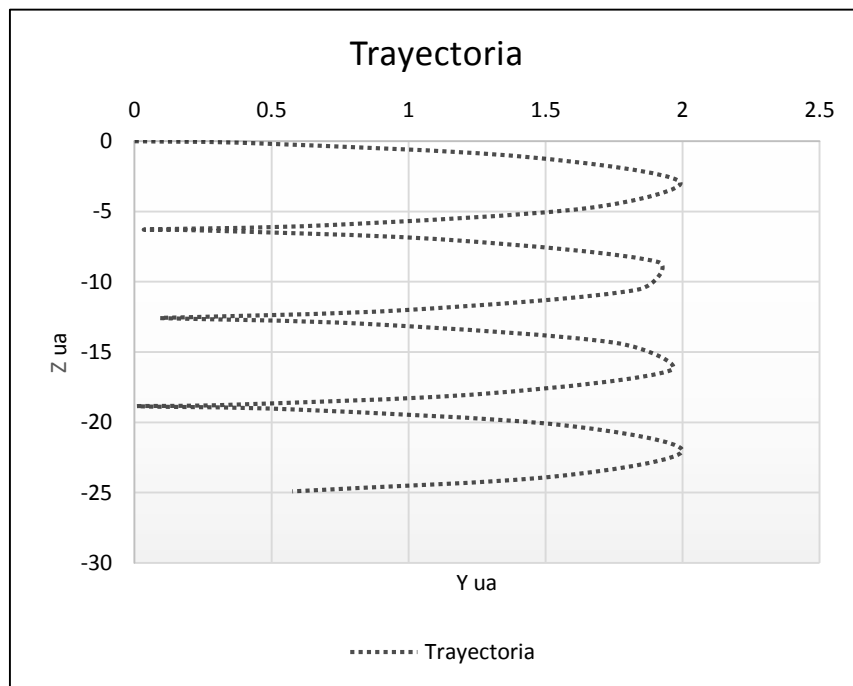
$$y(t) = \frac{1}{w} \frac{E}{B} [wt - \sin(wt)] \dots \dots \dots (3.19)$$

$$z(t) = \frac{1}{w} \frac{E}{B} [1 - \cos[wt]] \dots \dots \dots (3.20)$$

Esto demuestra la trayectoria helicoidal que describe la partícula debido a la aceleración que sufre en las

y z como en la

direcciones y la mostrada **figura 3.4.**



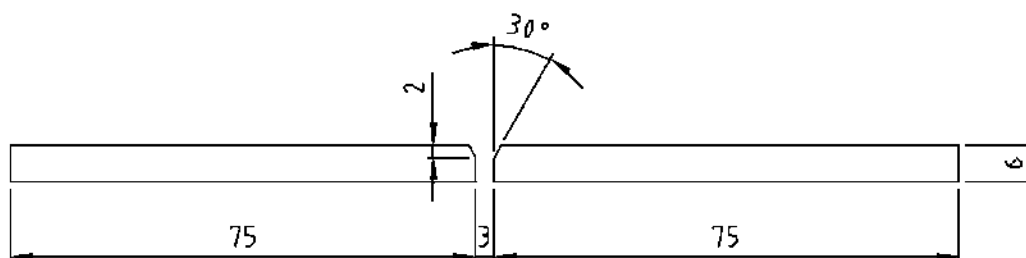
**Figura 3.4** Trayectoria helicoidal de partícula cargada.

### 3.5 Caracterización mecánica y metalúrgica del acero inoxidable austenítico comercial 304L.

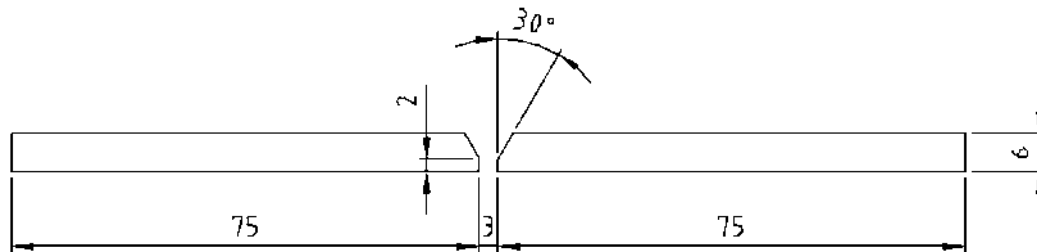
Para caracterizar el material con el cual se trabajó se prepararon probetas para realizar ensayos de tensión, microdureza, así como también se efectuó un análisis metalográfico. Para preparar el material se aplicaron técnicas de metalografía de estándar con papel de carburo de silicio de diferentes granulometrías (número de partículas en 1 pulg<sup>2</sup>) de 180 a 1500 y un subsecuente pulido a espejo con pasta de diamante de 6 y 3 micras, posteriormente se sometieron a un ataque químico para revelar la microestructura, utilizando 8.43 mL HCl + 2.8 mL HNO<sub>3</sub> + 3.75 mL etanol, finalmente se observó la microestructura en un banco metalográfico marca Nikon con capacidad de hasta 1000 magnificaciones.

### 3.6 Preparación de las uniones.

Para realizar las uniones se prepararon placas con una geometría rectangular de 75 x 150 mm, y un espesor de 6.3 mm. Para acondicionar el material a dichas dimensiones, se dispuso de una sierra cinta tipo RF 812N y mediante una fresadora se prepararon dos tipos de juntas con preparación en simple “V”, que son esquematizadas en las **figuras 3.5 y 3.6** con sus respectivas dimensiones para cada preparación.



**Figura 3.5** Preparación en simple “V” con talón de 4.3 mm, cotas en mm.



**Figura 3.6** Preparación en simple “V” con talón de 2 mm, cotas en mm.

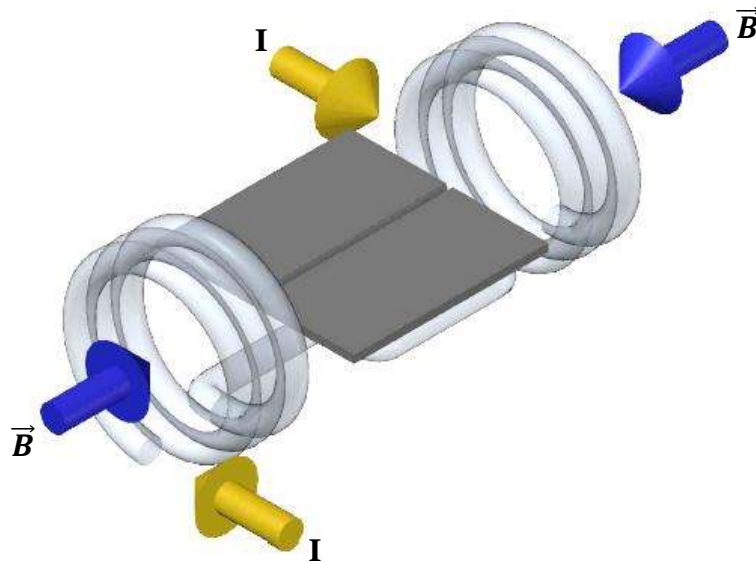
El diseño seleccionado en la preparación de las uniones en simple “V” en la parte superior como se muestra en la **figura 3.5**, en conjunto con el gas de protección utilizado (98% Ar, 2% O<sub>2</sub>) y la distancia de separación de la unión de 3 mm, ayudan a que el material fundido pueda penetrar adecuadamente en todo el espesor del material, en comparación con la preparación mostrada en la **figura 3.6** que es una preparación típica [32].

### 3.7 Procedimiento para la unión soldada.

Las uniones soldadas del acero inoxidable austenítico 304L fueron fabricadas con el proceso de soldadura GMAW y un electrodo ER308LSi de 1.6 mm de diámetro, como material de aporte, y para la protección se implementó un flujo de gas de 23.5 (L/min) de la mezcla (98% Ar, 2% O<sub>2</sub>). Estas fueron condiciones fijas en todas las uniones efectuadas y los cambios radicaron en la intensidad del campo magnético perpendicular opuesto.

Para el proceso de soldadura se contó con un equipo marca Infra modelo DELTAMIG 652 que entrega una corriente máxima de 650 A, con una eficiencia del 60 %, un potencial de 50 V a circuito abierto y un potencial de trabajo de 0 a 44 V a plena carga. Para aplicar el campo magnético se dispuso de un equipo de corriente alterna y corriente directa utilizado para detección de fallas superficiales mediante partículas magnéticas con una capacidad de corriente de 0 a 2000 A, la cual cuenta con un cable de 18.5 mm de diámetro con el que se formó una bobina de 3 espiras, con un diámetro interno de 10 cm para las espiras y a una

separación de 2.5 cm de la preparación a soldar. Con estas condiciones las bobinas fueron posicionadas de manera perpendicular al arco eléctrico y paralelas a la dirección de la soldadura, con una orientación en sentido opuesto una de la otra, lo cual resulta en un campo magnético perpendicular opuesto y con intensidades de 1, 2, 3 mT. En la **figura 3.7** se ilustra la forma de cómo se aplicó el campo magnético perpendicular opuesto al arco eléctrico.



**Figura 3.7** Esquema del arreglo para aplicación de campo magnético perpendicular al arco eléctrico.

### 3.8 Caracterización metalográfica y mecánica de las uniones soldadas.

En la **tabla 2** se encuentran las variables operativas bajo las cuales se llevó a cabo la experimentación, de cuatro diferentes condiciones de trabajo, para definir algunos parámetros de la experimentación se consultó el proceso de soldadura GMAW en el manual de la AWS [26]. Es evidente que las variables operativas usadas no son ajustables a una norma que se pueda consultar, de modo que la consulta del manual fue solo un apoyo, para seleccionar valores coherentes de las variables operativas para el proceso GMAW, pero cabe mencionar que ya que el uso de campos magnéticos en soldadura actualmente está en etapas muy prematuras, aún no se conocen las variables operativas óptimas para ejecutar uniones bajo la

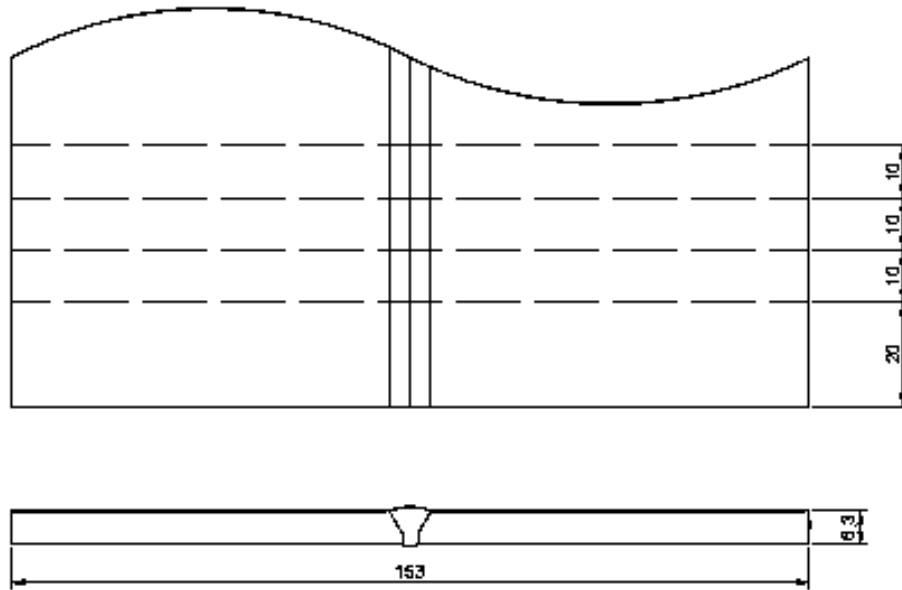
aplicación de un campo magnético de baja intensidad y es posible que los valores usados sean los más cercanos a los óptimos para lograr las mejores uniones.

**Tabla 2** Variables operativas de cada condición de unión.

<b>Probeta</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Voltaje (V)</b>	20.8	20.3	20.4	20.3
<b>Intensidad de corriente (A)</b>	320	340	340	345
<b>Velocidad de alimentación del electrodo (mm/s)</b>	50	50	50	50
<b>Velocidad de avance (mm/s)</b>	3.5	3.5	3.5	3.5
<b>Intensidad del campo magnético (mT)</b>	3	2	1	Sin campo magnético
<b>Preparación de la unión</b>	Simple “V” con talón de 4.3 mm	Simple “V” con talón de 4.3 mm	Simple “V” con talón de 4.3 mm	Simple “V” con talón de 2 mm
<b>Flujo de gas (L/min)</b>	23.59	23.59	23.59	23.59

### 3.9 Caracterización óptica.

Para caracterizar las uniones soldadas se cortaron probetas en forma transversal a la soldadura como se muestra en la **figura 3.8**. Tanto el material base, así como las uniones soldadas fueron obtenidas bajo la misma metodología, subsecuentemente se llevó a cabo la preparación utilizando técnicas de metalografía estándar, para acondicionar y revelar las microestructuras de las probetas y finalmente se observaron y obtuvieron las imágenes pertinentes en el banco metalográfico.



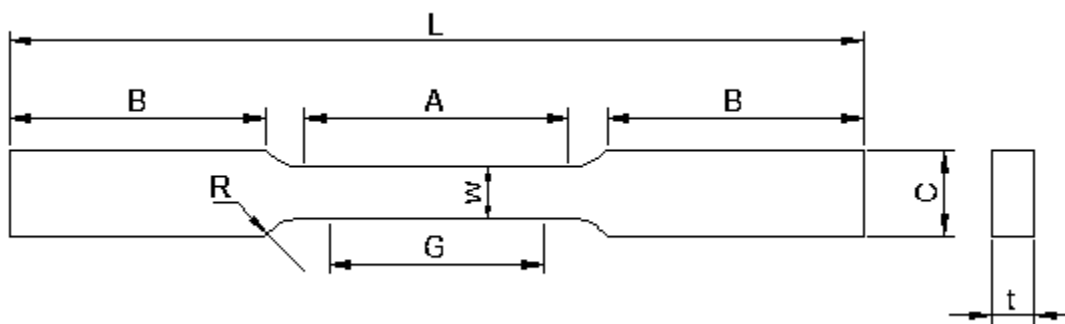
**Figura 3.8** Forma de cortar el material para la caracterización metalográfica.

### 3.10 Caracterización por microscopía óptica y de barrido.

Se realizó la caracterización de las fracturas resultantes en las probetas sometidas a los ensayos de tensión e impacto mediante MEB con el fin de analizar el tipo y morfología de las fracturas, así como examinar las diferencias en el comportamiento mecánico, entre el proceso de soldadura tradicional y las uniones con la aplicación de campos magnéticos de baja intensidad. La discusión correspondiente al análisis de los datos obtenidos es analizada más adelante en la sección de resultados preliminares.

### 3.11 Ensayo mecánico de tensión.

Para efectuar este ensayo se prepararon probetas de acuerdo a la norma ASTM E8M-04 [33] con la forma descrita en la **figura 3.9** (especímenes pequeños) y las dimensiones que muestra la **tabla 3**. El equipo que se utilizó para llevar a cabo el ensayo fue una maquina universal Zwick/ Roell Z100 que posee una capacidad máxima de 100 kN y se realizó a una velocidad de desplazamiento de 6 mm/min.



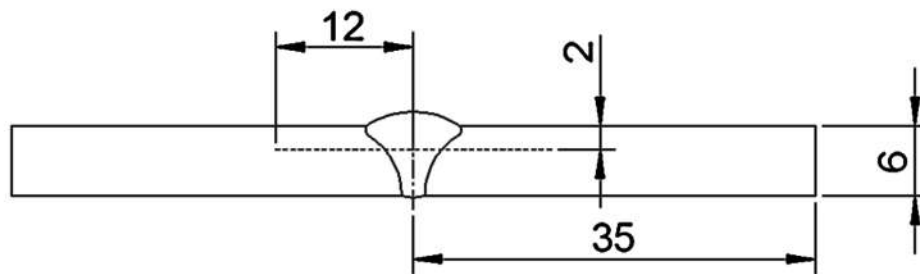
**Figura 3.9** Probeta de tensión bajo la norma ASTM E8M-04.

**Tabla 3** Dimensiones para las probetas para el ensayo de tensión.

Norma ASTM E8M-04	Especímenes tipo estándar (unidades en mm)		Especímenes pequeños (unidades en mm)
G.- Longitud calibrada	200 ± 0.2	50 ± 0.1	25 ± 0.1
W.- Ancho	40 ± 2	12.5 ± 0.2	6 ± 0.1
T.- Espesor	Espesor del material		
R.- Radio del filete	25	12.5	6
L.- Longitud total	450	200	100
A.- Longitud de la sección reducida	225	57	32
B.- Longitud de la sección de agarre	75	50	30
C.- Ancho de la sección de agarre	50	20	10

### 3.12 Ensayo de microdureza.

El ensayo se realizó utilizando un microdurómetro Vickers. Se efectuó un perfil en forma de línea recta para el barrido, situado a 2 mm de la parte superior de la probeta y extendido 12 mm hacia ambos sentidos en el eje horizontal a partir del eje vertical en el centro del cordón de soldadura como se ilustra en la **figura 3.10**, la separación entre cada una de las indentaciones en cada perfil fue de 250  $\mu\text{m}$  y la carga aplicada fue de 100 g, con la excepción de indentaciones hechas específicamente en la interface de la soldadura.



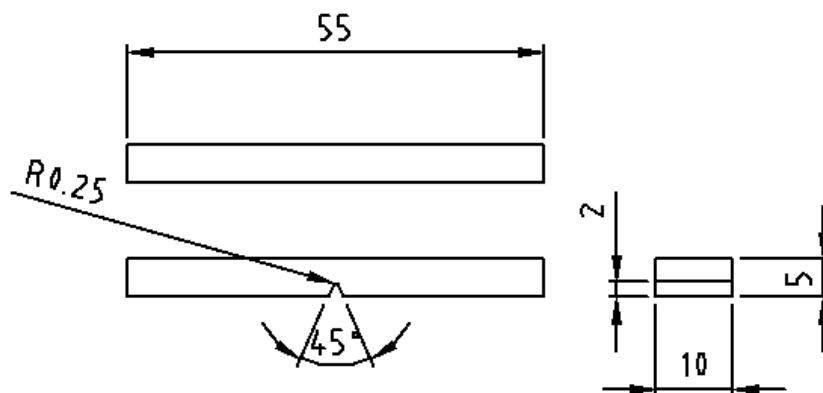
**Figura 3.10** Representación esquemática de la zona donde se medirán los perfiles de microdureza.

### 3.13 Ensayo de impacto.

Se realizó un ensayo de impacto de tipo “Charpy”, para el cual se tomaron las probetas de las zonas de interés en las uniones soldadas, las cuales comprenden la ZAT y el cordón de la soldadura de acuerdo a la norma ASTM E23-02a [34] para un espesor reducido (para ensayo Charpy) con la geometría mostrada en la **figura 3.11** (cotas en mm). Para realizar el ensayo se utilizó

máquina  
Charpy  
TINUS

una  
de péndulo  
marca  
OLSEN.



**Figura 3.11** Probeta para ensayo de impacto bajo norma ASTM E23-02A.

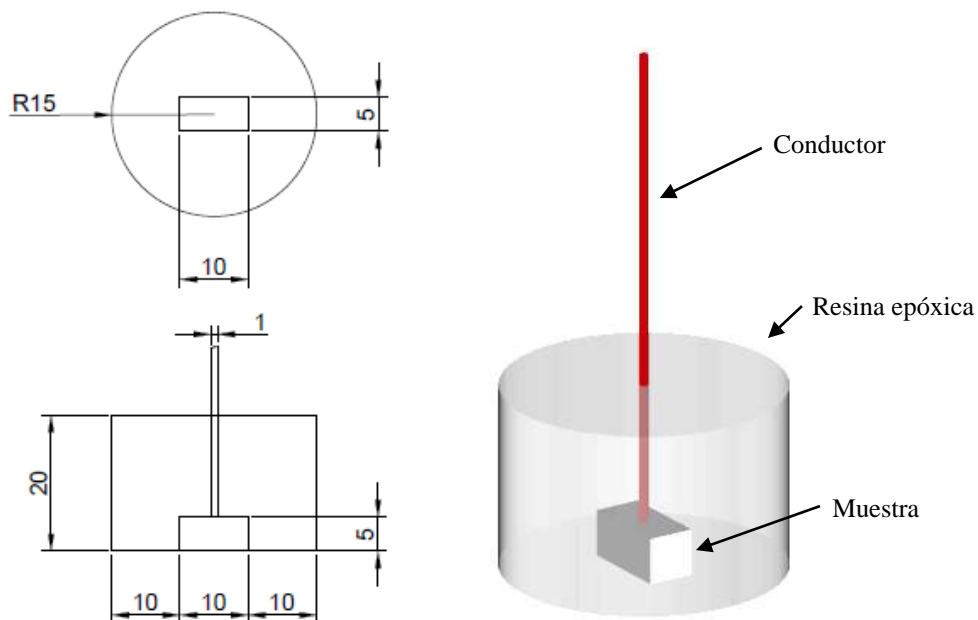
### **3.14 Caracterización electroquímica de la ZAT.**

Las probetas fueron cortadas con forma rectangular de 10X5 mm y un espesor de 5 mm. Posteriormente, se procedió a encapsular la muestra en una resina epóxica en moldes con forma de cilindro, adicionando un cable de cobre conductor, de manera que al sumergir la muestra en la solución ácida, solo la superficie de interés en la muestra es expuesta para ser evaluada durante la prueba como se muestra en la **figura 3.12**. Una vez encapsuladas las probetas la superficie a evaluar fue lijada con papel de carburo de silicio de granulometría (número de partículas en 1 pulg<sup>2</sup>) 180 a 1500 y pulida con pasta de diamante de 6 y 3 micras para tener una superficie adecuada para microscopia óptica de barrido, posterior al trazado de las curvas potenciodinámicas.

El equipo utilizado fue un potenciostato-galvanostato marca Solartron SI1280B (potenciostato programable), mediante una computadora y el software corrware correspondiente a este equipo. La caracterización se realizó mediante el trazado de las curvas potenciodinámicas de doble ciclo para lo cual se utilizó una solución de 0.5 M (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) + 0.01 M (KSCN), un electrodo de referencia de calomel saturado, una barra de grafito como electrodo auxiliar y las muestras fueron utilizadas como electrodo de trabajo, para poder formar una celda electroquímica convencional y las pruebas se efectuaron a una velocidad de barrido de 2 mV/s. El proceso constó de cortar probetas paralelas al cordón de soldadura a tres milímetros de la línea de fusión hacia la ZAT donde se alcanza una temperatura de 650°C.

La prueba consiste en polarizar anódicamente (activación) la muestra partiendo del potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) que fluctuó sobre  $-450$  mV, incrementando el  $E_{corr}$  hasta valores positivos que completan un ciclo, en el transcurso de este proceso el material primero sufre corrosión generalizada, después inicia la formación de una película pasiva hasta que toda la superficie está protegida por esta, en la siguiente etapa se rompe esta película protectora e inicia un ataque que produce corrosión localizada y así completando un ciclo. Después se invierte el sentido de polarización a catódico para regresar hasta el  $E_{corr}$  (reactivación), lo que conlleva a otro ciclo con las mismas etapas antes mencionadas.

Lo anterior se efectuó con la finalidad de determinar si existe o no modificación debido al fenómeno de la sensibilidad (precipitación de carburos de cromo en la ZAT), los cuales precipitan y crecen debido al ciclo térmico de soldadura (en el rango de  $450$  a  $850$  °C), en los procesos de soldadura tradicional y comparar el comportamiento electroquímico de la soldadura tradicional, con la que fue elaborada con la interacción de campos magnéticos de baja intensidad, con los cuales se espera propiciar el fenómeno de difusión de corto alcance del Cr en las zonas empobrecidas alrededor de los carburos precipitados, evitando con esto la corrosión intergranular de los aceros inoxidable austeníticos después de la soldadura.

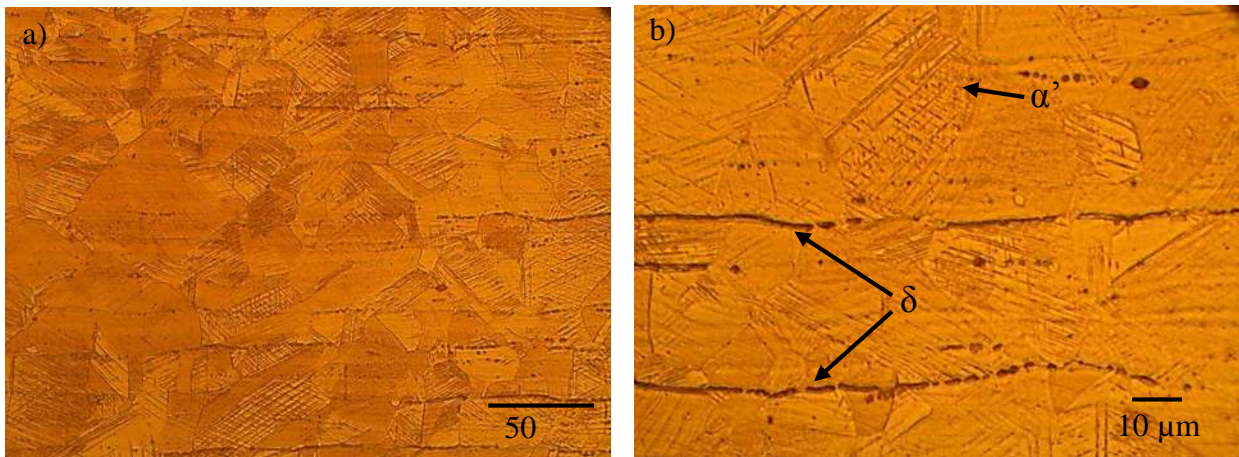


**Figura 3.12** Ilustración del encapsulado de las muestras para la caracterización electroquímica (cotas en mm).

## CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

### 4.1 Micrografías del material base.

El acero inoxidable 304L, es un acero con una matriz de austenita como se muestra en la **figura 4.1a y b**, que como se sabe no es magnética, sin embargo también es posible observar listones de ferrita  $\delta$ , que si es magnética y además de que cuenta con la presencia de pequeños vestigios de martensita que puede volver al material parcialmente magnético. Aunque la martensita no es propia de un acero inoxidable austenítico, esta se hace presente al someter estos aceros a una deformación en frío ya sea por alguno de los procesos típicos de fabricación como el laminado o bien durante el proceso de pulido. La presencia de microestructuras magnéticas hace más susceptible al material a cambiar de forma ya sea por dilatación o contracción al interactuar con un campo magnético, fenómeno conocido como



**Figura 4.1** Micro estructura del material base (acero inoxidable austenítico 304L): a) a 500X, b) a 1000X.

magnetostricción.

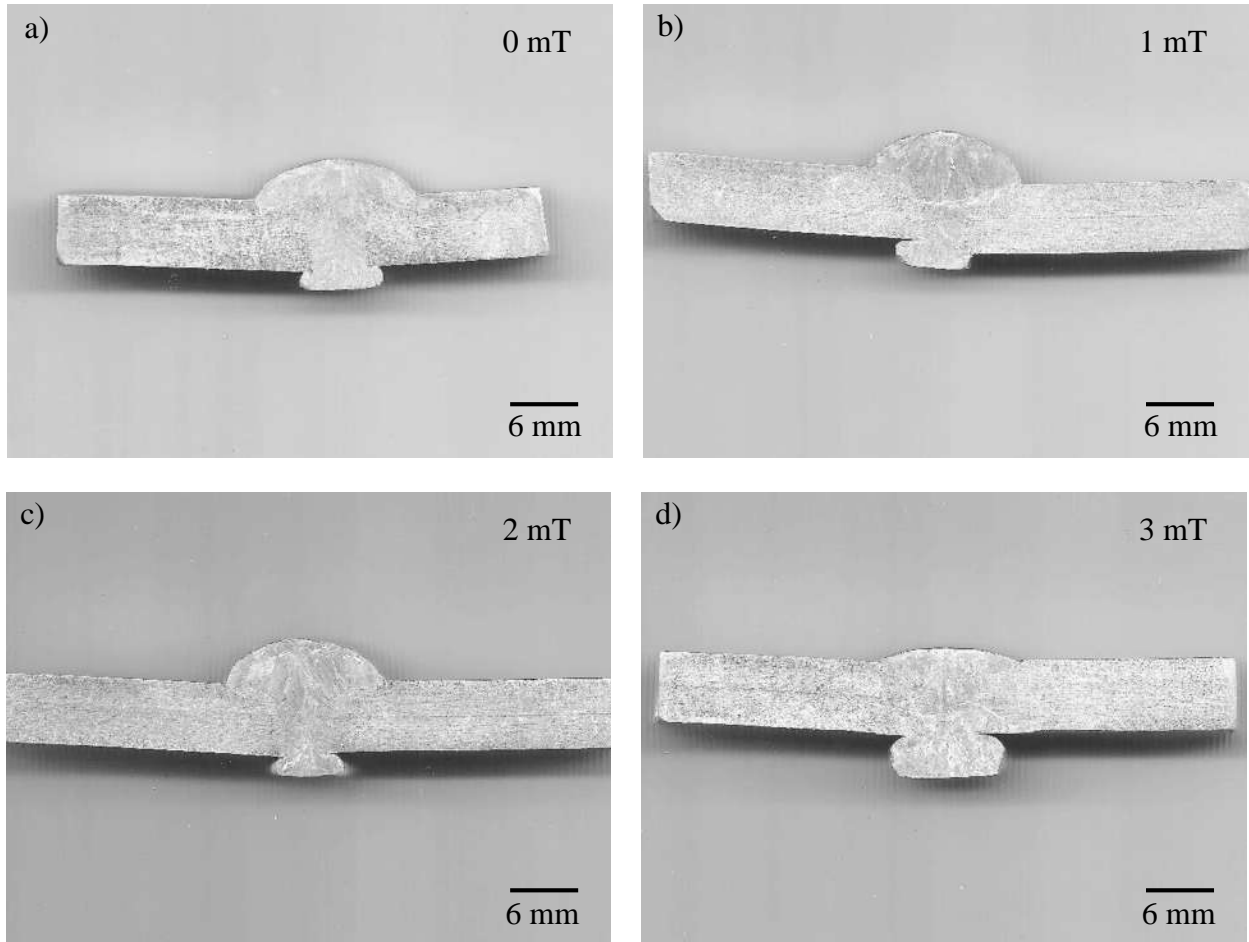
En la práctica, muchos aceros inoxidable austeníticos contienen una pequeña cantidad de ferrita  $\delta$  como la encontrada en el metal base del acero AISI 304L. En condiciones normales de producción, parte de esta ferrita pueden persistir y permanecer en la microestructura forjada. El nivel de ferrita es generalmente menos del 2 a 3% en volumen. La transformación durante la solidificación y transformación en estado sólido de algunos aceros inoxidable austeníticos a menudo conlleva a la retención de la ferrita a elevada temperatura (ferrita delta) en la microestructura a temperatura ambiente, la cual se alinea a lo largo de la dirección del laminado. Aunque no se considera perjudicial en la mayoría de las aplicaciones, la presencia de ferrita en la microestructura del material forjado puede reducir la ductilidad y, potencialmente, la tenacidad de los aceros inoxidable austeníticos. También puede ser un sitio preferencial para la precipitación de carburos de cromo  $M_{23}C_6$  y la fase sigma, de los cuales el último es un agente de fragilización en los aceros inoxidable. De manera que es claro que la presencia de ferrita  $\delta$  juega un papel relevante en el comportamiento final de la soldadura.

#### **4.2 Macrografías de los perfiles de soldadura.**

En la **figura 4.2** se muestran las macrografías de los perfiles transversales correspondientes a las cuatro diferentes condiciones de soldadura, en donde claramente se puede apreciar dos tipos de defectos, como son una sobremonta excesiva y escurrimiento en la raíz de las uniones. Para las imágenes de la **figura 4.2a, b y c**, que corresponden a las uniones, sin aplicación de un campo y con la aplicación de 1, 2 mT, en estas es claramente apreciable que al aplicar la interacción electromagnética, al ir aumentando la intensidad, la sobremonta excesiva va decreciendo hasta llegar a condiciones aceptables como se muestra en la **figura 4.2d**.

Contrariamente a la disminución de la sobremonta, el escurrimiento en la raíz de las uniones aumentó a medida que se incrementó la intensidad del campo magnético aplicado. De modo que este comportamiento es atribuible al efecto de la interacción electromagnética, ya que como fue planteado, el comportamiento del arco eléctrico en presencia de un campo magnético externo, al interactuar este se ve afectado en función de la orientación de las líneas de campo magnético aplicado, como en este caso es atraído con mayor fuerza a medida que incrementa la intensidad.

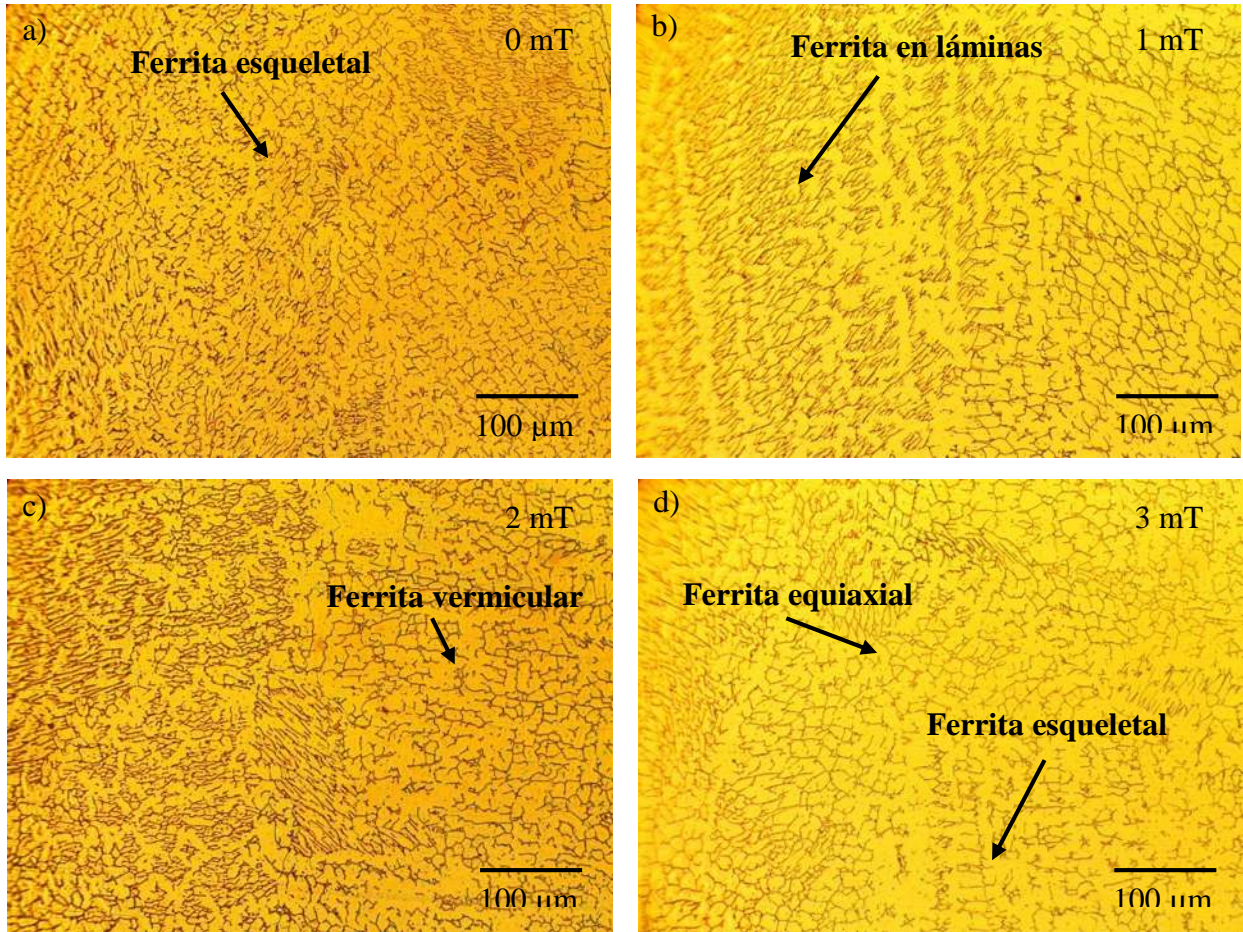
Reflejándose en la sobremonta y raíz de las soldaduras, disminución de la sobremonta y un incremento en el material que escurre en la raíz de las uniones.



**Figura 4.2** Macrografías de las uniones soldadas; a) unión sin campo magnético, b) unión con campo magnético de 1 mT, c) unión con campo magnético de 2 mT, d) unión con campo magnético de 3 mT.

### **4.3 Micrografías de las uniones.**

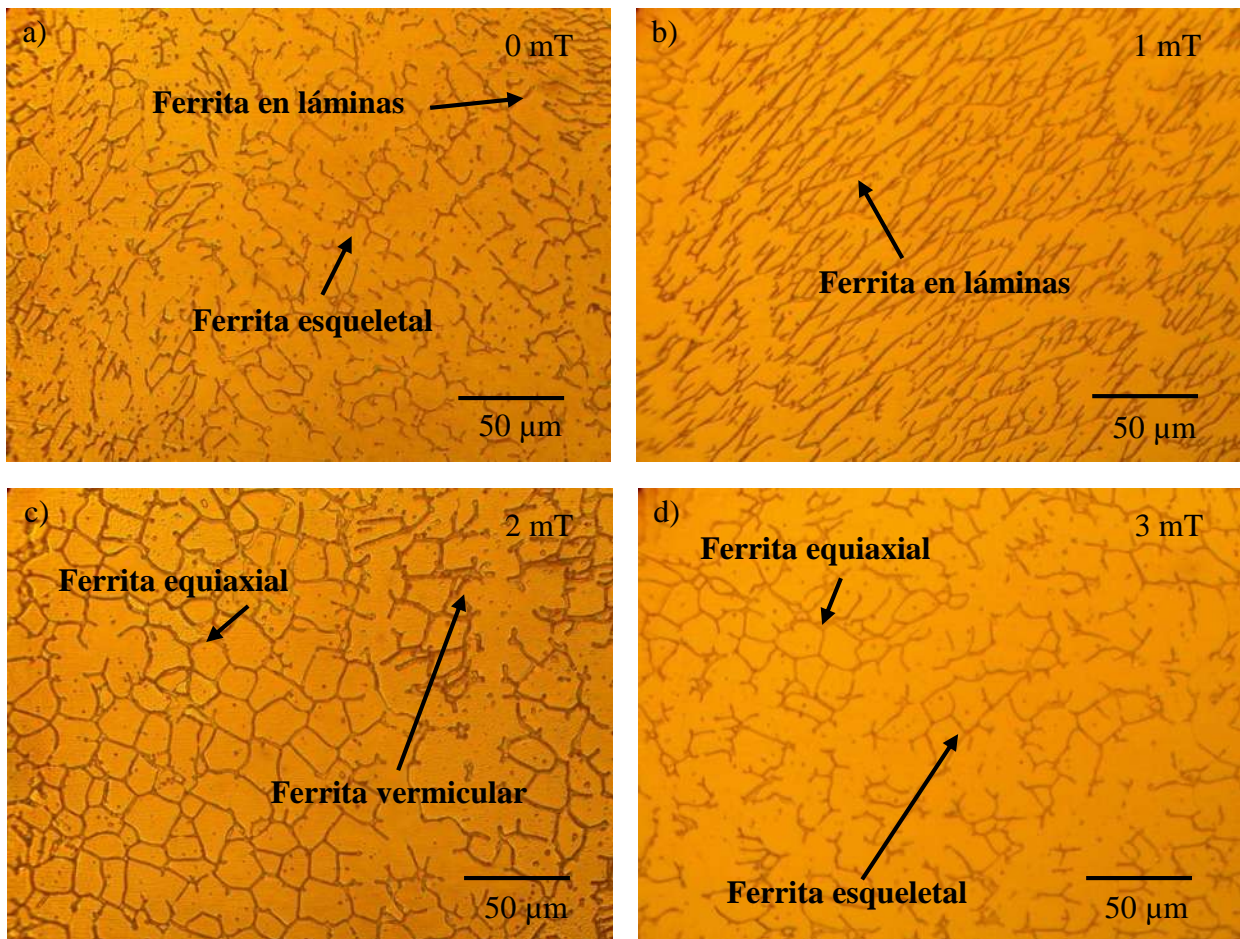
En la **figura 4.3** se muestra la zona central del cordón de soldadura de cada una de las condiciones de unión, y es apreciable para la unión sin campo magnético que presenta una microestructura del tipo esquelética de la ferrita  $\delta$ , típica de las soldaduras de los aceros inoxidable austeníticos, **figura 4.3a**. Por otra parte la **figura 4.3b** presenta una mezcla de la microestructura esquelética y alotrimórfica debido a la agitación realizada por el campo magnético aplicado con una intensidad de 1 mT.



**Figura 4.3** Micrografías de las uniones en el centro del cordón, 200X; a) unión sin campo magnético, b) unión con campo magnético de 1 mT, c) unión con campo magnético de 2 mT, d) unión con campo magnético de 3 mT.

Esto es muy similar también en la **figura 4.3d**, la cual fue realizada con una intensidad de campo magnético de 3 mT, mostrando una pequeña diferencia en cuanto a cierta forma de distribución de la micro estructura, mientras que la **figura 4.3c** no presenta la tendencia de obtener una mezcla de la micro estructura presentada en las **figura 4.3 b y d** con aplicación de campo magnético, puesto que la microestructura obtenida con la aplicación de un campo magnético de 2 mT presenta un tipo de microestructura muy similar a la obtenida sin la aplicación de un campo magnético, lo cual indica que en la aplicación de campo magnético durante la soldadura no se tiene una tendencia lineal bajo la cual se pudiera predecir fácilmente el progreso de la microestructura en función de la variación del campo magnético. Sin embargo, ya vistas a mayores magnificaciones se puede observar una microestructura

alotrimórfica bien definida en el centro del cordón de soldadura con campo magnético de 2

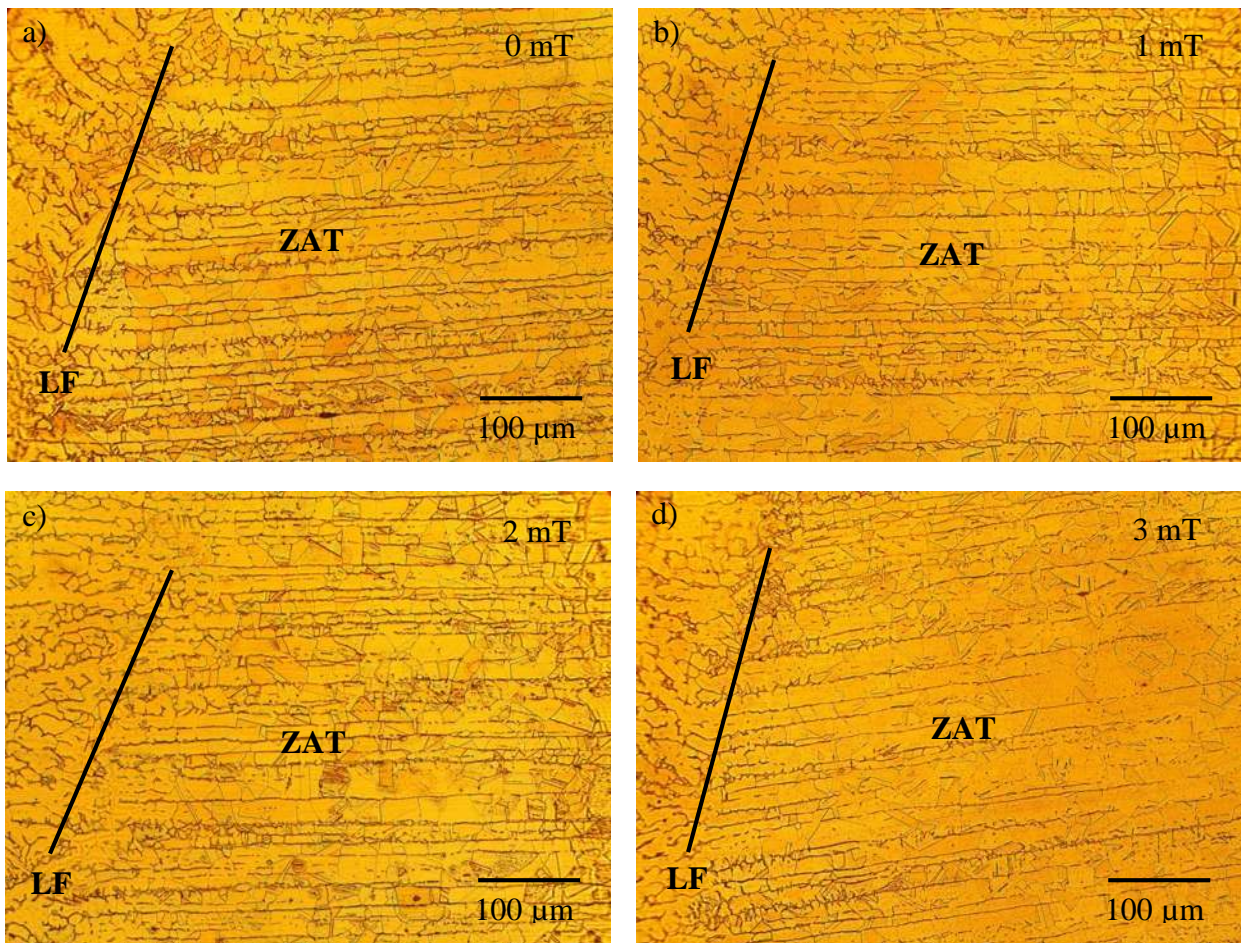


**Figura 4.4** Micrografías de las uniones en el centro del cordón, 500X; a) Unión sin campo magnético, b) unión con campo magnético de 1 mT, c) unión con campo magnético de 2 mT, d) unión con campo magnético de 3 mT.

mT.

En la **figura 4.5** se observa la zona afectada térmicamente de las diferentes condiciones de unión, en donde se aprecian moderados cambios en los listones de la ferrita  $\delta$  presente en esta zona, tal como se observa en la **figura 4.5a**, en donde la intensidad de los listones de la ferrita  $\delta$  es claramente notoria, mientras que en las soldaduras con aplicación de campo magnético la intensidad va disminuyendo de manera gradual y proporcional a la intensidad del campo magnético, este cambio micro estructural es atribuible y está ligado a la mayor susceptibilidad de la ferrita  $\delta$  de interactuar con el campo magnético aplicado, lo que puede dar como

resultado un incremento de las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión en esta



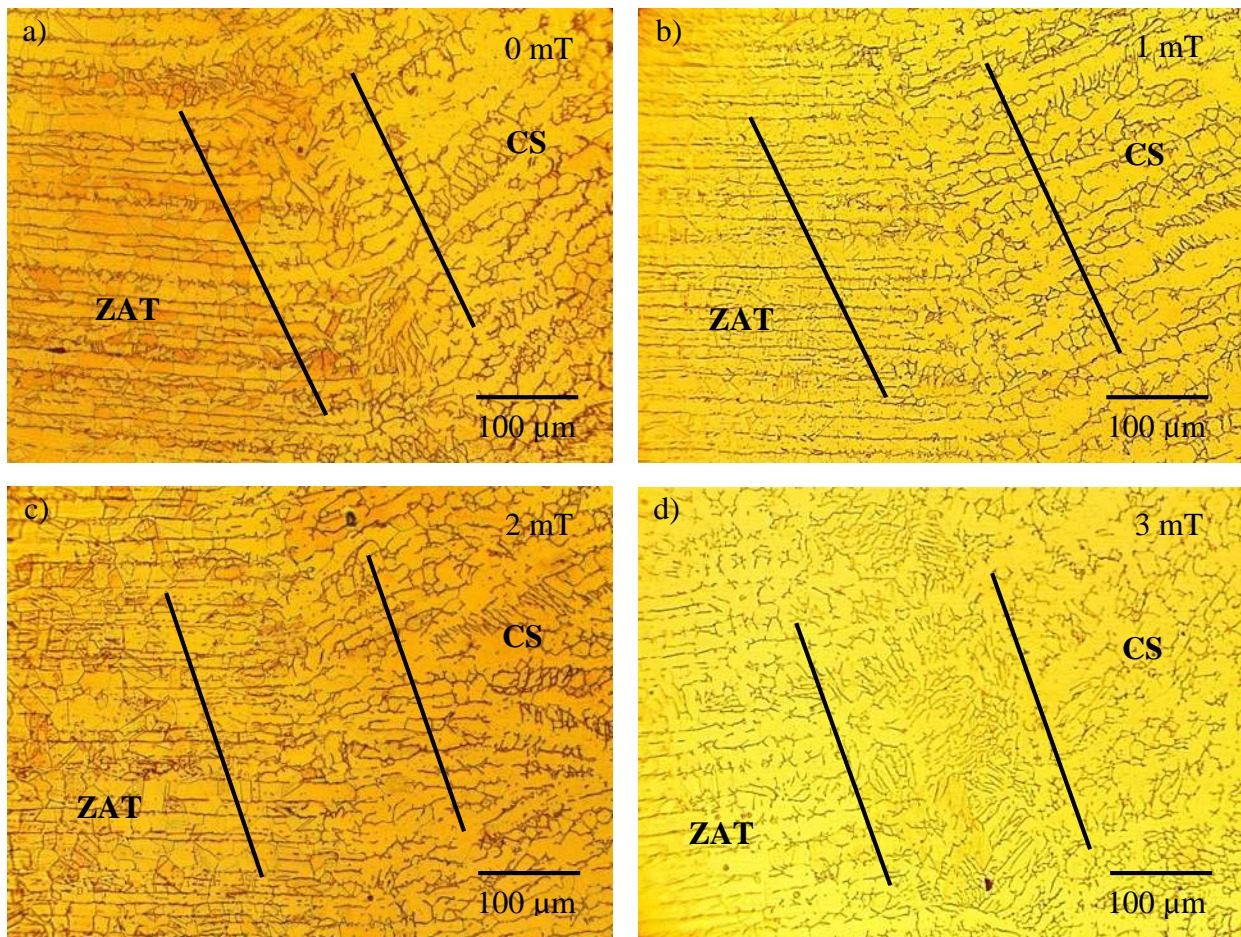
**Figura 4.5** Micrografías de las uniones en la ZAT, 200X; a) unión sin campo magnético, b) unión con campo magnético de 1 mT, c) unión con campo magnético de 2 mT, d) unión con campo magnético de 3 mT.

zona.

Por otra parte la **figura 4.6** muestra el inicio de la interface de los cordones de soldadura en donde se puede apreciar la formación de una pequeña zona de estructura acicular, la cual se presenta en la parte superior para las cuatro condiciones de soldadura, con ciertas pequeñas diferencias, encontrándose que para la condición de soldadura aplicando 1 mT la zona es de menor amplitud que para las demás condiciones, mientras que para la condición de soldadura con aplicación de 3 mT se puede observar en esta mayor zona de estructura acicular, mientras que para 2 mT se puede apreciar la presencia de martensita  $\alpha'$ , así como la formación de

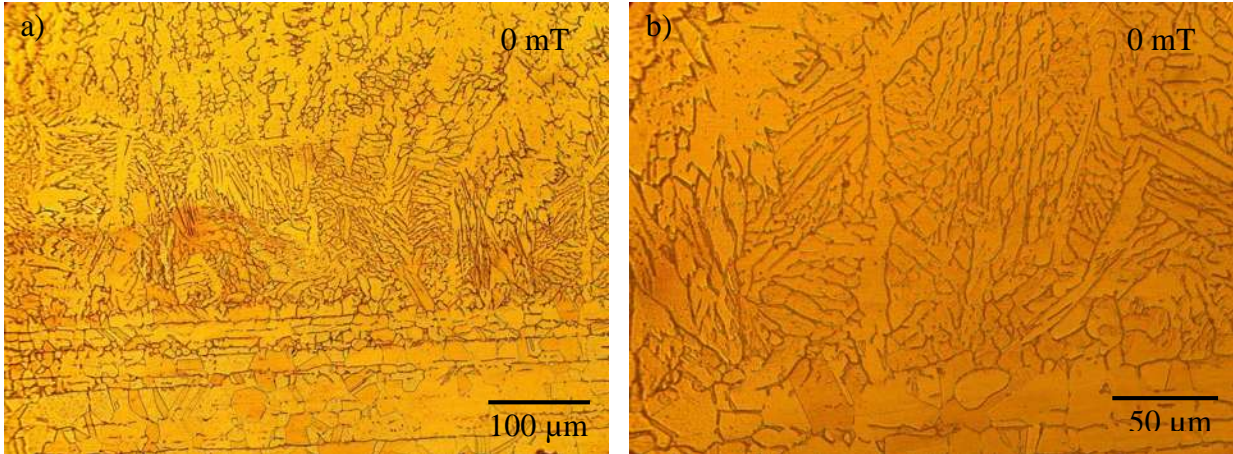
maclado coherente e incoherente en la ZAT, lo cual no es observado claramente en las otras tres condiciones de soldadura, lo que queda de manifiesto que a medida que se incrementa la

intensidad del campo magnético aplicado durante la soldadura.

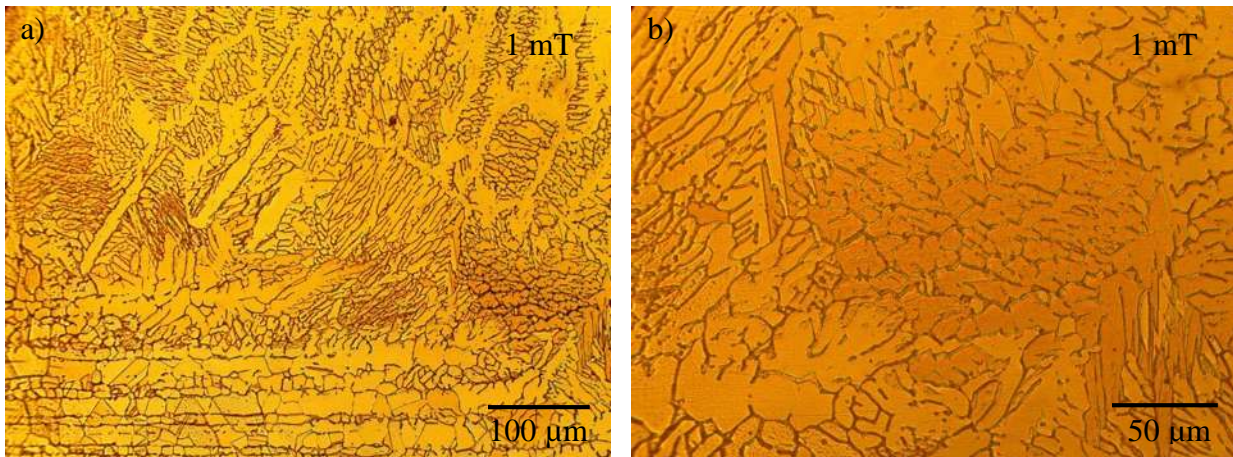


**Figura 4.6** Micrografías de las uniones en la interface, 200X; a) unión sin campo magnético, b) unión con campo magnético de 1 mT, c) unión con campo magnético de 2 mT, d) unión con campo magnético de 3 mT.

Este campo magnético afecta el cambio microestructural de la ZAT en los aceros inoxidable austeníticos, y queda demostrado que no solo la microestructura obtenida en la ZAT depende del ciclo térmico. Lo anterior mente expresado se puede corroborar en las micrografías de las **figuras 4.7, 4.8, 4.9, 4.10**, las cuales fueron obtenidas a mayores magnificaciones para las cuatro condiciones de soldadura.



**Figura 4.8** Micrografías de la interface de la unión sin la aplicación de un campo magnético; a) 200X, b) 500X.

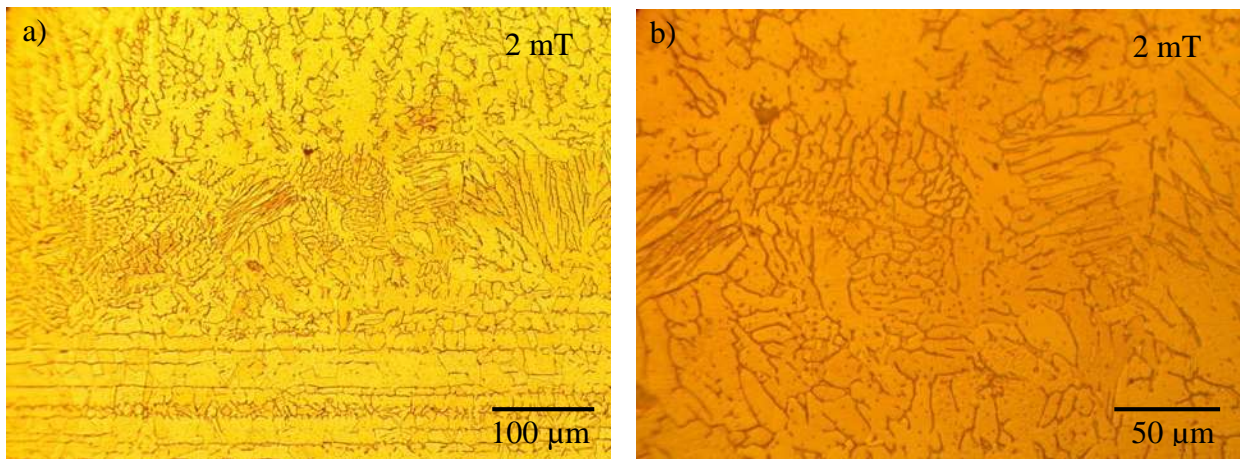


**Figura 4.7** Micrografías de la interface de la unión con la aplicación de un campo magnético de 1 mT; a) 200X, b) 500X.

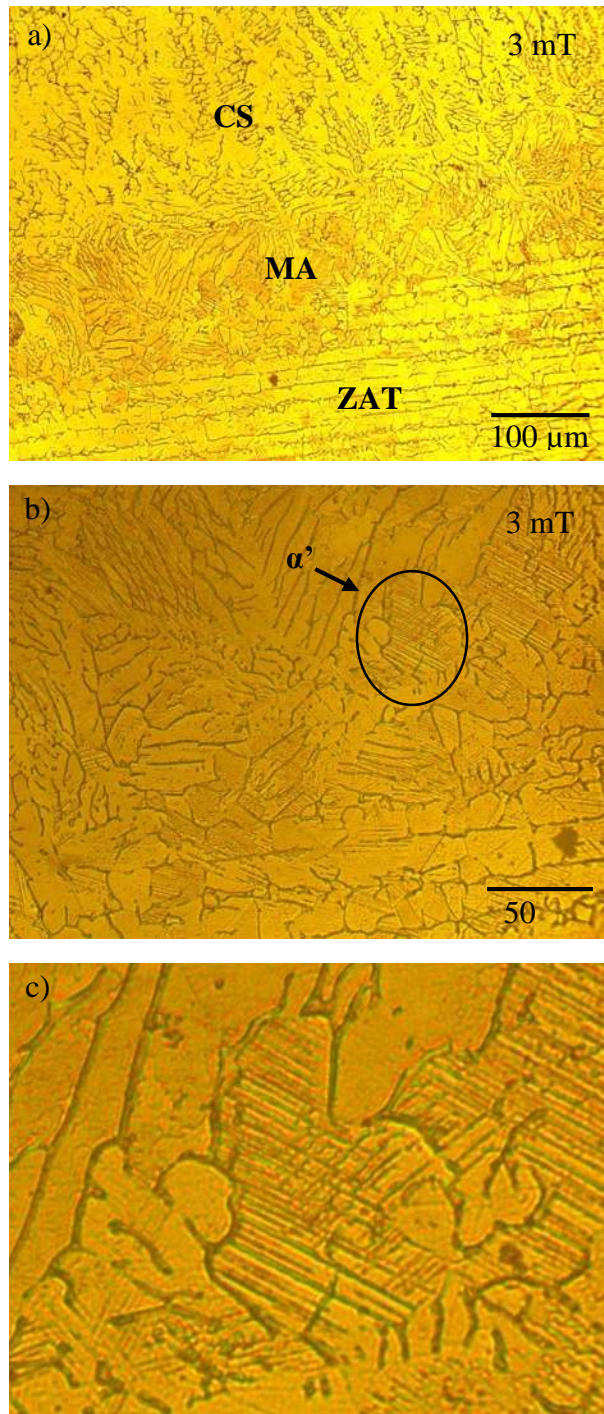
También es posible formar martensita en algunos aceros inoxidables austeníticos, pero esto ocurre sólo bajo condiciones muy especiales. La martensita se ha observado en aleaciones con deformación en frío, cuando los materiales se enfrían a temperaturas criogénicas [35].

De manera que se puede considerar que para llevar en material base a un espesor de 6.3 mm fue requerida una considerable cantidad de deformación, la cual propicio la formación de listones de ferrita  $\delta$  en sentido de la laminación y además genero una pequeña cantidad de martensita  $\alpha'$ , pero también se encontró martensita  $\alpha'$  en algunas interfaces de uniones con la interacción electromagnética, esto denota una clara diferencia entre el proceso de soldadura

tradicional y la soldadura con interacción electromagnética, ya que la presencia de martensita  $\alpha'$  es atípica y además fue encontrada en la ZAT, lo cual lleva a concluir que por la forma en que se produce la martensita, esta no se puede formar en el cordón de soldadura y su presencia en la interface de las uniones es debido a que pequeñas porciones de material base son arrastradas por la interacción electromagnética al interactuar con un campo electromagnético durante el proceso de soldadura propiciando la formación de la martensita  $\alpha'$  en la interface de las uniones, como se muestra en la **figura 4.10**.



**Figura 4.9** Micrografías de la interface de la unión con la aplicación de un campo magnético de 2 mT; a) 200X, b) 500X.



**Figura 4.10** Micrografías de la interface de la unión con la aplicación de un campo magnético de 3 mT; a) 200X, b) 500X; c) amplificación de la micrografía b).

#### 4.4 Ensayo de tensión.

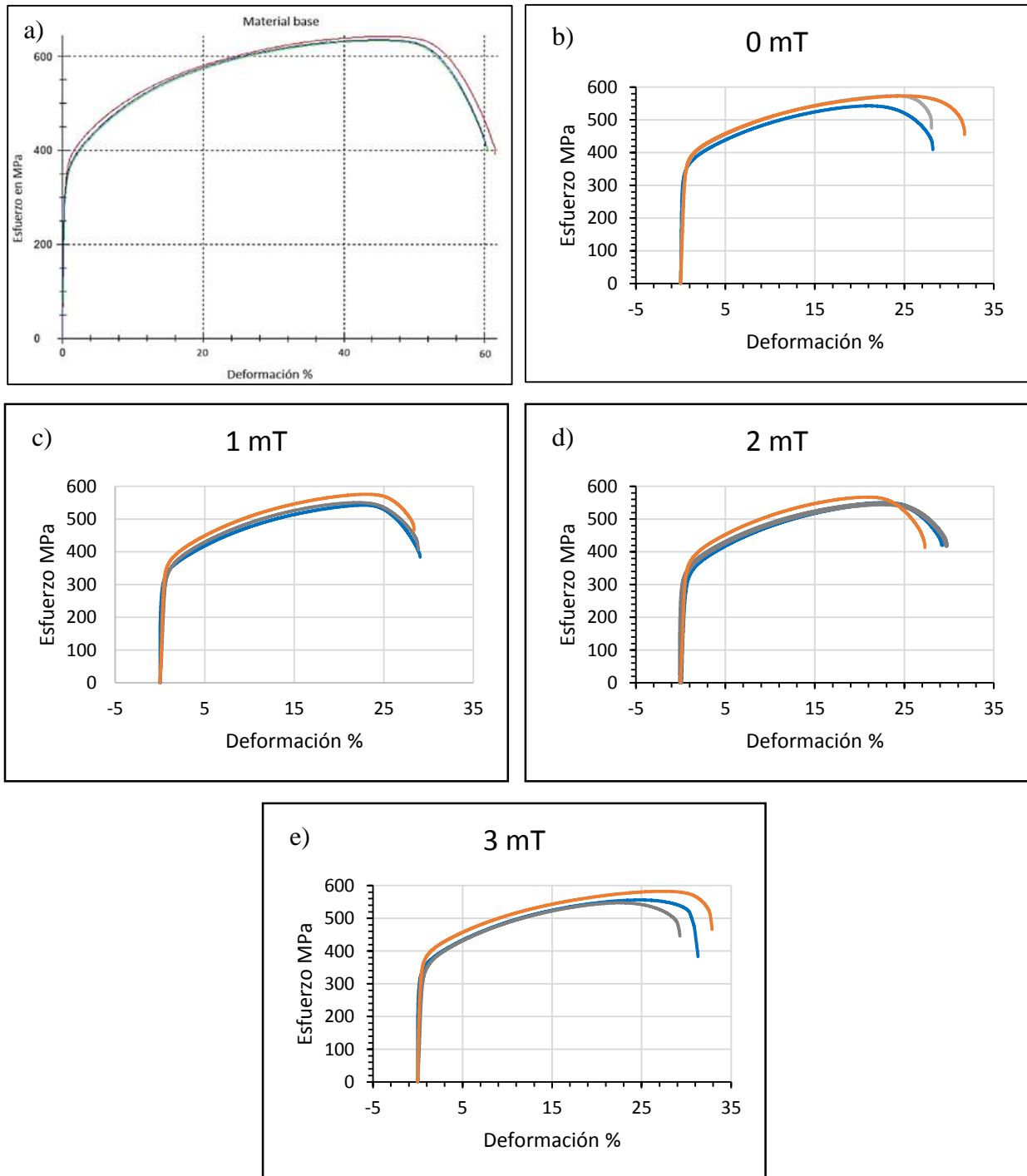
En la **figura 4.11** se muestran las gráficas del ensayo de tensión para las diferentes condiciones de soldadura y del material base, las cuales muestran un comportamiento típico del ensayo de tensión, además en la **tabla 4** se tienen los valores de resistencia a la tensión y el porcentaje de deformación a la fractura obtenido. De los datos adquiridos en este ensayo es apreciable que no hubo grandes diferencias en cuanto a la resistencia mecánica, ya que la unión sin campo magnético presenta prácticamente una resistencia mecánica idéntica a la unión con la interacción de un campo magnético de 3 mT, y las uniones bajo la interacción de un campo de 1 y 2 mT presentan una resistencia mecánica ligeramente inferior.

Por otra parte se puede decir que la baja resistencia mecánica obtenida en los cordones de soldadura es debido al tipo de electrodo utilizado, el cual fue un ER308LSi el cual contiene 1% de Si, si bien es cierto el Si se añade generalmente para los propósitos desoxidantes en concentraciones de hasta 1% en peso. A niveles más altos, el silicio es eficaz en la mejora de la oxidación a alta temperatura y también mejora la fluidez del metal líquido, lo que tiene implicaciones importantes para el comportamiento tanto de soldadura y fundición. Sin embargo, el silicio en el metal de soldadura que tiene muy baja o nula ferrita promueve agrietamiento durante la solidificación, pero también reduce la resistencia mecánica de la unión, ya que el electrodo recomendado para unir este tipo de acero inoxidable es el ER308L. La justificación del porque se utilizó el electrodo ER308LSi fue porque en el mercado nacional es muy difícil encontrar el electrodo requerido, a pesar de que todos estos productos son de importación y de igual forma, en el extranjero también es difícil encontrar comercialmente ciertos electrodos como el ER308L, ya que los fabricantes solo lo producen en grandes cantidades y sobre pedido.

Todas las uniones fallaron en la soldadura y no en la ZAT, sin importar bajo que condición hayan sido unidas, de modo que en base a los datos obtenidos del ensayo de tensión la única peculiaridad observada es la falla de las probetas en el área del cordón. Esto fue causado por el tipo de electrodo usado como material de aporte, como ya se mencionó anterior mente, sin olvidar el objetivo fundamental de la aplicación de la interacción electromagnética de baja intensidad, el cual consiste en mejorar las propiedades mecánicas y el comportamiento electroquímico de la ZAT, como es reportado por F. Curiel y colaboradores [1]. Quienes

reportan que los cambios más significativos son encontrados con la aplicación de campos magnéticos de baja intensidad entre 2 y 4 mT para un campo magnético aplicado de manera

axial al arco eléctrico del cordón de soldadura.



**Figura 4.11** Ensayo de tensión; a) Material base, b) Unión sin campo magnético, c) Unión con campo magnético de 1 mT, d) Unión con campo magnético de 2 mT, e) Unión con campo magnético de 3 mT.

Además es interesante considerar que el trayecto que sigue la corriente en un material ferro magnético es suficiente para producir el fenómeno de soplo magnético, y modificar las fuerzas magnéticas presentes en el arco eléctrico, es viable que este efecto pudiera haber modificado el resultado de la unión típica de soldadura.

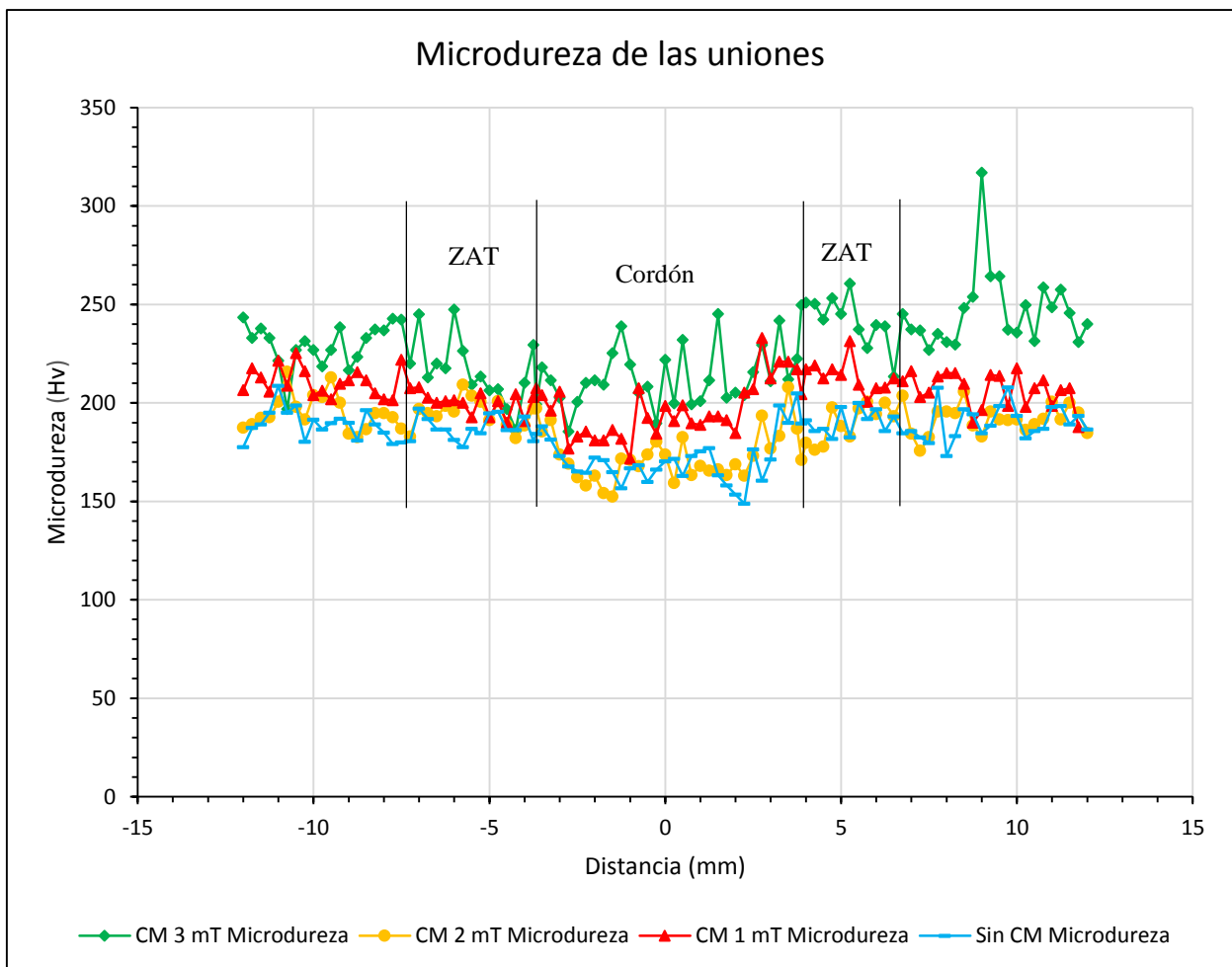
**Tabla 4** Resultados de ensayos de tensión.

<b>Probeta</b>	<b>Promedio de la resistencia a la tensión MPa</b>	<b>Error</b>	<b>% de deformación</b>
Material base	636.6	2.72	60.6
Sin campo magnético	563.33	10.81	29.36
Con campo magnético de 1 mT	556.66	6.69	28.83
Con campo magnético de 2 mT	553.66	9.93	28.83
Con campo magnético de 3 mT	562	10.17	31.26

#### **4.5 Perfiles de microdureza.**

En la **figura 4.12** se muestran los perfiles de microdureza de las cuatro diferentes condiciones de soldadura, en donde se observa que el comportamiento de microdureza de la unión realizada sin campo magnético es muy similar a la unión a la cual se le aplicó un campo magnético de 2 mT, sin embargo, también se puede observar que la unión con la aplicación del campo magnético de 1 mT si tiene un ligero incremento y al aumentar a 3 mT hay otro ligero incremento en la microdureza como se puede observar en la **figura 4.13**, también se pueden equiparar estos resultados con las observaciones hechas en las micrografías, donde se aprecia que el efecto de la interacción electromagnética en la forma de solidificación de la soldadura no es lineal y que los valores de microdureza entre la soldadura convencional comparada con la que tuvo una aplicación de un campo magnético de 2 mT son muy similares, lo que concuerda con el tipo de microestructura encontrada en las micrografías, en las cuales se observa una gran similitud entre estas dos condiciones de unión. También los perfiles de

microdureza de las uniones efectuadas bajo la influencia de un campo magnético denotan un incremento de microdureza en la ZAT, de lo que repercute en una mejora de las uniones, ya que generalmente las problemáticas existentes en la soldadura de aceros inoxidables austeníticos se presentan en la ZAT, debido a que el ciclo térmico de soldadura suele propiciar la precipitación de diversos carburos o fases ricas en cromo, hecho que deriva en que la ZAT contenga zonas más vulnerables a la corrosión. Por ello la relevancia de observar un incremento de la microdureza en la ZAT, que indica que la interacción electromagnética si



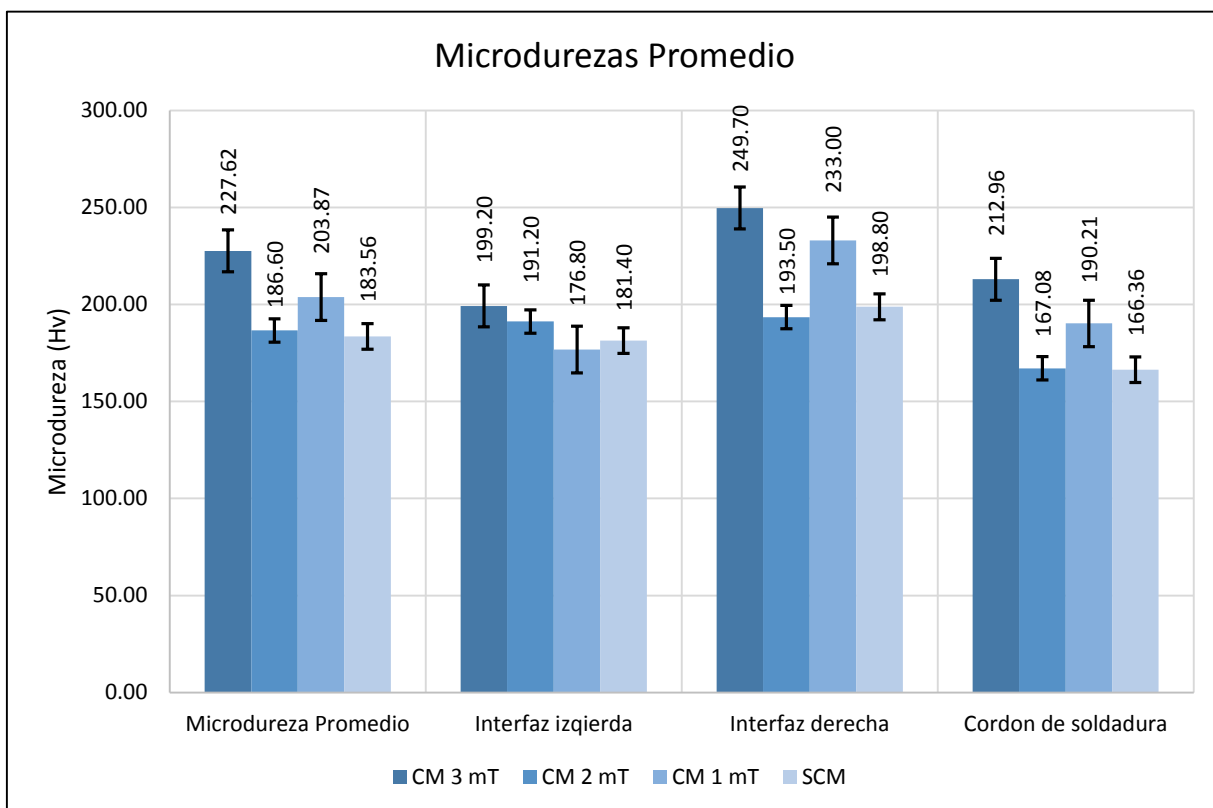
**Figura 4.12** Perfiles de microdureza de las cuatro condiciones de soldadura.

tiene efectos benéficos en el proceso de soldadura.

Además cabe mencionar que se encontró una variación de microdureza entre los valores en la interfaz derecha con respecto a la interfaz izquierda para las soldaduras realizadas con

interacción electromagnética de 1 y 3 mT, fenómeno que no se presentó en la soldadura convencional y en la que se aplicaron 2 mT, hecho que denota la ausencia de un comportamiento linealizado de los efectos producidos por la interacción electromagnética en

las uniones de soldadura.

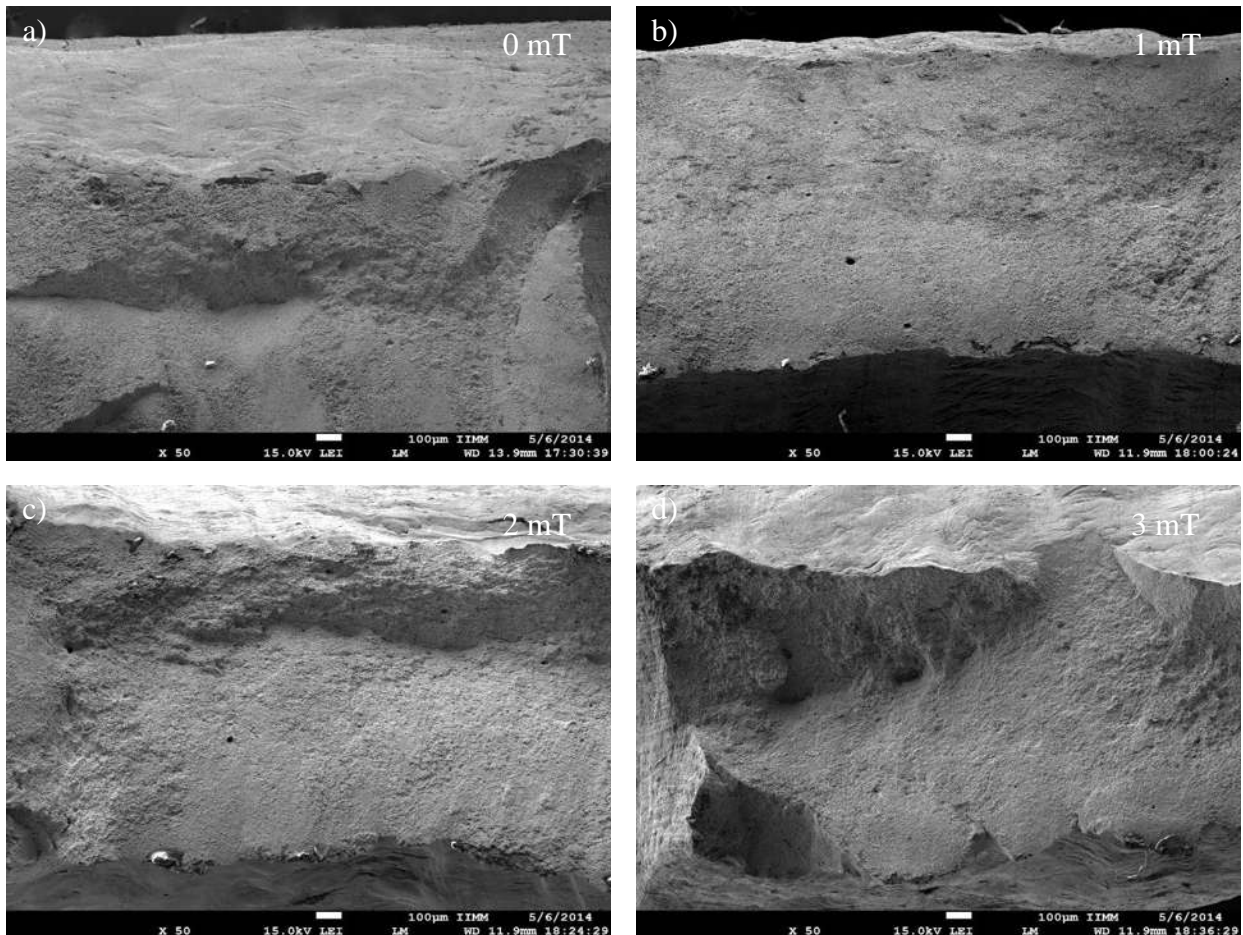


**Figura 4.13** Valores promedio de los datos obtenidos de los barrios de microdureza.

#### 4.6 Análisis de fracturas por MEB

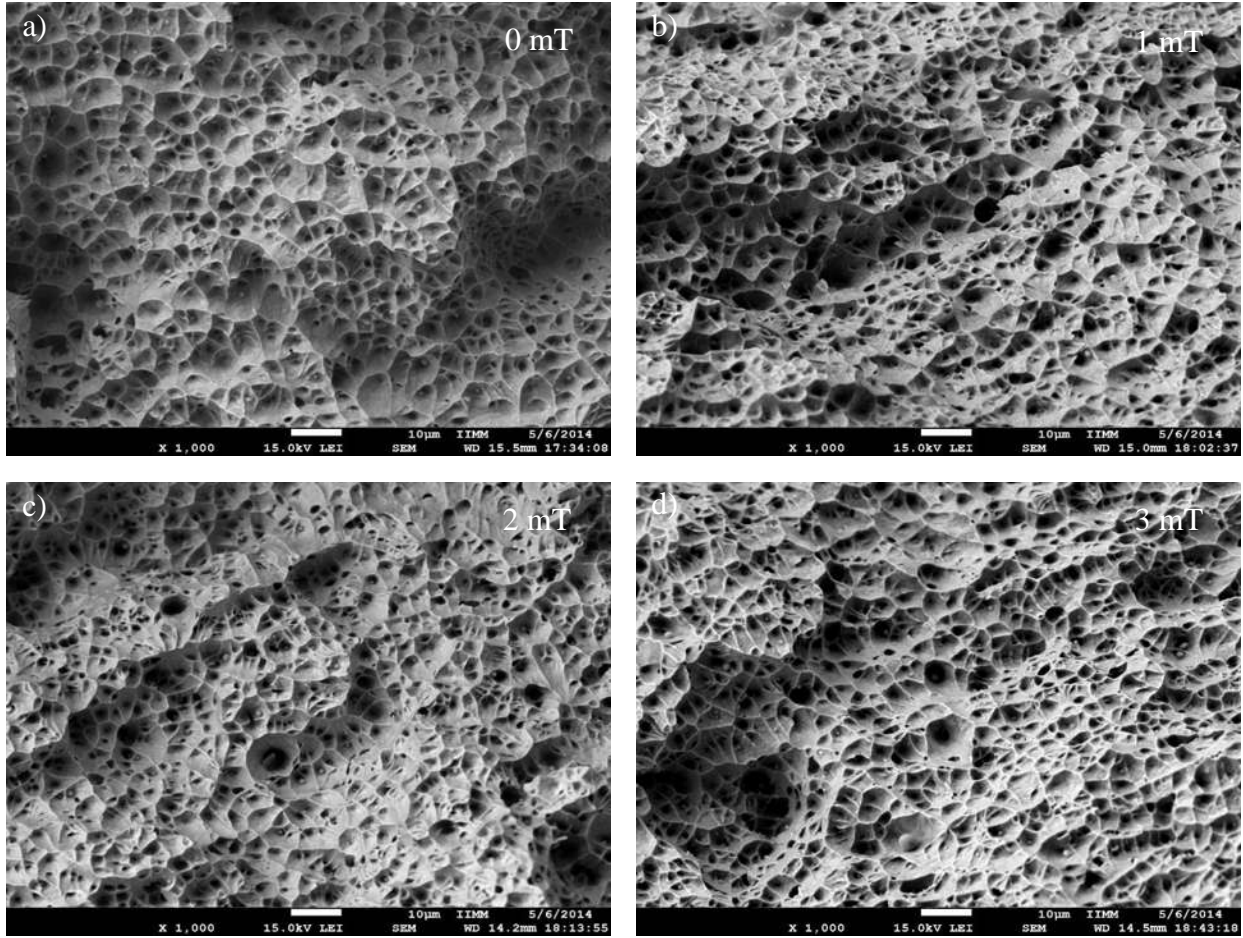
En la **figura 4.14** se observa una vista panorámica de las fracturas correspondientes a los ensayos de tensión de las cuatro condiciones de soldadura realizadas, en donde se puede apreciar una leve diferencia entre la fractura de la condición sin aplicación de campo magnético, la cual refleja una protuberancia en el centro de la fractura mientras que la fractura correspondiente a la interacción electromagnética de 1 mT tiende a ser de forma plana y finalmente las dos fracturas correspondientes a las interacciones electromagnéticas de 2 y 3 mT muestran una tendencia de una parte plana y otra saliente, no obstante estas pequeñas diferencias, no reflejan algún comportamiento muy diferente entre sí, puesto que a mayores

magnificaciones el tipo de fractura presentado en las cuatro condiciones de soldadura es del tipo dúctil, como se ilustra en las **figuras 4.15 y 4.14**.



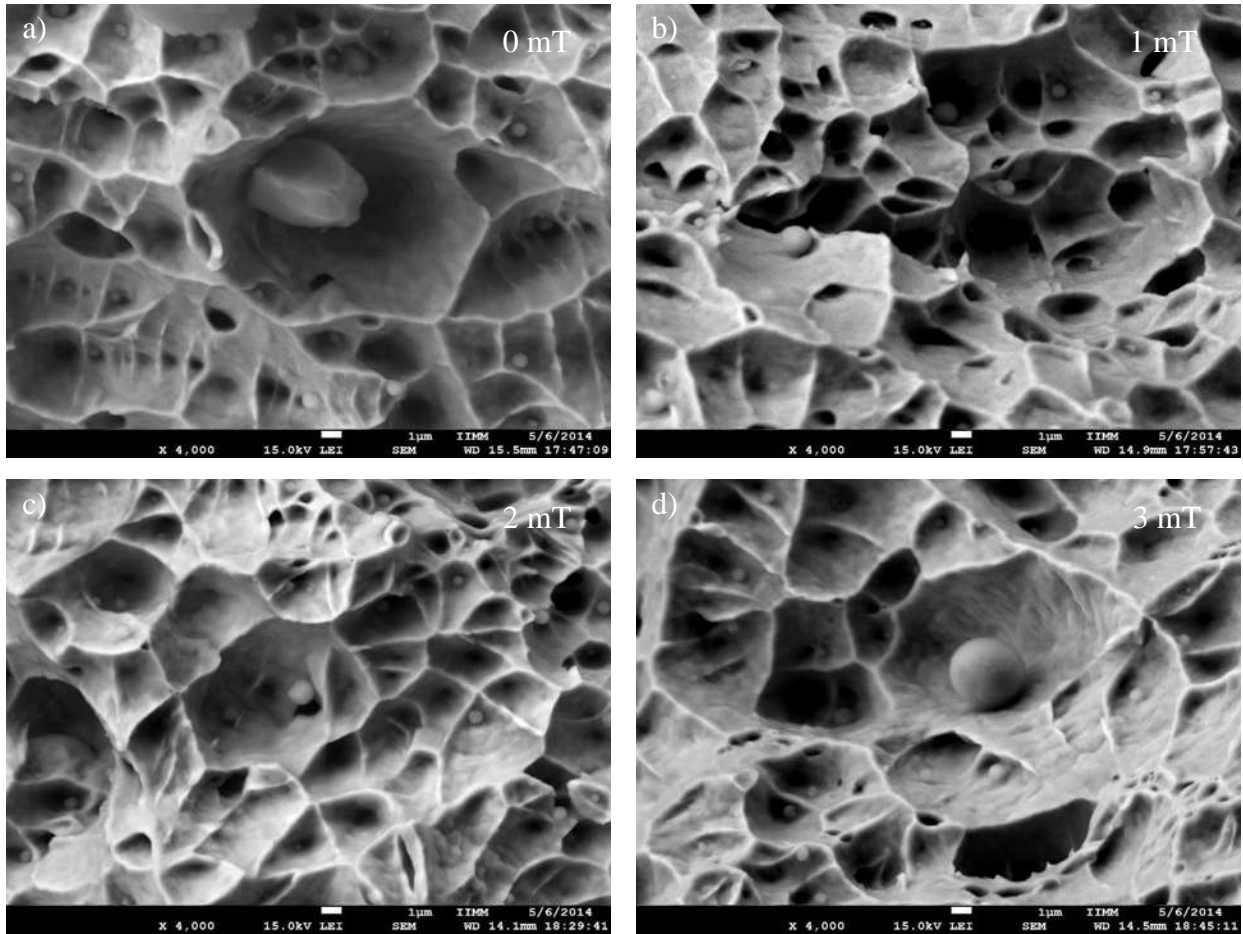
**Figura 4.14** Micrografías de las fracturas de las uniones a 50X; a) unión sin campo magnético, b) unión con campo magnético de 1 mT, c) unión con campo magnético de 2 mT, d) unión con campo magnético de 3 mT.

En donde lo más relevante que se puede resaltar es el tipo de morfología de las inclusiones no metálicas, así como su composición química mostrada en la **tabla 5**, de acuerdo a los microanálisis realizados y a los espectrogramas obtenidos para cada uno de las inclusiones correspondientes las **Figuras 4.17 y 4.18**.



**Figura 4.15** Micrografías de las fracturas de las uniones a 1000X; a) unión sin campo magnético, b) unión con campo magnético de 1 mT, c) unión con campo magnético de 2 mT, d) unión con campo magnético de 3 mT.

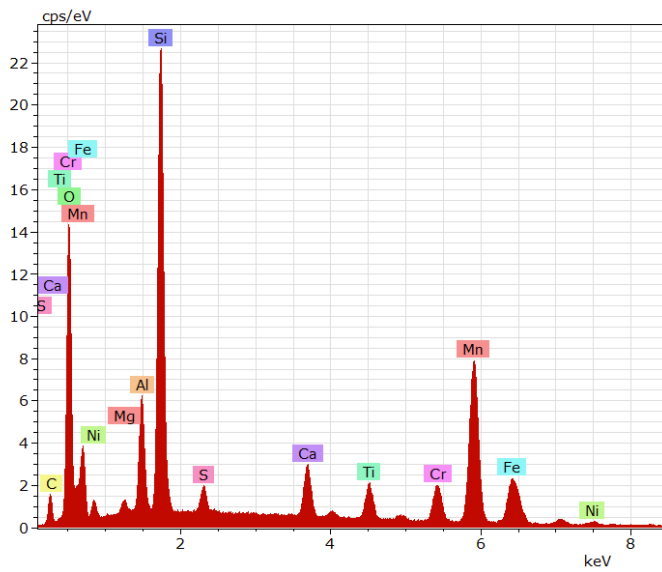
Lo cual muestra el efecto de la interacción electromagnética en la globulización y reducción de tamaño de las inclusiones no metálicas encontradas en cada una de las fracturas, para las condiciones de 1, 2 y 3 mT, mientras que en la soldadura tradicional la morfología de las inclusiones es de forma facetada y de mayor tamaño, correspondiente a la no perturbación del crecimiento durante el fenómeno de solidificación.



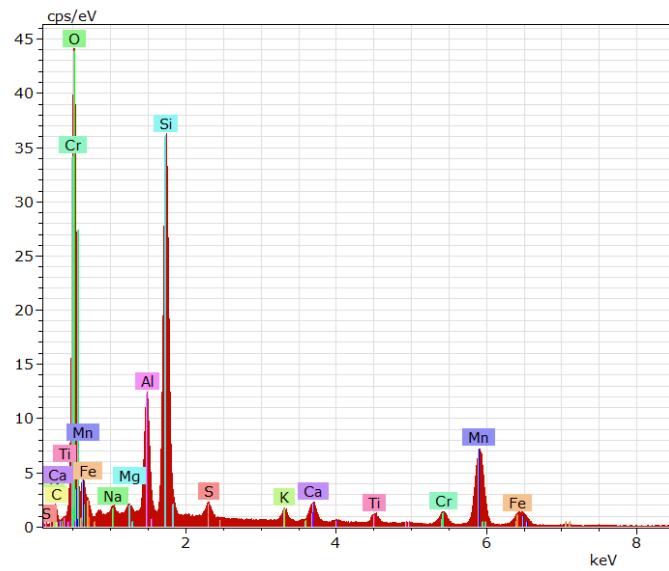
**Figura 4.16** Micrografías de las fracturas de las uniones a 4000X; a) unión sin campo magnético, b) unión con campo magnético de 1 mT, c) unión con campo magnético de 2 mT, d) unión con campo magnético de 3 mT.

**Tabla 5** Porcentajes en peso del microanálisis realizado a inclusiones en la unión sin aplicación de campo magnético y con aplicación de campo magnético de 3 mT.

Uniones	%Mn	%S	%Si	%Al	%O
Sin campo magnético	29.3	0.6721	12.7411	2.9	18.9
Con campo magnético de 3 mT	21.0	0.6364	14.6470	4.6	38.2



**Figura 4.17** Microanálisis de inclusiones en la unión sin aplicación de campo magnético.



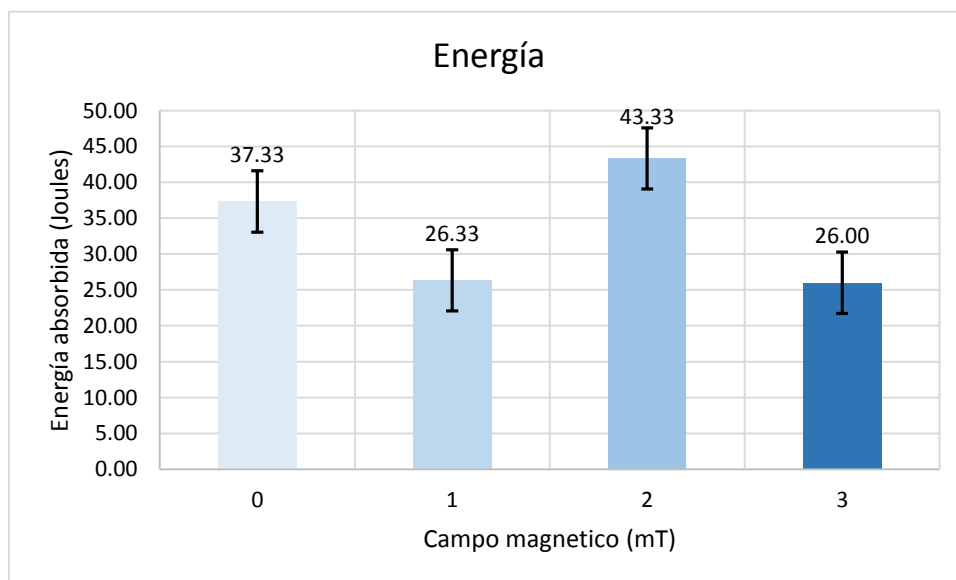
**Figura 4.18** Microanálisis de inclusiones en la unión con aplicación de un campo magnético de 3 mT.

#### 4.7 Ensayo de impacto.

En el ensayo de impacto se puede observar que los valores de la **tabla 6** y la **figura 4.19** concuerdan con los valores obtenidos en el ensayo de microdureza y lo observado en las micrografías de las uniones, ya que se corrobora que las uniones con la aplicación de interacción electromagnética de 2 mT y la soldadura convencional presentan un comportamiento muy similar e incluso en este ensayo las uniones con la aplicación de 1 y 3 mT son parecidas en cuanto a la energía absorbida.

**Tabla 6** Energía absorbida por las probetas en el ensayo de impacto.

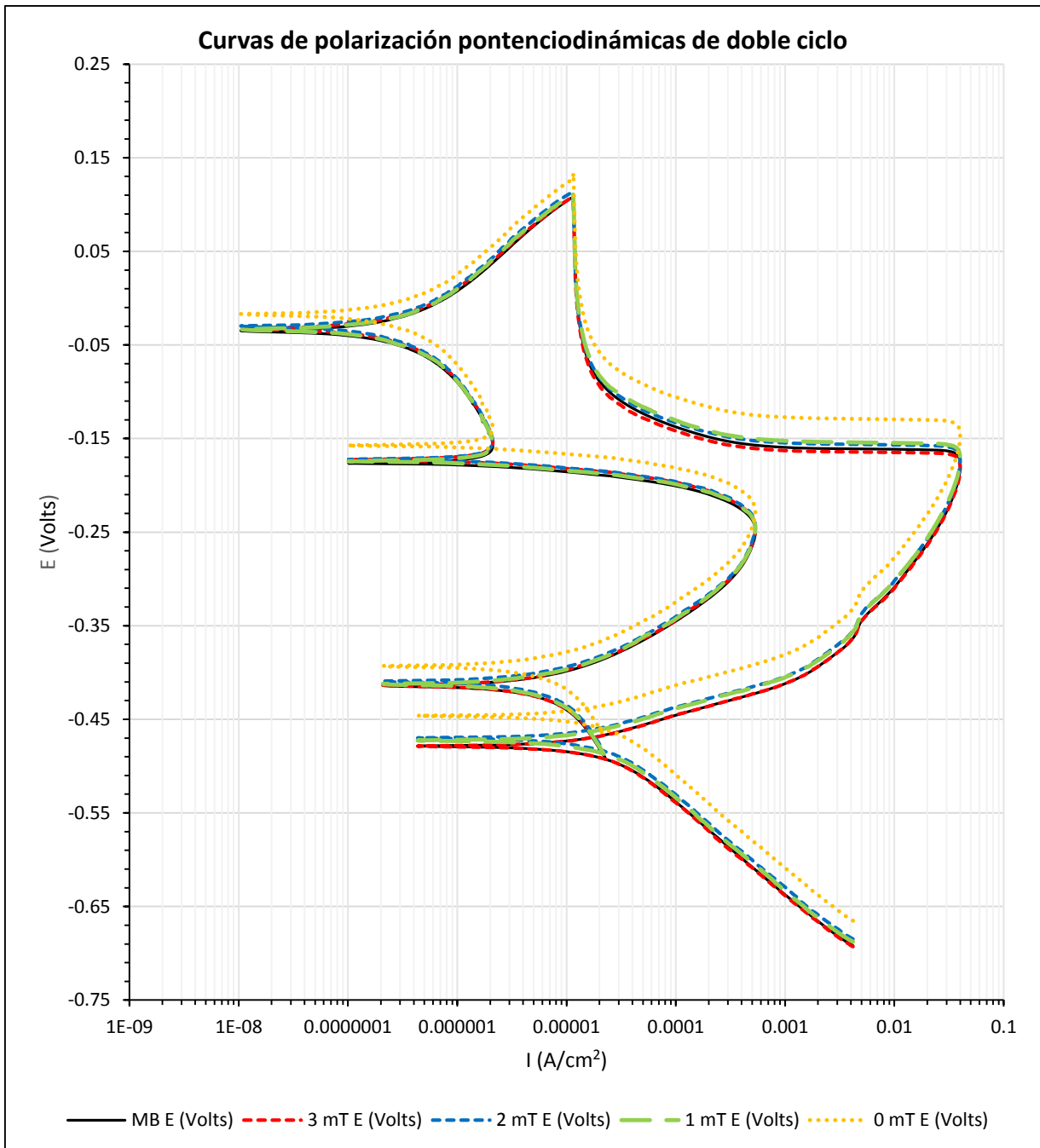
<b>Campo magnético (mT)</b>	<b>Energía (J)</b>	<b>Error</b>	<b>Área (mm<sup>2</sup>)</b>
<b>3</b>	26.00	2.30	26.14
<b>2</b>	43.33	8.76	33.65
<b>1</b>	26.33	1.20	25.92
<b>0</b>	37.33	7.17	30.66



**Figura 4.19** Energía absorbida por las probetas en el ensayo de impacto.

#### **4.8 Caracterización electroquímica del material base y la ZAT de las uniones soldadas.**

En la **figura 4.20** se muestran las curvas de polarización potenciodinámicas de doble ciclo (DLEPR, por sus siglas en inglés) realizadas para cada una de las diferentes condiciones de



soldadura y el material base tal y como se adquirió.

**Figura 4.20** Curvas de polarización potenciodinámicas de doble ciclo de las diferentes condiciones de soldadura.

En donde se puede observar que el comportamiento de todas las curvas es similar a simple vista pareciera ser muy difícil evaluar las diferencias entre las diversas curvas obtenidas de este ensayo, pero con la ayuda del software Corrview correspondiente al equipo utilizado es posible analizar y obtener datos de las curvas potenciodinámicas de doble ciclo, además el software permite conocer la corriente de activación ( $I_a$ ) y la corriente de reactivación ( $I_r$ ) con una elevada precisión. Recordando que si la relación entre  $I_r/I_a$  (grado de sensibilidad) es mayor a 0.05, se considera que el material está sensibilizado y es vulnerable a la corrosión intergranular. La **tabla 7** muestra los valores de la relación  $I_r/I_a$  promedio obtenidos de las curvas, cabe mencionar que las pruebas fueron realizadas por duplicado para comprobar la reproducibilidad de los resultados obtenidos.

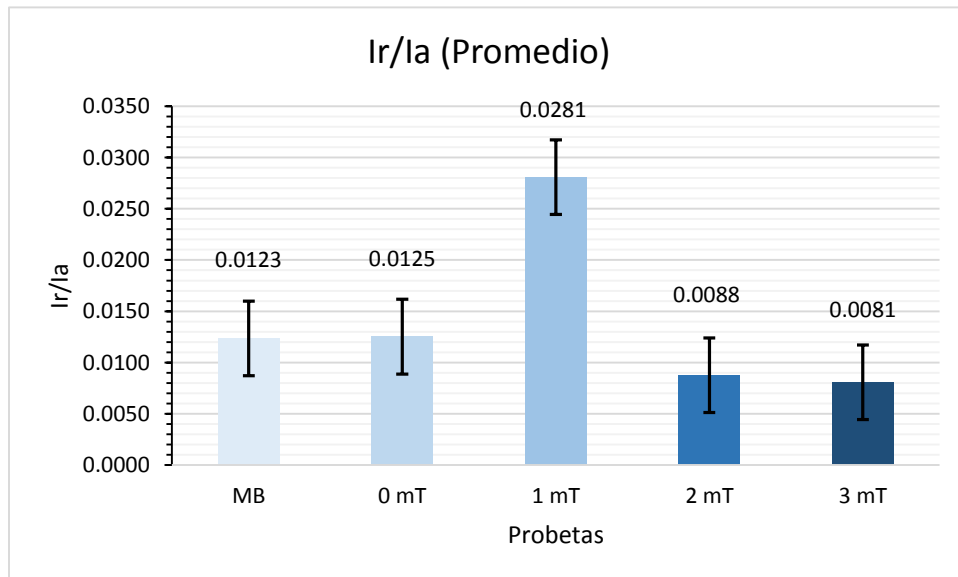
De los resultados obtenidos de la relación del grado de sensibilidad es notorio apreciar que ninguna condición sobrepasa el valor de la relación  $I_r/I_a > 0.05$ , por lo tanto el material base tanto como todas las uniones presentan valores inferiores al límite establecido. Se debe considerar que el acero inoxidable austenítico 304L de bajo contenido de carbono fue diseñado para dar solución a los problemas presentados en las soldaduras de acero inoxidable austenítico 304, pero aun así en ocasiones aún los aceros inoxidables austeníticos de bajo contenido de carbono llegan a presentar corrosión bajo esfuerzo y por picado debido a los entornos a los que son expuestos, tales como medios acuosos con presencia de iones cloruro [8], también se ha observado que la sensibilización en realidad puede ocurrir después de largos tiempos de exposición a bajas temperaturas ( $<300\text{ }^\circ\text{C}$ ), después de un ciclo térmico de alta temperatura inicial como el experimentado en la ZAT. Esto ha llegado a ser conocido como la sensibilización de baja temperatura (LTS), este ha sido un problema en las tuberías de acero inoxidable utilizado en la industria de generación de energía. La LTS se debe a que carburos "embriones" se forman durante el proceso de soldadura original y luego crecen hasta formar un carburo que precipita a baja temperatura, y el efecto a largo plazo es la sensibilización de los límites de grano [9].

**Tabla 7** Resultados del grado de sensibilidad obtenidos de las curvas DLEPR.

<b>Material</b>	MB	0 mT	1 mT	2 mT	3 mT
<b><math>I_r/I_a</math> (Promedio)</b>	0.0123	0.0125	0.0281	0.0088	0.0081

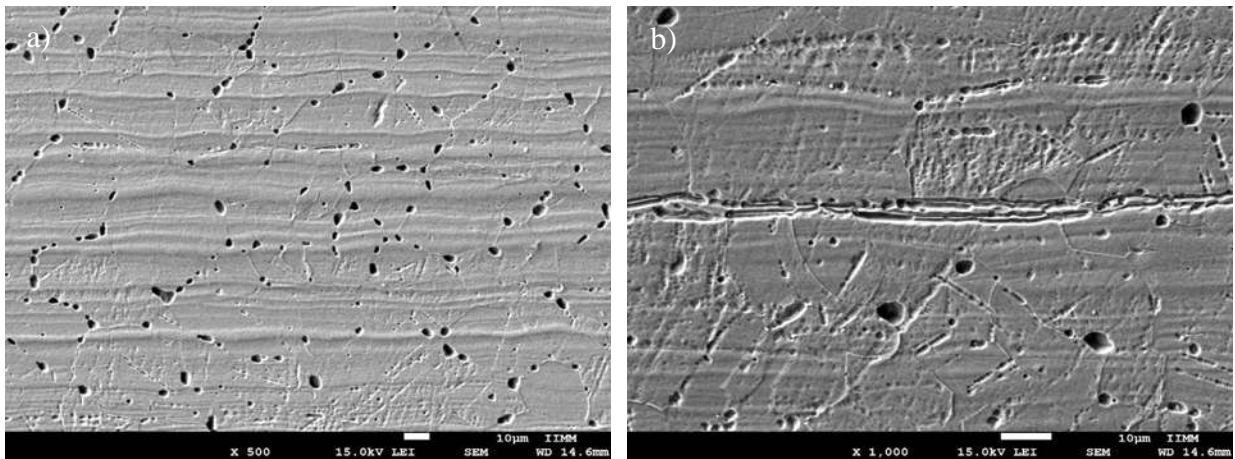
<b>Error</b>	0.0010	0.0014	0.0006	0.0187	0.0047
--------------	--------	--------	--------	--------	--------

Como se observa en la **tabla 7** los resultados del grado de sensibilidad están en un rango aceptable, lo ideal sería lograr eliminar la precipitación de los carburos de cromo en la soldadura de aceros inoxidable austeníticos, ya que estos son los causantes del deterioro de las uniones soldadas. En la **figura 4.21** se muestra una forma más apreciable de las diferencias entre los resultados obtenidos en cuanto al grado de sensibilidad en donde se puede observar que la interacción electromagnética durante el proceso de soldadura si tiene efectos en el comportamiento electroquímico de las uniones, ya que es muy notario la similitud en el comportamiento entre el material base y la soldadura sin interacción electromagnética y es claro que la interacción electromagnética generó modificaciones, como ya se había mencionado el efecto no sigue un comportamiento lineal, si es apreciable que al aplicar el campo magnético de 1 mT el grado de sensibilidad aumenta, pero al incrementar el campo aplicado a 2 y 3 mT el grado de sensibilidad va disminuyendo gradualmente, lo que prueba que la aplicación de un determinado campo electromagnético de baja intensidad con una orientación perpendicular opuesta al cordón de soldadura propicia cambios favorables en la resistencia a la corrosión de las soldaduras.



**Figura 4.21** Resultados del grado de sensibilidad obtenidos de las curvas DLEPR.

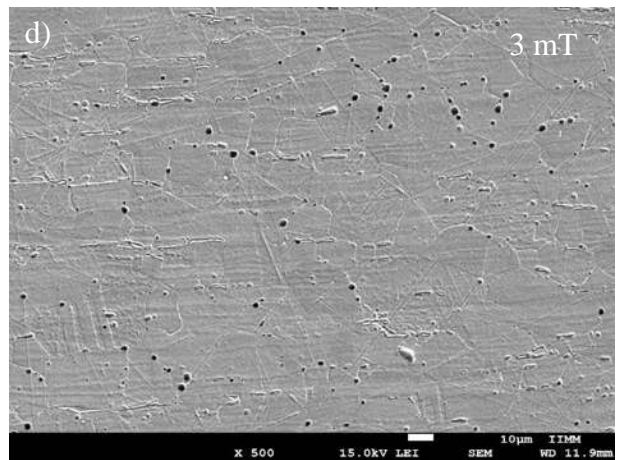
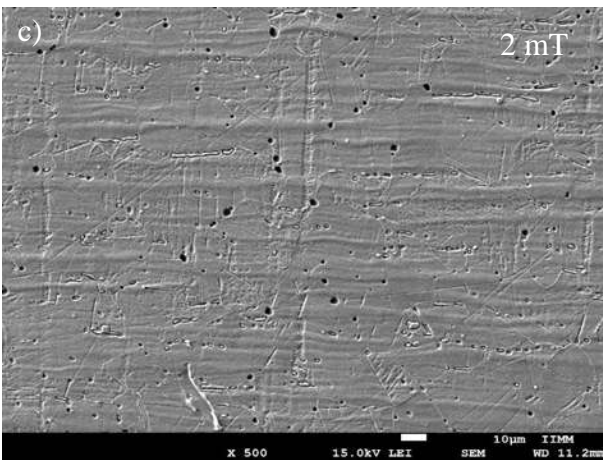
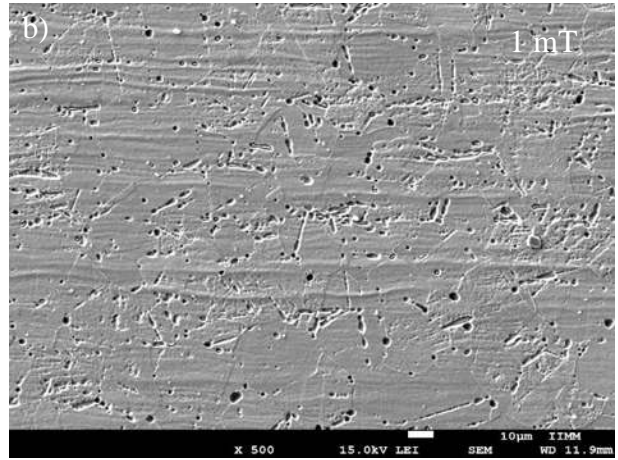
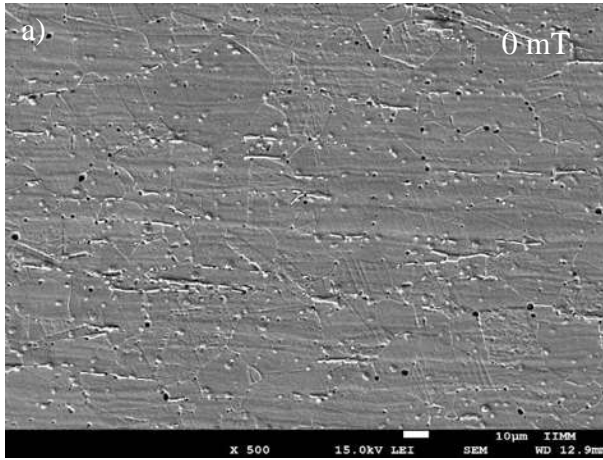
En la **figura 4.22** se muestra la superficie del material base después del ataque para la caracterización electroquímica, en estas dos imágenes se aprecia el tipo de corrosión que se presenta, principalmente localizada alrededor de los granos ortogonales de la austenita o límites de grano, conocida como corrosión intergranular, la cual es atribuida a la precipitación de carburos ricos en cromo tomando en cuenta que la solución utilizada fue en base a  $H_2SO_4 + KSCN$  con el propósito de revelar pequeños indicios de sensibilidad, lo que queda de manifiesto en la **figura 4.22**. También cabe mencionar el efecto de la ferrita  $\delta$ , que es una fase rica en cromo y algunos otros elementos estabilizadores de la ferrita y elementos estabilizadores de austenita, además es conocido que la presencia de la ferrita  $\delta$  disminuye la resistencia a la corrosión por picaduras y puede disminuir la resistencia a la sensibilización cuando está presente como una red continua en los límites de grano [36]. De modo que en la **figura 4.22** también se observa no solo el resultado de la corrosión intergranular, sino también se observa un ataque localizado alrededor de los listones de la ferrita  $\delta$ , como se aprecia en la



**figura 4.22b.**

En la **figura 4.23** se pueden observar las cuatro diferentes condiciones de soldadura a las mismas magnificaciones y se puede correlacionar esta imagen con los resultados del grado de sensibilidad, en donde la unión con la aplicación de interacción electromagnética de 1 mT fue la tuvo el peor resultado de todas las condiciones, como se puede ver en la **figura 4.23b**

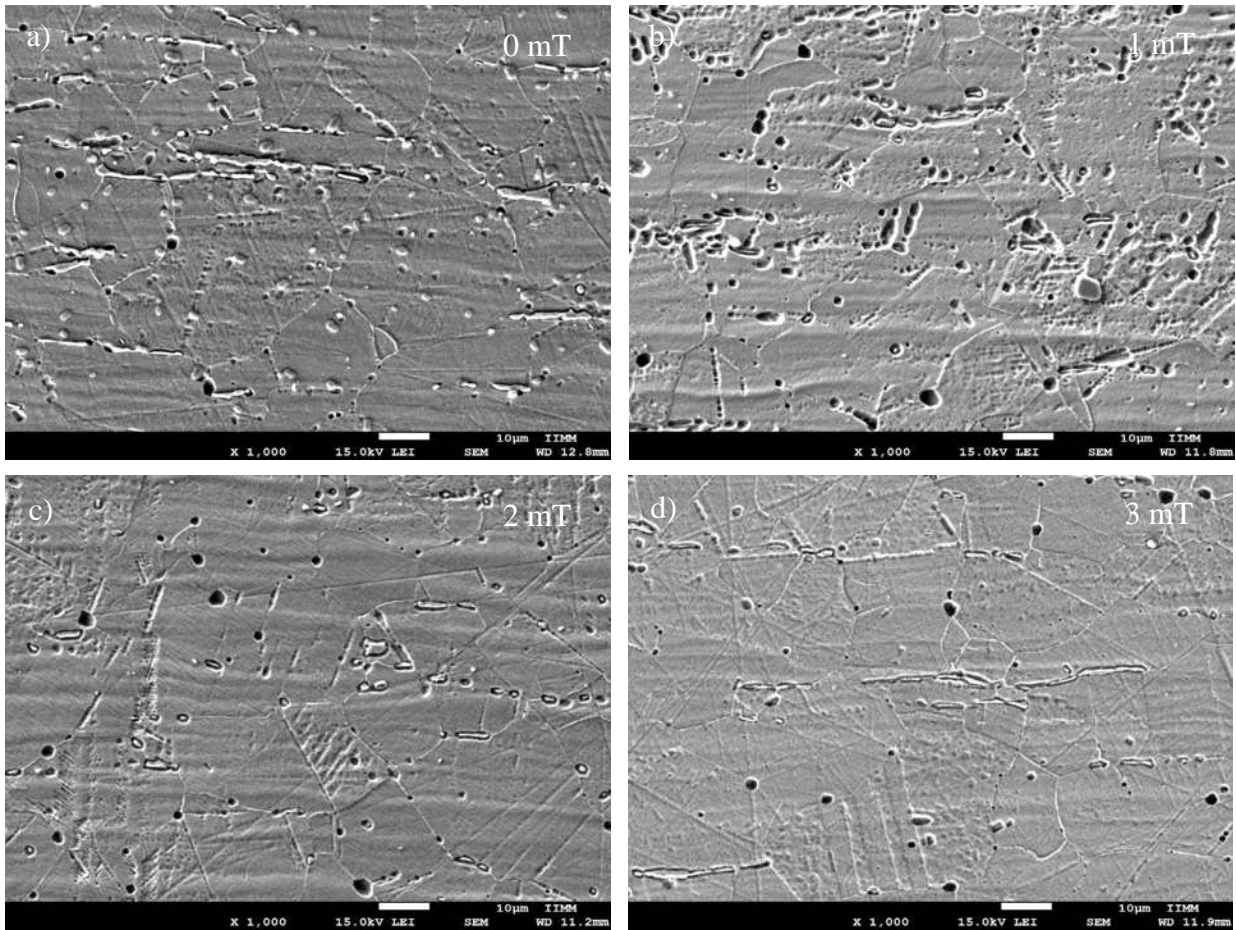
correspondiente a esta muestra, claramente la superficie presenta una mayor proporción de picaduras producidas durante el ensayo electroquímico.



En la **figura 4.24** se aprecia la morfología del ataque electroquímico realizado en la ZAT de las diferentes condiciones de soldadura y al igual que el material base las uniones también presentan corrosión intergranular, pero en la **figura 4.24b** también se puede apreciar como además de la corrosión intergranular y hay una morfología diferente que presenta corrosión en torno a listones de ferrita  $\delta$ , esta morfología se denota en mayor proporción que en las demás condiciones, y ya que esta condición con interacción electromagnética de 1 mT fue la que registro el mayor grado de sensibilización, se puede asociar a la ferrita  $\delta$  con la disminución de la resistencia a la corrosión y en las **figuras 4.24b y c** se observa una notable disminución de este tipo de morfología, presentando en su mayoría picaduras en los límites de grano debido a la precipitación de carburos de cromo. De modo que es evidente el efecto de la interacción electromagnética sobre la ferrita  $\delta$ , la cual es ferromagnética, ya que al modificar la distribución y cantidad de ferrita delta se ven afectadas las propiedades electroquímicas de las uniones soldadas. Es posible que debido a que el acero inoxidable austenítico 304L contiene un bajo contenido de carbono con la finalidad de evitar la precipitación de carburos de cromo durante el proceso de soldadura, hace que sean más notables los efectos de es la ferrita  $\delta$  sobre

**Figura 4.23** Micrografías del ataque producido por la caracterización electroquímica en la ZAT de las diferentes condiciones de soldadura, a) sin campo magnético, b) con campo de 1mT, c) con campo de 2mT, d) con campo de 3mT.

el comportamiento electroquímico es la ferrita  $\delta$ .



**Figura 4.24** Figura 4.23 Micrografías del ataque producido por la caracterización electroquímica en la ZAT de las diferentes condiciones de soldadura, a) sin campo magnético, b) con campo de 1mT, c) con campo de 2mT, d) con campo de 3mT.

Dentro de los efectos producidos como resultado de aplicar un campo magnético durante el proceso de soldadura se presenta el fenómeno de magnetostricción, que es el cambio de dimensiones en el cristal debido al alineamiento de los dominios magnéticos del material con el campo magnético aplicado. Además que la magnetostricción también depende del sentido que sea aplicado el campo magnético exterior ya dependiendo de este puede dilatar o expandir la red cristalina generando cambios, además los átomos intersticiales de carbono y nitrógeno

distorsionan la red fcc, haciendo que se expanda alrededor de 1% linealmente por 1% en peso de soluto [37]. En el caso de los aceros inoxidable austeníticos la magnetostricción actúa sobre los intersticios o huecos de la microestructura, que en el caso de la austenita existen dos tipos de intersticios los tetraédricos y octaédricos. De manera que si la interacción electromagnética actúa expandiendo o contrayendo la microestructura, también afecta los intersticios, y ya que el carbono se posiciona en estos intersticios es evidente que al modificarlos va a cambiar la difusividad del carbono y por ende también va a modificar la formación y distribución de otros elementos en la microestructura, tales como la ferrita  $\delta$  y la martensita  $\alpha'$ .

## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.**

En base a los resultados obtenidos en la experimentación de este proyecto y al correspondiente análisis de estos es posible obtener las siguientes conclusiones

1. En el cordón de soldadura no se obtuvo un incremento en las propiedades mecánicas de tensión, debido al tipo de electrodo utilizado y a la interacción electromagnética de

baja intensidad, ya que el uso de la interacción electromagnética es aplicada con la finalidad de minimizar el fenómeno de sensibilización en la ZAT.

2. El efecto de la interacción electromagnética de baja intensidad, presenta un cambio apreciable en el tipo de microestructura de la ZAT donde se aprecia una mejor distribución de la ferrita  $\delta$  y la presencia de martensita  $\alpha'$  a medida que incrementa la intensidad del campo magnético aplicado.
3. De igual forma en los perfiles de microdureza obtenidos se puede observar el efecto de la interacción electromagnética en un incremento de 1.6 a 24 % de la microdureza promedio para 2 y 3 mT respectivamente dependiendo del tipo de microestructura presente de acuerdo a la intensidad del campo magnético aplicado.
4. En cuanto a la resistencia a la corrosión se demostró que la interacción electromagnética de 3 mT produce cambios que contribuyen a la disminución del grado de sensibilización, esto se atribuye directamente a la distribución de la ferrita  $\delta$  y a la reducción de la precipitación de los carburos de Cr.
5. Mientras que por otra parte la intensidad del campo magnético aplicado en forma externa de 1 mT, produce un incremento en la relación  $I_r/I_a$ , esto ocasiona un mayor deterioro de la superficie del material, debido a que la intensidad del campo magnético generado por la corriente de soldadura es mayor que la intensidad del campo magnético aplicado, por lo cual la resultante de las magnitudes se inclina más a la producida por la corriente de soldadura y propicia la modificación de la distribución de la ferrita  $\delta$  incrementando el deterioro superficial de la ZAT.
6. En base a los resultados obtenidos de la microestructura, microdureza y a la caracterización electroquímica es notorio que la aplicación de un campo electromagnético durante la soldadura no produce efectos con un comportamiento completamente linealizado, pero sí demostró seguir una tendencia al incremento en la intensidad del campo magnético aplicado.

## **TRABAJO FUTURO.**

Incrementar la magnitud del campo magnético aplicado para observar el efecto producido sobre la corrosión de la ZAT.

Ajustar los parámetros del proceso de soldadura como incrementar la velocidad de avance para minimizar las dimensiones de la sobre monta del cordón de soldadura o reducir la intensidad de corriente.

Utilizar un material de aporte diferente con mayor resistencia mecánica para evaluar la ZAT respecto a la resistencia a la tensión en comparación con el material base, de tal forma de provocar las fracturas en cualquiera de estas dos partes del material soldado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. CURIEL, F.F., GARCÍA, R., LÓPEZ, V.H., and GONZÁLEZ-SÁNCHEZ, J., *Effect of magnetic field applied during gas metal arc welding on the resistance to localised corrosion of the heat affected zone in AISI 304 stainless steel*. Corrosion Science, 2011. **53**(7): p. 2393-2399.
2. CURIEL, F.F., GARCIA, R., LOPEZ, V.H., GARCIA, M.A., and 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, 2013. **54**(1): p. 122-125.
3. CURIEL, F.F., GARCÍA, R., LÓPEZ, V.H., and GONZÁLEZ-SÁNCHEZ, J., *Enhancing Corrosion Resistance of 304 Stainless Steel GMA Welds with Electromagnetic Interaction*. Materials transactions, 2011. **52**(8): p. 1701-1704.
4. KAUL, R., PARVATHAVARTHINI, N., GANESH, P., MULKI, S.V., SAMAJDAR, I., DAYAL, R.K., and KUKREJA, L.M., *A novel pre-weld laser surface treatment for enhanced intergranular corrosion resistance of austenitic stainless steel weldments*. Welding Journal, 2009: p. 233-242.
5. KOKAWA, H., *Weld decay-resistant austenitic stainless steel by grain boundary engineering*. Journal of Materials Science, 2005. **40**(4): p. 927-932.
6. RABENSTEINER, G., PERTENEDER, E., and SCHABEREITER, H., *Welding Metallurgy of Stainless Steels*. ed. UK. Springer. 1988.
7. MCGUIRE, M.F., *Stainless Steels for Design Engineers*. 2008: ASM International.
8. LUO, H., LI, X., DONG, C., HOU, Y., XIAO, K., and CHENG, X., *Electrochemical Behaviour and Surface Analytical of Welded Stainless Steel in the Room Temperature Simulated PWR Water*. ISIJ international, 2012. **52**(12): p. 2266-2272.
9. LIPPOLD, J.C. and KOTECKI, D.J., *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. ed. New Jersey. Wiley-Interscience. 2005.
10. GOLDSCHMIDT, H.J., J. Iron Steel Inst., 1948. **160**: p. 345.
11. PHILIBERT, J., HENRY, G., ROBERT, M., and PLATEAU, J., Mem. Sci. Rev. Metall. , 1961. **58**: p. 557.
12. CASA, C.D., NILESHWAR, V.B., and MELFORD, D.A., J. Iron Steel Inst., 1969. **160**: p. 1325.
13. KOKAWA, H., SHIMADA, M., and SATO, Y.S., JOM, 2000. **52**(7): p. 34.
14. PADILHA, A.F. and RIOS, P.R., *Decomposition of Austenite in Austenitic Stainless Steels*. ISIJ International, 2002. **42**(4): p. 325-337.
15. GWYTHER, J.R., HOBDELL, M.R., and HOOPER, A.J., Met Technol., 1976. **1**: p. 406.
16. W-TAI, H. and HONEYCOMBE, R.W.K., Mater. Sci Technol., 1985. **1**: p. 385.
17. LIN, P., PALUMBO, G., ERB, U., and AUST, K.T., *Influence of grain boundary character distribution on sensitization and intergranular corrosion of alloy 600*. Scripta Metallurgica et Materialia, 1995. **33**(9): p. 1387-1392.
18. PALUMBO, G. and AUST, K.T., *Structure-dependence of intergranular corrosion in high purity nickel*. Acta Metallurgica et Materialia, 1990. **38**(11): p. 2343-2352.
19. KOKAWA, H., SHIMADA, M., and SATO, M., *Grain-boundary structure and precipitation in sensitized austenitic stainless steel*. Journal of Materials, 2000. **52**(7): p. 34-37.

20. WATANABE, T., Res. Mechanica, 1984. **11**: p. 47.
21. PALUMBO, G., LEHOCKEY, E.M., and LIN, P., Journal of Materials, 1998. **50**: p. 40.
22. SEARS, F. and ZEMANSKY, M., *W. Young, HR Freedman, R. A Física Universitaria. Con física moderna. Volumen 2.* Undécima ed. México. Pearson Educación. 2004.
23. GRIFFITHS, D.J. and COLLEGE, R., *Introduction to electrodynamics.* ed. Upper Saddle River, NJ. Prentice hall. 1999.
24. ASKELAND, D.R. and PHULÉ, P.P., *Ciencia e ingeniería de los materiales.* ed. México. Thomson. 1998.
25. CULLITY, B.D. and GRAHAM, C.D., *Introduction to Magnetic Materials.* ed. New Jersey. Wiley. 2011.
26. O'BRIEN, A., JENNEY, C.L., SOCIETY, A.W., and COMMITTEE, W.H., *Welding Handbook: Welding processes, part 1.* ed. USA. AWS. 2001.
27. O'BRIEN, A., JENNEY, C.L., SOCIETY, A.W., and COMMITTEE, W.H., *Welding Handbook: Welding Science and Technology.* ed. USA. AWS. 2001.
28. WATANABE, Y., TAKEDA, T., and SATO, H., *Effect of Magnetic Field on Weld Zone By Spot-welding in Stainless Steel.* ISIJ International, 2006. **46**(9): p. 1292-1296.
29. FUJII, H. and TSUREKAWA, S., *Diffusion of carbon in iron under magnetic fields.* Physical Review B, 2011. **83**(5): p. 054412.
30. VANDER, G.F., LUCAS, G.M., and MANILOVA, E.P., *ASM Handbook: Metallography and Microstructures of Stainless Steels and Maraging Steels.* ed. USA. ASM. 2004.
31. RODRÍGUEZ, R.C., *Efecto del Campo Magnético Perpendicular al Arco eléctrico en la Penetración de la Soldadura en el Acero Austenítico 304 y su Comportamiento Electroquímico en la ZAT. Tesis para obtener el grado de Maestro en Metalurgia y Ciencia de Materiales.*, in *Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales.* 2013, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo: México.
32. AWS *Gas Metal Arc Welding, En; Welding Handbook.* ed. USA. AWS. 1991.
33. ASTM, *ASTM E8M-04: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric].* 2002.
34. ASTM, *ASTM E23-02: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.* 2002.
35. MARSHALL, P., *Austenitic Stainless Steels: Microstructure and Mechanical Properties.* ed. UK. Springer. 1984.
36. SEDRIKS, A.J., *Corrosion of stainless steels.* Second ed. New York. Wiley - interscience. 1996.
37. G.E. TOTTEN, M.N., R.R. BLACKWOOD, and JARVIS, A.L.M., *ASM Handbook: Failures Related to Heat Treating Operations.* ed. USA. ASM. 2002.