



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARACTERIZACIÓN DE JUNTAS SOLDADAS EN ACERO INOXIDABLE AISI 304 MEDIANTE LOS PROCESOS SMAW, GMAW Y GTAW

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

FLORES SUÁREZ CARLOS ANDRÉS
carlos.flores03@epn.edu.ec

SUÁREZ GAVILANES JUAN CARLOS
juan.suarez@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. BARRAGÁN CAMPOS GALO HOMERO, M.Sc.
homero.barragan@epn.edu.ec

COLABORADOR: Ing. VELASTEGUÍ BALDA GABRIEL EDMUNDO, M.Sc.
gabriel.velastegui@epn.edu.ec

Quito, junio 2020

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por **FLORES SUÁREZ CARLOS ANDRÉS** y **SUÁREZ GAVILANES JUAN CARLOS**, bajo nuestra supervisión.

Ing. Homero Barragán, M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Gabriel Velasteguí, M.Sc.

COLABORADOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **Flores Suárez Carlos Andrés** y **Suárez Gavilanes Juan Carlos**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Flores Suárez Carlos Andrés

Suárez Gavilanes Juan Carlos

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres, porque con su esfuerzo y bendición supieron iluminar mi camino para cumplir esta meta.

Carlos Andrés Flores

Este trabajo de titulación se lo dedico a mis padres, quienes supieron apoyarme desde el inicio de mi carrera hasta la conclusión, quienes con sus palabras y consejos nunca dejaron que me rindiera, a pesar de estar lejos siempre estuvieron ahí para mí.

A mi hermano Luis, quien siempre me apoyó con lo que más pudo a lo largo de la carrera, la distancia nos unió más.

A la FIM la cual cambió mi vida para bien haciéndome ganar gratas experiencias.

Juan Suárez

AGRADECIMIENTO

A Dios, por su infinita bondad y por todas las capacidades que nos regala para poder enfrentar cualquier desafío.

A mis padres Julio y Vilma, porque con sus acciones demuestran todo el amor que tienen por sus hijos.

A mi hermano mellizo Edison, desde que tengo uso de razón ha estado junto a mí para alegrarme la vida con sus locuras.

A mi hermano Christian, con su experiencia siempre ha sabido guiarme y aconsejarme para poder ser mejor persona.

A mi sobrino Joel Flores, a su corta edad alegra la vida de todas las personas que lo rodean.

A mis primos y primas, siempre los he admirado y visto como ejemplos a seguir, nunca cambien.

A mi querida Escuela Politécnica Nacional, por los amigos verdaderos y las experiencias invaluable que he vivido.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica, por ser ese segundo hogar donde recibí una formación de calidad.

Al Ingeniero Homero Barragán, por darme la oportunidad de realizar el trabajo de titulación bajo su dirección, siempre nos apoyó acertadamente para avanzar con la tesis.

Al Ingeniero Gabriel Velasteguí, por ayudarnos siempre a solventar nuestras inquietudes y guiarnos para hacer las cosas bien.

Al GREAT WELDER Jorge Guzmán, siempre nos ayudó de la mejor manera, nos hizo reír y nos dijo las cosas como son.

A la Metalmecánica San Bartolo, a todos los laboratorios donde realizamos las diferentes pruebas para nuestra tesis y a las personas que trabajan en ellos, con su apoyo este trabajo se materializó.

A mis amigas y amigos dentro y fuera de la universidad, siempre han estado conmigo ya sea para ir a un almuerzo o para conversar, gracias por compartir su tiempo conmigo.

A mi compañero de tesis y amigo Juan Suárez, durante el transcurso de nuestro proyecto de titulación hemos sabido comprender y respetar nuestros criterios y trabajar en equipo para alcanzar nuestro objetivo.

A mi tutor el Ingeniero Carlos Díaz, por ser una excelente guía durante mi vida estudiantil en la EPN.

A la Empresa Pública de Hidrocarburos del Ecuador, más conocida como EP Petroecuador, en especial a todas las personas de la Jefatura de Mantenimiento del Poliducto Quito-Ambato-Riobamba, por brindarme la oportunidad de realizar mis prácticas preprofesionales y aprender con ellos.

Carlos Andrés Flores

Agradezco a Dios por todas las bendiciones, como son la salud y fuerza para completar mi meta.

A mis padres Juan y Aida quienes siempre me brindaron su apoyo incondicional y me enseñaron a nunca darme por vencido, que todo sacrificio al final es bien recompensado. Agradezco mucho sus consejos a lo largo de mi vida.

A mi hermano que siempre estuvo ahí apoyándome a pesar de la distancia, siempre estaré dispuesto a ayudarte, aconsejarte y guiarte en el camino que elijas en tu vida.

A mis tíos Carlos y Mariana quienes fueron como unos segundos padres durante mi vida universitaria, quienes me abrieron más que las puertas de su casa, me abrieron las puertas de su corazón siempre estuvieron brindándome sus consejos y apoyo.

A mis primos con quienes se compartieron grandes experiencias y desmadres a lo largo de mi vida universitaria.

A mi amigo y compañero de tesis Carlos Flores, con quien finalizamos este proyecto de titulación, gracias por toda la comprensión y apoyo durante el desarrollo del proyecto.

Al Ingeniero Alex Núñez, por abrirme las puertas para poder realizar las pasantías, con quien empezamos solo como conocidos, pero terminamos como amigos, quien supo apoyarnos con disponibilidad y comprensión en el desarrollo de este proyecto.

Agradezco a los Ingenieros Homero Barragán y Gabriel Velastegui, quienes con sus conocimientos supieron guiarnos para el desarrollo de este proyecto de titulación.

Agradezco al “WELDERMAN API1104”, Jorge Guzmán quien nos prestó su paciencia para la parte experimental del proyecto, gracias por la disponibilidad y comprensión dada.

Agradezco a La Metalmecánica San Bartolo, a los laboratorios de: ensayos no destructivos, soldadura y análisis de esfuerzos y vibraciones, los cuales nos brindaron su apoyo y consejo para desarrollar de mejor manera el proyecto.

Agradezco al grupo de amigos LOS CAMARADAS de los cuales puede ser un integrante, con ellos se vivieron grandes momentos donde aprendí lo que es ser un grupo unido. Y al resto de amigos que fueron sumándose a mi vida a lo largo de carrera.

Juan Suárez

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
1. MARCO TEÓRICO	4
1.1. Aceros inoxidables	4
1.1.1. Denominaciones de los aceros.....	5
1.1.2. Aceros inoxidables austeníticos (series 200 y 300).....	5
1.1.3. Acero AISI 304	7
1.2. Microestructura del acero AISI 304	7
1.3. Transformación de ferrita a austenita en soldaduras de aceros inoxidables austeníticos	8
1.3.1. Modos de solidificación primaria.....	8
1.4. Soldadura con arco	12
1.5. Soldadura SMAW.....	13
1.6. Soldadura GMAW	14
1.7. Soldadura GTAW	15
1.8. Ensayos no destructivos	17
1.8.1. Inspección visual	17
1.8.2. Tintas penetrantes.....	18
1.8.3. Radiografía industrial.....	19
1.9. Metalurgia de la soldadura	20
1.9.1. Regiones de la soldadura por fusión.....	20
1.10. Soldabilidad	22
2. METODOLOGÍA	24
2.1. Adquisición del material base.....	24
2.2. Obtención de placas.....	25
2.2.1. Equipo para corte de las placas.....	25
2.2.2. Corte de las placas	26
2.3. Preparación de placas para soldadura	26
2.4. Caracterización del material base	27
2.4.1. Características del equipo de espectrometría	28
2.4.2. Procedimiento del ensayo de caracterización	28
2.5. Soldadura de placas con procesos SMAW, GMAW y GTAW	29
2.5.1. Selección del gas de protección	30

2.5.2.	Equipo para soldadura SMAW y GTAW	31
2.5.3.	Equipo para soldadura GMAW	31
2.5.4.	Soldadura con proceso SMAW	33
2.5.5.	Soldadura con proceso GMAW.....	33
2.5.6.	Soldadura con proceso GTAW	34
2.6.	Ejecución de los Ensayos No Destructivos.....	35
2.6.1.	Codificación de juntas soldadas para la realización de los END	36
2.6.2.	Ejecución del ensayo de inspección visual	37
2.6.3.	Criterios de aceptación para el ensayo de inspección visual	38
2.6.4.	Ejecución del ensayo de tintas penetrantes.....	38
2.6.5.	Ejecución del ensayo de radiografía industrial.....	40
2.7.	Corte de probetas mediante chorro de agua	42
2.8.	Ensayos Destructivos.....	44
2.8.1.	Maquinado de probetas para ensayo de tracción	44
2.8.2.	Equipo utilizado para el ensayo de tracción.....	45
2.8.3.	Ensayo de tracción	46
2.8.4.	Criterio de aceptación para la prueba de tracción.....	47
2.8.5.	Equipo utilizado para el doblado de cara y raíz.....	47
2.8.6.	Doblado de cara y raíz.....	48
2.8.7.	Criterios de aceptación para el doblado de cara y raíz	49
2.9.	Metalografías	50
2.9.1.	Preparación de las muestras	50
2.9.2.	Equipo para pulido de muestras	51
2.9.3.	Pulido de muestras.....	51
2.9.4.	Equipo para metalografías.....	52
2.9.5.	Micrografías.....	54
2.9.6.	Diagrama Schaeffler	55
2.9.7.	Macrografías.....	56
2.9.8.	Criterios de aceptación en las macrografías	56
2.10.	Barrido de dureza.....	56
2.10.1.	Equipo para barrido de dureza.....	56
2.10.2.	Ejecución del barrido de dureza.....	57
2.11.	Análisis de costos de los procesos de soldadura	58
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
3.1.	Resultados del análisis de composición química.....	61
3.2.	Resultados de los END	62

3.2.1.	Resultados del ensayo de inspección visual.....	62
3.2.2.	Resultados del ensayo de tintas penetrantes.....	69
3.2.3.	Resultados del ensayo de radiografía industrial.....	73
3.3.	Resultados de los ED.....	76
3.3.1.	Resultados del ensayo de tracción	76
3.3.2.	Resultados de los doblados de cara y raíz	77
3.4.	Resultados del estudio metalográfico.....	79
3.4.1.	Resultados de las micrografías.....	79
3.4.2.	Resultados del Diagrama Schaeffler.....	84
3.4.3.	Resultados de las macrografías.....	85
3.5.	Resultados del barrido de dureza.....	86
3.6.	Resultados del análisis de costos de los procesos.....	88
3.7.	Discusión de los resultados.....	88
3.7.1.	Discusión del análisis de composición química.....	88
3.7.2.	Discusión del ensayo de inspección visual	88
3.7.3.	Discusión del ensayo de tintas penetrantes.....	89
3.7.4.	Discusión del ensayo de radiografía industrial	89
3.7.5.	Discusión del ensayo de tracción.....	90
3.7.6.	Discusión del doblado de cara y raíz	90
3.7.7.	Discusión de las micrografías	90
3.7.8.	Discusión del diagrama Schaeffler.....	90
3.7.9.	Discusión de las macrografías.....	91
3.7.10.	Discusión del barrido de dureza.....	91
3.7.11.	Discusión del análisis de costos	91
3.7.12.	Discusión de propiedades mecánicas, costos y ZAC.....	91
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	93
4.1.	Conclusiones.....	93
4.2.	Recomendaciones	94
	Referencias Bibliográficas	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Clasificación de los aceros.....	4
Figura 1.2. Microestructura del acero AISI 304 atacado con NaOH acuoso al 20% a 3 V con DC durante 20 segundos.	8
Figura 1.3. Sistema ternario Fe-Cr-Ni, superficie líquida.....	9
Figura 1.4. Sistema ternario Fe-Cr-Ni, superficie sólida.	9
Figura 1.5. Esquemas que muestran la transformación de solidificación y post-solidificación en soldaduras de aceros inoxidable.	10
Figura 1.6. Estructura de solidificación en el centro de la soldadura (a) Acero inoxidable 310 (b) Acero inoxidable 309. Aumento 190x.	11
Figura 1.7. Los diagramas de fases Fe-Cr-Ni pseudo-binarios: (a) a 55% en peso de Fe, (b) a 63% en peso de Fe, (c) a 73% en peso de Fe.	11
Figura 1.8. Estructura de solidificación con enfriamiento de estaño líquido cerca del charco de soldadura en una soldadura GTAW de acero inoxidable 309.....	12
Figura 1.9. Configuración y circuito eléctrico en un proceso de soldadura con arco.	13
Figura 1.10. Esquema del proceso de soldadura por arco metálico protegido, SMAW. ...	14
Figura 1.11. Soldadura con arco de metal y gas (GMAW).	14
Figura 1.12. Proceso de soldadura por arco de tungsteno y gas conocido como soldadura TIG (Tungsten Inert Gas).....	16
Figura 1.13. Equipo para las operaciones de soldadura por arco de tungsteno y gas.....	16
Figura 1.14. Configuraciones del electrodo de tungsteno.	16
Figura 1.15. Esquema del procedimiento para el ensayo de tintas penetrantes.....	18
Figura 1.16. Esquema de la toma de una radiografía.....	19
Figura 1.17. Esquema temprano de las regiones de una soldadura por fusión.	21
Figura 1.18. Regiones de una soldadura por fusión.	21
Figura 1.19. Representación esquemática moderna de las regiones en una soldadura por fusión.....	22
Figura 1.20. Características de una zona normal en una junta soldada con soldadura con oxígeno y combustible gaseosos y por arco eléctrico.	22
Figura 2.1. Diagrama de la metodología experimental del trabajo de titulación.....	24
Figura 2.2. Plancha adquirida de material base.	24
Figura 2.3. Esquema de placas cortadas.....	25
Figura 2.4. Corte de placas con cizalla hidráulica	26
Figura 2.5. Preparación de placas con puentes previo a la soldadura.	27

Figura 2.6. Equipo para determinar la composición química.	27
Figura 2.7. Muestra colocada en el equipo.	29
Figura 2.8. Placas previo a realizar su unión con los diferentes procesos de soldadura. .	29
Figura 2.9. Soldadora para procesos SMAW y GTAW.....	31
Figura 2.10. Soldadora para proceso GMAW.....	32
Figura 2.11. Junta soldada con proceso SMAW.	33
Figura 2.12. Junta soldada con proceso GMAW.	34
Figura 2.13. Junta soldada con proceso GTAW.....	34
Figura 2.14. Gel decapante empleado para limpiar los cordones de soldadura.	35
Figura 2.15. Aplicación de gel decapante en juntas soldadas.	35
Figura 2.16. Medición de la sobremonta en el cordón de soldadura.	37
Figura 2.17. Kit de tintas.	38
Figura 2.18. Placa soldada con proceso SMAW luego de aplicar el líquido penetrante. ...	39
Figura 2.19. Placa soldada con proceso GMAW luego de aplicar el líquido penetrante. ...	39
Figura 2.20. Placa soldada con proceso GTAW luego de aplicar el líquido penetrante....	40
Figura 2.21. Película radiográfica colocada en la raíz del cordón de soldadura.	41
Figura 2.22. Ubicación de las probetas para los ensayos de tracción y para los doblados de raíz y cara.	42
Figura 2.23. Corte de las probetas utilizando chorro de agua.	43
Figura 2.24. Dimensiones normalizadas para la probeta de tracción.	44
Figura 2.25. Maquinado de probetas en la fresadora de la MSB.....	44
Figura 2.26. Probetas de cada proceso de soldadura para ensayo de tracción.	45
Figura 2.27. Probetas de material base para ensayo de tracción.....	45
Figura 2.28. Máquina universal para ensayo de tracción.	45
Figura 2.29. Probeta en la máquina universal de ensayos.....	46
Figura 2.30. Prensa hidráulica para ensayo de doblado.	47
Figura 2.31. JIG utilizado para los doblados de raíz y cara.	48
Figura 2.32. Ensayo de doblado en una de las probetas.	49
Figura 2.33. Muestra para metalografía.	50
Figura 2.34. Muestra colocada en un disco de resina.	50
Figura 2.35. Pulido de las probetas.....	52
Figura 2.36. Probetas listas para realizar las metalografías.	52
Figura 2.37. Microscopio para macrografías.	53
Figura 2.38. Microscopio para micrografías.	53
Figura 2.39. Diagrama Schaeffler.	55
Figura 2.40. Durómetro.....	57

Figura 2.41. Puntos donde se mide la dureza de las muestras soldadas.....	58
Figura 2.42. Puntos donde se mide la dureza del material base.....	58
Figura 3.1. Resultados del ensayo de tracción en las probetas.....	77
Figura 3.2. Ubicación en el Diagrama Schaeffler de las cantidades de Cromo y Níquel equivalente.....	84
Figura 3.3. Barrido de dureza para las muestras de las juntas soldadas.....	87
Figura 3.4. Desviación porcentual en las propiedades evaluadas.....	92

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Propiedades mecánicas a temperatura ambiente y aplicaciones típicas de aceros inoxidables recocidos seleccionados.	6
Tabla 2.1. Especificaciones técnicas del equipo de corte de placas.	25
Tabla 2.2. Detalles técnicos del equipo de espectrometría.	28
Tabla 2.3. Composición del metal depositado.	30
Tabla 2.4. Propiedades mecánicas del metal depositado.	30
Tabla 2.5. Datos técnicos de la soldadora empleada para SMAW y GTAW.	31
Tabla 2.6. Descripción técnica de la máquina soldadora para el proceso GMAW.	32
Tabla 2.7. Codificación en las juntas soldadas previo a los END.	36
Tabla 2.8. Identificación en las juntas soldadas.	36
Tabla 2.9. Características del equipo para radiografía industrial.	40
Tabla 2.10. Identificación de las películas en cada placa soldada.	41
Tabla 2.11. Características técnicas de la cortadora por chorro de agua y abrasivo.	43
Tabla 2.12. Características técnicas del equipo para ensayo de tracción.	46
Tabla 2.13. Características técnicas del equipo para ensayo de doblado.	47
Tabla 2.14. Características técnicas de la pulidora para muestras.	51
Tabla 2.15. Especificación técnica del microscopio para macrografía.	53
Tabla 2.16. Especificación técnica del microscopio para macrografía.	54
Tabla 2.17. Especificación técnica del durómetro.	57
Tabla 3.1. Resultado de la composición química del material base.	61
Tabla 3.2. Composición química nominal del material base.	61
Tabla 3.3. Resultado del ensayo de inspección visual en las juntas soldadas.	62
Tabla 3.4. Acabado de los cordones en los procesos de soldadura.	68
Tabla 3.5. Resultado del ensayo de tintas penetrantes en la junta soldada con SMAW.	69
Tabla 3.6. Resultado del ensayo de tintas penetrantes en la junta soldada con GMAW.	71
Tabla 3.7. Resultado del ensayo de tintas penetrantes en la junta soldada con GTAW.	72
Tabla 3.8. Resultados del ensayo de radiografía industrial en la junta soldada empleando SMAW.	74
Tabla 3.9. Resultados del ensayo de radiografía industrial en la junta soldada empleando GMAW.	75
Tabla 3.10. Resultados del ensayo de radiografía industrial en la junta soldada empleando GTAW.	76
Tabla 3.11. Resultado del ensayo de tracción.	77
Tabla 3.12. Resultados del doblado de cara y raíz en las juntas soldadas.	78

Tabla 3.13. Micrografías de las muestras con aumento de 100X.....	80
Tabla 3.14. Micrografías de las muestras con aumento de 500X.....	82
Tabla 3.15. Macrografías de las muestras soldadas.....	85
Tabla 3.16. Dureza del material base.....	86
Tabla 3.17. Dureza de la muestra soldada con proceso SMAW.....	86
Tabla 3.18. Dureza de la muestra soldada con proceso GMAW.....	86
Tabla 3.19. Dureza de la muestra soldada con proceso GTAW.....	87
Tabla 3.20. Costos de los procesos de soldadura.....	88
Tabla 3.21. Evaluación de propiedades mecánicas, costos y ZAC de los procesos realizados.....	92

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar las juntas soldadas en acero inoxidable AISI 304 mediante los procesos de soldadura SMAW, GMAW y GTAW. Para esto se relaciona cambios en la microestructura, ZAC, propiedades mecánicas y costos en cada proceso. Con la finalidad de comprobar la composición del material base adquirido se realizó un ensayo de espectrometría de emisión por chispa el cual indica la composición real del material y mediante el ensayo de tracción se pudo verificar las propiedades mecánicas de dicho material. Para el análisis experimental se prepararon las placas con la separación y bisel adecuado para cada proceso. Una vez obtenidas las juntas soldadas se realizaron los ensayos no destructivos de: inspección visual, tintas penetrantes y radiografía industrial. También se realizó ensayos destructivos: ensayo de tracción, doblado de cara y raíz. Adicionalmente, se efectuaron barridos de dureza con escala Rockwell B de las zonas cercanas a la soldadura. La norma AWS D1.6 fue tomada como referencia para establecer los criterios de aceptación de los ensayos realizados. Se realizó comparaciones entre los tres procesos para determinar cuál de ellos: produce cordones con mayor resistencia a tracción, menor ZAC y genera menor costo. Estos resultados sirvieron para establecer el proceso más adecuado para la soldadura del material en estudio. Finalmente, se determinó que el proceso GMAW es el más conveniente desde el punto de vista técnico y financiero para la soldadura en placas de acero inoxidable AISI 304.

Palabras clave: acero inoxidable AISI 304, espectrometría, SMAW, GMAW, GTAW, ZAC.

ABSTRACT

The aim of this work is to characterize the welded joints in stainless steel AISI 304 by means of the welding processes SMAW, GMAW and GTAW. In that way, changes in microstructure, HAZ, mechanical properties and costs in each process are related. In order to check the purchased base material composition, a spectrometry analysis by spark emission was made, this analysis reveals the material actual composition. Also, a tensile test was done to verify the mechanical properties of this material. For the experimental analysis, the plates were prepared with the right separation and bevel for each process. Once the welded joints were obtained, non destructive tests were made visual testing, liquid penetrant and radiographic. Destructive tests were performed as well: tensile test, face and root bent. In addition, hardness mappings with Rockwell B scale at the welding surroundings were done. AWS D1.6 standard was taken as a reference to establish the acceptance criteria of the performed tests. Comparisons among the three process were done to define which one produces: welding with higher tensile strength, smaller HAZ and involves less cost. These results were used to find the most suitable process for the welding of the studied material. Finally, it was found that the most adequate process considering both technical and economic aspects for the plate welding of the stainless steel AISI 304 was GMAW.

Keywords: stainless steel AISI 304, spectrometry, SMAW, GMAW, GTAW, HAZ.

“CARACTERIZACIÓN DE JUNTAS SOLDADAS EN ACERO INOXIDABLE AISI 304 MEDIANTE LOS PROCESOS SMAW, GMAW Y GTAW”

INTRODUCCIÓN

Cuando se quiere soldar un material y tomando en cuenta que existen diversos procesos de soldadura, es importante conocer el proceso más adecuado para un material específico. En ese sentido, en este trabajo se pretende determinar cuál es el proceso más conveniente para soldar acero inoxidable AISI 304, que es un acero inoxidable austenítico con una amplia gama de aplicaciones en diferentes industrias debido a su alta resistencia a la corrosión, por ejemplo, construcción soldada, equipo ligero de transporte, partes para hornos e intercambiadores de calor, componentes para ambientes químicos severos, artículos de cocina, etc. Para esto, en el presente proyecto de titulación, se consideran los procesos de soldadura SMAW, GMAW y GTAW; además, se realiza una caracterización de las juntas soldadas utilizando dichos procesos. La caracterización implica ejecutar una serie de pruebas como análisis de composición química, ensayos no destructivos, ensayos destructivos, análisis de propiedades mecánicas, estudio metalográfico, barrido de dureza y análisis de costos que permiten establecer técnica y económicamente el proceso más idóneo para la soldadura del mencionado acero inoxidable. Como se quiere comparar tres procesos de soldadura para un mismo material se establecen las mismas condiciones de soldadura, es decir, se realizan los procesos de soldadura en placas con la misma geometría, se suelda en la misma posición, se hace solamente un pase, se utilizan electrodos similares, la misma técnica de avance, etc.; con el fin de tener especificaciones de soldadura lo más parecidas posibles para hacer un adecuado contraste entre los procesos. Al concluir el presente proyecto se tiene un análisis completo de los tres procesos de soldadura empleados con placas de acero inoxidable. De esta forma, se puede establecer de forma cuantitativa y cualitativa considerando diversos aspectos técnicos y económicos, qué proceso es más conveniente. Al tener una idea clara sobre los resultados que presentan los procesos de soldadura en este material específico, se puede utilizar este proyecto como una guía para tomar decisiones en cuanto a la calidad de soldadura, soldabilidad o inversión económica que representa soldar sobre un material tan ampliamente utilizado. Si se conoce con certeza los resultados obtenidos en un trabajo bajo ciertas condiciones, se puede tomar decisiones más acertadas cuando se tenga que realizar una soldadura en el mismo material, en este caso, Acero Inoxidable AISI 304. Por lo tanto, y para fines prácticos, una industria que necesite utilizar juntas soldadas con este

material puede encontrar información de utilidad en este estudio, tanto en lo que se relaciona con la parte metodológica, es decir el proceso empleado para la caracterización de las juntas soldadas, así como para un análisis más práctico que tiene que ver con los resultados detallados en este trabajo.

Objetivo general

Caracterizar las juntas soldadas en acero inoxidable AISI 304 mediante los procesos SMAW, GMAW y GTAW.

Objetivos específicos

- Analizar la ZAC que presenta el material base al aplicar los tres procesos de soldadura.
- Determinar cuál de los tres procesos presenta mejores propiedades en el cordón de soldadura.
- Comparar entre los tres procesos cuál resulta mejor para este tipo de acero tanto en propiedades mecánicas, costos y afectación al material por ZAC.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Aceros inoxidables

El acero es una aleación de hierro que tiene un contenido de carbono que varía entre 0,02% y 2,11%. Es frecuente que también incluya otros elementos de aleación: manganeso, cromo, níquel y molibdeno; sin embargo, es el contenido de carbono lo que convierte al hierro en acero. Existen numerosas composiciones de acero disponibles en el mercado. Se pueden agrupar en: 1) aceros al carbono simples, 2) aceros de baja aleación, 3) aceros inoxidables y 4) aceros para herramientas. Estos a su vez se dividen en subcategorías como se indica en la Figura 1.1.

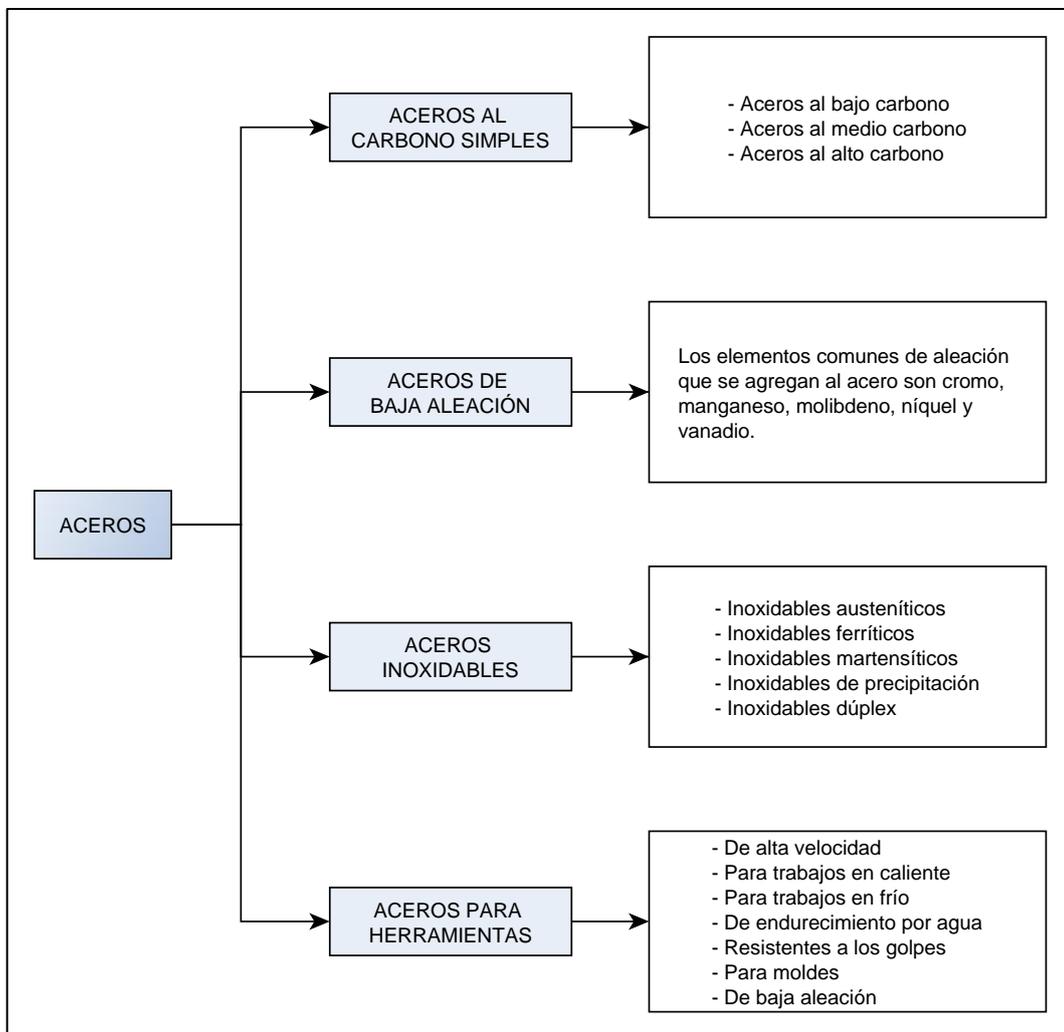


Figura 1.1. Clasificación de los aceros.
(Fuente: Propia)

Los aceros inoxidable son un grupo de aceros altamente aleados diseñados para proporcionar gran resistencia a la corrosión (Groover, 2009). El elemento principal de la aleación del acero inoxidable es el cromo, generalmente en un porcentaje superior al 15%. El cromo en la aleación forma una película de óxido impermeable, delgada, que en una atmósfera oxidante protege a la superficie de la corrosión. El níquel es otro elemento de aleación que se emplea en ciertos aceros inoxidables para aumentar la protección contra la corrosión. El carbono se utiliza para dar resistencia y endurecer el metal. Además de la resistencia a la corrosión los aceros inoxidables se destacan por su combinación de resistencia y ductilidad. Los aceros inoxidables son significativamente más caros que los aceros al carbono o los de baja aleación.

1.1.1. Denominaciones de los aceros

Tradicionalmente, el American Iron and Steel Institute (AISI) y la Society of Automotive Engineers (SAE) han denominado los aceros al carbono y aleados utilizando cuatro dígitos. Los dos primeros dígitos indican los elementos aleantes y sus porcentajes; y los dos últimos indican el contenido de carbono en peso. Las denominaciones de la American Society for Testing and Materials (ASTM) son otro sistema de numeración que reúne las denominaciones AISI y SAE e incluye especificaciones estándar para los productos de acero. Para los metales ferrosos, la denominación consiste en la letra "A" seguida generalmente de tres números arbitrarios.

Al sistema de numeración actual se le conoce como Sistema Unificado de Numeración (UNS, por sus siglas en inglés) y ha sido ampliamente adoptado por las industrias de metales ferrosos y no ferrosos. Consta de una letra que indica la clase general de la aleación, seguida de cinco dígitos que denominan su composición química. (Kalpakjian, 2008). Las letras que se utilizan para su denominación son:

G: para aceros AISI y SAE al carbono y aleados.

J: para aceros fundidos.

K: para aceros diversos y aleaciones ferrosas.

S: para aceros inoxidables y superaleaciones.

T: para aceros para herramientas.

1.1.2. Aceros inoxidables austeníticos (series 200 y 300)

Generalmente, estos aceros están compuestos de cromo, níquel y manganeso en hierro. No son magnéticos y tienen excelente resistencia a la corrosión, sin embargo, son

susceptibles al agrietamiento por esfuerzo-corrosión. Los aceros inoxidable austeníticos se endurecen mediante el trabajo en frío. Son los aceros inoxidable más dúctiles y se pueden formar con facilidad, aunque su formabilidad se reduce con mayor trabajo en frío. Se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones como: artículos de cocina, accesorios, construcción soldada, equipo ligero de transporte, partes para hornos e intercambiadores de calor y componentes para ambientes químicos severos (Kalpakjian, 2008).

En general, los aceros inoxidable recocidos se dividen en cinco tipos como se indica en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Propiedades mecánicas a temperatura ambiente y aplicaciones típicas de aceros inoxidable recocidos seleccionados.

Propiedades mecánicas a temperatura ambiente y aplicaciones típicas de aceros inoxidable recocidos seleccionados				
AISI (UNS)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Características y aplicaciones típicas
303 (S30300)	550 – 620	240 – 260	53 – 50	Productos de máquinas roscadoras (flechas, válvulas, pernos, bujes y tuercas) y accesorios para aeronaves (pernos, tuercas, remaches, tornillos, espárragos).
304 (S30400)	5 – 620	240 – 290	60 – 55	Equipo químico y de proceso de alimentos, recipientes criogénicos, canales, caños y placas de escurrimiento.
316 (S31600)	50 – 590	210 – 290	60 – 55	Alta resistencia a la corrosión y alta resistencia a la termofluencia, equipo químico y para manejo de pulpas, equipo fotográfico, cubas para brandy, partes para fertilizadoras, jarras para cocinar salsa de tomate y tinas para levadura.
410 (S41000)	480 – 520	240 – 310	35 – 25	Partes para máquinas, flechas para bombas, pernos, bujes, canales para carbón, cuchillería, polipastos, herramientas, partes para motores de aviones, maquinaria para minería, cañones para armas, tornillos y válvulas.
416 (S41600)	480 – 520	275	30 – 20	Accesorios para aviones, pernos, tuercas, insertos para extinción de incendios, remaches y tornillos.

(Fuente: Kalpakjian, 2008)

En los aceros inoxidable austeníticos su composición normal es alrededor de 18% de Cr y 8% de Ni, y son los más resistentes a la corrosión de los tres grupos (entre los austeníticos, ferríticos y martensíticos). Debido a esa composición, en ocasiones se les identifica como inoxidable 18-8. No son magnéticos y son muy dúctiles, pero muestran un endurecimiento por trabajo significativo. El níquel tiene el efecto de aumentar la región austenítica en el diagrama de fase hierro-carbono, lo cual los hace estables a temperatura

ambiente. Los aceros inoxidable austeníticos se utilizan para fabricar equipo de procesamiento químico y de alimentos, y también piezas de maquinaria que requieren alta resistencia a la corrosión (Groover, 2009).

1.1.3. Acero AISI 304

El acero inoxidable austenítico AISI 304 es uno de los más usados en la actualidad debido a su buena resistencia a la corrosión y costo. Este acero posee gran resistencia a los ácidos más oxidantes lo cual hace más fácil desinfectar haciéndolo ideal para usos domésticos, alimenticios, químicos y farmacéuticos. Entre las debilidades de este acero está el ambiente costero y soluciones de cloruros los cuales le generan corrosión.

El acero AISI 304 presenta en su composición de 16 a 24 por ciento de cromo el cual le ayuda a generar la película protectora contra la corrosión, hasta 35 por ciento de níquel el cual también le ayuda a generar una película protectora y también carbono y magnesio los cuales le ayudan a tener buenas propiedades mecánicas.

1.2. Microestructura del acero AISI 304

Las microestructuras de los aceros inoxidables pueden ser bastante complejas. Las estructuras de la matriz varían de acuerdo con el tipo de acero inoxidable como ferrítico, austenítico, martensítico, endurecible por precipitación o dúplex. Se puede observar un amplio rango de constituyentes de segunda fase, con la soldadura o la exposición a alta temperatura incrementa la complejidad (ASM INTERNATIONAL, 2004).

Los aceros inoxidables más comúnmente utilizados son los grados austeníticos, de los cuales los AISI 302, 304 y 316 son los grados forjados más populares y CF-8, CF-8M son los grados fundidos más populares. Estas categorías contienen 16% o más de cromo, un elemento estabilizante de ferrita, y suficientes elementos estabilizantes de austenita, como carbono, nitrógeno, níquel y manganeso para hacer que la austenita sea estable a temperatura ambiente. En la Figura 1.2 se observa la microestructura del acero inoxidable AISI 304 atacado con hidróxido de sodio. Esta microestructura corresponde a una matriz austenítica con ferrita-delta en forma alargada.

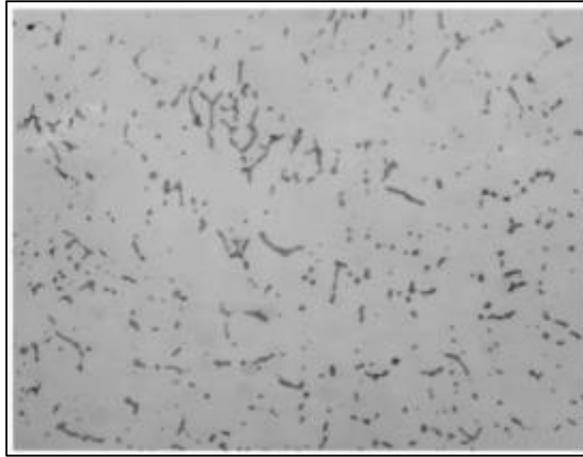


Figura 1.2. Microestructura del acero AISI 304 atacado con NaOH acuoso al 20% a 3 V con DC durante 20 segundos.
(Fuente: ASM INTERNATIONAL, 2004)

1.3. Transformación de ferrita a austenita en soldaduras de aceros inoxidables austeníticos

1.3.1. Modos de solidificación primaria

Las soldaduras de aceros inoxidables austeníticos normalmente tienen una matriz de austenita (FCC) con cantidades variables de ferrita-delta (BCC). Una cantidad adecuada de ferrita-delta en las soldaduras de aceros inoxidables austeníticos es esencial. Demasiada ferrita-delta (\geq al 10% en volumen) tiende a reducir la ductilidad, dureza y resistencia a la corrosión; mientras que, muy poca ferrita-delta (\leq al 5% en volumen) puede resultar en fisuras por solidificación (Kou, 2003).

a. Diagrama de fases

Las Figuras 1.3 y 1.4 muestran el diagrama de fase ternario del sistema Fe-Cr-Ni. La línea curva remarcada de la Figura 1.3 representa el canal en la superficie de líquido, la cual es conocida como la línea de saturación doble. La línea cae desde la temperatura de reacción peritética Fe-Ni hasta el punto eutéctico ternario en 49Cr-43Ni-8Fe. Las aleaciones con una composición rica en Cr (en la parte superior del diagrama) tienen ferrita-delta como fase de solidificación primaria, es decir, la fase sólida para formarse desde líquido. Por otro lado, las aleaciones con una composición rica en Ni (en la parte inferior del diagrama) tienen austenita como fase de solidificación primaria. Las curvas remarcadas en la superficie sólida de la Figura 1.4 siguen parcialmente la tendencia del canal líquido y convergen en la temperatura eutéctica ternaria.

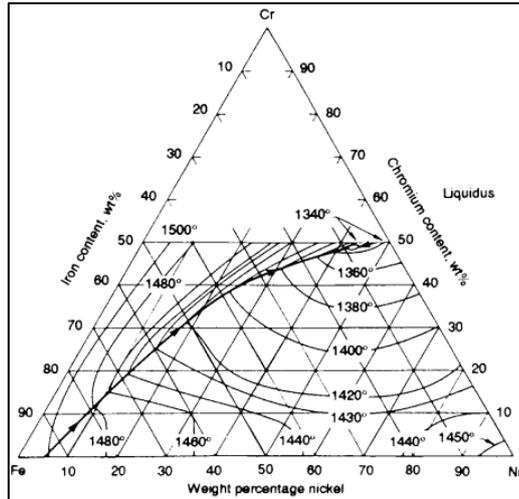


Figura 1.3. Sistema ternario Fe-Cr-Ni, superficie líquida.
(Fuente: Kou, 2003)

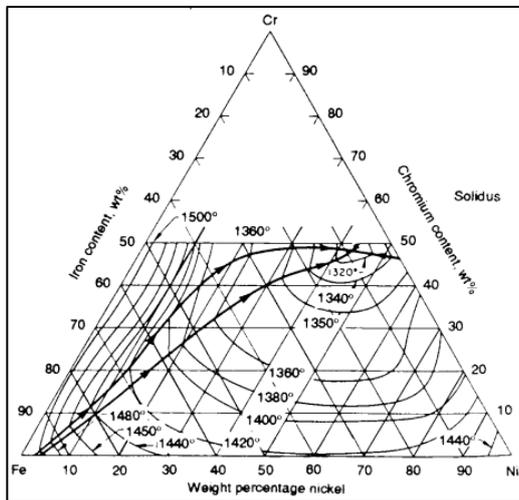


Figura 1.4. Sistema ternario Fe-Cr-Ni, superficie sólida.
(Fuente: Kou, 2003)

El desarrollo de la microestructura de la soldadura en los aceros inoxidable austeníticos se explica en la Figura 1.5. La ferrita del metal de soldadura puede tener tres tipos diferentes de morfología: interdendrítico (Figura 1.5.a), vermicular (Figura 1.5.b) y lathy (Figura 1.5.c). En la Figura 1.5.d se muestra una sección vertical del diagrama de fase ternario de la Figura 1.3, por ejemplo, al 70% en peso de Fe y sobre los 1200°C.

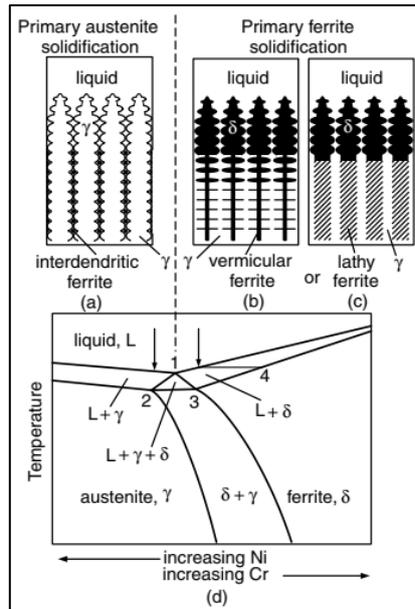


Figura 1.5. Esquemas que muestran la transformación de solidificación y post-solidificación en soldaduras de aceros inoxidable.
(Fuente: Kou, 2003)

b. Austenita primaria

Para una aleación rica en Ni (lado izquierdo del triángulo eutéctico trifásico) la austenita (gamma) es la fase de solidificación primaria. Las dendritas claras en la Figura 1.5.a son austenita, mientras que las partículas oscuras entre las ramificaciones de dendrita primaria son ferrita-delta que se forma cuando el triángulo trifásico es alcanzado durante la etapa terminal de solidificación. Estas se conocen como ferrita interdendrítica. Para dendritas con ramales secundarios largos, las partículas de ferrita interdendrítica pueden también formarse entre ramificaciones de dendrita secundaria.

c. Ferrita primaria

En una aleación rica en Cr (lado derecho del triángulo eutéctico trifásico) la ferrita-delta es la fase de solidificación primaria. Las dendritas oscuras que se indican en la Figura 1.5.b son ferrita-delta. El núcleo de las dendritas de ferrita-delta, que se forma al inicio de la solidificación es más rico en Cr (punto 4), mientras que, las porciones más externas que se forman al reducirse la temperatura tienen contenidos de cromo más bajos.

d. Microestructura de la soldadura

La Figura 1.6.a muestra la estructura de solidificación en la línea central de una soldadura GTAW en una placa de acero inoxidable 310, la cual contiene aproximadamente 25% de Cr, 20% de Ni y 55% de Fe en peso.

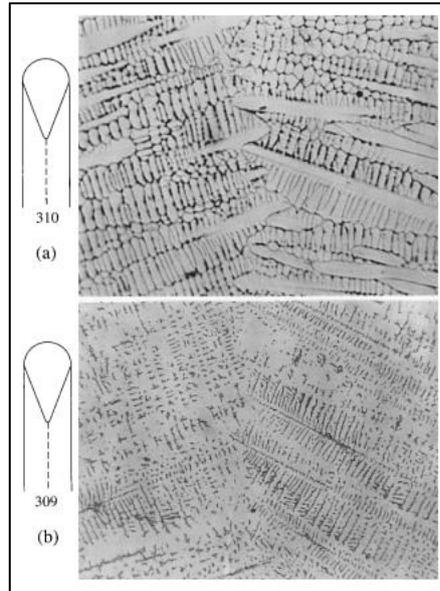


Figura 1.6. Estructura de solidificación en el centro de la soldadura (a) Acero inoxidable 310 (b) Acero inoxidable 309. Aumento 190x.
(Fuente: Kou, 2003)

Por otro lado, la Figura 1.6.b, muestra la estructura de solidificación en el centro de una soldadura GTAW de una placa de acero inoxidable 309, la cual contiene aproximadamente 23% en peso de Cr, 14% en peso de Ni y 63% en peso de Fe. La composición se ubica en el lado rico en Cr del triángulo eutéctico trifásico como se indica en la Figura 1.7.b y solidifica como ferrita-delta primaria. La microestructura consiste en ferrita-vermicular (oscura) en una matriz de austenita (clara).

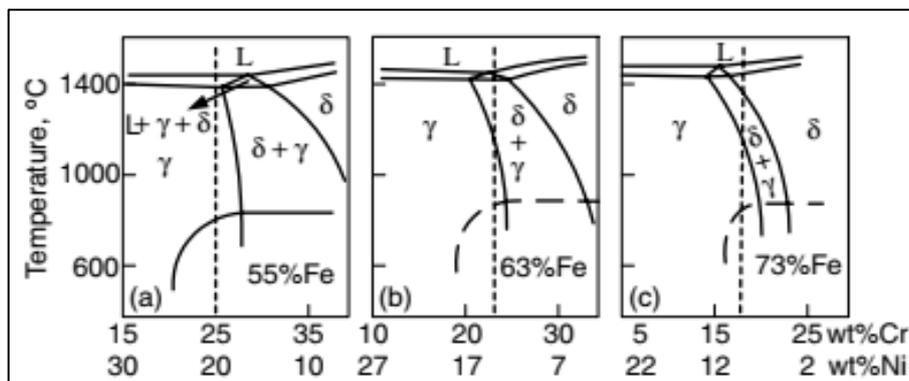


Figura 1.7. Los diagramas de fases Fe-Cr-Ni pseudo-binarios: (a) a 55% en peso de Fe, (b) a 63% en peso de Fe, (c) a 73% en peso de Fe.
(Fuente: Kou, 2003)

Con la ayuda del enfriamiento, la evolución de la microestructura durante la soldadura puede ser estudiada de mejor manera. En la Figura 1.8 se puede observar las dendritas de ferrita-delta (claras, atacadas con cloruro mixto) cerca al charco de soldadura de una soldadura GTAW de acero inoxidable 309, enfriada con estaño líquido antes de que ocurra la transformación $\delta \rightarrow \gamma$.

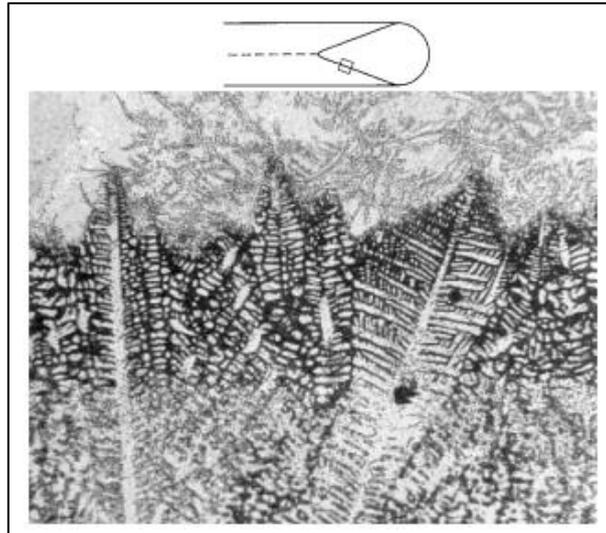


Figura 1.8. Estructura de solidificación con enfriamiento de estaño líquido cerca del charco de soldadura en una soldadura GTAW de acero inoxidable 309.
(Fuente: Kou, 2003)

1.4. Soldadura con arco

La soldadura con arco eléctrico (AW, por sus siglas en inglés) es un proceso de soldadura por fusión en el cual la coalescencia de los metales se obtiene mediante el calor de un arco eléctrico entre un electrodo y el material de trabajo. En la Figura 1.9 se muestra un proceso genérico de AW. Un arco eléctrico es una descarga de corriente eléctrica a través de una separación en un circuito. Se sustenta por la presencia de una columna de gas térmicamente ionizada (plasma) a través de la cual fluye la corriente. Para iniciar el arco en un proceso de AW, se acerca el electrodo a la pieza de trabajo, después del contacto el electrodo se separa rápidamente de la pieza a una distancia corta. La energía eléctrica del arco que se produce genera temperaturas de 5500 °C o mayores, que son suficientes para fundir cualquier metal. Se forma un pozo de metal fundido que consiste en el metal base y metal de relleno.

En la mayoría de los procesos de soldadura con arco se agrega metal de relleno en la operación para aumentar el volumen y fortalecer la unión soldada. A medida que el electrodo avanza a lo largo de la unión, el pozo de metal fundido se solidifica de inmediato. El movimiento que dirige el electrodo hacia el trabajo se consigue mediante un soldador o por medios mecánicos. Uno de los aspectos problemáticos de la soldadura manual con arco es que la calidad de la unión soldada depende en gran medida de la habilidad del soldador.

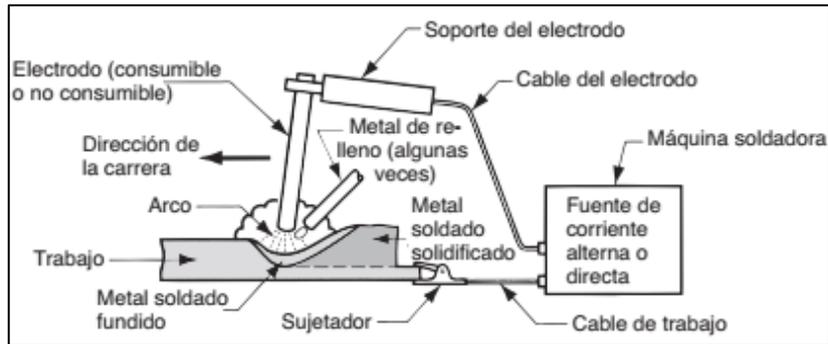


Figura 1.9. Configuración y circuito eléctrico en un proceso de soldadura con arco.
(Fuente: Groover, 2009)

1.5. Soldadura SMAW

La soldadura con arco y metal protegido, SMAW por sus siglas en inglés, es uno de los procesos de unión más antiguos, sencillos y versátiles. En la actualidad, aproximadamente el 50% de toda la soldadura en la industria y el mantenimiento se realiza mediante este proceso. El arco eléctrico en SMAW se genera tocando la pieza de trabajo con la punta de un electrodo que está recubierto y retirando la misma rápidamente, como si se tratara de encender un fósforo, a una distancia suficiente para mantener el arco como se indica en la Figura 1.10.

El calor que se genera en el arco eléctrico funde una parte de la punta del electrodo, su recubrimiento y el metal base en la zona inmediata del arco. El metal fundido es una mezcla del metal base, el metal del electrodo y las sustancias presentes en el recubrimiento del electrodo; esta mezcla es la que constituye la soldadura cuando se solidifica. La parte desnuda en el extremo del electrodo se sujeta a una terminal de la fuente de poder, mientras que, la otra terminal se conecta a la pieza de trabajo, como se observa en la Figura 1.10. La soldadura SMAW tiene la ventaja de ser sencilla y versátil, el equipo está conformado por una fuente de poder, cables de corriente y un portaelectrodo. Este proceso se usa comúnmente en la construcción en general, en astilleros, oleoductos y en trabajos de mantenimiento (Kalpakjian, 2008).

El proceso SMAW es bastante útil en zonas remotas, porque se puede emplear un generador con un motor de combustión interna como fuente de potencia. Es más adecuado para piezas de trabajo con espesores de 3 a 19 mm, este intervalo se puede ampliar fácilmente si los operadores son hábiles y utilizan técnicas de pases múltiples. Para el método de pases múltiples es importante limpiar la escoria después de cada cordón de soldadura, de lo contrario, la escoria solidificada puede provocar corrosión severa en el

área soldada y causar su falla. Previo a aplicar una nueva soldadura, debe retirarse por completo la escoria, mediante un cepillo de alambre o un cincel.

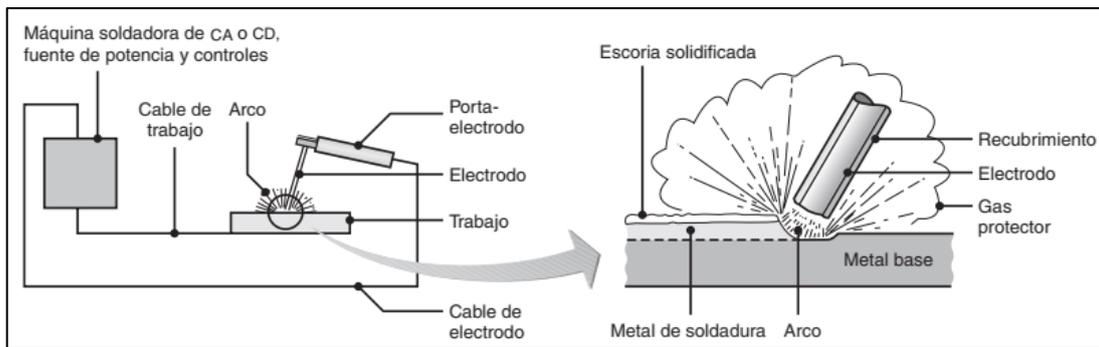


Figura 1.10. Esquema del proceso de soldadura por arco metálico protegido, SMAW. (Fuente: Kalpakjian, 2008)

El arco en este proceso puede ser generado con corriente alterna o continua, los electrodos no deben presentar humedad para poder obtener un buen cordón de soldadura. Las corrientes que se emplean en este proceso varían entre 30 a 300 amperios y los voltajes están entre 15 a 45 voltios (Groover, 2009).

Una de las principales desventajas de este método es que, con el electrodo al ser consumible, se pierde tiempo y continuidad del cordón al ser cambiado al momento que se desgasta.

1.6. Soldadura GMAW

La soldadura con arco de metal y gas (GMAW, por sus siglas en inglés) es un proceso de AW en el que el electrodo es un alambre metálico desnudo consumible y la protección se proporciona por inyección de gas en la zona de soldadura. El alambre desnudo se alimenta en forma continua y automática desde un rollo a través de una pistola de soldadura, como se observa en la Figura 1.11. En la soldadura GMAW se usan diámetros de alambre que van desde 0.8 a 6.4 mm (1/32 a 1/4 in), el tamaño depende del espesor de las piezas que se van a unir y de la velocidad de deposición deseada.

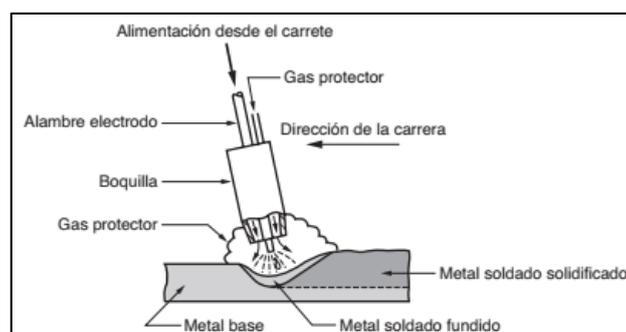


Figura 1.11. Soldadura con arco de metal y gas (GMAW). (Fuente: Groover, 2009)

Los gases empleados para protección son gases inertes como el argón y el helio o gases activos como el dióxido de carbono. La selección de los gases y las cantidades de estos depende del metal que se va a soldar y otros factores. Los gases inertes se utilizan para soldar aleaciones de aluminio y aceros inoxidables, como por ejemplo el AISI 304. Por otro lado, se usa dióxido de carbono para soldar aceros con bajo y mediano contenido de carbono.

La soldadura GMAW se utiliza ampliamente en operaciones de fabricación para soldar diversos metales ferrosos y no ferrosos. Al usar alambre de soldadura continuo en lugar de varillas de soldadura, tiene una ventaja significativa sobre la SMAW en términos de tiempo de arco cuando se realiza manualmente. Por este mismo motivo, también se presta a la automatización de la soldadura con arco. Los fragmentos de electrodo que quedan después de la soldadura con varilla también implican desperdicio de metal de relleno, por lo que la utilización del material del electrodo es mayor con soldadura GMAW.

1.7. Soldadura GTAW

En la soldadura por arco de tungsteno y gas (GTAW por sus siglas en inglés), conocida también como soldadura TIG, debido a las siglas en inglés de Gas Inerte y Tungsteno, el metal de aporte se suministra por un alambre de aporte como se indica en la Figura 1.12. Como en esta operación no se consume el electrodo de tungsteno, se mantiene una abertura de arco constante y estable en un nivel de corriente que no cambia. Los metales de aporte son similares a los que se sueldan y no se emplea fundente. El gas de protección por lo general es argón o helio, o también una mezcla de los dos. La soldadura GTAW se puede realizar sin metales de aporte, por ejemplo, al soldar juntas de ajuste preciso. Dependiendo de los metales a soldarse, la fuente de alimentación puede utilizar tanto corriente alterna AC o corriente directa DC en sus dos polaridades (Figura 1.13). Generalmente, se prefiere corriente alterna para aluminio y magnesio, puesto que tiene una acción limpiadora que remueve los óxidos y mejora la calidad de la soldadura. La contaminación del electrodo de tungsteno con el metal fundido puede ser un problema significativo, especialmente en aplicaciones críticas, donde puede ocasionar discontinuidades en la soldadura. Por esta razón, debe evitarse el contacto del electrodo con la mezcla de metales fundidos.

Sus aplicaciones más comunes incluyen el aluminio y el acero inoxidable (Groover, 2009). El proceso GTAW es adecuado sobre todo para metales delgados. El costo del gas inerte hace que esta soldadura sea más costosa que la de arco metálico protegido (SMAW), sin embargo, produce soldaduras y acabados superficiales de muy alta calidad. Se utiliza en

varias aplicaciones críticas, en una amplia gama de espesores y formas de la pieza de trabajo, además el equipo es portátil (Kalpakjian, 2008).

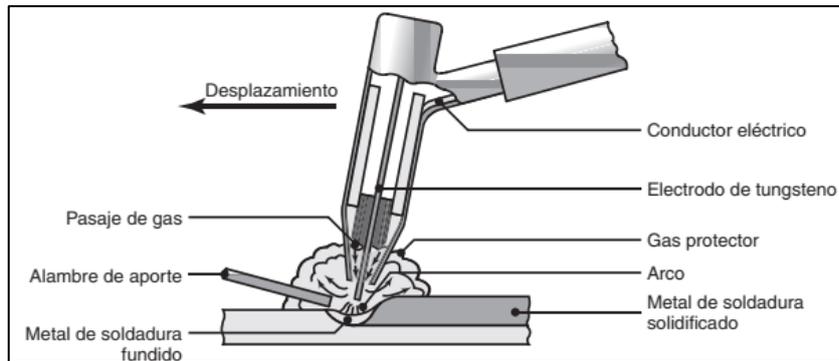


Figura 1.12. Proceso de soldadura por arco de tungsteno y gas conocido como soldadura TIG (Tungsten Inert Gas).
(Fuente: Kalpakjian, 2008)

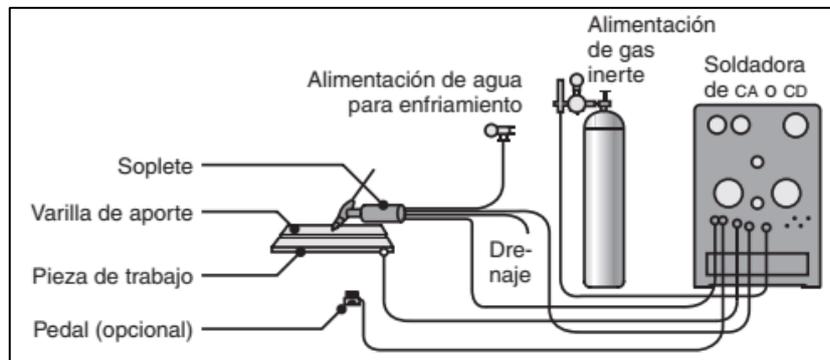


Figura 1.13. Equipo para las operaciones de soldadura por arco de tungsteno y gas.
(Fuente: Kalpakjian, 2008)

Dependiendo del material base, se utiliza el tipo de gas y la configuración de la forma de la punta del electrodo. En la Figura 1.14 se presentan las formas más utilizadas de puntas del electrodo.

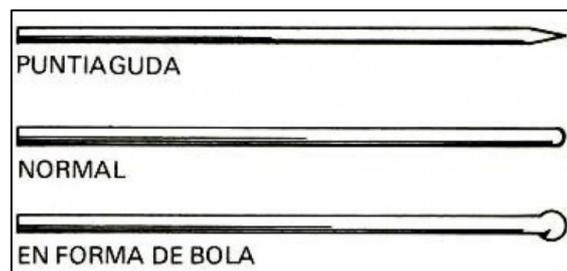


Figura 1.14. Configuraciones del electrodo de tungsteno.
(Fuente: <http://soldadurayestructuras.com/proceso-gtaw.html>)

La forma puntiaguda es más usada para aceros inoxidable y grandes espesores, la punta esférica es utilizada para aluminio y materiales con bajos puntos de fusión y la punta normal es como viene el electrodo de tungsteno al momento de ser adquirido.

1.8. Ensayos no destructivos

Son ensayos que permiten obtener información del material sin destruirlo o cambiar su composición química. Los Ensayos No Destructivos (END) son técnicas aplicadas a la inspección de productos acabados y semiacabados, para detectar discontinuidades internas y superficiales por medio de principios físicos, sin alterar el posterior uso de los productos inspeccionados. Las etapas fundamentales en la inspección de un material estructural mediante ensayos no destructivos son:

- Elección del método y técnicas operativas idóneos.
- Obtención de una indicación propia.
- Interpretación de la indicación.
- Evaluación de la indicación.

El objetivo de cada método de control es determinar si hay discontinuidades, caracterizarlas y luego evaluarlas, según el código establecido previamente, el cual define los criterios de aceptación o rechazo dependiendo de la aplicación específica (Lopez, Trujillo, & Parra, 2011).

Para seleccionar el ensayo adecuado, se tiene que considerar los siguientes criterios:

- Tipo y origen de la discontinuidad a detectarse.
- Proceso de fabricación y tipo de material.
- Acceso a la región de ensayo.
- Nivel de aceptación deseado.
- Disponibilidad de equipos.
- Costos del ensayo.

En el presente trabajo los END que se realizaron fueron: inspección visual, tintas penetrantes y radiografía industrial.

1.8.1. Inspección visual

Es sin duda el tipo de ensayo no destructivo que se utiliza más ampliamente. Es el más fácil de aplicar, reporta resultados rápidos y normalmente tiene un costo bajo (Lopez et al., 2011). Generalmente, previo a someter a una pieza a otros tipos de ensayos no destructivos, se inspecciona visualmente. Los resultados que se obtienen del ensayo visual pueden contribuir en la aplicación posterior de otras pruebas no destructivas. Para realizar una inspección visual adecuada es esencial la buena iluminación de la pieza que se está examinando. Es también importante observar que la superficie de la pieza esté limpia antes de efectuar el examen.

1.8.2. Tintas penetrantes

La inspección por tintas penetrantes es un método de ensayo no destructivo empleado para la detección de discontinuidades que aparecen en la superficie de la pieza. Se puede considerar que el uso de líquidos penetrantes es una extensión de la inspección visual, porque muchas discontinuidades que se revelan por el método de líquidos penetrantes no podrían ser detectadas a través de la inspección visual, realizada por un inspector experimentado. Los líquidos penetrantes permiten revelar discontinuidades en una gran extensión haciendo que la inspección dependa menos del elemento humano, por este motivo, este método es más adaptado a un sistema de producción. El ensayo de tintas penetrantes tiene la ventaja de ser un ensayo rápido, fácilmente aplicable y relativamente económico. Por otro lado, sólo revela discontinuidades existentes en la superficie de la pieza (Lopez et al., 2011).

La técnica de líquidos penetrantes consiste en aplicar sobre la pieza, después de limpiar la misma, un líquido penetrante de un color por lo general rojo, de baja viscosidad, que penetra en las discontinuidades presentes en la superficie bajo principios de capilaridad. Después, se limpia nuevamente la pieza por medio de un líquido removedor cuya función es la de eliminar el exceso de líquido penetrante que ha quedado en la superficie, para posteriormente, aplicar otro líquido llamado revelador que normalmente tiene talco en suspensión y por lo tanto presenta un color blanco. El líquido penetrante aprisionado en la discontinuidad de la pieza es absorbido por el revelador y como el primero posee una coloración roja, se mostrarán las discontinuidades presentes en la pieza. En la Figura 1.15 se expone un esquema del procedimiento del ensayo (AWS, 2009).

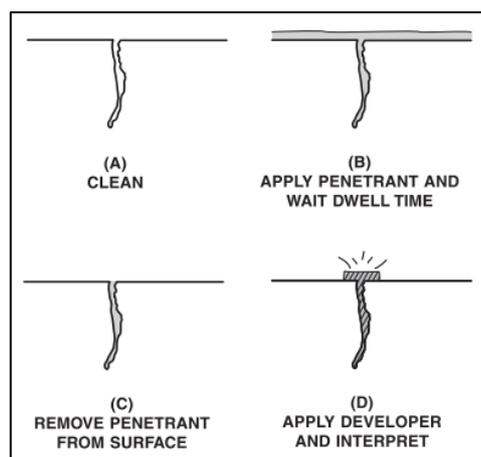


Figura 1.15. Esquema del procedimiento para el ensayo de tintas penetrantes.
(Fuente: AWS B1.10)

1.8.3. Radiografía industrial

La radiografía industrial es un método empleado para la inspección no destructiva, que se fundamenta en la absorción diferencial de radiación penetrante por la pieza que se está examinando. Debido a diferencias en las características de absorción causadas por las variaciones de masa, composición y estructura del material; diferentes regiones de una misma pieza absorberán cantidades distintas de radiación penetrante. Esa absorción diferencial de radiación penetrante puede ser detectada mediante una película o a través de un tubo de imagen, o la misma puede ser medida por tipos de detectores electrónicos de radiación (Figura 1.16). Esa variación de la cantidad de radiación absorbida, que se detecta por un medio, indica la existencia de una discontinuidad interna en un material.

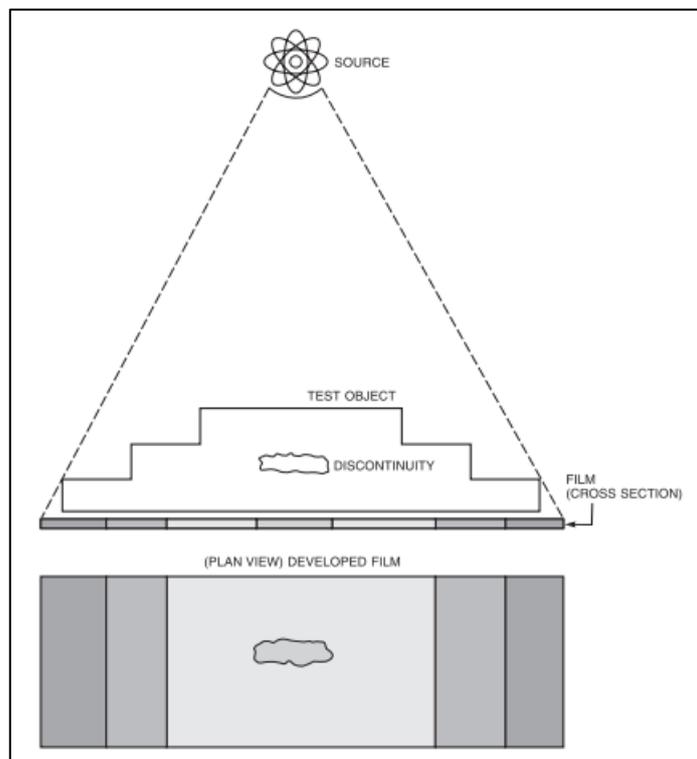


Figura 1.16. Esquema de la toma de una radiografía.
(Fuente: AWS B1.10)

La radiografía industrial es utilizada para detectar características de una región de un determinado material comparada con una región cercana. Diferencias muy grandes son más fácilmente detectadas, generalmente, la radiografía puede detectar sólo las características diferentes de una región que presenta una variación en el espesor, en el plano paralelo a la dirección del haz de radiación.

Las discontinuidades como poros e inclusiones que presentan un espesor variable en todas las direcciones serán fácilmente detectadas siempre que no sean muy pequeñas con

relación al espesor de la pieza. Generalmente, variaciones que presentan el 2 % o más de la variación de absorción en relación con el espesor total, pueden ser detectadas. La inspección radiográfica es ampliamente utilizada en la examinación de funciones, forja y soldaduras, particularmente donde se requiere evitar discontinuidades internas en el material (Lopez et al., 2011).

1.9. Metalurgia de la soldadura

Debido a que la susceptibilidad al agrietamiento de las estructuras soldadas es función de la microestructura, el ambiente y el esfuerzo aplicado, es fundamental entender los principios básicos que gobiernan la evolución de la microestructura durante la soldadura. Varios procesos metalúrgicos ocurren en el estado sólido, incluyendo transformaciones de fase, reacciones de precipitación, recristalización, crecimiento de grano, etc. La extensión de estas reacciones puede alterar significativamente la microestructura y propiedades de la soldadura relativas al metal base. Muchas de estas reacciones o combinaciones complejas de reacciones pueden resultar en fragilidad o agrietamiento de las soldaduras.

La expansión térmica durante el calentamiento y la contracción durante el enfriamiento pueden resultar en patrones de esfuerzo complejos en y alrededor de los cordones de soldadura. Estos esfuerzos pueden afectar la microestructura y las propiedades de la soldadura, y pueden promover el fisuramiento en regiones donde el esfuerzo de tracción resultante excede la ductilidad del material (Lippold, 2014).

1.9.1. Regiones de la soldadura por fusión

La examinación de una junta soldada revela distintas regiones microestructurales. La zona de fusión está asociada con la fundición. La zona afectada por el calor (HAZ, por sus siglas en inglés), aunque no fundida, es afectada por el calor proveniente del proceso de unión. Fuera de la HAZ está el metal base sin afectación.

La zona de fusión se describe como tal porque es la región donde la fundición y la solidificación ocurren para formar la junta. En muchos materiales, la solidificación es muy sensible a la composición. Por ejemplo, la adición de pequeñas cantidades de carbono y nitrógeno a algunos aceros puede cambiar su comportamiento de ferrítico (BCC) a austenítico (FCC).

La comprensión de las regiones de la soldadura ha evolucionado enormemente desde 1960. Anterior a esa época, la soldadura por fusión se pensaba que consistía en sólo dos regiones, la zona de fusión y la HAZ adyacente como se indica en la Figura 1.17.

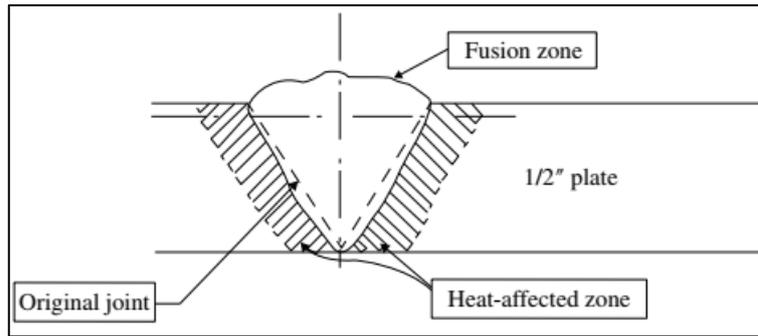


Figura 1.17. Esquema temprano de las regiones de una soldadura por fusión.
(Fuente: Lippold, 2014)

En 1976 se propusieron varios cambios para la terminología empleada para describir las regiones microestructurales de la soldadura por fusión, como se observa en la Figura 1.18. Se consideraba que la zona de fusión consistía en dos regiones. La región compuesta representaba la porción de la zona donde el metal base y el metal de aporte se mezclaban en una composición compuesta. Rodeando esta región a lo largo del contorno de fusión, se definió una región llamada la zona sin mezcla (UMZ, por sus siglas en inglés).

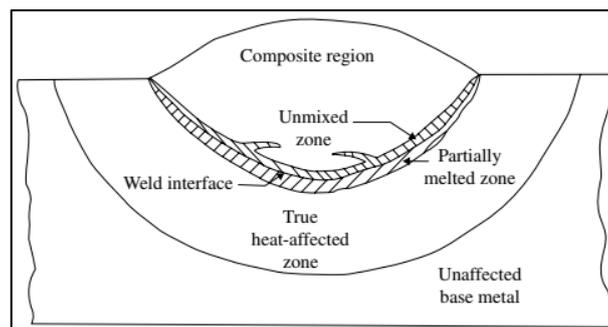


Figura 1.18. Regiones de una soldadura por fusión.
(Fuente: Lippold, 2014)

La UMZ consiste en metal fundido y metal base resolidificado que no se mezcla con el metal de aporte. La HAZ se subdividió en dos regiones, la zona parcialmente fundida (PMZ, por sus siglas en inglés) y la zona afectada por el calor "real" (T-HAZ). La PMZ existe en todas las soldaduras por fusión realizadas en aleaciones debido a que una transición de 100% líquido a 100% sólido debe ocurrir a lo largo del contorno de fusión.

La única adición potencial a la Figura 1.19 es una región de transición dentro de la zona de fusión. En algunos sistemas aleados, esta zona de transición (TZ) puede exhibir una microestructura diferente de las regiones circundantes. Un esquema moderno de las regiones de una soldadura por fusión se detalla en la Figura 1.19 para una soldadura heterogénea. Es similar a la Figura 1.18, sin embargo, contiene una TZ de composición que puede presentarse en algunos sistemas.

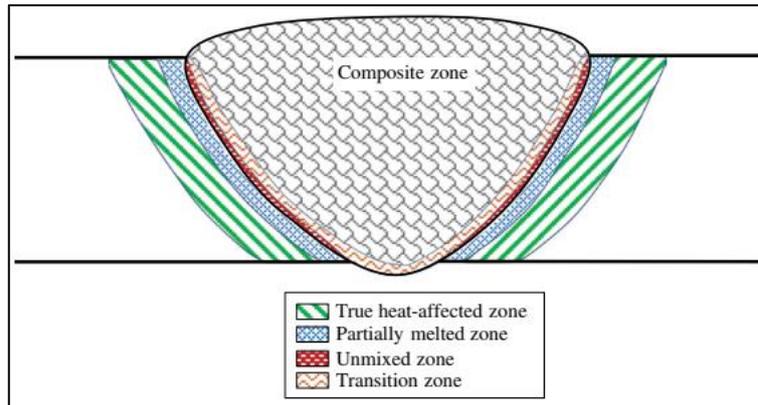


Figura 1.19. Representación esquemática moderna de las regiones en una soldadura por fusión.
(Fuente: Lippold, 2014)

En definitiva y para fines prácticos, en una junta soldada se identifican 3 zonas distintas que se muestran en la Figura 1.20: 1) Metal base; 2) Zona afectada por el calor (ZAC); 3) Metal de soldadura. Para el desarrollo del presente trabajo se considera únicamente estas tres zonas.

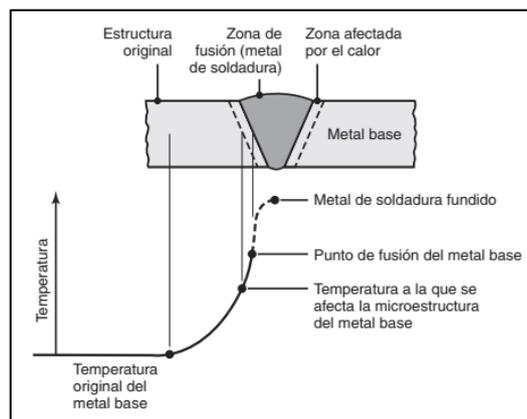


Figura 1.20. Características de una zona normal en una junta soldada con soldadura con oxígeno y combustible gaseosos y por arco eléctrico.
(Fuente: Kalpakjian, 2008)

La metalurgia y las propiedades de la segunda y de la tercera zona dependen en gran medida del tipo de metales unidos, el proceso particular de unión, los metales de aporte empleados y las variables del proceso de soldadura. La unión realizada con un metal de aporte tiene una zona central llamada metal de soldadura que consta de una mezcla de metal base y metales de aporte.

1.10. Soldabilidad

La soldabilidad de un metal es la capacidad para ser soldado en una estructura específica que tiene determinadas propiedades y características, cumpliendo de forma satisfactoria los requerimientos de servicio. Una buena soldabilidad está caracterizada por la facilidad

con que se realiza el proceso, la ausencia de defectos de soldadura, resistencia, ductilidad y tenacidad aceptables en la unión soldada.

Algunos factores que afectan la soldabilidad son: el proceso de soldadura, las propiedades del metal base, el metal de relleno y las condiciones de la superficie. El proceso de soldadura es significativo, al observarse que algunos metales que se sueldan con facilidad mediante un proceso son difíciles de soldar con otro.

En el caso del acero inoxidable, se suelda fácilmente mediante la mayoría de los procesos de AW, sin embargo, se considera un metal difícil para los procesos de soldadura con oxígeno y gas combustible.

2. METODOLOGÍA

El trabajo aquí presentado se desarrolla de acuerdo con la metodología experimental que se indica en la Figura 2.1: 1. Compra del material base; 2. Corte de placas para posterior soldadura; 3. Preparación de placas para soldadura; 4. Caracterización del material base; 5. Soldadura de placas con los procesos SMAW, GMAW y GTAW; 6. Ensayos No Destructivos; 7. Corte de probetas utilizando chorro de agua; 8. Ensayos Destructivos; 9. Micrografías y macrografías; 10. Barrido de dureza.

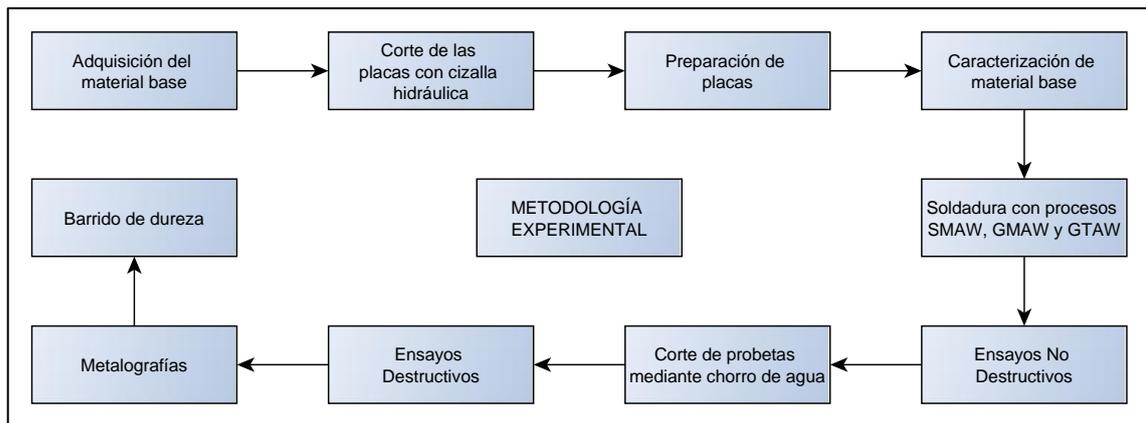


Figura 2.1. Diagrama de la metodología experimental del trabajo de titulación.
(Fuente: Propia)

2.1. Adquisición del material base

Se utiliza como material base para los distintos procesos de soldadura, el Acero Inoxidable Austenítico AISI 304 con acabado 2B (mate), que se obtiene de una plancha adquirida en la empresa IDMACERO con dimensiones de 2440 mm x 1220 mm x 3 mm (Figura 2.2), de esta plancha se cortan las placas para su posterior soldadura.



Figura 2.2. Plancha adquirida de material base.
(Fuente: Propia)

2.2. Obtención de placas

Para la elaboración de las juntas soldadas se cortan 6 placas de 350 mm de largo x 150 mm de ancho (Figura 2.3) con la cizalla hidráulica disponible en la Metalmecánica San Bartolo (MSB) de la Escuela Politécnica Nacional (EPN) como se indica en la Figura 2.4. Se toma en cuenta la dirección de las laminaciones en la plancha adquirida, para realizar los cortes, de tal manera que, al soldar, las laminaciones sean perpendiculares al cordón de soldadura.



Figura 2.3. Esquema de placas cortadas.
(Fuente: Propia)

2.2.1. Equipo para corte de las placas

El equipo empleado para el corte de las placas es una cizalla hidráulica (Figura 2.4) cuyas características técnicas se detallan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas del equipo de corte de placas.

Datos técnicos CIZALLA DE CORTE RECTO TOPTECH	
Imagen del equipo	
Marca	TOPTECH
Modelo	VSHS-8X3100
Espesor máximo de corte	7.62 mm
Ancho de corte	3100 mm

Rango de calibre posterior	750 mm
Ángulo de corte	0.5 – 2.5 °
Longitud de cuchilla	3.7 mm
Calibres de tope	762 mm
Potencia	11.2 kW
Dimensiones	154 in x 70 in x 83 in (3.91 m x 1.78 m x 2.11 m)
Peso	6100 kg

(Fuente: Tools, 2020)

2.2.2. Corte de las placas

El corte de las placas con la cizalla hidráulica se muestra en la Figura 2.4, esta cizalla corta las placas con las medidas indicadas en la Figura 2.3, de esta forma, se obtiene cortes en frío que no afectan la microestructura del material base y mantienen los bordes rectos, iguales a los de la plancha original. Por lo tanto, no se requiere pulir los bordes como en el caso de corte con plasma.



Figura 2.4. Corte de placas con cizalla hidráulica
(Fuente: Propia)

2.3. Preparación de placas para soldadura

En la preparación se empieza por retirar la capa plástica protectora de las placas de material base, la cual es de fácil desprendimiento, posterior a esto se realizan los biselés respectivos para cada proceso y se establece la separación entre placas la cual varía con el proceso a realizarse tal como se indica en los correspondientes WPS, para esto, se unen pequeñas placas de refuerzo en los extremos de las placas que se van a soldar, como se indica en la Figura 2.5. Para evitar el pandeo de las placas por el calor emitido en cada proceso de soldadura es necesario utilizar puentes, los cuales ayudan a mantener las

placas horizontales y también conservan constante la separación entre ellas, como se observa en la Figura 2.5.

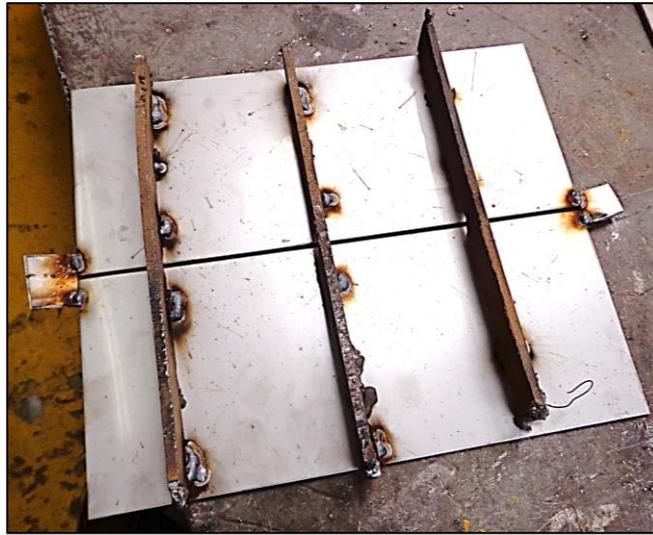


Figura 2.5. Preparación de placas con puentes previo a la soldadura.
(Fuente: Propia)

2.4. Caracterización del material base

La caracterización del material base implica por un lado analizar la composición química del mismo, para esto, se realiza el ensayo de espectrometría (o espectroscopía) de emisión atómica por chispa en el Laboratorio de Fundición de la EPN, el cual determina las cantidades presentes de cada uno de los elementos que componen la aleación. Para esta caracterización se utiliza el equipo mostrado en la Figura 2.6. Actualmente, el equipo Bruker Q2 ION es uno de los más pequeños y ligeros espectrómetros de emisión de chispa, para análisis de metales disponible en el mercado (Bruker, 2020).

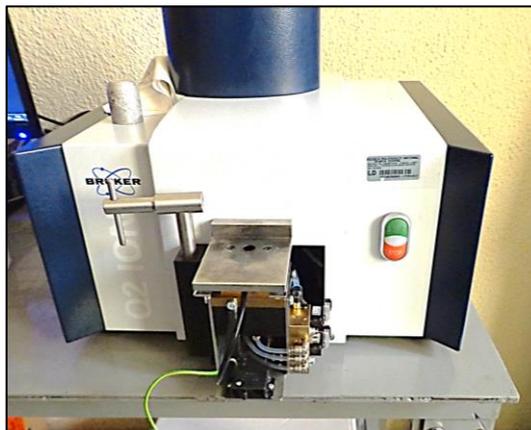


Figura 2.6. Equipo para determinar la composición química.
(Fuente: Propia)

2.4.1. Características del equipo de espectrometría

Las características del equipo de espectrometría de emisión atómica por chispa se detallan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Detalles técnicos del equipo de espectrometría.

Datos técnicos BRUKER Q2 ION	
Imagen del equipo	
Sistema óptico	Reja de campo plano Purga de argón para mejor proyección Tecnología de espectro claro para deconvolución de espectros avanzados Compensación de ambiente activa para operación entre 10 y 45 °C
Fuente generadora	Libre de mantenimiento, Generador PWM de dos fases Frecuencia de 50 a 1000 Hz Chispa y descargas de arco desde 0,01 ms a 2 ms
Emisor de chispa	Casi libre de mantenimiento Bajo consumo de argón durante la medición Calidad de argón 4.8 especificada para espectrometría
Paquetes de solución analítica (PSA)	Paquetes de calibración de matrices distintas disponible PSAs cubren todos los elementos y grupos de aleaciones importantes Actualizable para expansión futura
Datos eléctricos	100 a 240 V (50/60 Hz) 200 W durante la medición, 50 W durante reposo 16 A (240 V) o 25 A (100 V) fusible de fundición lenta
Dimensiones	Ancho 440 mm Alto 220 mm Profundidad 390 mm
Peso	19 kg
Rango medioambiental	Temperatura 10 – 45 °C Humedad 10 – 90 %, no condensación

(Fuente: Bruker, 2020)

2.4.2. Procedimiento del ensayo de caracterización

La espectroscopía de emisión atómica es un método de análisis químico que utiliza la intensidad de la luz emitida por una llama, un plasma, un arco o una chispa eléctrica en una longitud de onda particular para determinar la cantidad de un elemento en una muestra. La longitud de onda es una característica del espectro atómico y determina la cantidad del elemento, mientras que, la intensidad de la luz emitida es proporcional a la cantidad de átomos del elemento. La espectroscopía de emisión atómica de chispa se utiliza para el análisis de elementos metálicos en muestras sólidas.

Para el análisis, primero se tiene que calibrar el equipo de espectrometría con un patrón estandarizado de una composición química conocida. Luego, se debe colocar en el equipo una muestra del material base de dimensiones 75 mm x 75 mm como se observa en la Figura 2.7. Después, mediante un computador se inicia el ensayo.

El ensayo consiste en pasar un arco eléctrico o chispa a través de la muestra, calentando la misma hasta una temperatura alta para excitar los electrones dentro de ella. Los electrones del analito excitados emiten luz en longitudes de onda características que se pueden dispersar con un monocromador y se detectan, para que el equipo obtenga los valores de la composición química. La toma de datos se realiza en 3 puntos diferentes. Al final del ensayo se emite un informe mediante el software del equipo.



Figura 2.7. Muestra colocada en el equipo.
(Fuente: Propia)

2.5. Soldadura de placas con procesos SMAW, GMAW y GTAW

En la preparación de las placas antes de soldarlas se tomó en cuenta las especificaciones detalladas en los respectivos WPS de acuerdo con los distintos procesos de soldadura: SMAW, GMAW y GTAW. Se puede observar las placas preparadas antes de ser soldadas en la Figura 2.8.



Figura 2.8. Placas previo a realizar su unión con los diferentes procesos de soldadura.
(Fuente: Propia)

El electrodo o metal de aporte que se emplea es un electrodo E308L de acuerdo con la norma AWS A5.4 para el caso del proceso SMAW, y metal de aporte ER308L según la norma AWS A5.9 para los procesos GMAW y GTAW. Esta elección de electrodo y metal de aporte también se recomienda en los catálogos o manuales de soldadura (AGA, 2019) para soldar este tipo de acero inoxidable. La composición de este electrodo se detalla en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Composición del metal depositado.

Identificación: Punta Gris									
C	0.02%	Mn	0.7%	Si	0.7%	Cr	19%	Ni	10%

*Valores típicos
(Fuente: AGA, 2019)

Las propiedades mecánicas del electrodo E 308L se indican en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Propiedades mecánicas del metal depositado.

Resistencia a la tracción	Elongación
60 kg/mm ²	40%
85000 lb/pulg ²	

*Valores típicos
(Fuente: AGA, 2019)

Generalmente, no es beneficioso someter una pieza de acero inoxidable austenítico a un precalentamiento previo a la soldadura, porque se deteriora la resistencia a la corrosión de estos aceros como consecuencia de fenómenos de precipitación de compuestos de carburo de cromo.

También se aumenta el riesgo de producir fisuración en caliente en la soldadura, generar distorsión y deformaciones de las piezas, esto se debe a que los aceros inoxidables austeníticos tienen un mayor coeficiente de dilatación respecto a otros aceros. Por lo tanto, no es recomendable someter al acero inoxidable austenítico a precalentamiento previo a la soldadura (Rodríguez, 2020). En ese sentido, no es necesario el cálculo de la temperatura de precalentamiento.

2.5.1. Selección del gas de protección

Para los procesos GMAW y GTAW se requiere emplear un gas de protección inerte que puede ser argón o helio, sin embargo, se decide emplear argón porque las juntas soldadas van a realizarse en posición 1G. Por lo tanto, para esta posición no se puede emplear helio, debido a que este gas tiende a ascender y es más adecuado para la posición 4G o sobrecabeza.

2.5.2. Equipo para soldadura SMAW y GTAW

En la soldadura SMAW y GTAW se utiliza la máquina soldadora que se muestra en la Figura 2.9 y que tiene los datos técnicos mostrados en la Tabla 2.5. Se trata de una máquina que permite las aplicaciones de soldadura con electrodo, TIG y MIG (Electric, 2020).



Figura 2.9. Soldadora para procesos SMAW y GTAW.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.5. Datos técnicos de la soldadora empleada para SMAW y GTAW.

Especificaciones técnicas Lincoln Electric Invertec V350 Pro	
Imagen del equipo	
Potencia de entrada	200/220/380/415/440/1/3/50-60
Salida nominal	350A/34V @ 60% 300A/32V @ 100%
Corriente de entrada	32A
Rango de salida	5-425A
Dimensiones (Alto x Ancho x Largo)	376 mm x 338 mm x 709 mm
Peso neto	37,5 kg

(Fuente: Electric, 2020)

2.5.3. Equipo para soldadura GMAW

Para la soldadura GMAW se emplea el equipo que se indica en la Figura 2.10 y cuya descripción técnica (Electric, 1995) está en la Tabla 2.6.



Figura 2.10. Soldadora para proceso GMAW.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.6. Descripción técnica de la máquina soldadora para el proceso GMAW.

Especificación técnica Lincoln Electric Wire Matic 255			
Imagen referencial			
ENTRADA MONOFÁSICA ÚNICAMENTE			
Voltaje/Frecuencia estándar	Corriente de entrada (a salida máxima nominal)		
208/230/60 Hz	53/49 Amps		
230/460/575/60 Hz	50/25/20 Amps		
SALIDA NOMINAL			
Ciclo de trabajo	Amperaje	Voltios en amperes nominales	
35%	250 Amps	26 Volts	
60%	200 Amps	28 Volts	
100%	145 Amps	26 Volts	
SALIDA			
Corriente de soldadura (continuo)	Voltaje máximo de circuito abierto	Energía auxiliar	
30 – 250 Amps	40 Volts	NA	
DIMENSIONES FÍSICAS			
Altura	Ancho	Profundidad	Peso
719 mm	480 mm	1019 mm	100 kg

RANGO DE VELOCIDAD DE ALAMBRE	
Velocidad de alambre	50 – 600 IPM (1.27 – 15.2 m/minute)

(Fuente: Electric, 1995)

2.5.4. Soldadura con proceso SMAW

Para la soldadura SMAW el electrodo E308L (AWS, 2006) consumible recomendado es de bajo hidrógeno y emplea un revestimiento de tipo básico (Marulanda, Burbano, & Peláez, 2013) que genera la atmósfera protectora en dicho proceso. El diámetro del metal de aporte es 2,4 mm (3/32 in). En este proceso se emplea un voltaje en el rango de 25 a 30 V con polaridad DC+, por otro lado, el amperaje está en un rango de 40 a 60 A. La velocidad de avance del portaelectrodo en este caso es 68 mm/min. El tiempo empleado para soldar las placas fue de 0,086 h. La técnica de avance para el cordón de soldadura es oscilatoria con un solo pase y para conseguir el cordón a lo largo de la unión, se realizan primero tres puntos de soldadura que sirven para mantener constante la separación establecida previamente, que se indica en el respectivo WPS. El resultado de la unión soldada mediante el proceso SMAW se puede observar en la Figura 2.11.



Figura 2.11. Junta soldada con proceso SMAW.
(Fuente: Propia)

2.5.5. Soldadura con proceso GMAW

Para realizar la soldadura GMAW se utiliza un electrodo consumible ER308L (AWS, 2013) que viene en un carrete en presentación de alambre y tiene un diámetro de 0,9 mm, la velocidad de alimentación del alambre para conseguir un avance que genere una penetración adecuada es de 170 pulg/min. El gas de protección que se emplea tiene un flujo de trabajo de 25 L/min, en este proceso se utilizó un voltaje constante de 17 V y un amperaje entre 72 y 100 A con polaridad DC+. La transferencia que se emplea en este caso es por cortocircuito, mientras que, la velocidad de avance de la antorcha de soldadura

es de 101 mm/min. El tiempo empleado para realizar la junta soldada fue 0,058 h. La técnica de avance para generar el cordón de soldadura es oscilatoria con un solo pase. Todos los parámetros requeridos para esta soldadura se detallan en el correspondiente WPS. El cordón de soldadura resultante se indica en la Figura 2.12.



Figura 2.12. Junta soldada con proceso GMAW.
(Fuente: Propia)

2.5.6. Soldadura con proceso GTAW

En la soldadura GTAW se emplea una varilla de material de aporte ER308L (AWS, 2013) con 2,4 mm de diámetro. El electrodo que se utiliza en esta soldadura es un electrodo no consumible de tungsteno con un contenido de 2% de torio, el afilado de dicho electrodo es en forma de punta porque se va a soldar acero inoxidable, además, el soldador debe conocer la forma correcta de realizar este afilado. El voltaje requerido en este proceso es 16 V, la intensidad está entre 82 a 107 A con polaridad DC- y la velocidad de avance en este caso es de 60 mm/min. El tiempo empleado para soldar las placas fue de 0,097 h. Estas variables pueden observarse en el respectivo WPS. El caudal del gas de protección es de 12 L/min, adicionalmente, en este proceso se emplea una purga de argón con un caudal de 10 L/min. La junta soldada con este proceso se puede ver en la Figura 2.13.



Figura 2.13. Junta soldada con proceso GTAW.
(Fuente: Propia)

2.6. Ejecución de los Ensayos No Destructivos

Para los END se requiere que las juntas soldadas estén completamente libres de impurezas, para esto se aplica un químico decapante (Figura 2.14) recomendado para la soldadura de aceros inoxidable que limpia los cordones de soldadura y no afecta la composición química del material. El decapante remueve la termocoloración y otras impurezas provocadas por la aplicación de soldadura, grata o pulidora. Permite la regeneración inmediata de la película pasivadora, protegiendo el acero inoxidable de ambientes corrosivos por su rápida acción.



Figura 2.14. Gel decapante empleado para limpiar los cordones de soldadura.
(Fuente: Propia)

El gel decapante se aplica en dos pasadas como se observa en la Figura 2.15 y se deja reposar durante 5 minutos, luego de esto se limpia el decapante con una mezcla de agua jabonosa y se seca las placas con un paño.



Figura 2.15. Aplicación de gel decapante en juntas soldadas.
(Fuente: Propia)

Una vez que están limpios los cordones de soldadura se tiene que identificar las juntas soldadas, antes de realizar los END.

2.6.1. Codificación de juntas soldadas para la realización de los END

En la Tabla 2.7 se puntualiza cada una de las letras y números que se utilizan en la codificación, y su respectivo significado, asignados de acuerdo con los requerimientos del Laboratorio de Ensayos No Destructivos.

Tabla 2.7. Codificación en las juntas soldadas previo a los END.

SÍMBOLOGÍA	SIGNIFICADO	EJEMPLO ANALIZADO
20	Año del END	<p>20-R02-IV-01-P1A:</p> <p>En este caso se tiene que la junta soldada corresponde a END del AÑO 2020, el número del REPORTE es el 02, la INSPECCIÓN VISUAL realizada es la número 01, se realizan los ensayos en la PROBETA soldada con SMAW (1); y se analiza la CARA de la soldadura (A).</p>
R	Reporte	
02	Número de reporte	
IV	Siglas correspondientes al END realizado	
	IV: Inspección Visual	
	PT: Líquidos Penetrantes	
	RX: Rayos X	
01	Número de inspección visual	
P	Probeta	
1	Número de probeta de acuerdo con el proceso de soldadura empleado	
	1: SMAW	
	2: GMAW	
	2_1: GMAW CORREGIDA	
	3: GTAW	
A	Lado de la soldadura	
	A: CARA B: RAÍZ	

(Fuente: Propia)

La identificación que corresponde en este caso para las juntas soldadas se detalla en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Identificación en las juntas soldadas.

PROCESO DE SOLDADURA	CÓDIGO	IMAGEN DE REFERENCIA
SMAW	20-R02-IV-01-P1A	

GMAW	20-R02-IV-01-P2A	
GTAW	20-R02-IV-01-P3A	

(Fuente: Propia)

2.6.2. Ejecución del ensayo de inspección visual

Este ensayo se realiza identificando los posibles defectos presentes en la superficie de la junta soldada y con la medición de la sobremonta del cordón de soldadura en la cara y en la raíz del cordón, para esto se emplea una galga para soldadura y una regla, como se observa en la Figura 2.16. Con esto se determina las ubicaciones de las discontinuidades superficiales presentes y la longitud de estas.



Figura 2.16. Medición de la sobremonta en el cordón de soldadura.
(Fuente: Propia)

Mediante este proceso podemos determinar visualmente cualquier discontinuidad sin la necesidad de aplicar algún químico u otra sustancia. Luego de la inspección visual es

necesario complementar este ensayo con la realización de los ensayos de tintas penetrantes y radiografía industrial para determinar discontinuidades subsuperficiales.

2.6.3. Criterios de aceptación para el ensayo de inspección visual

- Para que se acepte la prueba de inspección visual la soldadura no debe presentar grieta alguna.
- Las mordeduras no deben exceder 1/32 in (1 mm). La sobremonta de la soldadura no debe exceder 1/8 in (3,2 mm).
- Para penetración completa de la junta (CJP, por sus siglas en inglés) sin respaldo de acero, se debe inspeccionar la raíz de la soldadura, y no debe existir evidencia de grietas, fusión incompleta o penetración inadecuada de la junta.
- Se permite una superficie de raíz cóncava siempre que el espesor total de la soldadura sea igual o mayor que el del metal base (AWS, 2007).

2.6.4. Ejecución del ensayo de tintas penetrantes

Para este ensayo se emplea un kit de tintas: limpiador, penetrante y revelador que se muestran en la Figura 2.17.



Figura 2.17. Kit de tintas.
(Fuente: Propia)

Para realizar el ensayo se debe seguir los pasos indicados a continuación:

1. Limpiar (quitar toda la suciedad, óxido, escoria etc.) y secar la probeta a ser ensayada con un paño que no desprenda pelusas.
2. Aplicar la tinta de manera uniforme y esperar el tiempo indicado por el fabricante para que la tinta ingrese en todas las discontinuidades.
3. Retirar el exceso de tinta con un paño de algodón.
4. Aplicar el revelador sobre el área donde se colocó la tinta y esperar que esta actúe, es decir, que se seque y revele las discontinuidades.

5. Mediante la hoja de datos y croquis respectivo anotar los datos de las discontinuidades observadas (distancia y tipo de discontinuidad).
6. Limpiar y secar la probeta.

En la Figura 2.18 se indica la junta soldada correspondiente al proceso SMAW una vez aplicado el líquido penetrante.



Figura 2.18. Placa soldada con proceso SMAW luego de aplicar el líquido penetrante.
(Fuente: Propia)

En la Figura 2.19 se observa la junta soldada correspondiente al proceso GMAW una vez aplicado el líquido penetrante.



Figura 2.19. Placa soldada con proceso GMAW luego de aplicar el líquido penetrante.
(Fuente: Propia)

En la Figura 2.20 se presenta la junta soldada correspondiente al proceso GTAW una vez aplicado el líquido penetrante.



Figura 2.20. Placa soldada con proceso GTAW luego de aplicar el líquido penetrante.
(Fuente: Propia)

2.6.5. Ejecución del ensayo de radiografía industrial

Para el ensayo de radiografía industrial primero se determinan las variables de exposición radiográfica, en este caso se tiene: 120 kV de voltaje, 5 mA de amperaje, 1 minuto de tiempo de exposición y una distancia a la fuente de 55 cm, y se emplea la técnica simple pared simple imagen, tal como se indica en el informe emitido por el Laboratorio de END. Las especificaciones del equipo empleado en este ensayo se detallan en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9. Características del equipo para radiografía industrial.

Datos técnicos del tubo de rayos catódicos y su consola	
Imagen del equipo	
Marca	Baltographe 200
Potencia	600 W
Voltaje máximo	200 kV
Amperaje máximo	10 mA
Peso	13 kg
Flujo de enfriamiento	0,57 L/min

(Fuente: Propia)

Una vez que se tiene las variables de exposición radiográfica se procede a colocar los códigos de identificación con letras de plomo que sirven para identificar las películas

radiográficas en cada una de las placas soldadas, también se tienen que situar los indicadores de calidad de imagen (1A ASTM 6) debajo de la identificación. Los códigos de identificación empleados se detallan en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Identificación de las películas en cada placa soldada.

JUNTA SOLDADA	Código en la película	Ubicación	Indicador de calidad de imagen
SMAW	20-RIV-RX-II-PIB	Segunda parte de la placa	1A ASTM 6
	20-RIV-RX-II-PIA	Primera parte de la placa	1A ASTM 6
GMAW	20-RIV-RX-II-PIIB	Segunda parte de la placa	1A ASTM 6
	20-RIV-RX-II-PIIA	Primera parte de la placa	1A ASTM 6
GMAW	20-RIV-RX-II-PII_IA	Primera parte de la placa	1A ASTM 6
	20-RIV-RX-II-PII_IB	Segunda parte de la placa	1A ASTM 6
GTAW	20-RIV-RX-II-PIIIA	Primera parte de la placa	1A ASTM 6
	20-RIV-RX-II-PIIIB	Segunda parte de la placa	1A ASTM 6

(Fuente: Propia)

Luego de colocar los códigos correspondientes y los indicadores de calidad de imagen se tiene que colocar la película radiográfica en la raíz del cordón de soldadura, de tal manera que se cubra toda la longitud del cordón de soldadura, para esto, se colocan dos películas por cada placa. En la Figura 2.21 se puede observar la película radiográfica colocada en la parte posterior de una placa.

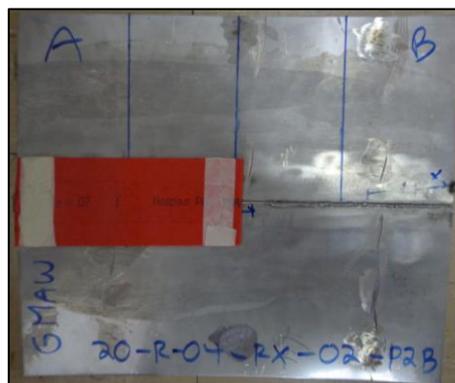


Figura 2.21. Película radiográfica colocada en la raíz del cordón de soldadura.

(Fuente: Propia)

Después de tomada la película radiográfica es necesario que pase por la etapa de revelado para su posterior interpretación y análisis de las posibles discontinuidades encontradas. En la etapa de revelado se tiene que sumergir las películas radiográficas en distintos baños como parte del proceso de revelado, los tiempos de los diferentes baños en los que se

sumerge la película radiográfica son: 3 minutos para el baño revelador, 1 minuto para el baño de parada, 6 minutos en el baño fijador y 1 minuto en el baño final.

2.7. Corte de probetas mediante chorro de agua

Una vez que se han realizado los END, se realiza el corte de las probetas para los ensayos de tracción, doblado de raíz y doblado de cara de acuerdo con la ubicación que se indica en la Figura 2.22.

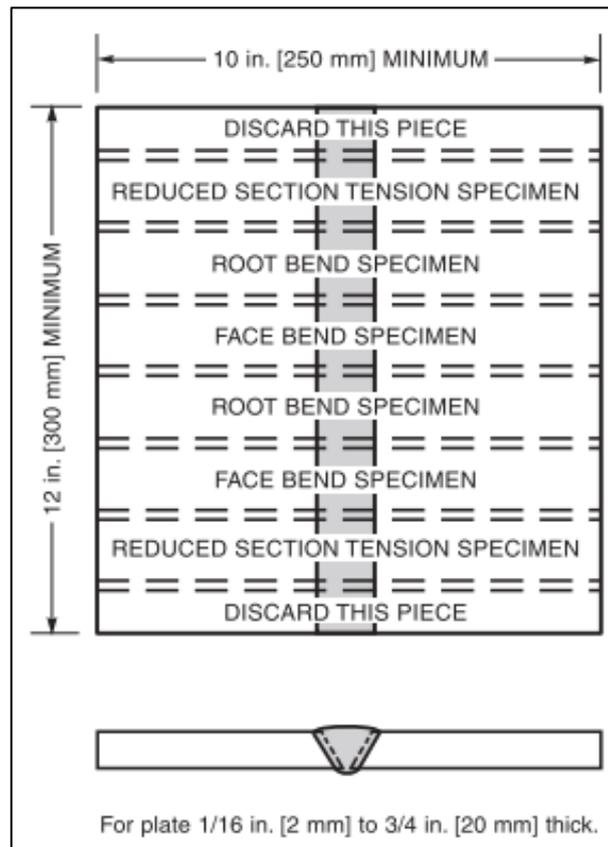


Figura 2.22. Ubicación de las probetas para los ensayos de tracción y para los doblados de raíz y cara.

(Fuente: AWS D1.6, 2014)

Este corte se realiza mediante un chorro de agua con abrasivo de arena, utilizando la máquina que se observa en la Figura 2.23 y cuya descripción detallada se indica en la Tabla 2.11. Algunas ventajas de utilizar este tipo de equipo para el corte son: no se tiene zonas afectadas por el calor, no se genera esfuerzos mecánicos y los cortes presentan una geometría extremadamente detallada (Flow, 2020). Además, se puede cortar casi cualquier material, metales, rocas, vidrios y materiales compuestos.

Tabla 2.11. Características técnicas de la cortadora por chorro de agua y abrasivo.

Datos técnicos FLOW MACH 2 2031B	
Imagen del equipo	
Fabricante	Flow
Modelo	Mach 2 2031 B, 30 HP, Intensifier Pumps 60 kpsi
Método de corte	Por agua y abrasivo
Tamaño de la mesa	1,8 m x 3 m (6 ft x 10 ft)
Presión máxima de corte	60000 psi
Precisión	+/- 0,127 mm por 1 m
Velocidad	101.6 mm/min
Potencia del motor de la bomba	30 hp
Capacidad de la tolva abrasiva	500 lb
Controlador	Basado en Windows, Software Flowmaster
Pantalla del controlador	Color de 17 in
Base del controlador	Montada en pedestal
Software	Paquete de software medidor de flujo Flowmaster

(Fuente: Flow, 2020)

El corte mediante este método no altera la microestructura del material base ni del cordón de soldadura, esto es importante para realizar el posterior análisis metalográfico, puesto que no se tiene afectaciones debido a altas temperaturas que pueden producirse con otros métodos de corte, por ejemplo, plasma u oxicorte.



Figura 2.23. Corte de las probetas utilizando chorro de agua.
(Fuente: Propia)

2.8. Ensayos Destructivos

Los ensayos destructivos (ED) que se realizan son: ensayo de tracción, doblado de cara y doblado de raíz. La finalidad de estos ensayos es determinar la variación en las propiedades mecánicas en las placas, después de haberse realizado los diferentes procesos de soldadura.

2.8.1. Maquinado de probetas para ensayo de tracción

Previo a realizar el ensayo de tracción se realiza el maquinado de las probetas de acuerdo con las dimensiones que se observan en la Figura 2.24. El maquinado de las probetas se realizó con la fresadora de la MSB en grupos de tres para optimizar tiempos, esto se puede visualizar en la Figura 2.25.

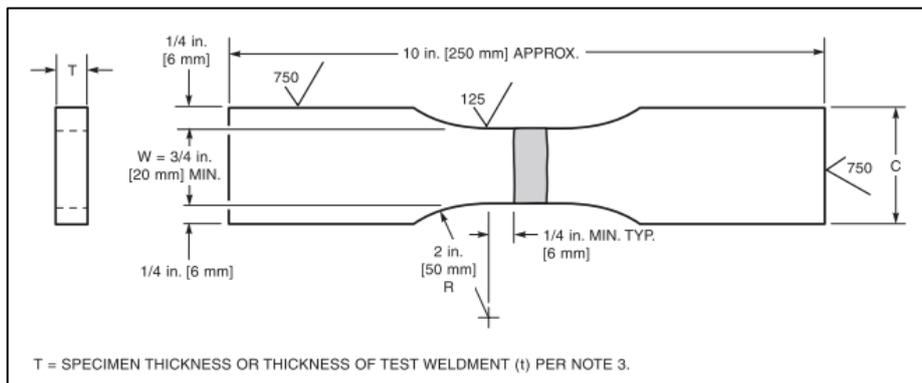


Figura 2.24. Dimensiones normalizadas para la probeta de tracción.
(Fuente: AWS D1.6, 2014)



Figura 2.25. Maquinado de probetas en la fresadora de la MSB.
(Fuente: Propia)

Se maquinaron un total de ocho probetas para los ensayos de tracción: dos probetas por cada proceso de soldadura y dos probetas de material base, estas pueden observarse en las Figuras 2.26 y 2.27.

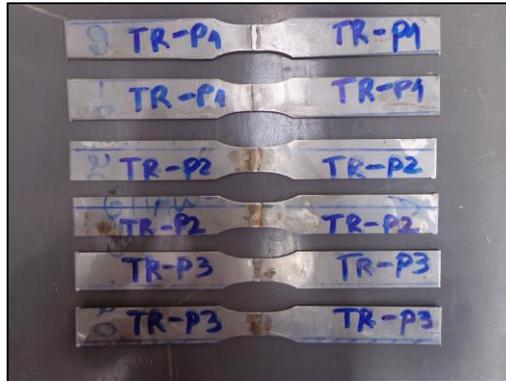


Figura 2.26. Probetas de cada proceso de soldadura para ensayo de tracción.
(Fuente: Propia)

La nomenclatura de las probetas que se indican en la Figura 2.26 corresponden a P1 para proceso SMAW, P2 para proceso GMAW y P3 para proceso GTAW.



Figura 2.27. Probetas de material base para ensayo de tracción.
(Fuente: Propia)

2.8.2. Equipo utilizado para el ensayo de tracción

Luego de maquinar las probetas para el ensayo de tracción, se procede a realizar el mismo con la máquina universal de ensayos disponible en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV) de la EPN, esta máquina se observa en la Figura 2.28 y sus especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 2.12.



Figura 2.28. Máquina universal para ensayo de tracción.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.12. Características técnicas del equipo para ensayo de tracción.

Especificaciones técnicas de la máquina universal para ensayo de tracción	
Imagen de referencia	
Marca	Tinius Olsen
Serie	Super L 1200
Capacidad	120000 Lbf
Sistema de tracción	Hidráulico
Apreciación	0,1 Lbf

(Fuente: Propia)

2.8.3. Ensayo de tracción

Se realizan ocho ensayos de tracción: dos para el proceso SMAW, dos para el proceso GMAW, dos para el proceso GTAW y dos para el material base. Las probetas se sujetan de dos extremos mediante mordazas como se indica en la Figura 2.29 y estas se someten a una carga variable hasta que llegan al esfuerzo máximo de tracción y se fracturan.

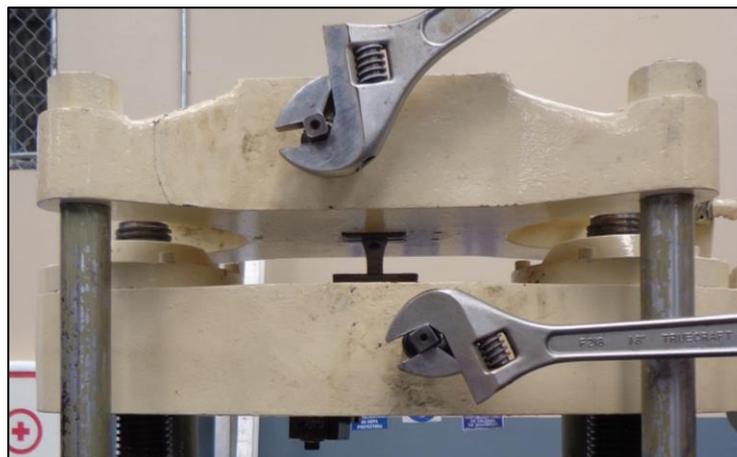


Figura 2.29. Probeta en la máquina universal de ensayos.
(Fuente: Propia)

Luego de realizado el ensayo se toman los valores de la carga y los esfuerzos máximos alcanzados en las probetas para posteriormente comparar con los valores nominales que corresponden.

2.8.4. Criterio de aceptación para la prueba de tracción

Las probetas deben resistir un esfuerzo superior a 75 ksi, que es el esfuerzo mínimo de tracción, según lo establecido en la norma AWS D1.6 para ser aceptadas. Si la probeta se rompe en el cordón de soldadura, igual este esfuerzo debe ser superior al mencionado para aceptar el ensayo.

2.8.5. Equipo utilizado para el doblado de cara y raíz

Para realizar el doblado de cara y raíz se tiene que emplear la prensa hidráulica que se observa en la Figura 2.30 ubicada en el Laboratorio de Soldadura en la Facultad de Ingeniería Mecánica (FIM) de la EPN y cuyas especificaciones técnicas se describen en la Tabla 2.13.



Figura 2.30. Prensa hidráulica para ensayo de doblado.
(Fuente: Propia)

En la Tabla 2.13, que se presenta a continuación, se puede observar una descripción técnica del equipo para doblado de cara y raíz.

Tabla 2.13. Características técnicas del equipo para ensayo de doblado.

Especificaciones técnicas de la prensa hidráulica para ensayos de doblado	
Imagen referencial	

Marca	NA
Modelo	Proyecto de tesis
Presión máxima	2000 psi
Velocidad angular del motor	1720 rpm
Potencia del motor	2 hp
Eficiencia del motor	0,82
Frecuencia	60 Hz

(Fuente: Propia)

2.8.6. Doblado de cara y raíz

El doblado de raíz y de cara se realiza utilizando el JIG especificado en la norma AWS D1.6, este se muestra en la Figura 2.31.

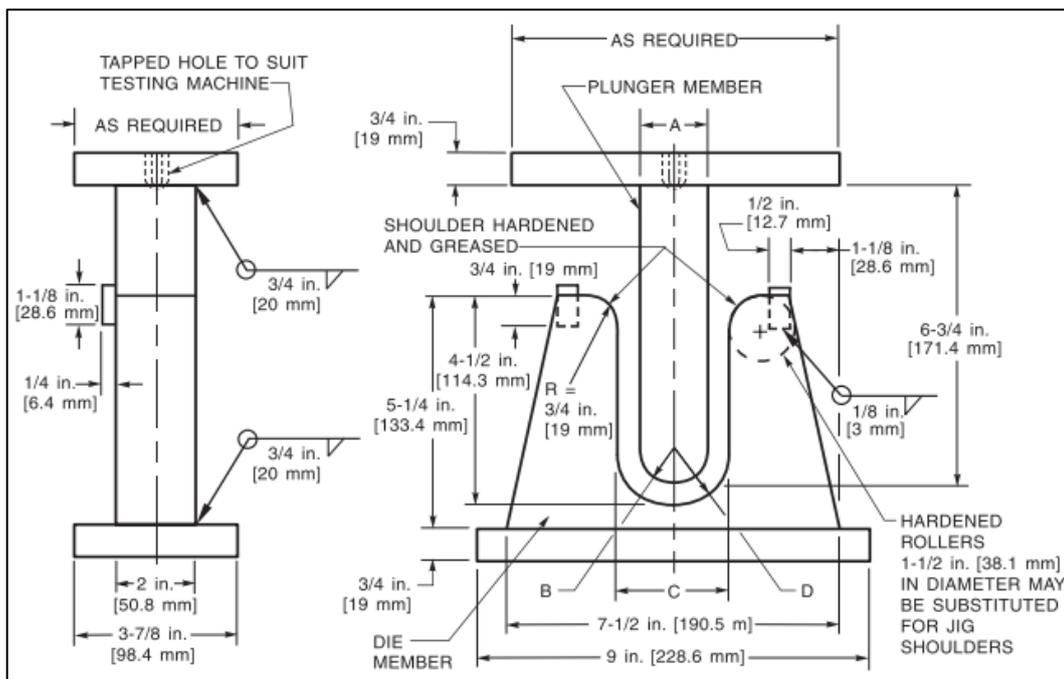


Figura 2.31. JIG utilizado para los doblados de raíz y cara.

(Fuente: Propia)

En este ensayo se procede a doblar la probeta mediante la aplicación de una carga en el centro de la probeta que se apoya en sus dos extremos. Si el doblado que se realiza es doblado de cara, con la cara hacia abajo. Y si el doblado realizado es doblado de raíz con la raíz hacia abajo, para ello es necesario pulir la zona a ser ensayada previamente, la finalidad de este ensayo es que la probeta no se rompa y que no presente fisuras luego del doblado, caso contrario esta se rechaza. Este ensayo se usa para complementar el ensayo de tracción, determinar la ductilidad de la soldadura y detectar defectos que afecten a la misma. El doblado se realiza en el Laboratorio de Soldadura en la FIM de la EPN, en la Figura 2.32 se muestra el doblado de una de las probetas.

Las probetas ensayadas fueron: DR1, DR2, DR3, DC1, DC2, DC3. Cada una de las cuales corresponde a un proceso de soldadura, las que tienen el número 1 corresponden al proceso SMAW, 2 a GMAW y 3 a GTAW. Se tiene un total de cuatro probetas por cada proceso, dos para doblado de cara y dos para doblado de raíz.



Figura 2.32. Ensayo de doblado en una de las probetas.
(Fuente: Propia)

2.8.7. Criterios de aceptación para el doblado de cara y raíz

La superficie convexa de las muestras para el ensayo de curvatura se examina visualmente para detectar discontinuidades en la superficie.

Para su aceptación, la superficie no deberá contener discontinuidades que excedan las siguientes dimensiones:

- 1) 1/8 in (3,2 mm) medidos en cualquier dirección de la superficie.
- 2) 3/8 in (9,5 mm): la suma de las mayores dimensiones de todas las discontinuidades que exceden 1/32 in (0,8 mm), pero menores o iguales que 1/8 in (3,2 mm).
- 3) 1/4 in (6,4 mm) la grieta máxima en la esquina, excepto cuando la grieta en la esquina resultó de la inclusión de escoria visible u otras discontinuidades del tipo de fusión, entonces se aplicará el máximo de 1/8 in (3,2 mm). Las muestras con grietas en las esquinas que excedan 1/4 in (3,2 mm) sin evidencia de inclusión de escoria u otras discontinuidades de tipo fusión.

2.9. Metalografías

2.9.1. Preparación de las muestras

Luego de realizar los ensayos destructivos, se prepara una muestra de cada placa soldada para realizar las metalografías, la muestra que se extrae de las distintas juntas soldadas presenta la geometría que se observa en la Figura 2.33.

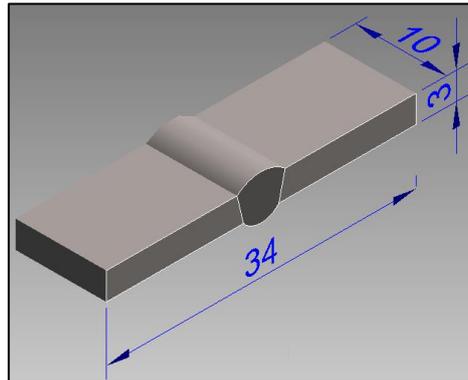


Figura 2.33. Muestra para metalografía.
(Fuente: Propia)

Para realizar las micrografías y macrografías de cada muestra de los procesos de soldadura, se debe colocar las muestras en un disco de resina (Figura 2.34) y luego se tiene que realizar un pulido para obtener un acabado tipo espejo, que permita visualizar la microestructura de las probetas en el microscopio.

Las micrografías se hacen con aumentos de 500x y 100x. Previo al pulido se tiene que hacer un lijado con lijas 150, 240, 320, 400, 600 y 1200. El pulido se realiza de forma automática en una máquina como se presenta en la Figura 2.35.



Figura 2.34. Muestra colocada en un disco de resina.
(Fuente: Propia)

2.9.2. Equipo para pulido de muestras

Para realizar el pulido de las muestras previo al análisis metalográfico, se emplea el equipo que se muestra en la Figura 2.35. Las características técnicas de este equipo (Metlab, 2020) se presentan en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14. Características técnicas de la pulidora para muestras.

Especificaciones técnicas METKON FORCIMAT/FORCIPOL	
Imagen del equipo	
Marca	Metkon
Modelo	Forcipol 2V
Número de estaciones	2
Motores	0,75 hp; 110 V 50/60 Hz; 1 pH
RPM	50 – 600
Diámetro del disco	200/250 mm
Dimensiones (mm)	700 x 690 x 340
Peso (kg)	40

(Fuente: Propia)

2.9.3. Pulido de muestras

Durante el pulido de las muestras se coloca alúmina cada 20 segundos y shampoo con ph neutro cada 2 minutos (Figura 2.35), para que se tenga un buen acabado que cumpla con el requerimiento del ensayo que se va a realizar.



Figura 2.35. Pulido de las probetas.
(Fuente: Propia)

Una vez pulidas las probetas se realiza el ataque químico de estas empleando un reactivo químico que se utiliza para el acero inoxidable, en este caso, Marble. La composición de este reactivo según se indica en Metals Handbook (ASM INTERNATIONAL, 2004) es: 50 ml de HCL, 10 g de CuSO_4 y 50 ml de H_2O destilada. Después de realizar el ataque químico, se lava con agua y alcohol industrial, posteriormente se seca con algodón y aire caliente utilizando una secadora. Las probetas listas para las metalografías se presentan en la Figura 2.36.



Figura 2.36. Probetas listas para realizar las metalografías.
(Fuente: Propia)

Después que las probetas están atacadas se realiza la toma de las micrografías en el metal base, en la interfaz cordón de soldadura-metal base y en el cordón de soldadura. Finalmente se toma las macrografías en las probetas soldadas.

2.9.4. Equipo para metalografías

Para realizar las metalografías se emplea el equipo de macrografías (Olympus, 2020b) y el que se utiliza para la toma de micrografías (Olympus, 2020a) que se observa en la Figura 2.37 y en la Figura 2.38 respectivamente. La descripción técnica de cada uno de estos equipos se detalla en la Tabla 2.15 y en la Tabla 2.16.



Figura 2.37. Microscopio para macrografías.
(Fuente: Propia)



Figura 2.38. Microscopio para micrografías.
(Fuente: Propia)

Las características técnicas del microscopio se indican en la Tabla 2.15.

Tabla 2.15. Especificación técnica del microscopio para macrografía.

Descripción técnica del microscopio para macrografías	
Imagen del equipo	
Marca	Olympus
Modelo	SZX7
Voltaje de entrada	110 V

Rango de magnificación	0,4X hasta 2,8X
Iluminación	Luz halógena 30 W
Visualización	Binocular
Enfoque	Manual
Observación	Tubo binocular con ángulo de inclinación 45°
Software	STREAM ESSENTIALS

(Fuente: Propia)

Las características técnicas del equipo para macrografías se detallan en la Tabla 2.16.

Tabla 2.16. Especificación técnica del microscopio para macrografía.

Descripción técnica del microscopio para micrografías	
Imagen del equipo	
Marca	Olympus
Modelo	GX41F
Voltaje	100-120/230-240 V
Frecuencia	50/60 Hz
Amplificación	5X, 10X, 50X, 100X
Tubos de observación	10X
Cámara metalográfica	5 MP
Software	STREAM ESSENTIALS
Consumo de energía	Consumo de potencia máximo: 85V a 40W
Dimensiones	236(Ancho) x 24(Profundidad) x 407(Altura) mm (Tubo binocular)
Peso	Aproximadamente 10 kg

(Fuente: Propia)

2.9.5. Micrografías

Para las micrografías, los técnicos del Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional primero verifican que las muestras pulidas no presenten novedades en su microestructura, por ejemplo, colas de cometa debido a una falta de pulido o quemones generados por una mala aplicación del ataque químico. Una vez que se revisa que las probetas están listas para la toma de micrografías, se realiza la toma de fotografías con aumentos de 100X y 500X en 3 zonas diferentes de la muestra: 1) en la

zona del material base, 2) en la zona de la interfaz entre el material base y el cordón de soldadura y 3) en el cordón de soldadura, esto se realiza con el fin de determinar las microestructuras en estas tres zonas y posteriormente realizar comparaciones acertadas.

2.9.6. Diagrama Schaeffler

El diagrama Schaeffler mostrado en la Figura 2.39 (Kotecki & Siewert, 1992) es una herramienta bastante útil para predecir la constitución del metal de soldadura en un acero inoxidable. Dependiendo de los elementos de aleación que contiene, el Diagrama Schaeffler entrega información sobre las varias fases o estructuras presentes (Group, 2014). El cromo equivalente se calcula mediante el porcentaje en peso de elementos formadores de ferrita, como el Cr, Si, Mo, Nb y W; y el níquel equivalente se calcula mediante el porcentaje en peso de los elementos formadores de austenita que son el C, Ni, Mn, Cu y N. La posición en el diagrama Schaeffler que está definida por los equivalentes de Cr y Ni entrega las proporciones de martensita, austenita y ferrita en la microestructura resultante.

El Cromo equivalente (Cr_{eq}) y el Níquel equivalente (Ni_{eq}) de un determinado acero inoxidable se calcula utilizando las Ecuaciones 1 y 2, en las que se introduce la composición química del acero.

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb$$

Ecuación 1

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30\%C + 0,5\%Mn$$

Ecuación 2

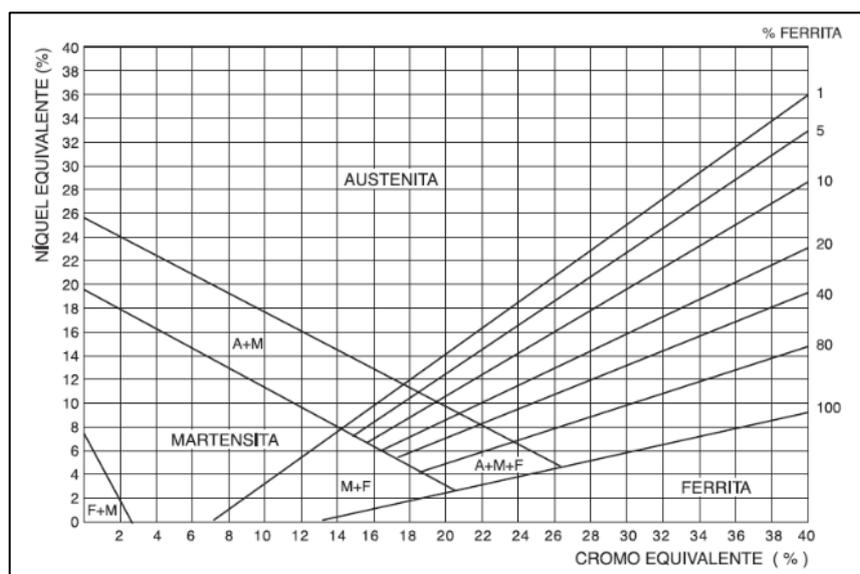


Figura 2.39. Diagrama Schaeffler.
(Fuente: Kotecki & Siewert, 1992)

2.9.7. Macrografías

La toma de las macrografías es más sencilla, pues solamente se tiene que tomar una fotografía con un solo aumento por cada una de las muestras, la toma de macrografías es correspondiente a: soldadura SMAW, soldadura GMAW y soldadura GTAW. Es decir, se obtienen un total de 3 macrografías.

2.9.8. Criterios de aceptación en las macrografías

Las muestras tienen que cumplir con los requerimientos que se establecen en la norma AWS D1.6, estos indican que, para una calificación aceptable, la macrografía inspeccionada visualmente debe ajustarse a:

- (1) La penetración de la junta parcial (PJP, por sus siglas en inglés) debe tener el tamaño de soldadura diseñado.
- (2) Las soldaduras de filete deben tener fusión en la raíz de la junta, pero no necesariamente, más allá.
- (3) El tamaño mínimo de la pierna del cordón de soldadura debe concordar con el tamaño de la soldadura de filete especificada.
- (4) Las soldaduras de ranura de penetración de junta parcial y las soldaduras de filete deben tener lo siguiente:
 - (a) No debe presentar grietas.
 - (b) A través de la fusión entre capas adyacentes de metales de soldadura y entre el metal de soldadura y el metal base.
 - (c) Perfiles de soldadura ajustados al detalle previsto.
 - (d) Las mordeduras no deben exceder 1/32 in (1mm).

2.10. Barrido de dureza

2.10.1. Equipo para barrido de dureza

El equipo que se utiliza para el barrido de dureza se muestra en la Figura 2.40 y su descripción técnica se presenta en la Tabla 2.17.



Figura 2.40. Durómetro.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.17. Especificación técnica del durómetro.

Descripción técnica del equipo para el ensayo de dureza	
Imagen del equipo	
Marca	Hardrocker
Modelo	HR 150 A
Indentador	Esférico de carburo de tungsteno. Diámetro 1/16 in
Cargas disponibles	60, 100, 150 kgf
Precarga	10 kgf
Medición	Análoga

(Fuente: Propia)

2.10.2. Ejecución del barrido de dureza

Para realizar este ensayo es necesario previamente marcar los lugares donde se va a medir la dureza de la muestra. Estos puntos se toman en cada muestra de las placas de soldadura como se puede ver en la Figura 2.41, la norma ASTM E18 indica la distancia entre los puntos para medición de la dureza. Luego de esto se elige el indentador, en este

caso se utiliza un indentador de bola con un diámetro de 1/16 de pulgada y la escala de dureza Rockwell B como se indica en (Avner, 1988).



Figura 2.41. Puntos donde se mide la dureza de las muestras soldadas.
(Fuente: Propia)

Para el caso de la muestra correspondiente al material base, de acuerdo con los protocolos del Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla, sólo debe tomarse la dureza en 3 puntos como máximo, esto se puede verificar en la Figura 2.42.



Figura 2.42. Puntos donde se mide la dureza del material base.
(Fuente: Propia)

2.11. Análisis de costos de los procesos de soldadura

En toda industria es importante conocer cuáles son los costos de realizar un determinado proceso, en este caso, la unión de metales mediante soldadura. Como en este proyecto se realiza la soldadura de Acero Inoxidable Austenítico AISI 304 con tres procesos diferentes SMAW, GMAW y GTAW, se necesita conocer cuál es el más conveniente desde el punto de vista financiero. Para realizar este análisis, primero se toma en cuenta el costo de la energía eléctrica en el sector industrial, en este caso se conoce que tiene un costo (C) de 0,091 [USD] por cada [kW-h]. Después se determina el consumo energético de cada proceso de soldadura, tomando en cuenta la potencia (P) consumida por cada proceso, esto se puede determinar conociendo los voltajes (V) y amperajes o intensidades (I) promedios que se pueden observar en los correspondientes WPS. Se tiene que la potencia se calcula mediante la Ecuación 3.

$$P = V \cdot I$$

Ecuación 3.

Donde:

P, potencia en cada proceso [W] o [kW]

V, voltaje promedio empleado [V]

I, intensidad o amperaje promedio [A]

Luego de determinar la potencia y al conocer los tiempos de ejecución de cada proceso, se establece el consumo energético en [kW-h] utilizando la Ecuación 4.

$$E = P \cdot t$$

Ecuación 4.

Donde:

E, consumo energético [kW-h]

P, potencia en cada proceso [kW]

t, tiempo de ejecución del proceso [h]

Para determinar el costo eléctrico (CE) de cada proceso de soldadura, se multiplica el respectivo consumo energético (E) por el costo (C) del [kW-h] y por un factor de 1/0.5 que está relacionado con la eficiencia de la fuente, que para todos los casos es 50%, como se indica en la Ecuación 5.

$$CE = E \cdot C \cdot \frac{1}{0,5}$$

Ecuación 5.

Donde:

CE, costo eléctrico del proceso [USD]

E, consumo energético [kW-h]

C, costo de la energía eléctrica en el sector industrial [USD/kW-h]

Por último, para determinar el costo total (CT) del proceso de soldadura analizado, se deben sumar el costo eléctrico (CE) y los costos de los insumos (CI) empleados. Esto se indica en la Ecuación 6.

$$CT = CE + CI$$

Ecuación 6.

Donde:

CT, costo total del proceso de soldadura [USD]

CE, costo eléctrico del proceso [USD]

CI, costo de los insumos empleados [USD]

A continuación, se detalla un ejemplo de cálculo para el proceso SMAW.

En la soldadura SMAW el Voltaje promedio es 27,5 [V] y el Amperaje promedio es 50 [A].

Por lo tanto, la potencia utilizando la Ecuación 3 es:

$$P = 27,5 [V] \cdot 50 [A] = 1375 [W] \cdot \frac{1 [kW]}{1000 [W]} = 1,375 [kW]$$

Se conoce que el tiempo empleado para realizar el cordón de soldadura con este proceso es 0,086 [horas], entonces el consumo energético con la Ecuación 4 es:

$$E = 1,375 [kW] \cdot 0,086 [h] = 0,1183 [kW \cdot h]$$

Conociendo el consumo energético [kW-h] y el costo de la energía eléctrica para el sector industrial [USD/kW-h] y empleando la Ecuación 5 se establece el costo eléctrico del proceso [USD]:

$$CE = 0,1183 [kW \cdot h] \cdot 0,091 \left[\frac{USD}{kW \cdot h} \right] \cdot \frac{1}{0,5} = 0,02 [USD]$$

Por último, se emplearon 4 electrodos con un costo de 0,75 [USD], entonces el costo de los insumos es 3 [USD]. Por lo tanto, de acuerdo con la Ecuación 6, el costo total es:

$$CT = 0,02 [USD] + 3 [USD] = 3,02 [USD]$$

Se determina de forma similar los costos de los procesos GMAW y GTAW. Se debe también tomar en cuenta el costo de los insumos que se emplearon en dichos procesos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados del análisis de composición química

Los resultados de la composición química del material base se indican en la Tabla 3.1. Considerando estos resultados se puede decir que la composición del material base corresponde a la nominal (Tabla 3.2) que se encuentra en el METALS HANDBOOK (ASM INTERNATIONAL, 2004), en ese sentido, es importante aclarar que la composición nominal corresponde a las cantidades máximas de cada elemento.

Tabla 3.1. Resultado de la composición química del material base.

Muestra M1		
Elemento		Composición [%]
Carbono	(C)	0,054
Silicio	(Si)	0,603
Manganeso	(Mn)	1,005
Fósforo	(P)	0,034
Cromo	(Cr)	14,23
Molibdeno	(Mo)	0,027
Níquel	(Ni)	9,151
Cobre	(Cu)	0,012
Cobalto	(Co)	0,254
Vanadio	(V)	0,064
Hierro	(Fe)	74,55
Total		99,98

(Fuente: Laboratorio de Fundición)

En la Tabla 3.2 que se indica a continuación, se presentan las cantidades máximas de cada elemento.

Tabla 3.2. Composición química nominal del material base.

Elemento		Composición [%]
Carbono	(C)	0,08
Silicio	(Si)	1,00
Manganeso	(Mn)	2,00
Fósforo	(P)	0,045
Cromo	(Cr)	19,00
Níquel	(Ni)	9,25

(Fuente: Metals Handbook)

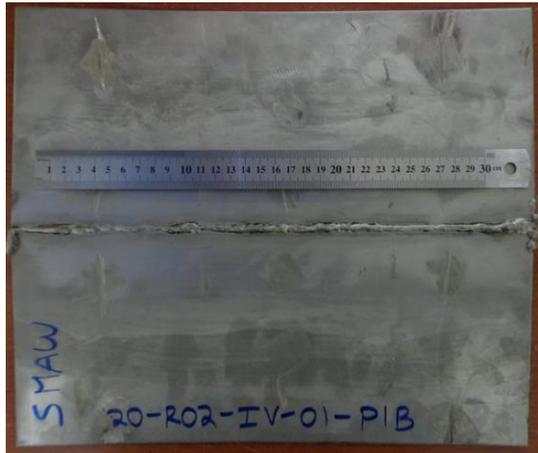
3.2. Resultados de los END

3.2.1. Resultados del ensayo de inspección visual

La inspección visual realizada en el LAB-END indica que se tiene los resultados que se detallan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Resultado del ensayo de inspección visual en las juntas soldadas.

IDENTIFICACIÓN	2020-R03-IV-01-P1-A		
			
Observaciones iniciales:			
<ol style="list-style-type: none"> 1. Se observa que el material base presenta deformación angular por convexidad, presentando un ángulo ascendente de 15° en el extremo izquierdo, una altura en el medio de la soldadura de 24 mm y un ángulo ascendente de 14° en el extremo derecho. 2. Longitudinalmente Lx: 342 mm, Ly: 146 mm y Lz: 3 mm. 3. Se identifican que la soldadura se hizo en 3 tramos. 4. Valor menor de refuerzo de soldadura (sobremonta) es 0,8 mm. 5. Valor máximo de refuerzo de soldadura (sobremonta) 2,3 mm. 6. El material base presenta 4 puntos afectados por el calor donde se soldó y ancló soportes. 			
Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades		
	X (mm)	Dim. (mm)	Discontinuidad observada
1	0	5	Quemón (Inicio del cordón)
2	179	3	Poro
3	325	0,8	Poro
Nota: Se identifican las indicaciones de izquierda a derecha.			
IDENTIFICACIÓN	2020-R03-IV-01-P1-B		



Observaciones iniciales:

1. Valor menor de refuerzo en el pase de raíz es 0,8 mm.
2. Valor máximo de refuerzo en el pase de raíz es 4,1 mm
3. El material base presenta 4 zonas que presentan maquinado debido a pase de moladora para eliminar los puntos de suelda de los soportes.

Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades		
	X (mm)	Dim. (mm)	Discontinuidad observada
1	53,5	13,5	Falta de fusión
2	41,2	3,2	Falta de fusión
3	47	12	Falta de fusión
4	220	41	Falta de fusión
5	298	51,5	Falta de fusión
6	355	18	Falta de fusión lado izquierdo
7	355	18	Falta de fusión lado derecho
8	340	11	Falta de fusión

Nota: Se identifican las indicaciones de izquierda a derecha.

IDENTIFICACIÓN	2020-R03-IV-01-P2-A
-----------------------	----------------------------



Observaciones iniciales:

1. Se observa que el material base presenta deformación angular por convexidad, presentando un ángulo ascendente de 13° en el extremo izquierdo, una altura en el medio de la soldadura de 22 mm y un ángulo ascendente de 10° en el extremo derecho.
2. Longitudinalmente Lx: 344 mm, Ly: 145 mm y Lz: 3 mm.
3. Se identifican que la soldadura se hizo en 3 tramos.
4. Valor menor de refuerzo de soldadura (sobremonta) es 0,6 mm.
5. Valor máximo de refuerzo de soldadura (sobremonta) 2,4 mm.
6. El material base presenta 6 puntos afectados por el calor donde se soldó y ancló soportes.

Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades		
	X (mm)	Dim. (mm)	Discontinuidad observada
1	34	14	Mordedura
2	174	54	Mordedura
3	170	15,2	Mordedura
4	191	159	Mordedura

Nota: Se identifican las indicaciones de izquierda a derecha.

IDENTIFICACIÓN	2020-R03-IV-01-P2-B
-----------------------	---------------------



Observaciones iniciales:

1. Valor menor de refuerzo en el pase de raíz es 0,2 mm.
2. Valor máximo de refuerzo en el pase de raíz es 4 mm
3. El material base presenta 6 zonas que presentan maquinado debido a pase de moladora para eliminar los puntos de suelda de los soportes.

Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades		
	X (mm)	Dim. (mm)	Discontinuidad observada
1	0	157	Falta de fusión
2	125	28,4	Falta de fusión
3	202	25,4	Falta de fusión
4	240	49,8	Falta de fusión
5	327	350	Falta de fusión

Nota: Se identifican las indicaciones de izquierda a derecha.

IDENTIFICACIÓN	2020-R03-IV-01-P2_1A
-----------------------	----------------------



Observaciones iniciales:

1. Se observa que el material base presenta deformación angular por convexidad, presentando un ángulo ascendente de 18° en el extremo izquierdo, una altura en el medio de la soldadura de 28 mm y un ángulo ascendente de 14° en el extremo derecho.
2. Longitudinalmente Lx: 343 mm, Ly: 139 mm y Lz: 3 mm.
3. Se identifican que la soldadura se hizo en 3 tramos.
4. Valor menor de refuerzo de soldadura (sobremonta) es 0,2 mm.
5. Valor máximo de refuerzo de soldadura (sobremonta) 2,5 mm.
6. El material base presenta 6 puntos afectados por el calor donde se soldó y ancló soportes.

Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades		
	X (mm)	Dim. (mm)	Discontinuidad observada
1	47,5	10	Mordedura Izquierda
2	43,8	15	Mordedura Derecha
3	105,4	4	Mordedura Izquierda

4	144	25	Mordedura Izquierda
5	183,2	58	Mordedura Izquierda
6	125,8	7	Mordedura Derecha

Nota: Se identifican las indicaciones de izquierda a derecha.

IDENTIFICACIÓN	2020-R03-IV-01-P2_1B
-----------------------	----------------------



Observaciones iniciales:

1. Valor menor de refuerzo en el pase de raíz es -0,6 mm.
2. Valor máximo de refuerzo en el pase de raíz es 3,5 mm
3. El material base presenta 6 zonas que presentan maquinado debido a pase de moladora para eliminar los puntos de suelda de los soportes.

Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades		
	X (mm)	Dim. (mm)	Discontinuidad observada
1	0	11	Falta de penetración
2	40	25,4	Exceso de penetración
3	230	25	Falta de penetración

Nota: Se identifican las indicaciones de izquierda a derecha.

IDENTIFICACIÓN	2020-R03-IV-01-P3-A
-----------------------	---------------------



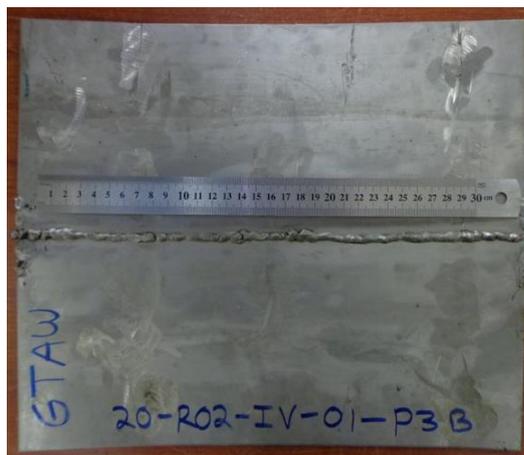
Observaciones iniciales:

1. Se observa que el material base presenta deformación angular por convexidad, presentando un ángulo ascendente de 14° en el extremo izquierdo, una altura en el medio de la soldadura de 28 mm y un ángulo ascendente de 13° en el extremo derecho.
2. Longitudinalmente Lx: 348 mm, Ly: 145 mm y Lz: 3 mm.
3. Se identifican que la soldadura se hizo en 3 tramos.
4. Valor menor de refuerzo de soldadura (sobremonta) es 0,2 mm.
5. Valor máximo de refuerzo de soldadura (sobremonta) 2 mm.
6. El material base presenta 6 puntos afectados por el calor donde se soldó y ancló soportes.

Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades		
	X (mm)	Dim. (mm)	Discontinuidad observada
1	0	10,6	Mancha
2	192	2,5	Mancha redonda

Nota: Se identifican las indicaciones de izquierda a derecha.

IDENTIFICACIÓN	2020-R03-IV-01-P3-B
-----------------------	---------------------



Observaciones iniciales:

1. Valor menor de refuerzo en el pase de raíz es 0,3 mm.
2. Valor máximo de refuerzo en el pase de raíz es 2,4 mm

3. El material base presenta 6 zonas que presentan maquinado debido a pase de moladora para eliminar los puntos de suelda de los soportes.			
Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades		
	X (mm)	Dim. (mm)	Discontinuidad observada
1	14	28	Falta de fusión
2	46	28	Falta de fusión
3	87,4	13	Falta de fusión
4	145	17	Falta de penetración
5	137	37	Falta de fusión
6	188	11	Falta de fusión
7	207	44	Falta de fusión
8	242	25	Falta de penetración
9	327	23	Falta de fusión
Nota: Se identifican las indicaciones de izquierda a derecha.			

(Fuente: Laboratorio de END)

En la Tabla 3.4 se exponen los tres cordones de soldadura de los procesos realizados donde se muestra el acabado que presenta cada.

Tabla 3.4. Acabado de los cordones en los procesos de soldadura.

PROCESO	IMAGEN DEL CORDÓN DE SOLDADURA	OBSERVACIONES
SMAW		El cordón de soldadura no se presenta uniforme debido al cambio de electrodo.

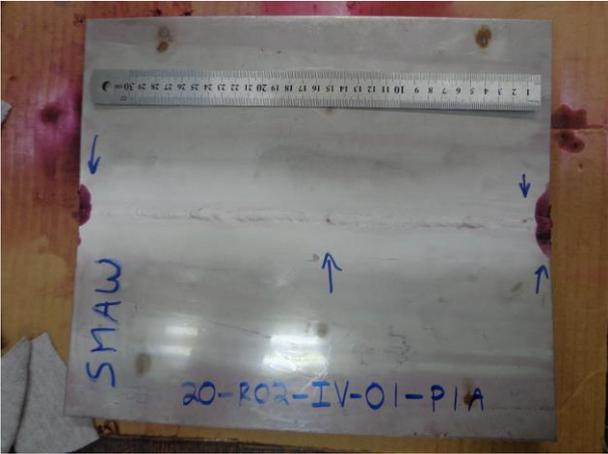
GMAW		Este cordón de soldadura presenta un acabado más uniforme.
GTAW		El cordón de soldadura presenta un acabado no uniforme.

(Fuente: Propia)

3.2.2. Resultados del ensayo de tintas penetrantes

En las Tablas 3.5, 3.6 y 3.7 se presentan los resultados del ensayo de tintas penetrantes para las juntas soldadas con procesos SMAW, GMAW y GTAW, respectivamente.

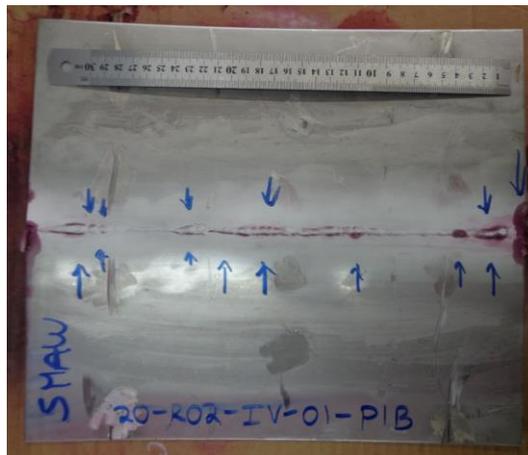
Tabla 3.5. Resultado del ensayo de tintas penetrantes en la junta soldada con SMAW.

IDENTIFICACIÓN	2020-R03-PT-01-P1-A
	

Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades		
#	X (mm)	Dim. (mm)	Tipo de mancha observada
1	0	5	Quemón
2	25	0,9	Poros
3	171	3	Poros
4	345	5	Quemón

Observaciones: Se identifican las indicaciones de izquierda a derecha.

IDENTIFICACIÓN	2020-R03-PT-01-P1-B
-----------------------	---------------------



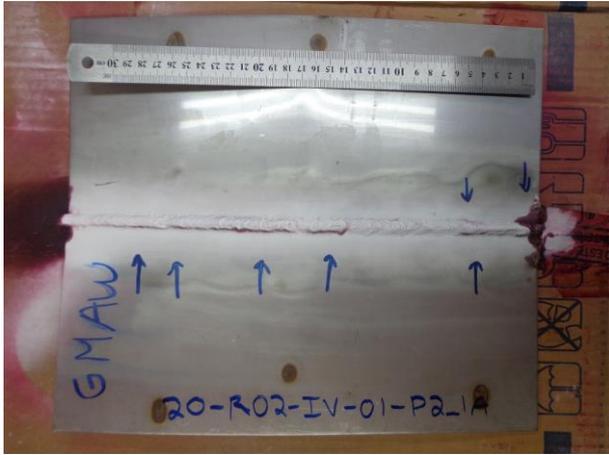
Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades		
#	X (mm)	Dim. (mm)	Tipo de mancha observada
1	0	10,2	Quemón
2	12,5	18	Falta de fusión, izquierda del cordón
2	12,5	17,4	Falta de fusión, derecha del cordón
3	38,5	8,5	Falta de fusión
4	116,2	6,2	Falta de fusión
5	103,4	51,5	Falta de fusión, derecha del cordón
5	126	11,2	Falta de fusión, izquierda del cordón
6	144,5	10	Falta de fusión
7	162,1	1,9	Poros, izquierda del cordón
8	171	41	Falta de fusión, izquierda del cordón
9	235	5,5	Falta de fusión
10	315	12	Falta de fusión
11	230	11	Falta de fusión, derecha del cordón

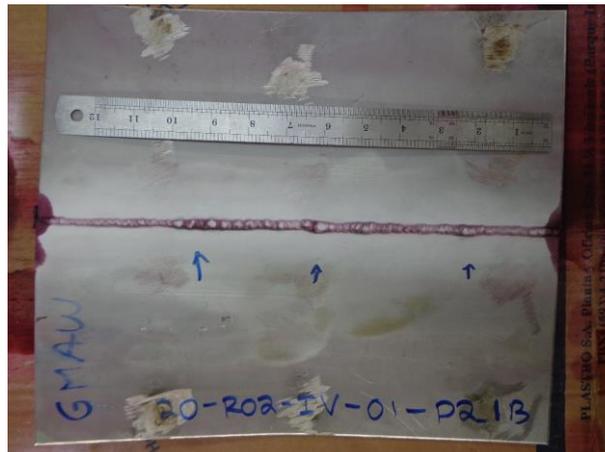
12	298	2,5	Poros
13	312	3,2	Poros
14	310	13,5	Falta de fusión

Observaciones: Se identifican las indicaciones de izquierda a derecha.

(Fuente: Laboratorio de END)

Tabla 3.6. Resultado del ensayo de tintas penetrantes en la junta soldada con GMAW.

IDENTIFICACIÓN		2020-R03-PT-01-P2_1A		
				
Discontinuidades		Identificación de Discontinuidades		
#	X (mm)	Dim. (mm)	Tipo de mancha observada	
1	0	10	Quemón	
2	47,5	10,5	Mordedura, izquierda	
2	43,8	15,2	Mordedura, derecha	
3	105,4	3,6	Mordedura	
4	144	25	Mordedura	
5	183,2	57,1	Mordedura	
6	125,8	7,5	Mordedura	
7	289	8	Falta de fusión	
Observaciones: Se identifican las indicaciones de izquierda a derecha.				
IDENTIFICACIÓN		2020-R03-PT-01-P2_1B		



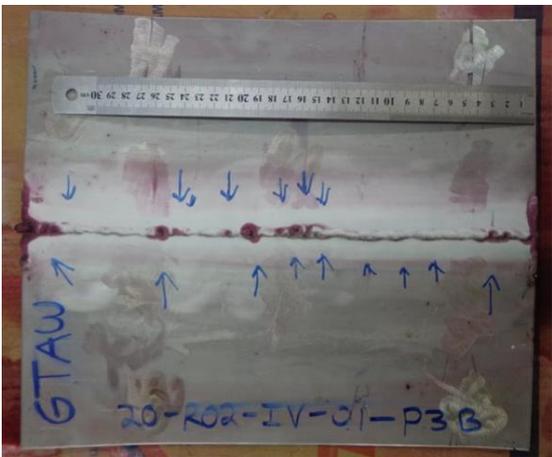
Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades		
#	X (mm)	Dim. (mm)	Tipo de mancha observada
1	0	11	Quemón
2	40	25,4	Falta de fusión
3	15,6	15,8	Falta de fusión
4	230	25	Falta de fusión

Observaciones: Se identifican las indicaciones de izquierda a derecha.

(Fuente: Laboratorio de END)

Tabla 3.7. Resultado del ensayo de tintas penetrantes en la junta soldada con GTAW.

IDENTIFICACIÓN	2020-R03-PT-01-P3-A		
Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades		
#	X (mm)	Dim. (mm)	Tipo de mancha observada
1	0	10,6	Quemón

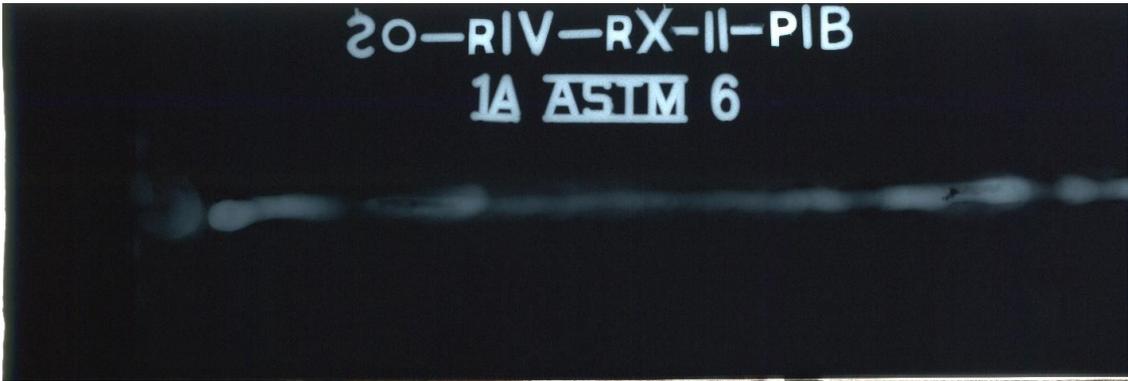
2	192	2,5	Poros
Observaciones: Se identifican las indicaciones de izquierda a derecha.			
IDENTIFICACIÓN	2020-R03-PT-01-P3-B		
			
Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades		
#	X (mm)	Dim. (mm)	Tipo de mancha observada
1	0	12,5	Quemón
2	14	27,45	Falta de fusión
3	46	27,8	Falta de fusión
4	87,4	12,5	Falta de fusión
5	145	17,4	Falta de penetración
6	137	37	Falta de fusión
7	188	11,5	Falta de fusión
8	207	4,5	Falta de fusión
9	242	25	Falta de penetración
10	327	23	Falta de fusión
11	318	4	Falta de fusión
Observaciones: Se identifican las indicaciones de izquierda a derecha.			

(Fuente: Laboratorio de END)

3.2.3. Resultados del ensayo de radiografía industrial

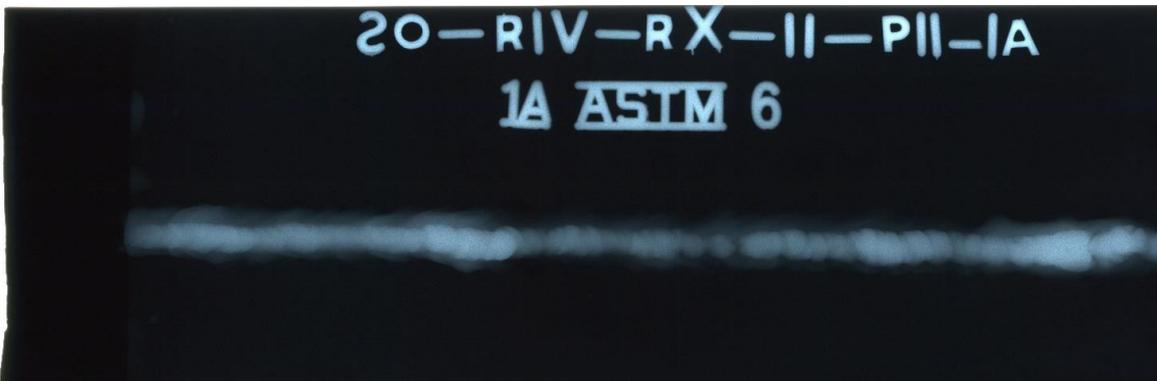
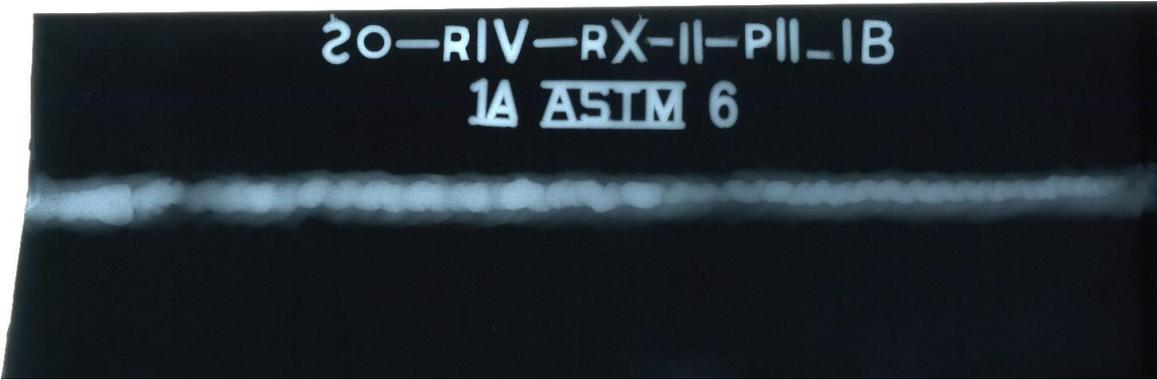
En las Tablas 3.8, 3.9 y 3.10 se indican los resultados del ensayo de radiografía industrial para las juntas soldadas con procesos SMAW, GMAW y GTAW, respectivamente.

Tabla 3.8. Resultados del ensayo de radiografía industrial en la junta soldada empleando SMAW.

Identificación: 2020-R04-RX-02-P1-B		Longitud de la película: 220 mm				
						
Discontinuidades	Sección A-B		Sección B-C		Sección C-D	
	X(mm)	Dim. (mm)	X(mm)	Dim. (mm)	X(mm)	Dim. (mm)
Falta de Penetración	67	4,5	0	7,6	--	--
Inclusiones de Escoria	--	--	--	--	24,5	9
Observaciones:						
Identificación: 2020-R04-RX-02-P1-A		Longitud de la película: 225 mm				
						
Discontinuidades	Sección A-B		Sección B-C		Sección C-D	
	X(mm)	Dim. (mm)	X(mm)	Dim. (mm)	X(mm)	Dim. (mm)
Falta de Penetración	--	--	37	38	0	15
Inclusiones de Escoria	48	4	20	19	--	--
	69	0,5				
	73	2				

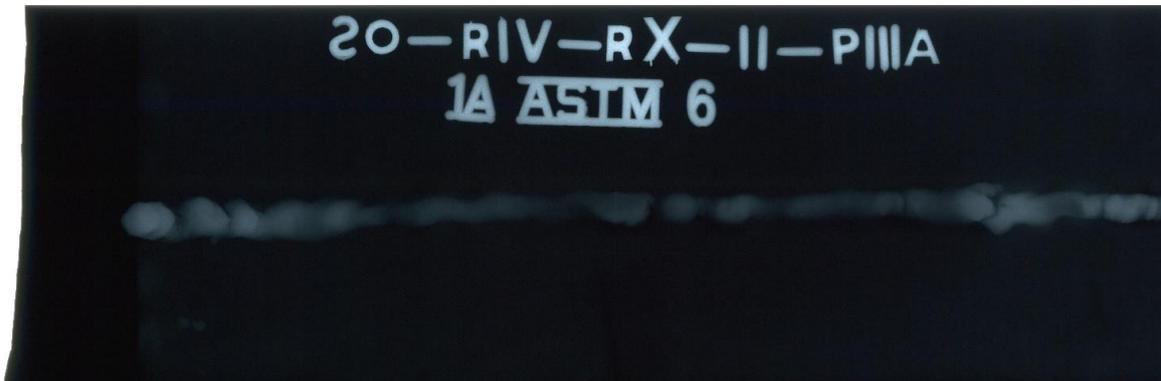
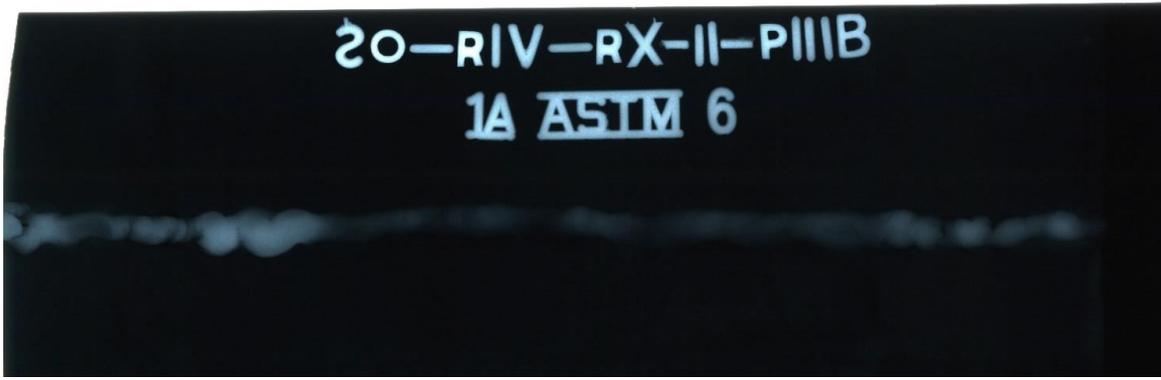
(Fuente: Laboratorio de END)

Tabla 3.9. Resultados del ensayo de radiografía industrial en la junta soldada empleando GMAW.

Identificación: 2020-R04-RX-02-P2_1A LONGITUD DE LA PLACA: 220 [mm]						
						
Discontinuidades	Sección A-B		Sección B-C		Sección C-D	
	X(mm)	Dim. (mm)	X(mm)	Dim. (mm)	X(mm)	Dim. (mm)
Concavidad Interna	--	--	10	40	--	--
Observaciones:						
Identificación: 2020-R04-RX-02-P2_1B LONGITUD DE LA PLACA: 232 [mm]						
						
Discontinuidades	Sección A-B		Sección B-C		Sección C-D	
	X(mm)	Dim. (mm)	X(mm)	Dim. (mm)	X(mm)	Dim. (mm)
Inclusiones de Escoria	20	2	--	--	--	--

(Fuente: Laboratorio de END)

Tabla 3.10. Resultados del ensayo de radiografía industrial en la junta soldada empleando GTAW.

Identificación: 2020-R04-RX-02-P3-A LONGITUD DE LA PLACA: 223 [mm]						
						
Discontinuidades	Sección A-B		Sección B-C		Sección C-D	
	X(mm)	Dim. (mm)	X(mm)	Dim. (mm)	X(mm)	Dim. (mm)
Grietas	--	--	40,3 51,7	3 2,3	25,4	6
Concavidad Interna	20	50	0	40	0	23
Observaciones:						
Identificación: 2020-R04-RX-02-P3-B LONGITUD DE LA PLACA: 220 mm						
						
Discontinuidades	Sección A-B		Sección B-C		Sección C-D	
	X(mm)	Dim. (mm)	X(mm)	Dim. (mm)	X(mm)	Dim. (mm)
Falta de Penetración	57	16,3	0	27	--	--
Inclusiones de Escoria	4	1	--	--	--	--
Concavidad interna	--	--	0	45	--	--

(Fuente: Laboratorio de END)

3.3. Resultados de los ED

3.3.1. Resultados del ensayo de tracción

En la Tabla 3.11 se detallan los resultados del ensayo de tracción en las placas soldadas con los diferentes procesos.

Tabla 3.11. Resultado del ensayo de tracción.

Identificación	Proceso empleado	Ancho promedio	Espesor promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Observación
		mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	
TR-P1-T1	SMAW	21,75	2,91	9589	42654	97,7	673,9	FZC
TR-P1-T2		20,33	2,89	8620	38343	94,7	652,6	FZC
TR-P2-T1	GMAW	20,60	2,91	8923	39694	96,0	662,2	FZC
TR-P2-T2		20,39	2,91	9410	41858	102,3	705,5	FJS
TR-P3-T1	GTAW	19,55	2,87	7433	33062	85,5	589,3	FJS
TR-P3-T2		19,35	2,89	7761	34524	89,5	617,4	FJS

*FZC: Falla en la zona afectada por el calor

*FJS: Falla en la junta soldada

(Fuente: Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones)

En la Figura 3.1 se puede observar los resultados del ensayo de tracción de las distintas probetas ensayadas correspondientes a cada proceso de soldadura.

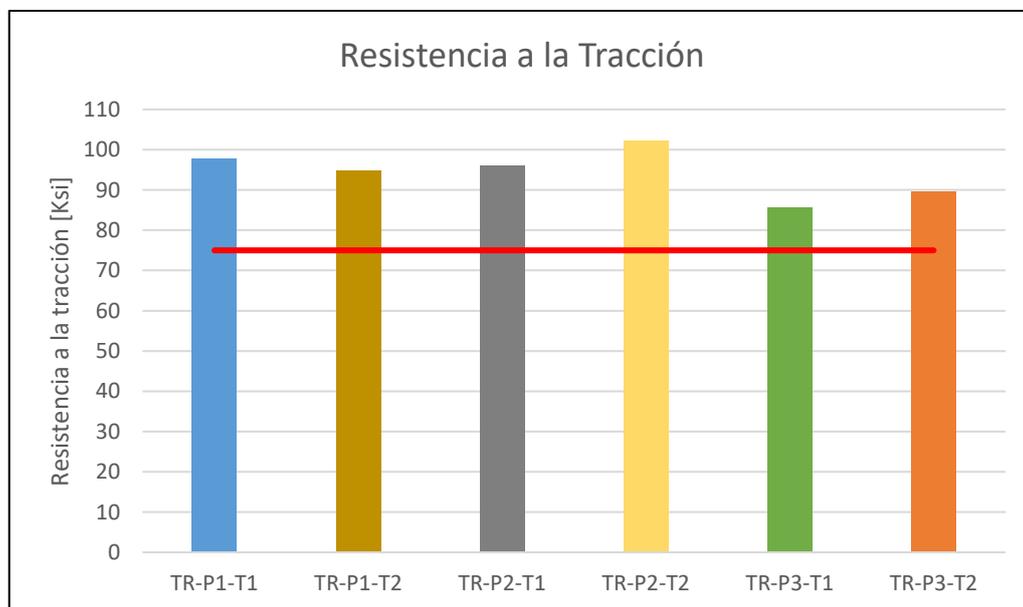


Figura 3.1. Resultados del ensayo de tracción en las probetas.
(Fuente: Propia)

La línea horizontal roja que aparece en la Figura 3.1 corresponde al esfuerzo de tracción mínimo del material base, especificado en la norma AWS D1.6.

3.3.2. Resultados de los doblados de cara y raíz

En la Tabla 3.12 se muestran los resultados de los doblados de cara y raíz en las placas soldadas con los diferentes procesos.

Tabla 3.12. Resultados del doblado de cara y raíz en las juntas soldadas.

PROCESO	DOBLADO DE CARA/RAÍZ	OBSERVACIONES
SMAW		<p>Las superficies no presentan discontinuidades.</p>
		<p>Las superficies no presentan discontinuidades.</p>
GMAW		<p>Las superficies no presentan discontinuidades.</p>
		<p>Las superficies no presentan discontinuidades.</p>

GTAW		Las superficies no presentan discontinuidades.
		Las superficies no presentan discontinuidades.

(Fuente: Propia)

3.4. Resultados del estudio metalográfico

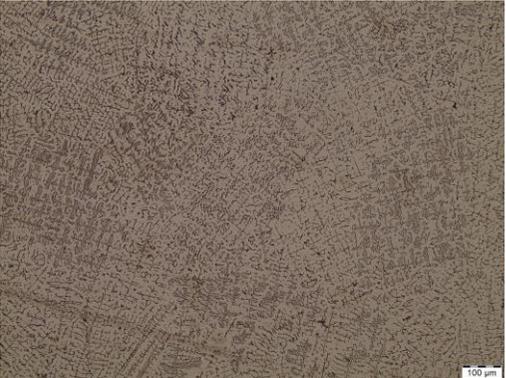
3.4.1. Resultados de las micrografías

En la Tabla 3.13 se indican las diversas micrografías tomadas, en las que se puede identificar la microestructura de las tres zonas principales de la junta soldada: metal base, zona afectada por el calor (ZAC) y zona de fusión (metal de soldadura) para cada una de las muestras preparadas con un aumento de 100X.

En la Tabla 3.14 se pueden observar las micrografías tomadas con las tres zonas indicadas anteriormente, este caso con un aumento de 500X.

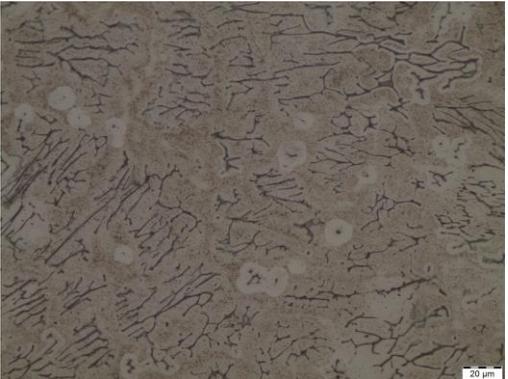
Tabla 3.13. Micrografías de las muestras con aumento de 100X.

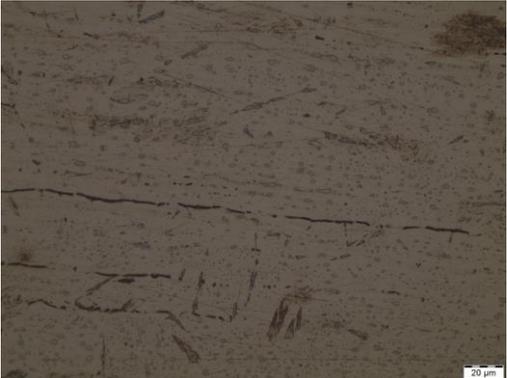
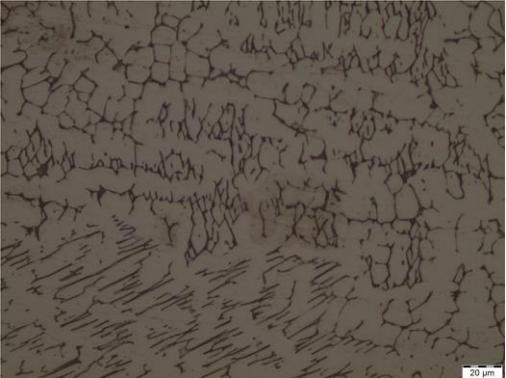
Micrografías de las muestras extraídas con un aumento de 100X			
MUESTRA	METAL BASE	ZONA AFECTADA POR EL CALOR (ZAC)	ZONA DE FUSIÓN (METAL DE SOLDADURA)
PROCESO SMAW			
OBSERVACIONES	Microestructura del Acero Inoxidable Austenítico AISI 304. Presenta una matriz austenítica. Ataque químico con Marble.	Microestructura de la ZAC. Presenta la transición de austenita a austenita+ferrita. Ataque químico con Marble.	Microestructura del metal de soldadura. Presenta ferrita delta en matriz de austenita. Ataque químico con Marble.
PROCESO GMAW			
OBSERVACIONES	Microestructura del Acero Inoxidable Austenítico AISI 304. Presenta una matriz austenítica. Ataque químico con Marble. Presenta algunos quemones.	Microestructura de la ZAC. Presenta la transición de austenita a austenita+ferrita. Ataque químico con Marble.	Microestructura del metal de soldadura. Presenta ferrita delta en matriz de austenita. Ataque químico con Marble.

PROCESO GTAW			
OBSERVACIONES	Microestructura del Acero Inoxidable Austenítico AISI 304. Presenta una matriz austenítica. Ataque químico con Marble. Presenta algunos quemones.	Microestructura de la ZAC. Presenta la transición de austenita a austenita+ferrita. Ataque químico con Marble.	Microestructura del metal de soldadura. Presenta ferrita delta en matriz de austenita. Ataque químico con Marble.
MATERIAL BASE		NA	NA
OBSERVACIONES	Microestructura del Acero Inoxidable Austenítico AISI 304. Presenta una matriz austenítica. Ataque químico con Marble. Presenta gotas residuales de alcohol industrial.	NA	NA

(Fuente: Laboratorio de metalografía, desgaste y falla)

Tabla 3.14. Micrografías de las muestras con aumento de 500X.

Micrografías de las muestras extraídas con un aumento de 500X			
MUESTRA	METAL BASE	ZONA AFECTADA POR EL CALOR (ZAC)	ZONA DE FUSIÓN (METAL DE SOLDADURA)
PROCESO SMAW			
OBSERVACIONES	Microestructura del Acero Inoxidable Austenítico AISI 304. Presenta una microestructura completamente austenítica. Ataque químico con Marble.	Microestructura de la ZAC. Ataque químico con Marble. Las burbujas que se observan son gotas de alcohol industrial residuales del proceso de limpieza.	Microestructura del metal de soldadura. Presenta austenita con inclusiones de ferrita delta. Ataque químico con Marble.
PROCESO GMAW			
OBSERVACIONES	Microestructura del Acero Inoxidable Austenítico AISI 304. Presenta una microestructura completamente austenítica. Ataque químico con Marble.	Microestructura de la ZAC. Ataque químico con Marble.	Microestructura del metal de soldadura. Presenta austenita con inclusiones de ferrita delta. Ataque químico con Marble.

<p>PROCESO GTAW</p>			
<p>OBSERVACIONES</p>	<p>Microestructura del Acero Inoxidable Austenítico AISI 304. Presenta una microestructura completamente austenítica. Ataque químico con Marble. Se observan algunos quemones.</p>	<p>Microestructura de la ZAC. Ataque químico con Marble. Se observa mayoritariamente ferrita en forma alargada.</p>	<p>Microestructura del metal de soldadura. Presenta austenita con inclusiones de ferrita delta. Ataque químico con Marble.</p>
<p>MATERIAL BASE</p>		<p>NA</p>	<p>NA</p>
<p>OBSERVACIONES</p>	<p>Microestructura del Acero Inoxidable Austenítico AISI 304. Presenta una microestructura completamente austenítica. Ataque químico con Marble. Se observan algunos quemones.</p>	<p>NA</p>	<p>NA</p>

(Fuente: Laboratorio de metalografía, desgaste y falla)

3.4.2. Resultados del Diagrama Schaeffler

En el presente estudio y de acuerdo con la composición química obtenida previamente, se emplean las Ecuaciones 1 y 2 para determinar las cantidades de Cr_{eq} y Ni_{eq} , obteniéndose como resultado los valores indicados a continuación.

$$Cr_{eq} = 14,23 + 0,027 + 1,5(0,603) = 15,16$$

$$Cr_{eq} = 15,16$$

$$Ni_{eq} = 9,151 + 30(0,054) + 0,5(1,005) = 11,27$$

$$Ni_{eq} = 11,27$$

Al graficar estos valores en el diagrama Schaeffler se obtiene el punto marcado en rojo que se observa en la Figura 3.2.

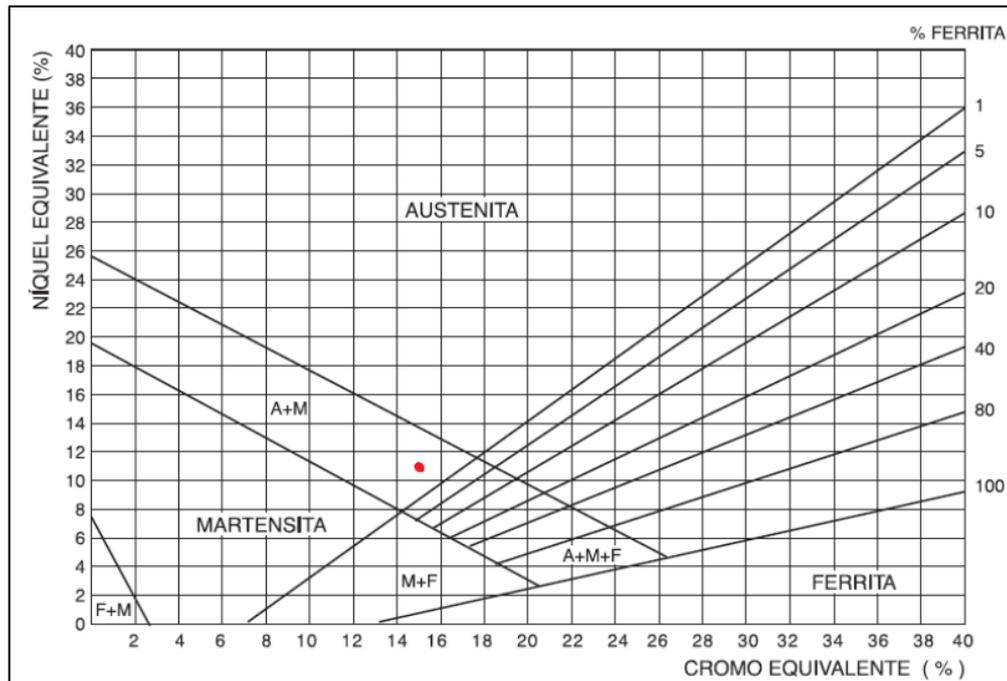


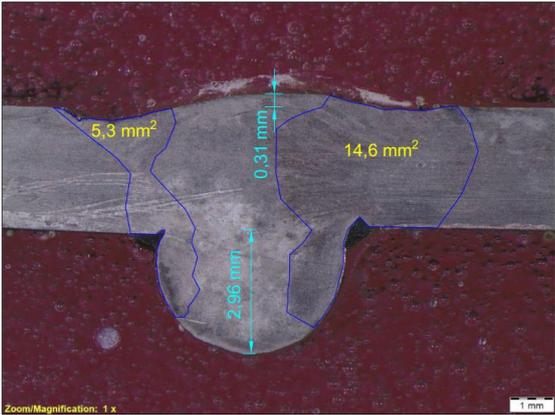
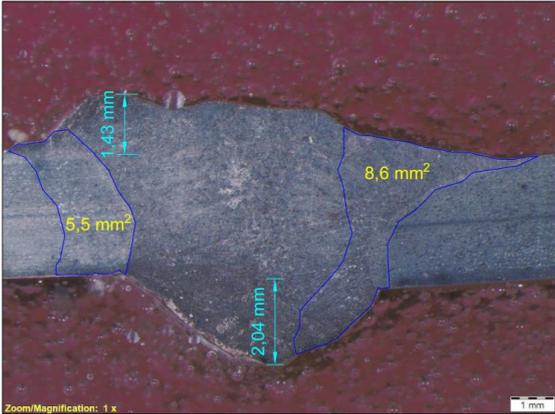
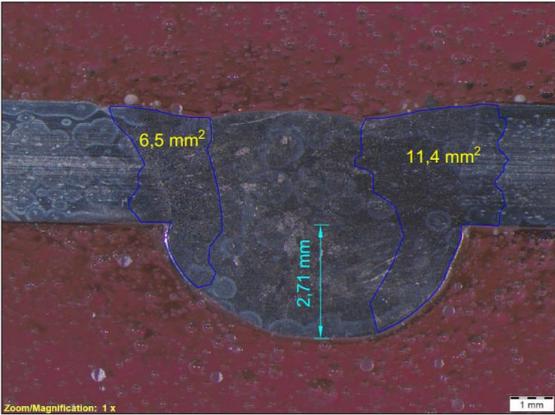
Figura 3.2. Ubicación en el Diagrama Schaeffler de las cantidades de Cromo y Níquel equivalente. (Fuente: Propia)

En el diagrama Schaeffler se observa que la microestructura del metal de soldadura corresponde a austenita y martensita. Sin embargo, esto difiere de lo que se observa en las micrografías.

3.4.3. Resultados de las macrografías

En la Tabla 3.15 se presenta los resultados de las macrografías tomadas en cada muestra con los diferentes procesos de soldadura.

Tabla 3.15. Macrografías de las muestras soldadas.

PROCESO DE SOLDADURA	MACROGRAFÍA	OBSERVACIONES	
SMAW		ZAC (mm²)	19,9
		SOBREMONTA EN CARA (mm)	0,31
		SOBREMONTA EN RAÍZ (mm)	2,96
GMAW		ZAC (mm²)	14,1
		SOBREMONTA EN CARA (mm)	1,43
		SOBREMONTA EN RAÍZ (mm)	2,04
GTAW		ZAC (mm²)	17,9
		SOBREMONTA EN CARA (mm)	0
		SOBREMONTA EN RAÍZ (mm)	2,71

(Fuente: Laboratorio de metalografía, desgaste y falla)

3.5. Resultados del barrido de dureza

Los resultados del barrido de dureza se detallan en las Tablas 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19. Las durezas se midieron utilizando la escala Rockwell B.

Tabla 3.16. Dureza del material base.

MATERIAL BASE	
Dureza HRB	tiempo (s)
84	12,78
83	15,36
83	13,04
83,3	Promedio

(Fuente: Propia)

Tabla 3.17. Dureza de la muestra soldada con proceso SMAW.

P1 – SMAW	
	
Dureza HRB	tiempo (s)
84	12,4
78	13,56
82	13,22
78	12,33
81	12,4
79	12,26
81	13,36
85	13,46
86	13,37
81,6	Promedio

(Fuente: Propia)

Tabla 3.18. Dureza de la muestra soldada con proceso GMAW.

P2 – GMAW	
	
Dureza HRB	tiempo (s)
86	12,26
85	12,47
87	12,74
88	12,53
82	12,26
80	12,86

83	12,15
88	12,64
86	12,78
85	Promedio

(Fuente: Propia)

Tabla 3.19. Dureza de la muestra soldada con proceso GTAW.

P3 – GTAW	
Dureza HRB	tiempo (s)
87	13,17
86	13,31
88	12,2
84	13,31
86	12,78
76	12,14
75	12,45
83	12,13
87	13,37
83,6	Promedio

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.3 se expone el gráfico correspondiente al barrido de dureza realizado en las tres muestras de las juntas soldadas. En dicha figura se reporta que se tomaron las durezas en 9 posiciones diferentes.

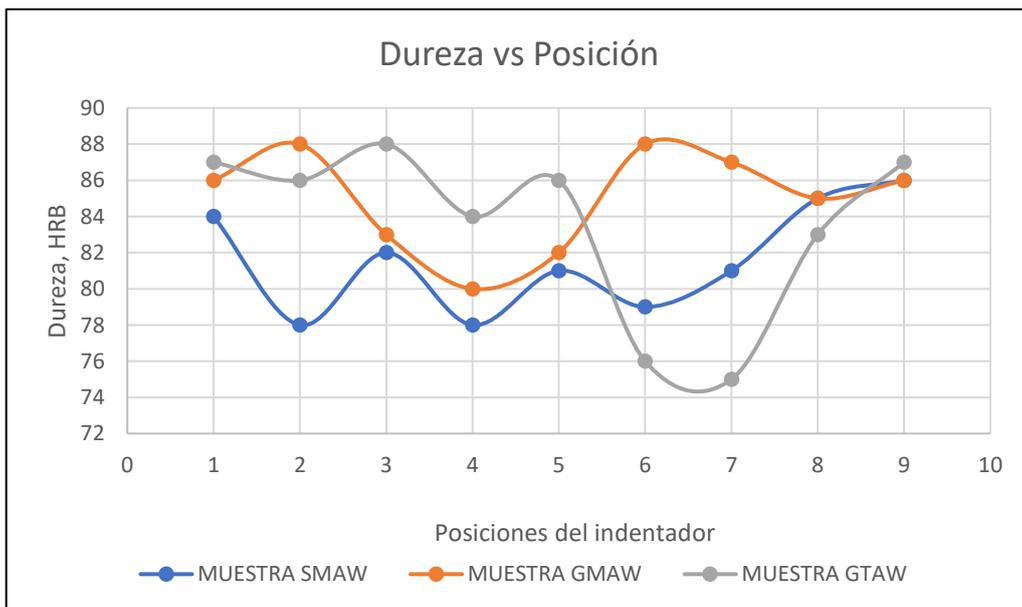


Figura 3.3. Barrido de dureza para las muestras de las juntas soldadas.
(Fuente: Propia)

3.6. Resultados del análisis de costos de los procesos

Los costos de los insumos adicionales empleados para la soldadura GMAW y GTAW se especifican a continuación.

Para GMAW se utilizó 83,24 [g] de carrete de soldadura, el precio del carrete de soldadura de 5 [kg] es 78 [USD]. Por lo tanto, el costo del material de aporte es 1,30 [USD]. Adicionalmente, se empleó 0,087 [m³] de argón y se conoce que el costo de 6 [m³] de este gas de soldadura es 125 [USD]. Por lo tanto, el costo del gas de soldadura es 1,81 [USD]. Es decir que el costo total de insumos en el GMAW es 3,11 [USD].

Para GTAW se emplearon 2 varillas de aporte las cuales tienen un precio de 0,625 [USD] cada unidad. Entonces el costo de las varillas de aporte es 1,25 [USD]. Se empleó también 0,128 [m³] de argón y se sabe que el costo de los 6 [m³] de este gas es 125 [USD]. Entonces el costo del gas de soldadura es 2,67 [USD]. El costo total de insumos en GTAW es 3,92 [USD].

Los resultados del análisis de los costos de cada proceso de soldadura se especifican en la Tabla 3.20 que se muestra a continuación.

Tabla 3.20. Costos de los procesos de soldadura.

Proceso	Voltaje Promedio, V [V]	Amperaje Promedio, I [A]	Potencia, P [kW]	Tiempo, t [h]	Consumo Energético, E [kW-h]	Costo Eléctrico, CE [USD]	Costo Insumos, CI [USD]	Costo Total, CT [USD]
SMAW	27,5	50	1,375	0,086	0,1183	0,02	3	3,02
GMAW	17	86	1,462	0,058	0,0848	0,02	3,11	3,13
GTAW	16	95	1,52	0,097	0,1474	0,03	3,92	3,95

(Fuente: Propia)

3.7. Discusión de los resultados

3.7.1. Discusión del análisis de composición química

Con los resultados presentados en la Tabla 3.1, se observa que la composición química del material base corresponde con las cantidades máximas de los elementos, que están detalladas en la Tabla 3.2, de acuerdo con el Metals Handbook Vol. 9. Por lo tanto, el material adquirido cumple con las especificaciones de composición química que se detallan en la teoría respectiva.

3.7.2. Discusión del ensayo de inspección visual

En la Tabla 3.3 se puede observar todas las probetas a las cuales se les realizó la inspección visual, hay que tomar en cuenta que la parte A es la cara y la B es la raíz.

En la probeta 2020-R03-IV-01-P1 la parte A presenta dos poros de tamaño 3 mm y 0,8 mm los cuales son aceptables en comparación con la longitud del cordón de soldadura.

Mientras que la parte B presenta a simple vista faltas de fusión las cuales deben ser verificadas con la radiografía para determinarse si la probeta es o no aceptada.

En la probeta 2020-R03-IV-01-P2 la parte A presenta 4 zonas con mordedura y la parte B presenta algunas zonas con falta de fusión las cuales indican que la probeta no aprueba el ensayo.

En la probeta 2020-R03-IV-01-P2_1 la parte A presenta 3 zonas con mordedura, pero cuyas suma no es muy importante, mientras que, en la parte B presenta 3 discontinuidades de corta dimensión las cuales no afectarán a la probeta.

En la probeta 2020-R03-IV-01-P3 en la parte A existen dos discontinuidades de baja dimensión las cuales son aceptables, mientras que, en la parte B se pueden ver varias zonas con falta de fusión las cuales deben ser verificadas mediante la radiografía para una mejor interpretación.

En la Tabla 3.4 se puede observar que la junta soldada con proceso GMAW presenta un mejor aspecto del cordón de soldadura.

3.7.3. Discusión del ensayo de tintas penetrantes

En la Tabla 3.5 se observa que la placa soldada con el proceso SMAW presenta menos discontinuidades en la cara que en la raíz de la soldadura. En la cara se tiene 2 quemones en los extremos y 2 poros. La mayoría de las discontinuidades en la raíz son 12 puntos con falta de fusión, 3 poros y 1 quemón; sin embargo, para los ensayos destructivos se extraen las probetas de las zonas que no presentan discontinuidades.

De la Tabla 3.6 para el proceso GMAW se puede señalar que las discontinuidades son 6 mordeduras, 1 falta de fusión y 1 quemón en la cara de la soldadura; mientras que, en la raíz de la soldadura se tiene 3 discontinuidades de falta de fusión y 1 quemón.

En los resultados de la Tabla 3.7 del proceso GTAW se identifica que en la raíz de la soldadura se tienen 10 discontinuidades de falta de fusión, 2 ubicaciones presentan falta de penetración y se tiene 1 quemón. Por otra parte, la cara de la soldadura reporta sólo 1 poro y 1 quemón.

Es importante que los resultados del ensayo de tintas penetrantes se contrasten con los resultados de radiografía industrial.

3.7.4. Discusión del ensayo de radiografía industrial

En las Tablas 3.8, 3.9 y 3.10 se observan las radiografías las cuales indican dos partes, A y B, porque las probetas tenían una longitud considerable que no podía cubrirse con una sola película radiográfica. Se puede apreciar que la probeta 2020-R03-IV-01-P2_1 correspondiente al proceso GMAW tiene menores discontinuidades, tanto en número como

en longitud. Le sigue la probeta 2020-R03-IV-01-P1 correspondiente al proceso SMAW y en último lugar está la probeta 2020-R03-IV-01-P3 que corresponde al proceso GTAW. Por lo tanto, con el proceso GMAW se obtiene mejores resultados según los resultados del ensayo de radiografía industrial.

3.7.5. Discusión del ensayo de tracción

De acuerdo con el gráfico presentado en la Figura 3.1 se verifica que todas las probetas superaron la resistencia mínima a la tracción del material base (75 ksi). Con esto se cumple el criterio de aceptación para el ensayo de tracción, que establece que las probetas deben superar el valor del esfuerzo mínimo de tracción. En la Tabla 3.11 se puede ver que la placa soldada con GMAW presenta la mayor resistencia a la tracción.

3.7.6. Discusión del doblado de cara y raíz

Según los resultados de los doblados de cara y raíz que se reportan en la Tabla 3.12 para cada uno de los procesos realizados, se puede notar que las soldaduras presentan una alta calidad, esto debido a que no se observa la presencia de ningún tipo de discontinuidad en ninguna de las superficies analizadas, que pueda afectar la unión soldada, tanto en la cara, así como en la raíz de la soldadura. Por lo tanto, las probetas aprueban los ensayos de doblado de cara y raíz.

3.7.7. Discusión de las micrografías

En las micrografías de las Tablas 3.13 y 3.14 correspondientes a aumentos de 100X y 500X respectivamente, se observa en resumen que, para el metal base se tiene una microestructura austenítica, la zona afectada por el calor presenta la transición desde austenita a austenita más ferrita, y el metal de soldadura presenta una microestructura con ferrita delta en forma alargada en una matriz de austenita. Se puede ver que en algunas micrografías aparecen quemones debido a un mal procedimiento de ataque químico. Adicionalmente, se observan residuos de alcohol industrial en forma de gotas debido a un secado incorrecto de las muestras.

3.7.8. Discusión del diagrama Schaeffler

En la Figura 3.2 se observa que el punto marcado en rojo correspondiente a los valores de Cr_{eq} en el eje de las abscisas y Ni_{eq} en el eje de las ordenadas se ubica en la zona de la microestructura formada por austenita y martensita. Por lo tanto, este resultado indica que el metal de soldadura tiene la microestructura indicada anteriormente. Sin embargo, la

microestructura de la zona de fusión depende de la microestructura del metal base y del metal de aporte.

3.7.9. Discusión de las macrografías

La Tabla 3.15 indica que la soldadura SMAW presenta la mayor Zona Afectada por el Calor. Por otro lado, la menor zona afectada por el calor se reporta en la soldadura GMAW. En ninguna de las probetas se identifica que la sobremonta exceda los 3,2 mm, lo cual corresponde con los criterios de aceptación que se establecen en la norma AWS D1.6.

3.7.10. Discusión del barrido de dureza

En la Figura 3.3 se observa que en la posición 5, cuando el indentador está en la mitad de la muestra, la dureza es más alta en el proceso GTAW, mientras que en el proceso SMAW es más baja. También se puede identificar que en las posiciones 4 y 6, la dureza cae para los procesos SMAW y GTAW, siendo estas ubicaciones los lados del cordón de soldadura. Mientras que en el proceso GMAW en el punto 6, la dureza aumenta. Esto puede deberse a cambios en la temperatura dependiendo el proceso, porque unos procesos generan más calor que otros. La dureza de la muestra soldada con GMAW presenta los valores más altos y con la menor variación.

3.7.11. Discusión del análisis de costos

En la Tabla 3.20 se identifica que el proceso SMAW es el más económico de los tres que se analizan. Por otro lado, el proceso GTAW es el más costoso para la soldadura de placas realizada en el presente trabajo.

3.7.12. Discusión de propiedades mecánicas, costos y ZAC

En la Tabla 3.21 se presenta un análisis general relacionado con las propiedades mecánicas, el análisis de costos y la afectación al material con la ZAC. En esta tabla los cuatro criterios analizados tienen la misma ponderación. Luego de analizar esta tabla se puede concluir de forma cuantitativa cuál es el mejor proceso para el material en estudio.

Tabla 3.21. Evaluación de propiedades mecánicas, costos y ZAC de los procesos realizados.

PROCESO	PROPIEDADES MECÁNICAS						ANÁLISIS FINANCIERO			AFECTACIÓN AL MATERIAL			CALIFICACIÓN DE CRITERIOS [/4]
	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (Debe ser ALTA)			DUREZA PROMEDIO (Debe ser ALTA)			COSTO (Debe ser BAJO)			ZONA AFECTADA POR EL CALOR - ZAC (Debe ser BAJA)			
	ESFUERZO PROMEDIO [ksi]	ESFUERZO REFERENCIAL DEL MATERIAL [ksi]	DESVIACIÓN EN ESFUERZO A LA TRACCIÓN	DUREZA PROMEDIO [HRB]	DUREZA REFERENCIAL DEL MATERIAL [HRB]	DESVIACIÓN EN LA DUREZA	COSTO TOTAL [USD]	COSTO PROMEDIO [USD]	DESVIACIÓN EN COSTOS	ÁREA DE LA ZAC [mm ²]	ÁREA PROMEDIO DE LA ZAC [mm ²]	DESVIACIÓN EN ÁREA DE LA ZAC	
SMAW	96,2	75	28,3%	81,6	83,3	-2,0%	3,02	3,37	-10,4%	19,9	17,3	15,0%	1/4
GMAW	99,2		32,3%	85		2,0%	3,13		-7,1%	14,1		-18,5%	3/4
GTAW	87,5		16,7%	83,6		0,4%	3,95		17,2%	17,9		3,5%	0/4

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.4 se puede observar un gráfico que resume la desviación porcentual para cada una de las propiedades evaluadas.

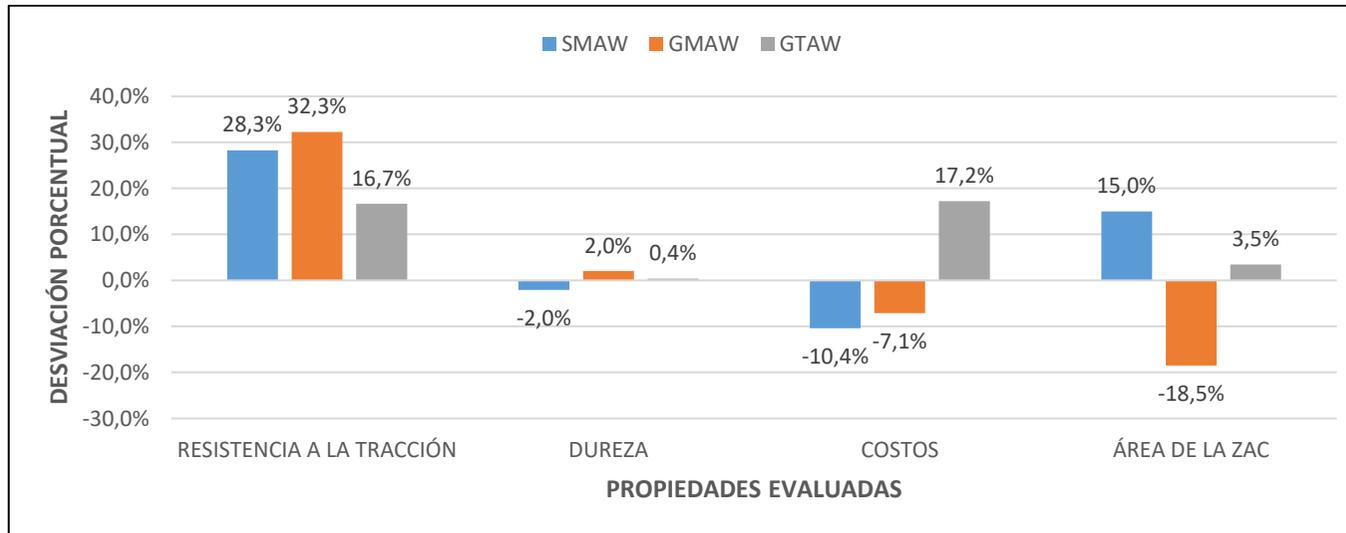


Figura 3.4. Desviación porcentual en las propiedades evaluadas.
(Fuente: Propia)

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Se cumplió el objetivo de caracterizar las juntas soldadas con los tres procesos de soldadura ejecutados.
- En las micrografías se puede identificar que la microestructura del metal base corresponde a una matriz de austenita con inclusiones de ferrita lo cual concuerda con la teoría detallada en el Metals Handbook Volumen 9 para este tipo de aceros inoxidable.
- La muestra extraída de la junta soldada con GMAW presenta la menor zona afectada por el calor con una desviación de -18,5% respecto al valor promedio como se indica en las macrografías.
- Los resultados de resistencia a la tracción entre los diferentes procesos de mayor a menor son: GMAW, SMAW y GTAW con desviaciones de 32,3%, 28,3% y 16,7% respectivamente con respecto a la resistencia del material base. Esto se debe a que en el proceso GMAW el material de aporte es continuo, con lo cual se garantiza que no existirá discontinuidad por cambio de electrodo o varilla de aporte como en los otros procesos.
- La dureza de las muestras analizadas de los diferentes procesos de soldadura ejecutados presenta valores de acuerdo con las especificaciones técnicas del material base. La desviación máxima es 2%, en ese sentido, se puede concluir que no existen afectaciones significativas en esta propiedad del material.
- La junta soldada con proceso GMAW presenta las mayores propiedades mecánicas en el ensayo de tracción, con un valor de desviación de 32,3% superior al referencial y en el barrido de dureza, con un 2% mayor respecto a la dureza referencial.
- El proceso más conveniente desde el punto de vista financiero para las juntas soldadas en el presente trabajo es SMAW, porque presenta un valor 10,4% inferior al costo promedio.
- Analizando los resultados de las propiedades mecánicas, costos y ZAC, se puede concluir que el proceso GMAW es el más conveniente para realizar soldaduras en el acero inoxidable AISI 304, porque este proceso supera 3 de los 4 aspectos evaluados. Mientras que, en el cuarto aspecto referente a costos, GMAW con una desviación porcentual de -7,1% respecto al costo promedio, es más costoso que el proceso SMAW, que presenta una desviación de -10,4% respecto al costo promedio.

4.2. Recomendaciones

- Cuando se requiere una soldadura con múltiples pases debería considerarse el primer pase hacerse como procesos GMAW o GTAW y los posteriores procesos con SMAW para abaratar costos y garantizar que no exista incrustaciones en el pase de raíz.
- Se debe verificar que no existan caídas de voltaje en la red al momento de realizar cualquiera de los tres procesos de soldadura y se tiene que realizar un bisel en este tipo de material cuando el espesor sea mayor o igual a 3 mm.
- En los procesos GMAW y GTAW se recomienda usar gas helio para posiciones sobre cabeza debido a que este gas inerte tiende a subir, contrario a lo que sucede cuando se emplea argón como gas de protección.
- Es recomendable contrastar los resultados de los ensayos no destructivos ejecutados para confirmar o descartar las discontinuidades que se encuentren. Porque pueden descartarse algunas discontinuidades que se encontraron, por ejemplo, algunas de las discontinuidades encontradas con el ensayo de tintas penetrantes se pueden descartar con el ensayo de radiografía industrial.
- El ataque químico debe realizarse con bastante cuidado para evitar la presencia de quemones en la microestructura de las muestras. También se debe secar completamente las muestras para que no se tenga residuos de alcohol industrial.
- Como el resultado del Diagrama Schaeffler y la micrografía para el metal de soldadura en los tres procesos difiere, se puede realizar como trabajo futuro un análisis que determine las causas de estos resultados. Debido a que se evidencia una clara diferencia entre la parte teórica y experimental. Por un lado, la parte teórica, es decir el Diagrama Schaeffler, indica que se tiene una microestructura de austenita y martensita; por otro lado, la parte experimental, es decir la Micrografía, muestra que la microestructura corresponde a austenita y ferrita.

Referencias Bibliográficas

- AGA. (2019). Catálogo de electrodos comunes, especiales & Gases para corte y soldadura, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- ASM INTERNATIONAL. (2004). Metallography and Microstructures 2004. Managing, 9. Retrieved from <http://www.worldcat.org/oclc/42469467>
- Avner, S. H. (1988). Introducción a la Metalurgia Física.
- AWS. (2006). AWS A5.4 Specification for Stainless Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding.
- AWS. (2007). AWS D1.6: Structural Welding Code - Stainless Steel. Committee on Structural Welding.
- AWS. (2009). Guide for the Nondestructive Inspection of Welds. American National Standards Institute, Standards.
- AWS. (2013). AWS A5.9 Specification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods. Journal of Chemical Information and Modeling (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Bruker. (2020). Q2 ION - OES - Optical Emission Spectrometry - For elemental analysis | Bruker. Retrieved April 1, 2020, from <https://www.bruker.com/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/optical-emission-spectrometry/q2-ion.html#tab-c295035>
- Electric, L. (1995). Wire-matic™ 255, (216).
- Electric, L. (2020). Invertec® V350-PRO. Retrieved April 2, 2020, from [https://www.lincolnelectric.com/es-es/Equipment/Pages/product.aspx?product=K1728-12\(LincolnElectric_EU_Base\)](https://www.lincolnelectric.com/es-es/Equipment/Pages/product.aspx?product=K1728-12(LincolnElectric_EU_Base))
- Flow. (2020). Mach 200 Waterjet - Value & Performance - Flow Waterjet. Retrieved April 1, 2020, from <https://www.flowwaterjet.com/Machines/Mach-200>
- Groover, M. (2009). Fundamentos de manufactura moderna (Tercera Ed). <https://doi.org/10:0-8400-5444-0>
- Group, W. A. (2014). Schaeffler Diagram, 2014.
- Kalpakjian, S. (2008). Manufactura, ingeniería y tecnología. (P. Educación, Ed.). México.
- Kotecki, D., & Siewert, T. (1992). WRC-1992 constitution diagram for stainless steel weld metals: a modification of the WRC-1988 diagram. Welding Journal, 71(5), 171.
- Kou, S. (2003). Welding Metallurgy.
- Lippold, J. C. (2014). Welding Metallurgy and Weldability.
- Lopez, O., Trujillo, H., & Parra, L. (2011). Application and selection of non-destructive test

- for the evaluation of welded joints. *Scientia et Technica*, (48), 1–10.
- Marulanda, J., Burbano, V., & Peláez, J. (2013). Análisis de soldabilidad de aceros inoxidables con aceros de medio y bajo carbono por SMAW. *Revista Facultad De Ingeniería*, 22(35), 91. <https://doi.org/10.19053/01211129.2517>
- Metlab. (2020). Forcipol Grinding & Polishing. Retrieved from <http://metallographicequipment.com/pdf/FORCIPOL.pdf>
- Olympus. (2020a). GX41 | Inverted Metallurgical Microscopes | Olympus. Retrieved April 6, 2020, from [https://www.olympus-ims.com/es/microscope/gx41/#!cms\[focus\]=cmsContent11208](https://www.olympus-ims.com/es/microscope/gx41/#!cms[focus]=cmsContent11208)
- Olympus. (2020b). SZX7 | Estereomicroscopio | Olympus Life Science. Retrieved April 6, 2020, from [https://www.olympus-lifescience.com/es/microscopes/stereo/szx7/#!cms\[focus\]=cmsContent658](https://www.olympus-lifescience.com/es/microscopes/stereo/szx7/#!cms[focus]=cmsContent658)
- Rodríguez, H. (2020). Soldadura de los Aceros Inoxidables. Retrieved June 29, 2020, from <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn48.html>

ANEXOS

ANEXO I. Composición química del material.

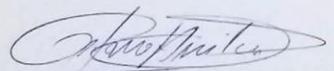
		
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL		
DEPARTAMENTO DE MATERIALES		
LABORATORIO DE FUNDICIÓN		
INFORME TÉCNICO		
Solicitado por: Ing. Homero Barragán Msc		
Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa		
Fecha: 11 de febrero del 2020		
Realizado por: Ing. Oscar Sotomayor/Ing. Luis G. Huilca		
Descripción: Muestra de material metálico		
1. ANTECEDENTES.		
Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional una probeta de material metálico.		
Se solicita realizar la prueba de espectrometría con la finalidad de determinar los componentes presentes en la muestra entregada.		
2. IDENTIFICACIÓN DE LA PROBETA.		
La probeta para el análisis correspondiente es identificada como se muestra a continuación:		
Nombre	Identificación de la probeta	Identificación Gráfica
MUESTRA METÁLICA	Sample M1	
3. ANTECEDENTES TÉCNICOS		
3.1. Limpieza Superficial: Según norma ASTM E415 – 17 Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry		
3.2. Método: Fe 130 Cr/Ni Steel		



4. VALORES OBTENIDOS

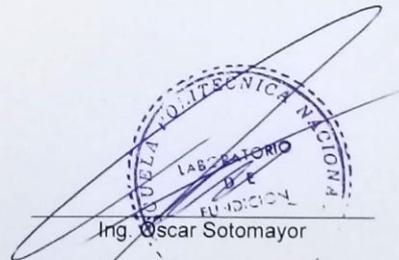
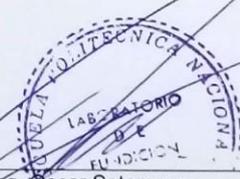
El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se tomaron 2 mediciones en distintos puntos del espécimen y finalmente se promedió su valor.

		Muestra M1
Elemento		Valor [%]
Carbono	[C]	0,054
Silicio	[Si]	0,603
Manganeso	[Mn]	1,005
Fósforo	[P]	0,034
Cromo	[Cr]	14,23
Molibdeno	[Mo]	0,027
Níquel	[Ni]	9,151
Cobre	[Cu]	0,012
Cobalto	[Co]	0,254
Vanadio	[V]	0,064
Hierro	[Fe]	74,55
Total		99,98



Ing. Luis G. Huilca

Técnico Responsable

Ing. Oscar Sotomayor

Jefe del Laboratorio de Fundición.



Con la finalidad de mejorar nuestros servicios, solicitamos de la manera más comedida se llene la encuesta mediante la captura del código QR adjunto, agradecemos su colaboración.

Bruker Analysis Report

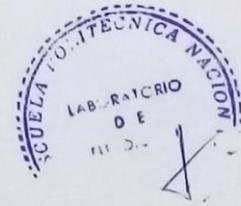


Sample: Muestra1

Analysis Time: 28.01.2020 15:15:12

Method: Fe130

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
Ø	0,054	0,603	1,005	0,034	0,0058
	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Cu [%]	Al [%]
Ø	14,23	0,027	9,151	0,012	<0,0020
	Co [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]	Fe [%]
Ø	0,254	<0,0100	0,0055	0,064	74,55



ANEXO II. Welding Procedure Specification (WPS).

		ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE MATERIALES LABORATORIO DE SOLDADURA						
ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)								
Nombre Compañía: PQR No.: Según norma:		EPN EPN – LDS – 01 AWS D1.6 Structural Welding Code – Stainless Steel		No. Identificación: EPN.001 Fecha: 06/01/2020 Realizado por: Carlos Flores, Juan Suárez Organización: Escuela Politécnica Nacional				
Artículo I. Junta Utilizada			Artículo II. Técnica de soldadura					
Tipo de junta: Abertura de raíz: Talón: Ángulo de ranura: Placa de respaldo: Preparar bisel: Método:		A tope 2.4 mm NA 60° No Sí Amolado		Proceso de soldadura: Tipo de soldadura: Soldadura a: Cordón de respaldo: Limpieza Pase raíz: Pases siguientes:				
				SMAW Manual Un lado No Amoladora NA				
Artículo III. Metal Base			Artículo V. Posición de Soldadura					
Especificación: Espesor: Diámetro:		AISI 304 3 mm NA		Posición de soldadura: Progresión: Técnica:				
				1G Ascendente Un pase				
Artículo IV. Metal de Aporte			Artículo VI. Notas					
Diámetro: Denominación AWS: Especificación AWS: Casa comercial: Denominación comercial:		2.4 mm E308L AWS A5.4 AGA AGA R60 AWS E308L-16		Precalentamiento Tiempo entre pases				
				NA NA				
Detalle de la Junta								
								
N.º de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. de avance (mm/min)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad.	Intensidad (Amperios)			oscilado	recto
1	E308L	2.4	DC+	40-60	25-30	68	X	



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE SOLDADURA**



ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

Nombre Compañía: PQR No.: Según norma:	EPN EPN – LDS – 02 AWS D1.6 Structural Welding Code – Stainless Steel	No. Identificación: EPN.002 Fecha: 06/01/2020 Realizado por: Carlos Flores, Juan Suárez Organización: Escuela Politécnica Nacional
--	---	---

Artículo I. Junta Utilizada

Artículo II. Técnica de soldadura

Tipo de junta: Abertura de raíz: Talón: Ángulo de ranura: Placa de respaldo: Preparar bisel: Método:	A tope 2.4 mm NA 60° No Sí Amolado	Proceso de soldadura: Tipo de soldadura: Soldadura a: Cordón de respaldo: Limpieza Pase raíz: Pases siguientes:	GMAW Semiautomático Un lado No No Amoladora NA
--	--	---	--

Artículo III. Metal Base

Artículo V. Posición de Soldadura

Especificación: Espesor: Diámetro:	AISI 304 3 mm NA	Posición de soldadura: Progresión: Técnica:	1G Arrastre Un pase
--	------------------------	---	---------------------------

Artículo IV. Metal de Aporte

**Pre calentamiento
Tiempo entre pases**

Diámetro: Denominación AWS: Especificación AWS: Casa comercial: Denominación comercial: Velocidad de alimentación:	0.9 mm ER308L AWS A5.9 LINCOLN ELECTRIC JMS-E308L 170 in/min		NA NA
		Artículo VI. Gas de protección	
		Tipo: Caudal:	Argón 25 L/min
		Artículo VII. Notas	
		<ul style="list-style-type: none"> • Verificar alineación de la junta • Asegurar limpieza de las partes 	

Detalle de la Junta



N.º de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. de avance (mm/min)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)			oscilado	recto
1	ER308L	0.9	DC+	72-100	17	101	X	



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE SOLDADURA**



ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

Nombre Compañía:	EPN	No. Identificación: EPN.003
PQR No.:	EPN – LDS – 03	Fecha: 06/01/2020
Según norma:	AWS D1.6 Structural Welding Code – Stainless Steel	Realizado por: Carlos Flores, Juan Suárez Organización: Escuela Politécnica Nacional

Artículo I. Junta Utilizada

Artículo II. Técnica de soldadura

Tipo de junta:	A tope	Proceso de soldadura:	GTAW
Abertura de raíz:	3.2 mm	Tipo de soldadura:	Manual
Talón:	NA	Soldadura a:	Un lado
Ángulo de ranura:	60°	Cordón de respaldo:	No
Placa de respaldo:	No	Limpieza	
Preparar bisel:	Sí	Pase raíz:	Amoladora
Método:	Amolado	Pases siguientes:	NA

Artículo III. Metal Base

Artículo VI. Posición de Soldadura

Especificación:	AISI 304	Posición de soldadura:	1G
Espesor:	3 mm	Progresión:	Arrastre
Diámetro:	NA	Técnica:	Un pase

Artículo IV. Metal de Aporte

Pre calentamiento
Tiempo entre pases

Diámetro:	2.4 mm		NA
Denominación AWS:	ER308L		NA
Especificación AWS:	AWS A5.9		
Casa comercial:	LINCOLN ELECTRIC		
Denominación comercial:	JMS-E308L		

Artículo VII. Gas de protección

Tipo:	Argón
Caudal:	12 L/min

Artículo VII. Notas

Artículo V. Electrodo	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar alineación de la junta • Asegurar limpieza de las partes • Se aplica una purga de argón en la raíz del cordón con un caudal de 10 L/min
Tipo:	No consumible
Composición:	Tungsteno con 2% Torio

Detalle de la Junta



N.º de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. de avance (mm/min)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)			oscilado	recto
1	ER308L	2.4	DC-	82-107	16	60	X	

ANEXO III. Ensayo destructivo del material base.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

F01-PE-LAEV-01 Rev.00

INFORME

LAEV – M20.032

Quito, 21 de febrero de 2020

Solicitado por: M.Sc. Galo Homero Barragán
Persona de contacto: Carlos Flores, Juan Suarez
Teléfono: 0998830451
Correo: carlos.flores03@epn.edu.ec
Fecha de recepción: 20/02/2020
Fecha de ejecución: 20/02/2020

ORDEN DE TRABAJO N°: DM-OTI0013-2020

1. **MUESTRAS:** Dos (2) probetas de acero inoxidable para ensayo de tracción.
2. **GENERALIDADES E IDENTIFICACIÓN:**

La siguiente descripción fue proporcionada por el cliente:

Título de la tesis: CARACTERIZACIÓN DE JUNTAS SOLDADAS EN ACERO INOXIDABLE AISI 304 MEDIANTE LOS PROCESOS SMAW, GMAW, Y GTAW.

En la tabla 1 se muestra la identificación de las muestras a ser ensayadas:

Tabla 1. Identificación de las muestras.

Id. cliente	Id. del LAEV
T1	M20.032.01
T2	M20.032.02

3. CONDICIONES AMBIENTALES:

Temperatura: $23,1 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$

Humedad relativa: $46,6 \pm 1,5\%$

4. ENSAYO DE TRACCION

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de tracción.

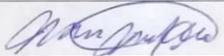


Dirección: Av. Mena Caamaño e Isabel la Católica Esquina (Escuela Politécnica Nacional)
Teléfono: 022976300 ext. 3715, 3716
Correo: laev@epn.edu.ec

Tabla 2. Resistencia a la tracción.

Id.	Ancho promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	
M20.032.01	19,95	2,86	9 926	44 151	112,2	773,9	53,8
M20.032.02	20,06	2,88	9 993	44 451	111,6	768,8	55,9

Nota.- Los resultados contenidos en el presente informe corresponden únicamente a las muestras ensayadas por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV). Además, los valores de fuerza que se emiten en el presente documento (y con los que se ha evaluado la conformidad) corresponden a valores corregidos en función del último certificado de calibración del equipo de fuerza y no se ha utilizado el valor de la incertidumbre.

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ph.D. Wilson Guachamin
Cargo:	ESPECIALISTA DE LABORATORIO	JEFE
LABORATORIO DE ANALISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES		



ANEXO IV. Ensayos destructivos de las probetas soldadas mediante los diferentes procesos.



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA**



**LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES**

F01-PE-LAEV-01 Rev.00

INFORME

LAEV – M20.025

Quito, 11 de febrero de 2020

Solicitado por: M.Sc. Galo Homero Barragán
Persona de contacto: Carlos Flores, Juan Suarez
Teléfono: 0998830451
Correo: carlos.flores03@epn.edu.ec
Fecha de recepción: 10/02/2020
Fecha de ejecución: 10/02/2020

ORDEN DE TRABAJO N°: DM-OTI0012-2020

- 1. MUESTRAS:** Seis (6) probetas de junta soldada para ensayo de tracción.
- 2. GENERALIDADES E IDENTIFICACIÓN:**

La siguiente descripción fue proporcionada por el cliente:

Título de la tesis: CARACTERIZACIÓN DE JUNTAS SOLDADAS EN ACERO INOXIDABLE AISI 304 MEDIANTE LOS PROCESOS SMAW, GMAW, Y GTAW.

En la tabla 1 se muestra la identificación de las muestras a ser ensayadas:

Tabla 1. Identificación de las muestras.

Id. cliente	Id. del LAEV
TR-P1-T1	M20.025.01
TR-P1-T2	M20.025.02
TR-P2-T1	M20.025.03
TR-P2-T2	M20.025.04
TR-P3-T1	M20.025.05
TR-P3-T2	M20.025.06

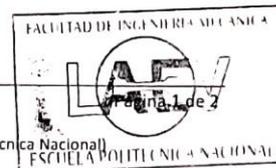
3. CONDICIONES AMBIENTALES:

Temperatura: $26,4 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$

Humedad relativa: $33,3 \pm 0,2\%$



Dirección: Av. Mena Caamaño e Isabel la Católica Esquina (Escuela Politécnica Nacional)
Teléfono: 022976300 ext. 3715, 3716
Correo: laev@epn.edu.ec



4. ENSAYO DE TRACCIÓN EN JUNTA SOLDADA

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de tracción.

Tabla 2. Resistencia a la tracción obtenida en el ensayo.

Id.	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	
M20.025.01	21,75	2,91	9 589	42 654	97,7	673,9	FZC
M20.025.02	20,33	2,89	8 620	38 343	94,7	652,6	FZC
M20.025.03	20,60	2,91	8 923	39 694	96,0	662,2	FZC
M20.025.04	20,39	2,91	9 410	41 858	102,3	705,5	FJS
M20.025.05	19,55	2,87	7 433	33 062	85,5	589,3	FJS
M20.025.06	19,35	2,89	7 761	34 524	89,5	617,4	FJS

* FZC = Falla en la zona afectada por el calor

* FJS = Falla en la junta soldada

Nota.- Los resultados contenidos en el presente informe corresponden únicamente a las muestras ensayadas por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV). Además, los valores de fuerza que se emiten en el presente documento (y con los que se ha evaluado la conformidad) corresponden a valores corregidos en función del último certificado de calibración del equipo de fuerza y no se ha utilizado el valor de la incertidumbre.

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ph.D. Wilson Guachamin
Cargo:	ESPECIALISTA DE LABORATORIO	JEFE
LABORATORIO DE ANALISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES		

