

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

**Facultad de ingeniería**

**Programa de Ingeniería Mecánica**

**Trabajo de Grado:**

**Evaluación de la influencia de los parámetros del proceso de soldadura SMAW en la soldabilidad y el desempeño de la unión soldada del acero balístico MIL-DTL-46100E con electrodo E312-16 en la Construcción Naval**

**Rodrigo Alfonso Figueroa Osorio**

**Tutor: Jairo Cabrera Tovar, PhD.**

**Co-tutor: Luis Marcos Castellanos Gonzáles, PhD.**

**2018**

## RESUMEN

El acero balístico 46100E, usado en la construcción de embarcaciones es de difícil soldabilidad por tener alto carbono equivalente y haber sido tratado con temple y revenido, con dureza superior a los 40 HRC (Hardness Rockwell C). Actualmente se sueldan las planchas por el método SMAW con electrodo E312-16. El WPS establecido para este fin establece una soldadura sin bisel, con una apertura de 6 mm y con tres pases de soldadura, con electrodo E312-16, diámetro de 1/8". Los resultados micro estructurales y la distribución de las propiedades mecánicas de estas uniones no son las deseadas: el cordón (zona de fusión) es muy ancho con dureza muy baja, la Zona afectada térmicamente (ZAT) del metal base es muy ancha, con una importante caída de dureza respecto a la deseada en dicha zona; estas dos zonas blandas contiguas hacen que la unión sea vulnerable a los impactos de balas, creando una alta probabilidad de ser perforada por un proyectil. A esto se suma otro problema, que en la zona de sobrecalentamiento aparecen picos de dureza por presencia de martensita, lo que sumado a las tensiones residuales y el hidrógeno difusivo puede provocar formación de grietas en frío. En este proyecto se ha planteado encontrar una mejor combinación de parámetros tecnológicos de soldadura que permitirán reducir el ancho de las zonas blandas (metal de aporte y ZAT) y nivelar los valores de dureza en estas zonas tratando que sean lo más cercano al del metal base no afectado térmicamente (subir dureza del metal de aporte por dilución, bajar los picos de dureza de la zona de sobrecalentamiento y subir dureza del resto de la ZAT).

En el proyecto de grado, se desarrollan corridas experimentales de soldadura SMAW del acero balístico y el electrodo antes mencionados con tres variables en dos niveles: 1) Apertura (separación de las juntas) de 3,5 mm y de 2,5 mm; 2) con precalentamiento de (180-200) °C y sin precalentamiento y la energía lineal de soldadura en dos niveles (cambiando el diámetro del electrodo). Lo que permitirá evaluar de forma preliminar la influencia de estas combinaciones en los parámetros de interés: ancho de las zonas de la unión (cordón y ZAT) y niveles de dureza en la unión. Para este estudio se seleccionaron las probetas para análisis macro estructural y micro estructural por microscopía óptica y electrónica. Se desarrollaron perfiles de dureza y se correlacionan propiedades mecánicas con microestructuras, obteniendo resultados satisfactorios en cuanto a la integridad de la unión soldada. Estos resultados servirán de base para nuevas corridas experimentales y sus réplicas en para el procesamiento estadístico y la inclusión de nuevos ensayos, como pueden ser los de impacto balístico.

Palabras Clave: Acero Balístico, Soldabilidad, Proceso SMAW, zona afectada térmicamente, precalentamiento, dureza.

## **AGRADECIMIENTOS**

De antemano agradezco a Dios, a mi madre, mi tía, y todas aquellas personas que han sido partícipes de mi formación y crecimiento como persona, porque siempre han creído en mí, y me han apoyado constantemente en cada proyecto que se ha presentado en mi vida.

Agradezco a mi tutor, PhD Jairo Cabrera Tovar por su colaboración y ayuda incondicional en la consecución de trabajo de grado.

Debo agradecer al sr Kevin Torrenegra, técnico de laboratorio de materiales de la Universidad Tecnológica de Bolívar, por su colaboración y buena atención durante el desarrollo de este trabajo.

Agradezco encarecidamente a mi asesor de trabajo de grado, Luis Marcos Castellanos González; por su dedicación, su pasión a la investigación se ve reflejada en este trabajo que de forma desinteresada aportó todo el conocimiento posible para la realización de este proyecto, lo cual ha servido para mi formación como un profesional integral.

Agradezco a la Universidad Tecnológica de Bolívar por ser la institución que me ha formado para convertirme en un profesional íntegro.

# DEDICATORIA

A mi hijo Matías Figueroa Coronell

A mi familia: mi madre, mis tías, mis abuelos, mis hermanos, mi novia

A todas las personas que me rodean y que de una u otra forma me han apoyado en las diferentes etapas de mi vida.

# **ABREVIATURA**

**ASME: American Society of Mechanical Engineer**

**ASTM: American Society of Testing Materials**

**AWS: American Welding Society**

**CCT: Continuous Cooling Transformation**

**CE: Carbono Equivalente**

**CrE: Cromo Equivalente**

**EDS: Espectros de Dispersión de Energía**

**END: Ensayos No Destructivos**

**HAZ: Heat Affected Zone**

**HRC: Hardness Rocwell C**

**HV: Hardness Vickers**

**NiE: Níquel Equivalente**

**Pcm: Parámetro de soldabilidad por composición química**

**Pw: Parámetro de Soldabilidad**

**SEM: Microscopia Electrónica de Barrido**

**TEC: Transformación de Enfriamiento Continuo**

**WPS: Welding Procedure Specification**

**ZAT: Zona Afectada Térmicamente**

## TABLA DE CONTENIDO

Introducción.....	10
1. Planteamiento y formulación del problema.....	12
1.1 Descripción del problema.....	12
1.2 Formulación del problema.....	13
2. Objetivos de la investigación.....	14
2.1 Objetivo general.....	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
3. Marcos referencial y teórico.....	15
3.1 Marco Referencial.....	15
3.2 Marco teórico.....	18
3.2.1 Proceso de soldadura por arco manual con electrodo revestido (SMAW).....	18
3.2.2 Zonas de la unión soldada de un acero al carbono mediante proceso SMAW.....	21
3.2.3 Diagramas termocinéticos. Las transformaciones de fase de la ZAT y su relación con la tendencia al agrietamiento.....	22
3.2.4 Defectos en las uniones soldadas. Grietas en frío y acciones evitarlas.....	26
3.2.5 Susceptibilidad al agrietamiento.....	26
3.2.6 Dilución en la unión soldada.....	29
3.2.7 Microdureza en las uniones soldadas.....	31
3.3 Técnicas de análisis micro estructurales.....	31
3.3.1 Microscopía óptica.....	31
3.3.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM) y Espectros de dispersión de energía (EDS)	32
4. Diseño Metodológico.....	32
4.1 Descripción de desarrollo metodológico experimental.....	32
4.2 Aplicación de condiciones de soldadura.....	34
4.3 Extracción de muestras.....	38
4.3.1 Preparación de muestras por pulido.....	39
4.3.2 Ataque Químico.....	40
4.3.3 Métodos y Ensayos utilizados para estudio de soldabilidad.....	40
5. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE SOLDABILIDAD.....	42
5.1 Caracterización macroestructural de las uniones soldadas.....	42
5.2 Caracterización microestructural y microdureza de las uniones soldadas.....	42
5.3 Resultados de la observación por microscopia electrónica de barrido (SEM) y Espectros de dispersión de energía (EDS).....	46
5.4 Medición de dilución.....	50
5.5 Discusión de resultados.....	53
6. CONCLUSIONES.....	55
Bibliografía.....	57
ANEXOS.....	59

## Tabla de Figuras

Figura 1. Remaches en embarcaciones, extraída de <a href="https://www.hiru.eus">https://www.hiru.eus</a> .....	15
Figura 2. Esquema de procesos y ensayos de micro dureza aplicada en la zona afectada térmicamente Acero Mil 46100 soldada con electrodo E312-16. Extraída de Giraldo,2005	17
Figura 3. proceso de soldadura SMAW, tomada de <a href="http://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/soldadura-smaw-que-es-y-procedimiento">http://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/soldadura-smaw-que-es-y-procedimiento</a> .....	19
Figura 4. Nomenclatura de zonas y limites en la zona afectada térmicamente .....	22
Figura 5. Diagrama de equilibrio del sistema Fe-C y la zona afectada térmicamente de un acero al carbono.....	23
Figura 6. Representación del diagrama termocinético de un acero medio en carbono, AISI 1035. Velocidades de enfriamiento $V_c$ (crítica de temple) y otras tres velocidades de enfriamiento ( $V_1$ , $V_2$ y $V_3$ ). Extraído de Ferrer y Amigó,2000 .....	24
Figura 7. Representación esquemática del ciclo térmico de temple y revenido del acero MIL-DTL-46100E extraída de <a href="https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/10-Temple_y_Revenido_v2.pdf">https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/10-Temple_y_Revenido_v2.pdf</a> .....	25
Figura 8. Análisis de macrografía para dilución geométrica, imagen extraída de <a href="http://blog.utp.edu.co/metalografia/10-soldadura-10-1-procesos-de-soldadura/">http://blog.utp.edu.co/metalografia/10-soldadura-10-1-procesos-de-soldadura/</a> .....	29
Figura 9. Ejemplo de unión de acero AISI 410 con metal de aporte austenítico. Los puntos A y B representan las composiciones en Ni y Cr equivalentes del metal base y el electrodo, el punto C muestra la composición y estructura del producto de la dilución.....	30
Figura 10. Esquema de descripción del desarrollo experimental .....	33
Figura 11. Probetas de soldadura MIL-DTL-46100E 30cmX15cm .....	35
Figura 12. Probeta de soldadura Mil-DTL-46100E, Medición de temperatura con pistola infrarroja, pirómetro. ....	36
Figura 13. División de probetas, aplicación de cordones de soldadura.....	36
Figura 14. Probeta de soldadura, Acero MIL-DTL46100E, Cara superior .....	38
Figura 15. Probeta de soldadura, Acero MIL-DTL-46100E Cara inferior.....	38
Figura 16. Probetas preparadas en laboratorio. Encapsuladas y pulidas.....	40
Figura 17. Macrografía de probetas con 3 cordones de 2.5 y 3.5mm, con precalentamiento y sin precalentamiento.....	42

Figura 18. Cuadro comparativo: imágenes microscopia óptica a 50X en la zona afectada térmicamente, separadas por cada cordón de soldadura de las probetas atacadas nital 2% .....	43
Figura 19. Micrografías y microdureza de la zona de sobrecalentamiento en las uniones soldadas con los tres pases bajo diferentes condiciones .....	45
Figura 20. Los dos perfiles de microdureza con apertura 2,5 mm con y sin precalentamiento. Diferencias significativas de los valores de microdureza en la zona de sobrecalentamiento. ....	45
Figura 21. Macrografía de probeta No. 3 sin precalentamiento de 2,5 mm. En ésta se muestran distintas microestructuras en la ZAT, obtenidas por medio de microscopio electrónico de barrido: zona de grano grueso, borde de fusión y zona blanda.....	46
Figura 22. Macrografía de probeta No. 3 con precalentamiento de 2,5 mm. En ésta se muestran distintas microestructuras en la ZAT, obtenidas por medio de microscopio electrónico de barrido: fusión, preparación de la junta, grano fino, grano grueso .....	47
Figura 23. Espectro obtenido mediante EDS para el revestimiento de un electrodo E312-16 de probeta No. 3 sin precalentamiento de 2.5 mm .....	47
Figura 24. Espectro de dispersión de energía en la junta soldada de probeta No. 3 sin precalentamiento de 2.5 mm .....	48
Figura 25. EDS por elementos en la junta de la unión soldada con un electrodo E312-16	48
Figura 26. Espectro obtenido mediante EDS para el revestimiento de un electrodo E312-16 de probeta No. 3 con precalentamiento de 2.5 mm.....	49
Figura 27. Espectro de dispersión de energía en la junta soldada de probeta No. 3 Con precalentamiento de 2.5 mm. ....	49
Figura 28. EDS por elementos en la junta de la unión soldada con un electrodo E312-16	50
Figura 29. Diagrama de Schaeffler, con los diferentes porcentajes de níquel y cromo equivalentes del electrodo y metal base sin diluir, grafica tomada de (Ospina, Aguirre, & Parra, 2007).....	52
Figura 30. Macrografía de probeta No. 3 sin precalentamiento de 2,5 mm. En ésta se muestran distintas microestructuras en la ZAT, obtenidas por medio de microscopio electrónico de barrido: zona de grano gueso, borde de fusión y zona blanda.....	60
Figura 31. Macrografía de probeta No. 3 con precalentamiento de 2,5 mm. En ésta se muestran distintas microestructuras en la ZAT, obtenidas por medio de microscopio electrónico de barrido: fusión, preparación de la junta, grano fino, grano grueso .....	61



Figura 32. Macrografía de probeta No. 3 con precalentamiento de 3,5 mm. En ésta se muestran distintas microestructuras en la ZAT, obtenidas por medio de microscopio electrónico de barrido: zona de grano fino, preparación de la junta, zona de grano grueso	62
Figura 33. Macrografía de probeta No. 3 sin precalentamiento de 3,5 mm. En ésta se muestran distintas microestructuras en la ZAT, obtenidas por medio de microscopio electrónico de barrido: zona de grano fino, zona de penetracion, zona de grano grueso...	63
Figura 34. Espectro obtenido mediante EDS para el revestimiento de un electrodo E312-16 de probeta No. 3 sin precalentamiento de 2.5 mm .....	64
Figura 35. Espectro de dispersión de energía en la junta soldada de probeta No. 3 sin precalentamiento de 2.5 mm .....	64
Figura 36. EDS por elementos en la junta de la unión soldada con un electrodo E312-16	65
Figura 37. Espectro obtenido mediante EDS para el revestimiento de un electrodo E312-16 de probeta No. 3 con precalentamiento de 2.5 mm .....	65
Figura 38. Espectro de dispersión de energía en la junta soldada de probeta No. 3 Con precalentamiento de 2.5 mm. ....	66
Figura 39. EDS por elementos en la junta de la unión soldada con un electrodo E312-16	66
Figura 40. Espectro obtenido mediante EDS para el revestimiento de un electrodo E312-16 de probeta No. 3 sin precalentamiento de 3.5 mm .....	67
Figura 41. Espectro de dispersión de energía en la junta soldada de probeta No. 3 sin precalentamiento de 3.5 mm .....	67
Figura 42. EDS por elementos en la junta de la unión soldada con un electrodo E312-16	68
Figura 43. Espectro obtenido mediante EDS para el revestimiento de un electrodo E312-16 de probeta No. 3 con precalentamiento de 3.5 mm .....	68
Figura 44. Espectro de dispersión de energía en la junta soldada de probeta No. 3 con precalentamiento de 3.5 mm. ....	69
Figura 45. EDS por elementos en la junta de la unión soldada con un electrodo E312-16	69
Figura 46. Barrido de microdureza de juntas de soldadura con electrodo E312-16 de probeta No. 3 de 2.5 mm sin precalentamiento .....	70
Figura 47. Barrido de dureza de la junta en diferente zona de la ZAT .....	71
Figura 48. Barrido de microdureza de juntas de soldadura con electrodo E312-16 de probeta No. 3 de 2.5 mm con precalentamiento .....	71
Figura 49. Barrido de dureza de la junta en diferente zona de la ZAT .....	72
Figura 50. Barrido de microdureza de juntas de soldadura con electrodo E312-16 de probeta No. 3 de 3.5 mm sin precalentamiento .....	72

Figura 51. Barrido de dureza de la junta en diferente zona de la ZAT .....	73
Figura 52. Barrido de microdureza de juntas de soldadura con electrodo E312-16 de probeta No. 3 de 3.5 mm con precalentamiento .....	73
Figura 53. Barrido de dureza de la junta en diferente zona de la ZAT .....	74

### **Listado de tablas**

Tabla 1. Nomenclatura de probetas según características de soldeo .....	34
Tabla 2. Características y parámetros de probetas .....	35
Tabla 3. Cálculo de calor suministrado a probeta de 3.5 mm sin precalentamiento .....	37
Tabla 4. Cálculo de calor suministrado en la probeta 3.5mm con precalentamiento a 200 grados Celsius.....	37
Tabla 5. Cálculo de calor suministrado en la probeta 2.5 sin precalentamiento .....	37
Tabla 6. Cálculo de calor suministrado en la probeta 2.5 con precalentamiento a 200 grados Celsius.....	37
Tabla 7. Nomenclatura utilizada para el análisis de probetas en laboratorio.....	39
Tabla 8. Técnicas de caracterización de materiales empleadas para el estudio de soldabilidad.....	41
Tabla 9. Porcentajes de dilución Geométrica en probetas con tres cordones de soldadura .....	50
Tabla 10. Composición química de Acero MIL-DTL-46100E según la composición típica del fabricante Astralloy Steel .....	51
Tabla 11. Composición química según AWS A5.4 para electrodo revestido AWS E312-16 del fabricante LINCOLN ELECTRIC COMPANY .....	51
Tabla 12. Porcentajes de cromo y níquel equivalente, de acuerdo a composición química del metal y electrodos, involucrados en la unión soldada .....	52

## Introducción

A pesar del desarrollo de nuevos materiales compuestos de gran resistencia mecánica y resistencia al impacto, el acero para blindaje sigue siendo el material más utilizado para la construcción de estructuras navales dedicadas a la defensa y al combate. Con el fin de reducir el peso de las embarcaciones de este sector se han introducido en el mismo los aceros de Alta Resistencia Ligeramente Aleados (HSLA), en los que la conformación termo mecánica controlada, con afinado de grano y tratamiento de temple y revenido les confiere una excelente combinación de propiedades mecánicas; alta resistencia mecánica y dureza, manteniendo altos niveles de resistencia al impacto. Uno de los aceros para blindaje más utilizados en la construcción de embarcaciones militares es del tipo MIL 46100.

El principal problema histórico en la fabricación de vehículos militares a partir de láminas de acero balístico ha sido el proceso de unión o ensamble. La soldadura por arco eléctrico manual (SMAW) sigue siendo el proceso de unión más confiable, económico y preferido<sup>1</sup>. Sin embargo, la soldabilidad de estos aceros es limitada por dos razones: una, debido a sus niveles altos de carbono equivalente (CE) y la otra, su estado estructural de endurecimiento por temple y revenido.

En el proceso de soldadura por arco eléctrico se dan tres procesos simultáneos y localizados; de reacciones metalúrgicas, de fusión y de tratamiento térmico, los que provocan diversas reacciones y cambios micro estructurales difíciles de controlar, convirtiendo a la unión en una zona heterogénea, con estructuras muchas veces no deseadas y diferentes a las del metal base; a ello se le suman los defectos no admisibles, como son las grietas en frío y en caliente, que pueden surgir.

Se han desarrollado muchas investigaciones con el fin de perfeccionar los procesos de soldadura de los aceros para blindaje y de encontrar los electrodos más adecuados, así como los parámetros de soldadura que garanticen el mejor desempeño balístico de las uniones soldadas. Trabajos recientes desarrollados en Colombia sobre la soldabilidad del acero MIL-DTL 46100E, demostraron que los electrodos de acero inoxidable y dúplex son una buena opción para soldar el acero MIL-DTL 46100E, siendo el electrodo E 312-16 uno de los más utilizados. No obstante, a estos avances, siguen existiendo problemas no resueltos: La baja dureza de la zona de fusión, los picos de durezas altas en la zona de

---

<sup>1</sup> (Facultad de Minas Universidad Nacional, Grupo de Soldadura, 2005)

sobrecalentamiento por la formación de estructuras martensíticas, fuente de formación de grietas en frío, y la pérdida de dureza en la zona de revenido de la ZAT.

Los estudios desarrollados han constituido una excelente guía para la construcción de embarcaciones militares con el acero MIL-DTL 46100E y electrodo E 312-16, pero en dichos trabajos se mantuvieron constantes algunos parámetros tecnológicos de soldadura y el espesor de las láminas a soldar, por lo que aquellos resultados no son aplicables para nuevas condiciones. El uso de láminas de acero de mayor espesor, exige cambios en el diámetro del electrodo, en la separación o apertura y en los parámetros del proceso de soldadura. Por otro lado, en los últimos años, en construcciones con acero MIL-A 46100 se han usado láminas de 4.3 mm con apertura de 6 mm y tres pases de soldadura. En estos procesos se ha observado que la zona de la unión es muy ancha, que se mantienen grandes heterogeneidades en las estructuras y propiedades de la unión; además se han presentado problemas de grietas en frío y rechazos de estructuras soldadas.

Este proyecto de investigación ha estado enfocado a evaluar de forma preliminar la influencia de tres variables sobre la soldabilidad metalurgia del acero para blindaje MIL-DTL 46100E con electrodo E312-16, que son: La apertura de las láminas, el uso del precalentamiento o sin él y la energía lineal de soldadura. La intención es tratar de reducir el ancho de la unión soldada, vulnerable a ser atravesada por los impactos de balas, nivelar los picos de dureza (bajos valores en la zona de fusión y en gran parte de la ZAT) con picos muy altos en la zona de sobrecalentamiento, tratando de que sean los más cercanos al valor de dureza del metal base.

## **1. Planteamiento y formulación del problema**

### **1.1 Descripción del problema**

El acero balístico MIL-DTL 46100E, usado en la construcción de embarcaciones es de difícil soldabilidad por tener alto carbono equivalente y haber sido tratado con temple y revenido, con dureza superior a los 40 HRC. La Welding Procedure Specification (WPS) utilizada actualmente para la fabricación de embarcaciones con acero micro aleado del tipo MIL 46100, Establece que las planchas deben ser unidas mediante el método de soldadura SMAW con metal de aporte electrodo E312-16, para este fin establece una unión a tope sin bisel, con una apertura de 6 mm y con tres pases de soldadura.

Los resultados micro estructurales y la distribución de las propiedades mecánicas de estas uniones no son las deseadas: el cordón (zona de fusión) es muy ancho con dureza muy baja, la Zona afectada térmicamente (ZAT) del metal base es muy ancha, con una importante caída de dureza respecto a la deseada en dicha zona; estas dos zonas blandas contiguas hacen que la unión sea vulnerable a los impactos de balas, creando una alta probabilidad de ser perforada por un proyectil. A esto se suma otro problema, que en la zona de sobrecalentamiento aparecen picos de dureza por presencia de martensita, lo que sumado a las tensiones residuales y el hidrógeno difusivo puede provocar formación de grietas en frío. Como consecuencia de los problemas evidenciados en los proyectos de fabricación de diversas embarcaciones con este acero, donde la rigidez de las uniones soldadas junto con los esfuerzos a los que se ve sometido el acero, tienden a presentarse múltiples grietas, y que son descubiertas cuando ya el buque se encuentra navegando, este suceso no deja de preocupar a las personas que abordan la nave sino a quienes se encargan de su construcción y reparación.

## 1.2 Formulación del problema

Se requiere encontrar la mejor combinación de parámetros tecnológicos de soldadura que permitan reducir el ancho de las zonas blandas (metal de aporte y ZAT) y nivelar los valores de dureza en estas zonas tratando que sean lo más cercano al del metal base no afectado térmicamente (subir dureza del metal de aporte por dilución, bajar los picos de dureza de la zona de sobrecalentamiento y subir dureza del resto de la ZAT).

Para la realización de dicho estudio que permita un análisis preliminar, es necesario seleccionar una cantidad considerable de cupones de prueba o piezas de metal, con las cuales se harán corridas de soldeo bajo condiciones estándares y control de variables fijas y aleatorias, donde se hace un esquema para evaluar el comportamiento de la estructura añadiendo precalentamiento y probando otra distancia de apertura entre placas, Utilizando como material de aporte un electrodo E312-16, el cual se ha demostrado en investigaciones anteriores que es un metal apropiado para esta aplicación<sup>2</sup>, lo anterior, será de gran utilidad para la realización de un análisis macro y micro estructural con la ayuda de métodos investigativos para la metalografía como microscopía óptica y electrónica, de igual forma se desarrollan perfiles de micro dureza, y se correlacionaran propiedades mecánicas con las respectivas microestructuras presentadas en la unión soldada.

---

<sup>2</sup> (Facultad de Minas Universidad Nacional, Grupo de Soldadura, 2005)

## **2. Objetivos de la investigación**

### **2.1 Objetivo general**

Evaluar de forma preliminar la influencia de los parámetros de soldadura del acero balístico MIL-DTL-46100E con electrodo E312-16, bajo proceso SMAW, sobre el ancho de las zonas de interés de la unión soldada y sobre la distribución de dureza en las mismas.

### **2.2 Objetivos específicos**

1. Realizar una evaluación micro estructural y de dureza de probetas del acero balístico objeto de estudio soldado mediante el proceso SMAW de forma tradicional con el electrodo E312-16 para identificar las oportunidades de mejora.
2. Seleccionar las variables que tengan influencia en el ancho de la zona de unión, en sus microestructuras y propiedades, y que posteriormente sirvan de base para el desarrollo de un diseño de experimento factorial.
3. Desarrollar las corridas experimentales y elaborar probetas soldadas controlando las variables y otros parámetros fijos de interés.
4. Identificar las variables de mayor influencia en los parámetros de interés, reduciendo el ancho de las zonas (cordón y ZAT) y ofreciendo los perfiles de dureza deseados.

### 3. Marcos referencial y teórico

#### 3.1 Marco Referencial

La necesidad de unir materiales para la fabricación de diferentes tipos de elementos, ya sea para reparar, o construir una estructura de mayores dimensiones, entre estos podemos encontrar automóviles, embarcaciones, líneas de tuberías, tanques, etc. ha generado la distintas ideas y métodos para la respectiva unión de estos, y que con el pasar de los años ha venido evolucionando. En primera instancia se utilizaban los sujetadores roscados, en este método de unión se utilizan elementos como tornillos, pernos, tuercas, etc. Para realizar la fijación entre los diferentes materiales, cabe resaltar que esta unión no se realiza de manera permanente, algunas de las principales ventajas son:

- Facilidad en el ensamble
- Facilidad para el desensamble
- Menor costo de manufactura.

De igual forma, encontramos el Remachado, el cual es un tipo de unión que permite una fijación semi-permanente, estos remaches son un método que facilita la producción a un bajo costo. La industria aeronáutica es una de las principales áreas de aplicación de este tipo de unión, así como la industria naval en sus inicios optaba por utilizar numerosos remaches a lo largo del casco y partes principales de los buques, con esto lograban garantizar un correcto ensamble de las diferentes partes, pero a su vez, hacía de este un elemento más pesado y menos resistente.

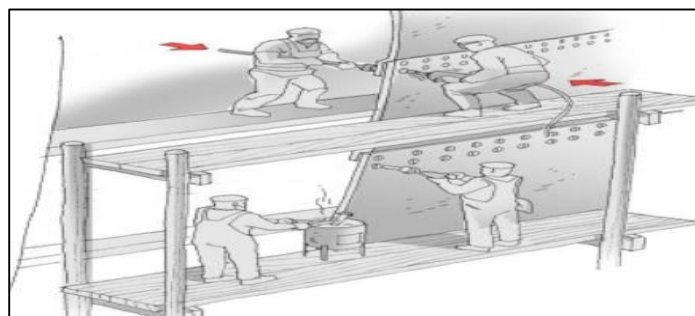


Figura 1. Remaches en embarcaciones, extraída de <https://www.hiru.eus>

Ante la necesidad de construir una serie de buques y en especial buques para la guerra, en la década de los años 40, surgen interrogantes acerca de los procedimientos usados para la unión de las planchas, eficiencia y reducción de costos. La técnica más moderna de la época y aun usada y recomendada en la actualidad para la aplicación es la soldadura, La soldadura



es un proceso de unión entre diferentes materiales con ayuda del calor, este método se puede realizar con ayuda de material de aporte o sin este, el proceso de Soldadura sobre los diferentes tipos de materiales ha sido realizado aproximadamente desde el año 1350 a.C. hasta hoy en la actualidad, factores como la precisión, el control de energía lineal de aporte, calidad de metales de aporte, etc. han permitido una mejora en los diferentes métodos de soldadura, este último lo podemos definir como el proceso mediante el cual se logra la unión entre materiales, esto se logra gracias a la acción del calor. Ya entrado en contexto general de la construcción de buques y la forma convencional de hacerlo, surgen ciertas dudas e interrogantes que desde ese entonces se han presentado a raíz de las grandes grietas que colapsan la estructura sin explicación alguna de lo que ocurre, algunas incluso al poco tiempo de haberse construido el buque.

Algunas de las investigaciones que se han realizado han determinado que algunos de los principales factores de estos fallos estructurales habrían sido: fragilidad de los aceros a bajas temperaturas, cálculos de diseño que no fueron considerados para la aplicación de los buques, defectos en la soldadura. Para todo lo anterior los entes reguladores especificaron procedimientos de fabricación, diseño, y técnicas de soldadura.

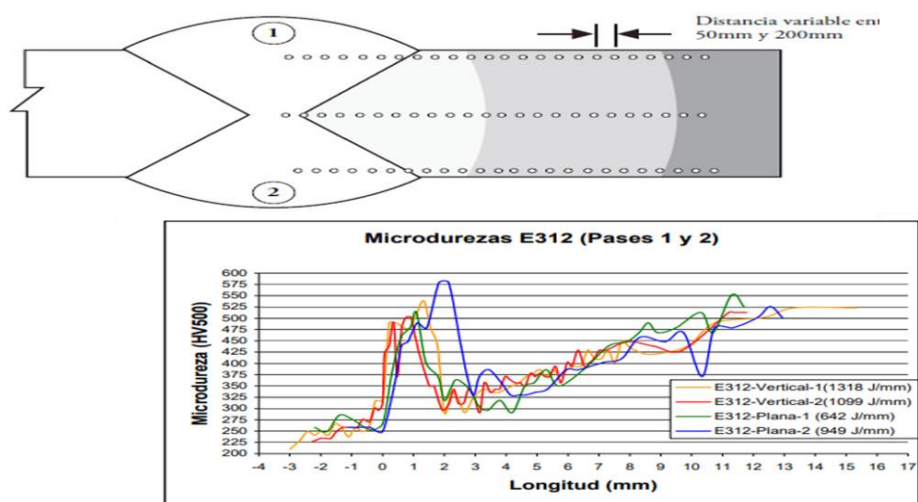
Algunas de las investigaciones más recientes en el ámbito de construcción naval y militar, se centran en los temas de soldabilidad, debido a las características que poseen estos aceros micro aleados para cumplir con los requisitos establecidos por la norma emitida por el departamento de estándares de defensa militar<sup>3</sup>. Dichos aceros poseen una alta resistencia al impacto, la cual se busca mantener con los diferentes metales de aporte por medio de la soldadura. En la búsqueda de métodos eficientes y que cumplan con los estándares de calidad de las uniones soldadas para aceros del tipo MIL 46100 se realizaron estudios de laboratorio a uniones mediante el proceso de soldadura GMAW con metal de aporte ER100S y respaldo de cobre<sup>4</sup> que resultó ser una opción adecuada, ya que este proceso pretende generar un enfriamiento más rápido y de esta forma, conseguir la aparición de estructuras martensíticas, lo cual se pudo constatar en base a resultados obtenidos en pruebas mecánicas y ensayos no destructivos. Sin embargo, este proceso no es favorable para algunas posiciones de soldeo y en casos especiales donde sea requerido no podrá ser usado.

---

<sup>3</sup> (Department of Defense Standards, Military for Shipment and Storage, 2008).

<sup>4</sup> (Mazuera, Suarez, & Giraldo, 2011)

Por otro lado, fue realizado un estudio por el grupo de soldadura de la facultad de minas de la universidad nacional de Colombia en el año 2005<sup>5</sup>, donde se obtiene una caracterización completa del metal base, así como, la comprobación de compatibilidad de las diferentes técnicas y electrodos del mercado, realizando un barrido de micro dureza sobre la zona afectada térmicamente como lo muestra en la siguiente figura.



**Figura 2. Esquema de procesos y ensayos de micro dureza aplicada en la zona afectada térmicamente Acero Mil 46100 soldada con electrodo E312-16. Extraída de Giraldo,2005**

En base a esta investigación, fue presentada una tesis de maestría donde involucran estudios de soldabilidad de un acero de blindaje con electrodos de acero inoxidable austeníticos óptimos para la unión soldada<sup>6</sup>, utilizando diferentes electrodos y evaluando la eficiencia y el comportamiento de la unión teniendo en cuenta las especificaciones de amperaje y velocidades del proceso de soldadura establecido y se evidenciaron, problemas de agrietamiento en la unión y el comportamiento balístico de las uniones soldadas no alcanza el del metal base, debido a la zona de reducción de dureza.

En el año 2007 se realizó un estudio para evaluar la susceptibilidad al agrietamiento inducido por hidrógeno en soldaduras de un acero para blindajes bajo especificación MIL A46100<sup>7</sup>, teniendo identificados problemas a nivel metalográfico y los posibles defectos que se podrían presentar en la unión soldada, de ésta manera, se implementa un ensayo de implante con geometría modificada, mediante el proceso de arco eléctrico con electrodo revestido, con

<sup>5</sup> (Facultad de Minas Universidad Nacional, Grupo de Soldadura, 2005)

<sup>6</sup> (Giraldo, 2005)

<sup>7</sup> (Unfried, Torres, Giraldo, & Bastidas, 2007)

aplicación de precalentamiento, y fue evidenciado un incremento de la susceptibilidad de agrietamiento inducido por hidrógeno, mientras que la incidencia del precalentamiento con respecto al agrietamiento no fue muy relevante.

En este mismo año se realizó una investigación concerniente a la soldabilidad en aceros disimiles<sup>8</sup>, donde se evalúa la unión de aceros mediante los procesos de soldadura por arco eléctrico y la complejidad de algunos equipos y máquinas requeridos para esto; teniendo en cuenta la composición de los aceros y metales de aporte, es posible lograr mejores resultados mediante el manejo de diagrama de schaeffler para predecir la estructura obtenida en la unión soldada de aceros inoxidable y aceros al carbono.

Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, este proyecto busca realizar una evaluación preliminar de la influencia de parámetros tecnológicos no tomados en cuenta en los estudios precedentes sobre soldabilidad metalúrgica del acero micro aleado (MIL-DTL-46100) utilizado para la fabricación de las embarcaciones de patrulla fluvial, con el fin de mejorar la calidad de la soldabilidad y características metalúrgicas de las uniones soldadas. En este estudio se pretende ver la influencia de tres factores importantes que son: el precalentamiento, la variación de la energía lineal de soldadura y la separación entre láminas a soldar, con lo cual se requiere reducir la tendencia al agrietamiento y elevar el desempeño de las uniones frente a los impactos de proyectiles.

## **3.2 Marco teórico**

### **3.2.1 Proceso de soldadura por arco manual con electrodo revestido (SMAW)**

Es la técnica en la cual el calor de soldadura suministrado, se genera por un arco eléctrico entre el metal base y un electrodo metálico consumible recubierto con materiales químicos en una composición adecuada y aplicado de forma manual

Se puede aplicar en procesos de fabricación y mantenimiento de estructuras metálicas, así como en la recuperación de piezas desgastadas y agrietadas. Aplicable en aceros, hierros fundidos, aluminio y bronce, siempre que el desgaste mínimo esté entre 0,5 y 1 mm. Es muy versátil, económico y cómodo por ser manual (con todas las posiciones).

---

<sup>8</sup> (Ospina, Aguirre, & Parra, 2007)

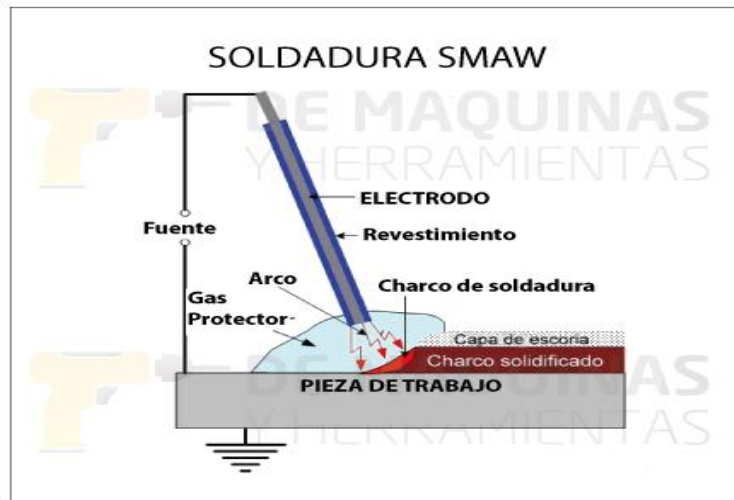


Figura 3. Proceso de soldadura SMAW, tomada de <http://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/soldadura-smaw-que-es-y-procedimiento>

Los electrodos por arco manual se clasifican a partir de las propiedades del metal de aporte, que han sido clasificadas y estudiadas por entidades como American Welding Society (A.W.S) y a la American Society Mechanical Engineers (ASME) las características mecánicas de los aceros están definidas por el tipo de aleación utilizada para su fabricación, por tanto, de esta forma también son elegidos los electrodos, de acuerdo a la compatibilidad y características del acero en el cual se vaya a utilizar.

Los tipos de electrodo utilizados para acero inoxidable, son regidos bajo las especificaciones de la AWS A5.4, que dicta las normas para la utilización y designación de para electrodos revestidos, de la siguiente forma:

## E 312-16

Dónde: **E**= electrodo de soldadura por arco manual

**312**= indica numeración correspondiente a la clase AISI de acero inoxidable.

**Penúltimo número "1"**: Indica la posición en que puede utilizarse, en este caso, el **número 1** representa que el electrodo puede utilizarse en todas las posiciones.

**Ultimo número "6"**: Indica el tipo de revestimiento, corriente y polaridad a utilizarse, en este caso indica un revestimiento de titanio, puede emplearse con corriente alterna o continua.

### **Funciones del revestimiento:**

- Protección del metal fundido a través de la generación de gas, y de la escoria
- Provee desoxidantes y elementos de aleación
- Facilita el inicio del arco y su estabilidad
- Determina la forma del cordón y su penetración
- Establece la posición y transmite mayor o menor energía lineal de aporte

### **Ventajas del proceso por arco eléctrico**

- Es un proceso simple y de bajo costo, con equipo portátil
- Variedad de posiciones de soldadura
- Amplia variedad de electrodos, aplicables a diferentes metales ferrosos y no ferrosos
- Soldabilidad en juntas de lugares de difícil acceso

### **Desventajas del proceso por arco eléctrico**

- Su productividad puede verse afectada debido al proceso discontinuo, gracias a la longitud limitada de los electrodos.
- La soldadura puede contener inclusiones de escoria.
- La pérdidas de energía en forma de calor disipado en el metal base.
- Las velocidades de deposición con electrodo revestido son menores que otros procesos de soldadura.
- También puede verse disminuido en rendimiento, comparándolo con otros procesos que son catalogados como semiautomáticos.

### **Calor suministrado o energía lineal de aporte:**

La influencia del calor suministrado por el arco<sup>9</sup>, está determinada por la composición del metal y las circunstancias bajo las cuales el metal solidifica y enfría a temperatura ambiente. El metal de soldadura puede ser heterogéneo en composición debido a que solidifica rápidamente y no hay tiempo suficiente para completar la dilución, en base a la energía lineal

---

<sup>9</sup> (Gomez, 2016)

aportada se generan cambios o alteraciones en la estructura del metal debido a las altas temperaturas que este genera.

El calor suministrado en la unión es calculado de la siguiente forma:

$$C_{suministrado} = \frac{V * A}{1000 * w} [\text{J/mm}]$$

$$w = \frac{d}{t}$$

Donde, V= voltaje, A= amperios, d= distancia en mm, t=tiempo en segundos.

### **3.2.2 Zonas de la unión soldada de un acero al carbono mediante proceso SMAW.**

En la unión soldada por arco eléctrico se dan tres procesos localizados: el de fundición, el metalúrgico y el de tratamiento térmico, los que crean una zona muy heterogénea en composición química, microestructuras y propiedades. Como se muestra en la figura en el proceso de soldadura existe una zona afectada por la soldadura, la que a su vez se divide en: Zona de fusión, zona de penetración y Zona Afectada Térmicamente (HAZ o ZAT) del metal base y el resto es el metal base no afectado por el proceso.

De acuerdo a las temperaturas de calentamiento y a las velocidades de enfriamiento ocurrirán transformaciones de fase que arrojan diferentes microestructuras y propiedades mecánicas finales, luego del enfriamiento. De modo que en los aceros con bajos o medios % de carbono, en estado normalizado o con temple y revenido, al ser soldados en la ZAT habrá diferentes subzonas como se muestra en las figuras 4 y 5. En la figura 4, de forma más simplificada la ZAT se divide: Zona de sobrecalentamiento y zona de grano fino. En la figura 5 se hace referencias a las transformaciones de fase que ocurren en aceros bajos en carbono en relación a las temperaturas de calentamiento según el diagrama Hierro- Carbono y considerando enfriamientos relativamente lentos; En este caso se distinguen cuatro subzonas en la ZAT: Zona de sobrecalentamiento, zona de recristalización completa, zona parcialmente cristalizada y zona de revenido, esta última sólo existe cuando el acero fue templado antes de ser soldado.

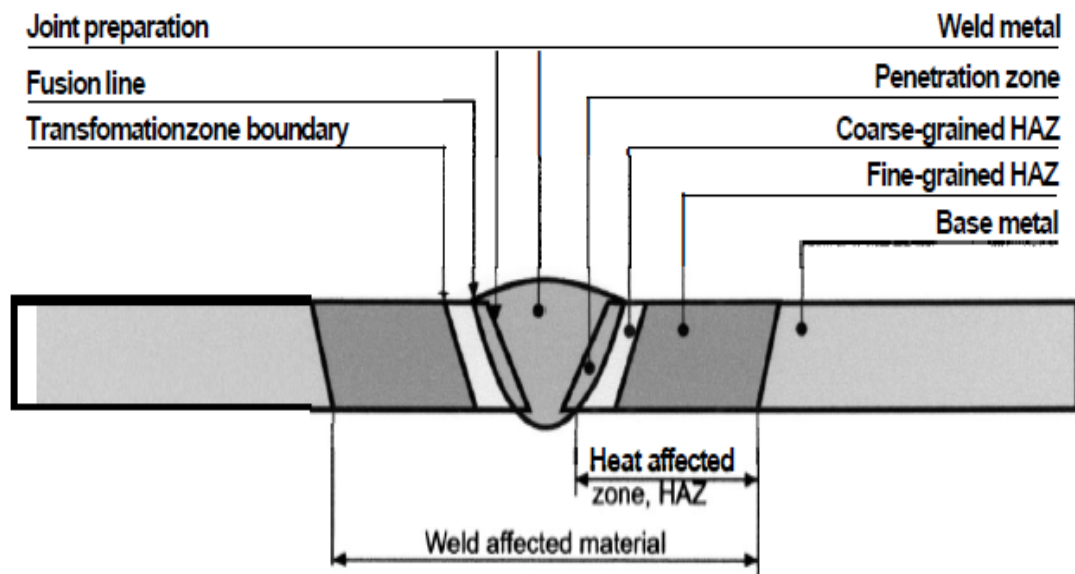


Figura 4. Nomenclatura de zonas y límites en la zona afectada térmicamente

La subzona más crítica es la de sobrecalentamiento con crecimiento de grano y con presencia de hidrógeno difusivo, con cierta caída de las propiedades mecánicas. Si el acero tiene más altos % de carbono o elementos de aleación, los resultados microestructurales y las propiedades mecánicas dependerán del diagrama termocinético (TEC o CCT) del acero y de la velocidad del enfriamiento continuo de cada punto de la ZAT; Si las velocidades de enfriamiento son superiores a la velocidad crítica de temple aparecerán estructuras martensíticas o Bainíticas en la zona de sobrecalentamiento que endurecen mucho y contribuyen a la formación de grietas en frío de acuerdo a la ecuación de ITO y BESSIO (referencia).

### 3.2.3 Diagramas termocinéticos. Las transformaciones de fase de la ZAT y su relación con la tendencia al agrietamiento.

La fracción del diagrama de equilibrio del sistema Fe- C, de la figura 5, y los resultados microestructurales así planteados, sólo responde a condiciones de enfriamiento lento y a aceros al carbono; En realidad, cuando el enfriamiento es rápido y/o los aceros son ligeramente aleados, el diagrama Fe -C no ofrece la información de las transformaciones durante de fase el enfriamiento continuo; sólo sirve de guía en cuanto a las temperaturas críticas de calentamiento. Entonces toca recurrir a los diagramas termocinéticos o de enfriamiento continuo (TEC o CCT) de cada acero.

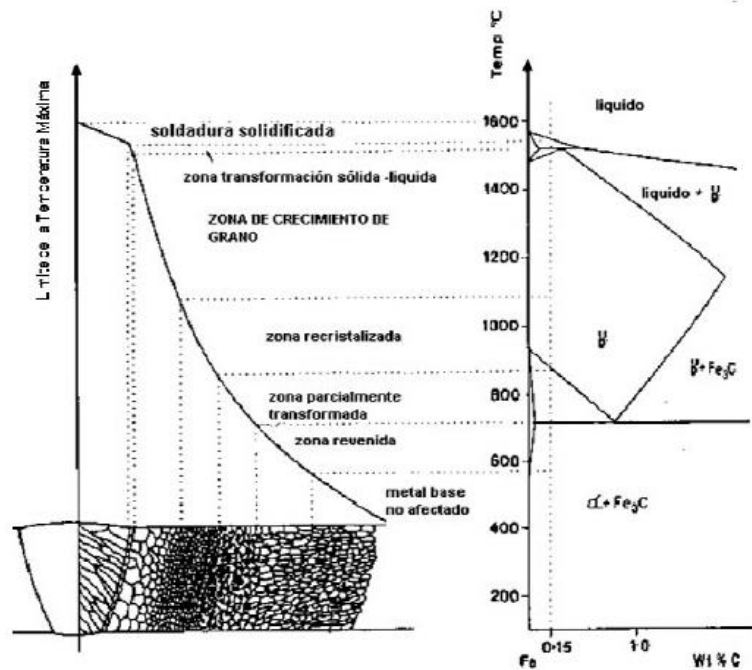


Figura 5. Diagrama de equilibrio del sistema Fe-C y la zona afectada térmicamente de un acero al carbono.

En la figura 6 se muestra a título de ejemplo un diagrama termocinético de un acero ligeramente aleado parecido al acero balístico que es estudiado en este trabajo, para poder explicar su relación con las transformaciones de fases en las uniones soldadas, los resultados microestructurales, las propiedades mecánicas, así como en la tendencia a la formación de grietas en frío en la ZAT.



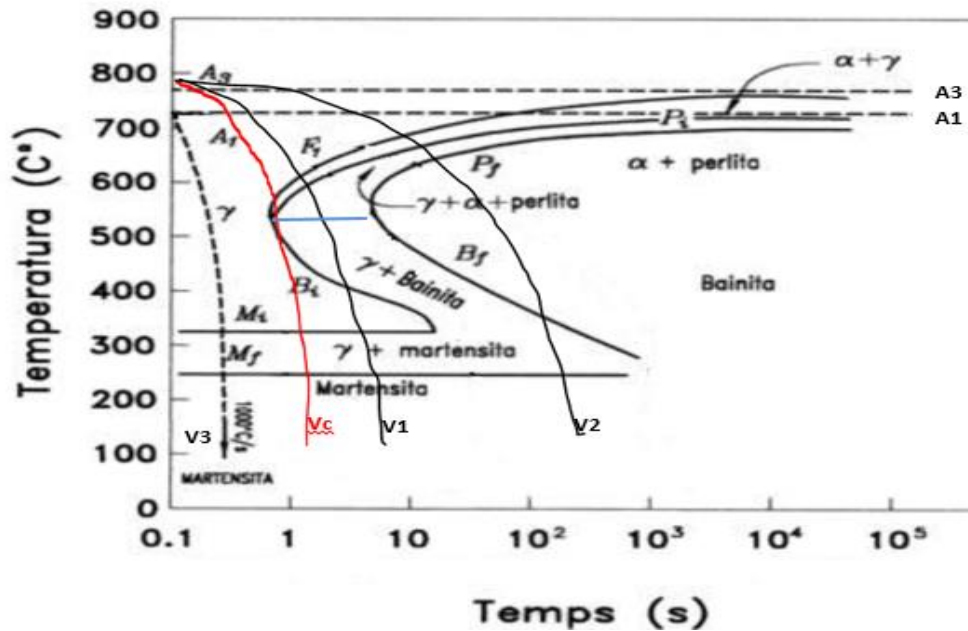


Figura 6. Representación del diagrama termocinético de un acero medio en carbono, AISI 1035. Velocidades de enfriamiento  $V_c$  (crítica de temple) y otras tres velocidades de enfriamiento ( $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$ ). Extraído de Ferrer y amigo, 2000

Los resultados microestructurales y la dureza dependerán del ciclo térmico que sufre cada punto del acero afectado por el calor: de la temperatura máxima de calentamiento y sobre todo de la velocidad de enfriamiento. En las zonas calentadas hasta el dominio austenítico, por encima de las temperaturas críticas ( $A_1$  y  $A_3$ ) del acero la velocidad de enfriamiento es determinante en las microestructuras y dureza final; por ejemplo si el enfriamiento ocurre con velocidad  $V_2$ , se obtienen estructuras ferrítico – perlíticas de baja dureza; pero si el enfriamiento ocurre con velocidad  $V_1$ , podrán aparecer mezclas de microestructurales de ferrita (poca) + perlita fina + bainita y algo de martensita con mayores durezas mientras mayor da la velocidad de enfriamiento: mientras más se acerque  $V_1$  a la velocidad crítica de temple menor será la presencia de ferrita y perlita y será mayor la cantidad de bainita y martensita y la dureza será mayor.

Si la velocidad de enfriamiento es mayor la velocidad crítica de temple ( $V_c$ ), por ejemplo con  $V_3$  ocurrirá temple martensítico, la microestructura será martensita (muy dura) con algo de austenita residual; la martensita así obtenida es inestable con alta dureza y grandes tensiones internas porque entraña un aumento de volumen en su formación, no es una fase final deseable en las uniones soldadas porque tiende a generar “grietas en frío” durante su formación en el intervalo de temperaturas de transformación martensítica,  $M_i$  y  $M_f$ , Entonces ¿Cuándo es deseable y cuándo no la transformación martensítica? El temple y revenido

constituye el mecanismo de endurecimiento de los aceros, el que se representa esquemáticamente en la figura 7; y es el tratamiento mediante el cual se endurece el acero balístico MIL-DTL-46100E, lo que permite obtener durezas por encima de los 400 HV. El revenido bajo alivia tensiones en la martensita y permite la formación de carburos dispersos, manteniendo alta dureza y reduciendo la tendencia al agrietamiento.

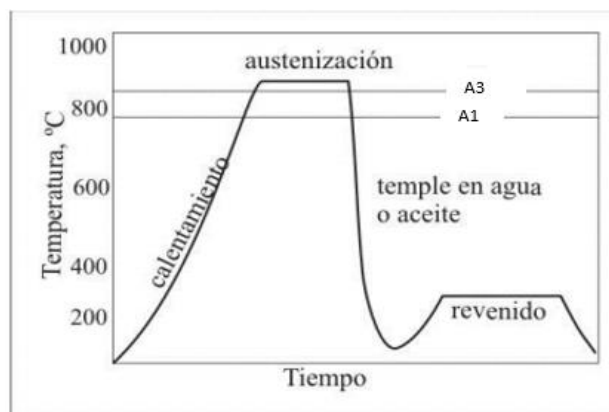


Figura 7. Representación esquemática del ciclo térmico de temple y revenido del acero MIL-DTL-46100E extraída de [https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5\\_anio/metalografia/10-Temple\\_y\\_Revenido\\_v2.pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/10-Temple_y_Revenido_v2.pdf)

Sin embargo, en las uniones soladas es indeseable la aparición de la martensita por influir en la formación de grietas en frío; razón por la cual se hacen precalentamientos o poscalentamientos en los procesos de soldadura de algunos aceros, obligando a que ocurran enfriamientos lentos en la ZAT (zona de sobrecalentamiento), evitando así que aparezcan estructuras de temple. Hay otras vías para lograr este efecto, como es el control de la energía lineal de soldadura, mientras mayor aporte de calor, menor tendencia a la formación de martensita y mayor tendencia a la formación de estructuras blandas (ferrita y perlita).

Es bueno señalar el aumento del % de carbono, o la introducción de elementos de aleación corren las curvas del diagrama termocinético hacia la derecha, incrementando la probabilidad de que aparezcan estructuras martensíticas y la tendencia a la formación de grietas en frío; por esta razón la soldabilidad de los aceros depende del % de carbono equivalente (CE), para bajos % de CE < 0.25 % C, los aceros tienen soldabilidad ideal, con % de carbono medios y altos hay que tomar medidas para evitar la aparición de grietas en frío.

En el caso de los aceros MIL-DTL-46100E la situación es más compleja; además de tener CE= 0.7 % C, y ser sensible al agrietamiento en frío, vienen tratados térmicamente con

temple y revenido, por lo es necesario desarrollar acciones para minimizar la tendencia a la formación de grietas en frío en condiciones de baja soldabilidad y tratar de mantener los niveles de dureza altos del metal base. Entonces, lo ideal en la soldadura de estos aceros sería que las velocidades de enfriamiento en la zona de sobrecalentamiento producto al ciclo térmico sean más bajas y cercanas a la velocidad crítica de temple ( $V_c$ ); por ejemplo en un intervalo entre  $V_c$  y  $V_1$ , según la figura 6, lo que permitiría la formación de bainita, con perlita fina, con muy escasa martensita y de este modo se lograrían durezas cercanas a la del metal base temple – revenido, sin el riesgo de agrietamiento en frío. El propósito de este trabajo de investigación está dirigido a encontrar condiciones de enfriamiento cercanas a lo ideal que se ha descrito.

### **3.2.4 Defectos en las uniones soldadas. Grietas en frío y acciones evitarlas**

La mayoría de los defectos en uniones soldadas son: las grietas, porosidad, falta de penetración, penetración excesiva, fusión deficiente, inclusión de escoria, socavación y distorsión.

Por criterio de diseño y de acuerdo a la responsabilidad de las estructuras, se aceptan imperfecciones de un rango pequeño de tamaño, por ejemplo, poros, inclusiones de escoria, sin embargo cuando estas imperfecciones pasan de cierto tamaño constituyen defectos no permisibles. Las grietas son defectos no permisibles bajo cualquier tamaño; dichos defectos ponen en riesgo la integridad estructural.

### **3.2.5 Susceptibilidad al agrietamiento**

La vida de las uniones soldadas comprende dos fases, el inicio de la grieta y la propagación de la misma. En modelos micro estructuralmente uniformes, la fase de iniciación de grieta comprende una parte considerable de la vida total, pero, para estructuras soldadas, la presencia de imperfecciones como las inclusiones de escoria en pie de soldadura, socavaciones, esfuerzos residuales, falta de penetración, desalineamientos, etcétera reducen efectivamente la fase de iniciación. Las juntas soldadas pueden contener pequeñas inclusiones de escoria en el cordón de soldadura, con defectos preexistentes que generan concentradores de esfuerzos como las micro grietas.

### 3.2.5.1 Agrietamiento en caliente

El agrietamiento en caliente contempla una fisura producida a temperaturas elevadas durante la solidificación del metal fundido de la soldadura, la permanencia a alta temperatura de un cordón a causa del calentamiento producido por el siguiente cordón, durante un tratamiento térmico o por exceso de carbono (C), fósforo (P) o azufre (S); se recomienda cambiar corriente o velocidad, corregir preparación de bordes o utilizar aceros con menor contenido en azufre y fósforo.

### 3.2.5.2 Agrietamiento en frío

Las grietas constituyen el principal problema en la soldabilidad de los aceros medios en carbono y ligeramente aleados, pueden ser en frío, en caliente, laminares y de revenido; dada la composición química del acero que nos ocupa, la mayor preocupación está en la formación de grietas en frío.

Las grietas en frío tienen tres causas fundamentales que son:

- La presencia de hidrógeno difusivo; al tipo de revestimiento del electrodo o por humedad.
- La presencia de martensita en la ZAT, por el alto porcentaje de carbono equivalente y las altas velocidades de enfriamiento impuestas por el ciclo de soldadura.
- Tensiones residuales

Estos tres factores se presentan en el criterio de Ito y Beesyo (Castellanos, 1995), a través de la siguiente ecuación:

$$P_w = P_{cm} + \frac{H}{60} + \frac{K}{4000}$$

Dónde:

El término H, indica el contenido del hidrógeno difundido determinado por método de la glicerina en la ZAT; el factor K, da cuenta de las tensiones residuales en la unión y el factor P<sub>cm</sub> está relacionada con la tendencia a formación de martensita debido al % de carbono equivalente del metal base.

El valor de P<sub>cm</sub> se determina por la siguiente ecuación:

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Cu}{20} + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

Según Ito y Beesyo<sup>10</sup>, si  $P_w$  es  $< 0,286 \%$  es muy baja la tendencia a la formación de grietas en frío en la ZAT. Mientras mayor sea  $P_w$ , mayor será la susceptibilidad a la formación de dichas grietas en frío, existiendo riesgos de falla.

De modo que cuando se va a soldar un acero medio en carbono y ligeramente aleado como el caso que nos ocupa, donde  $P_w$  es mayor a  $0,28 \%$ , se requiere tomar medidas para bajar dicho parámetro; primero hay que deducir H, para ello se usan electrodos de bajo hidrógeno y secos, luego se trabaja en la reducción de las tensiones residuales, parámetro K. Logrando esto, el parámetro  $P_m$  será menor y dependerá esencialmente de la composición química del metal base, parámetro  $P_{cm}$ . Cuando  $P_{cm}$  es alto y no podemos cambiar el metal base, persistirá la tendencia a la formación de martensita; en tal caso, se requiere buscar alternativas para evitar su formación, lo que se puede lograr reduciendo las velocidades del enfriamiento final de la ZAT, de modo que éstas sean menores a la velocidad crítica de temple.  $V_{c1}$  (como se mostró en la figura 5).

### 3.2.5.3 Acciones para reducir la tendencia al agrietamiento en frío

Dentro de las opciones tecnológicas para reducir las velocidades de enfriamiento en la ZAT están:

- Incrementar el aporte térmico en el último pase de soldadura, esto es incrementar la energía lineal de soldadura y el sistema se enfría más lentamente
- Realizar precalentamiento
- Realizar poscalentamiento
- Cubrir con mantas aislantes la unión soldada al final del proceso.

En todas estas acciones se trata de reducir velocidades finales de enfriamiento y evitar la formación de martensita y la tendencia al agrietamiento en frío.

El precalentamiento normalmente se hace con un soplete oxiacetilénico, los rangos de temperaturas de precalentamiento se calculan en función del carbono equivalente del acero base y del espesor de las planchas; su efectividad es muy alta cuando se trata de soldaduras

---

<sup>10</sup> (Ito & Et, 1979)

en la que la plancha está fría antes del último pase, como el caso que nos ocupa en este proyecto. Muchas veces este proceso no se usa en grandes volúmenes de soldadura, aunque es necesario, porque incrementa los costos totales del proceso.

### 3.2.6 Dilución en la unión soldada

Dilución es la proporción del metal base al mezclarse con el metal de aporte (electrodo) participa en la composición química y micro estructural de la zona fundida a través de su propia fusión, y no, es más, que el porcentaje de metal base (MIL-DTL-46100E) fundido e incorporado a la soldadura, para el proceso SMAW, una dilución de 30% es considerada teóricamente deseable.

Para determinar la dilución se utiliza el método geométrico, midiendo las áreas antes y después de la soldadura a partir del análisis macro estructural del corte de la sección transversal de la unión; existe otro método menos preciso a través del diagrama de Schaeffler a partir de la determinación del porcentaje de Níquel y Cromo equivalente; este último se usa esencialmente para determinar de forma aproximada en Cr y Ni equivalentes producto de la dilución. En figura 7, se presenta un esquema para la determinación de la dilución por el método geométrico, según la siguiente ecuación:

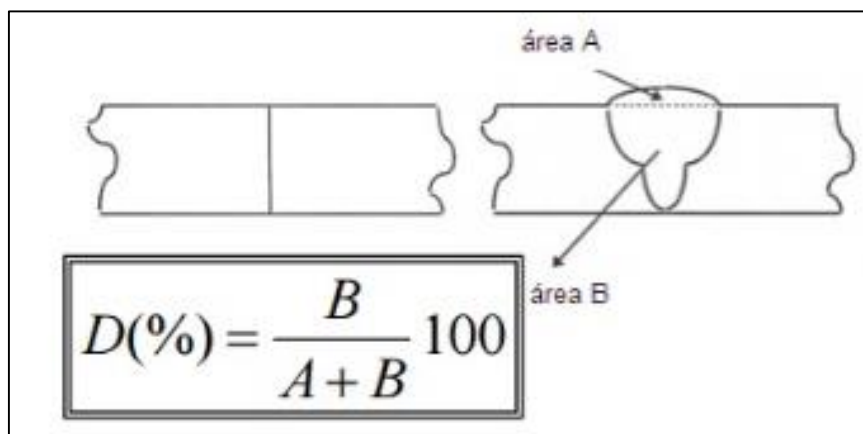


Figura 8. Análisis de macrografía para dilución geométrica, imagen extraída de <http://blog.utp.edu.co/metalografia/10-soldadura-10-1-procesos-de-soldadura/>

## Estimación de la composición en cromo y níquel y las microestructuras finales de la zona de dilución mediante el diagrama de Schaeffler

A partir del diagrama obtenido de manera empírica por AL Schaeffler<sup>11</sup>, para determinar la estructura de un material conociendo su composición química de una aleación, se puede usar para predecir la composición y estructura de la zona de dilución en una unión soldada. Utilizando la composición del metal base y del material de aporte, se hallan los valores de Níquel y Cromo equivalente, los cuales representan dos puntos en el diagrama de Schaeffler, ver figura 9. Si la longitud de la línea recta que une a esos dos puntos, se puede determinar el punto sobre la recta que determina la composición química de la dilución. Esto se puede hacer a partir del % de dilución ya calculado por el método geométrico.

$$\text{Cromo equivalente} = \%Cr + \%Mo + (1.5 * \%Si) + (0.5 * \%Nb + Ti)$$

$$\text{Níquel equivalente} = \%Ni + 30 * \%(C+N) + 0.5 * \%Mn$$

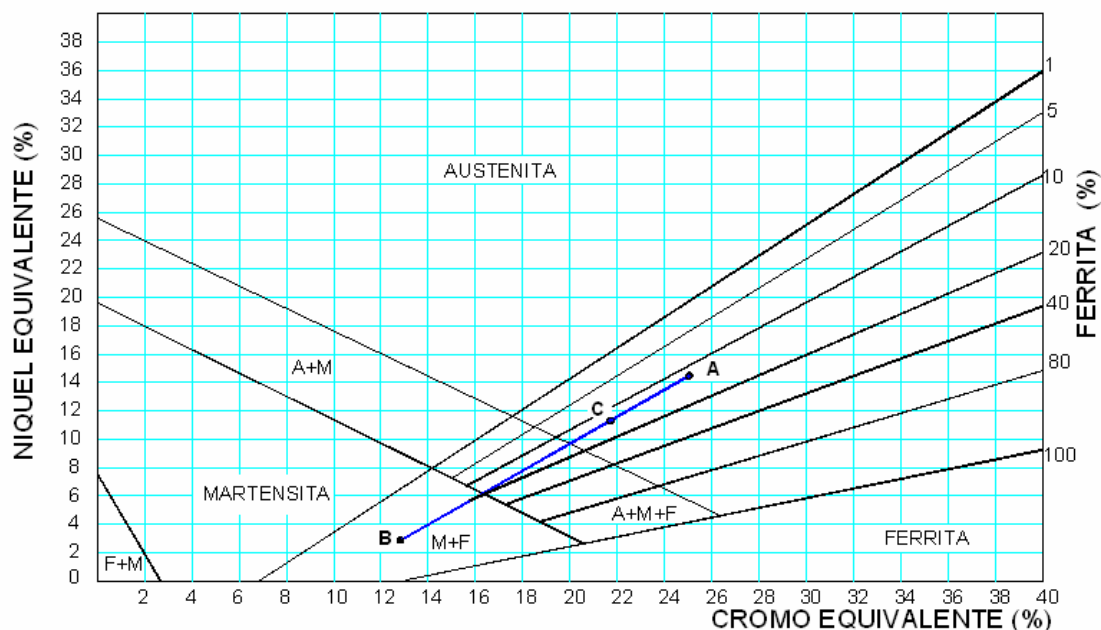


Figura 9. Ejemplo de unión de acero AISI 410 con metal de aporte austenítico. Los puntos A y B representan las composiciones en Ni y Cr equivalentes del metal base y el electrodo, el punto C expresa la composición y estructura del producto de la dilución.

<sup>11</sup> (Ospina, Aguirre, & Parra, 2007)

### **3.2.7 Microdureza en las uniones soldadas**

Los ensayos de micro dureza es la propiedad mecánica que mejor permite relacionar el estado micro estructural en la zona afectadas térmicamente con el resto de las propiedades mecánicas de la unión, la dureza y la resistencia mecánica están directamente relacionadas. La dureza es un indicador de la presencia de estructuras indeseables de temple; cuando la dureza es superior a 450 HV, indica que es muy probable la presencia de martensita (Castellanos, 1995). Utilizando perfiles o barridos de dureza en probetas obtenidas de cortes en secciones transversales de las uniones soldadas se puede obtener información valiosa sobre las fases y microestructuras presentes en las distintas zonas de la unión. Esta técnica es clave en este trabajo, pues permite comparar las probetas objeto de estudio y valorar la influencia de los factores que entran como variable sobre la soldabilidad. Estos resultados indican que fases deben estar presentes en cada subzona, los que son corroborados por microscopía óptica y electrónica.

En este caso de estudio, se tomaron micro durezas al material en estado de entrega en distintas zonas de la superficie para determinar la homogeneidad del tratamiento térmico en las planchas, tanto transversal como longitudinal, que garantizan las propiedades mecánicas de metal base usado bajo normas del acero MIL-DTL-46100E certificado.

## **3.3 Técnicas de análisis micro estructurales**

### **3.3.1 Microscopía óptica**

La microscopia óptica es una de las técnicas básicas usada para la búsqueda y el reconocimiento de características micro estructurales, a través de una emisión de luz de espectro visible hacia la muestra, la cual se encuentra adecuadamente pulida y atacada químicamente, como consecuencia del ataque químico presenta una visión más clara de su textura; al captar el reflejo de luz por medios ópticos se observaran a detalle los constituyentes de la microestructura por la acción de la luz. Esta técnica es clave para correlacionar microestructuras con las microdurezas en las distintas zonas de la unión soldada y hacer comparaciones.



### **3.3.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM) y Espectros de dispersión de energía (EDS)**

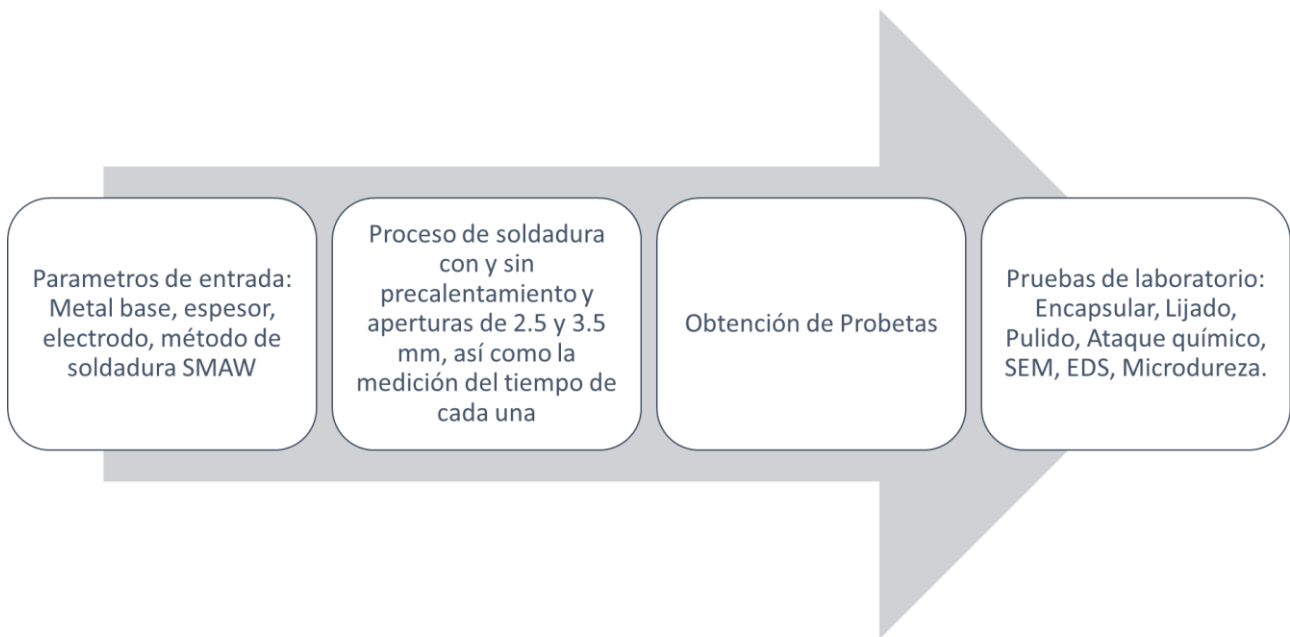
SEM (Scanning Electron Microscopy). Es la técnica que permite la caracterización microestructural de muestras de muestras no orgánicas, a diferencia de la microscopía óptica, esta técnica genera un haz de electrones desde una fuente excitada por diferencia de voltaje, pueden captarse principalmente dos tipos de señales: Electrones secundarios (SEI), la cual una exploración de fallas y texturas por medio de la generación de una imagen de la morfología de la pieza. Y la otra interacción Electrones Retro proyectados (BSE), que capta de manera aguda las interacciones emisivas de energía y de los niveles de los niveles de procedencia de los átomos correspondientes mediante detectores.

La técnica de dispersión de energía o microanálisis, generada por un análisis de composición por rayos x, permite determinar la composición química de las distintas regiones y realizada de manera muy puntual de la unión soldada y hacer perfiles o mapeos de concentración. Dichos análisis, son obtenidos por medio de un microscopio electrónico. Cabe resaltar que esta técnica no permite detectar elementos con bajo número atómico.

## **4. Diseño Metodológico**

### **4.1 Descripción de desarrollo metodológico experimental**

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizan como variable algunos parámetros tecnológicos de soldadura con el fin de mejorar las propiedades mecánicas y metalúrgicas de la unión soldada, por lo cual se realizan corridas preliminares, que consisten en el desarrollo de las pruebas de soldabilidad bajo las condiciones y parámetros de soldeo seleccionados (actuales y propuestos), y por último la realización de pruebas de desempeño en servicio de las uniones, como se muestra el esquema a continuación.



**Figura 10. Esquema de descripción del desarrollo experimental**

La selección de parámetros se realiza de acuerdo al comportamiento actual de desempeño en las uniones soldadas y las mejoras que requiere el procedimiento de soldadura para obtener mejores resultados en la unión.

**1. Parámetros variables:**

- Zona Apertura (Separación entre las juntas a soldar, por tanto el diámetro de electrodos dentro de las especificaciones)
- Energía Lineal de Soldadura
- Precalentamiento

**2. Parámetros Fijos:**

- Metal base, MIL-DTL-46100E
- Espesor de lámina 6.3 mm
- Metal de aporte, Electrodo E312-16
- 3 cordones de soldadura
- Amperaje
- Voltaje

El problema de la investigación es determinar de forma preliminar la influencia de estas combinaciones en los parámetros de interés: ancho de las zonas de la unión (cordón y ZAT) y niveles de dureza en la unión.

## 4.2 Aplicación de condiciones de soldadura

Esta investigación surge por la necesidad de mejorar la soldabilidad en los aceros micro aleados en este caso ARMOR STEEL MIL 46100E, utilizado para la fabricación estructural de cascos de embarcaciones patrulleras que permiten desarrollar operaciones de control fluvial en ríos de poca profundidad.

Con el fin de encontrar la influencia de algunas variables tecnológicas de soldabilidad sobre los parámetros de salida de interés; se realiza un estudio de 4 probetas sometidas a cambios en la zona de apertura y tratamiento térmico de precalentamiento, como se distingue en las tabla 1 y 2, para este proceso es utilizado el código para soldadura estructural AWS D1.1<sup>12</sup> y la especificación SFA: AWS 5.4.

Tabla 1. Nomenclatura de probetas según características de soldeo

NOMENCLATURA UTILIZADA PARA PROBETAS	abreviacion
3.5mm sin precalentamiento	3.5 sin pre
3.5 mm con precalentamiento 200 grados	3.5 con pre
2.5 mm sin precalentamiento	2.5 sin pre
2.5 mm con precalentamiento 200 grados	2.5 con pre

---

<sup>12</sup> (Giraldo, 2005)

**Tabla 2. Características y parámetros de probetas**

Nombre	Area de Apertura	Tratamiento Termico	Electrodo	Diametro de electrodo
3.5 mm sin pre	3.5 mm	NO	E 312-16	1/8"
3.5 mm con pre	3.5 mm	PRECALENTAMIENTO 200 GRADOS	E 312-16	1/8"
2.5 mm sin pre	2.5 mm	NO	E 312-16	3/32"
2.5 mm con pre	2.5 mm	PRECALENTAMIENTO 200 GRADOS	E 312-16	3/32"

Las condiciones de soldeo son aplicadas en probetas de 30cm x 15 cm como se muestran en la figura 11, donde se fijan con placas auxiliares para evitar que estas se muevan durante la aplicación de soldadura y se pierda la distancia entre las placas. Durante el procedimiento se toma la distancia que recorre el soldador con un mismo electrodo y el tiempo que este se demora, de igual forma se realiza el control de precalentamiento con un pirómetro infrarrojo con el fin de garantizar que las placas se encuentren a 200 grados Celsius antes de comenzar a soldar.



**Figura 11. Probetas de soldadura MIL-DTL-46100E 30cmX15cm**



Figura 12. Probeta de soldadura Mil-DTL-46100E, Medición de temperatura con pistola infrarroja, pirómetro.

En el proceso de aplicación de soldadura se decide aplicar el primer cordón a lo largo de toda la probeta, el segundo cordón solo se aplica en 2/3 de la placa y el tercer cordón de soldadura en 1/3 de la probeta, como se muestra en la figura 13. Los tiempos fueron cronometrados de esta forma para tener en cuenta el promedio de calor suministrado por cada mm de la probeta.

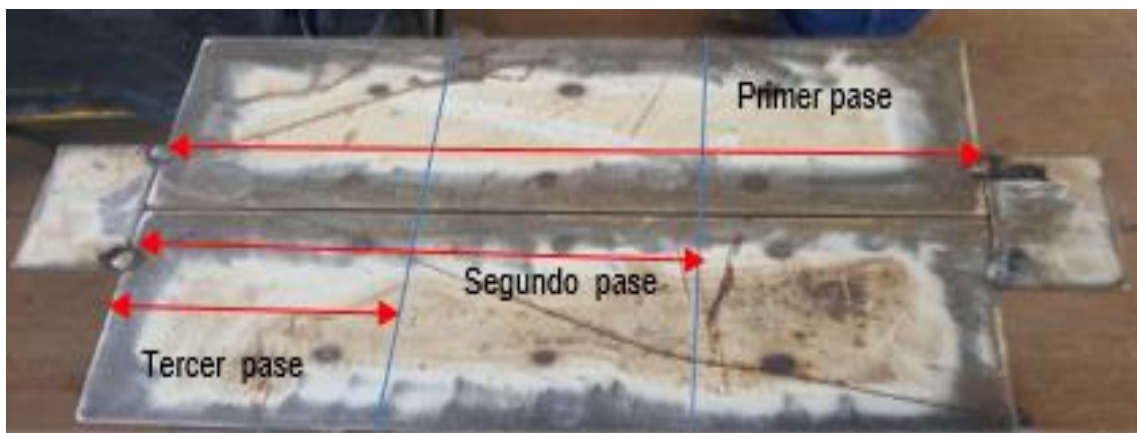


Figura 13. División de probetas, aplicación de cordones de soldadura

Para la medición de calor suministrado se tomaron los tiempos empleados para cada pase de soldadura y se tiene en cuenta la velocidad de aplicación del mismo, y se obtienen los resultados que se muestran en las tablas 3 a la 6.

**Tabla 3. Cálculo de calor suministrado a probeta de 3.5 mm sin precalentamiento**

TABLA DE CALCULO: ENERGIA LINEAL DE APORTE PROBETA 3.5mm sin precalentamiento							
			Heat input		TIME		
	Ampers	Voltage	$V \cdot I / (1000 \cdot w)$	Length	min	seg	Travel speed (mm/seg)
1	100	76.4	<b>2.393866667</b>	300	1	34	3.191489362
2	100	76.4	<b>2.5594</b>	200	1	7	2.985074627
3	100	76.4	<b>2.8268</b>	100	0	37	2.702702703

**Tabla 4. Cálculo de calor suministrado en la probeta 3.5mm con precalentamiento a 200 grados Celsius**

TABLA DE CALCULO: ENERGIA LINEAL DE APORTE PROBETA 3.5mm con precalentamiento a 200 grados celsius							
			Heat input		TIME		
	AMPERS	VOLTAGE	$V \cdot I / (1000 \cdot w)$	LENGTH	min	seg	travel speed (mm/seg)
1	100	76.4	<b>1.8336</b>	300	1	12	4.166666667
2	100	76.4	<b>2.5976</b>	200	1	8	2.941176471
3	100	76.4	<b>1.7572</b>	100	0	23	4.347826087

**Tabla 5. Cálculo de calor suministrado en la probeta 2.5 sin precalentamiento**

TABLA DE CALCULO: ENERGIA LINEAL DE APORTE PROBETA 2.5mm sin precalentamiento							
			Heat input		TIME		
	AMPERS	VOLTAGE	$V \cdot I / (1000 \cdot w)$	LENGTH	min	seg	travel speed (mm/seg)
1	100	76.4	<b>2.41933333</b>	300	1	35	3.157894737
2	100	76.4	<b>2.5594</b>	200	1	7	2.985074627
3	100	76.4	<b>2.674</b>	100	0	35	2.857142857

**Tabla 6. Cálculo de calor suministrado en la probeta 2.5 con precalentamiento a 200 grados Celsius**

TABLA DE CALCULO: ENERGIA LINEAL DE APORTE PROBETA 2.5mm con precalentamiento a 200 grados celsius							
			Heat input		TIME		
	AMPERS	VOLTAGE	$V \cdot I / (1000 \cdot w)$	LENGTH	min	seg	travel speed (mm/seg)
1	100	76.4	<b>1.8336</b>	300	1	12	4.166666667
2	100	76.4	<b>1.9482</b>	200	0	51	3.921568627
3	100	76.4	<b>2.4448</b>	100	0	32	3.125



### 4.3 Extracción de muestras

Principalmente se requiere ubicar las zonas de interés; algunas normas definen la forma de extracción de las muestras, como es el caso de los estudios microestructurales de materiales y las pruebas relacionadas con caracterización de las probetas y la evaluación de soldabilidad; para tal fin las probetas fueron divididas en 3 partes iguales con el fin de sustraer información de los tres cordones de soldadura aplicados como se ve en la figuras 14 y 15, donde se muestra la cara superior y posterior de la probeta.

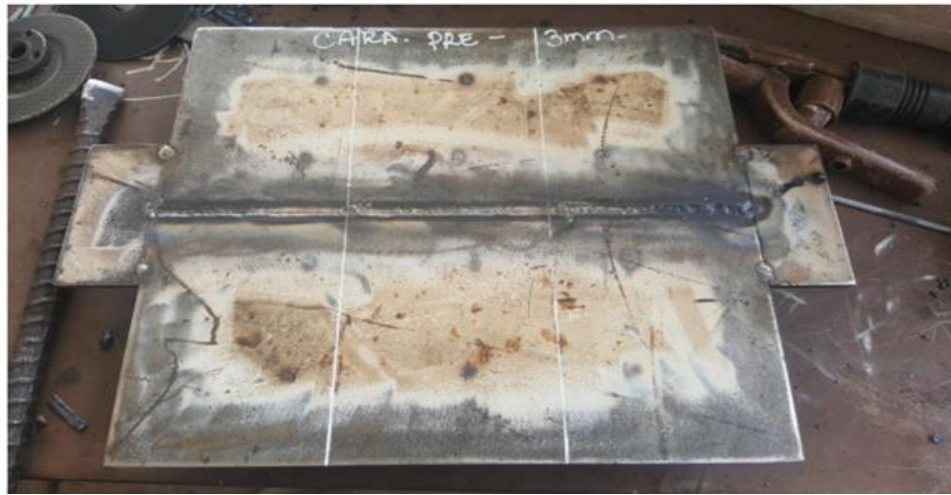


Figura 14. Probeta de soldadura, Acero MIL-DTL46100E, Cara superior



Figura 15. Probeta de soldadura, Acero MIL-DTL-46100E Cara inferior.

Una vez se obtienen las probetas con tres divisiones, cada una con un número de pases de soldadura distintos, se procede a cortar y encapsular las piezas seleccionadas para examinar, teniendo en cuenta que se dividen las probetas en 3 partes, también se triplica el número de probetas a examinar en laboratorio; a partir de este momento son clasificadas por sus características iniciales de apertura y tratamiento térmico, y se identifican por el número de pases que contienen, como se muestra en la tabla 7.

**Tabla 7. Nomenclatura utilizada para el análisis de probetas en laboratorio**

Nomenclatura según el numero de pases	
Nomneclatura para ensayos de laboratorio	Numero de pases
2.5mm sin pre #1	1
2.5mm sin pre #2	2
2.5mm sin pre #3	3
2.5mm con pre #1	1
2.5mm con pre #2	2
2.5mm con pre #3	3
3.5mm sin pre #1	1
3.5mm sin pre #2	2
3.5mm sin pre #3	3
3.5mm con pre #1	1
3.5mm con pre #2	2
3.5mm con pre #3	3

#### **4.3.1 Preparación de muestras por pulido**

El primer paso es la preparación de la superficie, la cual involucra dos partes: el desbaste, que se lleva a cabo mediante el uso de lijas o papeles abrasivos, y el pulido, el cual se realiza con la ayuda de paños, alúmina y polvo de diamante. En la figura 16 se muestran las probetas encapsuladas, desbastadas y pulidas.



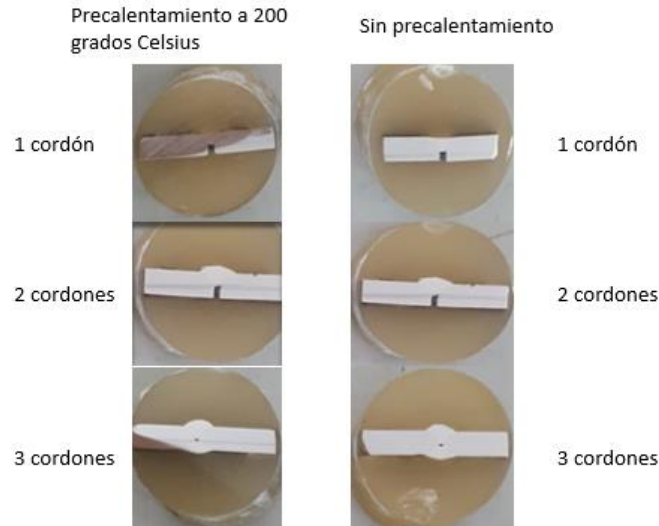


Figura 16. Probetas preparadas en laboratorio. Encapsuladas y pulidas.

### 4.3.2 Ataque Químico

El ataque químico es utilizado para la identificación de fases o características microestructurales como límites de grano. El reactivo seleccionado para esta investigación es el Nital 2% el cual es usado para acero al carbono, el cual permite un máximo contraste entre la perlita y la ferrita o cementita. Revela los límites de grano ferríticos y permite diferenciar la ferrita de la martensita.

### 4.3.3 Métodos y Ensayos utilizados para estudio de soldabilidad

En la tabla 8 se presenta una relación de las probetas seleccionadas, y los ensayos a las cuales fueron sometidas, para esta investigación se examinaron probetas con 1, 2, y 3 pases de soldadura con el fin identificar microscópicamente defectos en la unión desde el primer pase de soldadura hasta completar la unión bajo las condiciones de soldeo propuestas anteriormente.

Para ensayos de SEM, EDS, y microdureza solo fueron seleccionadas las probetas con 3 pases de soldadura, ya que en estas corridas son las que brindan información completa de las microestructuras y propiedades finales de la unión.

**Tabla 8. Técnicas de caracterización de materiales empleadas para el estudio de soldabilidad**

	ensayos y procedimientos utilizados				
	preparacion de muestras : lijado y pulido	microscopia optica	SEM	EDS	MICRODUREZA (HV)
2.5mm sin pre #1	X	X			
2.5mm sin pre #2	X	X			
2.5mm sin pre #3	X	X	X	X	X
2.5mm con pre #1	X	X			
2.5mm con pre #2	X	X			
2.5mm con pre #3	X	X	X	X	X
3.5mm sin pre #1	X	X			
3.5mm sin pre #2	X	X			
3.5mm sin pre #3	X	X	X	X	X
3.5mm con pre #1	X	X			
3.5mm con pre #2	X	X			
3.5mm con pre #3	X	X	X	X	X

Para medir la dilución se toman las 4 probetas que contienen 3 pases de soldadura y se obtiene una imagen digital (Macrografía) de la unión y por el método geométrico, se mide a escala el área de metal base antes y después de la aplicación de la soldadura; teniendo en cuenta el porcentaje de dilución obtenido por el método geométrico, se representa en el diagrama de schaeffler, donde se traza una línea entre los valores de níquel y cromo equivalente (obtenidos luego de reemplazar los porcentajes de elementos que componen el metal base y el metal de aporte) del metal base y el electrodo, luego se determinan de forma aproximada los valores de níquel y cromo equivalente del punto de dilución.

## 5. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE SOLDABILIDAD

### 5.1 Caracterización macroestructural de las uniones soldadas

En la figura 16 se muestran las macrográficas de las probetas obtenidas en las 4 juntas soldadas con el tercer pase de soldadura. Se discuten éstas y no todas (con uno y dos pases) porque son las que representan el estado final de la unión con las microestructuras y propiedades de interés.

El tercer cordón (tercer pase), se encuentra en la parte inferior de la probeta. A estos se realizó perfil de dureza Vickers. En la figura 17, la zona central oscura es la de fusión y la zona contigua en gris y blanco es la ZAT; en ésta, la gris oscura es la subzona de sobrecalentamiento y gris clara es la subzona de recristalización. La zona de sobrevenido no siempre se distingue bien con el macro ataque.

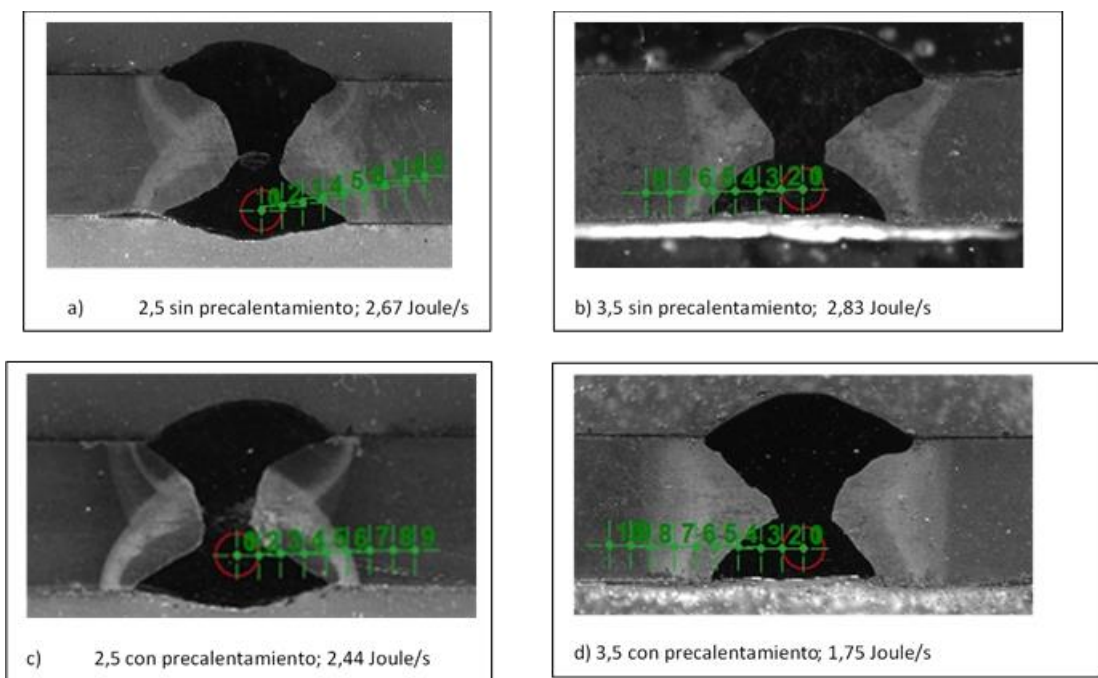


Figura 17. Macrografía de probetas con 3 cordones de 2.5 y 3.5mm, con precalentamiento y sin precalentamiento

### 5.2 Caracterización microestructural y microdureza de las uniones soldadas

En la figura 18, se muestran las microestructuras de las subzonas de la sección transversal de las 4 juntas soldadas a tope en todas las etapas del proceso, con uno, dos y tres pases. Se obtuvieron imágenes por microscopía óptica en las siguientes zonas: de fusión, de sobrecalentamiento, de recristalización, y de sobre revenido, atacadas químicamente con

Nital al 2 %. Las micrografías de mayor interés se dan en las 4 uniones con los tres pases de soldadura, con mayor énfasis en las microestructuras y dureza de la zona de sobrecalentamiento.

Los resultados microestructurales, como se mencionó anteriormente, dependen de dos factores importantes del ciclo térmico impuesto por el calor: de la temperatura máxima de calentamiento y de la velocidad de enfriamiento. Las zonas de sobrecalentamiento son las más sensibles al crecimiento de grano y a la aparición de estructuras martensíticas de temple y a la formación de grietas en frío. Con el precalentamiento se trata de reducir velocidad de enfriamiento para lograr estructuras bainíticas y perlita.

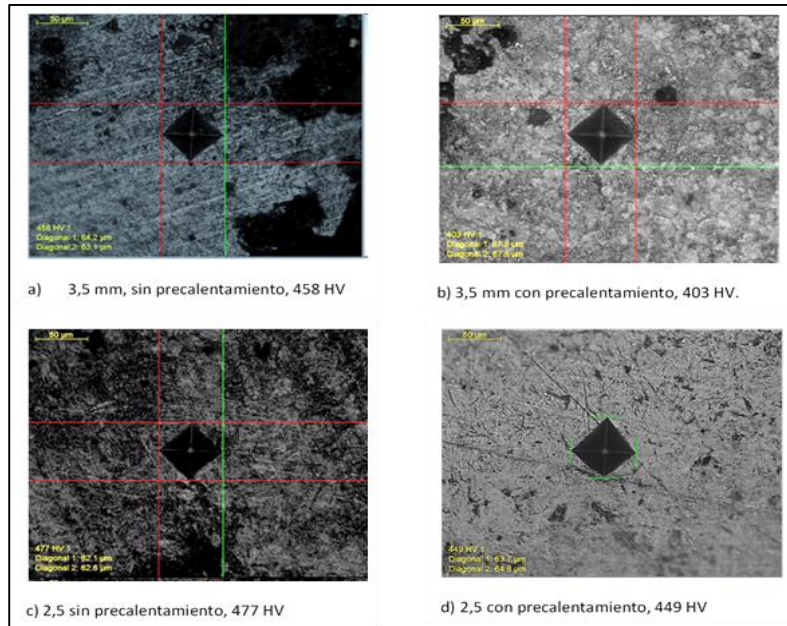
	3.5mm	3.5 mm	2.5 mm	2.5 mm
	Pre calentamiento 200	Sin pre calentamiento	Precalentamiento 200	Sin precalentamiento
PRIMER CORDON DE SOLDADURA				
SEGUNDO CORDON DE SOLDADURA				
TERCER CORDON DE SOLDADURA				

Figura 18. Cuadro comparativo: imágenes microscopía óptica a 50X en la zona afectada térmicamente, separadas por cada cordón de soldadura de las probetas atacadas nital 2%

En general se destaca una buena unión y dilución entre el metal de aporte y el metal base. Aunque en el primer pase tiende a aparecer alguna martensita en la zona de sobrecalentamiento, sobre todo cuando no hay precalentamiento, ésta siempre se transforma por el ciclo térmico que se genera en el segundo pase, por lo que no hay que preocuparse de ella. El segundo pase sobre el primer cordón no genera martensita en la ZAT; esto se debe a que el metal depositado en los dos cordones superpuestos (primer y segundo pase) es esencialmente acero inoxidable austenítico y presenta baja conductividad térmica provocando una transferencia de calor mal lenta a la ZAT, con picos más bajos de calentamiento en la misma y velocidades de enfriamiento más lentas (menores a la  $V_c$ ). El tercer pase y final, que se hace por el respaldo es el que determina las microestructuras finales y de hecho transforma y borra en gran medida la historia microestructural dejada por los dos pases anteriores, como se observa en las macrografías de la figura 16. En lo que sigue la atención y la discusión se centrará en las microestructuras y propiedades de las de probetas de las uniones soldadas terminadas, con el tercer pase de soldadura.

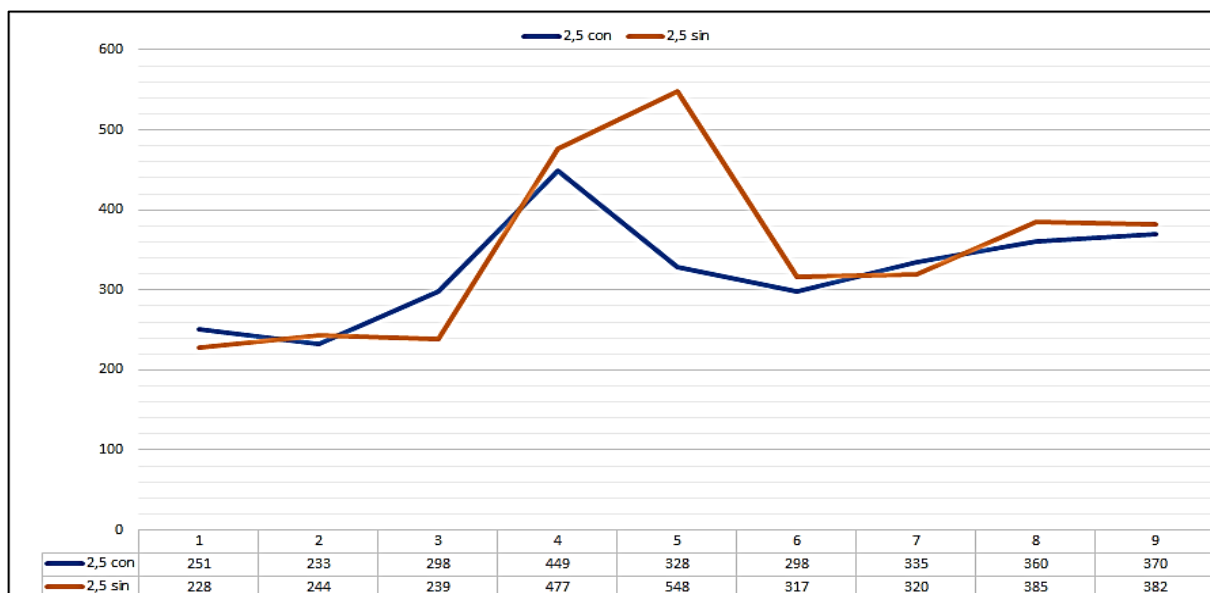
Es importante, destacar en la zona de recristalización, donde la temperatura sube por encima de A1 y A3 (ver figura 7) y las velocidades de enfriamiento son más lentas, ocurre un normalizado con un afinado de grano y estructuras ferrítico – perlíticas dispersas, con durezas normalmente superiores a los 380 HV e inferiores a las del metal base no afectado térmicamente. La subzona de la ZAT más alejada del cordón es la de sobre revenido, en la que la temperatura del ciclo térmico no llega a la temperatura eutectoide, A1; en este caso baja un poco la dureza ya que las temperaturas máximas en el ciclo son más altas que la del revenido aplicado al acero balístico.

En la figura 19, se presentan los resultados de microdureza y las microestructuras de las 4 subzonas de sobrecalentamiento al final del proceso, esto permite precisar lo que ocurre en esta zona después del tercer pase de soldadura y cómo han influido los parámetros o variables introducidas: a) con precalentamiento o sin él, b) la apertura (2,5 mm y 3,5 mm) y c) la energía lineal de soldadura impuesta por el último en la soldabilidad metalúrgica.



**Figura 19. Micrografías y microdureza de la zona de sobrecalentamiento en las uniones soldadas con los tres pases bajo diferentes condiciones**

Los resultados detallados de microdureza en los 4 casos se ofrecen en Anexo. Aquí se destaca que con la misma apertura reducida a 2,5 mm y sin cambio apreciable en la energía lineal de soldadura, el precalentamiento jugó un rol importante reduciendo las velocidades de enfriamiento, evitando la aparición de martensita y el riesgo de agrietamiento en frío en la ZAT (Subzona de sobrecalentamiento).



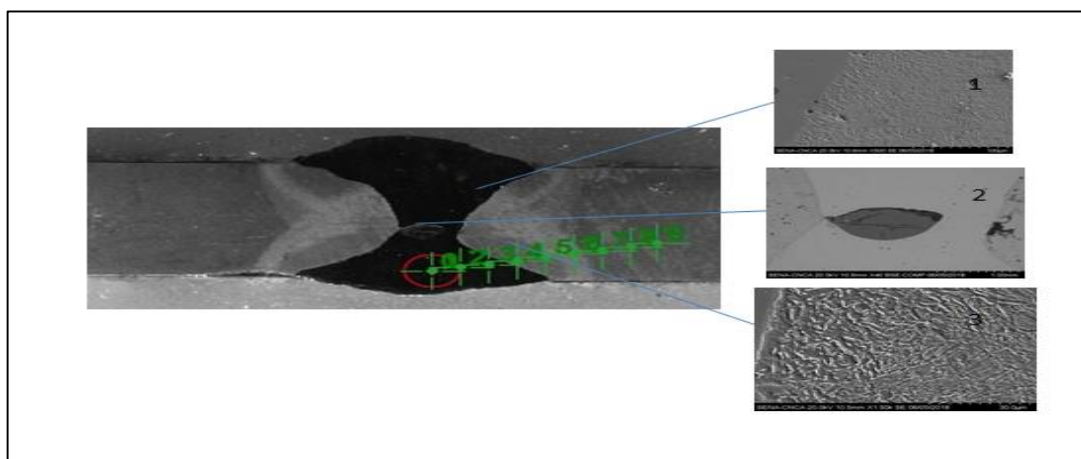
**Figura 20. Los dos perfiles de microdureza con apertura 2,5 mm con y sin precalentamiento. Diferencias significativas de los valores de microdureza en la zona de sobrecalentamiento.**



### 5.3 Resultados de la observación por microscopía electrónica de barrido (SEM) y Espectros de dispersión de energía (EDS)

Se presentan los resultados de las imágenes obtenidas con electrones secundarios en el microscopio electrónico de barrido (SEM) para las subzonas de interés en las 4 probetas objeto de estudio, la intención fue determinar algún cambio microestructural en la zona de fusión por la dilución del carbono y la posible aparición de carburos que pudieran incrementar la dureza en dicha zona. Este análisis no evidenció la formación de carburos en ninguna de las probetas en la zona de fusión y por ende no hubo endurecimiento significativo en la misma por la dilución del carbono del metal base. En las figuras 21 y 22, se muestran a modo de ejemplo el caso de la unión de 2,5 mm con precalentamiento y 2.5 mm sin precalentamiento.

Mediante la espectroscopia por dispersión de energía de rayos x, (MEB/EDX), se hizo análisis de composición química un mapeo de concentración de los elementos químicos de mayor interés en las 4 uniones soldadas. En la figura 26 se ofrece a modo de ejemplo el resultado de la unión de 2,5 mm con precalentamiento expresando concentración (ver figura 27) y distribución de Fe, Cr, Ni, Mn y Mo (ver figura 28), de igual forma se observan los resultados obtenidos de la probeta de 2.5 mm sin precalentamiento en las figuras 21 a la 23, Estos resultados no ofrecen información adicional a la que se ha obtenido mediante de la microscopía óptica; por medio de SEM se esperaba ver algunos precipitados duros de la combinación del carbono con algunos formadores de carburo como el cromo, niobio, etc., presentes en el electrodo de acero inoxidable.



**Figura 21. Macrografía de probeta No. 3 sin precalentamiento de 2,5 mm. En ésta se muestran distintas microestructuras en la ZAT, obtenidas por medio de microscopio electrónico de barrido: zona de grano grueso, borde de fusión y zona blanda**

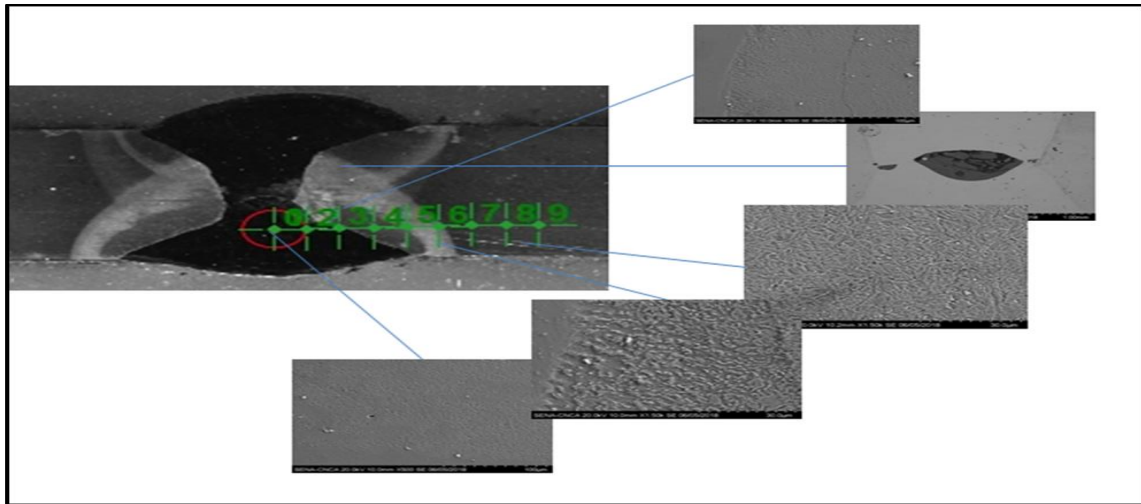


Figura 22. Macrografía de probeta No. 3 con precalentamiento de 2,5 mm. En ésta se muestran distintas microestructuras en la ZAT, obtenidas por medio de microscopio electrónico de barrido: fusión, preparación de la junta, grano fino, grano grueso

#### EDS para probeta No.3 de 2.5 mm sin precalentamiento

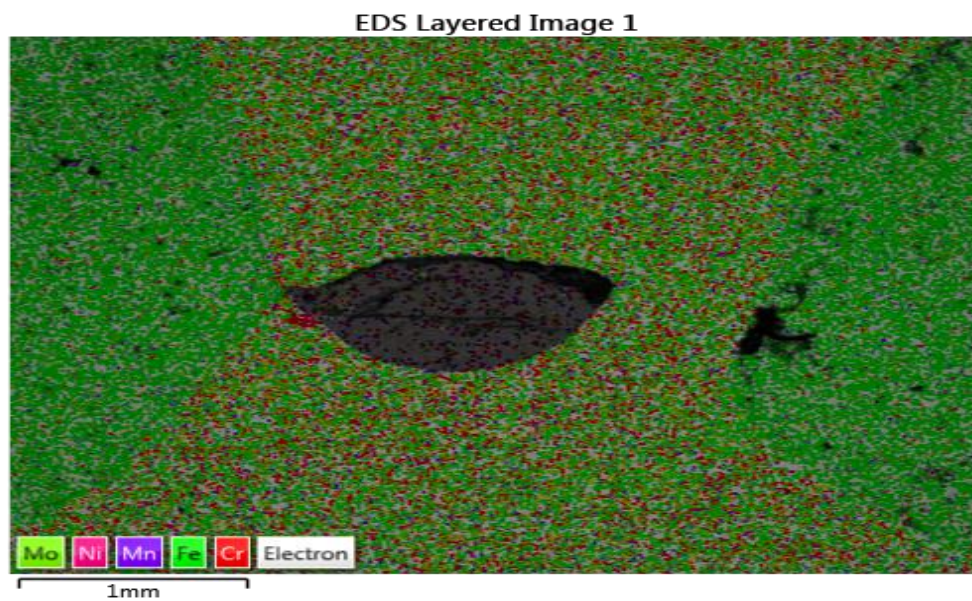


Figura 23. Espectro obtenido mediante EDS para el revestimiento de un electrodo E312-16 de probeta No. 3 sin precalentamiento de 2.5 mm



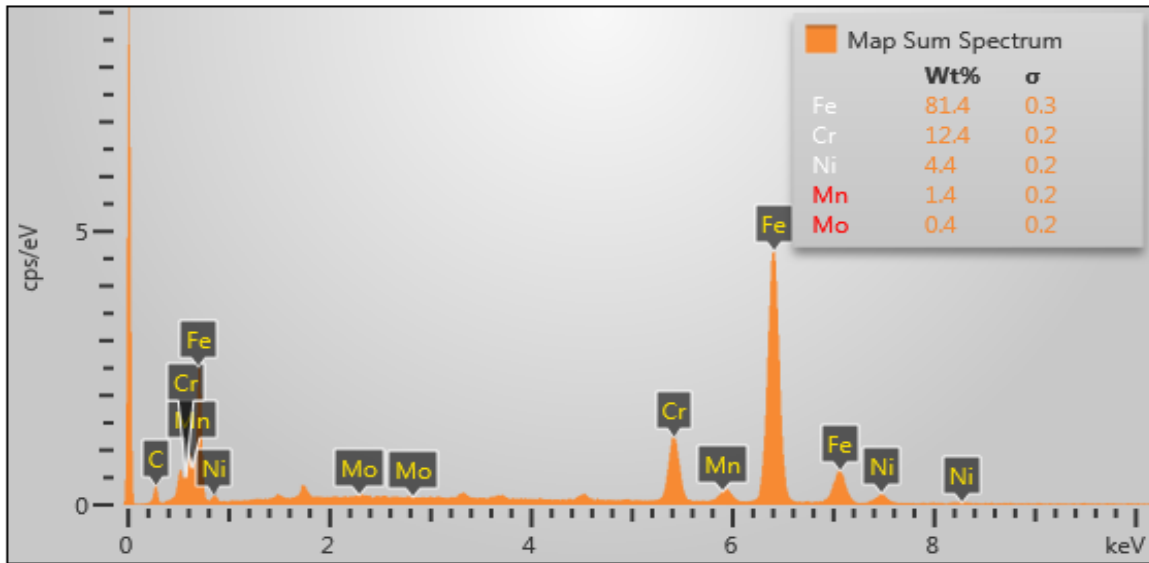


Figura 24. Espectro de dispersión de energía en la junta soldada de probeta No. 3 sin precalentamiento de 2.5 mm

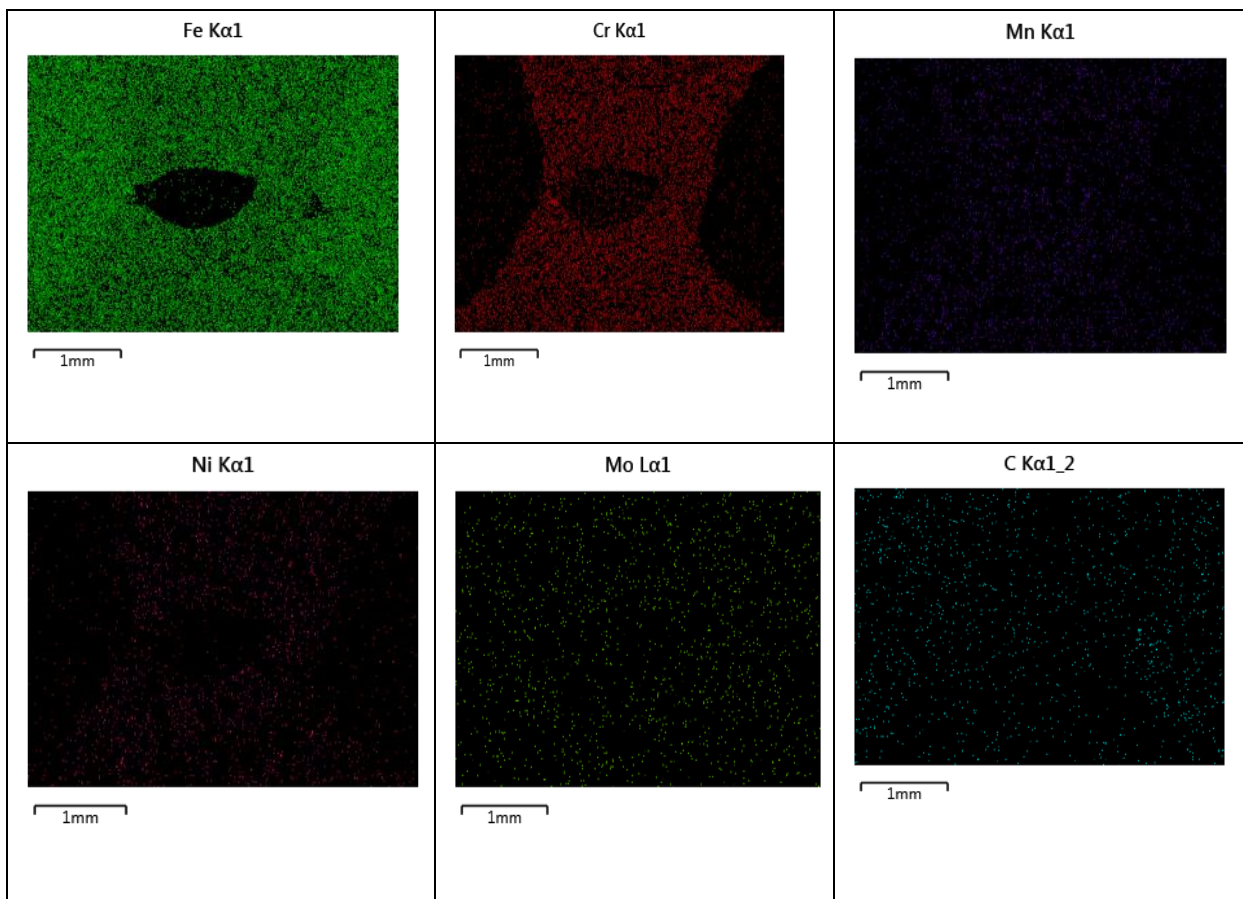


Figura 25. EDS por elementos en la junta de la unión soldada con un electrodo E312-16

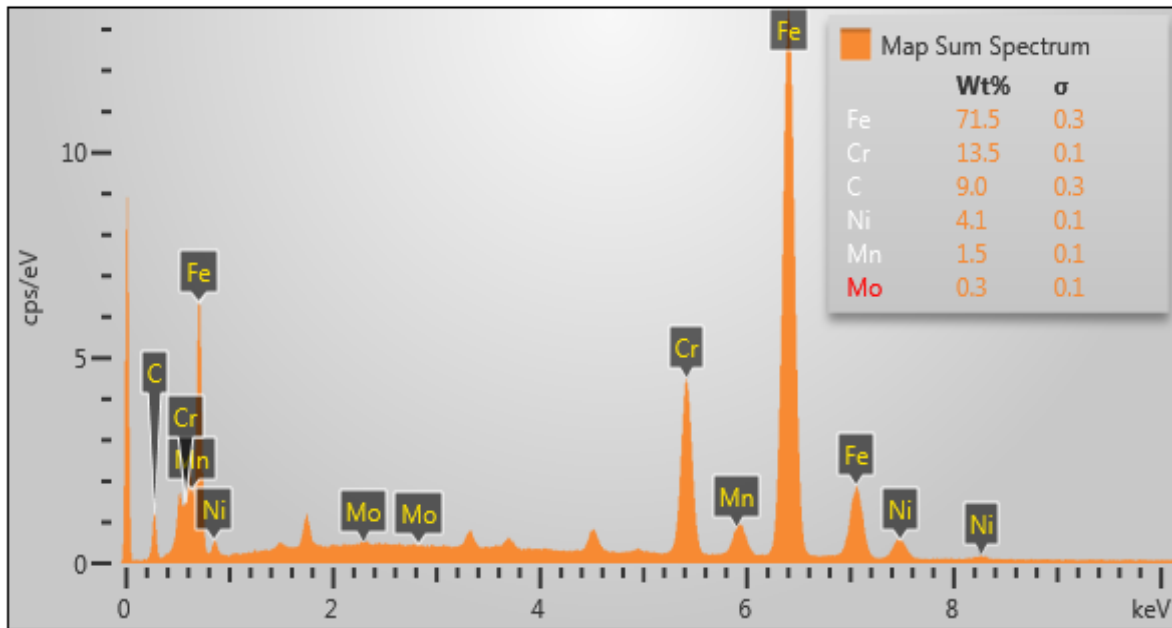


Figura 26. Espectro obtenido mediante EDS para el revestimiento de un electrodo E312-16 de probeta No. 3 con precalentamiento de 2.5 mm

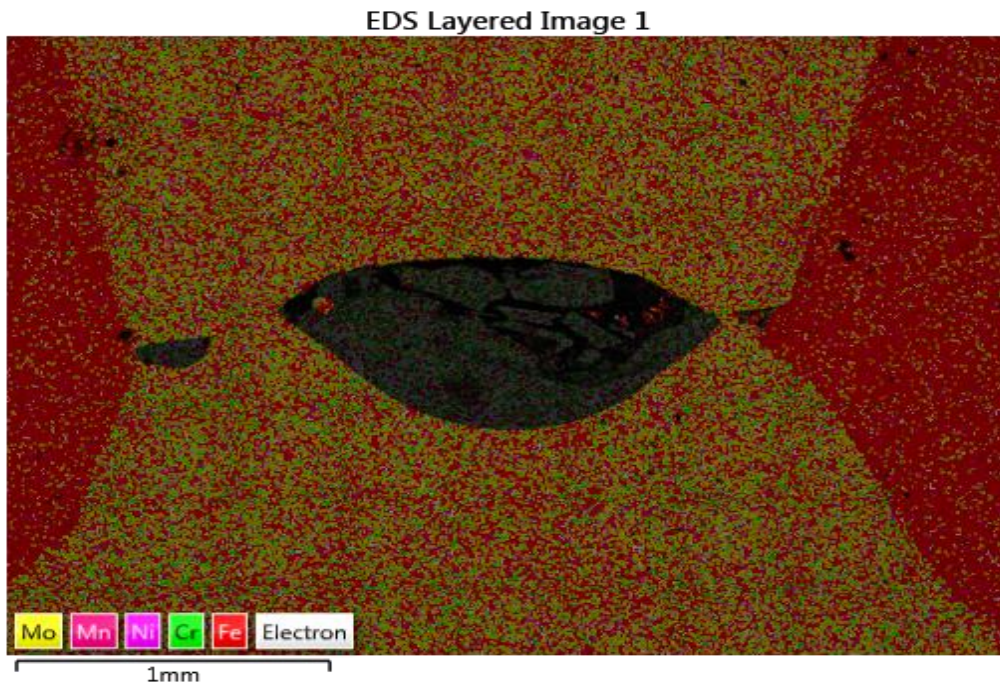


Figura 27. Espectro de dispersión de energía en la junta soldada de probeta No. 3 Con precalentamiento de 2.5 mm.

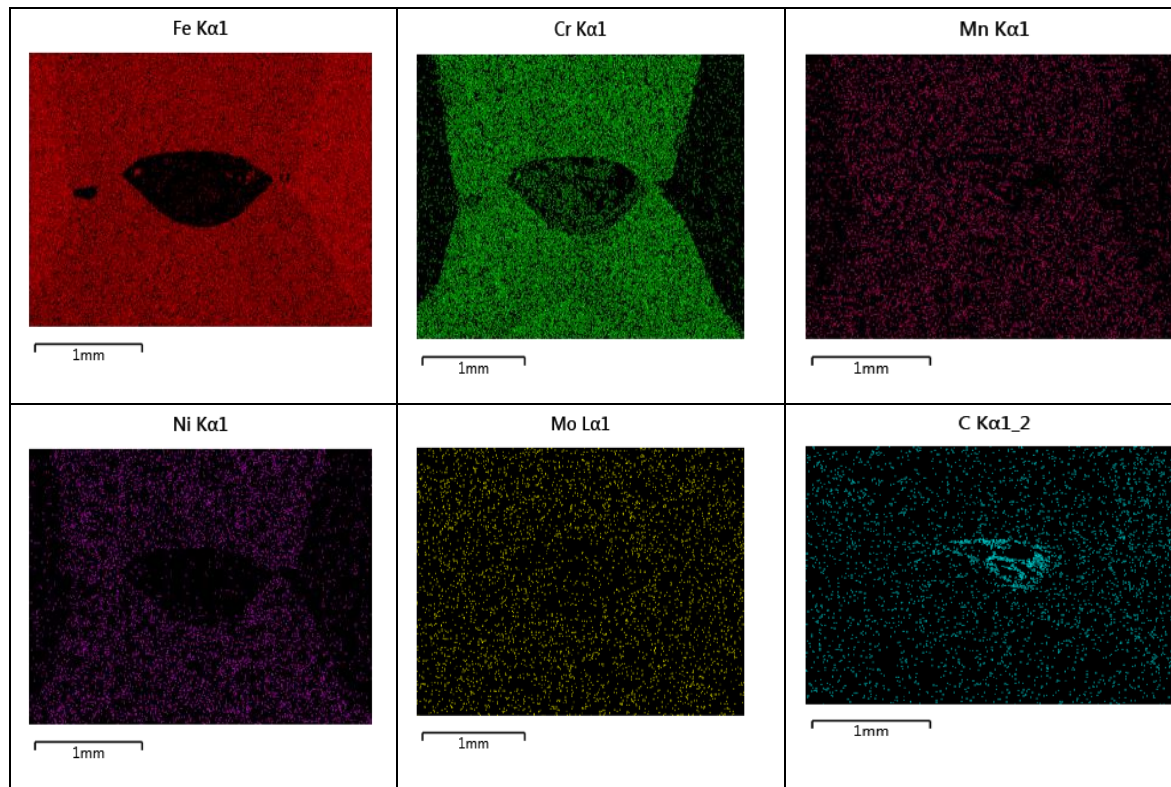


Figura 28. EDS por elementos en la junta de la unión soldada con un electrodo E312-16

#### 5.4 Medición de dilución

Utilizando el método geométrico para calcular la dilución de las juntas soldadas, donde son extraídas las imágenes de las secciones transversales de las juntas de soldadura a tope y juntas de soldadura a tope con bisel, que permitieron determinar las áreas del metal base fundido y las áreas del depósito de soldadura, para la cual se muestra el resultado en la tabla 9.

Tabla 9. Porcentajes de dilución Geométrica en probetas con tres cordones de soldadura

ELECTRODO	PROBETA No.3	TIPO DE APERTURA	%DILUCION
E312-16	2.5 mm, sin precalentamiento	A tope	34.7
E312-16	2.5mm, con precalentamiento	A tope	32.5
E312-16	3.5 mm, sin precalentamiento	Tope	34.8
E312-16	3.5 mm, con precalentamiento	Tope	36

De acuerdo a los porcentajes de dilución geométrica obtenidos, se identifican numéricamente en el diagrama de schaeffler, expresados en porcentaje de cromo y porcentaje de níquel. Para realizar este procedimiento es necesario calcular los valores de cromo y níquel equivalente del acero MIL-DTL-46100E y del Electrodo utilizado para la unión E312-16 y a partir de estos resultados, se grafica el porcentaje de dilución (ver tabla 9) de la unión, como se muestra en la figura 29.

Para la representación de la dilución en el diagrama de schaeffler es necesario conocer la composición química del metal base y el metal de aporte, en las tablas 10 y 11 se muestran los porcentajes de cada uno de los elementos.

**Tabla 10. Composición química de Acero MIL-DTL-46100E según la composición típica del fabricante Astralloy Steel**

COMPOSICION ACERO MIL-DTL 46100E	
ELEMENTO	Wt (%)
<b>C</b>	<b>0.32</b>
<b>Mn</b>	<b>1</b>
<b>P</b>	<b>0.02</b>
<b>S</b>	<b>0.005</b>
<b>Si</b>	<b>0.6</b>
<b>Ni</b>	<b>0.6</b>
<b>Cr</b>	<b>0.7</b>
<b>Mo</b>	<b>0.3</b>
<b>Cu</b>	<b>0.25</b>

**Tabla 11. Composición química según AWS A5.4 para electrodo revestido AWS E312-16 del fabricante LINCOLN ELECTRIC COMPANY**

COMPOSICION ELECTRODO AWS 5.4 LINCOLN ELECTRIC E 312-16	
ELEMENTO	Wt (%)
<b>C</b>	<b>0.12</b>
<b>Mn</b>	<b>1.4</b>
<b>P</b>	<b>0.02</b>
<b>S</b>	<b>0.01</b>
<b>Si</b>	<b>0.67</b>
<b>Ni</b>	<b>9.4</b>
<b>Cr</b>	<b>29.4</b>
<b>Mo</b>	<b>0.15</b>
<b>Cu</b>	<b>0.06</b>

Luego de reemplazar los porcentajes de elementos que componen el metal base y electrodo en las ecuaciones de níquel y cromo equivalente se obtienen los resultados que muestra la tabla 12.

Tabla 12. Porcentajes de cromo y níquel equivalente, de acuerdo a composición química del metal y electrodos, involucrados en la unión soldada

	NIQUEL EQUIVALENTE (%)	CROMO EQUIVALENTE (%)
ACERO MIL-DTL-46100E	10.9	2.4
ELECTRODO E312-16	13.1	30.6

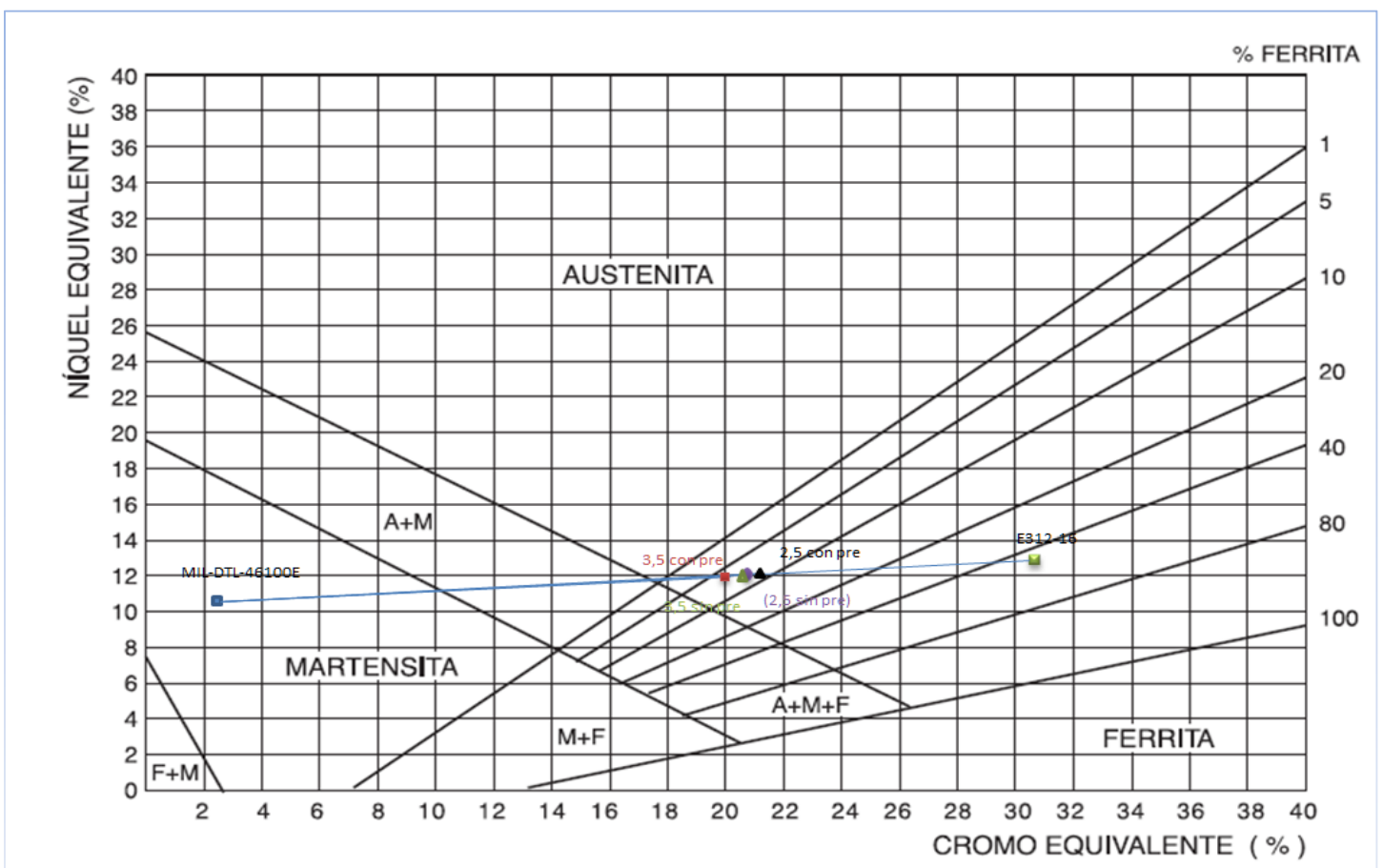


Figura 29. Diagrama de Schaeffler, con los diferentes porcentajes de níquel y cromo equivalentes del electrodo y metal base sin diluir, grafica tomada de (Ospina, Aguirre, & Parra, 2007)



## 5.5 Discusión de resultados

Del análisis macrográfico, de acuerdo a lo observado en la figura 18 se evidencia que el precalentamiento no influye mucho en el ancho total de la ZAT para una misma apertura. El ancho total de la ZAT es superior cuando la apertura crece, siendo mayor cuando se aplica sobrecalentamiento.

Del análisis microestructural por microscopía óptica y electrónica y su correlación con la microdureza en la zona de sobrecalentamiento conforme la figura 20, la comparación entre ambos casos, con aperturas de 3,5 y 2,5 mm, muestra que en ambos casos la microdureza es menor en ambos cuando se hace precalentamiento respecto al caso sin precalentar. Las durezas de 558 HV y 477 HV para aperturas de 2,5 y 3,5 mm de apertura (sin pre) se corresponden a la presencia de martensita debido a las más altas velocidades de enfriamiento: las durezas de 449 HV y 403 HV (con pre) para estas aperturas son el resultados de la presencia de bainita con perlita fina producto de las más bajas velocidades de enfriamiento. Lo anterior indica que el precalentamiento en ambo casos surtió el efecto esperado, el que es más evidente en el caso de 2,5 mm de apertura, ya que se logró similar aportación de calor sin y con precalentamiento; lo que no ocurrió en la de 3,5 mm donde la energía lineal de soldadura bajó a 1,75 J/s en el último pase respecto al caso sin precalentamiento que fue de 2,8 J/s, creando un efecto contrario al que produce el precalentamiento. Sin embargo el efecto del precalentamiento se impuso sobre el efecto negativo de la reducción de la energía lineal de soldadura, lo que ratifica la importancia del precalentamiento en el último pase de soldadura.

En consecuencia con el análisis anterior se presentó una comparación de los perfiles de dureza únicamente de las dos probetas con apertura de 2,5, sin y con precalentamiento, figura 20. El precalentamiento da una dureza bastante equilibrada por encima de los 300 HV en toda la ZAT, incluso en la zona de recristalización se logran valores ligeramente superiores respecto al caso sin precalentamiento. Este resultado indica que el precalentamiento tiene el efecto deseado, logra subir en algo la dureza en las zonas blandas (cordón y zona de recristalización) y logra evitar la presencia de martensita en la zona de sobrecalentamiento con durezas por encima de los 400 HV, reduciendo así el riesgo de formación de grietas en frío en la ZAT

La microscopía óptica ofreció información muy valiosa; el análisis por SEM/EDS ofreció poca información, sólo nos indicó que no se forman carburos en la zona de dilución por la

presencia de abundante carbono proveniente del metal base; parece ser que el carbono entra en solución sólida intersticial en la austenita y en tal caso el endurecimiento que provoca es muy bajo. Lamentablemente el SEM no puede precisar cantidad y distribución de carbono

El porcentaje de dilución calculado por el método geométrico arrojó resultados muy similares en todos los casos; al ser un método aproximado y no estar diseñado para encontrar la distribución de los elementos del metal base en la zona fusión no contribuyó mucho en este estudio. Es de esperar que cerca del bode de soldadura entre la zona de fusión y el metal base haya mayor concentración de carbono y microaleantes difundidos que en el centro del cordón o en el segundo cordón (segundo pase) por estar más lejos del borde. Para profundizar en este aspecto se requieren de más ensayos de microdureza y análisis químicos puntuales en barrido por SEM/EDS, los cuales tienen un costo elevado.

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se logró cumplir con el objetivo general propuesto, lográndose determinar de forma preliminar la influencia de dos parámetros de soldadura, la apertura y el precalentamiento en las uniones a tope del acero balístico MIL-DTL-46100E con electrodo E312-16, bajo proceso SMAW, sobre las propiedades mecánicas de y ancho de la misma. Se incluyó considerar la influencia de un tercer parámetro, la energía lineal de soldadura, sabiendo que éste es difícil de controlar en un proceso manual. Sin embargo fue una suerte que tuviera poca variación en el tercer pase con apertura de 2,5 mm con pre y sin precalentamiento.

El análisis macroestructural y microestructural, así como los perfiles de dureza Vickers sobre las secciones transversales de las 4 uniones soldadas con los tres pases de soldadura cordones, dos niveles de aperturas (2,5 mm y 3,5 mm) y dos niveles de precalentamiento (28°C y 200°C) permitieron arribar a las siguientes conclusiones.

- La reducción de la apertura en la unión tuvo un efecto positivo en la reducción del ancho total de la unión afectada por el calor (ZAT+ Zona de fusión), y que pueden ser menos vulnerables a los impactos de balas para 2,5 mm de apertura.
- El precalentamiento en el entorno de los 200 °C, con ambas aperturas tuvo una incidencia positiva en la disminución de los picos de dureza de la zona de sobrecalentamiento de la ZAT evitando la presencia de martensita y reduciendo la tendencia al agrietamiento en frío. En el caso de 2,5 mm de apertura, con la misma energía lineal de soldadura con pre y sin precalentamiento este efecto fue más evidente; no sólo bajó la dureza entre 400 y 450 HV (dureza anterior entre los 550 y 650 HV) en la zona de sobrecalentamiento, sino que subió ligeramente de dureza de la zona de recristalización, manteniéndola por encima de los 300 HV.
- El precalentamiento no provocó algún cambio importante en el ancho total de la zona afectada por el calor manteniendo una misma apertura en la unión soldada.
- En ninguno de los dos casos ocurrió un incremento de la energía lineal de soldadura asociado con el precalentamiento. Se sabe que su incremento constituye una manera de reducir las velocidades de enfriamiento en la ZAT; aunque en este trabajo no se



haya podido corroborar este efecto, es importante señalar que es una buena opción y debe tenerse en cuenta para futuros estudios.

- El porcentaje de dilución estimado en las 4 uniones estudiadas fue muy similar, estando entre 32,5 % y 36 %. Sin embargo este parámetro por sí sólo no ofrece información respecto a la distribución y concentración de carbono y elementos de micro aleación en la zona diluida.
- Finalmente se puede decir que se demostró que la reducción de la apertura, junto con el precalentamiento en el orden de los 200 °C, principalmente en el último pase de soldadura en el acero balístico MIL-DTL-46100E con electrodo E312-16, bajo proceso SMAW, permiten reducir el ancho de la zona vulnerable a los impactos de proyectil y reducir la tendencia al agrietamiento en frío de la zona afectada térmicamente (ZAT).

#### **Recomendaciones.**

- Aprovechar los resultados de este estudio preliminar para el desarrollo de uno más profundo con un diseño de experimento estadístico que permita encontrar la combinación de parámetros para lograr a mayor calidad de estas uniones soldadas con el menor costo posible.
- Socializar este trabajo a las empresas que desarrollan estos procesos de soldadura en acero balístico

## BIBLIOGRAFÍA

- Universidad Tecnológica Nacional de Argentina, Sede Regional Rosario. (2008). Metalografía y Tratamientos Termicos, Cap IV Principios Generales de los Tratamientos Termicos de los Aceros. *Metalografía y Tratamientos Termicos, Cap IV Principios Generales de los Tratamientos Termicos de los Aceros, Pag 1-11. Universidad Tecnológica Nacional de Argentina, Sede Regional Rosario.*
- Akelsen, O. (1987). Techniques for examining transformation behavior in weld metal and HAZ. (5), 26-34.
- Armor Steel Weldments. (s.f.). Standard MIL 1941. Ballistic qualification of Armor Steel Weldments.
- Castellanos, L. M. (1995). Transformaciones De Fase y Su Influencia En La Soldabilidad Metalurgica Del Acero Cubano A-40.
- Chicas, R. (2013). Analisis de Fisuras en los Cordones de Soldadura en Aceros al Carbono sus Causas y Soluciones. Guatemala.
- Department of Defense Standards, Military for Shipment and Storage. (2008). *MIL-STD-129*.
- Departments and Agencies of the Department of Defense. (2008). Armor Plate, Steel, Wrought, High-hardness. MIL-DTL-46100E (MR). *I(29)*.
- Facultad de Minas Universidad Nacional, Grupo de Soldadura. (2005). *Estudio de la Soldabilidad De Aceros Microaleados Utilizados en la Construcción y Reparación de Embarcaciones*. Medellin.
- Ferrer, Carlos; Amigó, Vicente. (2000). *Fundamentos de Ciencia e Ingeniería de los materiales*. Valencia: Universidad de Valencia.
- Giraldo, J. (2005). Soldabilidad de un Acero de Blindaje Con Electrodo de Acero Inoxidable austenítico. *Tesis de Maestría*. Medellin.
- Gomez, F. (2016). influencia de la entrada de calor en las características mecánicas y microestructurales finales de la zona afectada por el calor en uniones soldadas en tubería para transporte de hidrocarburos.
- Ito, Y., & Et, A. (1979). Carbon equivalent, hardness and cracking tendency relationships in C-Mn microalloyed structural steels.
- Mazuera, D., Suarez, J., & Giraldo, J. (2011). Desarrollo de un Procedimiento de Soldadura Para Juntas de Acero de Blindaje MIL A46100 Con Proceso GMAW. *78(168)*.
- Oscar Javier Araque, N. A. (2012). Estado del arte sobre la integridad estructural de uniones soldadas y modelos de propagación de grietas para la gestión de vida en estructuras. *21(2)*.
- Ospina, R., Aguirre, H., & Parra, H. (2007). Soldabilidad En Aceros Inoxidables y Aceros Disímiles. *XIII(34)*.

- Perez, J., Alvarez, A., Manzano, R., & Perez, J. (2007). *Manual Basico. Control en la ejecución en obras de las uniones soldadas*. Murcia: Consejería de Obras Públicas, Vivienda y Transporte de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.
- Sanchez, R. (25 de Junio de 2017). *Navegar es preciso.com*. Obtenido de <https://www.navegar-es-preciso.com/news/el-hierro-y-el-acero-en-la-construccion-naval-apuntes/>
- Society, American Welding. (1996). ANSI/AWS D1.1-96, Structural Welding Code,. *ANSI/AWS D1.1-96, Structural Welding Code, Steel, Ed. 15., I(15)*.
- steel, Ballistic Qualification of armor. (2008). Ballistic Qualification of Armor Steel/MIL-DTL-46100E (MR) w/AMENDMENT 1-24 October 2008. *Especificacion, I(24)*.
- Unfried, J., Torres, E., Giraldo, J., & Bastidas, U. (2007). Influencia del estado de consumibles y del precalentamiento en la susceptibilidad al agrietamiento inducido por hidrogeno en la soldadura de un acero para blindajes. *II(27)*, 114-123.
- Universidad Autonoma de Madrid. (26 de Marzo de 2018). *www.uam.es*. Obtenido de <https://www.uam.es/docencia/labvformat/labvformat/practicas/practica4/fases%20del%20acero.htm>

# ANEXOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las probetas en el laboratorio por ensayos de SEM/EDS/ y microdureza, aquí se puede comparar cada uno de los datos asociados a las probetas estudiadas (4 probetas con 3 cordones de soldadura) en esta investigación. Han sido distribuidos de la siguiente forma:

- **ANEXO 1:** Resultados obtenidos de microscopia electrónica de barrido (SEM) para 4 probetas con 3 cordones de soldadura.
- **ANEXO 2:** Resultados obtenidos mediante espectros de dispersión de energía (EDS) centrados en la zona de fusión, con el fin de conocer la concentración de elementos en la unión soldada.
- **ANEXO 3:** Resultados de perfiles de microdureza en 4 probetas con 3 pases de soldadura, aplicados en la zona de fusión y la ZAT (con intervalos de 0.5 mm).

Los resultados de SEM, EDS, y perfiles de microdureza fueron practicados con equipos especializados del laboratorio de ensayos y materiales del Sena Centro Nacional Colombo Alemán, ubicado en la ciudad de barranquilla.

## Anexo 1

### Resultados microscopia electronica (SEM)

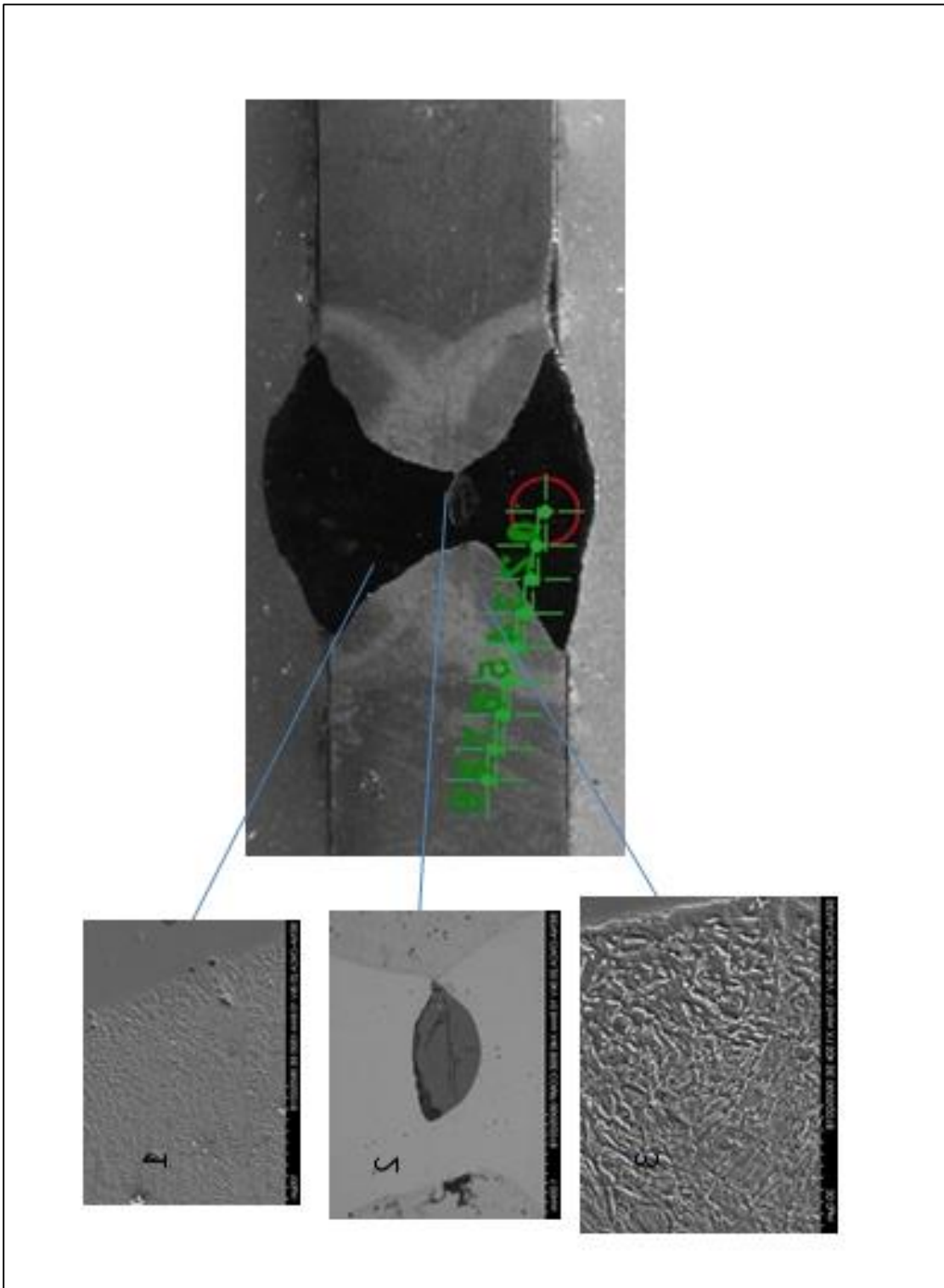


Figura 30. Macrografía de probeta No. 3 sin precalentamiento de 2,5 mm. En ésta se muestran distintas microestructuras en la ZAT, obtenidas por medio de microscopio electrónico de barrido: zona de grano grueso, borde de fusión y zona blanda

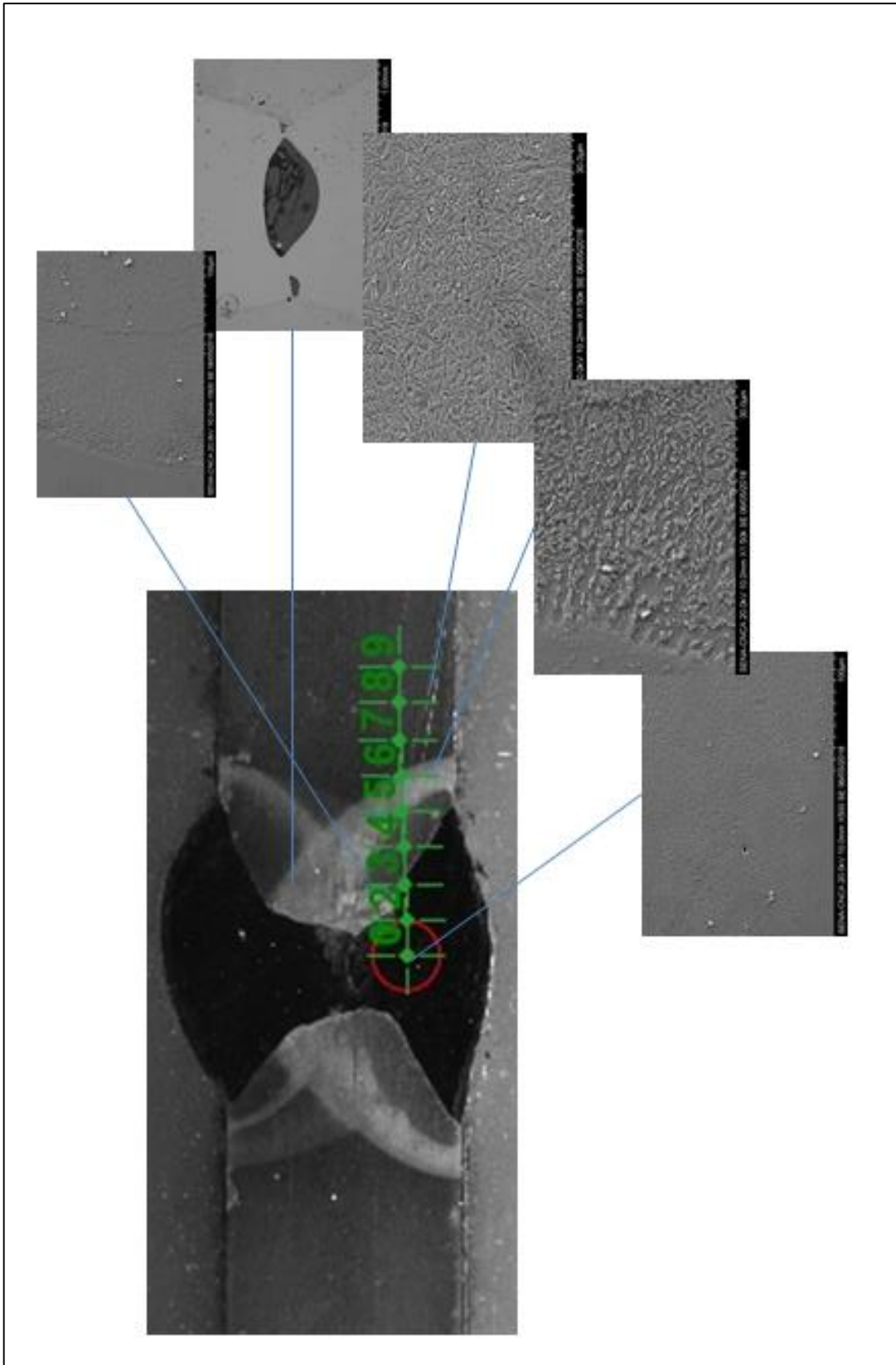


Figura 31. Macrografía de probeta No. 3 con precalentamiento de 2,5 mm. En ésta se muestran distintas microestructuras en la ZAT, obtenidas por medio de microscopio electrónico de barrido: fusión, preparación de la junta, grano fino, grano grueso

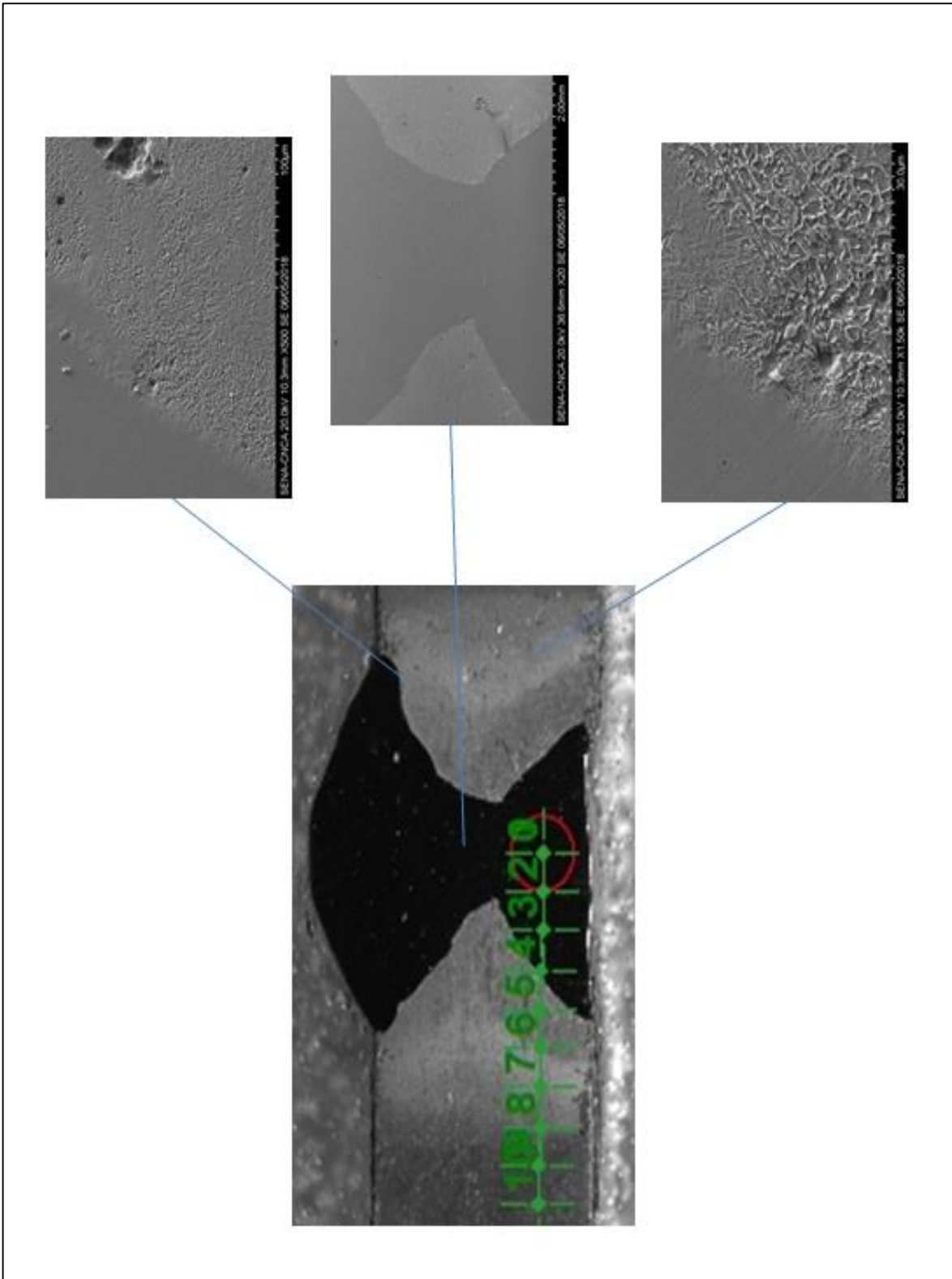


Figura 32. Macrografía de probeta No. 3 con precalentamiento de 3,5 mm. En ésta se muestran distintas microestructuras en la ZAT, obtenidas por medio de microscopio electrónico de barrido: zona de grano fino, preparación de la junta, zona de grano grueso

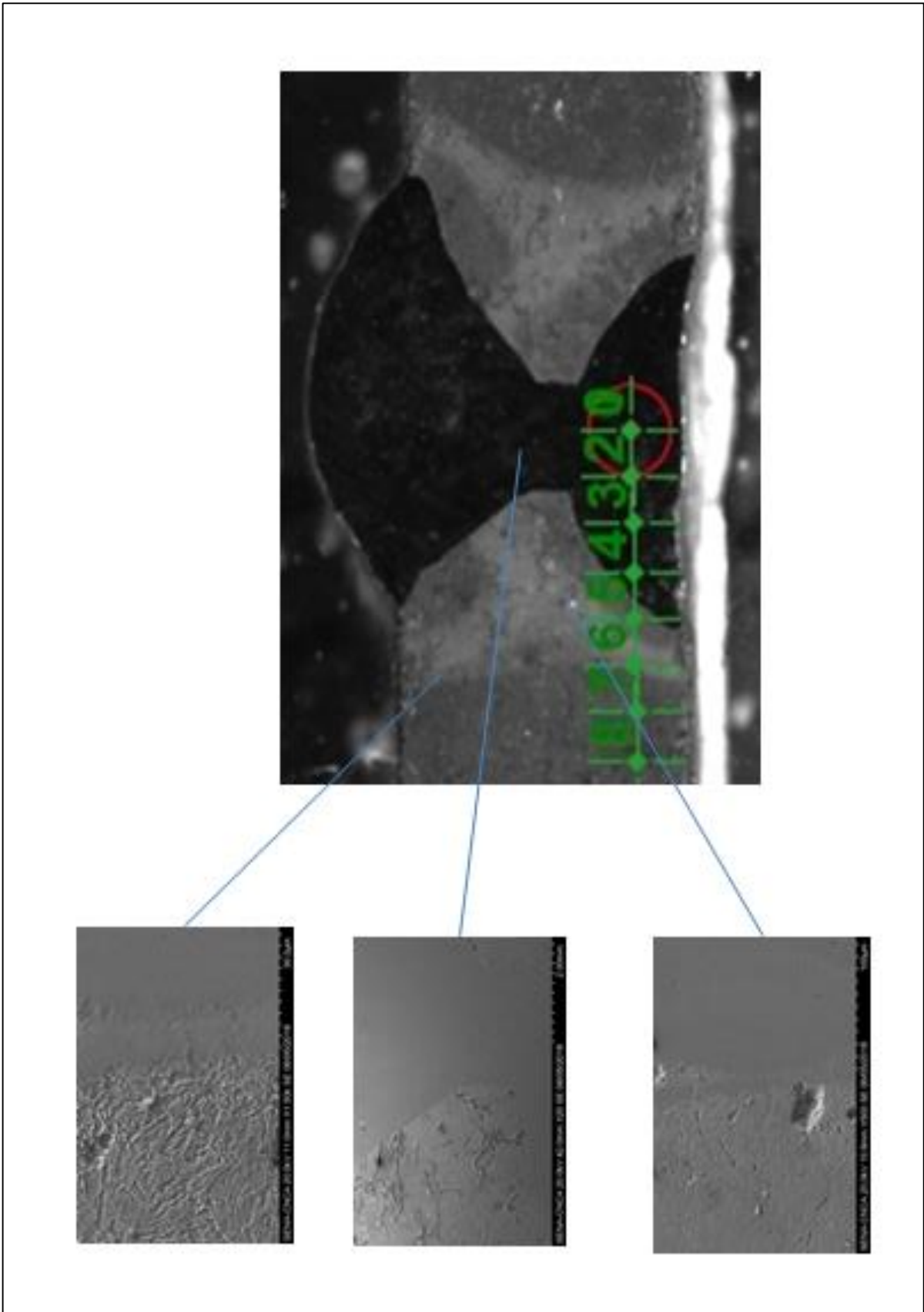


Figura 33. Macrografía de probeta No. 3 sin precalentamiento de 3,5 mm. En ésta se muestran distintas microestructuras en la ZAT, obtenidas por medio de microscopio electrónico de barrido: zona de grano fino, zona de penetracion, zona de grano grueso



## Anexo 2 Espectros de dispersión de energía (EDS)

### EDS para probeta No.3 de 2.5 mm sin precalentamiento

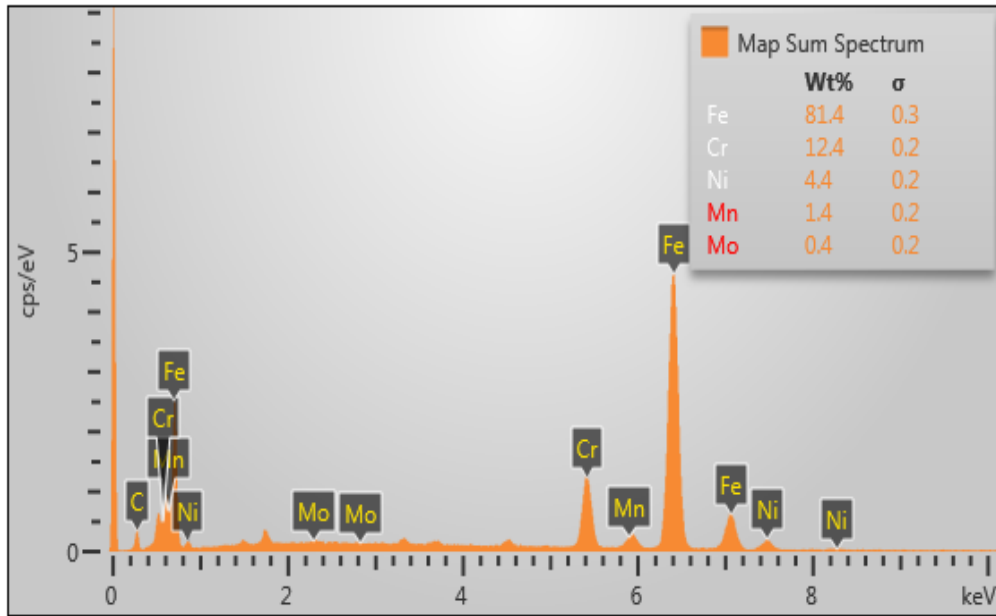


Figura 34. Espectro obtenido mediante EDS para el revestimiento de un electrodo E312-16 de probeta No. 3 sin precalentamiento de 2.5 mm

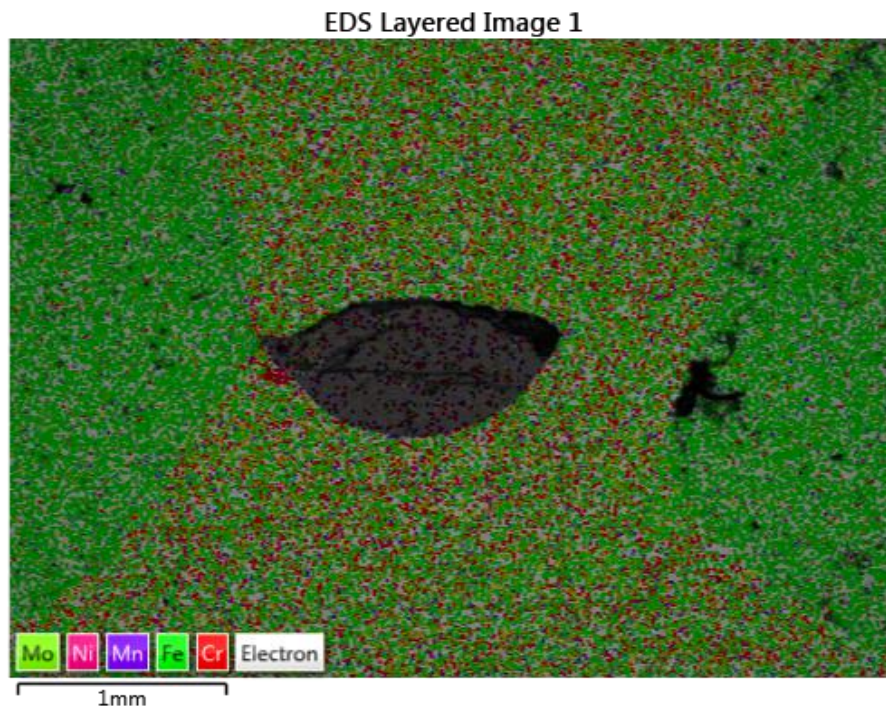


Figura 35. Espectro de dispersión de energía en la junta soldada de probeta No. 3 sin precalentamiento de 2.5 mm

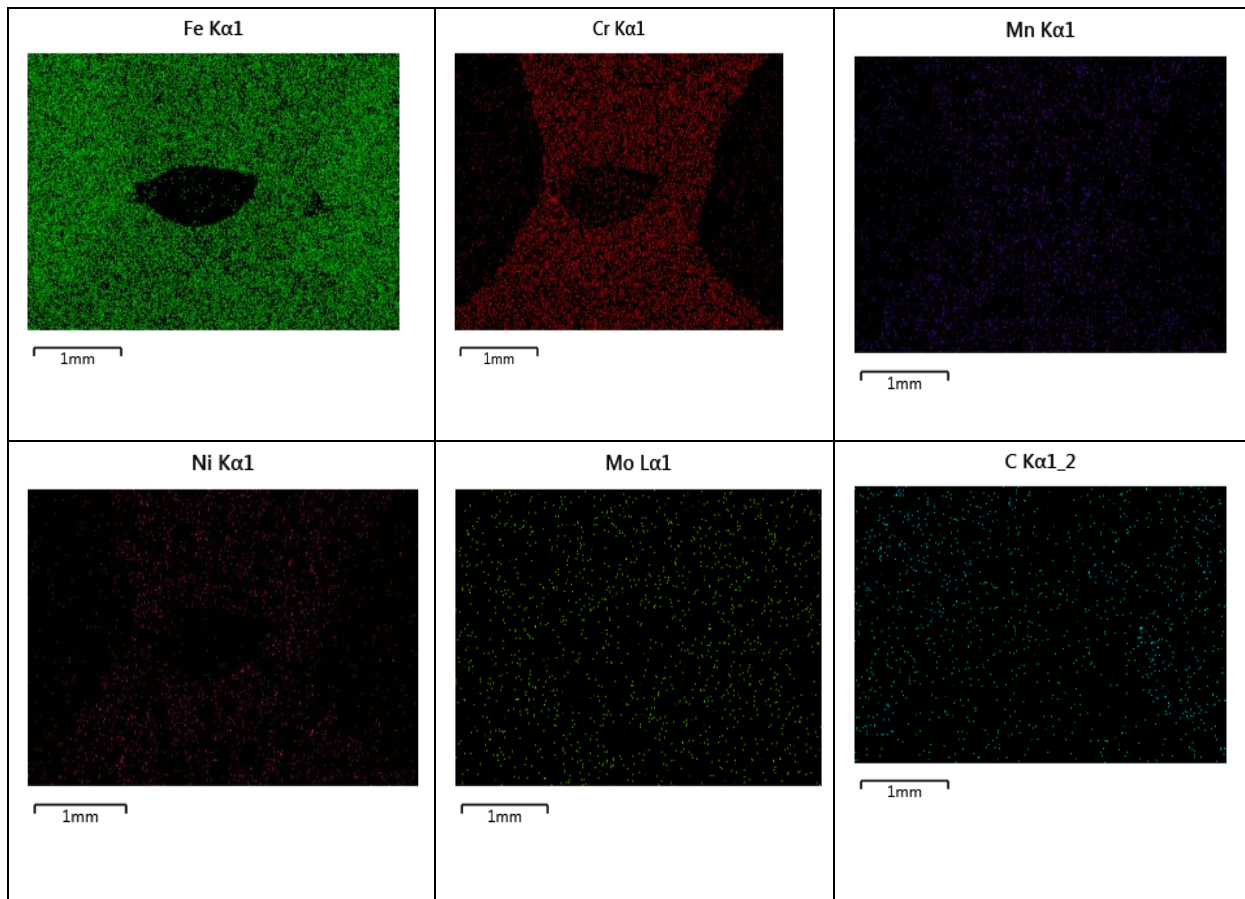


Figura 36. EDS por elementos en la junta de la unión soldada con un electrodo E312-16

### EDS para probeta No.3 de 2.5 mm con precalentamiento

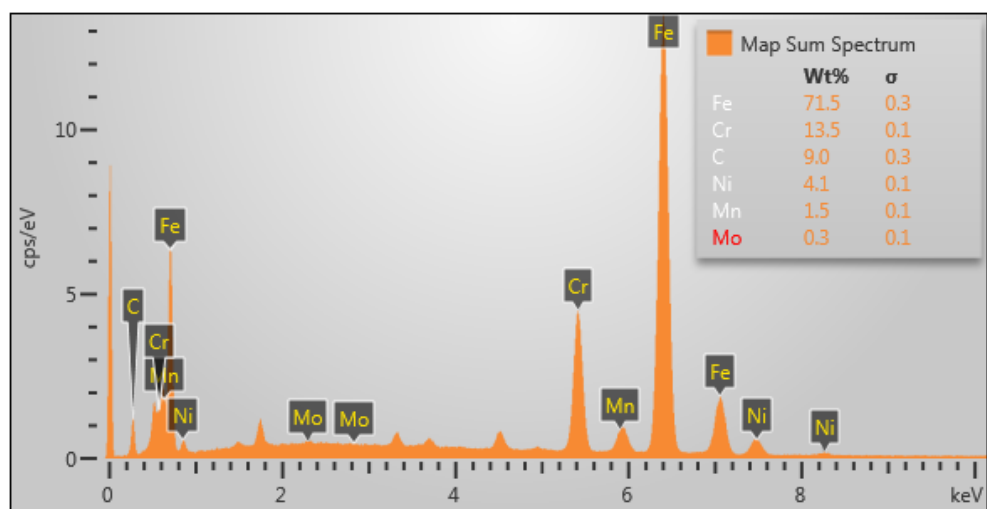


Figura 37. Espectro obtenido mediante EDS para el revestimiento de un electrodo E312-16 de probeta No. 3 con precalentamiento de 2.5 mm

EDS Layered Image 1

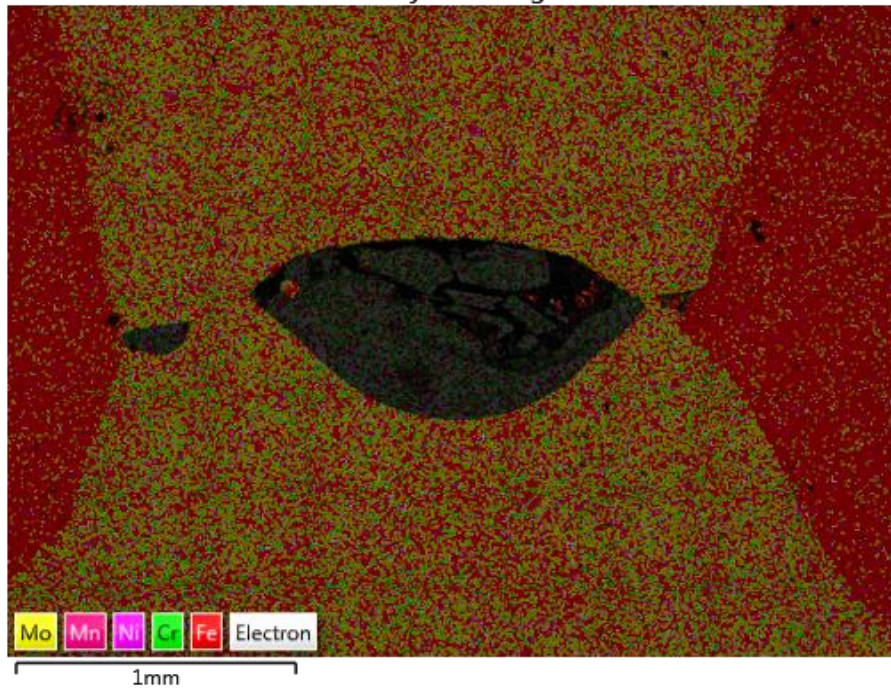


Figura 38. Espectro de dispersión de energía en la junta soldada de probeta No. 3 Con precalentamiento de 2.5 mm.

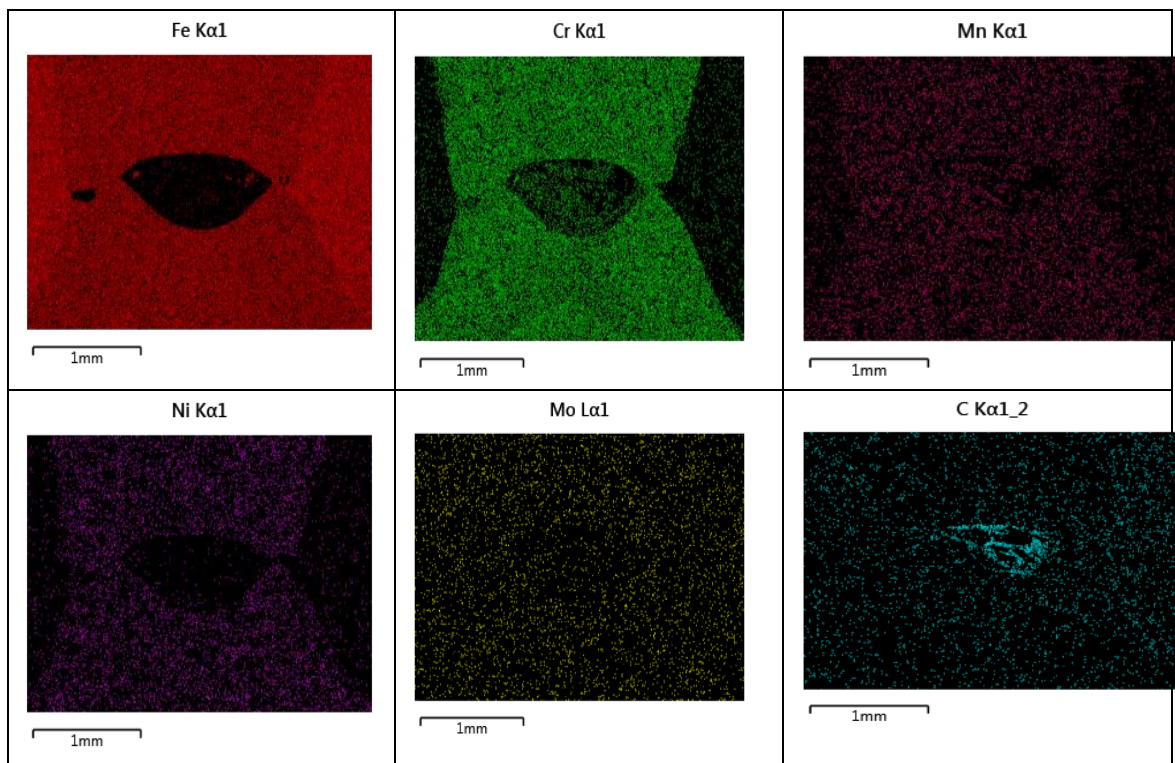


Figura 39. EDS por elementos en la junta de la unión soldada con un electrodo E312-16



### EDS para probeta No.3 de 3.5 mm sin precalentamiento

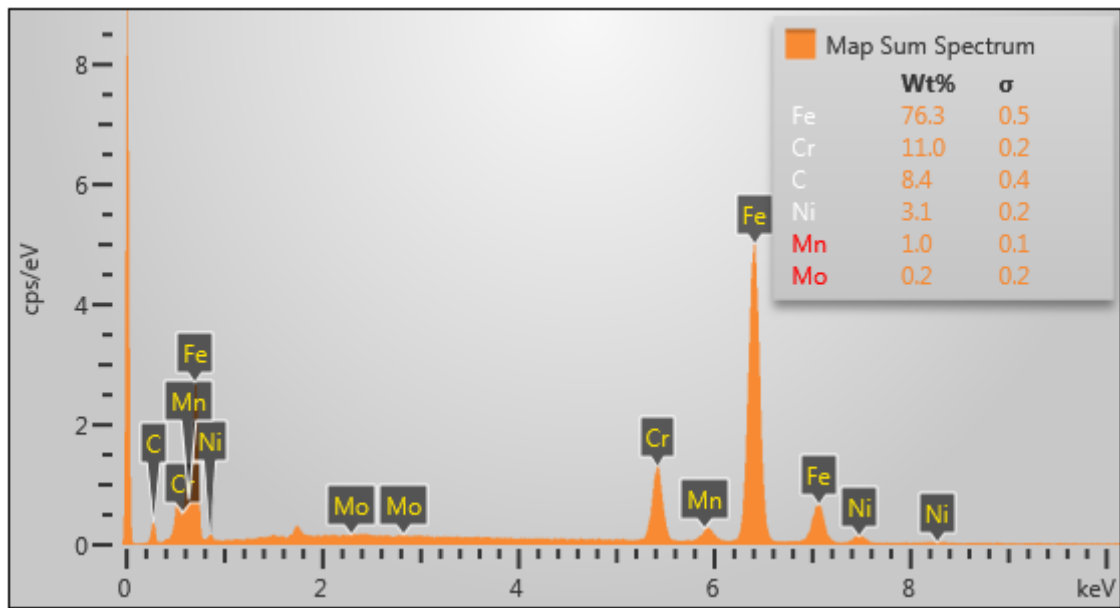


Figura 40. Espectro obtenido mediante EDS para el revestimiento de un electrodo E312-16 de probeta No. 3 sin precalentamiento de 3.5 mm

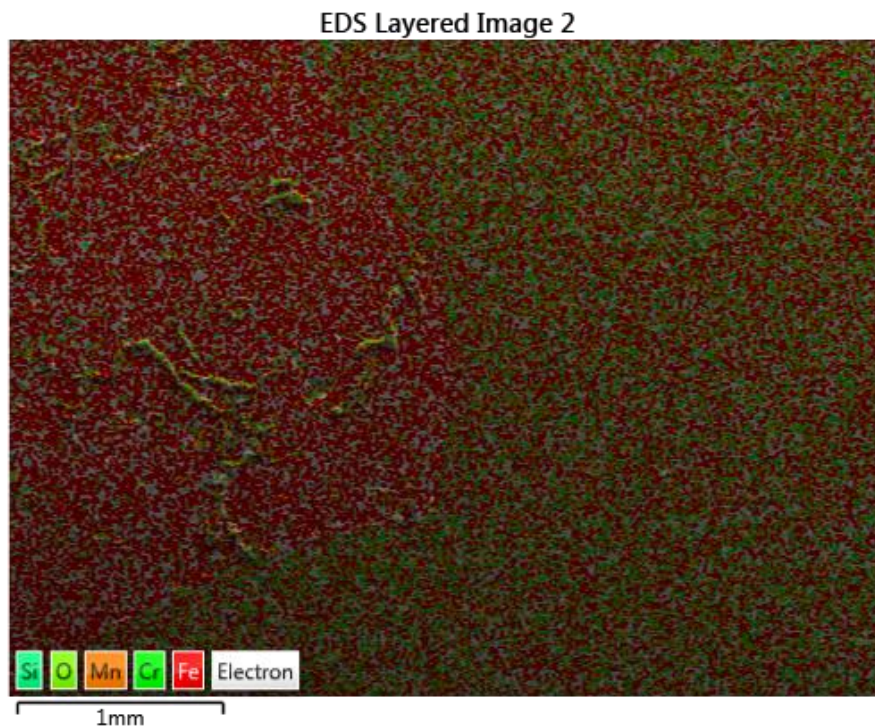


Figura 41. Espectro de dispersión de energía en la junta soldada de probeta No. 3 sin precalentamiento de 3.5 mm

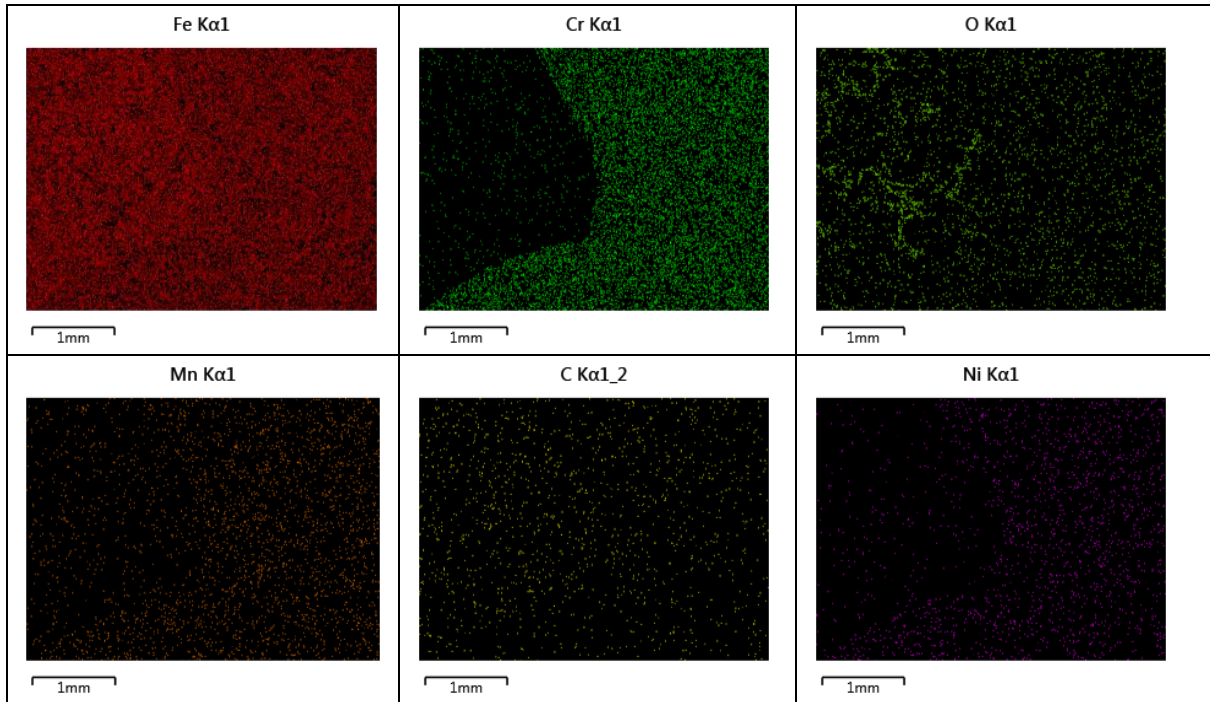


Figura 42. EDS por elementos en la junta de la unión soldada con un electrodo E312-16

### EDS para probeta No.3 de 3.5 mm con precalentamiento

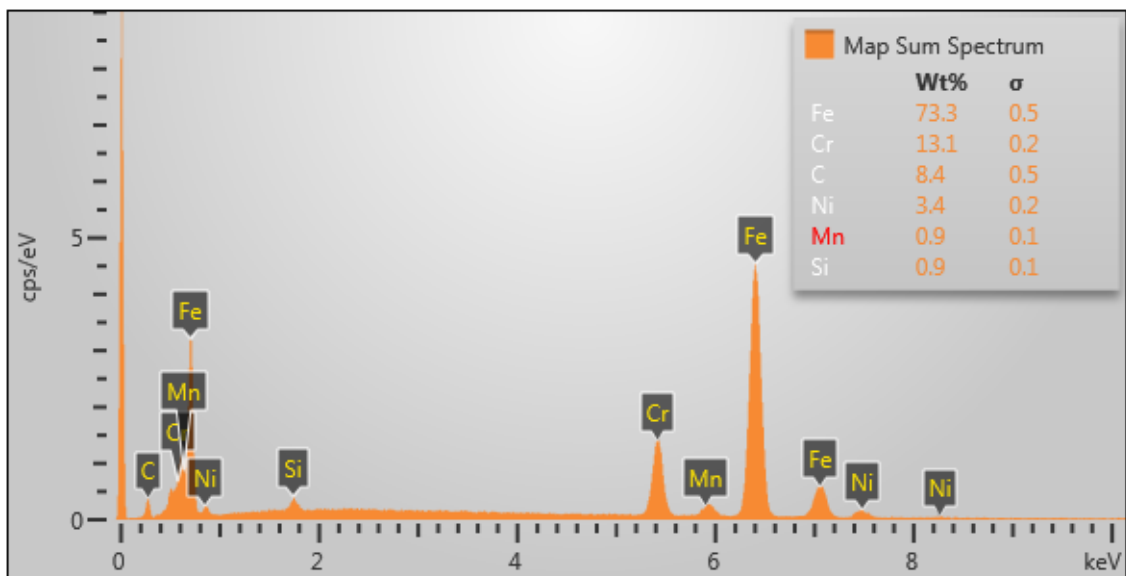


Figura 43. Espectro obtenido mediante EDS para el revestimiento de un electrodo E312-16 de probeta No. 3 con precalentamiento de 3.5 mm

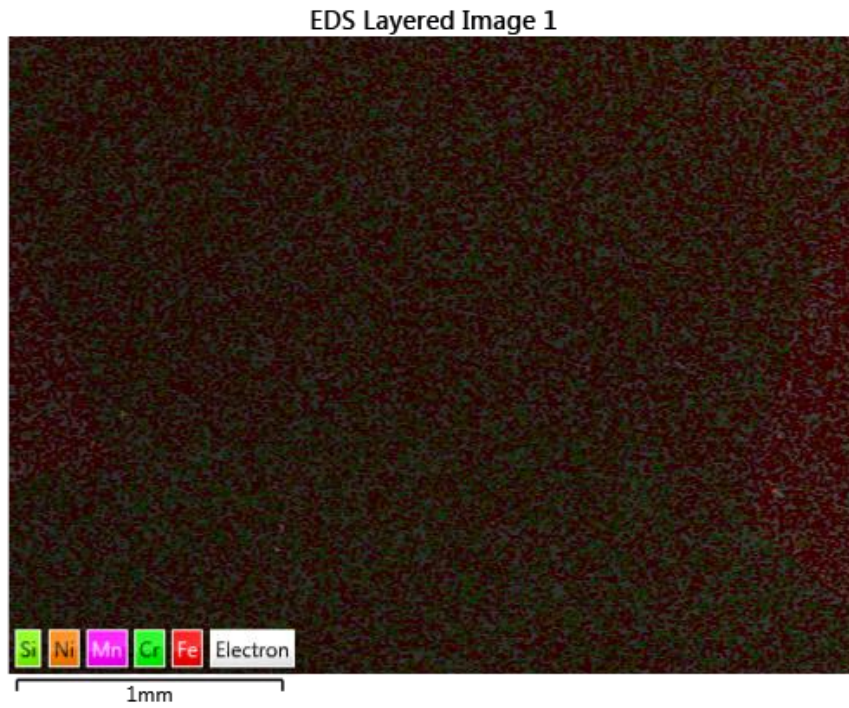


Figura 44. Espectro de dispersión de energía en la junta soldada de probeta No. 3 con precalentamiento de 3.5 mm.

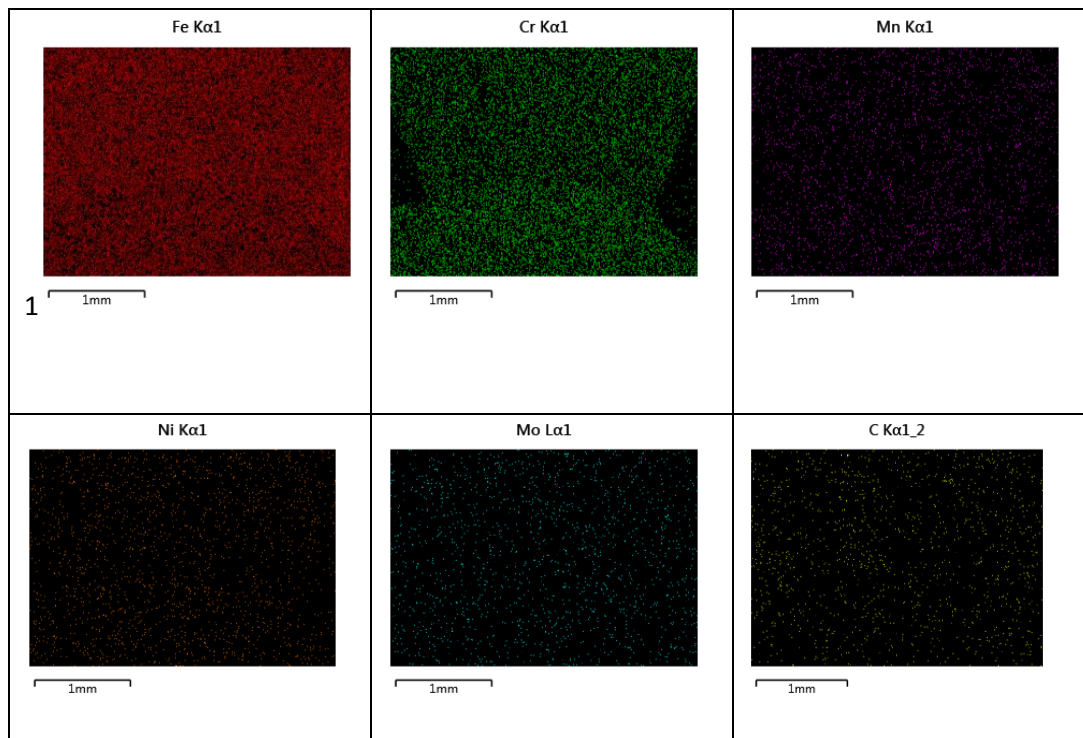


Figura 45. EDS por elementos en la junta de la unión soldada con un electrodo E312-16

### Anexo 3 Microdurezas

Microdureza de probeta No. 3 de 2.5 mm sin precalentamiento.

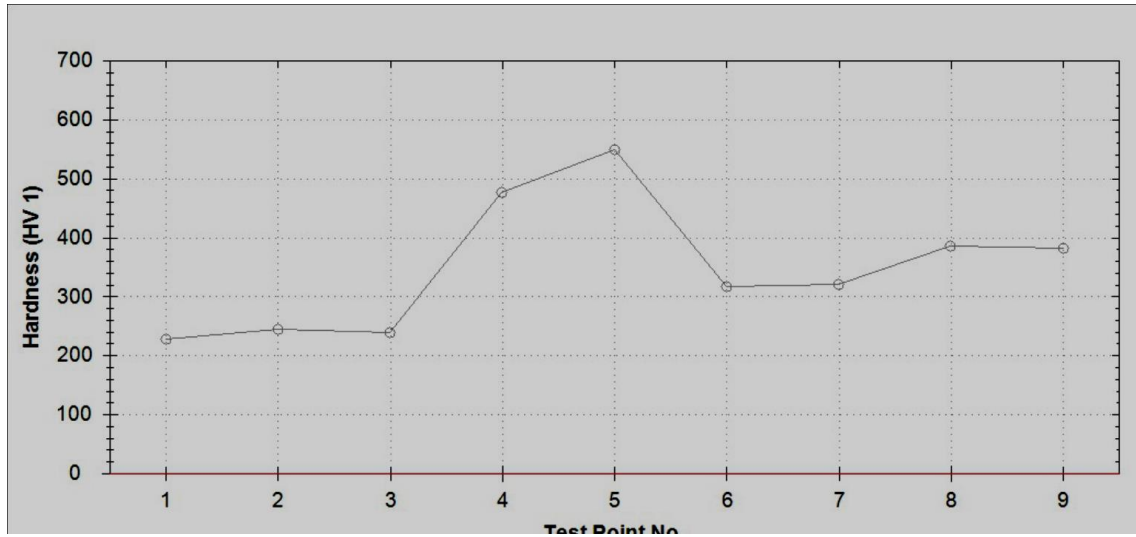


Figura 46. Barrido de microdureza de juntas de soldadura con electrodo E312-16 de probeta No. 3 de 2.5 mm sin precalentamiento

IMAGEN	DUREZA	IMAGEN	DUREZA
<p>1.</p>	228	<p>6.</p>	317
<p>2.</p>	244	<p>7.</p>	320



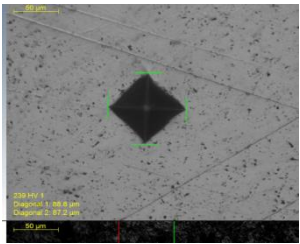
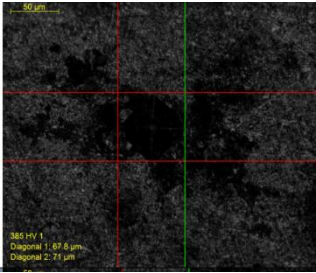
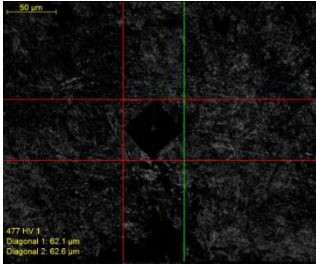
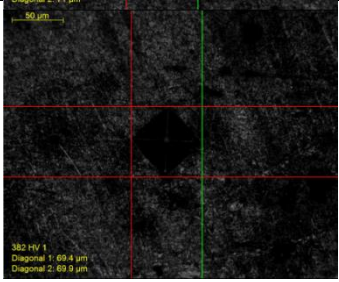
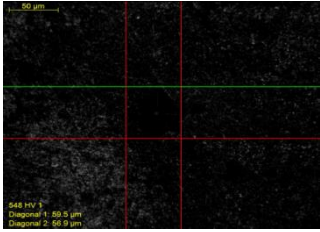
<p>3.</p> 	<p>239</p>	<p>8.</p> 	<p>385</p>
<p>4.</p> 	<p>477</p>	<p>9.</p> 	<p>382</p>
<p>5.</p> 	<p>548</p>		

Figura 47. Barrido de dureza de la junta en diferente zona de la ZAT

### Microdureza de probeta No. 3 de 2.5 mm con precalentamiento

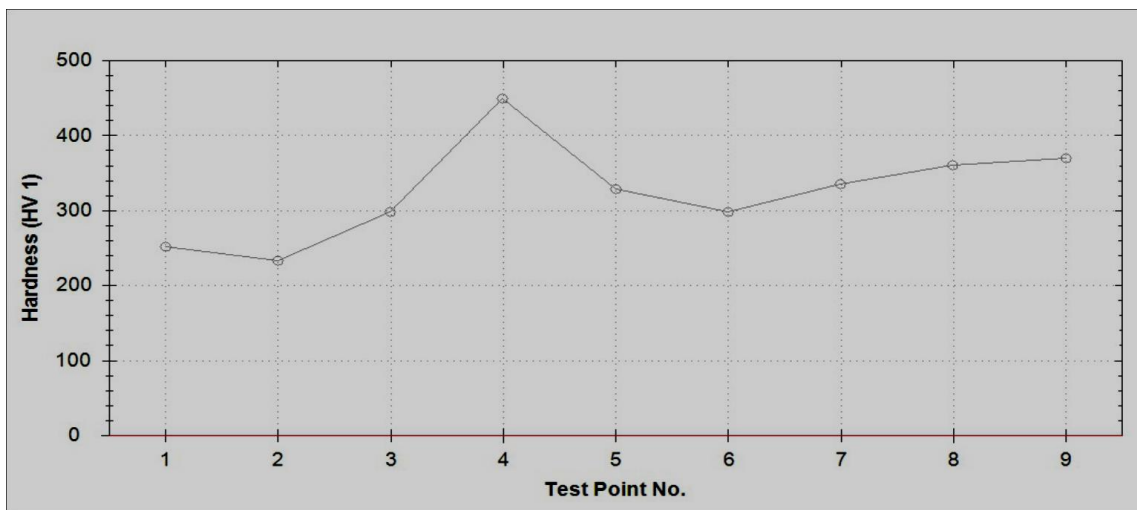


Figura 48. Barrido de microdureza de juntas de soldadura con electrodo E312-16 de probeta No. 3 de 2.5 mm con precalentamiento



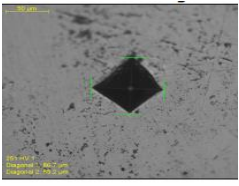
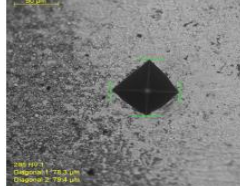
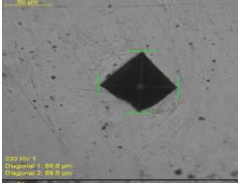
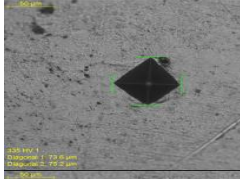
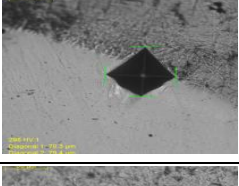
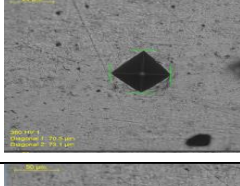
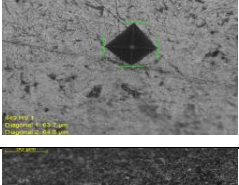
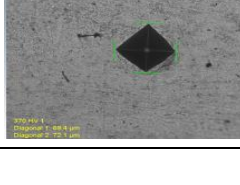
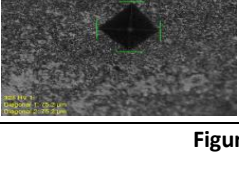
IMAGEN	DUREZA	IMAGEN	DUREZA
1. 	251	6. 	298
2. 	233	7. 	335
3. 	298	8. 	360
4. 	449	9. 	370
5. 	328		

Figura 49. Barrido de dureza de la junta en diferente zona de la ZAT

### Microdureza de probeta No. 3 de 3.5 mm sin precalentamiento

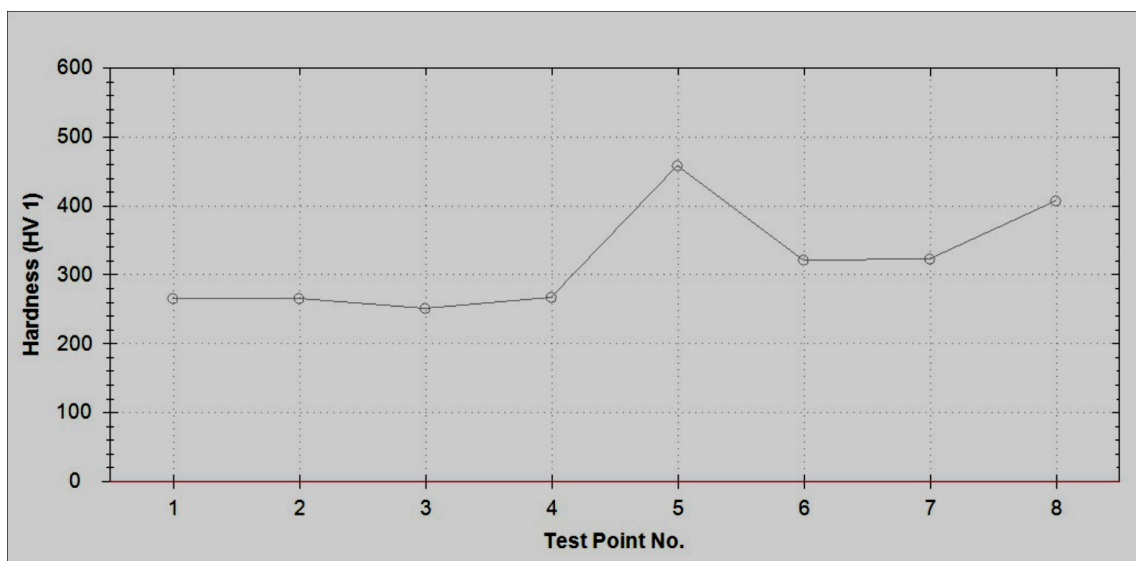


Figura 50. Barrido de microdureza de juntas de soldadura con electrodo E312-16 de probeta No. 3 de 3.5 mm sin precalentamiento

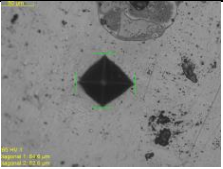
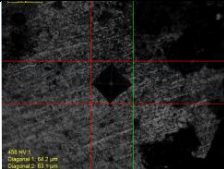
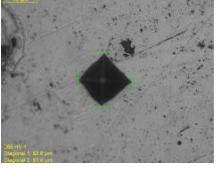
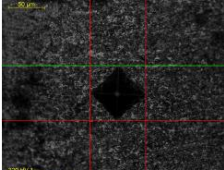
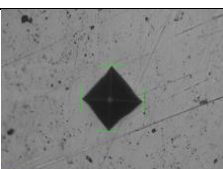
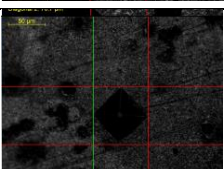
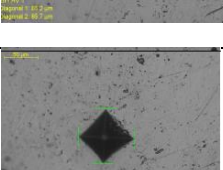
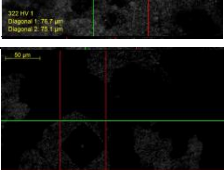
IMAGEN	DUREZA	IMAGEN	DUREZA
1. 	265	5. 	458
2. 	265	6. 	320
3. 	251	7. 	322
4. 	266	8. 	406

Figura 51. Barrido de dureza de la junta en diferente zona de la ZAT

### Microdureza de probeta No. 3 de 3.5 mm con precalentamiento

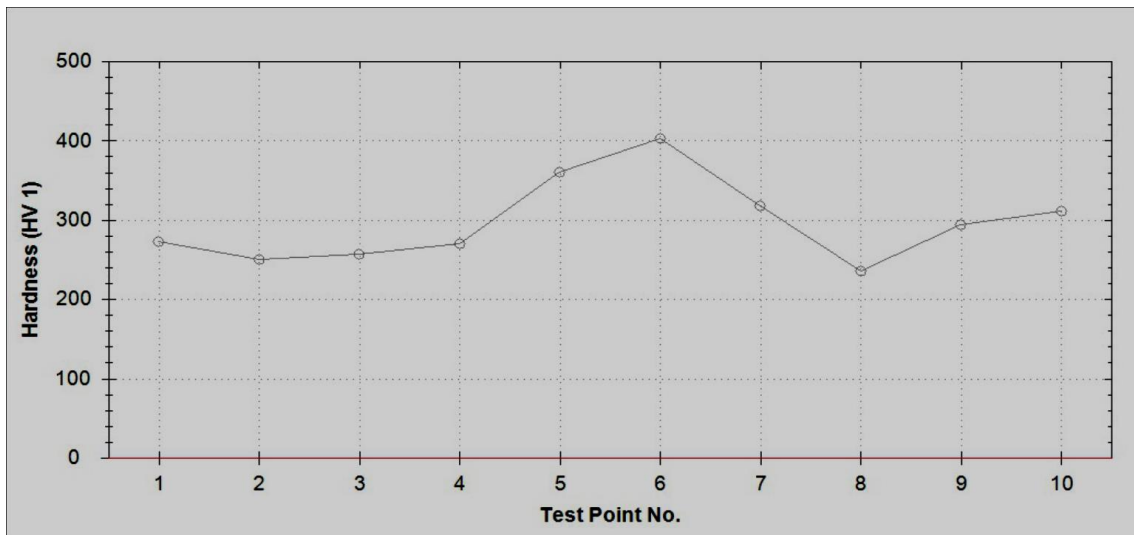


Figura 52. Barrido de microdureza de juntas de soldadura con electrodo E312-16 de probeta No. 3 de 3.5 mm con precalentamiento

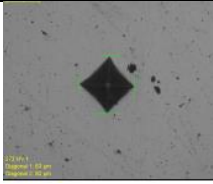
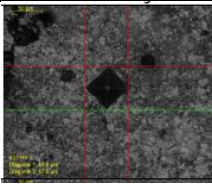
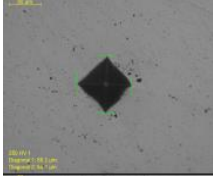
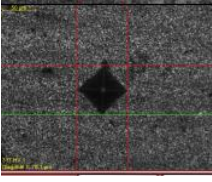
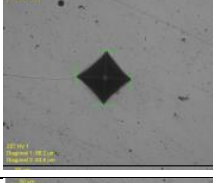
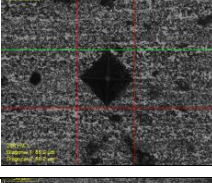
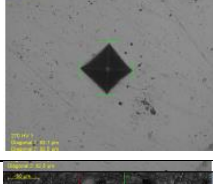
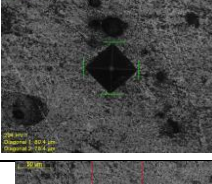
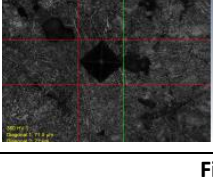
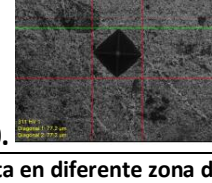
IMAGEN	DUREZA	IMAGEN	DUREZA
1. 	272	6. 	403
2. 	250	7. 	317
3. 	257	8. 	236
4. 	270	9. 	294
5. 	360	10. 	311

Figura 53. Barrido de dureza de la junta en diferente zona de la ZAT