



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIEROS MECÁNICOS**

**TEMA: “EVALUACIÓN DE LA SOLDADURA DE  
RECUBRIMIENTO CON TÉCNICA POR REVENIDO PARA UN  
ACERO DE BAJA ALEACIÓN Y ALTA RESISTENCIA CON UN  
SOLO TIPO DE ELECTRODO AUSTENÍTICO”**

**AUTORES: PRIETO AYO, CARLOS ANDRÉS  
CÓRDOVA AGUILAR, LENIN FABIÁN**

**DIRECTOR: ING. NARANJO GUATEMALA, CARLOS  
RODRIGO, MSC.**

**SANGOLQUÍ**

**2019**



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, *“EVALUACIÓN DE LA SOLDADURA DE RECUBRIMIENTO CON TÉCNICA POR REVENIDO PARA UN ACERO DE BAJA ALEACIÓN Y ALTA RESISTENCIA CON UN SOLO TIPO DE ELECTRODO AUSTENÍTICO”* fue realizado por los señores *Córdova Aguilar Lenin Fabián y Prieto Ayo Carlos Andrés* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 07 de enero de 2019

Ing. Carlos Rodrigo Naranjo Guatemala, MSc.

C. C: 1707087084



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, *Córdova Aguilar Lenin Fabián* y *Prieto Ayo Carlos Andrés*, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *Evaluación de la soldadura de recubrimiento con técnica por revenido para un acero de baja aleación y alta resistencia con un solo tipo de electrodo austenítico* es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 07 de enero de 2019

Lenin Fabián Córdova Aguilar

C.C.: 1719459826

Carlos Andrés Prieto Ayo

C.C.: 1718160243



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

*Nosotros, Córdova Aguilar Lenin Fabián y Prieto Ayo Carlos Andrés autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: Evaluación de la soldadura de recubrimiento con técnica por revenido para un acero de baja aleación y alta resistencia con un solo tipo de electrodo austenítico en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.*

Sangolquí, 07 de enero de 2019

Lenin Fabián Córdova Aguilar

C.C.: 1719459826

Carlos Andrés Prieto Ayo

C.C.: 1718160243

## **DEDICATORIA**

A mis padres Celio Córdova y Luz Aguilar quienes con su amor, esfuerzo y sacrificio me han permitido llegar a cumplir una meta más, gracias por inculcarme buenos valores y darme una excelente carrera para mi futuro.

A mis hermanas Carla y Vanessa por estar siempre a mi lado en los momentos difíciles y apoyarme siempre.

Lenin Fabián Córdova Aguilar

El proyecto es dedicado al esfuerzo y dedicación de mis padres Carlos Prieto y Fanny Ayo, que me han apoyado desde el principio de mis estudios, hasta culminar una gran e importante etapa en mi vida universitaria.

A mi hermana Michelle por estar presente y por el apoyo moral que me brindó durante todo este proceso.

A mi hijo Emilio que me dio el coraje y la fuerza para poder culminar mis estudios y obtener mi título de Ingeniero Mecánico.

Carlos Andrés Prieto Ayo

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a mis padres por haberme brindado todo su apoyo y ánimo en los momentos de crisis y felicidad y poder cumplir mi sueño de ser Ingeniero.

A mi Director de Tesis, Ingeniero Carlos Naranjo, mi más sincero agradecimiento por haberme confiado este proyecto, por su paciencia, su valiosa dirección y apoyo para lograr concluir la tesis.

A Válvulas del Pacífico por creer en Carlos en mí, y habernos dado su apoyo y facilidades para desarrollar la tesis y brindado la oportunidad de crecer profesionalmente.

A mis amigos, ya que con ellos he compartido incontables horas de trabajo y buenos ratos lo cual aprecio mucho.

Lenin Fabián Córdova Aguilar

Agradezco a Dios porque nada hubiera sido posible sin su bendición, a mis padres que han sido un pilar fundamental en mi educación y que con su ejemplo de trabajo diario me han demostrado que no existen limitaciones en la vida.

Mi agradecimiento a los docentes del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, en especial al director de tesis, Ingeniero Carlos Naranjo que, con su dirección, conocimiento y su buena predisposición ayudó a culminar con éxito el proyecto de titulación.

Agradezco a la empresa Válvulas del Pacífico y en especial al Ingeniero Jairo Barragán que estuvo siempre dispuesto a colaborarnos y apoyarnos.

A mis amigos y a todas las personas que de una u otra manera han apoyado a la realización del presente proyecto.

Carlos Andrés Prieto Ayo

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<b>i</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD</b> .....	<b>ii</b>
<b>AUTORIZACIÓN</b> .....	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>x</b>
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b> .....	<b>xii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiv</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Definición del problema .....	2
1.3. Justificación e importancia .....	4
1.4. Área de influencia .....	5
1.5. Objetivos .....	6
1.5.1. Objetivo general .....	6
1.5.2. Objetivos específicos .....	6
1.6. Alcance del proyecto .....	7
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>8</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>8</b>

2.1. Metalurgia de la soldadura.....	8
2.1.1. Zona afectada por el calor.....	9
2.2. Técnica de soldadura por revenido.....	10
2.3. Soldabilidad.....	11
2.4. Modelo de solidificación con segregación.....	13
2.5. Especificaciones y Códigos.....	17
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>18</b>
<b>DISEÑO, EJECUCIÓN Y ADQUISICIÓN DE PARÁMETROS DEL RECUBRIMIENTO DE SOLDADURA.....</b>	<b>18</b>
3.1. Materiales.....	18
3.2. Diseño de los cupones de prueba.....	19
3.3. Diseño del WPS.....	20
3.4. Diseño del sistema de adquisición de datos.....	20
3.5. Ejecución y adquisición de datos de las variables esenciales de soldadura.....	21
3.6. Cálculo del aporte térmico.....	22
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>24</b>
<b>ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LA SOLDADURA DE RECUBRIMIENTO.....</b>	<b>24</b>
4.1. Inspección Visual.....	24
4.2. Ensayo de tintas penetrantes.....	28
4.3. Ensayo de Macrografía.....	31
4.3.1. Ensayo de Macrografía lateral.....	31
4.3.2. Ensayo de Macrografía transversal.....	33
4.2. Ensayo de Micrografía.....	36
4.4. Ensayo de Dureza.....	42

4.5. Ensayo de Microdureza Vickers y Dureza Rockwell C .....	43
4.6. Ensayo de doblado guiado .....	48
4.7. Composición química con Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) .....	53
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>55</b>
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>55</b>
5.1. Análisis según el ensayo de tintas penetrantes .....	55
5.2. Análisis de la macrografía .....	55
5.3. Análisis de la micrografía .....	56
5.3.1. Composición de la microestructura según el Diagrama de Schaeffler .....	56
5.3.2. Medición Experimental de la capa intermetálica .....	58
5.4. Análisis del ensayo de dureza .....	61
5.5. Análisis del ensayo de microdureza.....	61
5.6. Análisis del ensayo de doblado.....	63
5.7. Análisis de la capa intermetálica aplicando el modelo de segregación .....	63
5.7.1. Análisis del cromo.....	65
5.7.2. Análisis del níquel.....	66
5.7.3. Determinación del error porcentual .....	67
<b>CAPÍTULO VI .....</b>	<b>68</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>68</b>
6.1. Conclusiones.....	68
6.2. Recomendaciones .....	70
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>71</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Composición química promedio del metal base y metal de aporte</i> .....	18
<b>Tabla 2.</b> <i>Propiedades mecánicas del metal de aporte</i> .....	18
<b>Tabla 3.</b> <i>Cordones de la primera capa depositada (capa base) del cupón N°1</i> .....	23
<b>Tabla 4.</b> <i>Cordones de la segunda capa depositada (1era capa de revenido) del cupón N°1</i> .....	23
<b>Tabla 5.</b> <i>Cordones de la tercera capa depositada (2da capa de revenido) del cupón N°1</i> .....	23
<b>Tabla 6.</b> <i>Ancho y altura del refuerzo del recubrimiento</i> .....	24
<b>Tabla 7.</b> <i>Penetración de la soldadura de recubrimiento</i> .....	32
<b>Tabla 8.</b> <i>Espesor de la Zona “B”</i> .....	35
<b>Tabla 9.</b> <i>Dureza Rockwell C en la zona de fusión, zona afectada por el calor y material base</i> ...	42
<b>Tabla 10.</b> <i>Microdureza Vickers (HV) y Dureza Rockwell C (HRC) de la probeta 1D</i> .....	43
<b>Tabla 11.</b> <i>Composición química (Cromo, Manganeso, Hierro, Níquel) de la probeta 1D</i> .....	53
<b>Tabla 12.</b> <i>Cromo y Níquel equivalente del Material de aporte y Material base</i> .....	57
<b>Tabla 13.</b> <i>Temperatura de precalentamiento y espesor de la capa intermetálica de las probetas</i> .....	60
<b>Tabla 14.</b> <i>Promedio de Microdureza Vickers (HV) y Dureza Rockwell C (HRC) en la interfaz de las probetas</i> .....	62
<b>Tabla 15.</b> <i>Composición de Cromo y Níquel en la probeta 1D</i> .....	64
<b>Tabla 16.</b> <i>Ajuste del modelo de segregación al Cromo en la probeta 1D</i> .....	65
<b>Tabla 17.</b> <i>Ajuste del modelo de segregación al Níquel en la probeta 1D</i> .....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Interacción del material de aporte con el material base.....	8
<b>Figura 2.</b> Fases de transición de la ZAC en la soldadura.....	9
<b>Figura 3.</b> Soldadura de revenido .....	11
<b>Figura 4.</b> Distribución de soluto en el Líquido y en Solido .....	15
<b>Figura 5.</b> Determinación de áreas en la distribución de soluto en el Líquido y en Solido.....	15
<b>Figura 6.</b> Vista frontal del cupón de prueba.....	19
<b>Figura 7.</b> Sistema de conexión del adquisidor de datos .....	21
<b>Figura 8.</b> Adquisidor de datos (multímetro y amperímetro) .....	22
<b>Figura 9.</b> Dimensiones del recubrimiento .....	24
<b>Figura 10.</b> Cupón N° 1 (Temperatura precalentamiento: Temperatura ambiente 28 °C) .....	25
<b>Figura 11.</b> Cupón N° 2 (Temperatura precalentamiento: 100 °C) .....	25
<b>Figura 12.</b> Cupón N° 3 (Temperatura precalentamiento: 150 °C) .....	26
<b>Figura 13.</b> Cupón N° 4 (Temperatura de precalentamiento: 200 °C) .....	26
<b>Figura 14.</b> Cupón N°5 (Temperatura de precalentamiento: 300 °C) .....	27
<b>Figura 15.</b> Obtención de probetas para ensayos.....	27
<b>Figura 16.</b> Ensayo de tintas penetrantes sobre el recubrimiento de los cupones N° 1, 2, 3, 4 y 5 .....	28
<b>Figura 17.</b> Ensayo de tintas penetrantes en el cupón N° 1 .....	28
<b>Figura 18.</b> Ensayo de tintas penetrantes en el cupón N° 2.....	29
<b>Figura 19.</b> Ensayo de tintas penetrantes cupón N° 3.....	29
<b>Figura 20.</b> Ensayo de tintas penetrantes cupón N° 4.....	30
<b>Figura 21.</b> Ensayo de tintas penetrantes cupón N° 5.....	30
<b>Figura 22.</b> Preparación del ácido pícrico.....	31
<b>Figura 23.</b> Macrografía lateral del cupón N° 1 (1D).....	32
<b>Figura 24.</b> Macrografía lateral del cupón N° 2 (2D).....	32
<b>Figura 25.</b> Macrografía lateral del cupón N° 3 (3D).....	32
<b>Figura 26.</b> Macrografía lateral del cupón N° 4 (4D).....	33
<b>Figura 27.</b> Macrografía lateral del cupón N° 5 (5D).....	33

<b>Figura 28.</b> Ataque y Macrografía transversal de las probetas .....	33
<b>Figura 29.</b> Zonas mostradas en la macrografía transversal .....	34
<b>Figura 30.</b> Esquema de las zonas de interés .....	35
<b>Figura 31.</b> Espesor de la Zona “B” .....	35
<b>Figura 32.</b> Micrografía de la interfase entre el material de aporte y la zona de fusión de la probeta 1D (200X).....	36
<b>Figura 33.</b> Micrografía de la zona de fusión de la probeta 1D (500X) .....	37
<b>Figura 34.</b> Micrografía de la interfase entre el material de aporte y la zona de fusión de la probeta 2D (200X).....	37
<b>Figura 35.</b> Micrografía de la zona de fusión de la probeta 2D (500X) .....	38
<b>Figura 36.</b> Micrografía de la interfase entre el metal de aporte y la zona de fusión de la probeta 3D (200X).....	38
<b>Figura 37.</b> Micrografía de la zona de fusión de la probeta 3D (500X) .....	39
<b>Figura 38.</b> Micrografía de la interfase entre el metal de aporte y la zona de fusión de la probeta 4D (200X).....	39
<b>Figura 39.</b> Micrografía de la zona de fusión de la probeta 4D (500X) .....	40
<b>Figura 40.</b> Micrografía de la interfase entre el material de aporte y la zona de fusión de la probeta 5D (200X).....	40
<b>Figura 41.</b> Micrografía de la zona de fusión de la probeta 5D (500X) .....	41
<b>Figura 42.</b> Puntos de medición de dureza en las probetas.....	42
<b>Figura 43.</b> Perfil de microdureza Vickers de la probeta 1D.....	44
<b>Figura 44.</b> Perfil de dureza Rockwell C de la probeta 1D.....	44
<b>Figura 45.</b> Perfil de Microdureza Vickers de las probetas 1D, 2D, 3D, 4D y 5D.....	46
<b>Figura 46.</b> Perfil de Dureza Rockwell C de las probetas 1D, 2D, 3D, 4D y 5D .....	47
<b>Figura 47.</b> Probetas dobladas del cupón N° 1 (Temperatura de precalentamiento: 28°C) .....	48
<b>Figura 48.</b> Probetas dobladas del cupón N° 2 (Temperatura de precalentamiento: 100°C) .....	49
<b>Figura 49.</b> Probetas dobladas del cupón N° 3 (Temperatura de precalentamiento: 150°C) .....	50
<b>Figura 50.</b> Probetas dobladas del cupón N° 4 (Temperatura de precalentamiento de 200°C).....	51
<b>Figura 51.</b> Probetas dobladas del cupón N° 5 (Temperatura de precalentamiento de 300°C).....	52
<b>Figura 52.</b> Composición química de la probeta 1D.....	54

<b>Figura 53.</b> Diagrama de Schaeffler aplicado al problema.....	57
<b>Figura 54.</b> Medición de la capa intermetálica de la probeta 1D.....	58
<b>Figura 55.</b> Medición de la capa intermetálica de la probeta 2D.....	58
<b>Figura 56.</b> Medición de la capa intermetálica de la probeta 3D.....	59
<b>Figura 57.</b> Medición de la capa intermetálica de la probeta 4D.....	59
<b>Figura 58.</b> Medición de la capa intermetálica de la probeta 5D.....	60
<b>Figura 59.</b> Espesor de la capa intermetálica vs temperatura de precalentamiento.....	61
<b>Figura 60.</b> Curvas de templabilidad para varios aceros con el mismo contenido en carbono (0.40 por ciento en peso) y distinto contenido en elementos aleantes.....	62
<b>Figura 61.</b> Puntos escaneados mediante la técnica SEM-EDS .....	64
<b>Figura 62.</b> Grafica 1-Cs/Co en función de la distancia x en el Cromo .....	65
<b>Figura 63.</b> Grafica 1-Cs/Co en función de la distancia x en el Níquel.....	66

## ÍNDICE DE ANEXOS

- **Anexo 1.** *Parámetros de soldadura*
- **Anexo 2.** *Calor aportado*
- **Anexo 3.** *Ensayos de Microdureza*
- **Anexo 4.** *Composición química de las probetas 2D, 3D, 4D Y 5D*

## RESUMEN

El proceso de recubrimiento mediante soldadura para mejorar la resistencia a la corrosión sobre aceros HSLA son de vital importancia en la industria petrolera y requieren tratamiento térmico posterior a la soldadura. En el siguiente trabajo se estudió los cambios metalográficos que se generaron al realizar un recubrimiento de un acero AISI 4140 (HSLA) con un electrodo de acero inoxidable del tipo austenítico E316L-16 por medio de soldadura. Se analizó la afectación metalográfica en función de la temperatura de precalentamiento, para lo cual se ejecutaron cinco cupones con soldadura de recubrimiento a diferentes temperaturas de precalentamiento, además, se utilizó la técnica de soldadura por revenido con el fin de evitar el postcalentamiento, para esto se controlaron los parámetros de soldeo como: el voltaje, amperaje y velocidad de avance como la técnica lo requiere. Basándose en el Código ASME de Recipientes a Presión se realizaron ensayos de doblado y tintas penetrantes, adicionalmente se realizaron ensayos de dureza, microdureza y microscopía que permitieron determinar las propiedades mecánicas y estructuras metalográficas de la ZAC y la zona de fusión. Por último, se aplicó el modelo de solidificación por segregación de Pohl en la zona de fusión para obtener el espesor efectivo de la capa intermetálica con un error promedio del 10%, se recolectaron los datos empleando la técnica SEM-EDS, obteniendo la concentración de Cr, Ni, Mn y Fe a diferentes distancias. Con los datos obtenidos se logró verificar la presencia de una capa intermetálica con una estructura martensítica y carburos de cromo, la cual posee una elevada dureza y es el lugar en donde se inició los fisuramientos en los ensayos de doblado, además existe relación directamente proporcional entre la temperatura de precalentamiento y el espesor de la capa intermetálica.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **SOLDADURA POR REVENIDO**
- **SOLIDIFICACIÓN POR SEGREGACIÓN**
- **SOLDADURA DE RECUBRIMIENTO**

## **ABSTRACT**

The overlay process on HSLA steels to improve the corrosion resistance is very important in the petroleum industry, it usually requires post weld heat treatment. This project presents the metallographic changes generated when an overlay of an austenitic stainless steel electrode type E316L-16 is applied on AISI 4140 steel (HSLA). The metallographic affectation was studied as a function of the preheating temperature, for which, five coupons were overlaid with different preheating temperatures, in addition, a temper bead welding was used to avoid post weld heat treatment. The welding parameters like the voltage, amperage and welding speed were controlled as the technique requires. Bending tests and liquid penetrant test were carried out according to ASME BPVC Code. In addition, hardness, microhardness and microscopy tests were carried out to determine the changes in mechanical properties and metallographic structures of the HAZ and fusion zone. Finally, the Pohl's solidification model by segregation was applied with a scanning electron microscope in the fusion zone using the SEM-EDS technique, obtaining the concentration of Cr, Ni, Mn and Fe at different distances to determinate the effective thickness of the boundary layer with an average error of 10%. The results obtained verify the presence of a boundary layer with a martensitic structure and chromium carbides, which has a high hardness and is the place where cracking started in the bending tests, finally, it was found that there is a directly proportional relationship between the preheating temperature and the thickness of the boundary layer.

### **KEYWORDS:**

- **WELD BY TEMPERING**
- **SOLIDIFICATION BY SEGREGATION**
- **OVERLAY**

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

El overlay es una técnica que realiza un recubrimiento de soldadura para proteger el material base del desgaste de los ambientes corrosivos. La capa de recubrimiento de soldadura se agrega como un medio adecuado para aumentar la resistencia a la corrosión o las propiedades mecánicas del material base.

La soldadura por arco eléctrico implica fusión y solidificación del material base, por tanto puede causar cambios significativos en su microestructura y composición química. Tales cambios pueden afectar negativamente a las propiedades mecánicas y químicas del material (Cieslak, M., & Ritter, M., 1982).

La exposición de aceros inoxidable de tipo austenítico a altas temperaturas [450 °C – 900 °C] por un elevado periodo de tiempo durante la soldadura, causa su descomposición, que resulta en la formación de fases intermetálicas, así como un alto contenido de carbono en el metal base produce precipitados de carbono, que afectan significativamente las propiedades mecánicas de la junta soldada. Las principales fases observadas en el acero inoxidable tipo 316 son  $M_{23}C_6$ ,  $M_6C$ ,  $M_7C_3$  con estructuras cristalinas como FCC tetragonal y BCC hexagonal (Cieslak, M., & Ritter, M., 1982).

Los aceros inoxidable austeníticos de la serie AISI 300 tienen una estructura dúplex, es decir, la matriz austenítica tiene algunos fragmentos de ferrita. La mayoría de los aceros de la serie 300 tiene ferrita del 5% al 10% a temperatura ambiente (J. I. Akhter, 1987).

La austenita en el acero inoxidable lo hace susceptible al agrietamiento en caliente y la ferrita tiene beneficios como el efecto en la reducción del agrietamiento en caliente. A temperaturas más altas la ferrita se descompone en fases intermetálicas que afectan las propiedades mecánicas de la junta soldada (Cieslak, M., & Ritter, M., 1982).

## **1.2. Definición del problema**

El acero al carbono de alta resistencia se lo elige comúnmente para la mayoría de aplicaciones en la industria química, petrolera y de gas por su disponibilidad y bajo precio, sin embargo, no es un material apropiado para aplicaciones que requieran resistencia a altas temperaturas y/o a la corrosión en ambientes agresivos tales como exposiciones al azufre, sales y ácidos. Por el contrario, los aceros inoxidables tienen un buen desempeño en estas condiciones agresivas ya que es un material con alta resistencia a la corrosión con buenas características para la fabricación y diseño, además, tienen una larga vida útil y requieren un mínimo de mantenimiento (Aplica-inox, 2011)

Una práctica común en la industria de petróleo es recubrir con una capa de acero inoxidable partes de piezas fabricadas con aceros de baja aleación y alta resistencia; y, de esta manera aumentar la vida útil de los equipos que se encuentran en servicio de extracción de petróleo. La deposición de un acero inoxidable austenítico como metal de aporte sobre un acero de alta resistencia, da lugar a la dilución del metal de aporte con el metal base por el fenómeno de la fusión local. En condiciones normales de desplazamiento, puede ocurrir una dilución de hasta 40%, dependiendo de la técnica de soldadura utilizada. (Ikawa, H., & Shin, S., 1972).

Otro efecto observado es la formación de una región intermedia distinta en la interfaz entre el metal de soldadura y la zona afectada térmicamente por el calor. La formación de esta región se ha atribuido generalmente a la difusión de los elementos de aleación en el sistema formado entre el

metal base y el metal de soldadura. En general, se acepta que esta zona intermedia es de estructura martensítica y que su composición química varía entre la composición química del metal base y metal de aporte (Seferian, D., 1962).

Otros efectos son: el crecimiento excesivo de grano y formación de martensita con un alto nivel de dureza en la zona afectada por el calor, que cuando se asocia con la presencia de hidrógeno y las tensiones residuales a la tracción pueden causar agrietamiento en frío.

Los aceros C-Mn y aceros de alta resistencia baja aleación, tales como el AISI 4130, 4140, 4340 y 1045, generalmente tienen un contenido de carbono de alrededor de 0.4% y valores de carbono equivalente ( $C_{eq}$ ) entre 0.6 y 0.9, que son altamente susceptibles al agrietamiento (API, 2004), además, requieren cuidado en la elección del relleno y de las variables de soldadura. El uso de precalentamiento y control de temperatura entre pases para la reparación que se debe realizar en esta gama de aceros se encuentra entre los 200 y 300 °C, y además se debe controlar que la velocidad de enfriamiento sea lo suficientemente lenta para evitar el agrietamiento en frío inducido por el hidrógeno.

El postcalentamiento se lo realiza a temperaturas entre 500°C y 600°C aproximadamente y se debe llevar a cabo inmediatamente después de terminada la soldadura para reducir los altos niveles de dureza de la zona afectada por el calor, aliviar las tensiones residuales de la soldadura y eliminar el hidrógeno presente en el metal de soldadura y en la zona afectada por el calor. Aunque el postcalentamiento puede contribuir con beneficios a la unión soldada, tiene inconvenientes como: altos costos e inaccesibilidad para reparaciones en campo, por lo que se busca implementar soluciones como aplicar la técnica de soldadura por revenido, consiguiendo que ciertos

procedimientos de soldadura ya no requieran postcalentamiento (Naranjo, C., Ayala D., & Díaz C., 2017).

En la mayoría de aplicaciones de la industria petrolera en la soldadura de recubrimiento se utilizan al menos 2 tipos de electrodos inoxidables, generalmente para la capa base se utiliza el electrodo E 309 y para las capas de revenido se emplea el electrodo E 312 o E 316 generando costos elevados en su fabricación, por lo que se busca utilizar un solo tipo de electrodo como el E 312 o E 316 para la fabricación total del recubrimiento optimizando recursos.

### **1.3. Justificación e importancia**

Debido a su elevada resistencia a la corrosión, los recubrimientos de acero inoxidable sobre el acero al carbono se utilizan ampliamente en diversas piezas y equipos en la industria química, petroquímica, petróleo y gas. En muchos casos, estos materiales, por estar sometidos a severas condiciones de servicio en ambientes hostiles, sufren desgastes e incluso fallos de los equipos, por lo que se necesita frecuentemente reparación y mantenimiento con metal de soldadura de acero inoxidable (Akhter, J., & Shoaib, K., 1987).

Un Riser es un tubo que conecta la plataforma de perforación con el lecho del pozo, el cual se utiliza para circular el lodo de perforación hacia el pozo y así evitar la comunicación del fluido de control con el medio. La soldadura de recubrimiento en los Riser de acero AISI 4130 con acero inoxidable es muy común en la industria del petróleo. Los Risers se acoplan unos a otros, por medio de cajas y pernos ubicados en sus extremos. Este acoplamiento o conexión debe ser eficiente y seguro, además debe prevenir la posibilidad de corrosión. Por lo tanto, esta región del Riser recibe un recubrimiento de acero inoxidable, siendo esta la forma de asegurar la no ocurrencia de posibles fugas en su utilización debido a los efectos de la corrosión. El propósito es revestir de soldadura la

superficie interior del tubo de Riser, más específicamente su área de sellado. Este tipo de recubrimiento inoxidable se caracteriza por presentar propiedades químicas, físicas y mecánicas que aumentan la vida útil del Riser en servicio (Gomez, J., 2010).

Los cordones de soldadura por revenido se los coloca en un lugar específico formando una capa de soldadura con el propósito de afectar las propiedades metalúrgicas de la zona afectada térmicamente de un material previamente soldado, siendo esta una técnica que se puede aplicar en donde es ineficiente o inaccesible ejecutar un postcalentamiento a la soldadura.

El presente proyecto pretende generar un mayor conocimiento y mejorar la técnica en el campo de la soldadura de recubrimiento con un solo tipo de electrodo de acero inoxidable austenítico sobre un acero de alta resistencia baja aleación con técnica por revenido, estudiando los cambios producidos por la soldadura como la microestructura, ductilidad, dureza, y propiedades de la zona de fusión formada entre el metal base y metal de aporte en función de la variación de la temperatura de precalentamiento.

Adicionalmente para la industria petrolera evitar daños al medio ambiente debido a fugas o derrames es de vital importancia, por ese motivo en la fabricación del recubrimiento de soldadura se busca obtener una junta que proporcione la mayor estanqueidad posible y sin defectos al momento de entrar en operación.

#### **1.4. Área de influencia**

El presente proyecto por elaborarse tiene un área de influencia del tipo nacional, orientado principalmente a la industria dedicada a la construcción y mantenimiento de equipos en facilidades petroleras, donde se concentran una gran parte de empresas encargadas de la extracción de petróleo.

Las mismas que ante todo deben prevenir la corrosión de elementos y equipos mecánicos sometidos a las condiciones de servicio en ambientes agresivos como es la explotación de petróleo y garantizar la no ocurrencia de fugas que puedan comprometer al personal, maquinaria o al medio ambiente.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo general**

- Evaluar los cambios metalúrgicos de la soldadura de recubrimiento sobre un acero de baja aleación y alta resistencia utilizando la técnica de soldadura por revenido con un solo tipo de electrodo de acero inoxidable

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Elaborar los cupones de prueba mediante un procedimiento de soldadura que cumpla los requisitos del Código ASME BPVC sección IX aplicando la soldadura de recubrimiento con técnica por revenido y establecer el procedimiento para medir las variables esenciales de manera continua.
- Analizar las características metalográficas de la zona de fusión formada entre el metal base y metal de aporte con la técnica de soldadura por revenido con un solo tipo electrodo de acero inoxidable austenítico en función de la variación de la temperatura de precalentamiento
- Aplicar el modelo de segregación en la soldadura de recubrimiento con técnica por revenido para analizar las propiedades químicas y metalográficas en la zona de fusión formada entre el metal de aporte y metal base

## 1.6. Alcance del proyecto

Una vez definido el problema completamente y justificado la realización del proyecto se inicia con la obtención de información de los conceptos de metalografías, la zona afectada térmicamente, soldadura con técnica por revenido, y toda la información necesaria que permita analizar las características metalográficas de la zona de fusión.

Los entregables del proyecto se detallan a continuación:

- Los procedimientos para realizar las pruebas a los cupones de soldadura tomando como referencia a la normativa ASME BPVC Sección IX.
- Resultados y análisis de los siguientes ensayos metalográficos:
  - Macrografía
  - Micrografía
  - Dureza
  - Microdureza
  - Ensayo de doblado y tintas penetrantes
  - Determinación del espesor de la capa intermetálica que se encuentra en la zona de fusión formada entre el metal de aporte y metal base aplicando el modelo de segregación

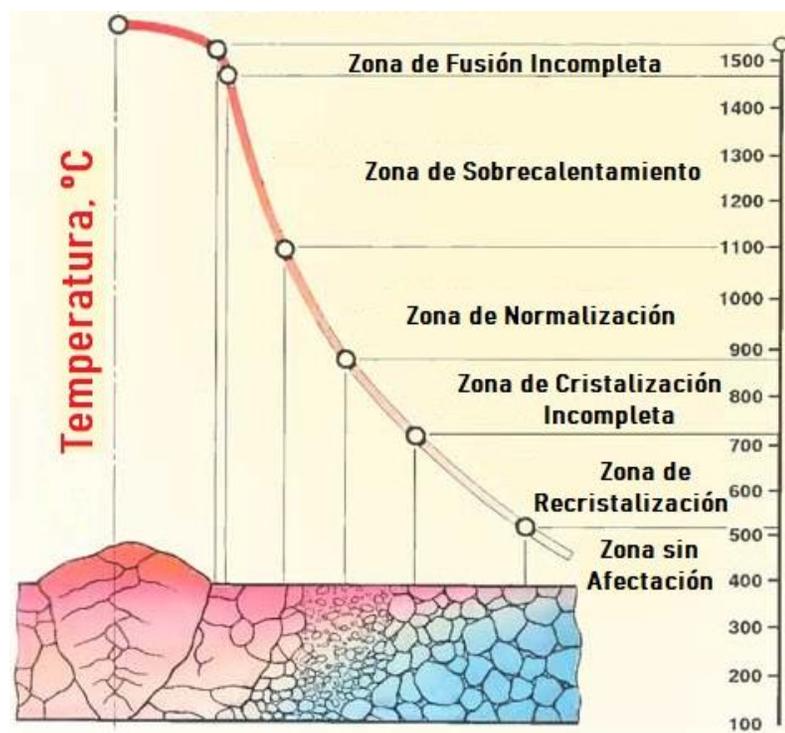
Por lo tanto, al finalizar el proyecto se obtendrá las características metalúrgicas de la zona de fusión formada entre el metal de aporte y metal base debido a la soldadura de recubrimiento con técnica por revenido, y como varían éstas en función de la temperatura de precalentamiento.



### 2.1.1. Zona afectada por el calor

Constituye una región conformada por una parte del metal base adyacente a la soldadura, dentro de ella se producen las transformaciones tanto de fase como estructurales, esto se debe al efecto térmico del calor aportado durante el proceso de soldadura. Generalmente dicho fenómeno tiene como resultado una microestructura secundaria y un tamaño de grano diferente del metal base en la zona afectada por el calor (ZAC).

Como se puede observar en la Figura 2, se pueden distinguir 6 zonas marcadas:



**Figura 2.** Fases de transición de la ZAC en la soldadura  
Fuente: (Welding Technology Institute of Australia, 2016)

La zona de fusión incompleta es transicional del metal de soldadura al metal base. En esta área, se produce la fusión del metal de aporte con el metal base, por lo tanto, la calidad de la unión soldada depende de las propiedades de esta área.

La zona de sobrecalentamiento aproximadamente a una temperatura de 1100 - 1500 °C, es una zona de metal base significativamente sobrecalentado con una estructura de grano grueso. Esta sección se caracteriza por una disminución en las propiedades de plasticidad y la resistencia al impacto.

La zona de normalización aproximadamente a una temperatura de 930 - 1100 ° C, es un metal base calentado a esa temperatura durante un corto tiempo y en el proceso de recristalización se forma una estructura metálica de grano fino. Las propiedades mecánicas del sitio aumentan en comparación con el estado antes de la soldadura.

La zona de cristalización incompleta aproximadamente a una temperatura de 720 - 850 ° C es el área que se caracteriza por un cambio incompleto en la estructura del metal. Alrededor de los granos de ferrita en esta área hay pequeños granos de ferrita y perlita, formados durante el proceso de recristalización.

El sitio de recristalización aproximadamente a una temperatura de 550 - 720 ° C, en ésta área se puede observar la restauración de los granos destruidos durante la deformación.

La última zona se encuentra en el rango de temperaturas de 200 a 550 ° C, en éste sitio no sufre cambios estructurales, pero es característico que reduzca las deformaciones plásticas (Osvarke.net, 2017).

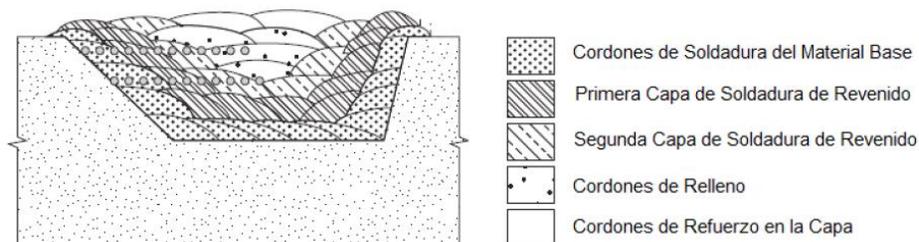
## **2.2. Técnica de soldadura por revenido**

La implementación de la técnica de soldadura de revenido fue desarrollada para evitar el agrietamiento producido por el recalentamiento del material. Lo que busca la técnica es aprovechar el calor aportado entre pases sucesivos para obtener una estructura metalográfica adecuada en la

ZAC, el pase de revenido, se puede definir como un cordón de soldadura que es traslapado a un pase anterior con el fin de afectar la ZAC del cordón previamente depositado (Pilgarín E. H., 2009).

Para poder aplicar la técnica se requiere tener en cuentas algunos aspectos como:

- Control adecuado del aporte térmico (voltaje, amperaje, velocidad de avance)
- Correcto traslape entre cordones
- Secuencia y depósito de cordones adecuada como se muestra en la Figura 3



**Figura 3.** Soldadura de revenido  
Fuente: (ASME BPVC Sección IX, 2013)

### 2.3. Soldabilidad

Es la característica que le permite determinar la capacidad de varios metales bajo la influencia de altas temperaturas al momento de ser soldados, obteniendo un comportamiento satisfactorio en condiciones mecánicas y físicas. Algunos de los factores que intervienen en la soldabilidad de los aceros son:

- Composición química
- Espesor
- Grado de restricción
- Nivel de hidrogeno presente durante la operación

En los aceros HSLA (High-Strength Low-Alloy) la alta resistencia de los aceros de baja aleación es el producto de un tratamiento térmico que trata de eliminar la región austenítica seguida de un revenido a baja temperatura. Básicamente estos son principalmente aceros templados y revenidos.

Debido a los fenómenos presentes durante el proceso de soldadura, dichos aceros son propensos a ablandarse (revenido en el acero) en la zona afectada por el calor. Por lo tanto, dicha región mostrará una disminución en la dureza y resistencia, consecuentemente producirá un enlace débil afectando principalmente a las propiedades de ductilidad y fatiga (Mohandas et al, 1999).

El término acero inoxidable se utiliza para cubrir una amplia variedad de grados y composiciones. En general, un acero se puede considerar inoxidable cuando posee en su composición química un porcentaje superior al 13% de Cromo. Los electrodos austeníticos tienen componentes estabilizadores de la austenita como el níquel y el manganeso. Estos aceros no poseen propiedades magnéticas y generalmente tienen baja resistencia mecánica (comparada con otros inoxidables), una elevada ductilidad, excelente tenacidad y altas velocidades de endurecimiento por acritud. Estas propiedades, combinadas con la sencillez de su fabricación hacen de estos aceros los más comunes de los aceros inoxidables. Para resistencia a elevadas temperaturas se utilizan las aleaciones con alto contenido en cromo y para ambientes corrosivos de compuestos inorgánicos, las de alto contenido en níquel. Estos aceros pueden quedar expuestos a corrosión intergranular (sensitización) por efectos de la soldadura o por exposición a elevadas temperaturas por largos períodos de tiempo, ya que con este fenómeno se produce una precipitación de carburos de cromo en los límites de grano, empobreciéndose por tanto el acero en este elemento en las proximidades de dichos carburos. Este fenómeno puede prevenirse mediante el uso de tipos de aceros de bajo

contenido en carbono ( $\%C < 0,03$ ) o tipos con elementos estabilizadores, como AISI 321 y 347, con titanio y niobio, respectivamente (Lázaro, 2012).

#### 2.4. Modelo de solidificación con segregación

El modelo de segregación supone que la solidificación puede ocurrir sin difusión sólida, difusión líquida limitada y sin convección. Cuando lo hace, se forma un perfil transitorio de solutos en la capa límite que es la primera en depositarse (Pohl et al. 1981). Y queda expresada como la Ecuación 1:

$$C_s = C_o \left[ 1 - (1 - k) \exp\left(-\frac{kRx}{D_L}\right) \right] \quad (1)$$

donde  $C_s$  es el contenido de soluto en sólido,  $C_o$  es el contenido de soluto inicial en líquido,  $k = \frac{C_s}{C_o} < 1$  es la proporción de equilibrio de partición de soluto  $R$  es la velocidad de solidificación y  $D_L$  es el coeficiente de difusión en el líquido. La ecuación está asociada con algunas simplificaciones adicionales; estos pueden ser establecidos de la siguiente manera:

1. El caso tridimensional real es reemplazado por una aproximación unidimensional.
2. No se produce mezcla en la región límite.
3. No se consideran influencias de otros elementos que forman parte del sistema multicomponente.

Para la demostración del modelo matemático empleado, se parte de la suposición que la tasa de aproximación de  $C_s$  (concentración de soluto disponible en función de la distancia) a  $C_o$  (concentración de soluto antes de la solidificación) con respecto a  $x$  (distancia medida desde el inicio de la capa inter metálica) es proporcional a  $(C_o - C_s)$ .

$$\frac{d(C_o - C_s)}{dx} = -\alpha (C_o - C_s)$$

$$\int \frac{d(C_o - C_s)}{(C_o - C_s)} = - \int \alpha dx$$

$$\ln(C_o - C_s) = -\alpha x + \ln(A)$$

$$\ln\left(\frac{C_o - C_s}{A}\right) = -\alpha x$$

$$\frac{C_o - C_s}{A} = e^{-\alpha x}$$

$$C_s = C_o - A e^{-\alpha x} \quad (2)$$

La curva de concentración de soluto en el sólido (Ecuación 2) debe satisfacer las siguientes condiciones:

1. Al principio debe iniciar con una con una concentración proporcional a  $C_o$ , es decir cuando  $x = 0$  entonces  $C_s = k C_o$ , sabiendo que  $k < 1$ .
2. Debe tender asintóticamente a  $C_o$  conforme vaya aumentando la distancia.
3. La función debe ser continua en cualquier punto.
4. Debe mantenerse el denominado “Conservación del Soluta”

Aplicando la **condición 1** en la Ecuación 2:

$$k C_o = C_o - A$$

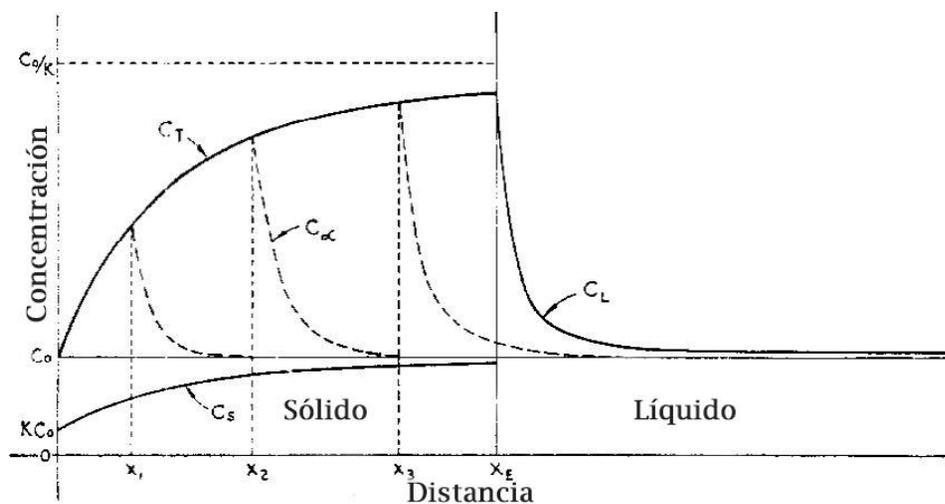
$$A = C_o (1 - k)$$

$$C_s = C_o - C_o (1 - k) e^{-\alpha x}$$

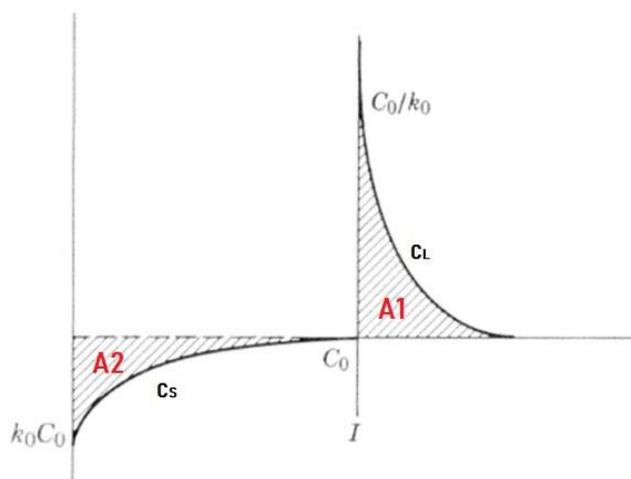
$$C_s = C_o[1 - (1 - k) e^{-\alpha x}] \quad (3)$$

Como se puede observar la Ecuación 3 satisface las **condiciones 2 y 3**.

Para satisfacer la **condición 4** el área A1 debe ser igual al área A2



**Figura 4.** Distribución de soluto en el Líquido y en Sólido



**Figura 5.** Determinación de áreas en la distribución de soluto en el Líquido y en Sólido

Se conoce que la curva de concentración de soluto en el líquido está dada por:

$$C_L = C_o \left[ 1 + \frac{1-k}{k} e^{-\frac{R}{D_L} x} \right] \quad (4)$$

Cálculo del área A1:

$$A1 = - \int_{C_o}^{C_o/k} \frac{D_L}{R} \ln \left[ \frac{k}{1-k} \left( \frac{C_L}{C_o} - 1 \right) \right] d(C_L)$$

$$A1 = - \frac{D_L}{R} C_o \left( \frac{C_L}{C_o} - 1 \right) \left\{ \ln \left[ \frac{k}{1-k} \left( \frac{C_L}{C_o} - 1 \right) \right] - 1 \right\} \Bigg|_{C_o}^{C_o/k}$$

$$A1 = \frac{D_L}{R} C_o \left( \frac{1-k}{k} \right) - \lim_{C_L \rightarrow C_o} \frac{D_L}{R} C_o \left( \frac{C_L}{C_o} - 1 \right) \left\{ \ln \left[ \frac{k}{1-k} \left( \frac{C_L}{C_o} - 1 \right) \right] - 1 \right\}$$

$$A1 = \frac{D_L}{R} C_o \left( \frac{1-k}{k} \right) \quad (5)$$

Para el cálculo del área A2 se emplea la Ecuación 3

Cálculo del área A2:

$$A2 = - \int_{k C_o}^{C_o} \frac{1}{\alpha} \ln \left[ \frac{1}{1-k} \left( 1 - \frac{C_L}{C_o} \right) \right] d(C_L)$$

$$A2 = \frac{1}{\alpha} C_o \left( 1 - \frac{C_L}{C_o} \right) \left\{ \ln \left[ \frac{1}{1-k} \left( 1 - \frac{C_L}{C_o} \right) \right] - 1 \right\} \Bigg|_{k C_o}^{C_o}$$

$$A2 = \lim_{C_L \rightarrow C_o} \frac{1}{\alpha} C_o \left( 1 - \frac{C_L}{C_o} \right) \left\{ \ln \left[ \frac{1}{1-k} \left( 1 - \frac{C_L}{C_o} \right) \right] - 1 \right\} + \frac{1}{\alpha} C_o (1-k)$$

$$A2 = \frac{1}{\alpha} C_o (1-k) \quad (6)$$

Igualando las áreas A1 y A2

Ecuación 5 = Ecuación 6

$$\frac{D_L}{R} C_o \left( \frac{1-k}{k} \right) = \frac{1}{\alpha} C_o (1-k)$$

$$\alpha = \frac{k R}{D_L} \quad (7)$$

Reemplazando la Ecuación 7 en la Ecuación 3:

$$C_s = C_o \left[ 1 - (1-k) e^{-\frac{kR}{D_L} x} \right] \quad (8)$$

La Ecuación 8 permitirá obtener la concentración de soluto en el material base en función de la distancia mediante la composición química obtenida con el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM).

## 2.5. Especificaciones y Códigos

La especificación API 6A “Especificaciones para equipamiento de pozos y árboles de Navidad” (API, 2004) establece que el recubrimiento debe ser realizado de acuerdo a una Especificación de Procedimiento de Soldadura (WPS) calificado conforme al Código ASME de Calderas y Recipientes a Presión sección IX. (ASME, 2015).

## CAPÍTULO III

### DISEÑO, EJECUCIÓN Y ADQUISICIÓN DE PARÁMETROS DEL RECUBRIMIENTO DE SOLDADURA

#### 3.1. Materiales

En el presente proyecto se estudió el comportamiento mecánico de un recubrimiento mediante la soldadura con técnica por revenido. Se utilizó placas de acero de baja aleación alta resistencia AISI 4140 de 30 mm de espesor como metal base. El recubrimiento de soldadura se lo realizó con proceso SMAW utilizando electrodos E316 L-16 de 3.2 mm de diámetro. La composición química del metal base y metal de aporte se muestra en la Tabla 1 y propiedades mecánicas del consumible se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 1**

*Composición química promedio del metal base y metal de aporte*

<b>Material</b>	<b>%C</b>	<b>%Cr</b>	<b>%Ni</b>	<b>%Mo</b>	<b>%Mn</b>	<b>%Si</b>
<b>AISI 4140</b>	0.4	1.1	-----	0.2	0.5	-----
<b>E316 L-16</b>	0.02	17.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	0.50-2.50	1.0

Fuete: (West Arco, 2018)

**Tabla 2**

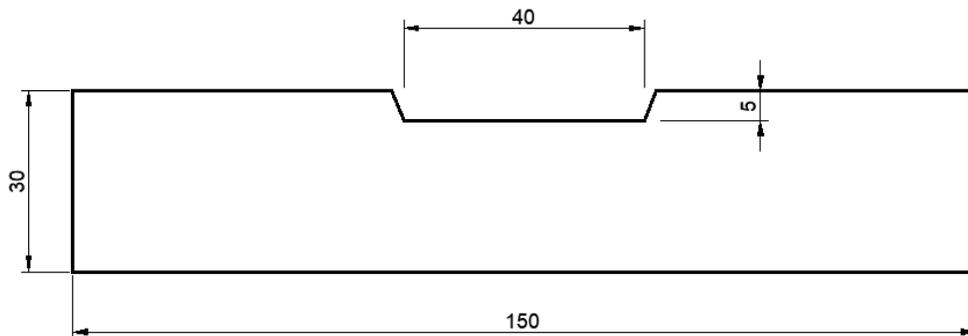
*Propiedades mecánicas del metal de aporte*

<b>Material</b>	<b>E316 L-16</b>
Resistencia a la tracción [psi]	70k-90k
Alargamiento (%)	30-50

Fuete: (West Arco, 2018)

### 3.2. Diseño de los cupones de prueba

El proyecto está orientado al análisis del recubrimiento de un acero de baja aleación alta resistencia con un solo tipo de electrodo austenítico, difiriendo la temperatura de precalentamiento en cada cupón (temperatura ambiente, 100°C, 150°C, 200°C y 300°C), para lo cual se realizaron cinco cupones de prueba de dicho acero con las medidas de 150 x 150 x 30 mm. El espesor fue escogido en base a las recomendaciones del Código ASME BPVC Sección IX, y así el proceso de soldadura se podría aplicar para materiales de cualquier espesor. Las probetas fueron diseñadas con una ranura de 5 mm de profundidad como se muestra en la Figura 6, garantizando que el material de aporte utilizado como recubrimiento sea depositado en la ranura con cordones rectilíneos y de tamaño adecuado, empleando la técnica de soldadura por revenido, es decir controlando los parámetros adecuados para el proceso, como son: amperaje, voltaje, velocidad de avance, precalentamiento y calor aportado.



*Figura 6.* Vista frontal del cupón de prueba

### 3.3. Diseño del WPS

De acuerdo a la Sección IX del código ASME BPVC el Carbono Equivalente (Ceq) se lo calcula con la Ecuación 9.

$$Ceq = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (9)$$

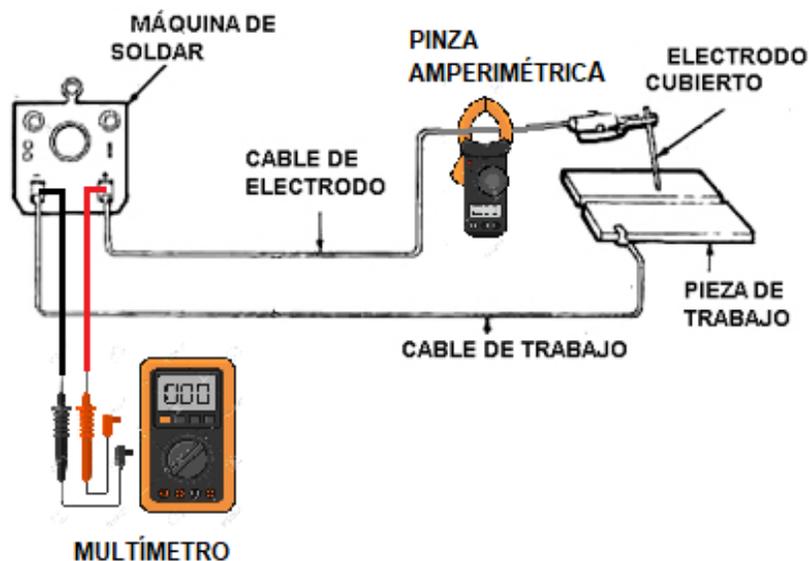
$$Ceq = 0.4 + \frac{0.5}{6} + \frac{1.1 + 0.2 + 0}{5} + \frac{0 + 0}{15}$$

$$Ceq = 0.743$$

El material base tiene un Carbono Equivalente CE=0.743 lo que significa que este acero tiene una tendencia a presentar agrietamiento por la formación de martensita, por lo se debe realizar un precalentamiento a temperaturas bajo el punto de recristalización del metal base y una vez finalizada la soldadura inmediatamente se debería realizar un postcalentamiento. Sin embargo, se utilizará la técnica de soldadura por revenido en lugar de realizar un tratamiento térmico posterior a la soldadura. Las variables de soldadura para los cupones de prueba se encuentran en el Anexo 1

### 3.4. Diseño del sistema de adquisición de datos

Se diseñó un sistema de adquisición de datos con los siguientes elementos: Cámara de 16 MP, multímetro, pinza amperimétrica y cables de conexión. El multímetro se lo conectó en paralelo a la salida de los terminales de la máquina soldadora para medir el voltaje. La pinza amperimétrica se la conectó al cable del electrodo ya que la polaridad es electrodo positivo. El esquema de conexión se puede observar en la Figura 7.



**Figura 7.** Sistema de conexión del adquisidor de datos

Fuente: (Sapiesman, 2018)

### 3.5. Ejecución y adquisición de datos de las variables esenciales de soldadura

El proceso de soldadura empleado para el recubrimiento fue SMAW con electrodo austenítico. Los cordones de soldadura fueron ejecutados calibrando el equipo de soldadura con el voltaje y corriente mostrados en el Anexo 1. La soldadura la ejecutó un soldador calificado y entrenado para realizar cordones rectilíneos uniformes a velocidad casi constante, para garantizar la técnica de soldadura por revenido. Una vez terminada la ejecución de la soldadura de recubrimiento se la dejó enfriar a temperatura ambiente.

Con la cámara se pudo grabar el voltaje y amperaje para obtener el promedio de estos parámetros de soldadura a lo largo de cada cordón como se puede observar en la Figura 8. Los equipos de medición se encontraban calibrados para asegurar una mayor confiabilidad en los datos obtenidos.



**Figura 8.** Adquisidor de datos (multímetro y amperímetro)

### 3.6. Cálculo del aporte térmico

Para el cálculo del aporte térmico se utilizó la Ecuación 10 y un valor de 0.85 en la eficiencia de transferencia de calor ( $n$ ) para el proceso SMAW.

$$Q = \frac{V \times I}{v} \times n \quad (10)$$

Con el sistema de adquisición de datos se obtuvo los valores cada cinco segundos de voltaje y amperaje para cada cordón de cada uno de los cupones de prueba, generando como promedio los siguientes parámetros de soldadura en donde:

- Temperatura: Temperatura de la superficie donde va a ser depositado el cordón [°C]
- Intensidad: Promedio de la corriente del cordón de soldadura [A]
- Voltaje: Promedio del voltaje del cordón de soldadura [V]
- Velocidad: Velocidad de avance del cordón de soldadura [mm/s]
- Calor aportado: Calor de revenido en la zona aledaña de cada cordón [KJ/mm]

a) **Cupón N°1** (Temperatura de precalentamiento: Temperatura ambiente = 28°C)

**Tabla 3**

*Cordones de la primera capa depositada (capa base) del cupón N°1*

<b>CORDÓN</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
TEMPERATURA [°C]	28,0	45,0	51,8	55,0	60,5	80,9	83,3	96,0	111,1
INTENSIDAD [A]	99,6	98,9	99,7	102,3	99,2	103,0	101,2	100,6	103,8
VOLTAJE [V]	27,8	27,3	28,0	25,6	28,5	26,4	28,4	27,7	27,4
VELOCIDAD [mm/s]	4,4	4,2	4,3	3,9	4,0	3,6	4,2	3,9	3,9
CALOR APORTADO [KJ/mm]	0,53	0,55	0,55	0,57	0,61	0,64	0,58	0,61	0,62

**Tabla 4**

*Cordones de la segunda capa depositada (1era capa de revenido) del cupón N°1*

<b>CORDÓN</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>
TEMPERATURA [°C]	125,6	129,3	131,3	137,6	138,0	160,1	169,9
INTENSIDAD [A]	99,6	102,8	104,0	102,4	101,4	102,5	104,7
VOLTAJE [V]	27,8	28,4	28,4	29,6	27,4	29,5	26,9
VELOCIDAD [mm/s]	4,4	5,0	4,4	4,7	4,0	4,3	3,2
CALOR APORTADO [KJ/mm]	0,53	0,50	0,57	0,55	0,59	0,60	0,75

**Tabla 5**

*Cordones de la tercera capa (2da capa revenido) del cupón N°1*

<b>CORDÓN</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>
TEMPERATURA [°C]	169,0	207,7	168,3	190,4	182,1	182,7	197,1	204,3	211,8	218,6	234,3
INTENSIDAD [A]	103,8	106,0	101,2	103,4	82,3	91,5	97,3	95,6	88,7	98,1	98,0
VOLTAJE [V]	29,0	27,1	28,4	27,9	29,0	29,0	29,3	29,8	40,4	31,2	32,2
VELOCIDAD [mm/s]	4,8	4,7	4,8	4,8	4,2	4,3	4,8	4,8	4,4	4,8	4,0
CALOR APORTADO [KJ/mm]	0,53	0,52	0,50	0,51	0,48	0,52	0,50	0,50	0,69	0,54	0,67

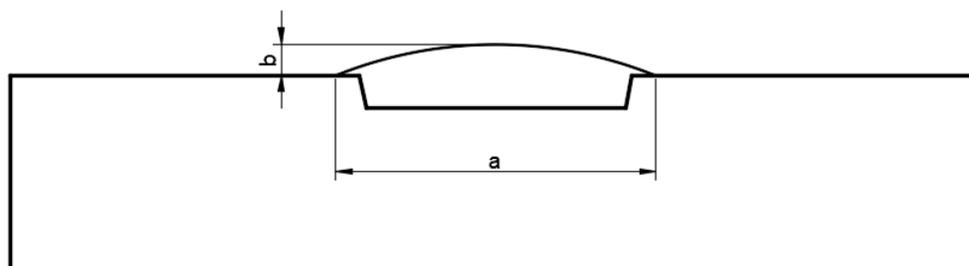
Las variables esenciales y cálculo del calor aportado de los cupones N° 2, 3, 4 y 5 se encuentran en el Anexo 2.

## CAPÍTULO IV

### ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LA SOLDADURA DE RECUBRIMIENTO

#### 4.1. Inspección Visual

Transcurridas aproximadamente 72 horas de finalizada la soldadura se realizó la inspección visual. Los cordones son rectilíneos con apariencia uniforme, no presentan costuras de unión con aristas pronunciadas. No se evidencia presencia de fisuras, porosidades, inclusiones de escoria ni mordeduras. La altura del refuerzo y el ancho del recubrimiento se muestran en la Tabla 6.



*Figura 9.* Dimensiones del recubrimiento

**Tabla 6**

*Ancho y altura del refuerzo del recubrimiento*

<b>Espécimen</b>	<b>Ancho (a) [mm]</b>	<b>Altura (b) [mm]</b>
Cupón N° 1	54.30	1.60
Cupón N° 2	56.40	2.70
Cupón N° 3	55.50	2.80
Cupón N° 4	53.15	1.80
Cupón N° 5	59.50	2.20



**Figura 10.** Cupón N° 1 (Temperatura precalentamiento: Temperatura ambiente 28 °C)



**Figura 11.** Cupón N° 2 (Temperatura precalentamiento: 100 °C)



*Figura 12.* Cupón N° 3 (Temperatura precalentamiento: 150 °C)

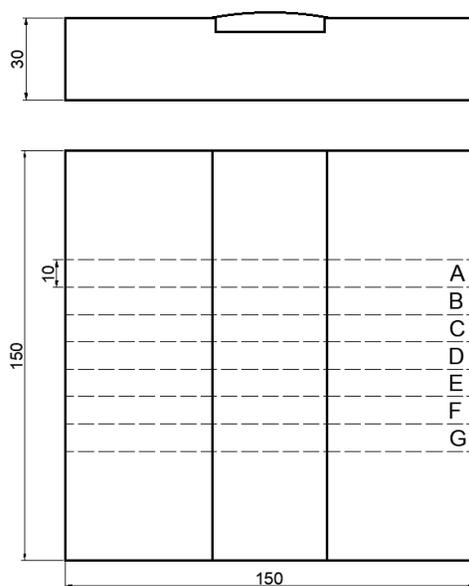


*Figura 13.* Cupón N° 4 (Temperatura de precalentamiento: 200 °C)



**Figura 14.** Cupón N°5 (Temperatura de precalentamiento: 300 °C)

Tomando como referencia el código ASME BPVC Sección IX, para determinar las propiedades de la soldadura de recubrimiento, se procedió a obtener probetas (7) de cada uno de los cupones de prueba como se muestra en la Figura 15 para realizar los ensayos correspondientes.



**Figura 15.** Obtención de probetas para ensayos

#### 4.2. Ensayo de tintas penetrantes

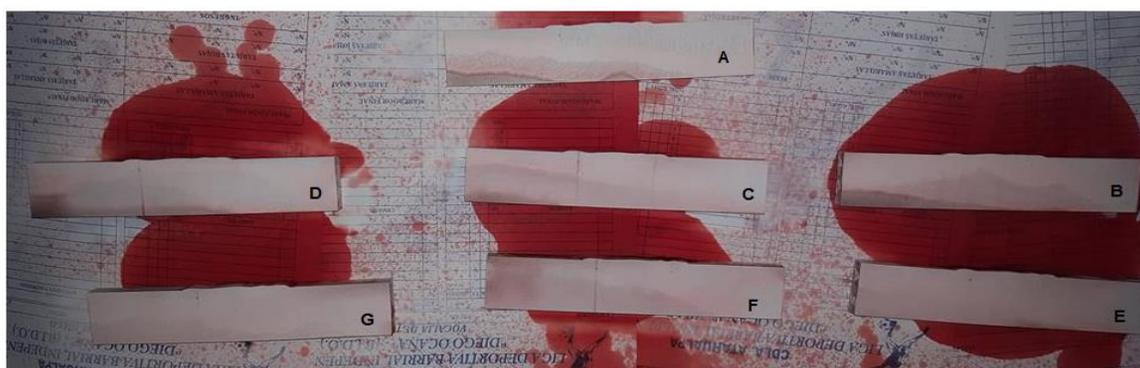
Transcurridas aproximadamente 72 horas de finalizada la soldadura se ejecutó el ensayo de tintas penetrantes en todos los cupones de prueba conforme al Código ASME BPVC Sección IX. Para el ensayo de tintas penetrantes sobre el recubrimiento ver reporte y los criterios de aceptación en el Anexo 5.



**Figura 16.** Ensayo de tintas penetrantes sobre el recubrimiento de los cupones N° 1, 2, 3, 4 y 5

En las probetas se obtuvo los siguientes resultados:

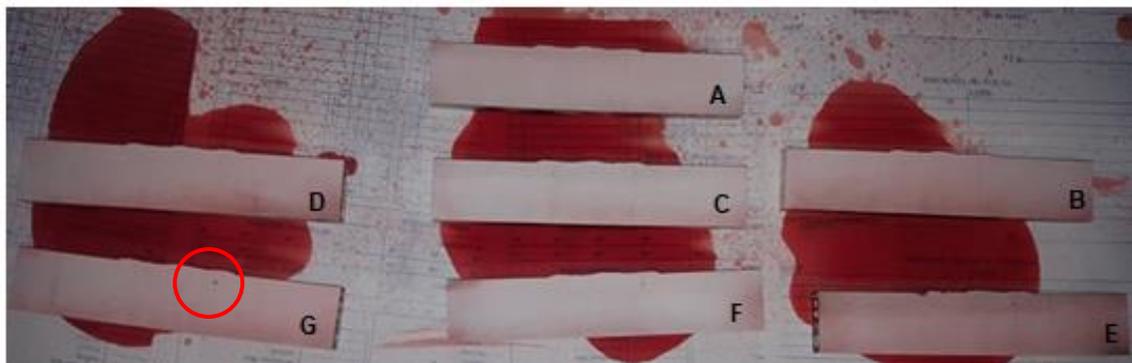
- a) **Cupón N°1** (Temperatura de precalentamiento: Temperatura ambiente = 28 °C)



**Figura 17.** Ensayo de tintas penetrantes en el cupón N° 1

No se encontró ninguna indicación lineal o redondeada relevante.

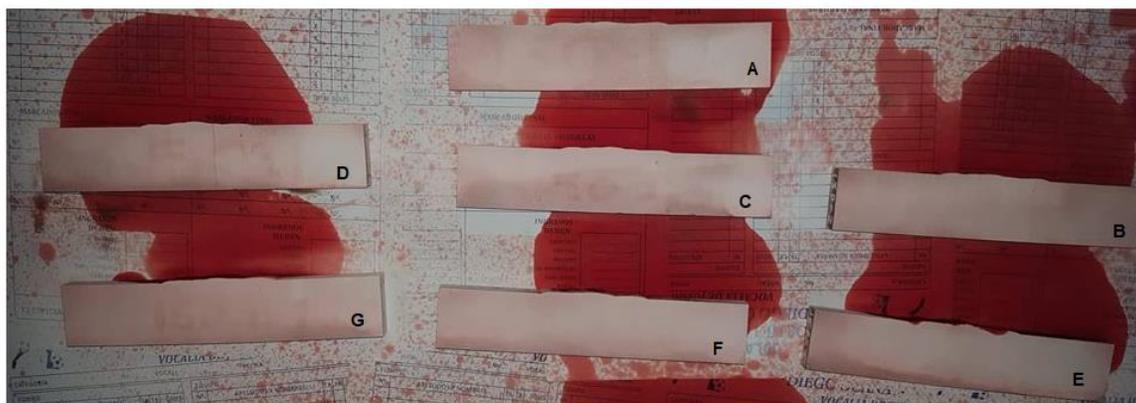
b) **Cupón N°2** (Temperatura de precalentamiento: 100 °C)



**Figura 18.** Ensayo de tintas penetrantes en el cupón N° 2

Se encontró una indicación redondeada relevante de 2.2 mm en la probeta 2G.

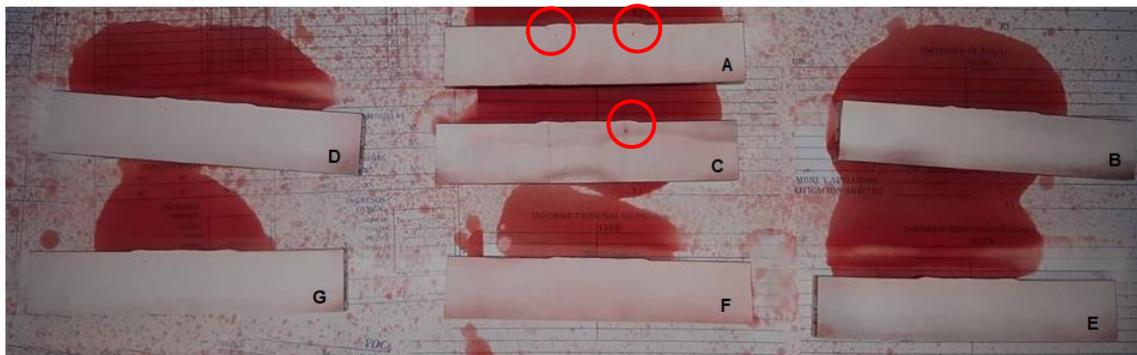
c) **Cupón N°3** (Temperatura de precalentamiento: 150 °C)



**Figura 19.** Ensayo de tintas penetrantes cupón N° 3

No se encontró ninguna indicación lineal o redondeada relevante.

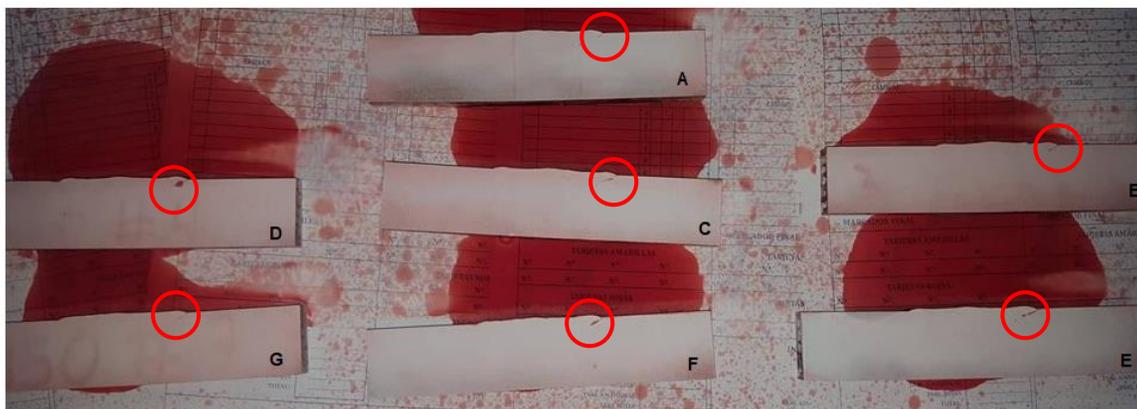
d) **Cupón N°4** (Temperatura de precalentamiento: 200 °C)



*Figura 20.* Ensayo de tintas penetrantes cupón N° 4

Se encontró una indicación redondeada de 1.5 mm y una indicación lineal de 2.6 mm en la probeta 4A, en la probeta 4C se encontró una indicación redondeada de 2.4 mm.

e) **Cupón N°5** (Temperatura de precalentamiento: 300 °C)



*Figura 21.* Ensayo de tintas penetrantes cupón N° 5

En la probeta 5A se encontró una indicación lineal de 3.95 mm, en la probeta 5B se encontró una indicación lineal de 4.2 mm, en la probeta 5C se encontró una indicación lineal de 6.75 mm, en la probeta 5D se encontró una indicación redondeada de 3.5 mm, en la probeta 5E se encontró

una indicación lineal de 6.35 mm, en la probeta 5F se encontró una indicación lineal de 5.5 mm y en la probeta 5G se encontró una indicación lineal de 7.7 mm.

### 4.3. Ensayo de Macrografía

Para los ensayos de macrografía lateral se pulieron las probetas y se procedió a preparar ácido pícrico como se muestra en la Figura 22 (4g de ácido pícrico con 100ml de alcohol metílico al 100%) para atacar las probetas y visualizar la penetración del recubrimiento soldado con el electrodo E316L-16. Para los ensayos de macrografía transversal se procedió a atacar con ácido pícrico (5ml de ácido clorhídrico, 4g de ácido pícrico y 100 ml de alcohol metílico al 100%) para visualizar y reconocer las distintas zonas que puedan presentarse.



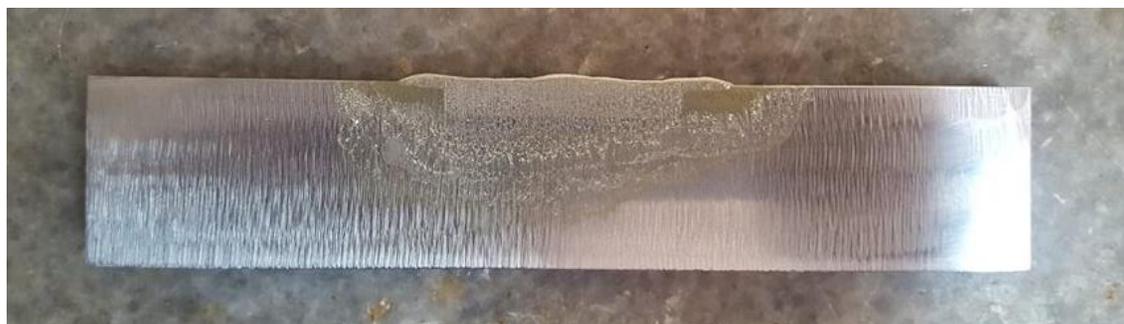
*Figura 22.* Preparación del ácido pícrico

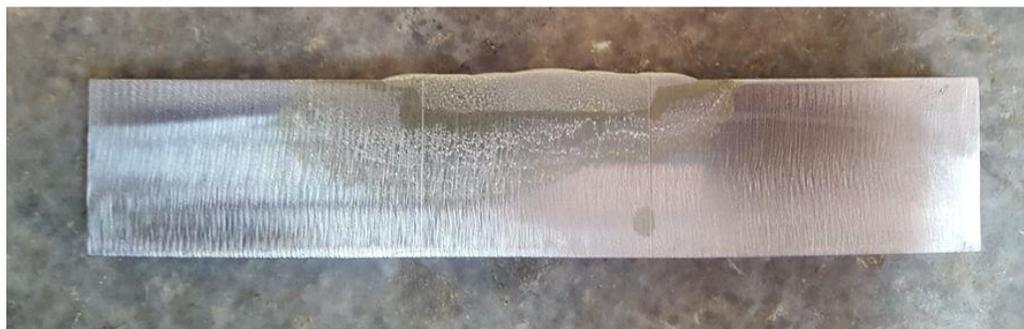
#### 4.3.1. Ensayo de Macrografía lateral

Una vez atacadas las probetas, se logró visualizar la penetración de la soldadura de recubrimiento en el metal base, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 7 y en las Figuras 23 - 27. La medición fue realizada con un pie de rey con apreciación 0.02mm.

**Tabla 7***Penetración de la soldadura de recubrimiento*

<b>Espécimen</b>	<b>Penetración [mm]</b>
Probeta 1D	0.80
Probeta 2D	0.80
Probeta 3D	0.75
Probeta 4D	0.95
Probeta 5D	1.25

**Figura 23.** Macrografía lateral del cupón N° 1 (1D)**Figura 24.** Macrografía lateral del cupón N° 2 (2D)**Figura 25.** Macrografía lateral del cupón N° 3 (3D)



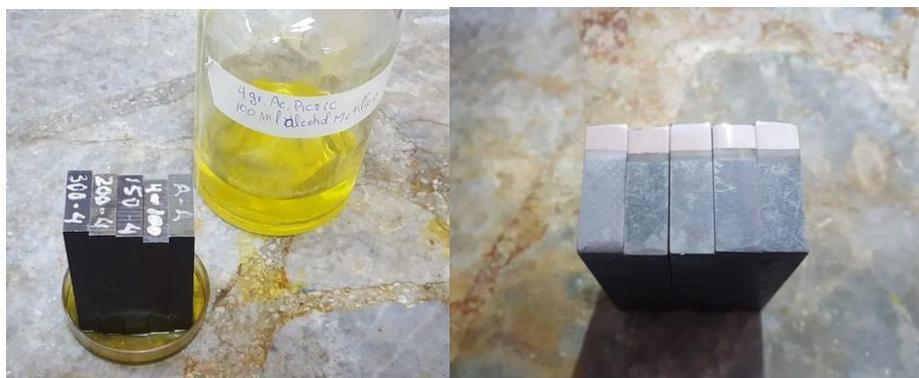
**Figura 26.** Macrografía lateral del cupón N° 4 (4D)



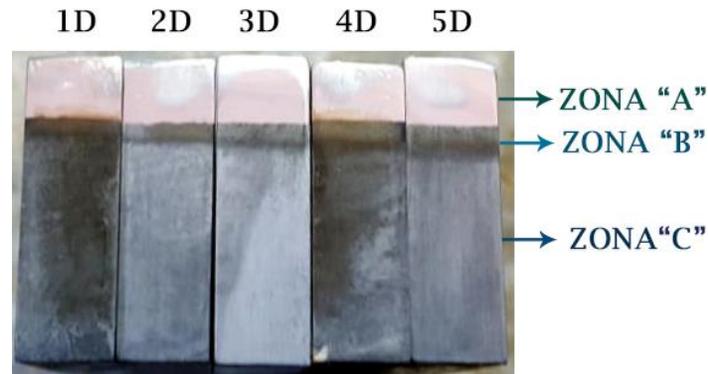
**Figura 27.** Macrografía lateral del cupón N° 5 (5D)

#### 4.3.2. Ensayo de Macrografía transversal

Una vez atacadas las probetas, se logró visualizar 3 zonas claramente marcadas como se muestra en las Figura 28-29.



**Figura 28.** Ataque y Macrografía transversal de las probetas



**Figura 29.** Zonas mostradas en la macrografía transversal

- Zona “A”: Es la zona ubicada en la parte superior de color más claro, en la cual se encuentra el material de aporte, constituido por el electrodo empleado en la soldadura E316 L-16.
- Zona “B”: Es la zona intermedia de color más oscuro, en la cual se encuentra una mezcla entre el material de aporte y el metal base, dicha zona es diferente a las otras tanto en su composición química como en su microestructura. En la zona mencionada se deben encontrar tanto la zona de fusión que a su vez contiene a la capa intermetálica y la zona afectada por el calor (ZAC) que también forma parte del metal base, como se puede observar en la figura 29.



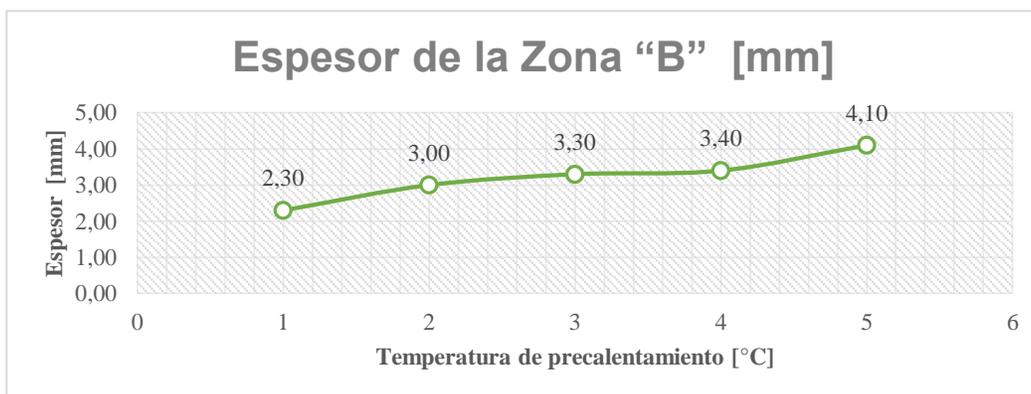
**Figura 30.** Esquema de las zonas de interés

De manera experimental se procedió a medir el espesor de la Zona “B” con un pie de rey de apreciación de 0.02mm, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 8.

**Tabla 8**

*Espesor de la Zona “B”*

Espécimen	Zona “B” [mm]
Probeta 1D	2,30
Probeta 2D	3,00
Probeta 3D	3,30
Probeta 4D	3,40
Probeta 5D	4,10



**Figura 31.** Espesor de la Zona “B”

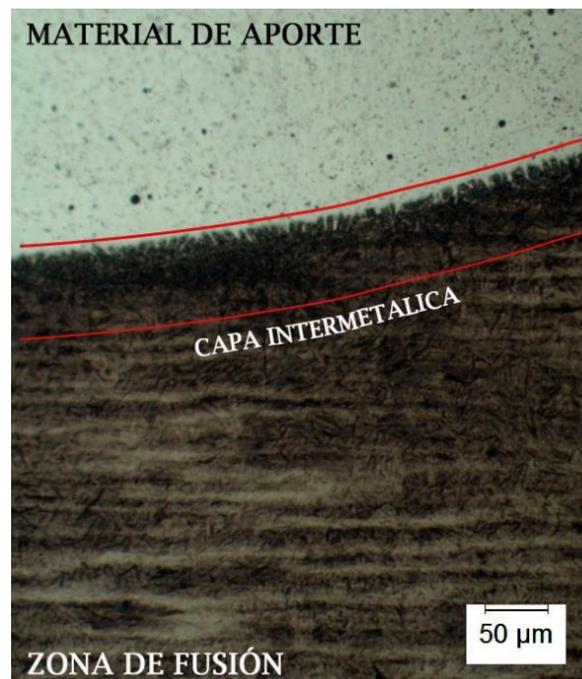
El gráfico de la Figura 31 muestra como el espesor de la zona “B” aumenta en función de la temperatura de precalentamiento.

- Zona “C”: Es la zona ubicada en la parte inferior de color gris, en la cual se encuentra únicamente el metal base, constituido por el acero de baja aleación y alta resistencia (HSLA) AISI 4140.

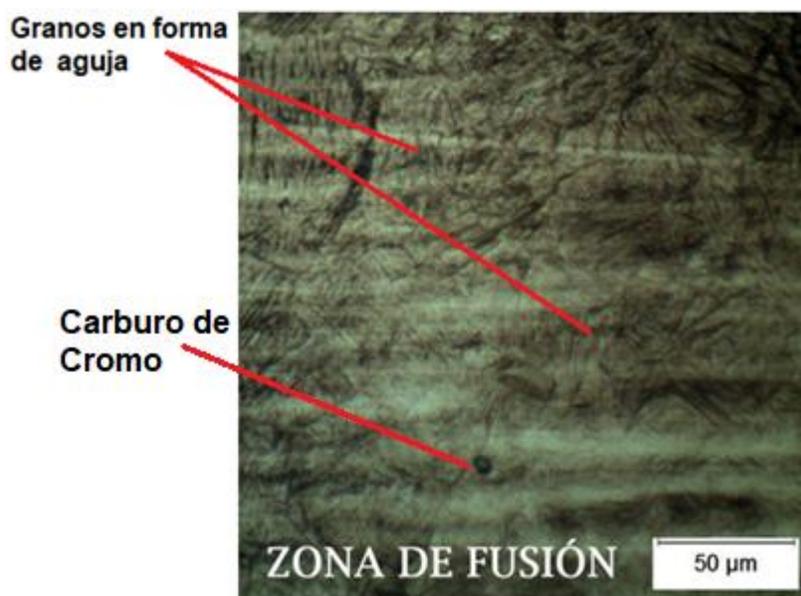
#### 4.2. Ensayo de Micrografía

Una vez atacadas las probetas con ácido pícrico se las expuso al microscopio para analizar la microestructura de la zona de fusión. Se obtuvo las siguientes imágenes:

- a) **Probeta 1D** (Temperatura de precalentamiento: Temperatura ambiente = 28 °C)

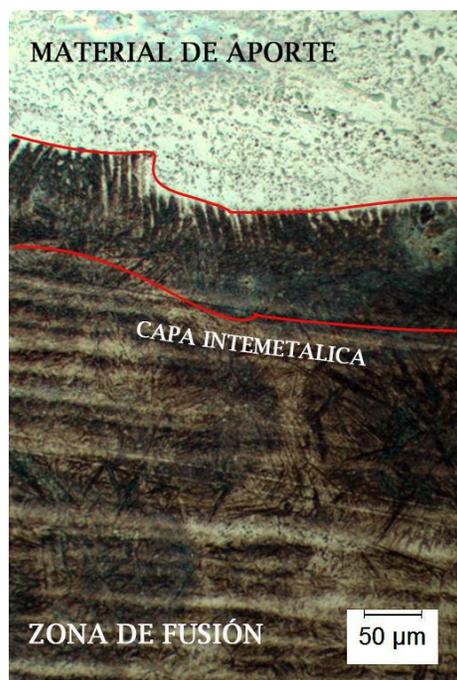


**Figura 32.** Micrografía de la interfase entre el material de aporte y la zona de fusión de la probeta 1D (200X)



*Figura 33.* Micrografía de la zona de fusión de la probeta 1D (500X)

b) **Probeta 2D** (Temperatura de precalentamiento: 100 °C)

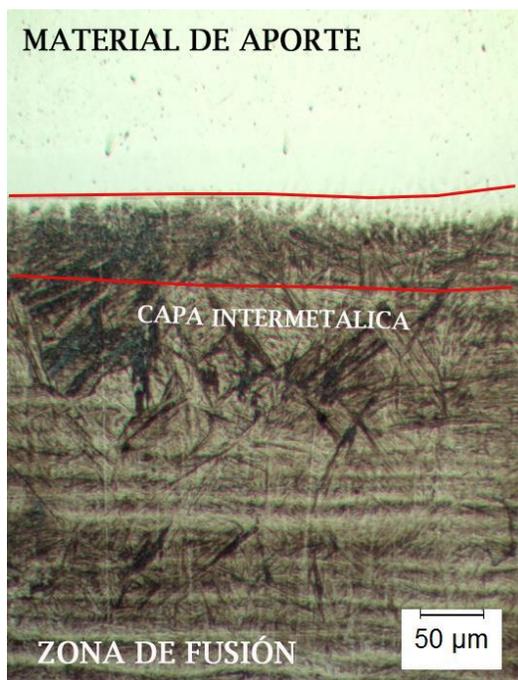


*Figura 34.* Micrografía de la interfase entre el material de aporte y la zona de fusión de la probeta 2D (200X)

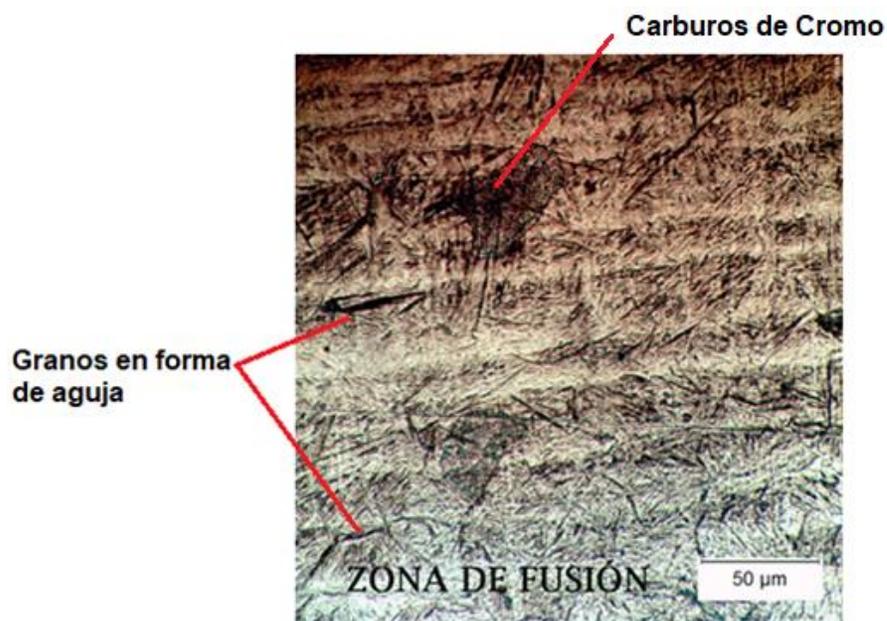


*Figura 35.* Micrografía de la zona de fusión de la probeta 2D (500X)

c) **Probeta 3D** (Temperatura de precalentamiento: 150 °C)



*Figura 36.* Micrografía de la interfase entre el metal de aporte y la zona de fusión de la probeta 3D (200X)



*Figura 37.* Micrografía de la zona de fusión de la probeta 3D (500X)

d) **Probeta 4D** (Temperatura de precalentamiento: 200 °C)

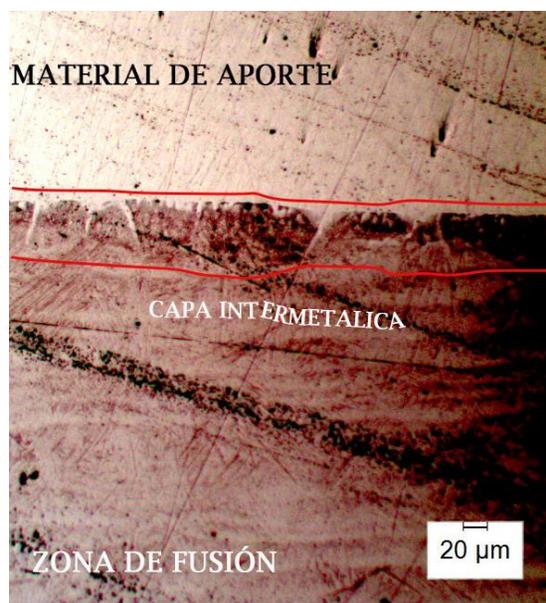


*Figura 38.* Micrografía de la interfase entre el metal de aporte y la zona de fusión de la probeta 4D (200X)

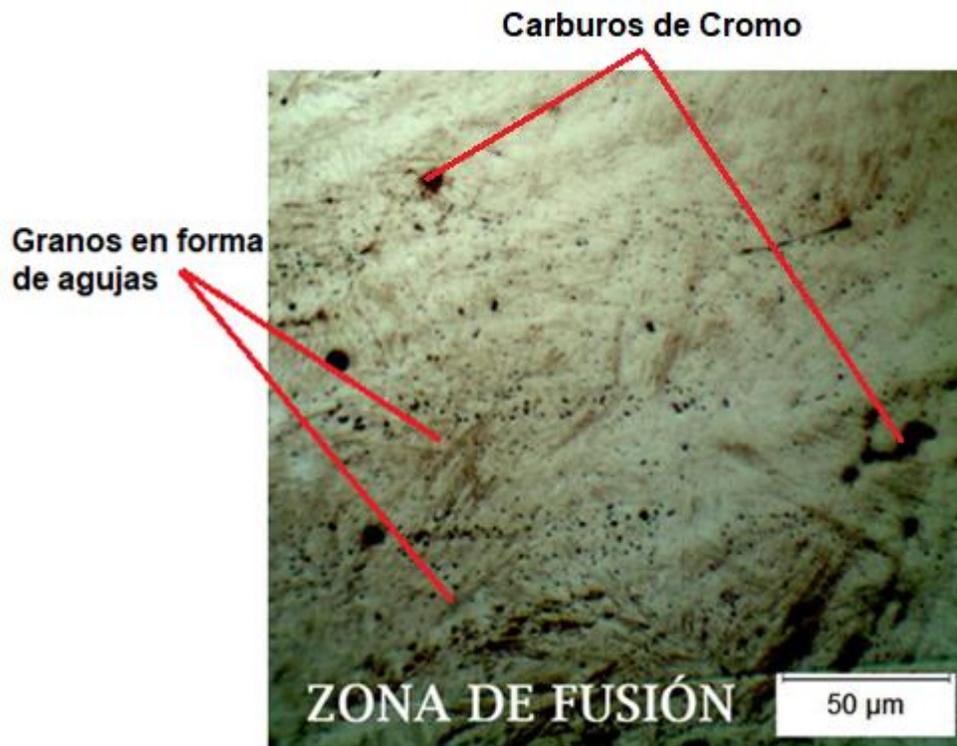


*Figura 39.* Micrografía de la zona de fusión de la probeta 4D (500X)

e) **Probeta 5D** (Temperatura de precalentamiento: 300 °C)



*Figura 40.* Micrografía de la interfase entre el material de aporte y la zona de fusión de la probeta 5D (200X)



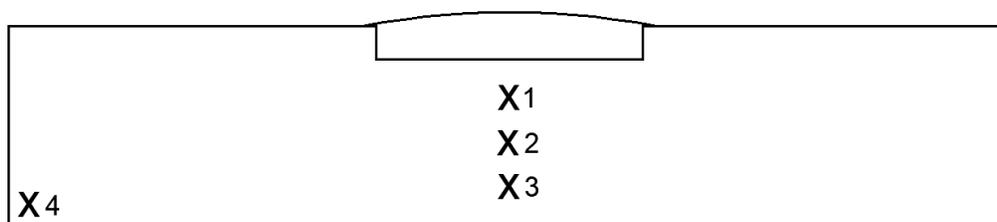
*Figura 41.* Micrografía de la zona de fusión de la probeta 5D (500X)

En las micrografías a 200X se puede observar la presencia 3 zonas: el material de aporte, una zona más oscura y la zona de fusión. La zona más oscura es una capa intermetálica formada por la unión del metal de aporte con el metal base, la cual tiene su microestructura formada por martensita (granos en formas de agujas) e incrustaciones de carburo de cromo (zonas negras). En las micrografías a 500X se puede observar que la microestructura de la zona de fusión es martensítica, pero con granos de menor tamaño que la capa intermetálica.

#### 4.4. Ensayo de Dureza

La dureza se la midió en la zona “B” y la zona “C” como se muestra en la Figura 42 obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 9 con los siguientes parámetros:

- Carga: 150kg
- Precarga: 10kg
- Escala: Rockwell C
- Penetrador: Diamante



**Figura 42.** Puntos de medición de dureza en las probetas

**Tabla 9**

*Dureza Rockwell C en la zona de fusión, zona afectada por el calor y material base*

<b>Espécimen</b>	<b>Punto</b>	<b>Dureza Rockwell C</b>
Probeta 1D	1	22.8
	2	24.3
	3	23.7
	4	31.4
Probeta 2D	1	23.4
	2	26.7
	3	24.6
	4	39.1
Probeta 3D	1	22.5
	2	23.6
	3	23.4
	4	38.1
Probeta 4D	1	24.0
	2	25.1
	3	24.4
	4	37.5

Probeta 5D	1	22.7
	2	24.7
	3	24.8
	4	33.3

#### 4.5. Ensayo de Microdureza Vickers y Dureza Rockwell C

El ensayo de microdureza se lo ejecutó de acuerdo al estándar ASTM E92 Standard Test Methods for Vickers and Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials utilizando la dureza Vickers y dureza Rockwell C con una carga de 500 gramos con tiempo de aplicación de 10 segundos. Se obtuvo los siguientes resultados:

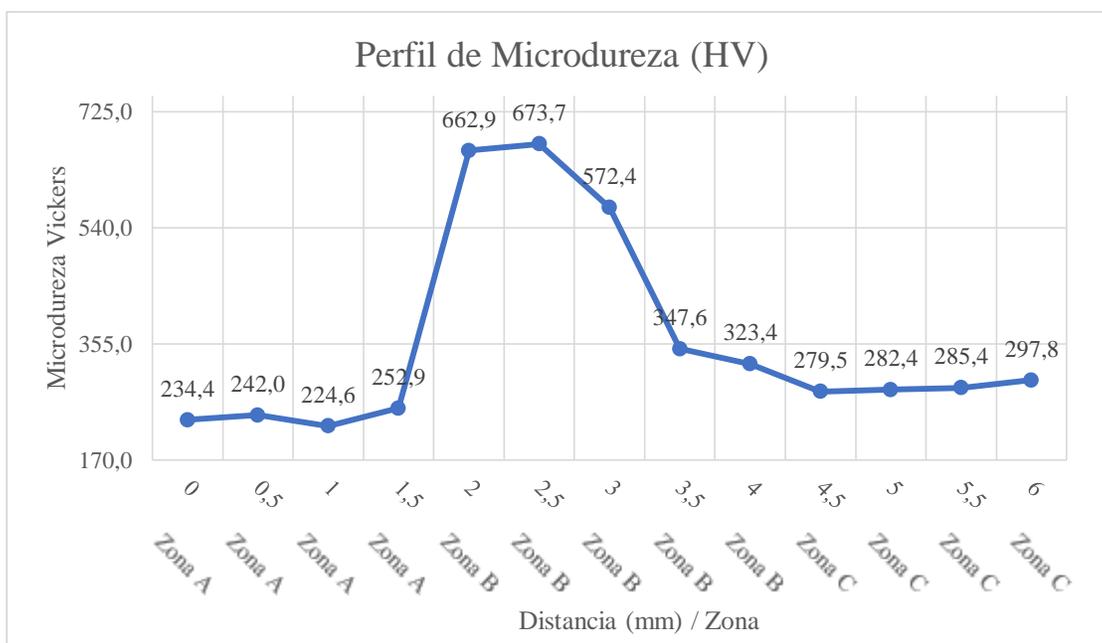
- a) **Probeta 1D** (Temperatura de precalentamiento: Temperatura ambiente = 28 °C)

**Tabla 10**

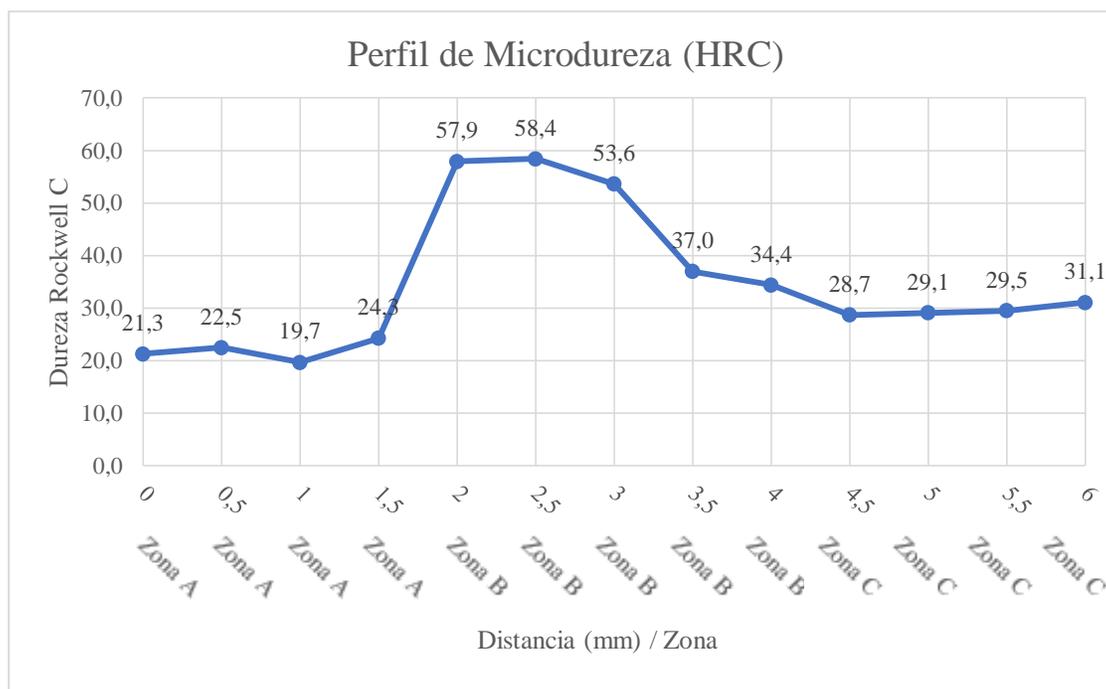
*Microdureza Vickers (HV) y Dureza Rockwell C (HRC) de la probeta 1D*

Zona de penetración	HV	HRC
Zona "A"	234,4	21,3
Zona "A"	242,0	22,5
Zona "A"	224,6	19,7
Zona "A"	252,9	24,3
Zona "B"	662,9	57,9
Zona "B"	673,7	58,4
Zona "B"	572,4	53,6
Zona "B"	347,6	37,0
Zona "B"	323,4	34,4
Zona "C"	279,5	28,7
Zona "C"	282,4	29,1
Zona "C"	285,4	29,5
Zona "C"	297,8	31,1

Las Figura 43 y 44 muestran que la banda más dura tiene un espesor de alrededor de 1.5mm y se encuentra en la Zona "B". Los valores de microdureza (HV) y dureza (HRC) de lo las probetas 2D, 3D, 4D Y 5D se encuentran en el Anexo 3.

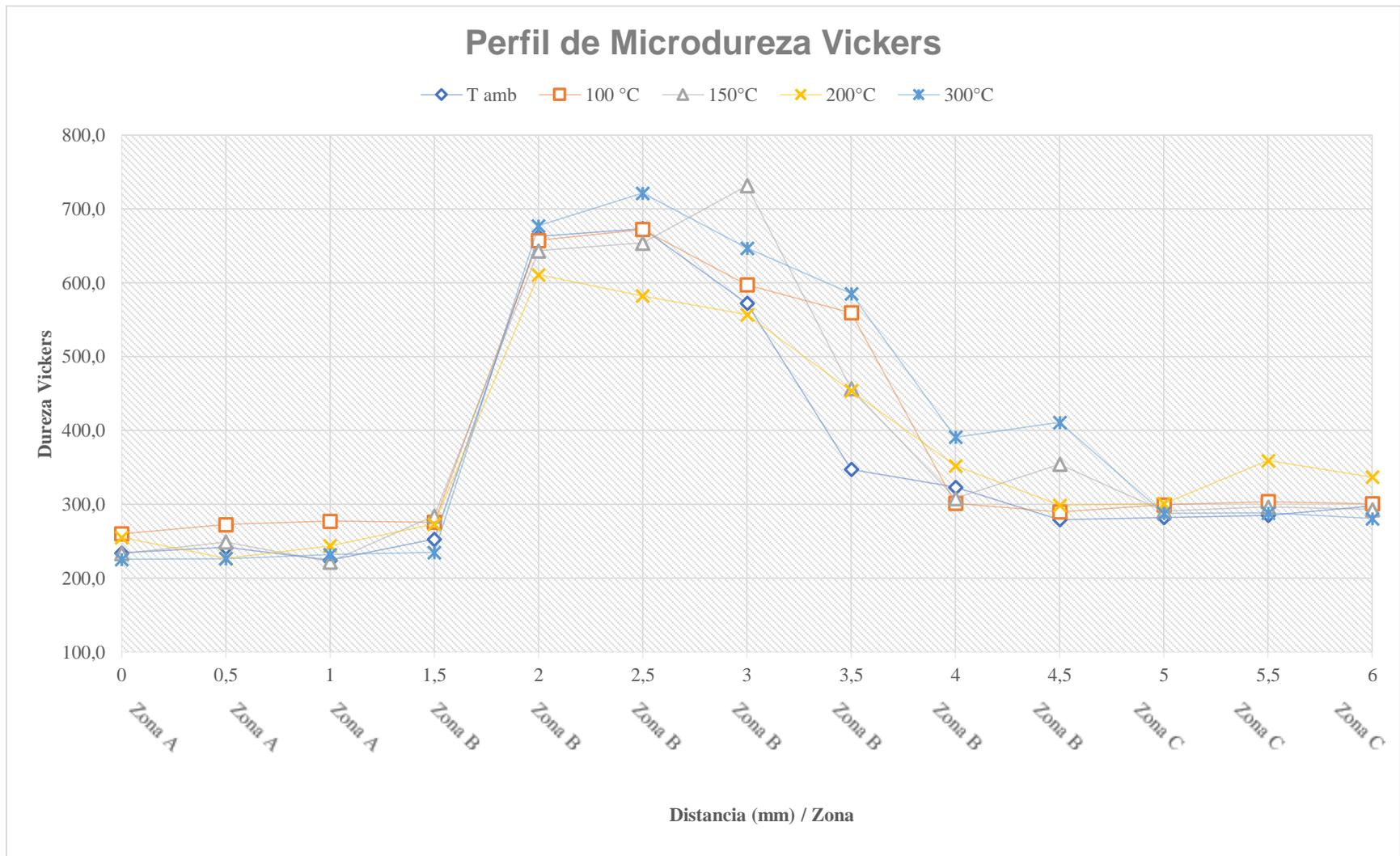


**Figura 43.** Perfil de microdureza Vickers de la probeta 1D

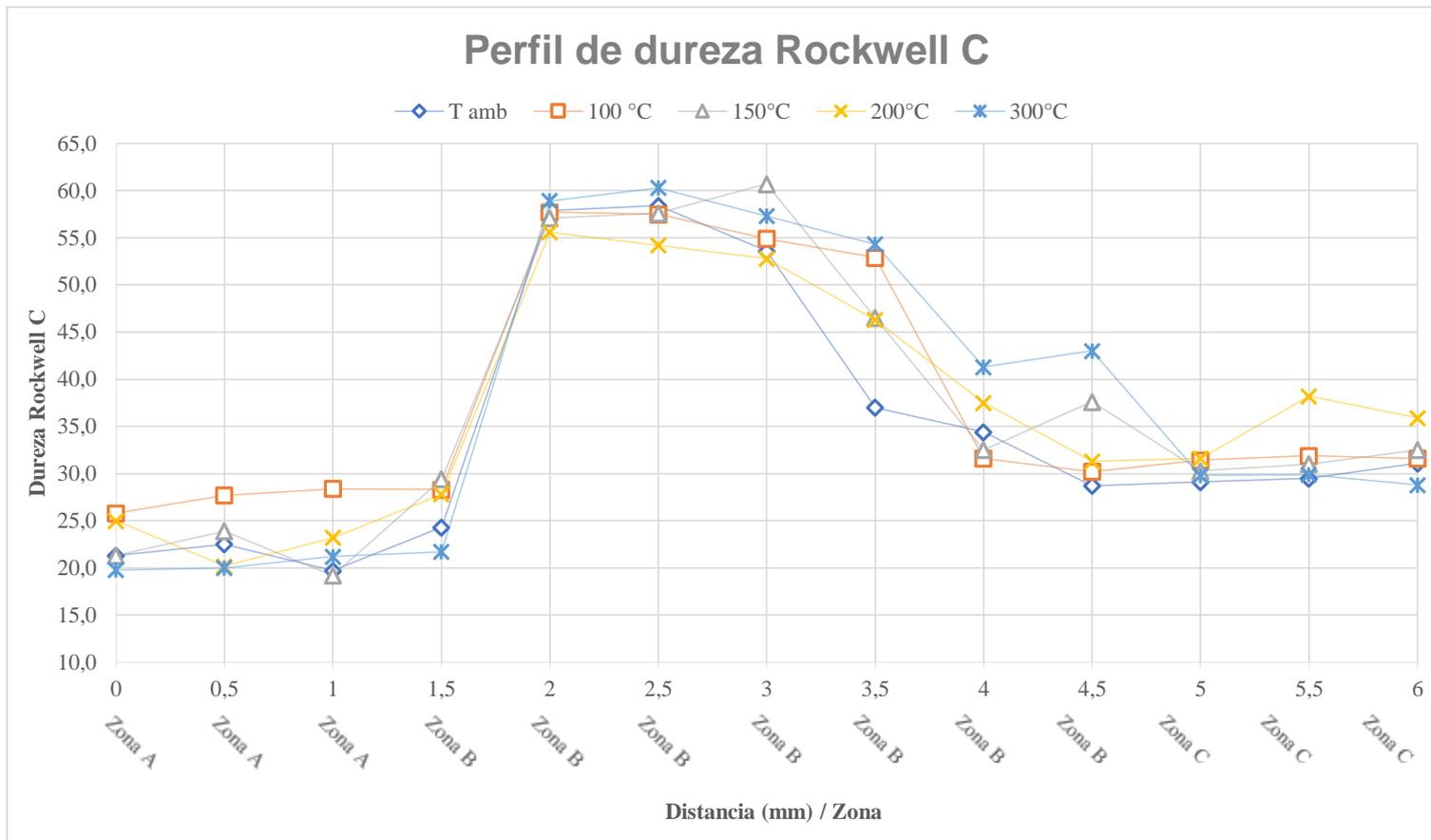


**Figura 44.** Perfil de dureza Rockwell C de la probeta 1D

Los perfiles de microdureza mostrados en las Figuras 43 y 44 muestran un incremento del 90% de dureza en la zona “B” correspondiente a la zona de fusión y ZAC en comparación a la Zona “C” correspondiente al metal base.



**Figura 45.** Perfil de Microdureza Vickers de las probetas 1D, 2D, 3D, 4D y 5D

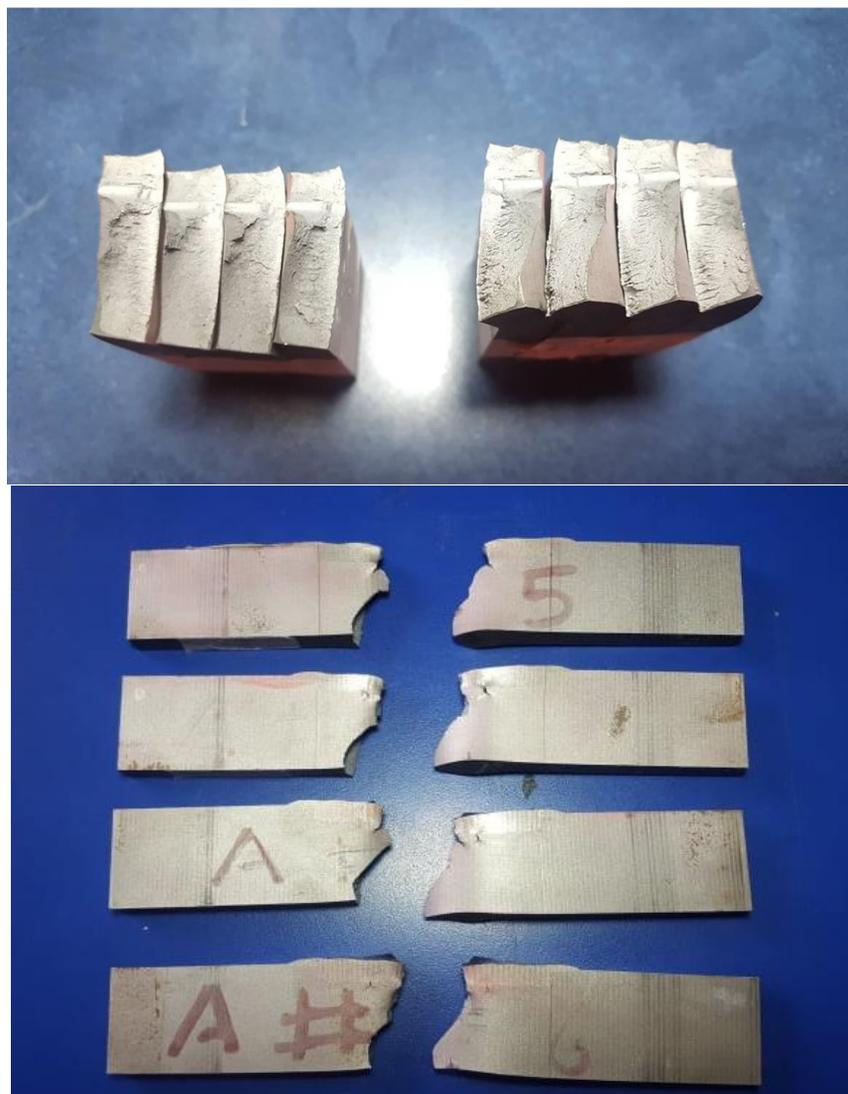


**Figura 46.** Perfil de Dureza Rockwell C de las probetas 1D, 2D, 3D, 4D y 5D

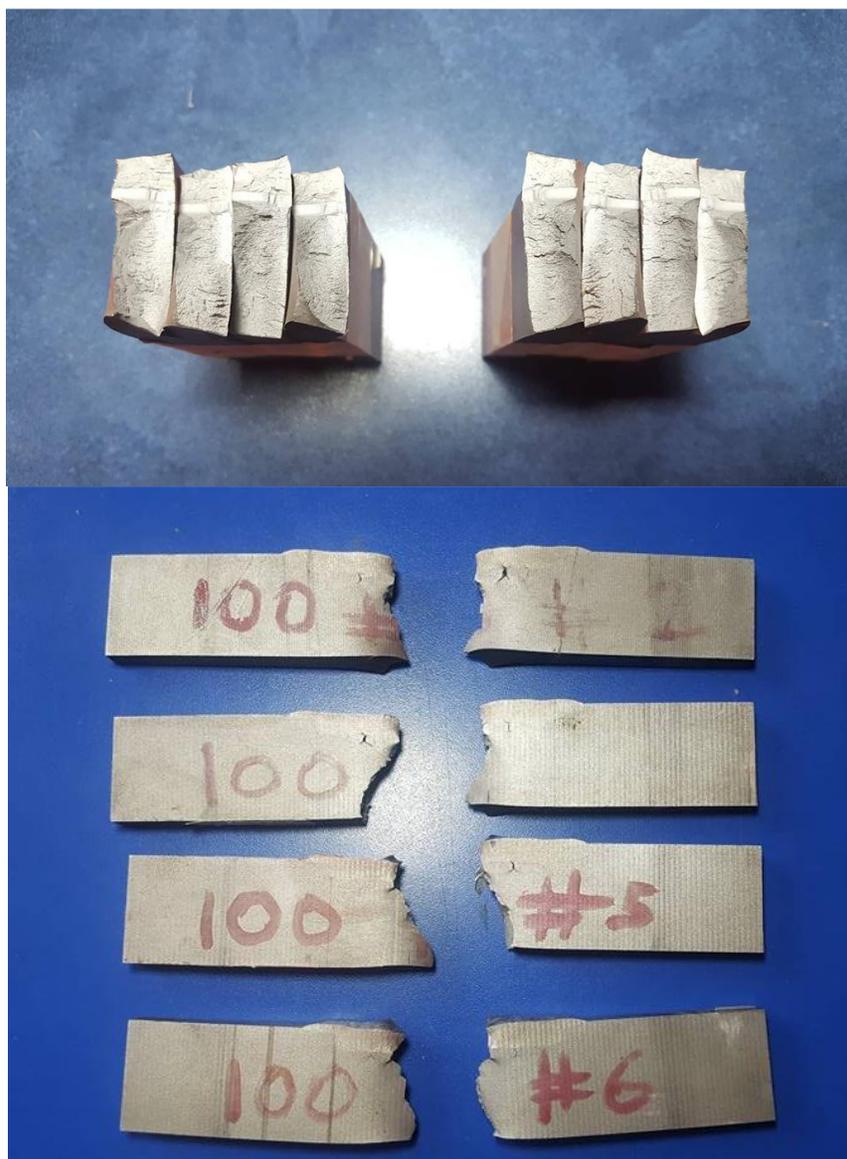
Los perfiles de microdureza mostrados en las Figuras 45 y 46 muestran que en todos los cupones de prueba ocurrió un endurecimiento de alrededor de 80% más en la Zona “B” que en la Zona “C”, siendo el cupón N°5 el que mayor microdureza alcanzó.

#### 4.6. Ensayo de doblado guiado

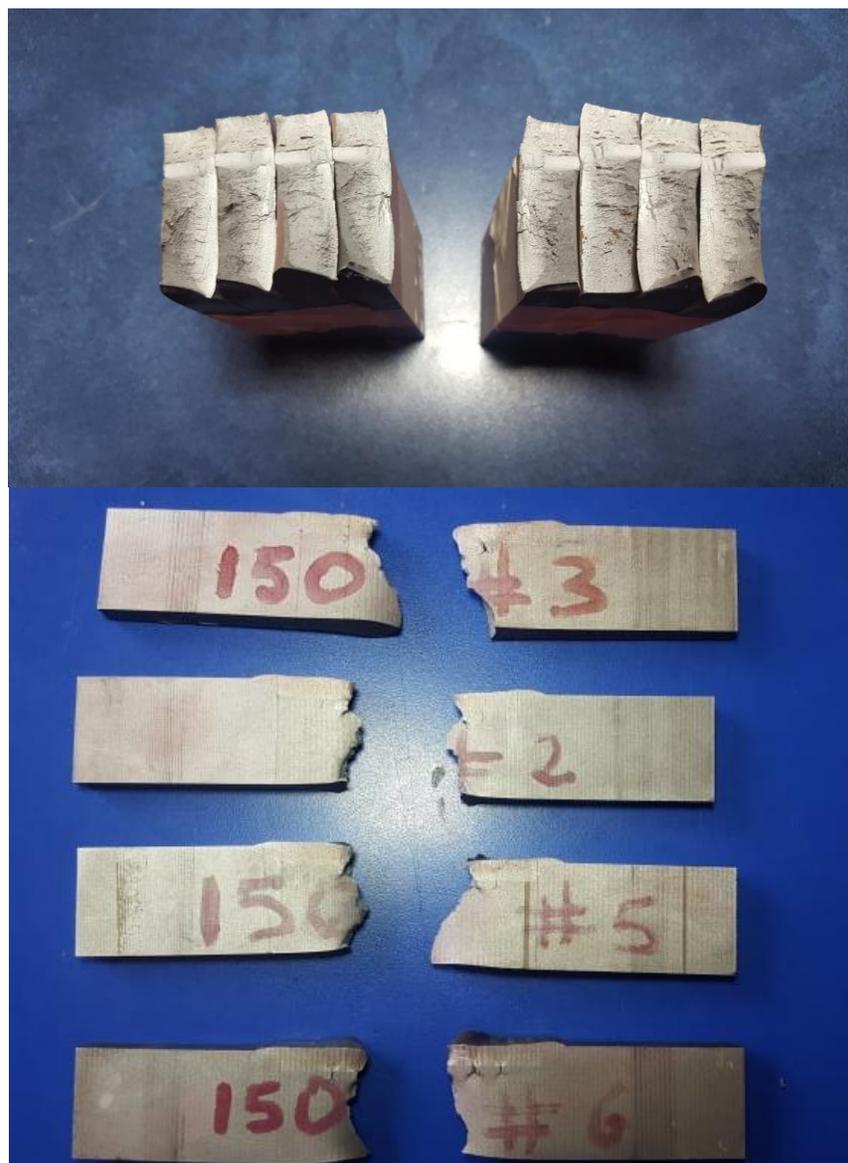
El ensayo de doblado se lo realizó de acuerdo al Código ASME BPVC Sección IX, para lo cual se realizó el doblado transversal de las probetas B, C, E y F de cada cupón de prueba (Ver Figura. 15).



**Figura 47.** *Probetas dobladas del cupón N° 1 (Temperatura de precalentamiento: 28°C)*



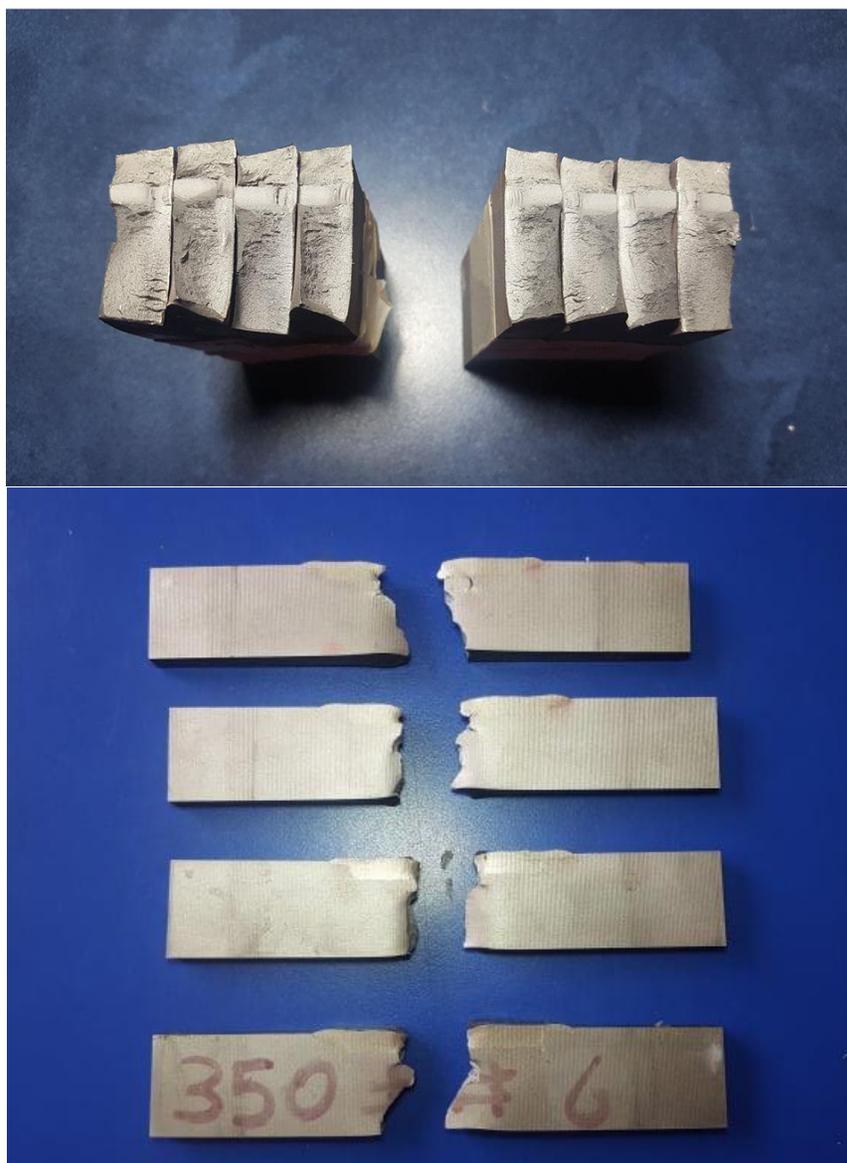
**Figura 48.** Probetas dobladas del cupón N° 2 (Temperatura de precalentamiento: 100°C)



**Figura 49.** Probetas dobladas del cupón N° 3 (Temperatura de precalentamiento: 150°C)



**Figura 50.** Probetas dobladas del cupón N° 4 (Temperatura de precalentamiento de 200°C)



**Figura 51.** Probetas dobladas del cupón N° 5 (Temperatura de precalentamiento de 300°C)

Todas las probetas de todos los cupones se fracturaron, evidenciando muy poca ductilidad y generándose el inicio de falla en la Zona “B”, como se muestran en las Figuras 47 - 51.

#### 4.7. Composición química con Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)

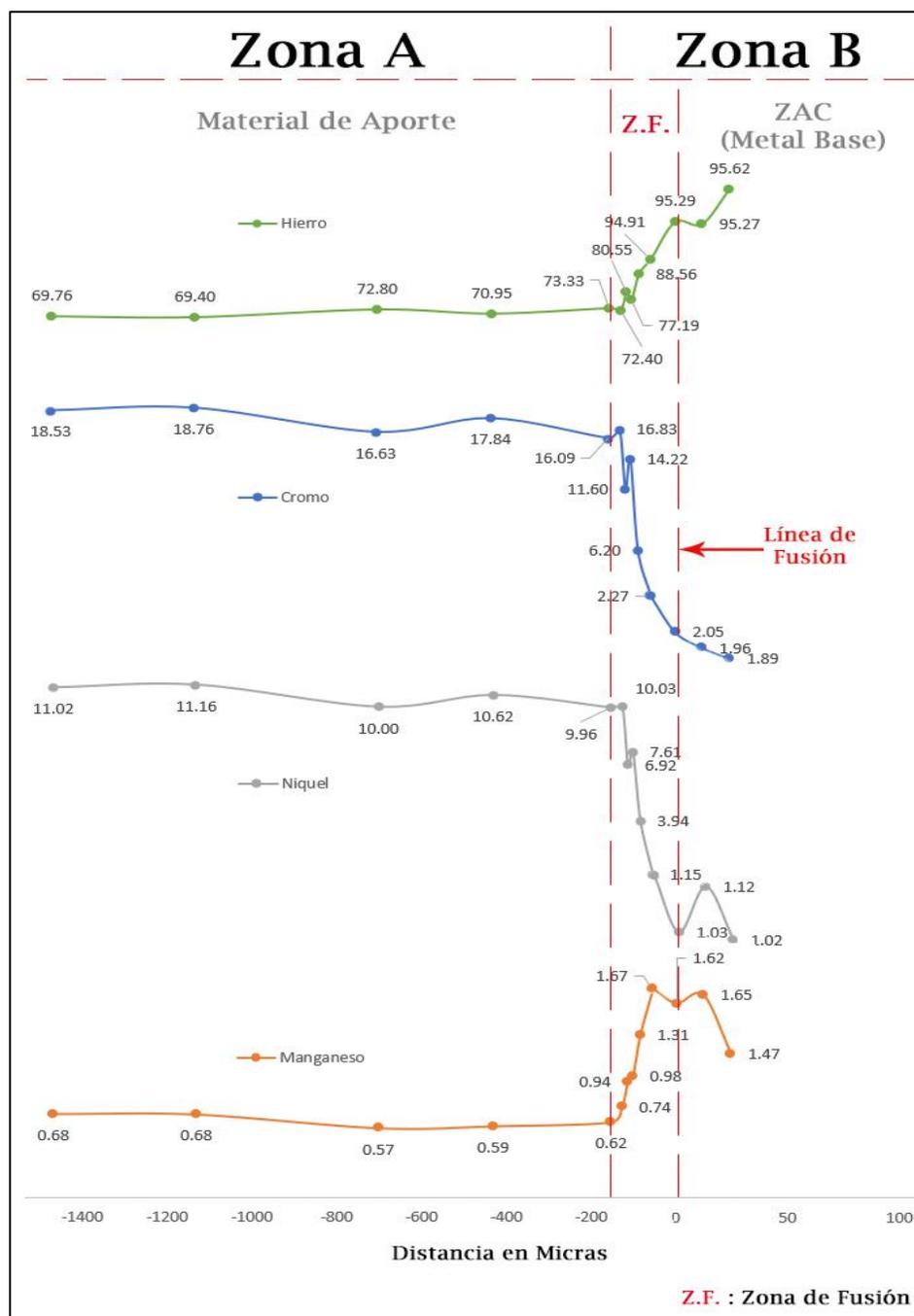
Con la ayuda de la microcopia electrónica de barrido (SEM) se ejecutó un análisis denominado EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy), a esta técnica se la conoce como SEM-EDS y se lo realizó con un aumento de 46X para proporcionar datos sobre la composición química en la zona de interés, para este caso analizó una parte de la zona “A” y la zona “B”. La composición química de las probetas 2D, 3D, 4D Y 5D se encuentran en el Anexo 4.

##### a) **Probeta 1D** (Temperatura de precalentamiento: Temperatura ambiente = 28 °C)

**Tabla 11**

*Composición química (Cromo, Manganeso, Hierro, Níquel) de la probeta 1D*

<b>Zona</b>	<b>Distancia</b>	<b>%Cr</b>	<b>%Mn</b>	<b>%Fe</b>	<b>%Ni</b>
Zona “A”	1218	18.53	0.68	69.76	11.02
Zona “A”	880	18.76	0.68	69.40	11.16
Zona “A”	451	16.63	0.57	72.80	10.00
Zona “A”	180	17.84	0.59	70.95	10.62
Zona “B”	-98	16.09	0.62	73.33	9.96
Zona “B”	-73	16.83	0.74	72.40	10.03
Zona “B”	-59	11.60	0.94	80.55	6.92
Zona “B”	-47	14.22	0.98	77.19	7.61
Zona “B”	-29	6.20	1.31	88.56	3.94
Zona “B”	0	2.27	1.67	94.91	1.15
Zona “B”	11	2.05	1.62	95.29	1.03
Zona “B”	23	1.96	1.65	95.27	1.12
Zona “B”	35	1.89	1.47	95.62	1.02



**Figura 52.** Composición química de la probeta 1D

La Figura 52 indica que la zona de fusión tiene un espesor aproximado de 200 micrómetros y muestra como los componentes del material de aporte (Hierro, Cromo, Níquel y Manganeso) se segregaron en el metal base.

## CAPÍTULO V

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 5.1. Análisis según el ensayo de tintas penetrantes

De acuerdo al ensayo de tintas penetrantes para los cupones N° 1, N° 2 y N° 3 (soldados con temperatura de precalentamiento de 28, 100 y 150 °C respectivamente), no presentaron indicaciones lineales o redondeadas relevantes por lo tanto se determinó que no existen defectos en la soldadura.

En el cupón N° 4 (temperatura de precalentamiento de 200°C) se determinó que existen indicaciones redondeadas relevantes (Figura 20) lo que indica que existió una falta de fusión entre el material de aporte y metal base debido a la preparación de la ranura en el cupón de prueba, estas indicaciones son inadmisibles para el Código ASME BPVC Sección IX.

En el cupón N° 5 (temperatura de precalentamiento de 300°C) se determinó que existen indicaciones lineales y redondeadas relevantes (Figura 21, ver también Anexo 5), lo que indica una falta de fusión y la presencia de fisuras que son inadmisibles para el Código ASME BPVC Sección IX.

#### 5.2. Análisis de la macrografía

En la macrografía lateral se pudo observar que existe buena fusión de todos los cupones de prueba del metal de aporte sobre el metal base, los resultados obtenidos (Tabla 7) muestran que hasta con una temperatura de precalentamiento de 150°C se obtiene una penetración de alrededor de 0.8 mm, con la temperatura de 200 °C la penetración aumenta en un 18.75% y con temperatura de 300 °C aumenta en un 56.25%.

En la macrografía transversal se observó tres zonas claramente distintas (Figura. 28 y 29). La zona "A" (metal de aporte E316L-16), la zona "B" (zona de fusión que a su vez contiene a la capa intermetálica y la ZAC que a su vez forma parte del metal base) y la zona "C" (metal base). La zona "B" varía entre 2.30 y 4.10 mm como se muestra en la Tabla 8 y la Figura. 31 indicando que la temperatura de precalentamiento afecta el espesor de dicha zona de manera proporcional como era lo esperado.

### **5.3. Análisis de la micrografía**

Una vez realizado el análisis de composición química, se logró comprobar que la zona más oscura mostrada en las Figuras 32 - 41 pertenece a una capa intermetálica dentro de una zona de fusión, formada principalmente por hierro, cromo, níquel y manganeso. Además de poseer una gran dureza debido a la martensita (granos en forma de agujas), la austenita retenida y las incrustaciones de carburo de cromo producidas durante la soldadura. La zona de fusión también tiene granos en forma de agujas, pero de menor tamaño que en la capa intermetálica; a medida que los granos se alejan de la línea de fusión hacia el metal base, dichos granos toman la forma de un acero 4140 con estructura martensítica-ferrítica-agregados de carburo.

#### **5.3.1. Composición de la microestructura según el Diagrama de Schaeffler**

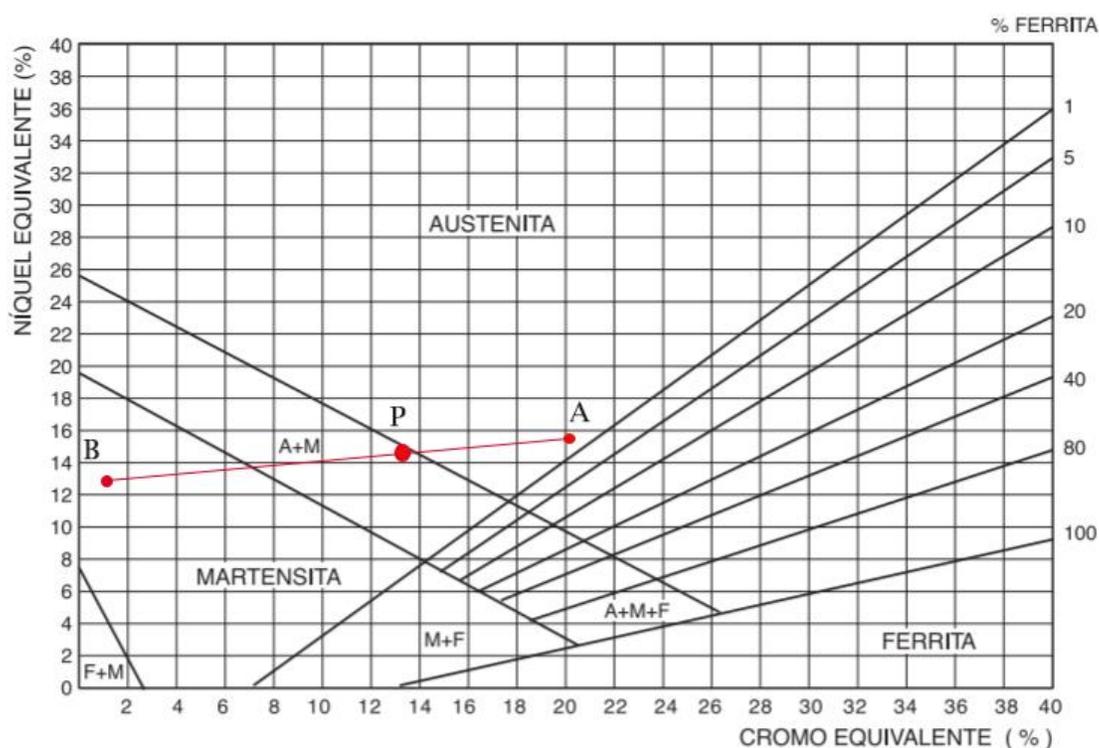
Mediante la aplicación del diagrama de Schaeffler (Figura 53), se puede tener una aproximación hacia el tipo de estructura del metal de soldadura obtenido en la unión de aceros inoxidables con aceros al carbono de baja aleación. Es necesario obtener el cromo y níquel equivalente tanto del electrodo como del material base.

**Tabla 12**

*Cromo y Níquel equivalente del Material de aporte y Material base*

	%Cr eq	%Ni eq	Punto
<b>E 316 L-16</b>	20.5	15.85	A
<b>AISI 4140</b>	1.3	12.65	B

En un proceso de soldadura con electrodo revestido (SMAW), aproximadamente un porcentaje de dilución de 30% es considerada para el resultado final.



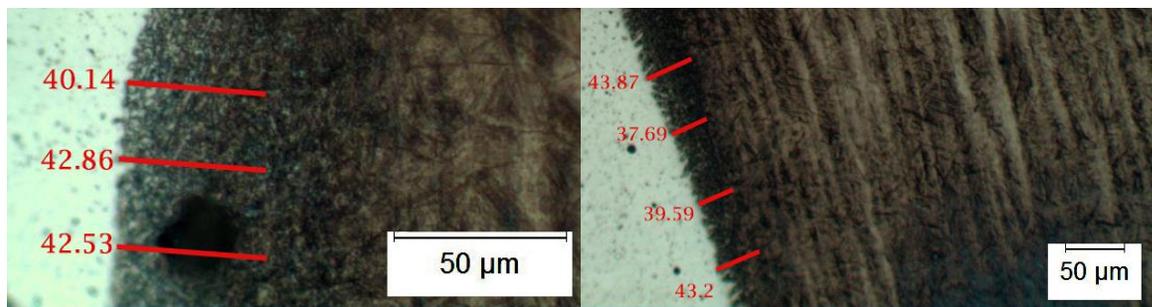
**Figura 53** Diagrama de Schaeffler aplicado al problema  
(Fuente: Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura, 2018)

Como se puede observar en el diagrama, se puede predecir que la estructura esperada en la zona de fusión es la mezcla entre **Austenita + Martensita**, que es en la zona donde se encuentra el punto P.

### 5.3.2. Medición Experimental de la capa intermetálica

Se procedió a realizar la medición del espesor de la capa intermetálica en las micrografías para obtener un promedio de cada cupón de prueba y compararlo con el espesor obtenido con el Modelo de Segregación

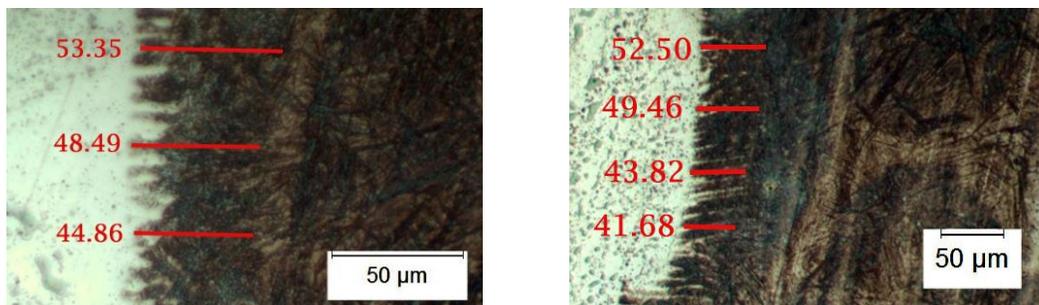
a) **Probeta 1D** (Temperatura de precalentamiento: Temperatura ambiente=28°C)



**Figura 54.** Medición de la capa intermetálica de la probeta 1D

El promedio de las mediciones da como resultado:  $\delta_{exp} = 42 \mu m$

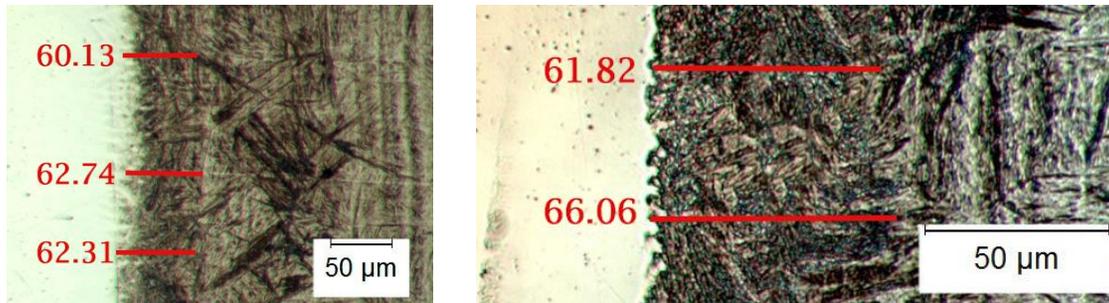
b) **Probeta 2D** (Temperatura de precalentamiento:100°C)



**Figura 55.** Medición de la capa intermetálica de la probeta 2D

El promedio de las mediciones da como resultado:  $\delta_{exp} = 48 \mu m$

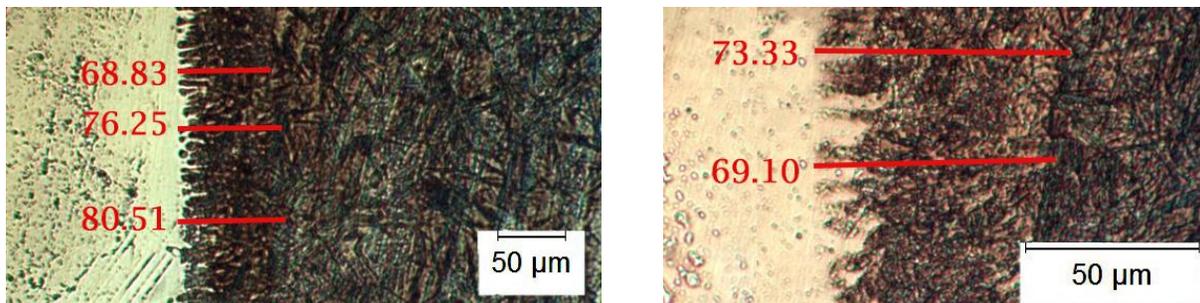
c) **Probeta 3D** (Temperatura de precalentamiento:150°C)



*Figura 56.* Medición de la capa intermetálica de la probeta 3D

El promedio de las mediciones da como resultado:  $\delta_{exp} = 63 \mu m$

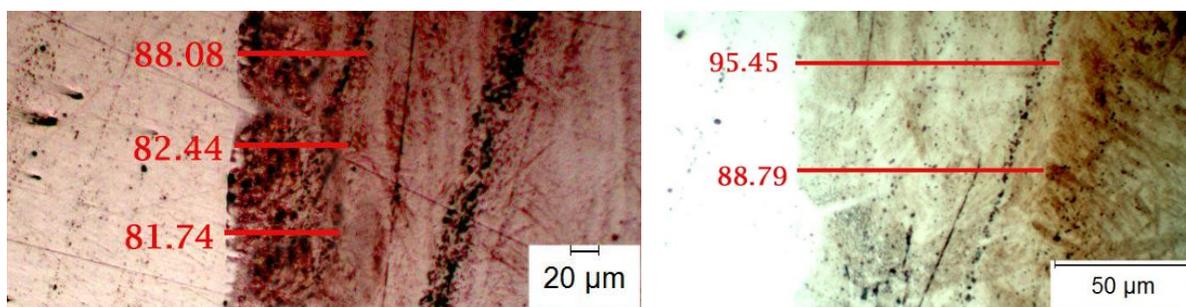
d) **Probeta 4D** (Temperatura de precalentamiento:200°C)



*Figura 57.* Medición de la capa intermetálica de la probeta 4D

El promedio de las mediciones da como resultado:  $\delta_{exp} = 74 \mu m$

e) **Probeta 5D** (Temperatura de precalentamiento:300°C)



**Figura 58.** Medición de la capa intermetálica de la probeta 5D

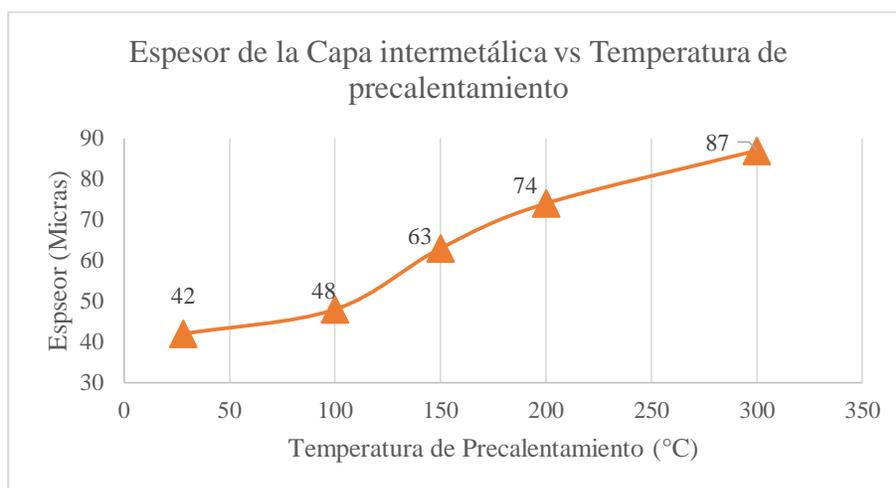
El promedio de las mediciones da como resultado:  $\delta_{exp} = 87 \mu m$

En la Tabla 13 y en la Figura. 59 se muestran los valores obtenidos experimentalmente de los espesores de la capa intermetálica de cada probeta

**Tabla 13**

*Temperatura de precalentamiento y espesor de la capa intermetálica de las probetas*

<b>Cupón de prueba</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Espesor de capa intermetálica (<math>\mu m</math>)</b>
Probeta 1D	28	42
Probeta 2D	100	48
Probeta 3D	150	63
Probeta 4D	200	74
Probeta 5D	300	87



**Figura 59.** Espesor de la capa intermetálica vs temperatura de precalentamiento

El espesor de la capa intermetálica de la probeta 1D es 52% más baja que el espesor de la probeta 5D, teniendo un mayor espesor de dicha capa a medida que la temperatura de precalentamiento aumenta.

#### **5.4. Análisis del ensayo de dureza**

El ensayo de dureza indica que la zona aledaña a la soldadura tiene una menor dureza que los extremos de la probeta indicando que existió un cambio sustancial en la microestructura del material base durante la soldadura, además estas variaciones de dureza indican que la estructura metalográfica del acero no es homogénea.

#### **5.5. Análisis del ensayo de microdureza**

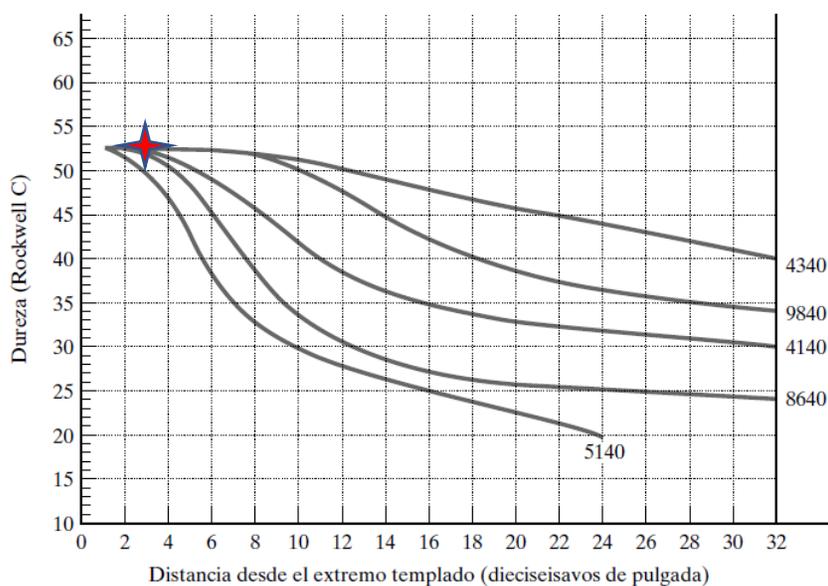
En el perfil de microdureza la zona de fusión es la que posee mayor dureza seguida por la zona afectada por el calor, el metal base y finalmente el metal de aporte (E316L-16) siendo el material menos duro. Los valores promedio de la dureza en la línea de fusión son presentados en la Tabla 14. La probeta con mayor promedio de dureza en la interfaz es la probeta del cupón N°5.

La dureza de la probeta del cupón N° 1 es 14% más baja que la dureza que el cupón N° 5, teniendo una mayor dureza en la probeta que se soldó con una mayor temperatura de precalentamiento.

**Tabla 14**

*Promedio de Microdureza Vickers (HV) y Dureza Rockwell C (HRC) en la interfaz de las probetas.*

Espécimen	HV	HRC
Probeta 1D	564,2	51,7
Probeta 2D	621,8	55,8
Probeta 3D	621,6	55,5
Probeta 4D	551,1	52,2
Probeta 5D	657,9	57,7



**Figura 60.** Curvas de templabilidad para varios aceros con el mismo contenido en carbono (0.40 por ciento en peso) y distinto contenido en elementos aleantes.

(Fuente: W. T. Lankford et al., *The Making, Shaping, and Treating of Steel*, 10th ed., United States Steel, Pittsburg, PA, 1985.)

Según las Curvas de templabilidad (Figura. 60) y la Dureza en Rockwell C se pudo establecer que las probetas sufrieron un temple en toda la Zona “B”.

## **5.6. Análisis del ensayo de doblado**

Todas las probetas se fracturaron evidenciando una baja ductilidad lo que indica que la zona “C” (material base) y especialmente la Zona “B” (zona de fusión + ZAC) estuvo formada por estructuras metalográficas duras (martensita).

El tipo de fractura es completamente frágil, la falla comenzó en la Zona “B”, donde se puede apreciar la existencia de fisuras y además un cambio de coloración (más claro) que el resto del material. El inicio de falla es por esfuerzos de compresión característicos de materiales duros.

En todas las probetas existen pequeñas incrustaciones brillantes que son visibles a simple vista y que según la composición del material base corresponden a carburos o compuestos de cromo formados por los efectos térmicos de la soldadura provocando un endurecimiento del material y generando este tipo de falla característico de los materiales duros.

## **5.7. Análisis de la capa intermetálica aplicando el modelo de segregación**

Para la aplicación del modelo de segregación en la solidificación se ha tomado los datos obtenidos en la composición química de la Probeta 1D en la zona de interés, es decir desde la línea de fusión hasta la parte superior de la capa intermetálica. Solo se realiza en dicha probeta debido a que después de haber realizado el ensayo SEM-EDS, se recolectó una mayor cantidad de datos en la zona de fusión con los cuales se pueden realizar los cálculos necesarios para el modelo de solidificación mediante la segregación.

Mediante el empleo de la ecuación de concentración de soluto en función de la distancia mencionada en la Ecuación 8, se tratará de ajustar los valores tomados a una curva exponencial.

$$C_s = C_o \left[ 1 - (1 - k) e^{-\frac{kR}{D_L} x} \right]$$

$$1 - \frac{C_s}{C_o} = (1 - k) e^{-\frac{kR}{D_L} x}$$

Si se conoce que:

$$\delta = \frac{D_L}{kR}$$

Donde  $\delta$  es definida como el espesor efectivo de la capa intermetálica, por lo tanto, la ecuación queda definida como:

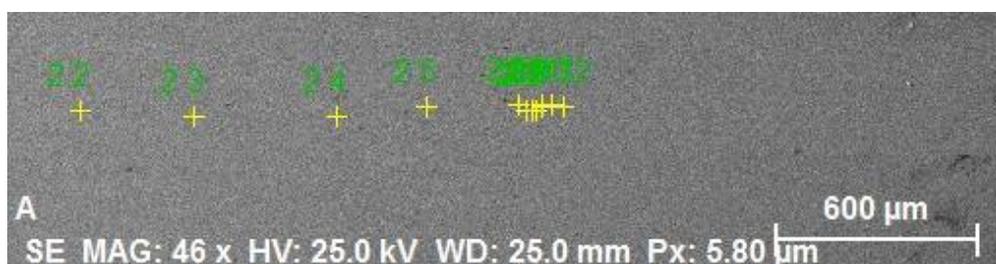
$$1 - \frac{C_s}{C_o} = (1 - k) \exp\left(-\frac{x}{\delta}\right) \quad (11)$$

Se tomarán los datos del Cromo y el Níquel para el ajuste del modelo matemático

**Tabla 15**

*Composición de Cromo y Níquel en la probeta 1D*

Distancia (um)	%Cr	%Ni
0	2.27	1.15
29	6.20	3.94
47	14.22	7.61
59	11.60	6.92
73	16.83	10.03
98	16.09	9.96



**Figura 61.** Puntos escaneados mediante la técnica SEM-EDS

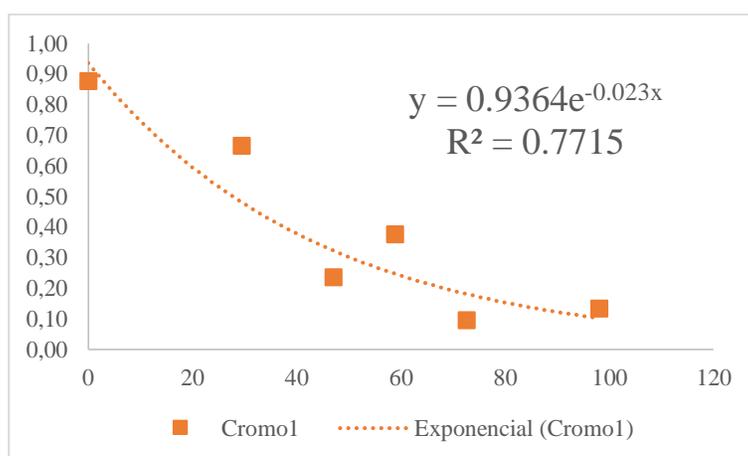
### 5.7.1. Análisis del cromo

En la Tabla 16 se muestran la composición y segregación del Cromo en la probeta 1D.

**Tabla 16**

*Ajuste del modelo de segregación al Cromo en la probeta 1D*

Distancia (um)	%Cr	$1 - \frac{C_s}{C_o}$
0	2.27	0.88
29	6.20	0.67
47	14.22	0.24
59	11.60	0.38
73	16.83	0.09
98	16.09	0.13



**Figura 62.** *Gráfica 1-C<sub>s</sub>/C<sub>o</sub> en función de la distancia x en el Cromo*

La ecuación del ajuste de la curva mostrado en la Figura 62 se la puede igualar a la Ecuación 11 quedando como resultado que el espesor efectivo de la capa intermetálica es:

$$\delta = \frac{1}{0.023} \approx 43.5 \mu m$$

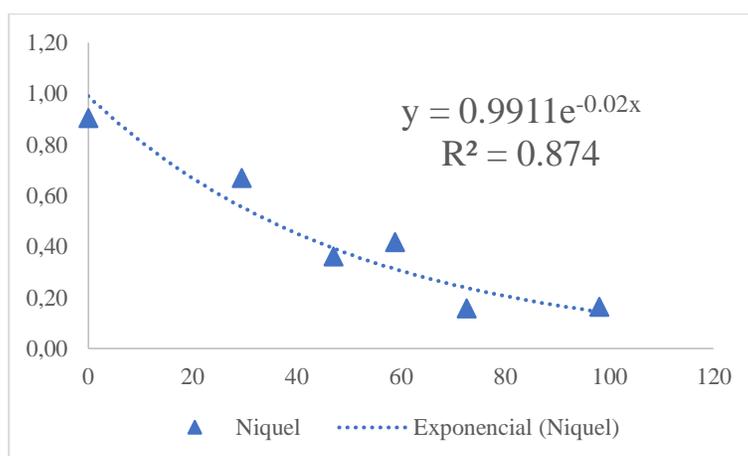
### 5.7.2. Análisis del níquel

En la Tabla 17 se muestran la composición y segregación del Níquel en la probeta 1D.

**Tabla 17**

*Ajuste del modelo de segregación al Níquel en la probeta 1D*

Distancia (um)	%Ni	$1 - \frac{C_s}{C_o}$
0	1.15	0.90
29	3.94	0.67
47	7.61	0.36
59	6.92	0.42
73	10.03	0.16
98	9.96	0.16



**Figura 63.** Gráfica  $1 - C_s/C_o$  en función de la distancia  $x$  en el Níquel

La ecuación del ajuste de la curva mostrado en la Figura 63 se la puede igualar a la Ecuación 11 quedando como resultado que el espesor efectivo de la capa intermetálica es:

$$\delta = \frac{1}{0.020} \approx 50 \mu\text{m}$$

### 5.7.3. Determinación del error porcentual

Con la ayuda de las micrografías realizadas a la probeta 1D, se tomaron las medidas de forma experimental a la longitud de la capa intermetálica como se lo demostró en el capítulo 5.3. Para comparar el porcentaje de error se determinó que el espesor experimental de capa intermetálica es:

$$\delta_{exp} \approx 42 \mu m$$

➤ Cromo

$$\%Error = \frac{\delta - \delta_{exp}}{\delta}$$

$$\%Error = \frac{43.5 - 42}{43.5} \times 100 = 3\%$$

➤ Níquel

$$\%Error = \frac{\delta - \delta_{exp}}{\delta}$$

$$\%Error = \frac{50 - 42}{50} \times 100 = 16\%$$

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

- El análisis de las estructuras metalográficas mostró la formación de una capa intermetálica en la Zona “B” conformada por los componentes del metal de aporte y metal base la cual posee una microestructura martensítica, una elevada dureza y fragilidad; además se evidencia que a mayor temperatura de precalentamiento aumenta el espesor y la dureza de la capa intermetálica.
- La capa intermetálica se formó con dos tipos de microestructuras: martensita y carburos de cromo. La martensita pudo originarse debido a la presencia del carbono en el metal base, al enfriamiento a temperatura ambiente del recubrimiento y a la capacidad de la austenita presente en el material de aporte para mantener la martensita a temperaturas bajas. Los carburos de cromo se formaron debido a que el cromo del material de aporte reaccionó con el carbono del material base durante la soldadura permitiendo la formación de estos compuestos. Estas microestructuras poseen una elevada dureza con valores desde los 55HRC en la probeta 1D hasta los 60HRC en la probeta 5D, por lo que se redujo significativamente la ductilidad del recubrimiento.
- Las propiedades de la capa intermetálica tienen una correlación directa con la temperatura de precalentamiento, con una baja temperatura de precalentamiento se obtiene una capa intermetálica delgada en el caso de la probeta 2D el espesor es de 48 micras, y a medida que se aumenta la temperatura de precalentamiento también aumenta el espesor de la capa intermetálica como en la probeta 5D, que su espesor es de 87 micras, es decir, aumentando

200°C en la temperatura de precalentamiento el espesor de la capa intermetálica aproximadamente aumento 81%. A medida que la capa intermetálica es más gruesa es más susceptible a agrietarse.

- El ensayo las tintas penetrantes mostró que a partir de los 200°C de temperatura de precalentamiento el proceso tiende a presentar más defectos en su estructura. En general el ensayo de tintas penetrantes indica que a mayor temperatura de precalentamiento existe una mayor probabilidad que aparezcan fisuras en el recubrimiento. Al evaluar el proceso se obtuvieron mejores resultados a temperaturas de precalentamiento menores a 150°C.
- En el ensayo de doblado se puede observar que el inicio de falla comenzó en la zona de fusión propagándose rápidamente hacia el material de aporte como una falla dúctil como era lo esperado, pero en el metal base se propagó como una falla frágil, resultado disímil a estudios similares (Naranjo et al., 2017), lo que es indicativo que probablemente éste poseía una microestructura frágil antes de realizarse el proceso de soldadura.
- Mediante el uso del modelo de solidificación por segregación se logró determinar el espesor teórico efectivo de la capa intermetálica ( $\delta$ ) y se encontró el error porcentual comparado con el espesor de la capa medida de forma experimental ( $\delta_{exp}$ ), dando como resultado un error del 3% empleado al cromo como soluto y un 16% empleando al níquel como soluto en la probeta 1D. De esa manera se puede determinar que el modelo de segregación es aplicable en este proceso obteniéndose buenos resultados.

## **6.2. Recomendaciones**

- Realizar análisis químicos, mecánicos y metalográfico de los elementos que intervienen en el estudio (metal base y metal de aporte) antes de realizar la soldadura de recubrimiento, para conocer con qué tipo de material exactamente se está tratando y tener un punto de referencia y confiabilidad en los resultados obtenidos.
- Efectuar un estudio más profundo sobre la técnica de revenido para aplicaciones mostradas en el presente proyecto de similar naturaleza, debido a que las propiedades mecánicas obtenidas no fueron las esperadas como resultados obtenidos en investigaciones similares y asegurar la confiabilidad de la aplicación de este tipo de técnicas.
- Desarrollar un sistema de adquisición de datos que se encuentre más tecnificado para medir y almacenar las variables esenciales del proceso de soldadura y poder garantizar una buena aplicación de la técnica de soldadura por revenido, además de poder realizar análisis posteriores con los datos almacenados.

## BIBLIOGRAFÍA

- Akhter, J., & Shoaib. (1987). *Segregation Effects in Welded Stainless Steels*. Retrieved from [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/19/011/19011992.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/19/011/19011992.pdf)
- API. (2004). *Specification for wellhead and Christmas tree equipment, API – specification 6A*. Washigton: API.
- Aplica-inox. (2011). Retrieved from <http://aplicainox.org/petroleo/>
- ASME. (2015). *ASME Boiler & Pressure Vessel Code*. New York: ASME.
- Bhaduri, A., & Gill, T. (2001). Repair welding of cracked steam turbine blades using austenitic and martensitic stainless steel consumables. *Nuclear Engineering and Desing. ResearchGate*, 249-259.
- Bstudy.net. (2018). *Procesos Metalúrgicos en la soldadura*. Retrieved from [https://bstudy.net/606600/tehnika/metallurgicheskie\\_protsesty\\_protsekayuschie\\_svarochnoy\\_vanne?fbclid=IwAR1vT0uz8HVDraGnZO2b6uwF2SKIESxFqL7jhQO5HVyDwtSBxYg7XQ9Ny74](https://bstudy.net/606600/tehnika/metallurgicheskie_protsesty_protsekayuschie_svarochnoy_vanne?fbclid=IwAR1vT0uz8HVDraGnZO2b6uwF2SKIESxFqL7jhQO5HVyDwtSBxYg7XQ9Ny74)
- Cieslak, M., & Ritter, M. (1982). Solidification Cracking and Analytical Electron Microscopy of Austenitic Stainless Steel Weld Metal. *American Welding Society*, 1-8.
- Gomez, J. (2010). *Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço ABNT 1020 utilização de arame tubular inoxidável austenítico. Dissertação de mestrado*. Retrieved from <https://saturno.unifei.edu.br/bim/0036333.pdf>
- Ikawa, H., & Shin, S. (1972). On the martensite like structure at weld bond and the macroscopic segregation in weld metal in the welded dissimilar metals of  $\delta$ -steel and  $\gamma$ -steels. *American Welding Society*, 1-4.
- Kaçar, R., & Baylan, O. (2004). An investigation of microstructure/property relationships in dissimilar welds between martensitic and austenitic stainless steel. *Materials & Design*, 317-329.

- Lázaro, A. (2012). *Propiedades y Soldabilidad de los aceros inoxidable*s. Retrieved from <https://www.solysol.com.es/data/documents/Soldabilidad=20Inox.pdf>
- Mohandas, T., & Madhusudan G. (1999). Heat-affected zone softening in high-strength low-alloy steels . *Journal of Materials Processing Technology*, 284-294.
- Naranjo, C., Ayala D., & Díaz C. (2017). Análisis del comportamiento mecánico al depositar soldadura de recubrimiento sobre el acero AISI 4130 con la técnica de soldadura de revenido. *Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, 1-4.
- Ornath, F., Soundry, J., Weiss B. Z. & Minkoff, I. (1981). Weld Pool Segregation During the Welding of Low Alloy Steels with Austenitic Electrodes . *American Welding Society*, 1-4.
- Osvarke.net. (2017). *La estructura de la zona afectada por el calor durante la soldadura*. Retrieved from <http://osvarke.net/soedineniya/zona-termicheskogo-vliyaniya/>
- Pilgarín, E. H. (2009). *Efecto de la técnica de pases de revenido en las propiedades mecánicas del acero ASTM A743: Grado CA6NM*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Pohl, R. (1954). Solute Redistribution by Recrystallization. *Journal of Applied Physics*, 6-10.
- Seferian, D. (1962). Stainless steel electrode to the ferrite steel mother metal. *The Metallurgy of Welding 303*, 3-15.
- Sun, Z., & Han, H.Y. (1994). Weldability and properties of martensitic/austenitic stainless steel joints . *Mat. Science and Technology*, 823-829.
- Tsay, L. W., & Lin, W. L. (1998). Hydrogen sulfide stress corrosion cracking of weld overlays for desulfurization reactor. *Corrosion Science*, 577-591.
- Watanabe, M., & Watanabe, I. (2002). Brittleness at bonded part of deposit metal by austenitic weld bond and the macroscopic segregation in weld metal in the welded dissimilar metals if 6-steel and y-steels. *Science and Technology of Welding and Joining* , 10-12.
- West Arco. (2018). *Cromarco 316L-16*. Retrieved from <https://www.westarco.com/westarco/sp/products/index.cfm?fuseaction=home.product&productCode=413038>