



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS JUNTAS SOLDADAS UTILIZANDO ACERO HSLA CON EL PROCESO GAS METAL ARC WELDING (GMAW) EN LA FABRICACIÓN DE VEHÍCULOS DE TRANSPORTE DE PASAJEROS

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

COLLANTES CUMBAL SILVIA ELIZABETH
silvia.collantes@epn.edu.ec

SÁNCHEZ ROSAS MAURICIO FERNANDO
mauricio.sanchez@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. GRANJA RAMÍREZ MARIO GERMÁN, M.Sc.
mario.granja@epn.edu.ec

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

Quito, agosto 2019

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **SILVIA ELIZABETH COLLANTES CUMBAL Y MAURICIO FERNANDO SÁNCHEZ ROSAS**, bajo muestra supervisión.

Ing. Mario Granja, M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Gabriel Velasteguí, M.Sc.

COLABORADOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **Collantes Cumbal Silvia Elizabeth y Sánchez Rosas Mauricio Fernando**, 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.

Collantes Cumbal Silvia Elizabeth

Sánchez Rosas Mauricio Fernando

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mis padres y hermana, quienes siempre me han apoyado incondicionalmente para seguir adelante.

A mis abuelitos que son mis segundos padres gracias por siempre darme sus bendiciones, cariño, por enseñarme a ser una mujer fuerte, trabajadora y responsable.

Finalmente, a Dios por darme el privilegio de la vida, haberme puesto en mi camino a personas valiosas que hacen vida única.

Silvia Collantes.

Dedico este trabajo de titulación a mis padres Fernando y Margarita por demostrarme su apoyo incondicional a lo largo de mi vida y permitirme que mi sueño de ser Ingeniero se haga realidad.

A mi hermano Christian, quien siempre me ayudo en los momentos difíciles de mi vida, gracias por todo ese apoyo brindado.

Mauricio Sánchez.

AGRADECIMIENTO

Un especial agradecimiento a mi madre a quien admiro y respeto. Con su amor y paciencia me alentó a perseguir mis sueños “te amo mami”. A mi hermana Dayana por siempre estar junto a mí, darme todo su cariño y amor, el camino siempre estará lleno de obstáculos y dificultades, yo siempre estaré ahí para usted.

Agradezco infinitamente a Jonathan por su apoyo incondicional gracias, amor por no dejarme vencer ante cualquier adversidad, porque no solamente eres mi novio sino mi mejor amigo, quien me ayudo en cada momento de debilidad a seguir en este camino de aprendizaje y brindarme su amor sincero.

También quiero agradecerle a mi compañero de Tesis Mauricio con quien hemos logrado culminar este proyecto.

A mis amigos con quienes hemos compartido buenos momentos como politécnicos.

Agradezco a todo el equipo técnico del CCICEV en especial a Pablo, Mauricio, Cristian gracias por haberme permitido crecer profesionalmente, por sus consejos y palabras de apoyo.

A Ing. Mario Granja y al Ing. Gabriel Velastegui, a quienes con su apoyo han permitido culminar con éxito este proyecto de titulación.

Silvia Collantes.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme dado la salud y la fuerza para terminar este trabajo de titulación. Gracias por bendecirme cada día de mi vida y darme a los mejores padres de este mundo.

A mis padres quienes fueron el pilar fundamental durante mi vida y cada día me dieron su amor incondicional. Ustedes que fueron los principales promotores de mis sueños, por desear y anhelar siempre lo mejor para mí. Agradezco cada consejo y palabras que guiaron mi vida estudiantil y personal.

A mi hermano, por apoyarme y estar siempre a mi lado como un amigo. Sabes que siempre cuentas conmigo y estaré ahí para guiarte por el mejor camino.

A mis amigos con quienes compartimos los mejores momentos en la Universidad.

Agradezco a mi compañera de tesis Silvia, con quien terminamos este trabajo de titulación.

Agradezco al Ing. Mario Granja y al Ing. Gabriel Velastegui, quienes con sus conocimientos nos guiaron para la realización del presente trabajo. Gracias por la disponibilidad y la comprensión dada.

Agradezco a los Laboratorios de Soldadura y Ensayos No Destructivos, quienes nos abrieron las puertas y nos dieron consejos para poder realizar de mejor manera este trabajo de titulación.

Agradezco al Laboratorio de Fundición y a Don Fabián por abrirme las puertas para poder realizar mis pasantías y por toda la ayuda recibida.

A mi colegio, el señor Montúfar donde cumplí uno de mis mayores sueños y viví los mejores momentos de mi vida.

Mauricio Sánchez.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN	i
DECLARACIÓN	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xvi
RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general	2
Objetivos específicos.....	2
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. Transporte.....	3
1.1.1. Transporte de pasajeros	3
1.1.2. Transporte de mercancías	3
1.1.3. Medios de transporte.....	3
1.1.4. Transporte en el Ecuador.....	6
1.2. Aceros para la fabricación de buses en el Ecuador.....	9
1.2.1. Acero ASTM A36.....	9
1.2.2. Acero ASTM A500.....	10
1.3. Estudio de los aceros HSLA (High Strength Low Alloy) ¹⁷	10
1.4. Categorías de los aceros HSLA ¹⁷	11
1.4.1. Aceros autoprotectores	11
1.4.2. Aceros microaleados de ferrita – perlita	12
1.4.3. Aceros perlíticos laminados	12
1.4.4. Aceros de ferrita acicular (Bainita de bajo contenido de carbono)	12
1.4.5. Aceros de doble fase.....	12

1.4.6.	Aceros con inclusiones de forma controlada	122
1.5.	Efecto de los Elementos de Microaleación ¹⁷	13
1.5.1.	Aceros microaleados de Vanadio	14
1.5.2.	Aceros microaleados de Niobio	14
1.5.3.	Aceros microaleados de Vanadio-Niobio.....	15
1.5.4.	Aceros microaleados de Niobio-Molibdeno	15
1.5.5.	Aceros microaleados de Vanadio-Nitrógeno	15
1.5.6.	Aceros microaleados de Titanio.....	16
1.5.7.	Aceros microaleados de Niobio-Titanio	16
1.6.	Aplicaciones de los aceros HSLA.....	17
1.7.	Soldabilidad de los aceros HSLA	18
1.8.	Propiedades y aplicaciones del acero HSLA ASTM A 572	19
1.9.	Comparación entre los aceros ASTM A-36, ASTM A-500 y ASTM A-572 Grado 50.....	21
2.	METODOLOGÍA	22
2.1.	Caracterización del material base	22
2.1.1.	Análisis químico del metal base por medio de espectrometría de emisión atómica de chispa.....	22
2.1.2.	Ensayo de Tracción del material base.....	24
2.2.	Soldadura eléctrica por arco bajo protección de gas con alimentación continua de electrodo sólido (GMAW).	26
2.2.1.	Ventajas del proceso de soldadura GMAW.....	27
2.2.2.	Desventajas del proceso de soldadura GMAW	27
2.2.3.	Modos de transferencia del metal de aporte	28
2.3.	Variables del proceso GMAW considerados en la soldabilidad del acero ASTM A572 Grado 50.	29
2.3.1.	Diámetro y tipo de electrodo	29
2.3.2.	Extensión del alambre electrodo.....	30
2.3.3.	Polaridad.....	31

2.3.4.	Corriente de Soldadura y Velocidad de Alimentación	32
2.3.5.	Voltaje de soldadura y longitud del arco	32
2.3.6.	Gases de Protección	32
2.3.7.	Velocidad de avance	33
2.4.	Discontinuidades típicas en el proceso de soldadura GMAW	34
2.5.	Código de soldadura estructural para aceros AWS D1.1	35
2.5.1.	Requisitos y ensayos para la calificación de WPS.....	35
2.6.	Procedimiento de Soldadura	37
2.7.	Ensayos No Destructivos (END)	38
2.7.1.	Inspección Visual	39
2.7.2.	Líquidos Penetrantes	40
2.7.3.	Radiografía	42
2.8.	Ensayos Destructivos	46
2.8.1.	Extracción de probetas	46
2.8.2.	Doblado de Cara y Raíz.....	47
2.8.3.	Ensayo de tracción.....	50
2.9.	Micrografía	52
2.9.1.	Preparación de la muestra	52
2.9.2.	Procedimiento del ensayo metalográfico.....	54
2.10.	Macrografía (macroscopía óptica).....	55
2.11.	Ensayo de dureza superficial	56
2.11.1.	Preparación de la muestra	56
2.11.2.	Procedimiento del ensayo.....	56
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
3.1.	Resultados de la caracterización del material base.....	58
3.1.1.	Análisis químico del material base por medio de espectrometría de emisión atómica de chispa.....	58
3.1.2.	Ensayo de tracción.....	58
3.2.	Parámetros del proceso de soldadura GMAW.....	60

3.2.1.	Calor entregado.....	60
3.3.	Resultados de los Ensayos No Destructivos	61
3.3.1.	Inspección Visual	61
3.3.2.	Líquidos Penetrantes	65
3.3.3.	Radiografía	66
3.4.	Resultados de los Ensayos Destructivos	67
3.4.1.	Doblado de cara y raíz de las juntas soldadas.....	67
3.4.2.	Ensayo de tracción de las juntas soldadas	74
3.5.	Resultados de micrografía.....	78
3.6.	Resultados de macrografía.....	79
3.7.	Resultados del ensayo de dureza	82
3.8.	Resumen general del proceso GMAW.....	87
3.9.	Discusión.....	89
3.9.1.	Material base	89
3.9.2.	Inspección visual y líquidos penetrantes	89
3.9.3.	Radiografía	90
3.9.4.	Ensayo de doblado de cara y raíz	90
3.9.5.	Ensayo de tracción de sección reducida	90
3.9.6.	Micrografía.....	91
3.9.7.	Macrografía	91
3.9.8.	Ensayo de dureza	92
3.9.9.	Parámetros de soldadura.....	92
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	94
4.1.	Conclusiones.....	94
4.2.	Recomendaciones	95
	Referencias Bibliográficas	96
	ANEXOS.....	100
	ANEXO I. DATOS DE EMPRESAS CARROCERAS.....	101

ANEXO II. RESULTADO DEL ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL BASE -A572.....	104
ANEXO III. ENSAYO DE TRACCIÓN DEL MATERIAL BASE.....	107
ANEXO IV. WPS.....	109
ANEXO V. RESULTADO DEL ENSAYO DE LÍQUIDOS PENETRANTES.....	116
ANEXO VI. RESULTADOS DEL ENSAYO DE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL.....	125
ANEXO VII. RESULTADO DEL ENSAYO DE TRACCIÓN A LAS PROBETAS DE LAS JUNTAS SOLDADAS.....	134
ANEXO VIII. RESULTADO DE LAS MICROGRAFÍAS DE LAS MUESTRAS.....	137

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Tipos de transporte terrestre.	4
Figura 1.2. Tipos de transporte marítimo.....	4
Figura 1.3. Tipos de transporte aéreo.....	5
Figura 1.4. Tipos de transporte fluvial.....	6
Figura 1.5. Serie histórica de vehículos matriculados hasta el año 2017.....	7
Figura 1.6. Efecto del carburo de niobio en la resistencia a la fluencia para diversos tamaños de partículas.....	15
Figura 1.7. Vigas IPN de Acero ASTM A572 Grado 50 para la construcción de puentes.	21
Figura 2.1. Dimensiones de la muestra.	23
Figura 2.2. Dimensiones en mm de la probeta para el ensayo de tracción.....	25
Figura 2.3. Probetas para ensayo de tracción del material base.....	25
Figura 2.4. Equipo utilizado en el proceso de soldadura GMAW.....	27
Figura 2.5. Ciclo del modo de transferencia del metal de aporte por corto circuito.....	29
Figura 2.6. Extensión del alambre electrodo en el proceso GMAW.	31
Figura 2.7. Esquema de la polaridad inversa del proceso GMAW.	31
Figura 2.8. Contorno y penetración del cordón de soldadura con diferentes gases de protección.....	33
Figura 2.9. Medidas de la placa soldada y disposición de las probetas a cada ensayo. ..	36
Figura 2.10. Soldadura de las probetas en la posición 3G.	38
Figura 2.11. Galga Bridge Cam.	40
Figura 2.12. Medición de la cara y raíz de las juntas soldadas.....	40
Figura 2.13. Líquidos empleados en el ensayo: Limpiador o removedor (E-59A), penetrante visible (VP-30) y revelador (D-70).....	41
Figura 2.14. Criterios de aceptación de discontinuidades para conexiones no tubulares cargadas estáticamente.....	43
Figura 2.15. Discontinuidades presentes en las radiografías dependiendo del espesor de la placa.	44
Figura 2.16. Probeta preparada con los ICI y película radiográfica.	46
Figura 2.17. Corte de las probetas para ensayos mecánicos.....	47
Figura 2.18. Dimensiones en mm de las probetas de doblado de cara y raíz según la AWS D1.1.....	48
Figura 2.19. Probetas para el doblado de cara y raíz.	48
Figura 2.20. Deformación provocada por flexión en las probetas de doblado.	50
Figura 2.21. Probetas de tracción antes del maquinado.....	51

Figura 2.22. Dimensiones en mm de las probetas de tracción según la AWS D1.1.	51
Figura 2.23. Probetas de tracción de sección reducida maquinadas.	51
Figura 2.24. Muestras terminadas para el análisis metalográfico.	54
Figura 3.1. Probetas ensayadas de metal base.	59
Figura 3.2. Zona de fractura tipo copa-cono.....	59
Figura 3.3. Gráfica comparativa de las probetas de tracción de juntas soldadas.	75
Figura 3.4. Zonas consideradas para el ensayo de micrografía.	78
Figura 3.5. Macroestructura de la muestra 1A3.	80
Figura 3.6. Macroestructura de la muestra 2D3.	80
Figura 3.7. Macroestructura de la muestra 3D2.	80
Figura 3.8. Macroestructura de la muestra 4DTC.	80
Figura 3.9. Macroestructura de la muestra 5A2.	81
Figura 3.10. Macroestructura de la muestra 6M3.....	81
Figura 3.11. Macroestructura de la muestra 7MA3.	81
Figura 3.12. Gráfica de dureza vs distancia de las muestras 1A3 y 2D3.	83
Figura 3.13. Gráfica de dureza vs distancia de las muestras 3D2, 4DTC y 5A2.....	85
Figura 3.14. Gráfica de dureza vs distancia de las muestras 6M3 y 7MA3.....	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Características generales de los buses urbanos/intraprovincial fabricados por Carrocerías Nacionales.....	8
Tabla 1.2. Características generales de los buses urbanos/interprovincial de procedencia brasileña.	8
Tabla 1.3. Propiedades mecánicas del acero ASTM A-36.....	9
Tabla 1.4. Composición química del acero ASTM A-36.....	9
Tabla 1.5. Propiedades mecánicas del acero ASTM A-500.....	10
Tabla 1.6. Propiedades químicas del acero ASTM A-500.	10
Tabla 1.7. Categorías de los aceros HSLA.	13
Tabla 1.8. Propiedades mecánicas de los aceros microaleados de ferrita – perlita.....	16
Tabla 1.9. Composición química de los aceros microaleados de ferrita – perlita.....	17
Tabla 1.10. Propiedades mecánicas del acero ASTM A572.....	20
Tabla 1.11. Composición química del acero ASTM A572.	20
Tabla 1.12. Comparación de las propiedades mecánicas de los aceros ASTM A-36, ASTM A-500 y ASTM A-572 Grado 50.....	21
Tabla 2.1. Especificaciones técnicas del espectrómetro de emisión óptica.	23
Tabla 2.2. Especificaciones técnicas de la máquina universal de ensayos.....	25
Tabla 2.3. Composición química del electrodo ER 70S-6.....	30
Tabla 2.4. Propiedades mecánicas del electrodo ER 70S-6.....	30
Tabla 2.5. Discontinuidades típicas del proceso de soldadura GMAW.	34
Tabla 2.6. Cantidad y tipo de probetas en función del espesor de la placa.	37
Tabla 2.7. Especificaciones técnicas del equipo de soldadura.....	37
Tabla 2.8. Identificación de las juntas soldadas.	38
Tabla 2.9. Criterios de aceptación en el ensayo de Inspección Visual por la AWS D1.1..	39
Tabla 2.10. Clasificación de los tipos de tintas penetrantes y métodos según la ASTM E165.	41
Tabla 2.11. Criterios de aceptación de discontinuidades.....	42
Tabla 2.12. Leyendas de la Figura 2.14.	43
Tabla 2.13. Especificaciones del tubo de rayos catódicos y consola de mando (Equipo de Rayos X).....	44
Tabla 2.14. Parámetros utilizados para las tomas radiográficas.	45
Tabla 2.15. Procesamiento de la película radiográfica.....	46
Tabla 2.16. Identificación de las probetas para los ensayos mecánicos.	47
Tabla 2.17. Criterios de aceptación para los ensayos de doblado.	49

Tabla 2.18. Especificaciones del equipo para el ensayo de doblado guiado.	49
Tabla 2.19. Criterio de aceptación para ensayo de tracción.	50
Tabla 2.20. Especificaciones técnicas de la máquina de corte en frío.	52
Tabla 2.21. Especificaciones técnicas de la máquina desbastadora.	53
Tabla 2.22. Especificaciones técnicas de la pulidora automática.	53
Tabla 2.23. Especificaciones del microscopio metalográfico invertido.	54
Tabla 2.24. Criterios de aceptación para el ensayo de macroataque.	55
Tabla 2.25. Especificaciones técnicas del estereomicroscopio trinocular.	56
Tabla 2.26. Especificaciones técnicas del equipo para el ensayo de dureza.	57
Tabla 3.1. Resultados de la composición química del metal base.	58
Tabla 3.2. Resultados del ensayo de tracción del material base.	59
Tabla 3.3. Variables modificadas del proceso GMAW para las juntas soldadas.	60
Tabla 3.4. Calor entregado en el proceso de soldadura GMAW.	61
Tabla 3.5. Resultados de la inspección visual en las 7 juntas soldadas.	61
Tabla 3.6. Resumen de la Inspección Visual.	65
Tabla 3.7. Resumen del ensayo de líquidos penetrantes.	65
Tabla 3.8. Discontinuidades detectadas en la inspección radiográfica de las juntas soldadas.	66
Tabla 3.9. Resultados obtenidos de la junta 1A3.	67
Tabla 3.10. Resultados obtenidos de la junta 2D3.	68
Tabla 3.11. Resultados obtenidos de la junta 3D2.	69
Tabla 3.12. Resultados obtenidos de la junta 4DTC.	70
Tabla 3.13. Resultados obtenidos de la junta 5A2.	71
Tabla 3.14. Resultados obtenidos de la junta 6M3.	72
Tabla 3.15. Resultados obtenidos de la junta 7MA3.	73
Tabla 3.16. Resumen del ensayo de doblado de cara y raíz.	74
Tabla 3.17. Resultados obtenidos de las 7 juntas soldadas.	75
Tabla 3.18. Probetas después de realizado el ensayo de tracción.	76
Tabla 3.19. Resultados de las micrografías de la muestra 1A3.	78
Tabla 3.20. Resumen del análisis del ensayo de macrografía.	82
Tabla 3.21. Resultados de la dureza superficial de la muestra 1A3.	82
Tabla 3.22. Resultados de la dureza superficial de la muestra 2D3.	83
Tabla 3.23. Resultados de la dureza superficial de la muestra 3D2.	84
Tabla 3.24. Resultados de la dureza superficial de la muestra 4DTC.	84
Tabla 3.25. Resultados de la dureza superficial de la muestra 5A2.	85
Tabla 3.26. Resultados de la dureza superficial de la muestra 6M3.	86

Tabla 3.27. Resultados de la dureza superficial de la muestra 7MA3.....	86
Tabla 3.28. Resumen general.....	88

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Denominación
AC	Análisis de Calor
AP	Análisis del Productor
Apr.	Aprueba
A. R	Abertura de Raíz
Ascend.	Ascendente
CCEP	Corriente Continua de Electrodo Positivo
DC	Corriente Directa
Descend.	Descendente
FMB	Falla en el material base
FJS	Falla en la junta soldada
HSLA	Aceros de alta resistencia y baja aleación
I	Intensidad de Corriente
J. S	Junta Soldada
Macrog.	Macrografía
MA	Material de Aporte
MB	Material Base
NBR	Norma Brasileña
No Apr.	No Aprueba
Prog.	Progresión de soldadura
Qe	Calor Entregado
RX	Rayos X
V	Voltaje
Va	Velocidad de avance
WPS	Especificación del Procedimiento de Soldadura
ZAC	Zona afectada por el calor

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar el comportamiento de las juntas soldadas utilizando acero HSLA con el proceso Gas Metal Arc Welding (GMAW) en la fabricación de vehículos de pasajeros considerando las variables que influyen en dicho proceso que son: apertura de raíz, progresión de soldadura, voltaje, amperaje, velocidad de avance y gas de protección. Con el fin de comprobar la adquisición del metal base se realizó el análisis químico por espectrometría de emisión atómica de chispa para comparar su composición química y por medio del ensayo de tracción comprobar sus propiedades mecánicas. En las juntas soldadas se efectuó los ensayos de inspección visual, ensayos no destructivos, tracción en la sección reducida, doblado de cara y raíz. Con los resultados se obtiene Especificaciones del Procedimiento de Soldadura (WPS) calificados con los parámetros óptimos para garantizar la calidad del cordón con fundamento en el código AWS D1.1. Como un análisis adicional se realizó ensayos metalográficos para conocer la variación microestructural en el cordón de soldadura. Para conocer el valor del área de la zona afectada por el calor se requirió realizar el ensayo de macrografía. Mientras que con el ensayo de dureza en la escala Rockwell B se conoció que zona posee mayores valores.

Palabras clave: acero HSLA, parámetros de soldadura, código, ensayos no destructivos, ensayos destructivos, ensayos metalográficos.

ABSTRACT

The present work has as objective to study the behavior of welded joints using HSLA steel with the Process Gas Metal Arc Welding (GMAW) in the manufacture of passenger vehicles considering the variables that influence the process that are: opening of root, progression of welding, voltage, amperage, forward speed and shielding gas. In order to check the acquisition of base metal, chemical analysis was performed by atomic emission spectrometry spark to compare their chemical composition and by means of the tensile test to check its mechanical properties. In welded joints was the testing of visual inspection, non-destructive testing, traction on the section reduced, bent of face and root. With the results obtained Welding Procedure Specifications (WPS) qualified with the optimum parameters to assure the quality of the bead with basis of the code AWS D1.1. As an additional analysis, metallographic testing was performed to know the microstructural variation in the weld bead. To know the value of the area of the zone affected by the heat, the macrography test was required. While with the testing of hardness in the scale Rockwell B, it was known that zone has higher values.

Keywords: HSLA steel, welding parameters, code, non-destructive testing, destructive testing, metallographic testing.

“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS JUNTAS SOLDADAS UTILIZANDO ACERO HSLA CON GMAW”

INTRODUCCIÓN

En el Ecuador cada año ingresan vehículos de transporte de pasajeros importados, que provienen de países como: Brasil, China, Colombia y Perú. Los países ya mencionados utilizan nuevos materiales para la construcción de las estructuras de las carrocerías afectando directamente a las empresas carroceras nacionales, hay que mencionar que por falta de información y estudios no han podido utilizar otro material en la fabricación de las estructuras.

En nuestro país las empresas carroceras que fabrican las estructuras de los buses trabajan únicamente con el acero negro A-36 y A-500 galvanizado con espesores que varían de 2 a 3 [mm] utilizando procesos de soldadura tanto GMAW como SMAW, restringiendo su fabricación y mejora de sus productos al no utilizar nuevos materiales. [52] Estas empresas se dedican a la fabricación de buses Urbanos, Interprovinciales e Intraprovinciales debido a la gran demanda que existe en nuestro país para movilizarse de un lugar a otro. Además de ser unos de los medios de transporte más económicos para trasladarse, ya sea dentro de la ciudad o entre provincias.

Durante los últimos años la fabricación de carrocerías de vehículos sufrió un cambio considerable con la utilización de los aceros de alta resistencia. El uso de estos materiales permitió a los fabricantes reducir considerablemente el peso de los vehículos lo cual conllevó a la reducción de costos por combustible, mejorar la resistencia a los choques, reducir problemas debido a la corrosión y optimizar la precisión geométrica de los vehículos. [31] Una de las empresas reconocidas a nivel mundial como es HYUNDAI utilizan este tipo de aceros para la fabricación de las estructuras de carrocerías de sus automóviles, camiones y buses. [21]

En resumen, en el Ecuador existe la necesidad de estudiar el comportamiento de las juntas soldadas utilizando acero HSLA con el proceso GMAW para la fabricación de vehículos de transporte de pasajeros. Este trabajo plantea obtener juntas soldadas de material base de acero HSLA A572 con un espesor de 3 [mm] considerando variables que influyen en el proceso de soldadura como son intensidad de corriente, voltaje, velocidad de avance, gas de protección y velocidad de alimentación.

Las carrocerías a nivel nacional utilizan la especificación AWS D8.8 para los requisitos mínimos de calidad para la soldadura por arco y el código AWS D1.3 relacionado con la soldadura estructural de chapas de acero. El primer estándar mencionado no posee requerimientos de ensayos y el segundo estándar posee un solo tipo de ensayo relacionado con el doblado para la calificación del procedimiento de soldadura. Al poseer mayores requerimientos de ensayos para la calificación de las Especificaciones del Procedimiento de Soldadura (WPS) y que permitían cumplir con los objetivos planteados en el presente trabajo se optó por utilizar el código de la AWS D1.1 que cubre con el espesor del material base utilizado.

Una vez establecido el régimen de soldadura de las juntas, se efectúa los ensayos que permiten validar la calidad de cada de ellas basándose en el código de la AWS D1.1. Los ensayos que se realizan para calificar las Especificaciones del Procedimiento de Soldadura (WPS) son los siguientes: inspección visual, ensayos no destructivos, ensayo de tracción de sección reducida, doblado de cara y raíz.

Con los resultados obtenidos de los ensayos destructivos se revelarán las propiedades físico-mecánicas de cada junta soldada dando a conocer cuáles son los parámetros óptimos para utilizar en el proceso de soldadura GMAW con aceros HSLA.

El aporte de este estudio permite contribuir con información a las empresas carroceras nacionales sobre el proceso de soldadura GMAW en juntas soldadas de acero HSLA y así poder generar un cambio de perspectiva en utilizar nuevos materiales en la fabricación de vehículos de transporte de pasajeros.

Objetivo general

Estudiar el comportamiento de las juntas soldadas utilizando acero HSLA con el proceso Gas Metal Arc Welding (GMAW) en la fabricación de vehículos de transporte de pasajeros.

Objetivos específicos

Determinar el procedimiento en las juntas soldadas de acero HSLA con Gas Metal Arc Welding (GMAW).

Establecer el régimen de soldadura en juntas soldadas de acero HSLA con Gas Metal Arc Welding (GMAW).

Revelar las propiedades físico-mecánicas en las juntas soldadas utilizando acero HSLA con Gas Metal Arc Welding (GMAW).

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Transporte

El transporte se considera un medio para trasladar bienes o personas de un lugar a otro, siendo considerado como una de las actividades económicas fundamentales entre los diversos países o regiones.

El transporte comercial moderno está dirigido a prestar un servicio de interés público que implica la movilización de personas, así como a la entrega y recepción de bienes. El transporte de personas se cataloga como un servicio de pasajeros o comercial y a los bienes se lo considera como servicio de mercancía.

1.1.1. Transporte de pasajeros

Al hablar de transporte para pasajeros se considera como un servicio o consumo final que se brinda. Para considerar el estudio del transporte para pasajeros debe tomarse en cuenta diferentes motivos, considerando la accesibilidad interurbana e intraurbana, así como si la movilización sea por tema laboral o de recreación.

El transporte de pasajeros es considerado como una actividad económica debido a la incidencia del factor humano y es de gran importancia desde un punto de vista laboral. Considerándose desde el aspecto de recreación, el transporte para viajeros ha incrementado su demanda, sobre todo con lo referente al transporte de carretera, ferrocarril y aérea.

1.1.2. Transporte de mercancías

El transporte de mercancías se considera como una conexión entre los productos y distribución de bienes. El transporte de mercancías es una causa de comercio internacional que ha tenido un gran aumento gracias a las innovaciones y mejoras, esto referente a términos de capacidad y rendimiento. Dando como resultado final una transferibilidad de materia prima y productos terminados.

1.1.3. Medios de transporte

Los medios de transporte son las diferentes maneras de trasladar un objeto de un lugar a otro contribuyen al desarrollo social y económico de la sociedad. Entre los medios de transporte más utilizados se tienen:

1.1.3.1. Transporte terrestre

El transporte terrestre es uno de los más utilizados para trasladar la mayor cantidad de mercancías, siendo así el responsable de mover la mayor cantidad de actividad económica de un país.

El transporte terrestre con lo que respecta a la red vial ha obtenido un gran desarrollo gracias al interés de los gobiernos por mejorarlas, permitiendo que un gran número de personas y mercancías sean desplazadas. En la Figura 1.1 se presenta los tipos de transporte terrestre.

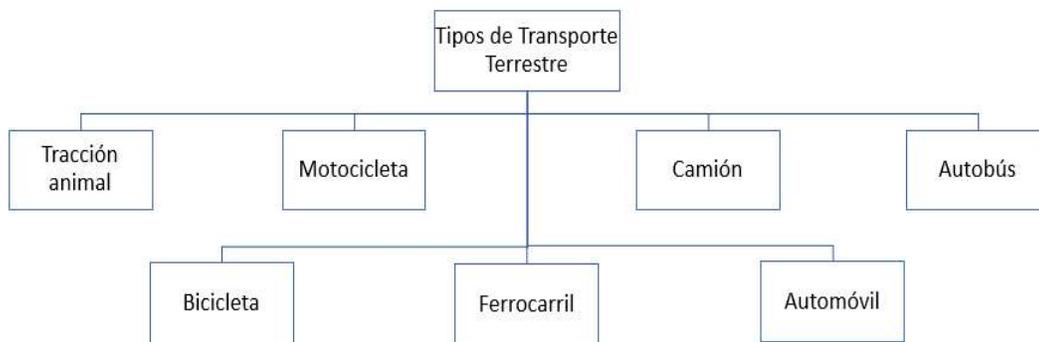


Figura 1.1. Tipos de transporte terrestre.
(Fuente: Propia, 2019)

1.1.3.2. Transporte marítimo

El transporte marítimo permite la comunicación y el comercio internacional entre ciudades ubicadas junto al mar. Este tipo de transporte se moviliza entre grandes distancias llevando grandes cantidades de mercancías. En la Figura 1.2 se muestra los tipos de transporte marítimo.



Figura 1.2. Tipos de transporte marítimo.
(Fuente: Propia, 2019)

1.1.3.3. Transporte aéreo

El transporte aéreo es considerado como el medio de transporte más costoso para movilizarse. Pero debido a la rapidez y el tiempo de entrega se ha vuelto un medio de transporte atractivo.

Este transporte permite realizar viajes de una manera directa y por la ruta más corta a través de montañas, océanos y ciudades. En la Figura 1.3 se presenta los tipos de transporte aéreo.



Figura 1.3. Tipos de transporte aéreo.
(Fuente: Propia, 2019)

1.1.3.4. Transporte fluvial

El transporte fluvial se relaciona con movilización de pasajeros o mercancías por medio de ríos, lagos o canales que tienen una infraestructura adecuada para el arribo y recepción de estos. Este transporte permite el comercio interior entre comunidades indígenas en la Amazonia Ecuatoriana. En la Figura 1.4 se presenta los tipos de transporte fluvial.

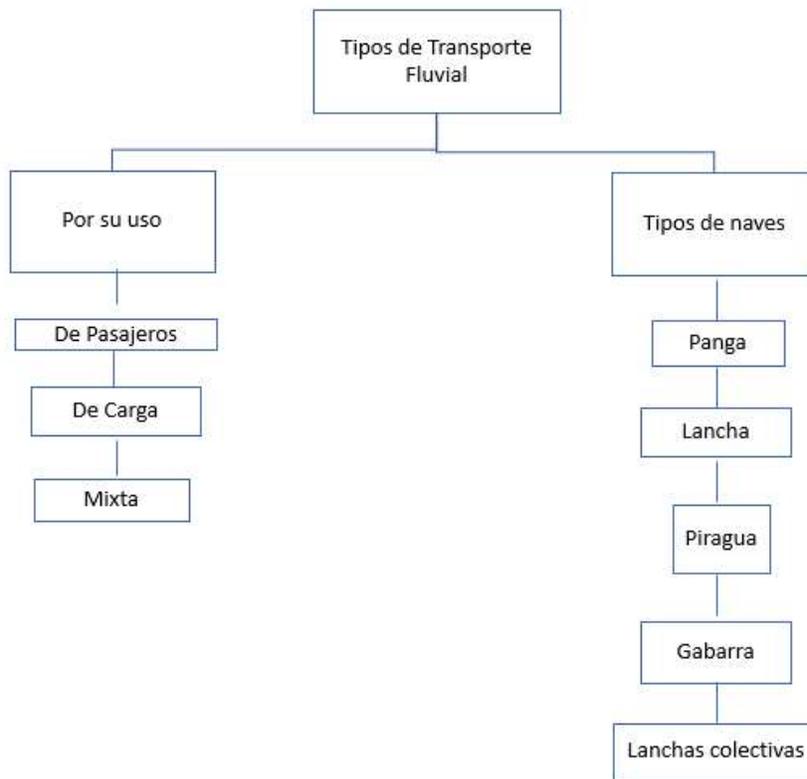


Figura 1.4. Tipos de transporte fluvial.
(Fuente: Propia, 2019)

1.1.4. Transporte en el Ecuador

A partir del año 2010 hasta el 2017, la población del Ecuador creció desde 15'012.228 hasta 16'776.977 habitantes en dicho período, el parque automotor creció desde 1'226.349 hasta 2'237.264 vehículos (Figura 1.5). De acuerdo con los datos mostrados se puede observar que el número de vehículos creció a través del tiempo, con un crecimiento de 8,8% entre los años 2016 y 2017. La tasa de vehículos matriculados por cada mil habitantes varía de acuerdo con la provincia, siendo la mayor tasa para Tungurahua con 180 vehículos matriculados, Azuay con 169, Pichincha con 167, Sto. Domingo de los Tsáchilas con 156, El Oro 153, Cañar con 152, Cotopaxi con 143, Los Ríos con 141, Loja con 137, Carchi con 126 y el resto de las provincias con 111.[24]

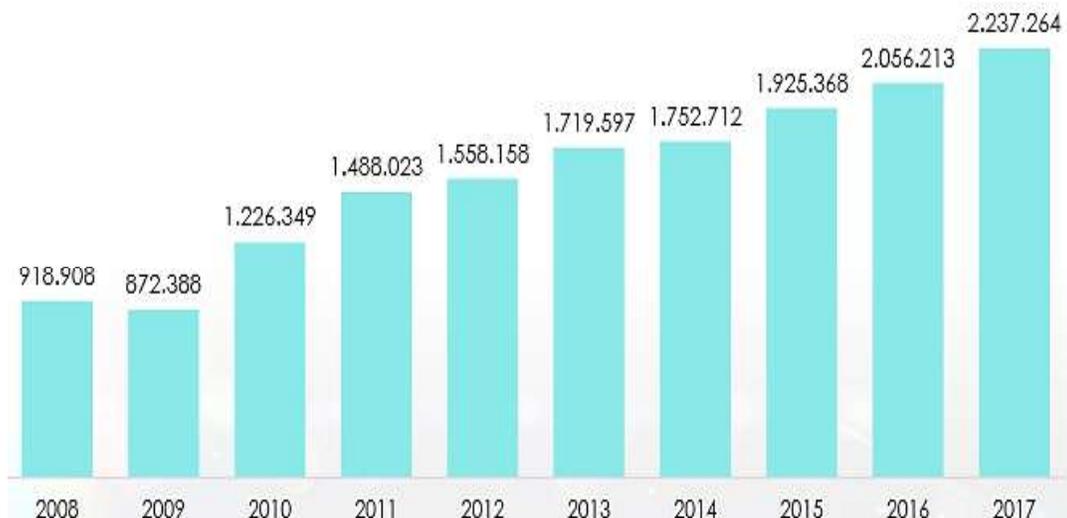


Figura 1.5. Serie histórica de vehículos matriculados hasta el año 2017.
(Fuente: INEC, 2018)

En el presente estudio se pondrá énfasis en los vehículos de transporte de pasajeros relacionados con los buses urbanos, intraprovinciales e interprovinciales, como se presenta a continuación:

1.1.4.1. Buses urbanos e intraprovinciales

Los buses urbanos son vehículos que permiten la movilización de personas dentro del área de una ciudad. El servicio prestado tiene un valor de (USD 0,25), siendo que la gran mayoría de las unidades llevan pasajeros sentados y de pie. Además, circulan desde las 05:30 hasta 22:00.

Los buses intraprovinciales permiten trasladar a los pasajeros dentro del límite de la provincia. El costo del servicio prestado depende del lugar de destino y tienen el mismo horario de circulación que los buses urbanos.

En la Tabla 1.1 se tiene un resumen de las características generales que presentan los buses urbanos e intraprovinciales fabricados por Carrocerías Nacionales.

Tabla 1.1. Características generales de los buses urbanos/intraprovincial fabricados por Carrocerías Nacionales.

Empresa Carrocera:	MODELO		IMETAM	
	Urbano	Interprovincial/ Intraprovincial	Urbano	Intraprovincial
Tipo de ámbito de transporte:				
Capacidad:	Sentados: 38 Pie: 37 Total: 75	Sentados: 42 Pie: 3 Total: 45	Sentados: 35 Pie: 45 Total: 80	Sentados: 45 Pie: 30 Total: 75
Materiales usados:	ASTM A-36 ASTM A-500	ASTM A-36 ASTM A-500	ASTM A-36 ASTM A-500	ASTM A-36 ASTM A-500
Costo de la carrocería USD:	54.000	58.000	54.000	58.000
Proceso de soldadura:	GMAW/SMAW	GMAW/SMAW	GMAW	GMAW
Capacidad de carga [Kg]:	9310	4245	5300	6100
Peso de la carrocería [Kg]:	4000	4300	4010	3210
Peso Bruto Vehicular [Kg]:	14200	13435	14200	14200

(Fuente: Propia, 2019)

1.1.4.2. Buses interprovinciales

El bus interprovincial es el más utilizado para desplazarse entre provincias por la amplia red vial que posee el país. El servicio prestado por estos vehículos funciona las 24 horas del día y su costo de pasaje varía de acuerdo con el destino a trasladarse. Las unidades cuentan con baño, asientos reclinables, aire acondicionado y televisión. Los buses interprovinciales son fabricados por empresas carroceras nacionales como Modelo (Tabla 1.1) y de procedencia internacional. En la Tabla 1.2 se tiene un resumen de las características generales que presentan los buses urbanos e interprovinciales de procedencia brasileña.

Tabla 1.2. Características generales de los buses urbanos/interprovincial de procedencia brasileña.

Empresa Carrocera:	MARCOPOLO		IRIZAR
	Urbano	Interprovincial	Interprovincial/ Interregional/ Turismo
Tipo de ámbito de transporte:			
Capacidad:	Sentados:33 Pie: 50 Total: 83	Sentados: 44	Sentados: 44
Materiales usados:	Acero estructural NBR ZAR 230 NBR ZSTE 380	Acero estructural NBR ZAR 230 y NBR ZSTE 380	Acero estructural NBR ZAR 230
Costo del chasis y carrocería USD:	160.000	250.000	260.000
Proceso de soldadura:	GMAW	GMAW	GMAW
Capacidad de carga [Kg]:	6516	4100	12500+7500
Peso de la carrocería [Kg]:	5448	7030	13500
Peso Bruto Vehicular [Kg]:	17000	16000	19500

(Fuente: Propia, 2019)

1.2. Aceros para la fabricación de buses en el Ecuador

Actualmente en el Ecuador se cuenta con un total de 63 Empresas Carroceras Autorizadas, las cuales tienen el permiso para la fabricación de su totalidad de buses, mismos que brindan el servicio de movilización a los pasajeros.

Las empresas carroceras en su gran mayoría utilizan para la construcción de las carrocerías los aceros estructurales como: ASTM A36 y ASTM A500 (Tabla 1.1). Esto debido a las características técnicas que presentan, así como de la facilidad de conseguir dichos materiales. Entre las empresas más representativas que manejan estos aceros son las siguientes: IMETAM, MODELO, MONCAYO, OLIMPICA, entre otras.

1.2.1. Acero ASTM A36

El acero ASTM A36 también conocido como Acero Estructural de Carbono, es uno de los materiales estructurales más utilizados en el campo industrial y de la construcción. Este acero también es utilizado mayormente en la construcción de máquinas, maquinaria, herramientas, estructura para edificaciones, esto debido a la disponibilidad que tiene en el mercado y costo. Además, tiene los atributos de ser maquinable, de soldarse con facilidad, así como de ser resistente y dúctil. Sus propiedades mecánicas y composición química se mencionan en las Tablas 1.3 y Tabla 1.4.

Tabla 1.3. Propiedades mecánicas del acero ASTM A-36.

Resistencia a la fluencia, mín.		Resistencia a la tracción, mín.		Elongación Mínima, %	
ksi	[MPa]	ksi	[MPa]	En 8 pulg [200 mm]	En 2 pulg [50 mm]
36	250	58-80	400-500	20	23

(Fuente: ASTM A36/A36M, 2014)

Tabla 1.4. Composición química del acero ASTM A-36.

Producto	%C, máx.	% Mn, rango	%P, máx.	%S, máx.	%Si, máx.	%Cu, mín.
Perfiles	0,26	0,85 - 1,35	0,04	0,05	0,40	0,20
Placas > 15 pulg, [380 mm]	0,25 - 0,29	0,80 - 1,20	0,030	0,030	0,40	0,20
Placas ≤ 15 pulg, [380 mm]	0,26 - 0,29	0,60 – 0,90	0,04	0,05	0,40	0,20

(Fuente: ASTM A36/A36M, 2014)

1.2.2. Acero ASTM A500

El acero ASTM A-500 posee un campo de aplicación amplio, principalmente es de uso estructural y viene en presentaciones de tubos y perfiles usándose en: edificaciones, torres de telecomunicaciones, defensas viales, ferrocarriles, galpones de uso industrial, puentes peatonales y vehiculares, entre otros. Sus características principales son una alta soldabilidad, ductilidad, fácil de dar forma y maquinar. En la Tabla 1.5 y Tabla 1.6 se presenta las propiedades mecánicas y composición química de este acero.

Tabla 1.5. Propiedades mecánicas del acero ASTM A-500.

Grado	Resistencia a la fluencia, mín.		Resistencia a la tracción, mín.		Elongación Mínima, %
	ksi	[MPa]	ksi	[MPa]	En 2 pulg. [50 mm]
A	39	270	45	310	25
B	46	315	58	400	23
C	50	345	62	425	21
D	36	250	58	400	23

(Fuente: ASTM A500/A500M, 2018)

Tabla 1.6. Propiedades químicas del acero ASTM A-500.

Grado	%C, máx.		%Mn, máx.		%P, máx.		%S, máx.		%Cu, mín.	
	AC	AP	AC	AP	AC	AP	AC	AP	AC	AP
A, B y D	0,26	0,30	1,35	1,40	0,035	0,045	0,035	0,045	0,20	0,18
C	0,23	0,27	1,35	1,40	0,035	0,045	0,035	0,045	0,20	0,18

(Fuente: ASTM A500/A500M, 2018)

El acero ASTM A-500 posee diferentes grados, mismos que se especifica en las Tablas 1.5 y 1.6, siendo el Grado A y B los más utilizados en la industria carrocería ecuatoriana.

1.3. Estudio de los aceros HSLA (High Strength Low Alloy)¹⁷

Los aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA) o aceros micro aleados son un tipo de acero al carbono que contienen pequeñas cantidades de elementos aleantes en su composición química, con el objetivo de obtener mejores propiedades mecánicas como resistencia y tenacidad. Además de una resistencia a la corrosión atmosférica de cuatro veces mayor que los aceros convencionales al carbono.

¹⁷ Davis, J. (2001). Alloying: Understanding the Basics. United States of America: ASM International.

Los aceros HSLA están diseñados para tener una resistencia a la fluencia superior a $S_y=275$ MPa, una resistencia última a la tracción entre $S_{ut}=450$ a 860 MPa y poseen un contenido de carbono bajo (0,05 a 0,25 %C) a fin de lograr la soldabilidad y conformabilidad, y hasta un 2% de contenido de manganeso. [17]

La composición química de los aceros HSLA depende de las propiedades mecánicas específicas a cumplir. Entre los elementos aleantes que son añadidos a este tipo de aceros se tienen: Cromo, niobio, zirconio, molibdeno, níquel, cobre, vanadio, nitrógeno y titanio. [17]

Los aceros HSLA al tener una alta resistencia permiten reemplazar aceros al carbono que tienen espesores gruesos, por este tipo de material y de menor espesor sin ninguna pérdida de rendimiento. La reducción en peso de los materiales depende principalmente del parámetro de la resistencia específica que relaciona la resistencia a la fluencia (S_y) o a la tracción (S_{ut}) dividido para la densidad. Los valores altos de resistencia específica indican una mayor resistencia y un menor peso que tiene el material. Mientras que los valores bajos de resistencia específica indican una menor resistencia y un mayor peso que posee el material. [2]

1.4. Categorías de los aceros HSLA¹⁷

Los aceros HSLA poseen una variedad de combinaciones específicas de elementos aleantes en diversos grados estándar para obtener diferentes propiedades mecánicas mejoradas. Entre las propiedades mejoradas en estos aceros son las siguientes: resistencia, tenacidad, soldabilidad, conformabilidad y resistencia a la corrosión atmosférica.

Los aceros HSLA se dividen en seis categorías dependiendo de los elementos aleantes que tienen y las propiedades mecánicas mejoradas. [17]

1.4.1. Aceros autoprotectores

Este tipo de aceros son resistentes a la corrosión atmosférica como cuatro veces más que los aceros convencionales y su solución sólida es fortalecida debido a que contienen pequeñas cantidades de fósforo y cobre como elementos aleantes.

¹⁷ Davis, J. (2001). Alloying: Understanding the Basics. United States of America: ASM International.

Una película superficial de óxido propia de estos aceros se forma para proteger de la corrosión. El óxido está adherido al material de forma continua y es una barrera para el oxígeno y la humedad.

1.4.2. Aceros microaleados de ferrita – perlita

Estos aceros microaleados contienen pequeñas cantidades menores al 0,15% de vanadio, niobio y titanio como elementos que permiten la formación de carburos o carbonitruros como precipitados. Además, estos elementos aleantes añadidos permiten la refinación del grano y en la transformación de una fase a otra controlando la temperatura.

1.4.3. Aceros perlíticos laminados

Este grupo de aceros tiene en su composición química como elemento de aleación al manganeso en mayor cantidad que lo diferencia de los aceros al carbono convencionales.

La microestructura perlítica tiene problemas en una transición de dúctil a frágil. Los tratamientos térmicos que comúnmente se realizan son: el alivio de tensiones y normalizado. [28]

1.4.4. Aceros de ferrita acicular (Bainita de bajo contenido de carbono)

La microestructura de esta categoría de aceros HSLA es ferrita acicular que se consigue por enfriamientos acelerados y bajo contenido de carbono. La composición química de estos aceros permite disminuir por debajo del 0,05% el contenido de carbono, debido a que tiene como elementos aleantes añadidos al manganeso, molibdeno y/o boro. [22]

1.4.5. Aceros de doble fase

Estos aceros tienen una matriz ferrítica (entre 90% y 80%) con una microestructura de martensita dispersa (entre 10% y 20%), que se obtiene por un enfriamiento rápido. La composición química de esta categoría de aceros HSLA se da con elementos aleantes como el manganeso, molibdeno, vanadio o niobio y un contenido de carbono entre 0,06 a 0,15%. Los aceros de doble fase están siendo utilizados en la industria del automovilismo debido a su característica de absorber energía. [22]

1.4.6. Aceros con inclusiones de forma controlada

En este tipo de aceros se obtienen inclusiones en forma de glóbulos casi esféricos, pequeños y dispersos de manera controlada por la adición de pequeñas cantidades de

elementos aleantes como titanio, calcio o zirconio. Se controla que las inclusiones no se vuelvan plásticas si la temperatura de laminación aumenta. Las propiedades principales que caracterizan a estos aceros son una alta resistencia y una buena ductilidad.

En la siguiente Tabla 1.7, se resume las categorías que presentan los aceros HSLA comparando los elementos aleantes, la resistencia a la fluencia (S_y) y propiedades que poseen cada una.

Tabla 1.7. Categorías de los aceros HSLA.

Categorías	Elementos aleantes principales	Resistencia a la fluencia (S_y)	Propiedades
Autoprotectores	Fósforo, cobre, níquel y cromo	Entre 290 a 345 MPa.	Excelente resistencia a la corrosión atmosférica
Microaleados ferrita-perlita	Vanadio, niobio y titanio	Entre 345 a 620 MPa.	Alta resistencia. Buena tenacidad y soldabilidad
Perlíticos laminados	Manganeso	Entre 290 a 345 MPa.	Buena resistencia, tenacidad, conformabilidad y soldabilidad.
Ferita Acicular (Bainita de bajo carbono)	Manganeso, molibdeno y/boro.	Entre 415 a 690 MPa.	Alta resistencia y tenacidad. Buena soldabilidad y conformabilidad.
Doble fase	Manganeso, molibdeno, vanadio o niobio.	Entre 290 a 550 MPa.	Alta resistencia. Buena ductilidad, conformabilidad y soldabilidad
Con inclusiones de forma controlada	Titanio, calcio o zirconio.	Entre 310 a 550 MPa.	Alta resistencia y buena ductilidad.

(Fuente: Davis, 2001)

1.5. Efecto de los Elementos de Microaleación¹⁷

En los aceros HSLA se utiliza diferentes elementos de microaleación para obtener las propiedades mecánicas que se requiera. Una de las categorías de mayor énfasis a ser estudiada es los aceros microaleados de ferrita- perlita, donde se utilizan como elementos de microaleación al vanadio, niobio y el titanio.

El vanadio y niobio incrementan la resistencia a la fluencia sin la necesidad de aumentar el manganeso y/o carbono en su composición. Las propiedades mecánicas de los aceros HSLA no dependen solo de los elementos de microaleación sino también de la refinación del grano y las técnicas de laminación.

¹⁷ Davis, J. (2001). Alloying: Understanding the Basics. United States of America: ASM International.

Se consigue una alta resistencia a la fluencia ($S_y=345$ a 620 MPa) y una mayor tenacidad con un refinamiento de grano y procesos de laminación controlados. Los contenidos de carbono están por debajo del $0,25\%$ en los aceros HSLA microaleados. [17]

Existen diferentes tipos de aceros microaleados de ferrita – perlita, los cuales son:

- Aceros microaleados de Vanadio.
- Aceros microaleados de Niobio.
- Aceros microaleados de Niobio-Molibdeno.
- Aceros microaleados de Vanadio-Niobio.
- Aceros microaleados de Vanadio-Nitrógeno.
- Aceros microaleados de Titanio.
- Aceros microaleados de Niobio-Titanio.

1.5.1. Aceros microaleados de Vanadio

El vanadio como elemento de microaleación contribuye a la formación de partículas precipitadas finas en la ferrita para fortalecerla durante los procesos de laminación en caliente y posteriormente su enfriamiento.

En los productos laminados en caliente de estos aceros, el porcentaje máximo permitido de vanadio es del $0,15\%$. La resistencia a la fluencia aumenta entre 5 y 15 MPa por cada $0,01\%$ de vanadio en peso.

El contenido de manganeso y el tamaño de grano de la ferrita afectan al fortalecimiento de estos aceros microaleados. La resistencia se ve mejorada cuando existe un aumento del manganeso y se consigue una mayor ductilidad cuando el grano de ferrita es más fino.

1.5.2. Aceros microaleados de Niobio

En este tipo de aceros se forman carburos de niobio precipitados que contribuyen al aumento de resistencia a la fluencia, y deben estar presentes en el tamaño y cantidad adecuada en la precipitación.

El niobio es un mejor agente fortalecedor que el vanadio debido que refina el grano de ferrita y produce endurecimiento por precipitación. La resistencia a la fluencia aumenta entre 35 y 40 MPa por cada $0,01\%$ de niobio en peso. En la Figura 1.6, se observa el efecto del carburo de niobio.

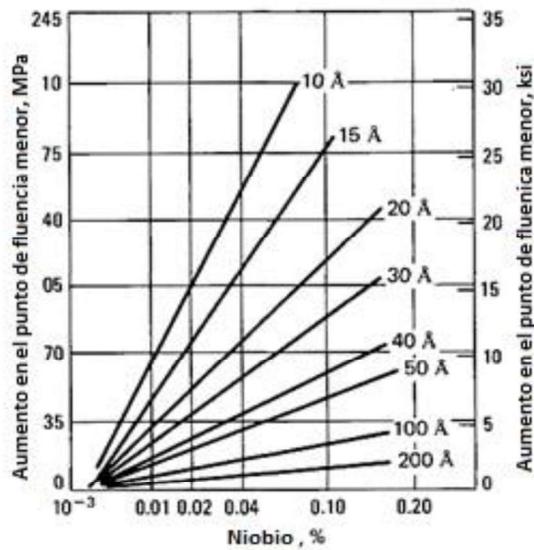


Figura 1.6. Efecto del carburo de niobio en la resistencia a la fluencia para diversos tamaños de partículas.
(Fuente: Davis, 2001)

1.5.3. Aceros microaleados de Vanadio-Niobio.

La propiedad mecánica de resistencia a la fluencia en este tipo de aceros de vanadio–niobio es superior a la que se tiene con los elementos microaleantes solos. El vanadio y niobio juntos permiten tener temperaturas de transición dúctil–frágil disminuidas y límites elásticos aumentados.

1.5.4. Aceros microaleados de Niobio-Molibdeno

La microestructura en los aceros de niobio-molibdeno se presenta como ferrita acicular o ferrita-perlita. El contenido de molibdeno incrementa la resistencia a la tracción en 30 MPa y la resistencia a la fluencia en 20 MPa por cada 0,1%. El contenido máximo de molibdeno como elemento de microaleación es del 0,31% en este tipo de aceros, lo que permite una disminución de actividad del carbono en su composición química.

1.5.5. Aceros microaleados de Vanadio-Nitrógeno

La adición de nitrógeno en este tipo de aceros permite la formación de nitruros de vanadio que incrementan el endurecimiento por precipitación y funcionan como refinador del grano. El contenido de nitrógeno varía entre 0,018 a 0,022% permitiendo el fortalecimiento de la ferrita debido a que es un elemento intersticial.

1.5.6. Aceros microaleados de Titanio

La adición de titanio permite mejorar la tenacidad cuando estos aceros son obtenidos por medio de laminación controlada. Este elemento de microaleación produce la formación de nitruros de titanio que refinan el grano y fortalecen la precipitación. El contenido de titanio se encuentra en porcentajes menores al 0,025%.

1.5.7. Aceros microaleados de Niobio-Titanio

La eficiencia del niobio se ve aumentada debido a la adición de titanio en este tipo de aceros, evitando la formación de nitruros de niobio. Esto permite una mayor solubilidad del niobio en la austenita, lo que resulta en un aumento posterior de la precipitación de partículas de niobio en la ferrita. [17]

En la Tabla 1.8, se resume las propiedades mecánicas de los aceros microaleados de ferrita-perlita comparando la resistencia a la fluencia (S_y), resistencia última a la tracción (S_{ut}) y porcentaje de elongación. En la Tabla 1.9, se detalla la composición química de los tipos de aceros microaleados de ferrita-perlita.

Tabla 1.8. Propiedades mecánicas de los aceros microaleados de ferrita – perlita.

Tipos	S_y [MPa]	S_{ut} [MPa]	% Elongación
Aceros microaleados de Vanadio (V)	≥ 370	≥ 571	22 – 24
Aceros microaleados de Niobio (Nb)	≥ 370	≥ 536	18 - 22
Aceros microaleados de Vanadio–Niobio (V-Nb)	290 - 450	415 - 550	15 - 24
Aceros microaleados de Niobio – Molibdeno (Nb-Mo)	393 - 460	571 - 660	28 – 34
Aceros microaleados de Vanadio – Nitrógeno (V-N)	≥ 516	≥ 659	$\geq 25,70$
Aceros microaleados de Titanio (Ti)	≥ 375	≥ 582	$\geq 27,80$
Aceros microaleados de Niobio – Titanio (Nb-Ti)	533 - 658	583 - 763	23,7 – 31,7

(Fuente: Najafi, 2014) (Fuente: ASTM A572/A572M, 2018) (Fuente: Mohrbaker, 2013) (Fuente: Pan, 2015)
(Fuente: Xu, 2010) (Fuente: Yuan, 2015)

Tabla 1.9. Composición química de los aceros microaleados de ferrita – perlita.

Tipos	Composición Química											
	%C, máx.	%Mn, máx.	%Si, máx.	%P, máx.	%S, máx.	%Al, máx.	%Cr, máx.	%V, máx.	%Nb, máx.	%Mo, máx.	%N, máx.	%Ti, máx.
Aceros microaleados de V.	0,15	1,41	0,31	0,01	0,02	0,02	-	0,09	-	-	-	-
Aceros microaleados de Nb	0,14	1,50	0,33	0,008	0,010	0,03	-	-	0,04	-	-	-
Aceros microaleados de V - Nb	0,23	1,35	0,40	0,030	0,030	-	-	0,15	0,05	-	-	-
Aceros microaleados de Nb - Mo	0,05	1,57	0,05	-	-	0,028	-	-	0,03	0,31	0,01	-
Aceros microaleados de V – N	0,14	1,50	0,45	-	-	-	-	0,079	-	-	0,02	-
Aceros microaleados de Ti	0,22	1,34	0,35	0,025	0,023	-	-	-	-	-	-	0,003
Aceros microaleados de Nb - Ti	0,07	1,78	0,22	-	0,002	-	0,04	-	0,07	-	0,01	0,157

(Fuente: Najafi, 2014) (Fuente: ASTM A572/A572M, 2018) (Fuente: Mohrbaker, 2013) (Fuente: Pan, 2015) (Fuente: Xu, 2010) (Fuente: Yuan, 2015)

1.6. Aplicaciones de los aceros HSLA

Las aplicaciones de los aceros HSLA se fueron incrementando con el pasar de los años y debido a diferentes necesidades que fueron apareciendo al utilizar los aceros estructurales. Estos aceros permitieron tener ciertas ventajas sobre los aceros al carbono, las cuales son: menores costos de fabricación o manufactura, una reducción de peso y mejores propiedades mecánicas en los diseños a construirse.

Los tratamientos térmicos que se realizaban a los aceros al carbono para conseguir mejores propiedades fueron eliminados con los aceros HSLA, por lo que los costos de fabricación o manufactura se redujeron. Entre los procesos eliminados fueron: templado, endurecimiento, eliminación de tensiones y recocido.

La industria automotriz fue uno de los principales pilares para la utilización de los aceros HSLA debido a la crisis del petróleo en 1973. El objetivo de la industria era conseguir carrocerías resistentes, seguras para los ocupantes, de pesos reducidos y de menor costo para reducir el consumo de combustible escaso en esa época. En la actualidad, grandes

fabricantes de automóviles como Hyundai Motor Company utilizan los aceros HSLA en sus modelos fabricados sin importar el mercado donde son vendidos. [21]

Además, empresas internacionales dedicadas a la fabricación de carrocerías de vehículos de transporte de pasajeros están cambiando sus aceros convencionales por los aceros HSLA debido a las ventajas que poseen y los beneficios que los mismos traen.

Entre las principales aplicaciones de los aceros HSLA se tiene las siguientes:

- Líneas de transmisión de petróleo y gas a alta presión.
- Estructura de puentes y edificios.
- Recipientes a presión.
- Torres de transmisión de energía, postes de luz y vigas de construcción.
- Maquinaria de construcción y agrícola, equipos industriales, brazos de grúa, vagones de ferrocarril y minas.
- Carrocerías de automóviles y vehículos de transporte de pasajeros, bastidores de chasis de los camiones y partes de la suspensión.

1.7. Soldabilidad de los aceros HSLA

La soldabilidad de los aceros HSLA es óptima debido a su contenido de carbono entre 0,05% y 0,25 %, esto permite utilizar los mismos procesos de soldadura de los aceros estructurales al carbono. No se requiere precalentamiento o post calentamiento al momento de realizar la soldadura.

Este tipo de aceros por su contenido de carbono bajo presentan un endurecimiento en la Zona Afectada por el Calor (ZAC) similar a la que presentan los aceros de bajo contenido de carbono. [3]

El metal de aporte debe tener características similares como el material base utilizado, tomando en cuenta la composición química y las propiedades mecánicas de ambos. [50]

Para conocer el comportamiento de soldabilidad de los aceros HSLA se debe relacionar los efectos combinados de los diferentes elementos de aleación con un valor empírico en porcentaje en peso conocido como Carbono Equivalente (CE). Este valor puede ser obtenido por medio de las siguientes ecuaciones que se presentan a continuación:

La Ecuación 1.1. utilizada por el Instituto Internacional de Soldadura (IIW), es la siguiente:

$$CE_{(IIW)} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

Ecuación 1.1.

La Ecuación 1.2. utilizada por American Welding Society en el código AWS D1.1., es la siguiente:

$$CE_{(AWS)} = \%C + \frac{\%Mn + \%Si}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

Ecuación 1.2.

El parámetro de composición de Ito - Bessyo (Pcm) que se aplica para los nuevos aceros HSLA, donde su Carbono Equivalente se obtiene de una manera más precisa. [41]. Se representa por la Ecuación 1.3, la cual es la siguiente:

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

Ecuación 1.3.

Todos los elementos aleantes deben estar en porcentaje en peso (%) para poder calcular el Carbono Equivalente. Si el valor obtenido no excede los 0,45% de CE, no se requiere un precalentamiento o post calentamiento al momento de realizar el proceso de soldadura. Si el valor esta entre 0,45 y 0,60% de CE, se requiere un precalentamiento en un rango aproximado de 95 a 400°C para evitar agrietamientos. Cuando el valor excede 0,60% de CE, se requiere un precalentamiento y post calentamiento para obtener una soldadura sólida y sin agrietamientos. [3]

1.8. Propiedades y aplicaciones del acero HSLA ASTM A 572

Es un acero de alta resistencia y baja aleación con una microaleación de vanadio-niobio, que le permite tener propiedades mejoradas en comparación con los aceros al carbono convencionales. El acero ASTM A572 posee una excelente ductilidad, buenas características para ser soldado fácilmente y puede ser mecanizado por varias técnicas. Además, tiene una disponibilidad de cinco grados diferentes, los cuales son: 42, 50, 55, 60 y 65. Cada uno de los números que representan estos grados indican la resistencia a la fluencia (ksi) que poseen los aceros en el sistema inglés.

En la Tabla 1.10, se puntualizan las propiedades mecánicas del acero ASTM A572 en sus diferentes grados. En la Tabla 1.11, se muestra la composición química que posee el acero ASTM A572 en sus diferentes grados.

Tabla 1.10. Propiedades mecánicas del acero ASTM A572.

Grado	Resistencia a la fluencia, min		Resistencia a la tracción, min		Elongación Mínima, %	
	ksi	[MPa]	ksi	[MPa]	En 8 pulg. [200 mm]	En 2 pulg. [50 mm]
42 [290]	42	290	60	415	20	24
50 [345]	50	345	65	450	18	21
55 [380]	55	380	70	485	17	20
60 [415]	60	415	75	520	16	18
65 [450]	65	450	80	550	15	17

(Fuente: ASTM A572/A572M, 2018)

Tabla 1.11. Composición química del acero ASTM A572.

Grados	%C, máx.	%Mn, máx.	%P, máx.	%S, máx.	%Si, máx.	%Nb, rango.	%V, rango.
42 [290]	0,21	1,35	0,030	0,030	0,40	0,005 - 0,05	0,01 – 0,15
50 [345]	0,23	1,35	0,030	0,030	0,40	0,005 - 0,05	0,01 – 0,15
55 [380]	0,25	1,35	0,030	0,030	0,40	0,005 - 0,05	0,01 – 0,15
60 [415]	0,26	1,35	0,030	0,030	0,40	0,005 - 0,05	0,01 – 0,15
65 [450]	0,23	1,65	0,030	0,030	0,40	0,005 - 0,05	0,01 – 0,15

(Fuente: ASTM A572/A572M, 2018)

El acero ASTM A572 Grado 50 es uno de los más utilizado a nivel de aplicaciones y escogido para el estudio correspondiente. Las aplicaciones típicas del Grado 50 incluyen: partes de automóviles y camiones (carrocerías), vagones de ferrocarril, puentes, equipos de construcción, torres de transmisión, contenedores de carga, tubos estructurales y cilindros de gas LP. En la Figura 1.7 se presenta una aplicación de este tipo de acero. [19]



Figura 1.7. Vigas IPN de Acero ASTM A572 Grado 50 para la construcción de puentes.
(Fuente: Jinshi, 2015)

1.9. Comparación entre los aceros ASTM A-36, ASTM A-500 y ASTM A-572 Grado 50

Los aceros ASTM A-36 y ASTM A-500 son utilizados por empresas carroceras en el Ecuador para la construcción de las estructuras de los buses como puede observarse en la Tabla 1.1. En la Tabla 1.12 se realiza una comparación de las propiedades mecánicas de los aceros estructurales utilizados con el acero HSLA ASTM A-572 Grado 50.

Tabla 1.12. Comparación de las propiedades mecánicas de los aceros ASTM A-36, ASTM A-500 y ASTM A-572 Grado 50.

Tipo de Acero	Resistencia a la Fluencia (Sy), mín.		Resistencia a la Tracción (Sut), mín.		Elongación mínima, %
	ksi	[MPa]	ksi	[MPa]	En 2 pulg. [50 mm]
ASTM A-36	36	250	58-80	400-500	30
ASTM A-500, Grado A	39	270	45	310	25
ASTM A-500, Grado B	46	315	58	400	23
HSLA (A-572), Grado 50	50	345	65	450	21

(Fuente: Propia, 2019)

2. METODOLOGÍA

En el presente trabajo dentro de la sección que corresponde a la parte experimental se detallan (1) los métodos empleados para caracterizar el material base, (2) una revisión del proceso Gas Metal Arc Welding (GMAW), (3) variables del proceso de soldadura, (4) discontinuidades típicas del proceso GMAW, (5) código de soldadura de la AWS D1.1, (6) procedimiento de soldadura, (7) ensayos no destructivos, (8) ensayos destructivos, (9) micrografía, (10) macrografía y (11) dureza superficial.

2.1. Caracterización del material base

El acero HSLA ASTM A-572 Grado 50 se utilizó como metal base para obtener las juntas soldadas en el presente estudio. Este material proviene de la compra realizada en la empresa NOVACERO de una plancha de 1220 X 2000 mm con un espesor de 3 mm. Se procedió a extraer probetas para conocer la composición química y propiedades mecánicas.

2.1.1. Análisis químico del metal base por medio de espectrometría de emisión atómica de chispa

Con la finalidad de determinar la composición química del metal base se dio una muestra al Laboratorio de Fundición (LF) de la Escuela Politécnica Nacional. Este método de prueba permite el análisis directo de probetas metálicas, principalmente para determinar un porcentaje de fracción en masa de los elementos aleantes. Se toma de referencia la norma ASTM E415-17 para llevarse a cabo el ensayo.

2.1.1.1. Preparación de la muestra

Las dimensiones de la muestra fueron 32 x 33 mm para el área de medición con un espesor de 3 mm, como se presenta en la Figura 2.1. La probeta utilizada para caracterizar al material se extrajo de la plancha, misma que se obtuvo realizando un corte en frío con la ayuda de una hoja de sierra de acero templado con dientes de punta de carburo. Después de realizarse el corte del material base se utilizó una lija de lona para metales de granulometría 100 grano/in² para retirar el recubrimiento que podría afectar en las mediciones.

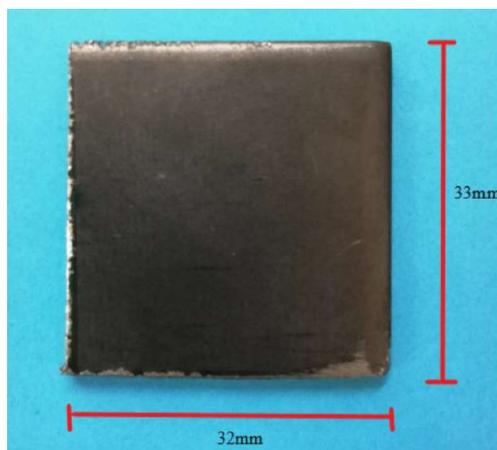


Figura 2.1. Dimensiones de la muestra.
(Fuente: Propia, 2019)

2.1.1.2. Preparación de los materiales de referencia

El laboratorio cuenta con 4 patrones de referencia para realizarse la prueba de espectrometría, estas se utilizan de acuerdo con la composición del material base a examinar. Cuando el patrón de referencia ha sido usado se debe maquinar la superficie, esto debido a que la chispa quema la superficie. Como el patrón de referencia estaba apto para utilizarse no se realizó ninguna preparación.

2.1.1.3. Procedimiento de medición

Para realizar las mediciones del análisis químico se empleó un espectrómetro de emisión óptica cuyas especificaciones técnicas se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas del espectrómetro de emisión óptica.

Descripción		Imagen	
Marca:	BRUKER		
Modelo:	Q2 ION		
Características eléctricas:	Voltaje:		230 [VCA]
	Frecuencia:		50-60 [Hz]
	Potencia:		450 [W]
Condiciones del ensayo:	Gas utilizado:		Argón
	Método de análisis:	FE 110 Low Alloy	
Software para análisis:	Elemental Suite OES		

(Fuente: Propia, 2019)

Para proceder a la realización de la espectrometría se reguló el flujo del gas de protección (Argón), seguidamente en el software se seleccionó el método de análisis a usarse. Para alcanzar las especificaciones del fabricante se debe realizar 3 purgas de 5 minutos cada una, esto para que el equipo verifique el patrón a utilizarse. Para iniciar las mediciones se debe limpiar el electrodo de tungsteno para retirar residuos contaminantes.

La muestra preparada previamente se coloca sobre el orificio de la cámara de chispa y se alinea el electrodo con el área de medición. Debe cerrarse el circuito para efectuar las mediciones. Por medio de los controlares del software se da inicio al ensayo. La superficie del metal se quema por medio de las chispas generadas mientras se efectúa las mediciones y el gas de argón permite mejorar la lectura debido a la ionización que produce. Luego de realizar la medición respectiva, el software usa el método de análisis seleccionado y presenta los resultados automáticamente del porcentaje de fracción en masa de todos los elementos aleantes. En la superficie de la muestra se realizó 4 quemaduras y el promedio de estos resultados fue el reportado. El electrodo en cada medición realizada fue limpiado y colocado en una parte diferente de la superficie que no se localice quemada.

2.1.2. Ensayo de Tracción del material base

El ensayo de tracción se realizó con la finalidad de conocer las propiedades mecánicas del metal base utilizado. Este se llevó a cabo en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV) de la Escuela Politécnica Nacional.

2.1.2.1. Preparación de la muestra

Para extraer las muestras se realizó el corte en el eje longitudinal de manera que coincida con la dirección del laminado del material base. Las probetas cortadas fueron obtenidas de placas con dimensiones de 510 x 180 x 3 mm de espesor, mismas que fueron maquinadas por el Laboratorio de Máquinas Herramientas de la FIM – EPN hasta obtener la forma y dimensiones mostradas en la Figura 2.2 y Figura 2.3 respectivamente. Las dimensiones establecidas fueron tomadas de acuerdo con el método estándar definido en la norma ASTM E8/E8M-16 para una longitud calibrada de 50mm.

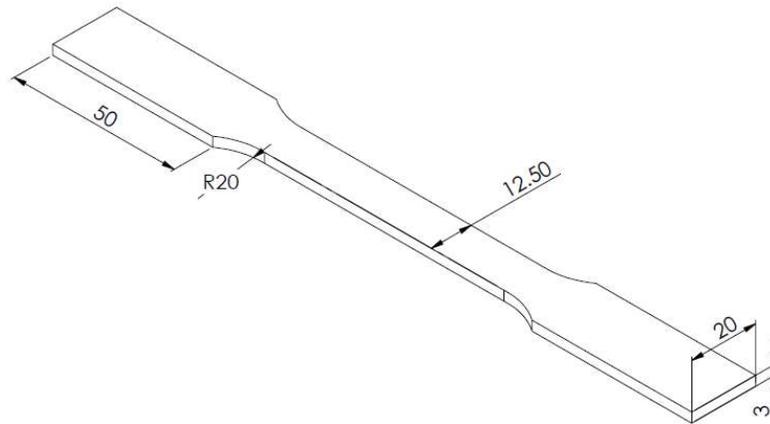


Figura 2.2. Dimensiones en mm de la probeta para el ensayo de tracción.
(Fuente: Propia, 2019)



Figura 2.3. Probetas para ensayo de tracción del material base.
(Fuente: Propia, 2019)

2.1.2.2. Procedimiento del ensayo

Para el ensayo de tracción se utilizó la máquina universal cuyas especificaciones técnicas se detalla en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Especificaciones técnicas de la máquina universal de ensayos.

Descripción		Imagen
Marca:	Tinius Olsen	
Modelo:	Super L	
Capacidad de carga:	50 toneladas	
Sistema de aplicación de carga:	Hidráulico	
Velocidad de desplazamiento:	2 [mm/s]	

(Fuente: Propia, 2019)

Se regula la velocidad de desplazamiento en la máquina universal para así quedar calibrada. En la sección reducida de cada probeta se marcó con puntos la longitud calibrada de 50 mm que permitirá medir posteriormente la elongación.

La probeta debe sujetarse a la mesa fija del equipo mientras que la mesa móvil debe ser desplazada para colocar la probeta en las mordazas de la máquina. El ensayo inicia con el desplazamiento de la mesa móvil y este proceso debe realizarse hasta que la probeta sufra la ruptura.

Para proceder a la medición debe retirarse las secciones de la probeta fracturada. Los valores obtenidos por el controlador del equipo fueron de carga máxima y el desplazamiento de la mesa móvil de la máquina, mientras que el límite de fluencia, resistencia a la tracción y porcentaje de elongación fueron calculados y emitidos en el Informe LAEV – 019.001.

2.2. Soldadura eléctrica por arco bajo protección de gas con alimentación continua de electrodo sólido (GMAW).

Es un proceso de soldadura donde el arco eléctrico se genera entre los metales a unirse y el electrodo de metal de aporte continuo con una protección de gas. El gas de blindaje es suministrado de manera externa al mismo tiempo que se genera el arco y el alambre continuo se vuelve metal líquido.

Existen dos variaciones del proceso GMAW dependiendo del gas que se utilice en la atmósfera de protección, estas son MIG y MAG. En el MAG se emplea un gas reactivo como el dióxido de carbono para soldar metales ferrosos y el MIG hace uso de un gas inerte como el helio o argón para soldar metales no ferrosos.

El electrodo consumible en forma sólida o tubular requiere una corriente continua positiva (DC+) de polaridad inversa. La operación del proceso GMAW puede darse de modo semiautomática o automática. [39] En la Figura 2.4, se presenta el equipo utilizado para la soldadura GMAW.

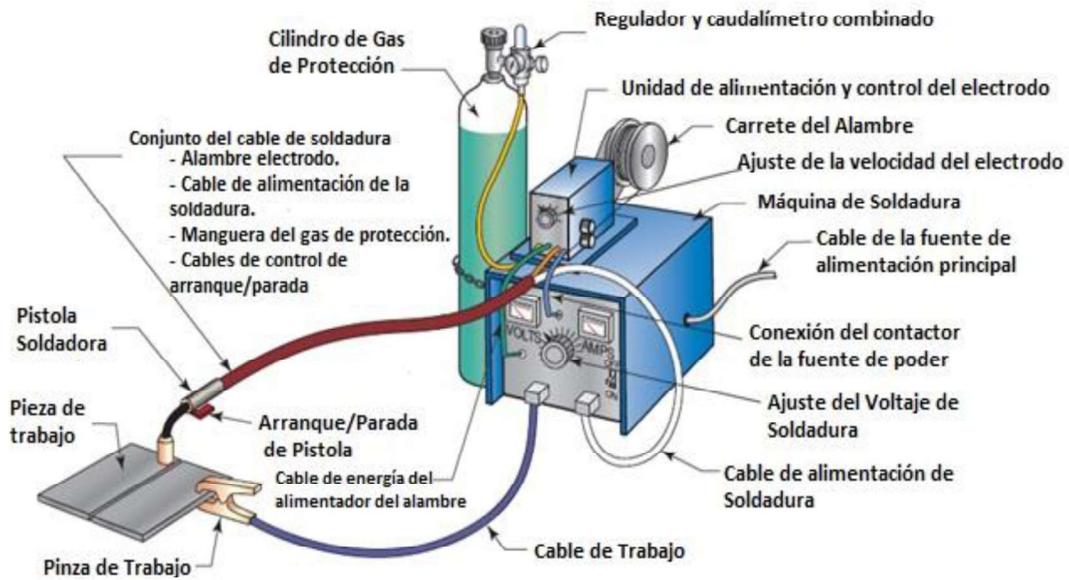


Figura 2.4. Equipo utilizado en el proceso de soldadura GMAW.
(Fuente: Jeffus, 2016)

2.2.1. Ventajas del proceso de soldadura GMAW

- Dependiendo de los electrodos, gases de protección y parámetros de soldadura adecuados se puede soldar una amplia gama de metales ferrosos y no ferrosos en cualquier posición requerida.
- Los electrodos utilizados tienen una eficiencia entre 93% y 98%.
- La tasa de deposición y las velocidades de soldadura son superiores comparadas con el proceso de soldadura SMAW.
- El cordón de soldadura por este proceso presenta una excelente apariencia.
- La limpieza después del proceso de soldadura es rápida y sencilla debido a que presenta un mínimo de escoria y salpicaduras.
- La alimentación del electrodo es continua permitiendo soldar largas distancias sin paradas ni arranques.

2.2.2. Desventajas del proceso de soldadura GMAW

- El equipo utilizado en el proceso GMAW es más costoso, menos portátil y más complejo que el proceso de soldadura SMAW.
- El gas de protección utilizado durante la soldadura debe ser protegido de flujos de aire que lo puedan separar del proceso, por eso no se utiliza en exteriores.
- Debido al tamaño de la pistola de soldadura, no se utiliza donde exista poco espacio para la movilización.
- Debido a altos niveles de intensidad del arco y calor radiado puede dificultar la aceptación del proceso GMAW para los operadores.

2.2.3. Modos de transferencia del metal de aporte

Dentro del proceso GMAW existen cuatro mecanismos básicos por los cuales se transfiere el metal de aporte a la pieza de trabajo, estos son:

- Transferencia por Corto Circuito.
- Transferencia Globular.
- Transferencia por aspersion (rocío).
- Transferencia por pulsos.

Dentro de este proceso de soldadura existen varios factores que influyen para determinar el tipo de transferencia de metal, entre los más importantes son:

- Tipo y magnitud de la corriente de soldadura.
- Composición del electrodo.
- Extensión del electrodo.
- Diámetro del electrodo
- Gas de protección.

En el presente estudio, para el proceso de soldadura GMAW del acero HSLA ASTM A572 Grado 50 se utilizó el modo de transferencia por corto circuito del metal de aporte.

2.2.3.1. Transferencia por corto circuito (GMAW-S)

En este modo de transferencia se producen cortocircuitos eléctricos repetidos entre el contacto del metal de aporte y la pieza de trabajo generando un pequeño charco de soldadura con solidificación rápida y un bajo calor de entrada que reduce la distorsión de la soldadura. Este método es usado para soldar en todas las posiciones, aberturas de raíz amplias y unir materiales base con un espesor entre 0,6 a 5 mm.

Los electrodos se alimentan de forma continua y tienen diámetros entre 0,6 a 1,2 mm, con una protección de gas de 100 % CO₂ o mezcla de 25-20% CO₂ con 75-80% argón. Se obtiene penetración más profunda y niveles altos de salpicaduras al soldar aceros cuando se utiliza CO₂ comparado con gases inertes como argón o helio. La velocidad de alimentación del electrodo controla la corriente de soldadura.

En la Figura 2.5 se presenta el ciclo del modo de transferencia por corto circuito. Parte A: El electrodo y material base están en corto circuito. No existe corriente ni arco de soldadura. Parte B: La corriente aumenta provocando el calentamiento del electrodo hasta un estado plástico. La fuerza electromagnética de Pinch provoca un efecto cuello de botella del alambre para la formación de gotas de metal. [47] Parte C: Se deposita la gota de metal fundido y se reinicia el arco de soldadura. El voltaje y la longitud de arco son máximos. El

metal fundido se aplanan por el calor generado por el arco. [34] Parte D: El calor del arco es superado por la velocidad de alimentación del electrodo y se aproxima al material base nuevamente. El ciclo se repite entre 20 a 250 veces por segundo. [1]

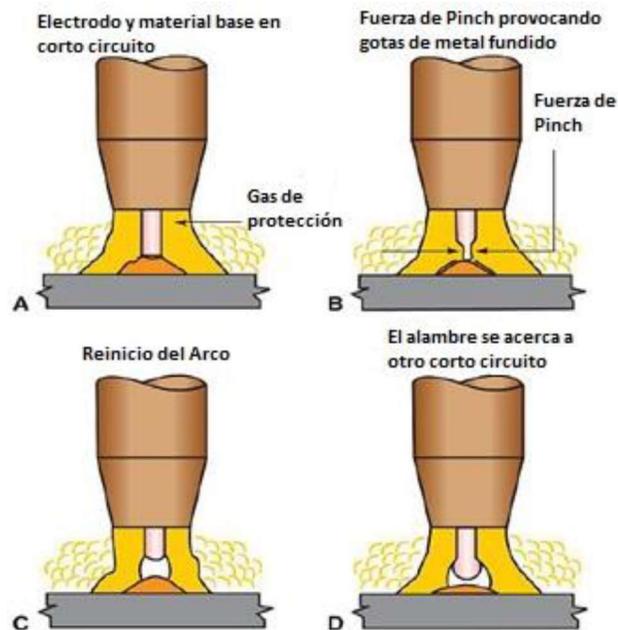


Figura 2.5. Ciclo del modo de transferencia del metal de aporte por corto circuito.
(Fuente: Althouse, 2013)

2.3. Variables del proceso GMAW considerados en la soldabilidad del acero ASTM A572 Grado 50.

La metodología experimental utilizada en el presente estudio consistió en soldar varias juntas por el proceso GMAW tomando en cuenta parámetros invariables como: (1) diámetro y tipo de electrodo, (2) extensión del alambre electrodo y (3) polaridad. Los parámetros variables tomados en cuenta para cada junta fueron: (4) velocidad de alimentación y corriente de soldadura, (5) voltaje de soldadura, (6) gas de protección y (7) velocidad de avance.

2.3.1. Diámetro y tipo de electrodo

El alambre electrodo utilizado para el proceso GMAW tiene como designación ER 70 S-6 obtenido con la especificación según la AWS A5.18 para electrodos y varillas de acero al carbono por arco con protección de gas. El diámetro elegido de alambre fue de 0,9 mm debido al espesor del material base que corresponde a 3 mm.

En la Tabla 2.3 se presenta la composición química del electrodo según especificaciones AWS y analizas por el fabricante. Las propiedades mecánicas según la especificación AWS y realizadas por el fabricante, se puntualizan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.3. Composición química del electrodo ER 70S-6.

Elemento	Composición química del electrodo		
	Porcentaje, Especificación AWS		Porcentaje de Resultados
	mín.	máx.	
Carbono (C)	0,06	0,15	0,08
Manganeso (Mn)	1,40	1,85	1,44
Silicio (Si)	0,80	1,15	0,86
Fósforo (P)	-	0,025	0,012
Azufre (S)	-	0,035	0,014
Cromo (Cr)	-	0,15	0,02
Níquel (Ni)	-	0,15	0,04
Molibdeno (Mo)	-	0,15	0,003
Vanadio (V)	-	0,03	0,005
Cobre (Cu)	-	0,50	0,20

(Fuente: INDURA, 2012)

Tabla 2.4. Propiedades mecánicas del electrodo ER 70S-6.

Término evaluado	Resistencia a la fluencia		Resistencia a la tracción		Porcentaje de elongación
	[MPa]	[ksi]	[MPa]	[ksi]	[%]
AWS-Requerimientos	400	58	480	70	22
Resultados del fabricante	415	60	530	77	31

(Fuente: INDURA, 2012)

2.3.2. Extensión libre del electrodo (Stick Out)

Es la distancia medida desde el borde del tubo de contacto hasta la punta del alambre electrodo. Un aumento en la extensión del electrodo provoca un incremento en la resistencia eléctrica, lo que produce que se eleve la temperatura del electrodo generando que la tasa de fusión aumente. [42] Para el proceso GMAW por el modo de transferencia por corto circuito se mantiene una extensión del electrodo entre 6 a 13 mm. [35] En la Figura 2.6 se muestra la extensión del alambre electrodo y otras distancias considerables para el proceso GMAW.

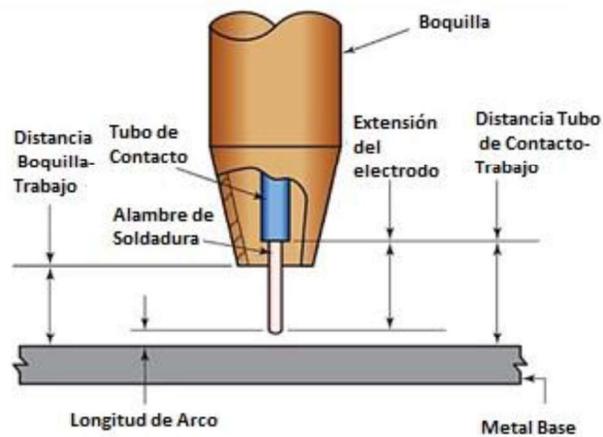


Figura 2.6. Extensión del alambre electrodo en el proceso GMAW.
(Fuente: Althouse, 2013)

2.3.3. Polaridad

La polaridad es un término que especifica la conexión eléctrica realizada desde la fuente de poder de corriente directa (DC) por medio de sus terminales a la pistola de soldadura y el material a soldarse. En el proceso GMAW y en el presente estudio, se utiliza la polaridad inversa o también conocida como corriente continua de electrodo positivo (CCEP) que relaciona la pistola con el ánodo o polo positivo y el material de trabajo con el cátodo o polo negativo consiguiendo: un arco estable, deposición uniforme de metal de aporte, salpicaduras disminuidas y una profundidad de penetración incrementada. En la Figura 2.7 se muestra el esquema de la polaridad inversa del proceso.

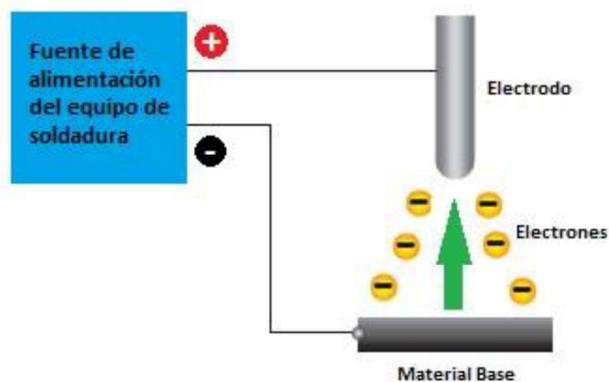


Figura 2.7. Esquema de la polaridad inversa del proceso GMAW.
(Fuente: Praxair, 2015)

2.3.4. Corriente de Soldadura y Velocidad de Alimentación

La velocidad de alimentación del electrodo y la corriente de soldadura están relacionadas directamente entre sí. Al existir un incremento o disminución en la velocidad de alimentación, también existe un aumento o reducción en la corriente. La deposición de metal de aporte, la penetración y el ancho de la soldadura se ven incrementados cuando la intensidad de corriente y la velocidad de alimentación aumentan, mientras que cuando disminuyen estas dos variables ocurre todo lo contrario.

En el presente estudio, los valores de la velocidad de alimentación se registraron en forma directa desde la perilla reguladora del equipo de soldar y con la ayuda de un multímetro digital con pinza amperimétrica se obtuvieron los amperajes utilizados.

2.3.5. Voltaje de soldadura y longitud del arco

La longitud de arco es la distancia desde la punta del electrodo al metal base y está relacionada en forma directa con el voltaje de soldadura. Entre estas dos variables, la más sencilla de controlar es el voltaje por medio de la fuente de potencia.

Con voltajes incrementados se consigue una zona de fusión mayor, menores penetraciones y sobremontas más planas, mientras que con voltajes reducidos se tiene penetraciones superiores, altas sobremontas y cordones de soldadura angostos.

Para conseguir un voltaje óptimo en el proceso de soldadura GMAW se debe tomar en cuenta diversos factores como:

- Espesor del material base.
- Diámetro del alambre electrodo.
- Gas de protección.
- Tipo de junta.
- Posición de soldadura.

En el presente proyecto se hizo variar el voltaje desde la perilla reguladora del equipo de soldadura y con la ayuda de un multímetro digital se obtuvieron los valores utilizados de una manera más precisa.

2.3.6. Gases de Protección

Los gases de protección crean un escudo protector alrededor del metal fundido para evitar que entre en contacto con elementos contaminantes como: oxígeno, nitrógeno e hidrógeno, los mismos que causan la formación de óxidos, nitruros y agrietamientos. Los gases de

protección como el Dióxido de carbono (CO_2) y mezclas de este gas con Argón ($\text{Ar} + 20\% \text{CO}_2$) fueron empleados para el proceso de soldadura durante el presente estudio.

Con el uso del dióxido de carbono (gas reactivo) se obtiene buenos cordones de soldadura con excelente penetración y un ancho de la zona de fusión mayor. Con mezclas de gases ($\text{Ar} + 20\% \text{CO}_2$) se consigue estabilidad en el arco, una penetración adecuada y menos salpicaduras que las que se produce con el CO_2 . Estos dos gases son utilizados en el proceso de soldadura GMAW de aceros al carbono y de baja aleación. [42] En la Figura 2.8 se observa el contorno y penetración del cordón de soldadura con diferentes tipos de gases.

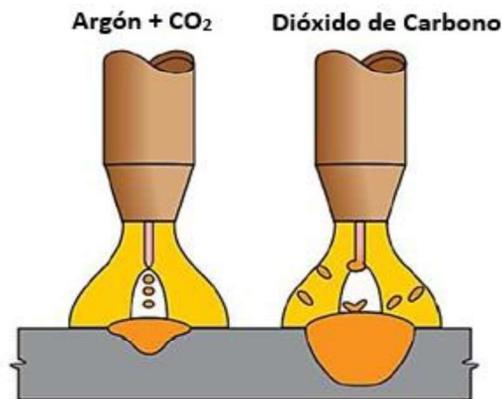


Figura 2.8. Contorno y penetración del cordón de soldadura con diferentes gases de protección.

(Fuente: Althouse, 2013)

2.3.7. Velocidad de avance

La velocidad de avance es la razón de la distancia recorrida del material a soldar desde el comienzo hasta el final de la generación del arco de soldadura por el tiempo empleado. A velocidades reducidas, el metal de aporte se deposita en mayor cantidad y la penetración disminuye, porque el arco incide sobre el baño de soldadura. A velocidades altas, el metal de aportación se deposita en menor cantidad produciendo socavamientos en el cordón de soldadura, debido a que el arco actúa sobre el material base.

Este parámetro es cambiante en cada una de las juntas soldadas debido al factor humano y las diferentes variables que se regularon.

2.4. Discontinuidades típicas en el proceso de soldadura GMAW

Existen discontinuidades típicas que ocurren durante el proceso GMAW debido a distintas causas y que se deben prevenir por medio de acciones correctivas para conseguir soldaduras de calidad. En la Tabla 2.5 se detalla las discontinuidades, causas posibles y acciones que se puedan tomar para corregirlas.

Tabla 2.5. Discontinuidades típicas del proceso de soldadura GMAW.

Discontinuidades	Causas Posibles	Acciones Correctivas
Socavamiento	Elevada corriente.	Disminuir la velocidad de alimentación del electrodo.
	Velocidad de soldadura demasiado alta.	Disminución de la velocidad de soldadura.
	Manipulación indebida de la pistola.	Modificar el ángulo para completar el socavado.
	Longitud de arco demasiado larga.	Reducir la longitud de arco.
Porosidad	Metal base contaminado.	Limpiar mecánica o químicamente el material base.
	Metal de aporte (electrodo) contaminado.	Limpiar el electrodo cuando entre en el mecanismo de alimentación.
	Voltaje demasiado alto.	Disminuir el voltaje de soldadura.
	Gas de protección inadecuado.	Utilizar gases que cumplan con la soldadura
	Deficiente escudo protector creado por el gas.	Incrementar el flujo de gas para apartar el aire del arco de soldadura. Revisar pistola y cable en busca de fugas de gas. Disminuir la velocidad de soldadura y distancia de la boquilla al material base. Evitar corrientes de aire durante el proceso de soldadura.
Fusión Incompleta	Material base contaminado con películas, grasas o óxidos.	Limpiar mecánica o químicamente el material base.
	Diseño defectuoso en las juntas.	Comprobar la abertura de raíz, dimensiones de la cara de raíz y ángulo de ranura.
	Longitud de arco demasiado larga.	Reducir la longitud de arco.
	Alta velocidad de avance.	Disminuir la velocidad de avance.
	Deficiente entrada de calor.	Incrementar el voltaje y la velocidad de alimentación del metal de aporte.

Penetración Incompleta	Preparación defectuosa de las juntas.	Comprobar la abertura de raíz y ángulo de ranura.
	Velocidad de avance demasiado rápida.	Reducir la velocidad de avance.
	Corriente de soldadura demasiado baja.	Incrementar la velocidad de alimentación del electrodo.
	Voltajes demasiado elevados.	Disminuir el voltaje de soldadura.
	Inapropiado ángulo de soldadura.	Corregir fallas, cambiar el ángulo de soldadura para obtener una mayor penetración.
Grietas en las soldaduras	Diseño defectuoso en las juntas.	Comprobar la preparación de los bordes y aberturas de las raíces.
	Electrodo inapropiado.	Comprobar la compatibilidad del electrodo con el metal base.
	Velocidad de avance demasiado rápida.	Disminuir la velocidad de avance.
	Distorsión y encogimiento debido a excesivo calor de entrada.	Disminuir el voltaje y la velocidad de alimentación del electrodo (corriente).
	Rigidez de las juntas soldadas.	Rediseño de las juntas. Utilizar precalentamiento y post calentamiento para disminuir esfuerzos residuales.

(Fuente: O'Brien R., 2002) (Fuente: Althouse, 2013)

2.5. Código de soldadura estructural para aceros AWS D1.1

El código de soldadura de la AWS D1.1: 2015 es empleado para la fabricación y montaje de estructuras soldadas de acero con resistencias a la fluencia igual o menores de 690 MPa y un espesor igual o superior a 3 mm. [12]

En el actual estudio se utiliza la Sección 4 del código de la AWS D1.1 que tiene referencia con la calificación de las Especificaciones del Procedimiento de Soldadura (WPS) por medio de diversos ensayos.

2.5.1. Requisitos y ensayos para la calificación de WPS

Las dimensiones de la placa soldada y disposición de las probetas a cada ensayo a realizarse se muestran en la Figura 2.9. Los tipos de ensayos imprescindibles tomados en cuenta en el estudio y para una adecuada calificación de WPS son los siguientes:

- Inspección Visual.
- Ensayos No Destructivos (radiografía).
- Doblado de cara y raíz.
- Tracción de sección reducida.

Como parte complementaria del presente estudio, se realizó el ensayo de metalografía, macrografía y dureza superficial en las zonas de la junta soldada como metal base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y metal de aporte (MA).

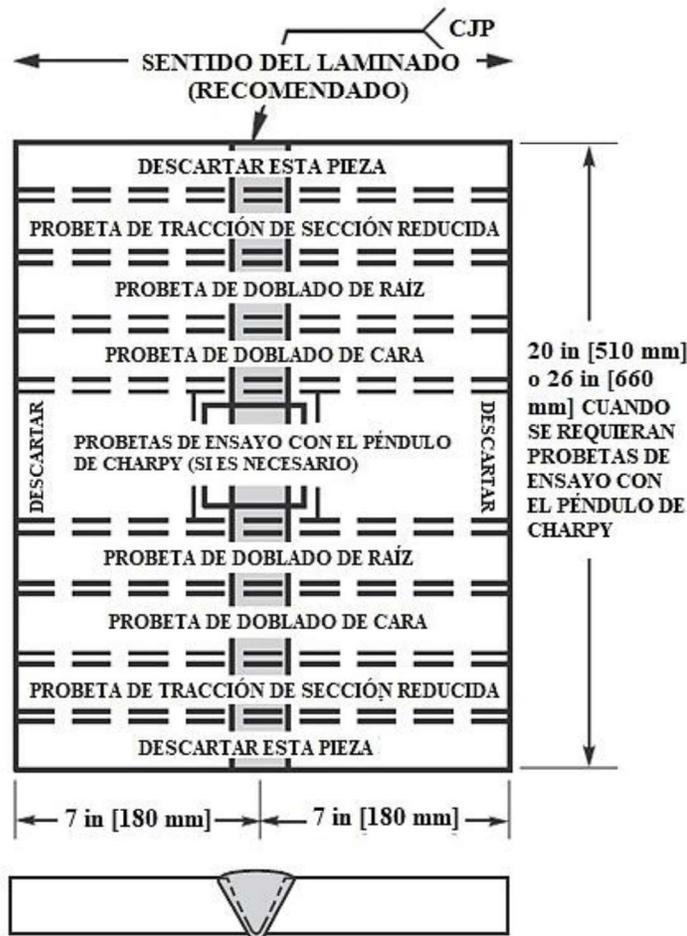


Figura 2.9. Medidas de la placa soldada y disposición de las probetas a cada ensayo.

(Fuente: AWS, 2015)

La cantidad de probetas en función del espesor del metal base para calificar un WPS según el código de la AWS D1.1: 2015 en los ensayos mecánicos como tracción de sección reducida, doblado de cara y raíz se detallan en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Cantidad y tipo de probetas en función del espesor de la placa.

Espesor de la Placa [mm]	Tipo de ensayo mecánico y cantidad de probetas		
	Tracción de sección reducida	Doblado de raíz	Doblado de cara
3	2	2	2

(Fuente: AWS, 2015)

2.6. Procedimiento de Soldadura

Las placas de acero ASTM A572 Grado 50 se cortaron en el sentido de la laminación de la plancha original por medio de una cizalla hidráulica con las dimensiones especificadas en la Figura 2.9 (Sección 2.5.1). Las dimensiones de cada placa fueron de 510 x 180 x 3 mm.

Para la soldadura de las placas se usó juntas a tope sin preparación de bisel debido al reducido espesor del metal base. La posición para todas las juntas fue 3G con un solo pase haciendo de variar la progresión de soldeo de forma ascendente y descendente. Se cambió la abertura de raíz para los valores de 0,0; 2,0 y 3,0 mm. Para garantizar que el ancho de raíz se constante se colocó puentes en las placas y se soldó los extremos.

El equipo empleado de soldadura por arco tiene una fuente de poder de voltaje constante DC y con alimentación de alambre, cuyas especificaciones se detallan en la Tabla 2.7. Para cada una de las juntas se calibró el voltaje y la velocidad de alimentación del electrodo en la soldadora. La pistola se operó en forma manual por el soldador durante el trayecto de la longitud correspondiente del cordón, esto se muestra en la Figura 2.10.

Tabla 2.7. Especificaciones técnicas del equipo de soldadura.

Especificaciones Técnicas		Imagen
Marca:	Lincoln Electric	
Modelo:	WIRE MATIC 255	
Tipo:	Soldadora por arco	
Características Eléctricas		
Entrada:	Monofásica	
Voltaje de entrada:	220 [V]	
Amperaje de entrada:	50 [A]	
Frecuencia	60 [Hz]	
Rango del voltaje de soldadura:	12 – 28 [V]	
Rango de velocidad de alimentación		
Velocidad de alambre:	50 – 600 IPM	

(Fuente: Company, 1995)



Figura 2.10. Soldadura de las probetas en la posición 3G.
(Fuente: Propia, 2019)

Cada una de las juntas soldadas se identificó con una denominación correspondiente tomando en cuenta la progresión de soldadura, la abertura de raíz y la utilización del tipo de gas de protección como se muestra en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Identificación de las juntas soldadas.

Junta Soldada	Progresión	Abertura de Raíz	Gas de Protección
1A3	Ascendente	3 mm	CO ₂
2D3	Descendente	3 mm	CO ₂
3D2	Descendente	2 mm	CO ₂
4DTC	Descendente	0 mm	CO ₂
5A2	Ascendente	2 mm	CO ₂
6M3	Descendente	3 mm	Ar+ 20%CO ₂
7MA3	Ascendente	3 mm	Ar+ 20%CO ₂

(Fuente: Propia, 2019)

En el ANEXO IV se detallan las Especificaciones del Procedimiento de Soldadura (WPS) elaborados que contienen cada uno de los parámetros principales que se variaron en cada junta soldada.

2.7. Ensayos No Destructivos (END)

En el Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Escuela Politécnica Nacional se evaluaron cada una de las juntas soldadas por los métodos de Inspección Visual, Tintas Penetrantes y Radiografía tomando en cuenta los criterios de aceptación presentados en la AWS D1.1: Código de soldadura estructural de aceros. [12]

2.7.1. Inspección Visual

Este método inicial y esencial permite evaluar la existencia de discontinuidades superficiales en las soldaduras por medio de la observación visual antes de realizar cualquier otro ensayo posterior.

2.7.1.1. Criterios de aceptación

Los requerimientos que se deben cumplir según el código de la AWS D1.1: 2015 en las soldaduras de ranura se detallan en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9. Criterios de aceptación en el ensayo de Inspección Visual por la AWS D1.1.

No	Criterios
1	Las grietas de cualquier tamaño son inaceptables.
2	Todas las mordeduras presentes en la soldadura se deben completar hasta su sección transversal.
3	Debe haber una fusión completa entre el metal base y el metal de aporte. El refuerzo no debe superar los 3 mm.
4	El máximo valor de socavación debe ser de 1 mm.
5	No se acepta grietas, penetración inadecuada o fusión incompleta en la raíz de soldaduras de ranura con penetración completa de la junta (CJP).
6	La perforación por fusión o concavidad de raíz de un lado sin respaldo en soldaduras de ranura con penetración completa de la junta (CJP) deben ajustarse a lo siguiente: <ul style="list-style-type: none">• Si el espesor total de la soldadura es igual o mayor al metal base, la concavidad de raíz no debe superar los 2 mm.• La perforación por fusión no debe exceder los 3 mm.

(Fuente: AWS, 2015)

2.7.1.2. Procedimiento del Ensayo

La Inspección visual se realizó en las superficies de la cara y raíz del cordón de soldadura de las 7 juntas soldadas tomando en cuenta los criterios citados en la Sección 2.7.1.1. Para medir la sobremonta de cara y raíz de la soldadura se utilizó como instrumento adicional una galga Bridge Cam como se muestra en las Figuras 2.11 y 2.12.



Figura 2.11. Galga Bridge Cam.
(Fuente: Propia, 2019)



Figura 2.12. Medición de la cara y raíz de las juntas soldadas.
(Fuente: Propia, 2019)

2.7.2. Líquidos Penetrantes

Es un método utilizado para detectar y localizar discontinuidades superficiales en materiales de ingeniería con mínima rugosidad y no porosos por la acción físico – química de un penetrante líquido y un revelador. En el presente estudio se utilizó este ensayo como un complemento de la Inspección Visual.

2.7.2.1. Criterios de aceptación

Los criterios de aceptación de líquidos penetrantes serán los mismos que se detallan en la Sección 2.7.1.1 pertenecientes a la Inspección Visual.

2.7.2.2. Procedimiento del Ensayo

El procedimiento del Ensayo de Líquidos Penetrantes se basó en la norma “ASTM E165: Práctica estándar para la examinación de líquidos penetrantes para la industria en general”, por medio del Tipo II - método A que corresponde a penetrantes visibles, que se detallan en la Tabla 2.10. Se utilizó líquidos procedentes del mismo fabricante Met-L-Chek, los mismos que se muestran en la Figura 2.13.

Tabla 2.10. Clasificación de los tipos de tintas penetrantes y métodos según la ASTM E165.

Tipo I – Examinación por penetrante fluorescente		
Método	A	Lavable con agua.
	B	Post- emulsificables, lipofílicos.
	C	Removibles con solventes.
	D	Post- emulsificables, hidrofílicos.
Tipo II – Examinación por penetrante visible		
Método	A	Lavable con agua.
	C	Removibles con solventes.

(Fuente: ASTM E165, 2012)



Figura 2.13. Líquidos empleados en el ensayo: Limpiador o removedor (E-59A), penetrante visible (VP-30) y revelador (D-70).

(Fuente: Propia, 2019)

El proceso del ensayo consta de 6 pasos básicos:

1. Se realiza una limpieza previa de las superficies de las juntas soldadas con líquido limpiador (Met-L-Chek E-59A) para retirar cualquier polvo, aceite, óxido o contaminante presente que impida la acción del tinte penetrante. Se deja secar por un tiempo de 10 minutos.
2. Se aplica el líquido penetrante (Met-L-Chek VP-30) a una distancia aproximada de 15 cm de la superficie del cordón de soldadura de una manera uniforme y que cubra completamente. El tiempo de permanencia del penetrante fue de 12 minutos después de su aplicación.

3. Se procede a remover el exceso de tinte penetrante con una tela de algodón humedecida con agua, haciendo que quede la cantidad aceptable.
4. A una distancia de 15 cm de la superficie, se aplica el líquido revelador (Met-L-Chek D-70) de una manera uniforme y que cubra completamente. El tiempo de espera para que el revelador actúe es de 5 minutos.
5. Se inicia una inspección visual por cada una de las superficies de las juntas soldadas en busca de indicaciones relevantes. Se procede a interpretar y evaluar bajo los criterios de aceptación dados en el Código de la AWS D1.1.
6. Se realiza una limpieza posterior a la inspección empleando una tela de algodón humedecida con agua para retirar el revelador y la tinta penetrante por completo.

Los pasos anteriormente mencionados se realizaron para las superficies de la cara y raíz de cada una de las 7 juntas soldadas.

2.7.3. Radiografía

Es un método de inspección volumétrica que permite verificar en los materiales su condición interna en todo su espesor. Se utiliza radiación electromagnética penetrante de onda corta generada por un equipo de rayos X o una fuente radioactiva. En una película sensible a la radiación queda registrada las indicaciones relevantes.

2.7.3.1. Criterios de aceptación

Las tomas radiográficas serán evaluadas por los criterios de aceptación de discontinuidades para conexiones no tubulares cargadas estáticamente presentes en el código de la AWS D1.1:2015, y serán inaceptables si superan las siguientes limitaciones que se detallan en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11. Criterios de aceptación de discontinuidades.

No	Criterios
1	Las discontinuidades alargadas tendrán como máximo el tamaño calculado en la Figura 2.14.
2	La holgura mínima admisible entre los bordes de las discontinuidades será calculada en la Figura 2.14.
3	Las discontinuidades redondeadas superiores a un tamaño máximo de $E/3$, no deben exceder de 6 mm. La separación mínima de las discontinuidades redondeadas que sean mayores o iguales a 2,5 mm hasta una discontinuidad alargada o redondeada aceptable o hasta un borde deberá ser tres veces mayor que la dimensión de mayor longitud de las discontinuidades más grandes que estén siendo consideradas.
4	Las discontinuidades aisladas tales como un grupo de indicaciones redondeadas, cuando la suma de sus dimensiones mayores supere el tamaño máximo de discontinuidad permitido en la Figura 2.14. La separación mínima hasta otra discontinuidad agrupada, alargada o

	redondeada o hasta un borde deberá ser tres veces mayor que la dimensión de mayor longitud de las discontinuidades que estén siendo consideradas.
5	La suma de las discontinuidades individuales, cada una con una dimensión mayor de 2,5 mm no debe exceder de $2E/3$ o 10 mm, cualquiera que se menor en el tramo lineal de 25 mm de soldadura.
6	Discontinuidades en línea, en las que la suma de las dimensiones más grandes sea mayor que E en cualquier tramo de $6E$ de longitud. Cuando la longitud de la soldadura examinada sea inferior a $6E$, la suma admisible de las dimensiones más grandes debe ser proporcionalmente inferior.

(Fuente: AWS, 2015)

La Figura 2.14 sirve de apoyo para los cálculos de los criterios de aceptación y la Figura 2.15 detalla las dimensiones máximas permitidas de las discontinuidades presentes en radiografía dependiendo del espesor de la placa. Las definiciones de sus leyendas se presentan en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12. Leyendas de la Figura 2.14.

Letra	Significado
E	Tamaño de la soldadura.
B	Máximo tamaño admisible de una discontinuidad radiografiada.
C	Holgura mínima admisible medida a lo largo del eje longitudinal de la soldadura entre los bordes de discontinuidades de cualquier tamaño mayor o igual a 2,5 mm.
T	Espesor de la placa para soldaduras en ranura con penetración completa de la junta (CJP).

(Fuente: AWS, 2015)

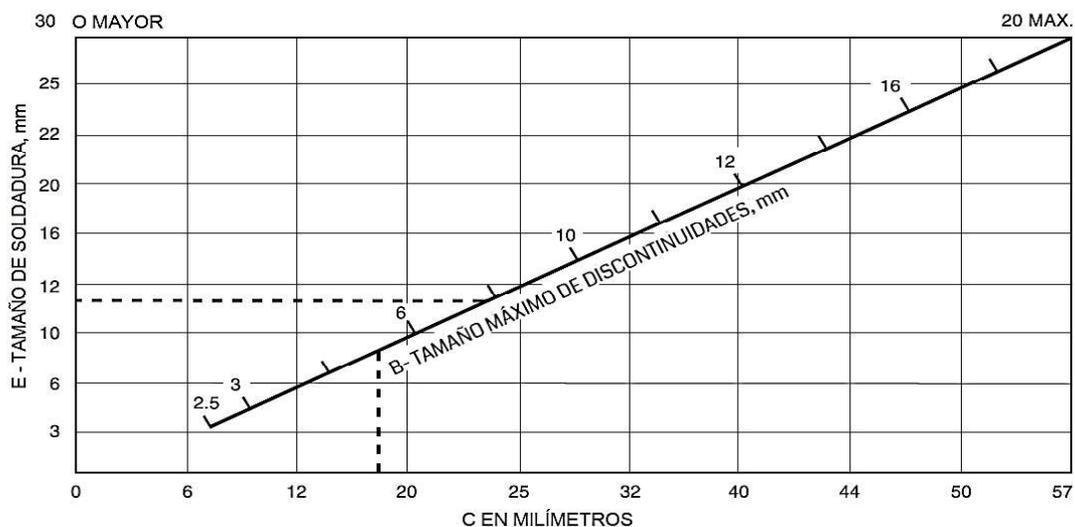


Figura 2.14. Criterios de aceptación de discontinuidades para conexiones no tubulares cargadas estáticamente.

(Fuente: AWS, 2015)

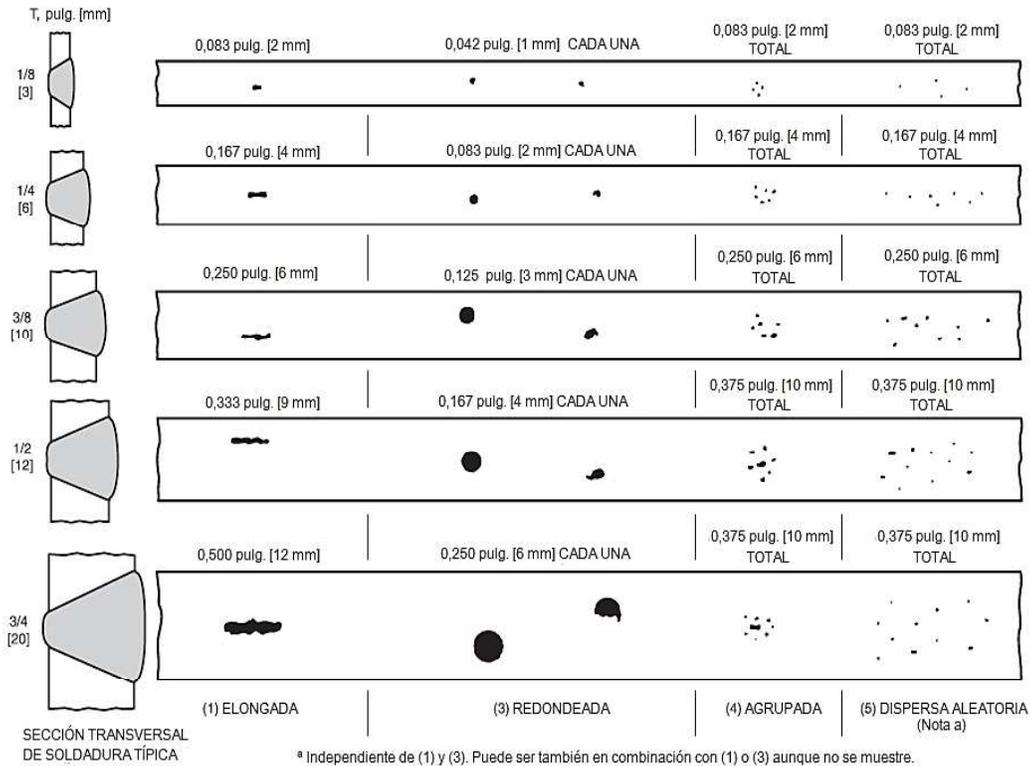


Figura 2.15. Discontinuidades presentes en las radiografías dependiendo del espesor de la placa.
(Fuente: AWS, 2015)

2.7.3.2. Procedimiento del Ensayo.

Para el presente ensayo se utilizó un equipo de Rayos X perteneciente al Laboratorio de END y sus especificaciones se detallan en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13. Especificaciones del tubo de rayos catódicos y consola de mando (Equipo de Rayos X).

Características del tubo de rayos catódicos		Imagen de la Consola
Marca:	Baltographe 200	
Potencia:	600 W	
Voltaje máximo:	200 Kv	
Amperaje máximo:	10 mA	
Peso:	13 Kg	
Flujo de enfriamiento:	0,57 lt/min	
Consola de mando		
Marca:	Balteau	

(Fuente: Laboratorio END, 2019)

Las condiciones de trabajo para la utilización del equipo de Rayos X fueron previamente establecidas antes de realizar cada una de las tomas radiográficas a las juntas soldadas. Estos parámetros son kilo voltaje [kV], mili amperaje [mA], tiempo de exposición y se detallan en la Tabla 2.14. Se realizó 2 tomas radiográficas para cubrir completamente la longitud de cada junta soldada.

Tabla 2.14. Parámetros utilizados para las tomas radiográficas.

Técnica de Exposición:		Simple Pared – Simple Imagen
[kV]		140
[mA]		5
Película radiográfica		Marca: Structurix
		Tipo: II-D7
Indicadores de Calidad de Imagen (ICI)		1A ASTM 6
Distancia de la fuente		53 cm
Junta Soldada	Nombre de las tomas radiográficas (END)	Tiempo de Exposición
1A3	1-A	1 min 54 s
	2-B	1 min 54 s
2D3	3-A	1 min 50 s
	4-B	1 min 50 s
3D2	5-A	1 min 58 s
	6-B	1 min 58 s
4DTC	7-A	1 min 52 s
	8-B	1 min 52 s
5A3	9-A	1 min 48 s
	10-B	1 min 48 s
6M3	11-A	1 min 50 s
	12-B	1 min 50 s
7MA3	13-A	1 min 54 s
	14-B	1 min 54 s

(Fuente: Laboratorio de END, 2019)

Con los parámetros elegidos, se procede a preparar cada probeta en la raíz del cordón de soldadura con los indicadores de calidad de imagen (ICI), el nombre correspondiente asignado por el Laboratorio de END y la película, como se muestra en la Figura 2.16.



Figura 2.16. Probeta preparada con los ICI y película radiográfica.
(Fuente: Propia, 2019)

Después de haber obtenido todas las tomas, se realiza el procesamiento de la película de imagen latente a visible por diferentes líquidos, el mismo que se detalla en la Tabla 2.15. Con los criterios de aceptación de la Sección 2.7.3.1, se procede a evaluar cada una de las tomas radiográficas.

Tabla 2.15. Procesamiento de la película radiográfica.

No	Proceso	Tiempo	Líquido
1	Revelado	5 min	Solución Alcalina (PH10)
2	Baño de Parada:	2 min	Agua
3	Fijador	10 min	Solución Ácida (PH4)
4	Baño de Parada:	5 min	Agua
5	Secado	30 min	---

(Fuente: Laboratorio de END, 2019)

2.8. Ensayos Destructivos

Son métodos que permiten detectar los defectos más apreciables y analizar el comportamiento de las propiedades mecánicas de juntas soldadas mediante el doblado o la destrucción del cordón de soldadura. Los ensayos más representativos son: Ensayo de tracción de sección reducida, doblado de cara y raíz.

2.8.1. Extracción de probetas

Las probetas para los respectivos ensayos se extrajeron por medio de una amoladora con disco de corte para metales (Figura 2.17), en el orden que se detallan en la Sección 2.5.1 y como se muestra en la Figura 2.9. Luego de haber obtenido las probetas cortadas, se

procede a retirar el material de la cara y raíz de la soldadura con la amoladora y un disco de desbaste hasta dejarlo en un espesor cercano al material base. Se identificó cada una de las probetas según el ensayo a realizarse como se presenta en la Tabla 2.16.



Figura 2.17. Corte de las probetas para ensayos mecánicos.
(Fuente: Propia, 2019)

Tabla 2.16. Identificación de las probetas para los ensayos mecánicos.

Junta Soldada	Doblado de Cara	Doblado de Raíz	Ensayo de Tracción
1A3	DC1-1A3	DR1-1A3	T1-1A
	DC2-1A3	DR2-1A3	T2-1A
2D3	DC1-2D3	DR1-2D3	T1-2D
	DC2-2D3	DR2-2D3	T2-2D
3D2	DC1-3D2	DR1-3D2	T1-3D
	DC2-3D2	DR2-3D2	T2-3D
4DTC	DC1-4DTC	DR1-4DTC	T1-4DTC
	DC2-4DTC	DR2-4DTC	T2-4DTC
5A2	DC1-5A2	DR1-5A2	T1-5A
	DC2-5A2	DR2-5A2	T2-5A
6M3	DC1-6M3	DR1-6M3	T1-6M
	DC2-6M3	DR2-6M3	T2-6M
7MA3	DC1-7MA3	DR1-7MA3	T1-7MA
	DC2-7MA3	DR2-7MA3	T2-7MA

(Fuente: Propia, 2019)

2.8.2. Doblado de Cara y Raíz

Es un método que permite determinar las propiedades de ductilidad y rigidez en juntas soldadas mediante la aplicación de una carga sobre el centro de la cara o raíz de la soldadura teniendo los extremos de la probeta apoyados.

En las Figuras 2.18 y 2.19 se muestra las dimensiones y geometría de las probetas para el doblado de cara y raíz según el código de la AWS D1.1.

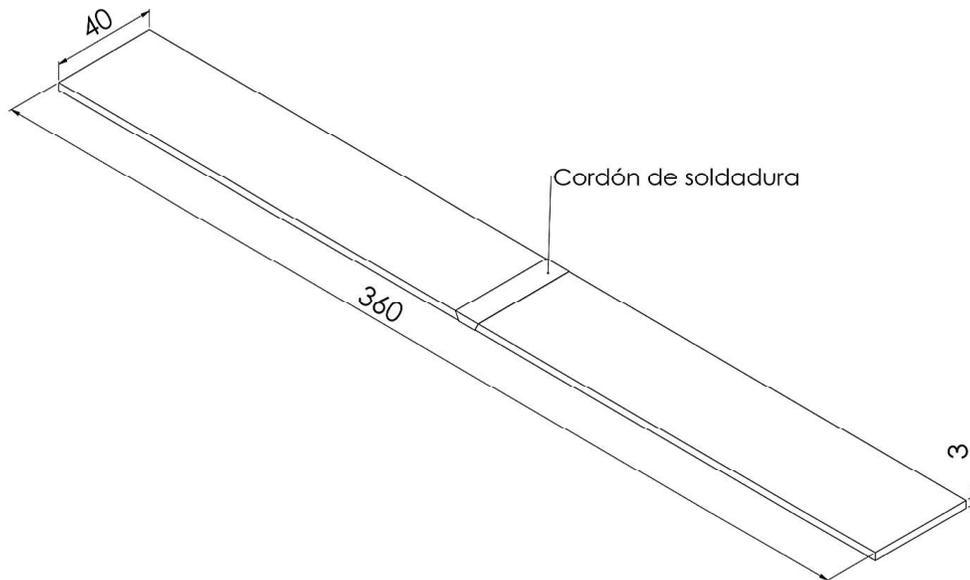


Figura 2.18. Dimensiones en mm de las probetas de doblado de cara y raíz según la AWS D1.1.
(Fuente: Propia, 2019)



Figura 2.19. Probetas para el doblado de cara y raíz.
(Fuente: Propia, 2019)

2.8.2.1. Criterios de aceptación

Las probetas ensayadas serán examinadas en la superficie convexa y evaluadas por medio de los criterios presentes en el código de la AWS D1.1: 2015. Serán aceptables si no superan las dimensiones de las discontinuidades que se detallan en la Tabla 2.17.

Tabla 2.17. Criterios de aceptación para los ensayos de doblado.

No	Criterios
1	El tamaño máximo de discontinuidad superficial será de 3 mm en cualquier dirección.
2	La suma de todas las discontinuidades que se encuentren en el rango de 1 mm a 3 mm no deberá exceder los 10 mm.
3	La grieta de esquina tendrá una dimensión máxima de 6 mm, excepto cuando se derive de una discontinuidad de fusión o una evidente inclusión de escoria donde tendrá un valor de 3 mm.
4	La probeta será descartada y reemplazada por una nueva, si la grieta de esquina supera los 6 mm sin surgir de una discontinuidad de fusión o inclusiones de escoria.

(Fuente: AWS, 2015)

2.8.2.2. Procedimiento del ensayo de doblado

Este ensayo se realizó por medio del equipo que se encuentre en el Laboratorio de Soldadura y sus especificaciones se detallan en la Tabla 2.18.

Tabla 2.18. Especificaciones del equipo para el ensayo de doblado guiado.

Especificaciones		Imagen
Equipo:	Máquina de doblado guiado	
Marca:	S/N	
Modelo:	S/N	
Potencia del motor:	2 HP	
Voltaje:	220 [V]	
Frecuencia:	60 [Hz]	
Velocidad:	Variable	
Aplicación de carga:	Sistema hidráulico	

(Fuente: Propia, 2019)

Las superficies preparadas de las muestras se colocarán sobre los apoyos dependiendo del tipo de doblado a realizarse. La cara debe estar ubicada hacia la abertura de la plantilla guía para probetas de doblado de cara. La raíz debe estar dirigida hacia la hendidura de la plantilla guía cuando son probetas de doblado de raíz.

Se desplazará el émbolo del equipo de doblado sobre la probeta para producir una sollicitación de flexión y provocar una deformación en forma de U, como se presenta en la Figura 2.20.



Figura 2.20. Deformación provocada por flexión en las probetas de doblado.
(Fuente: Propia, 2019)

Se retira la aplicación de la carga y se devolverá el émbolo a su posición inicial. Las probetas ensayadas serán retiradas del equipo, inspeccionadas y evaluadas por medio de los criterios presentes en la Sección 2.8.2.1.

2.8.3. Ensayo de tracción

Es un ensayo estático que por medio de una sollicitación creciente en dirección axial permite en las juntas soldadas determinar la resistencia a la tracción. Se utilizó la máquina universal que se encuentre en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV) y sus especificaciones fueron detalladas en la Tabla 2.2 de la Sección 2.1.2.2.

2.8.3.1. Criterios de aceptación

Las probetas ensayadas de cada junta soldada serán evaluadas bajo el siguiente criterio de aceptación de la AWS D1.1: 2015 que se presenta en la Tabla 2.19.

Tabla 2.19. Criterio de aceptación para ensayo de tracción.

No	Criterio
1	La resistencia a la tracción obtenida en las juntas soldadas no debe ser menor al mínimo valor especificado de tracción del metal base.

(Fuente: AWS, 2015)

2.8.3.2. Preparación de la muestra

Después de ser retirado el material de la cara y raíz de las 14 probetas obtenidas de las juntas soldadas como se presenta en la Figura 2.21. Se procede a maquinar la sección reducida de cada una de ellas en el Laboratorio de Máquinas Herramientas siguiendo la geometría y dimensiones mostradas en la Figura 2.22 y Figura 2.23.



Figura 2.21. Probetas de tracción antes del maquinado.
(Fuente: Propia, 2019)

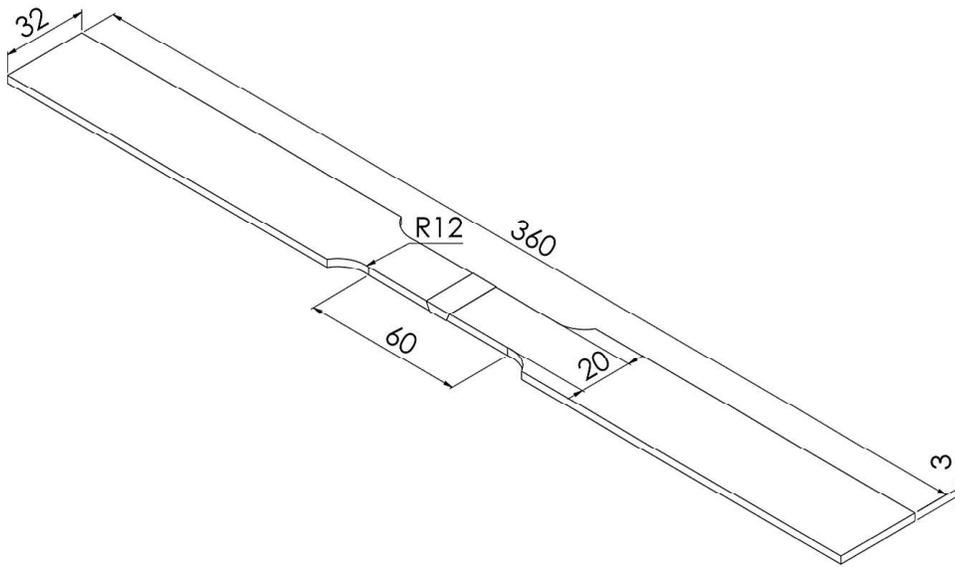


Figura 2.22. Dimensiones en mm de las probetas de tracción según la AWS D1.1.
(Fuente: Propia, 2019)



Figura 2.23. Probetas de tracción de sección reducida maquinadas.
(Fuente: Propia, 2019)

2.8.3.3. Procedimiento del Ensayo

El procedimiento del ensayo de tracción de las probetas de las juntas soldadas fue el mismo que se utilizó en la Sección 2.1.2.2 para el material base. Tomando en cuenta que se atacó con Nital al 10% la superficie de la cara y raíz para una mejor observación de estas durante el ensayo.

2.9. Micrografía

La micrografía o también conocida como metalografía microscópica tiene como objetivo revelar los constituyentes y estructura de un producto metalúrgico. Para que los detalles encontrados sean óptimos, la selección y preparación de la muestra debe tener una superficie desbastada, pulida y atacada químicamente. Para la preparación de probetas metalográficas se toma de referencia la norma ASTM E3-17.

2.9.1. Preparación de la muestra

Las muestras para realizarse el ensayo son obtenidas de la sección transversal tomadas perpendicularmente al eje principal de la junta soldada, esto para revelar las variaciones microestructurales. Cada muestra fue obtenida por medio de una máquina de corte en frío que utiliza un disco de 14 pulgadas para realizar dicha función, como se describe sus especificaciones técnicas en la Tabla 2.20. Una vez obtenidas todas las muestras se colocan en resina poliéster para facilitar su manejo.

Tabla 2.20. Especificaciones técnicas de la máquina de corte en frío.

Especificaciones		Imagen
Marca:	W.J. SAVAGE CO.ING	
Modelo:	SN-10 10T86-199	
Potencia del motor:	10 [HP]	
Voltaje:	220 [V]	
Amperaje:	26 [A]	
Frecuencia:	60 [Hz]	
Enfriamiento del corte:	Por agua	
Disco de corte:	14 pulgadas.	

(Fuente: Propia, 2019)

El desbaste grueso se realiza por medio de una lija de lona para metales (abrasivo de óxido de aluminio) de granulometría número 100 colocada sobre una máquina desbastadora y cuyas especificaciones se detallan en la Tabla 2.21. Luego se procede a realizar un desbaste fino utilizando lijas de agua para metales (abrasivo de carburo de silicio) en el siguiente orden de granulometría: 240, 320, 400, 600 y 1200. Finalmente se realiza el pulido de las muestras con una tela de paño, suspensión de diamante de 1 micra y lubricante a base de agua. En la Tabla 2.22 se presenta las especificaciones técnicas de la pulidora automática utilizada para los procesos de desbaste fino y pulido.

Tabla 2.21. Especificaciones técnicas de la máquina desbastadora.

Especificaciones		Imagen
Marca:	Bueheler	
Modelo:	121-OM-84	
Potencia del motor:	1 HP	
Voltaje:	220 [V]	
Frecuencia:	60 [Hz]	
Lija utilizada:	No 100	

(Fuente: Propia, 2019)

Tabla 2.22. Especificaciones técnicas de la pulidora automática.

Especificaciones		Imagen
Marca:	METKON	
Modelo:	FORCIMAT	
Potencia del motor:	150 [W]	
Voltaje:	220 [V]	
Frecuencia:	50-60 [Hz]	
Sistema de sujeción:	Neumático	
Diámetro de platos:	250 [mm]	

(Fuente: Propia, 2019)

Las muestras terminadas presentan una superficie plana y brillante sin la presencia de rayas visibles que afecten el análisis metalográfico como se muestra en la Figura 2.24.

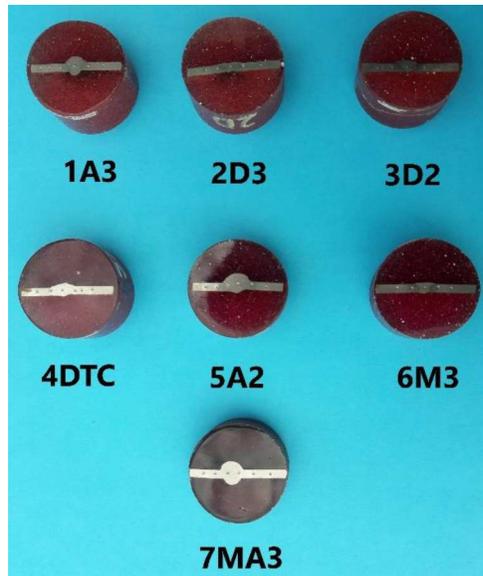


Figura 2.24. Muestras terminadas para el análisis metalográfico.
(Fuente: Propia, 2019)

2.9.2. Procedimiento del ensayo metalográfico

Este ensayo se realizó por medio del equipo que se encuentra en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la FIM - EPN y cuyas especificaciones técnicas se describen en la Tabla 2.23.

Tabla 2.23. Especificaciones del microscopio metalográfico invertido.

Descripción		Imagen
Marca:	OLYMPUS	
Modelo:	GX41F	
Voltaje de alimentación:	110 [V]	
Rango de magnificación:	5X, 10X, 20X, 50X, 100X, 500X	
Sistema de iluminación:	Luz halógena de 30 [W]	
Sistema de Visualización:	Binocular	
Sistema de Enfoque:	Manual	
Software:	STREAM ESSENTIALS	

(Fuente: Propia, 2019)

Para iniciar el ensayo se debe realizar el ataque químico con Nital al 10% (mezcla de 90 [ml] de etanol y 10 [ml] de ácido nítrico). Las muestras fueron sumergidas durante 15 [s] para revelar la constitución microestructural de las mismas.

Seguidamente se debe colocar la muestra debajo del lente del microscopio metalográfico invertido de manera que la superficie pueda ser observada. Luego se elige el objetivo a utilizar para posteriormente tomar la imagen de la zona deseada. Se utilizó los objetivos de 100X y 500X para tomar las imágenes del material base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y material de aporte (MA). Para las 7 muestras se realizó el mismo procedimiento.

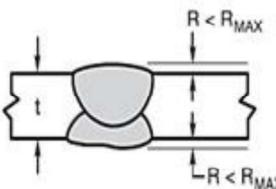
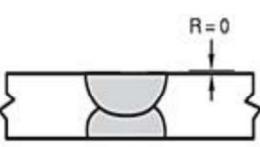
2.10. Macrografía (macroscopía óptica)

Es un método que permite la examinación de materiales y juntas soldadas en busca de discontinuidades o defectos con la ayuda de un microscopio. La superficie debe tener una preparación especial de desbastado, pulido y atacado químico para una observación más satisfactoria de las características macroscópicas.

2.10.1.1. Criterios de aceptación

Las muestras inspeccionadas visualmente serán evaluadas mediante los requisitos que deben cumplir las soldaduras según la AWS D1.1: 2015 y que se detallan en la Tabla 2.24.

Tabla 2.24. Criterios de aceptación para el ensayo de macroataque.

No	Criterios
1	No debe existir grietas.
2	Debe haber una fusión completa entre el metal base y el metal de aporte.
3	El máximo valor de socavación debe ser de 1 mm.
4	El sobremonta no debe superar los 3 mm. <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>DESEABLE</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>ACEPTABLE</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>INACEPTABLE</p>  </div> </div>

(Fuente: Propia, 2019)

2.10.1.2. Procedimiento del ensayo

Este ensayo se realizó por medio del equipo que se encuentra en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la FIM - EPN y cuyas especificaciones técnicas se describen en la Tabla 2.25.

Tabla 2.25. Especificaciones técnicas del estereomicroscopio trinocular.

Descripción		Imagen
Marca:	OLYMPUS	
Modelo:	SZX7	
Voltaje de alimentación:	110 [V]	
Rango de magnificación:	0.4x a 2.8x	
Sistema de iluminación:	Luz halógena de 30 [W]	
Sistema de Visualización:	Binocular	
Sistema de Enfoque:	Manual	
Software:	STREAM ESSENTIALS	

(Fuente: OLYMPUS,2019)

Para el ensayo de macroscopía óptica se utilizaron las mismas muestras de micrografía. Cada muestra se colocó debajo del lente óptico del estereomicroscopio con una regulación de magnificación de 0,63X; 2X y 2,8X. Se procedió a obtener las imágenes correspondientes de las zonas deseadas y los defectos encontrados en cada una de las 7 probetas.

Con las imágenes tomadas de cada una de las muestras se determinó: el área de la ZAC, la forma de variación del cordón, dimensión del cara y raíz de la soldadura utilizando el software AutoCAD 2018.

2.11. Ensayo de dureza superficial

Este tipo de ensayo permite determinar la dureza superficial de materiales metálicos mediante el principio de indentación por el método Rockwell. El procedimiento del ensayo se realiza mediante la norma ASTM E18-19.

2.11.1. Preparación de la muestra

Las probetas utilizadas para el ensayo de dureza son las mismas que se utilizaron para el análisis metalográfico y que se observan en la Figura 2.24.

2.11.2. Procedimiento del ensayo

Este ensayo de dureza se realizó por medio del equipo que se encuentra en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la FIM – EPN, y cuyas especificaciones técnicas se describen en la Tabla 2.26. Se utilizó las 7 mismas probetas de los ensayos de micrografía y macrografía.

Tabla 2.26. Especificaciones técnicas del equipo para el ensayo de dureza.

Descripción		Imagen
Marca:	HARDROKER	
Modelo:	HR-150-A	
Indentador:	Esférico de carburo de tungsteno de diámetro 1/16 pulgadas.	
Carga disponible	60, 100, 150 [kgf]	
Carga menor o precarga:	10 [kgf]	
Sistema de medición:	Indicador analógico	

(Fuente: Propia, 2019)

Para proceder al ensayo se colocó la muestra haciendo contacto con el indentador aplicándose una precarga de 10 [kgf], seguidamente se utiliza una carga de 100 [kgf] para realizarse la indentación. Posteriormente se retira la carga y el valor de dureza de la escala Rockwell B que se muestra en el indicador analógico es anotado. Este procedimiento se realizó en las 7 probetas con 5 indentaciones a cada una.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se detallan los resultados de la caracterización del metal base por medio del análisis de la composición química y ensayo de tracción para conocer sus propiedades mecánicas. Se establecerá los regímenes de soldadura de cada placa soldada con las variables que fueron modificadas en el proceso GMAW. Del planteamiento de la metodología se obtendrá los resultados de los ensayos no destructivos (inspección visual, líquidos penetrantes y radiografía), mecánicos (tracción, doblado de cara y raíz), metalografías, macrografías y dureza superficial de cada junta soldada. Se analizará el procedimiento óptimo para soldar el acero HSLA A572.

3.1. Resultados de la caracterización del material base

3.1.1. Análisis químico del material base por medio de espectrometría de emisión atómica de chispa

Los resultados promedios de las 4 mediciones tomadas en distintos puntos del material base se encuentran en la Tabla 3.1. En el ANEXO II se muestra el reporte completo entregado por el Laboratorio de Fundición.

Tabla 3.1. Resultados de la composición química del metal base.

Muestra de acero HSLA ASTM A-572 Grado 50	
Elemento	Valor [%]
Carbono [C]	0,096
Silicio [Si]	0,013
Manganeso [Mn]	0,646
Fósforo [P]	0,016
Cromo [Cr]	0,022
Níquel [Ni]	0,017
Aluminio [Al]	0,012
Hierro [Fe]	99,16

(Fuente: Propia, 2019)

3.1.2. Ensayo de tracción

Los resultados obtenidos en el ensayo de tracción del metal base se detallan en la Tabla 3.2. En la Figura 3.1 se puede observar todas las probetas ensayadas y en la Figura 3.2 se presenta la zona de fractura tipo “copa-cono” característica de un material dúctil.

Tabla 3.2. Resultados del ensayo de tracción del material base.

Muestra	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Límite de Fluencia		Resistencia a la tracción		% Elongación en 50 mm
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
T1	12,69	3,09	4480	19928	59,9	413,3	73,7	509,1	33,7
T2	12,67	3,09	4061	18064	53,1	365,9	66,9	462,3	35,5
T3	12,74	3,10	4159	18502	54,2	373,9	67,9	469,4	33,5
T4	12,84	3,08	4365	19461	57,5	396,7	71,2	491,9	36,0
T5	12,81	3,09	4155	18484	53,9	371,9	67,7	467,9	34,3
T6	12,69	3,09	4183	18607	55,1	379,7	68,8	475,5	36,4
Promedio	12,74	3,09	4233,8	18833,5	55,6	383,6	69,4	479,4	34,9

(Fuente: Propia, 2019)



Figura 3.1. Probetas ensayadas de metal base.

(Fuente: Propia, 2019)



Figura 3.2. Zona de fractura tipo copa-cono.

(Fuente: Propia, 2019)

3.2. Parámetros del proceso de soldadura GMAW

Las variables modificadas durante el proceso de soldadura de cada junta se especifican en la Tabla 3.3. Estos resultados se obtuvieron de los WPS realizados y detallados en el ANEXO IV.

Tabla 3.3. Variables modificadas del proceso GMAW para las juntas soldadas.

Junta Soldada	Abertura de raíz	Progresión	Voltaje	Amperaje	Velocidad del alambre	Velocidad de avance	Gas de Protección
	[mm]		[V]	[A]	[pulg/min]	[mm/min]	
1A3	3	Ascendente	15,5	90	100	55,02	CO ₂
2D3	3	Descendente	19	110	120	177,08	CO ₂
3D2	2	Descendente	15	139	190	224,67	CO ₂
4DTC	0	Descendente	15	140	190	150	CO ₂
5A2	2	Ascendente	14,6	100	100	47,57	CO ₂
6M3	3	Descendente	15,3	124	140	171,14	Ar + 20%CO ₂
7MA3	3	Ascendente	14	98	125	49,76	Ar + 20%CO ₂

(Fuente: Propia, 2019)

3.2.1. Calor entregado

Se puede calcular el calor entregado (Q_e) en el proceso de soldadura GMAW por medio de la Ecuación 1.4. En la Tabla 3.4 se presenta los resultados para cada junta soldada.

$$Q_e = \frac{0,06 \times I \times V}{V_a} \left[\frac{kJ}{mm} \right]$$

Ecuación 1.4.

Q_e = Energía suministrada por unidad de longitud soldada. [kJ/mm]

I= Intensidad de corriente [A]

V= Voltaje del arco [V]

V_a =Velocidad de avance [mm/min]

Factor= 0,06 [s x kJ / min x J]

Tabla 3.4. Calor entregado en el proceso de soldadura GMAW.

Junta Soldada	Calor entregado [kJ/mm]
1A3	1,52
2D3	0,71
3D2	0,56
4DTC	0,84
5A2	1,84
6M3	0,67
7MA3	1,65

(Fuente: Propia, 2019)

3.3. Resultados de los Ensayos No Destructivos

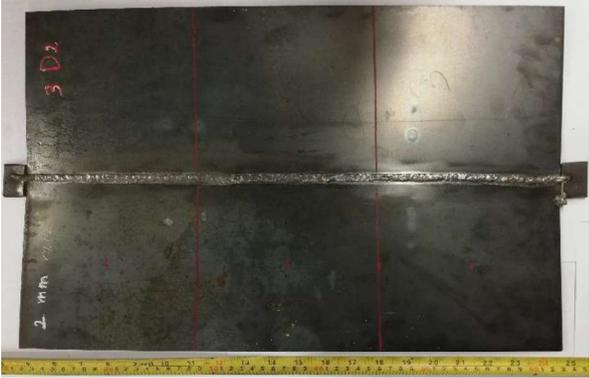
En las secciones siguientes se presentan los resultados obtenidos de las 7 juntas soldadas del acero A572 por medio de ensayos no destructivos como: inspección visual, tintas penetrantes y radiografía.

3.3.1. Inspección Visual

Los resultados obtenidos de la inspección visual en el cordón de soldadura realizada a las 7 juntas soldadas siguiendo los criterios de aceptación del código de la AWS D1.1 se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Resultados de la inspección visual en las 7 juntas soldadas.

Junta Soldada 1A3		
Cara del cordón		La cara del cordón de soldadura se presenta de manera uniforme en toda la longitud. No existe presencia de grietas. Sin poros ni fisuras superficiales. La dimensión de la sobremonta de la cara es 2,27 mm.
Raíz del cordón		La raíz del cordón de soldadura presenta penetración completa uniforme y no existe presencia de grietas. La dimensión de la sobremonta de la raíz es 1,89 mm.

Junta Soldada 2D3		
Cara del cordón		La cara del cordón de soldadura es uniforme en toda su longitud. Sin poros ni fisuras superficiales. No existe presencia de grietas. La dimensión de la sobremonta de la cara es 0,42 mm.
Raíz del cordón		La raíz del cordón de soldadura es uniforme y con penetración completa. Sin presencia de grietas. La dimensión de la sobremonta de la raíz es 0,64 mm.
Junta Soldada 3D2		
Cara del cordón		La cara del cordón de soldadura en toda su longitud es uniforme. No existe presencia de grietas. Sin poros ni fisuras superficiales. La dimensión de la sobremonta de la cara es 2,11 mm.
Raíz del cordón		La raíz del cordón de soldadura presenta una falta de fusión. No existe presencia de grietas. La dimensión de la sobremonta de la raíz es 0,50 mm.

Junta Soldada 4DTC		
Cara del cordón		<p>La cara del cordón de soldadura en toda su longitud es uniforme. No existe presencia de grietas. Sin poros ni fisuras superficiales. La dimensión de la sobremonta de la cara es 1,61 mm.</p>
Raíz del cordón		<p>La raíz del cordón de soldadura presenta falta de penetración. No existe presencia de grietas. La dimensión de la sobremonta de la raíz es 1,03 mm.</p>
Junta Soldada 5A2		
Cara del cordón		<p>La cara del cordón de soldadura es uniforme en toda su longitud. No existe presencia de grietas. Sin poros ni fisuras superficiales. La dimensión de la sobremonta de la cara es 3,02 mm.</p>
Raíz del cordón		<p>La raíz del cordón de soldadura es uniforme en toda su longitud. Presenta un poro superficial de 0,85 mm. La dimensión de la sobremonta de la raíz es 1,81 mm.</p>

Junta Soldada 6M3		
Cara del cordón		<p>La cara del cordón de soldadura es uniforme en toda su longitud. No existe presencia de grietas. Sin poros ni fisuras superficiales. La dimensión de la sobremonta de la cara es 0,64 mm.</p>
Raíz del cordón		<p>La raíz del cordón de soldadura es uniforme y con penetración completa. Sin presencia de grietas. La dimensión de la sobremonta de la raíz es 0,67 mm.</p>
Junta Soldada 7MA3		
Cara del cordón		<p>La cara del cordón de soldadura es uniforme en toda su longitud. No existe presencia de grietas. Sin poros ni fisuras superficiales. La dimensión de la sobremonta de la cara es 3,00 mm.</p>
Raíz del cordón		<p>La raíz del cordón de soldadura es uniforme y con penetración completa. Sin presencia de grietas. La dimensión de la sobremonta de la raíz es 1,42 mm.</p>

(Fuente: Propia, 2019)

En la Tabla 3.6 se presenta un resumen con las discontinuidades detectadas, dimensiones de las sobremontas de la cara y raíz de cada junta soldada.

Tabla 3.6. Resumen de la Inspección Visual.

Junta Soldada	Dimensión de la sobremonta		Discontinuidades detectadas		Descripción	Calificación según la AWS D1.1.
	Cara [mm]	Raíz [mm]	Cara	Raíz		
1A3	2,27	1,89	NO	NO		Aceptada
2D3	0,42	0,64	NO	NO		Aceptada
3D2	2,11	0,50	NO	SI	Falta de fusión al inicio de la junta.	Aceptada
4DTC	1,61	1,03	NO	SI	Falta de penetración al inicio de la junta.	Aceptada
5A2	3,02	1,81	NO	SI	Poros superficial de 0,85 mm	Aceptada
6M3	0,64	0,67	NO	NO		Aceptada
7MA3	3,00	1,42	NO	NO		Aceptada

(Fuente: Propia, 2019)

3.3.2. Líquidos Penetrantes

El reporte completo correspondiente al ensayo de líquidos penetrantes entregado por el Laboratorio de Ensayos No Destructivos se detalla en el ANEXO V. En la Tabla 3.7 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en las 7 juntas soldadas por medio del respectivo ensayo.

Tabla 3.7. Resumen del ensayo de líquidos penetrantes.

Junta Soldada	Discontinuidades detectadas		Descripción	Calificación según la AWS D1.1.
	Cara	Raíz		
1A3	NO	NO		Aceptada
2D3	NO	NO		Aceptada
3D2	NO	SI	Se encuentra una indicación al inicio de las placas.	Aceptada
4DTC	NO	SI	Se encuentra una indicación de 11 mm de diámetro al inicio de las placas.	Aceptada
5A2	NO	SI	Se encuentra una indicación de 12 mm de diámetro.	Aceptada
6M3	NO	NO		Aceptada
7MA3	NO	NO		Aceptada

(Fuente: Propia, 2019)

3.3.3. Radiografía

El reporte completo de inspección radiográfica entregado por el Laboratorio de Ensayos No Destructivos se detalla en el ANEXO VI. En la Tabla 3.8 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en las 7 juntas soldadas por medio del respectivo ensayo.

Tabla 3.8. Discontinuidades detectadas en la inspección radiográfica de las juntas soldadas.

Junta soldada	Discontinuidades detectadas	Tomas realizadas				Calificación según la AWS D1.1.
		1		2		
		Distancia desde el extremo izquierdo	Dimensión	Distancia desde el extremo izquierdo	Dimensión	
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
1A3	Ninguna	-	-	-	-	Aceptada
2D3	Falta de penetración	-	-	5	15	Rechazada
		35	25	65	13	
		90	20	135	12	
	Fusión incompleta	0	35	15	24	
		130	3	63	12	
		145	5	102	11	
		165	15	150	110	
		170	10	-	-	
	Porosidad	220	30	-	-	
81		0,2	-	-		
		85	1	-	-	
3D2	Falta de penetración	-	-	0	27	Rechazada
		-	-	160	11	
	Fusión incompleta	72	15	0	70	
		112	18	105	112	
		127	9	135	145	
		143	9	162	220	
		160	32	250	260	
	Exceso de penetración	225	12	-	-	
		-	-	220	7	
4DTC	Falta de penetración	0	60	90	16	Rechazada
		-	-	170	10	
		-	-	210	22	
		-	-	239	1	
		-	-	245	15	
	Porosidad	4	0,25	-	-	
		69	0,5	246	0,5	
Mordeduras	110	100	-	-		
5A2	Porosidad	98	0,5	70	0,25	Aceptada
6M3	Quemón	-	-	47	1	Aceptada
		-	-	48	8	
7MA3	Porosidad	41	1	45	1	Aceptada

(Fuente: Propia, 2019)

3.4. Resultados de los Ensayos Destructivos

En las secciones siguientes se presentan los resultados obtenidos de las 7 juntas soldadas del acero A572 por medio de ensayos destructivos como: doblado de cara - raíz y tracción de sección reducida.

3.4.1. Doblado de cara y raíz de las juntas soldadas

Para el ensayo de doblado de cara y raíz se utilizaron las 7 juntas soldadas, de donde se obtuvieron un total de 28 probetas. Los resultados obtenidos se muestran a continuación en la Tabla 3.9, Tabla 3.10, Tabla 3.11, Tabla 3.12, Tabla 3.13, Tabla 3.14 y Tabla 3.15.

Tabla 3.9. Resultados obtenidos de la junta 1A3.

Junta Soldada 1A3		
Probetas	Zona de Inspección	Indicaciones
Doblado de Cara	DC ₁ 1A3 	No se observan discontinuidades superficiales.
	DC ₂ 1A3 	No se observan discontinuidades superficiales.
Doblado de Raíz	DR ₁ 1A3 	No se observan discontinuidades superficiales.
	DR ₂ 1A3 	No se observan discontinuidades superficiales.

(Fuente: Propia, 2019)

Tabla 3.10. Resultados obtenidos de la junta 2D3.

Junta Soldada 2D3		
Probetas	Zona de Inspección	Indicaciones
Doblado de Cara	DC ₁ 2D3 	Se observa discontinuidades de: 2,47 mm 6,25 mm
	DC ₂ 2D3 	Se observa una discontinuidad de: 1,85 mm.
Doblado de Raíz	DR ₁ 2D3 	Se observa una discontinuidad de: 2,13 mm.
	DR ₂ 2D3 	Se observa discontinuidades de: 7,83 mm 4,01 mm 1,43 mm

(Fuente: Propia, 2019)

Tabla 3.11. Resultados obtenidos de la junta 3D2.

Junta Soldada 3D2			
Probetas	Zona de Inspección	Indicaciones	
Doblado de Cara	DC ₁ 3D2		No se observan discontinuidades superficiales.
	DC ₂ 3D2		Se observa una discontinuidad de: 6,58 mm.
Doblado de Raiz	DR ₁ 3D2		Probeta fracturada completamente.
	DR ₂ 3D2		Probeta fracturada completamente.

(Fuente: Propia, 2019)

Tabla 3.12. Resultados obtenidos de la junta 4DTC.

Junta Soldada 4DTC			
Probetas	Zona de Inspección	Indicaciones	
Doblado de Cara	DC ₁ 4DTC		Probeta fracturada completamente.
	DC ₂ 4DTC		Probeta fracturada completamente.
Doblado de Raíz	DR ₁ 4DTC		Se observa una discontinuidad de: 2,95 mm.
	DR ₂ 4DTC		Se observa una discontinuidad de: 2,17 mm.

(Fuente: Propia, 2019)

Tabla 3.13. Resultados obtenidos de la junta 5A2.

Junta Soldada 5A2		
Probetas	Zona de Inspección	Indicaciones
Doblado de Cara	DC ₁ 5A2 	No se observan discontinuidades superficiales.
	DC ₂ 5A2 	No se observan discontinuidades superficiales.
Doblado de Raíz	DR ₁ 5A2 	No se observan discontinuidades superficiales.
	DR ₂ 5A2 	No se observan discontinuidades superficiales.

(Fuente: Propia, 2019)

Tabla 3.14. Resultados obtenidos de la junta 6M3.

Junta Soldada 6M3			
Probetas	Zona de Inspección	Indicaciones	
Doblado de Cara	DC ₁ 6M3		No se observan discontinuidades superficiales.
	DC ₂ 6M3		No se observan discontinuidades superficiales.
Doblado de Raíz	DR ₁ 6M3		No se observan discontinuidades superficiales.
	DR ₂ 6M3		No se observan discontinuidades superficiales.

(Fuente: Propia, 2019)

Tabla 3.15. Resultados obtenidos de la junta 7MA3.

Junta Soldada 7MA3		
Probetas	Zona de Inspección	Indicaciones
Doblado de Cara	DC ₁ 7MA3 	Se observa una discontinuidad de: 1,90 mm.
	DC ₂ 7MA3 	Se observa una discontinuidad de: 1,64 mm.
Doblado de Raíz	DR ₁ 7MA3 	Se observa discontinuidades de: 1,58 mm. 1,54 mm.
	DR ₂ 7MA3 	Se observa discontinuidades de: 1,37 mm. 1,46 mm.

(Fuente: Propia, 2019)

En la Tabla 3.16 se presenta un resumen con las discontinuidades detectadas y sus dimensiones del ensayo de doblado de cara – raíz para las 28 muestras ensayadas.

Tabla 3.16. Resumen del ensayo de doblado de cara y raíz.

Junta Soldada	Probeta	Discontinuidades Detectadas	Descripción	Calificación según AWS D1.1.
1A3	DC ₁ 1A3	NO		Aceptada
	DC ₂ 1A3	NO		
	DR ₁ 1A3	NO		
	DR ₂ 1A3	NO		
2D3	DC ₁ 2D3	SI	Discontinuidades de 2,47 mm y 6,25 mm.	Rechazada
	DC ₂ 2D3	SI	Discontinuidad de 1,85 mm.	
	DR ₁ 2D3	SI	Discontinuidad de 2,13 mm.	
	DR ₂ 2D3	SI	Discontinuidades de 7,83 mm; 4,01 mm y 1,43 mm.	
3D2	DC ₁ 3D2	NO		Rechazada
	DC ₂ 3D2	SI	Discontinuidad de 6,58 mm.	
	DR ₁ 3D2	SI	Probeta fracturada completamente.	
	DR ₂ 3D2	SI	Probeta fracturada completamente.	
4DTC	DC ₁ 4DTC	SI	Probeta fracturada completamente.	Rechazada
	DC ₂ 4DTC	SI	Probeta fracturada completamente.	
	DR ₁ 4DTC	SI	Discontinuidad de 2,95 mm.	
	DR ₂ 4DTC	SI	Discontinuidad de 2,17 mm.	
5A2	DC ₁ 5A2	NO		Aceptada
	DC ₂ 5A2	NO		
	DR ₁ 5A2	NO		
	DR ₂ 5A2	NO		
6M3	DC ₁ 6M3	NO		Aceptada
	DC ₂ 6M3	NO		
	DR ₁ 6M3	NO		
	DR ₂ 6M3	NO		
7MA3	DC ₁ 7MA3	SI	Discontinuidad de 1,90 mm.	Aceptada
	DC ₂ 7MA3	SI	Discontinuidad de 1,64 mm	
	DR ₁ 7MA3	SI	Discontinuidades de 1,58 mm y 1,54 mm.	
	DR ₂ 7MA3	SI	Discontinuidades de 1,37 mm y 1,46 mm.	

(Fuente: Propia, 2019)

3.4.2. Ensayo de tracción de las juntas soldadas

En la Tabla 3.17 se presenta los resultados de las 14 probetas obtenidas de las juntas soldadas para el ensayo de tracción. El informe completo emitido por el laboratorio correspondiente como parte de la ratificación de los resultados expuestos se encuentra en el ANEXO VII.

Tabla 3.17. Resultados obtenidos de las 7 juntas soldadas.

Junta Soldada	Carga máxima registrada	Resistencia a la Tracción	Promedio de resistencia a la tracción	Obs.	%Elongación en 50 mm	Calificación según la AWS D1.1.
	N	MPa	MPa			
T ₁ -1A	28659	472,2	461,9	ZAC	16,8	Aceptada
T ₂ -1A	27221	451,5		FJS	13,9	Aceptada
T ₁ -2D	29309	470,4	470,9	FJS	14,2	Aceptada
T ₂ -2D	28863	471,3		FJS	12,8	Aceptada
T ₁ -3D	16265	266,8	283,6	ZAC	4,3	Rechazada
T ₂ -3D	18841	300,3		ZAC	4,3	Rechazada
T ₁ -4DTC	24878	405,6	425,9	FJS	6,7	Rechazada
T ₂ -4DTC	26543	446,2		ZAC	13,2	Rechazada
T ₁ -5A	26854	459,1	465,7	ZAC	15,0	Aceptada
T ₂ -5A	28953	472,3		ZAC	17,2	Aceptada
T ₁ -6M	28632	465,0	470	FJS	17,8	Aceptada
T ₂ -6M	29720	475,0		FMB	26,7	Aceptada
T ₁ -7MA	28397	456,5	455,7	FJS	14,2	Aceptada
T ₂ -7MA	28426	454,9		FMB	19,4	Aceptada

(Fuente: Propia, 2019)

En la Figura 3.3 se presenta una gráfica donde puede observarse como los valores promedios obtenidos de resistencia a la tracción para las juntas soldadas T3D y T4DTC están por debajo del valor mínimo de 450 [MPa] correspondiente al material base.

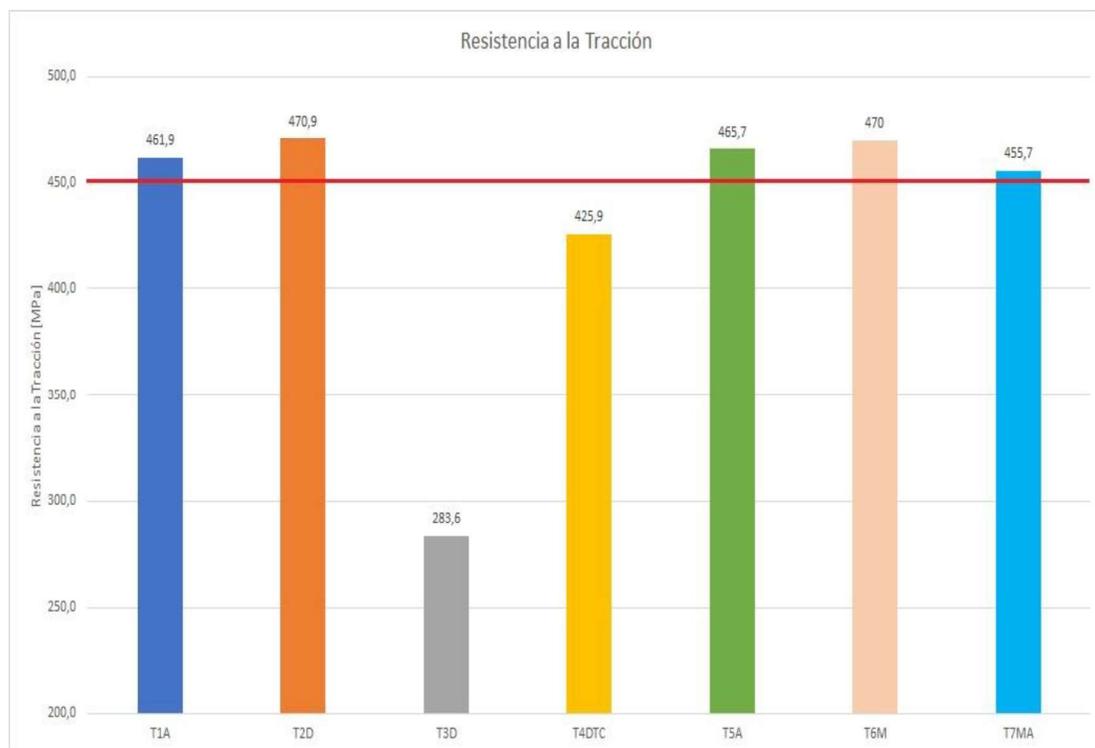


Figura 3.3. Gráfica comparativa de las probetas de tracción de juntas soldadas.
(Fuente: Propia, 2019)

Cada junta soldada con sus respectivas probetas después de realizado el ensayo de tracción y el punto de falla que tuvieron, se detallan en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18. Probetas después de realizado el ensayo de tracción.

Junta Soldada 1A3			
Probeta N°1:	T ₁ 1A	Falla en:	ZAC
			
Probeta N°2:	T ₂ 1A	Falla en:	JS
			
Junta Soldada 2D3			
Probeta N°3:	T ₁ 2D	Falla en:	JS
			
Probeta N°4:	T ₂ 2D	Falla en:	JS
			
Junta Soldada 3D2			
Probeta N°5:	T ₁ 3D	Falla en:	ZAC
			
Probeta N°6:	T ₂ 3D	Falla en:	ZAC
			

Junta Soldada 4DTC			
Probeta N°7:	T ₁ 4DTC	Falla en:	JS
			
Probeta N°8:	T ₂ 4DTC	Falla en:	ZAC
			
Junta Soldada 5A2			
Probeta N°9:	T ₁ 5A	Falla en:	ZAC
			
Probeta N°10:	T ₂ 5A	Falla en:	ZAC
			
Junta Soldada 6M3			
Probeta N°11:	T ₁ 6M	Falla en:	JS
			
Probeta N°12:	T ₂ 6M	Falla en:	MB
			
Junta Soldada 7MA3			
Probeta N°13:	T ₁ 7MA	Falla en:	JS
			
Probeta N°14:	T ₁ 7MA	Falla en:	MB
			

(Fuente: Propia, 2019)

3.5. Resultados de micrografía

El ensayo metalográfico se realizó a las muestras extraídas de las 7 juntas soldadas, en estas pueden observarse tres tipos de zonas: (1) material base (MB), (2) zona afectada por el calor (ZAC) y (3) material aporte (MA) como se muestra en la Figura 3.4.

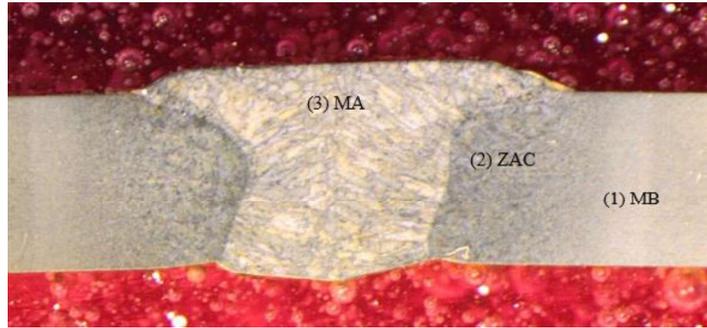
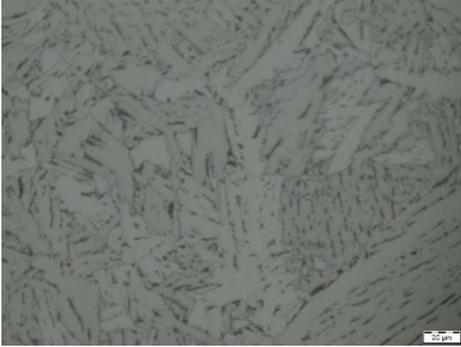
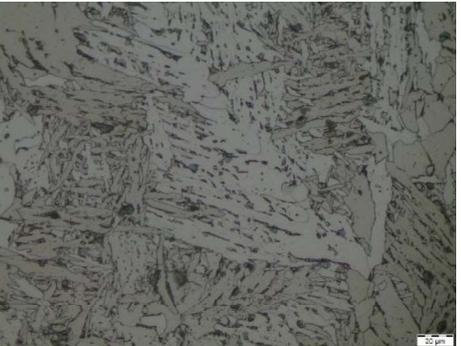


Figura 3.4. Zonas consideradas para el ensayo de micrografía.
(Fuente: Propia, 2019)

En la Tabla 3.19 se presenta los resultados metalográficos de la muestra extraída de la junta 1A3, clasificada de acuerdo con las zonas observadas y aumento utilizado respectivamente. Al ser analizadas las demás microestructuras se observa que son repetitivas por lo que se tomó la muestra más representativa, mientras que las demás se muestran en el ANEXO VIII.

Tabla 3.19. Resultados de las micrografías de la muestra 1A3.

Muestra	1 A3	
Objetivos	100X	500X
MB (material base)		
La microestructura observada en las figuras con sus respectivos aumentos se encuentra constituida por ferrita y perlita, estructura general de las aleaciones ferrosas.		

ZAC (zona afectada por el calor)	<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p>En la zona afectada por el calor con un aumento de 100X se observa granos gruesos de ferrita, mientras que con el aumento de 500X se ve cristales de ferrita Widmanstätten.</p>
MA (material de aporte)	<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p>Para un aumento de 100X se observa ferrita pro-eutectoide, así como de una solidificación del tipo dendrítico columnar. Mientras que con un aumento de 500 X se observa ferrita Widmanstätten, así como formaciones de granos de perlita alrededor de la austenita, además se observa sulfuro de manganeso.</p>

(Fuente: Propia, 2019)

3.6. Resultados de macrografía

Las macroestructuras obtenidas de las muestras correspondientes a las juntas soldadas se detallan en la Figura 3.5, Figura 3.6, Figura 3.7, Figura 3.8, Figura 3.9, Figura 3.10 y Figura 3.11. Además, estas detallan las medidas de la sobremonta de la cara y raíz en milímetros, el área del ZAC en milímetros cuadrados (zona bordeada por líneas verdes) y las dimensiones de las discontinuidades. En la Tabla 3.20 se resume todo lo anteriormente mencionado.

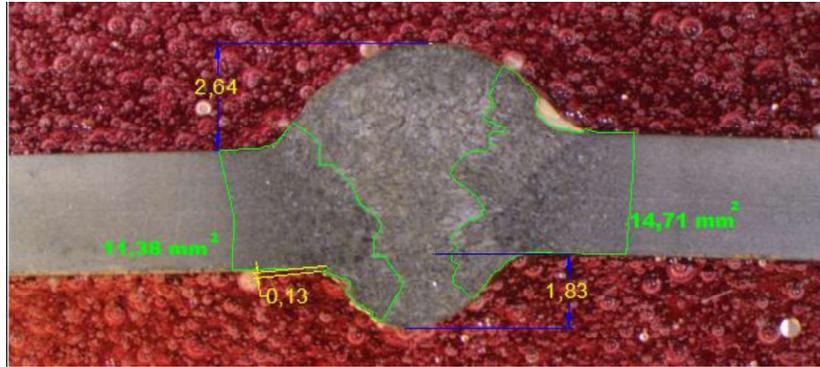


Figura 3.5. Macroestructura de la muestra 1A3.
(Fuente: Propia, 2019)

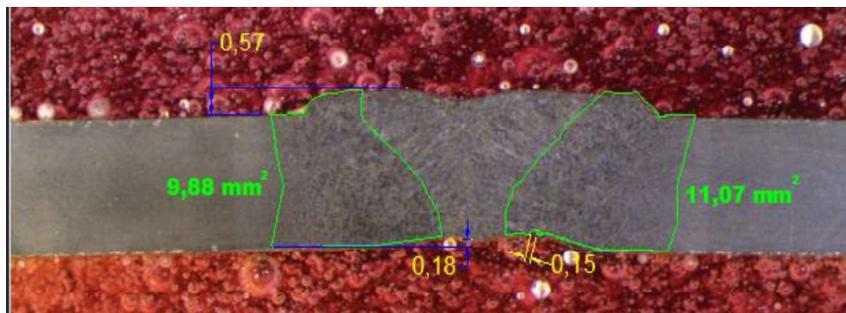


Figura 3.6. Macroestructura de la muestra 2D3.
(Fuente: Propia, 2019)

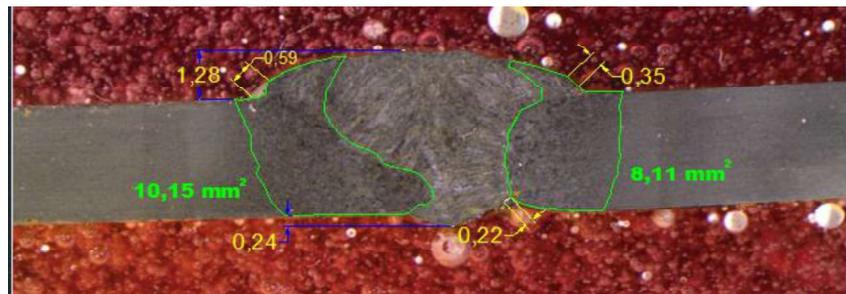


Figura 3.7. Macroestructura de la muestra 3D2.
(Fuente: Propia, 2019)

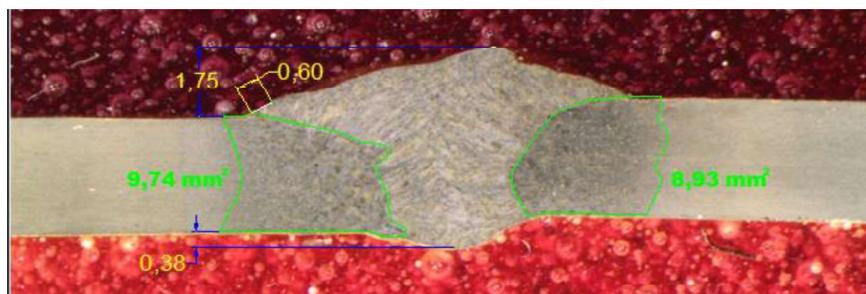


Figura 3.8. Macroestructura de la muestra 4DTC.
(Fuente: Propia, 2019)

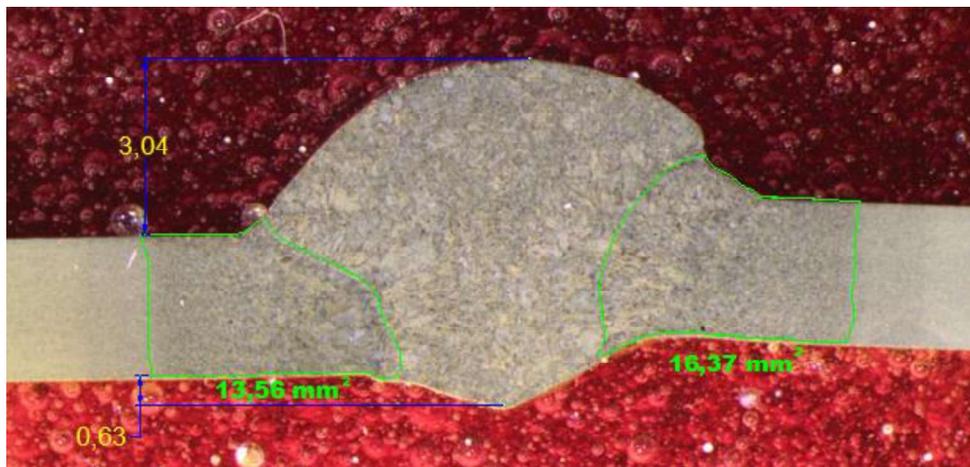


Figura 3.9. Macroestructura de la muestra 5A2.
(Fuente: Propia, 2019)

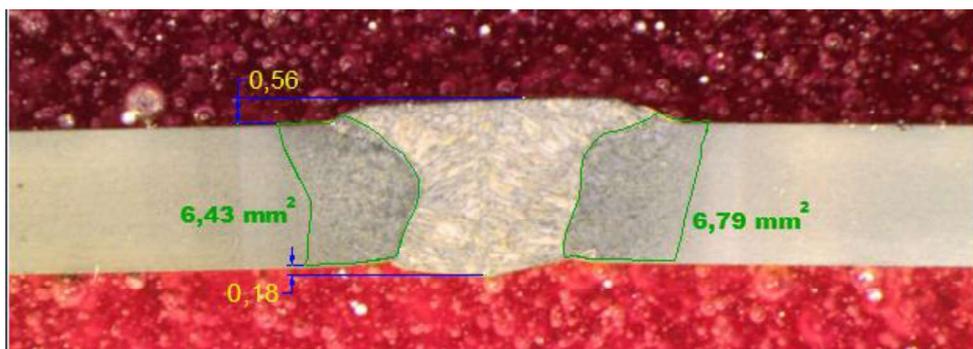


Figura 3.10. Macroestructura de la muestra 6M3.
(Fuente: Propia, 2019)

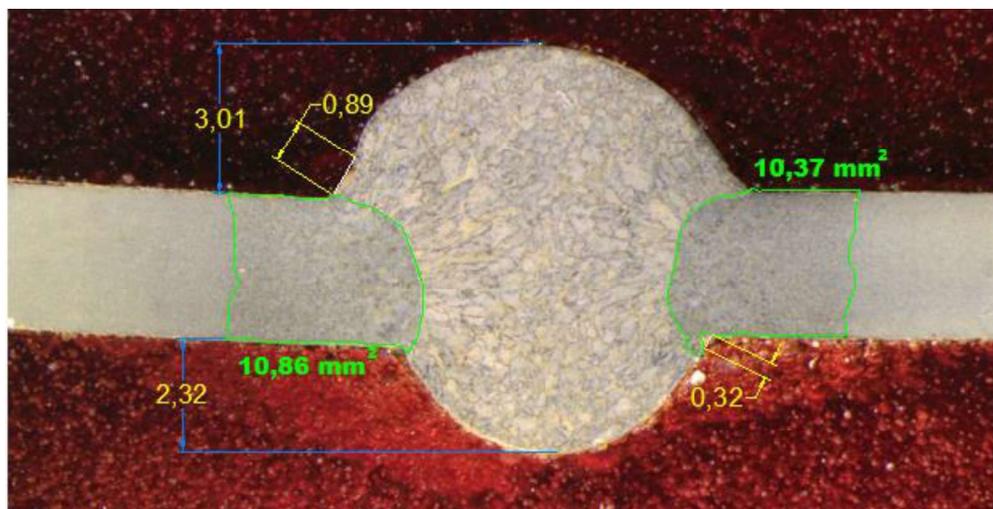


Figura 3.11. Macroestructura de la muestra 7MA3.
(Fuente: Propia, 2019)

Tabla 3.20. Resumen del análisis del ensayo de macrografía.

Muestras	Mediciones			Calificación según el AWS D1.1.	
	Sobremonta		Discontinuidades [mm]		Área total de la ZAC [mm ²]
	Cara [mm]	Raíz [mm]			
1A3	2,64	1,83	Socavación de 0,13	26,09	Aceptada
2D3	0,57	0,18	Socavación de 0,15	20,95	Aceptada
3D2	1,28	0,24	Socavaciones de 0,59; 0,35 y 0,22	18,26	Aceptada
4DTC	1,75	0,38	Socavaciones de 0,60	18,67	Aceptada
5A2	3,04	0,63		29,93	Aceptada
6M3	0,56	0,18		13,22	Aceptada
7MA3	3,01	2,32	Socavaciones de 0,89 y 0,32	21,23	Aceptada

(Fuente: Propia, 2019)

3.7. Resultados del ensayo de dureza

Los resultados de los valores de dureza en la escala Rockwell B para cada una de las muestras se presentan en la Tabla 3.21, Tabla 3.22, Tabla 3.23, Tabla 3.24, Tabla 3.25, Tabla 3.26 y Tabla 3.27.

Tabla 3.21. Resultados de la dureza superficial de la muestra 1A3.

Muestra 1A3			Imagen
Distancia [mm]	Dureza [HRB]	Zona	
3,60	81	MB	
7,66	83	MB	
11,14	73	ZAC	
16,48	87	MA	
21,78	77	ZAC	
28	81	MB	

(Fuente: Propia, 2019)

Tabla 3.22. Resultados de la dureza superficial de la muestra 2D3.

Muestra 2D3			Imagen
Distancia [mm]	Dureza [HRB]	Zona	
6,60	82	MB	
11,08	80	ZAC	
15,56	83	MA	
20,30	80	ZAC	
26,50	80	MB	

(Fuente: Propia, 2019)

De acuerdo con los datos obtenidos en las Tabla 3.21 y Tabla 3.22 se grafica los resultados obtenidos en el ensayo de dureza en función de la distancia a lo largo de la sección transversal de la muestra, como se presenta en la Figura 3.12.

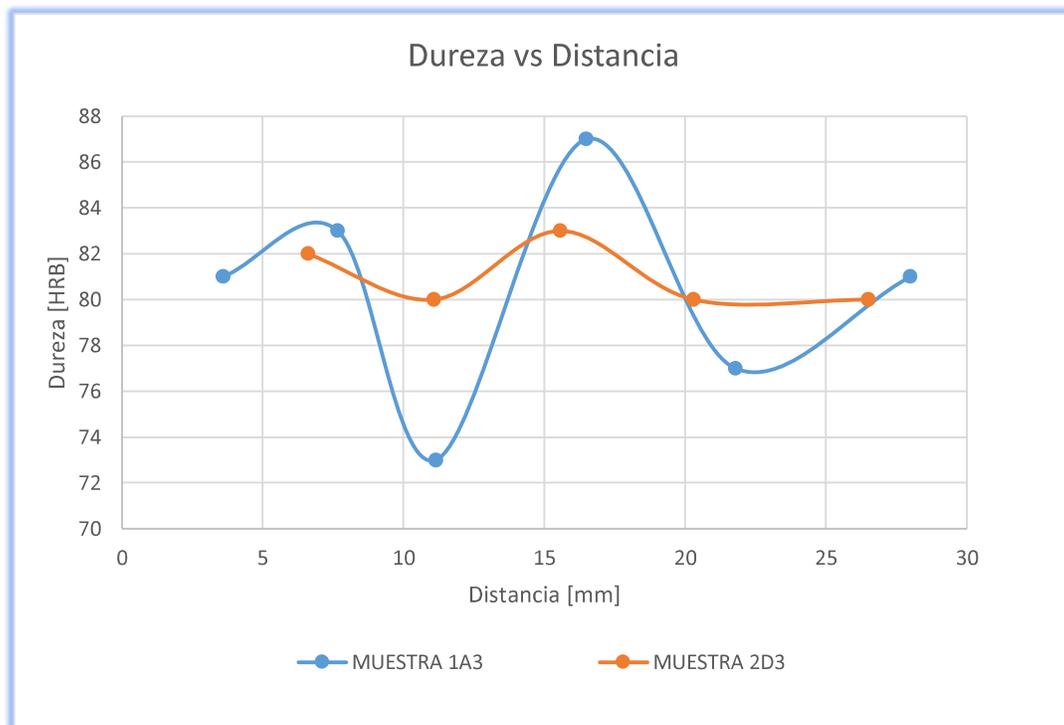


Figura 3.12. Gráfica de dureza vs distancia de las muestras 1A3 y 2D3.
(Fuente: Propia, 2019)

Tabla 3.23. Resultados de la dureza superficial de la muestra 3D2.

Muestra 3D2			Imagen
Distancia [mm]	Dureza [HRB]	Zona	
5,70	79	MB	
10,50	80	ZAC	
15,88	89	MA	
21,24	78	ZAC	
26,68	80	MB	

(Fuente: Propia, 2019)

Tabla 3.24. Resultados de la dureza superficial de la muestra 4DTC.

Muestra 4DTC			Imagen
Distancia [mm]	Dureza [HRB]	Zona	
5,70	83	MB	
11,04	79	ZAC	
15,24	88	MA	
19,20	78	ZAC	
21,80	81	MB	
25,78	81	MB	

(Fuente: Propia, 2019)

Tabla 3.25. Resultados de la dureza superficial de la muestra 5A2.

Muestra 5A2			Imagen
Distancia [mm]	Dureza [HRB]	Zona	
5,10	79	MB	
9,12	74	ZAC	
13,40	84	MA	
17,06	86	MA	
21,40	76	ZAC	
26,88	80	MB	

(Fuente: Propia, 2019)

De acuerdo con los datos obtenidos en las Tabla 3.23, Tabla 3.24 y Tabla 3.25 se grafica los resultados obtenidos en el ensayo de dureza en función de la distancia a lo largo de la sección transversal de la muestra, como se presenta en la Figura 3.13.

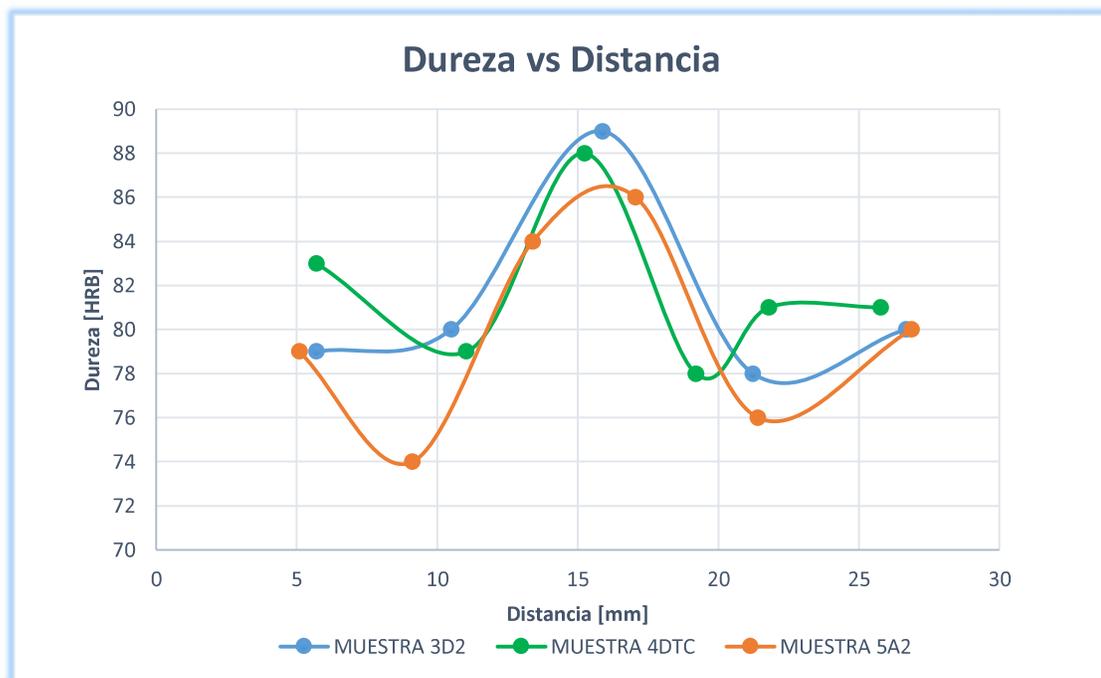


Figura 3.13. Gráfica de dureza vs distancia de las muestras 3D2, 4DTC y 5A2.
(Fuente: Propia, 2019)

Tabla 3.26. Resultados de la dureza superficial de la muestra 6M3.

Muestra 6M3			Imagen
Distancia [mm]	Dureza [HRB]	Zona	
7,50	80	MB	
12,76	77	ZAC	
17,14	91	MA	
21,80	80	ZAC	
26,40	79	MB	

(Fuente: Propia, 2019)

Tabla 3.27. Resultados de la dureza superficial de la muestra 7MA3.

Muestra 7MA3			Imagen
Distancia [mm]	Dureza [HRB]	Zona	
5,26	81	MB	
9,22	73	ZAC	
14,02	89	MA	
16,80	84	MA	
23,50	76	ZAC	
29,02	81	MB	

(Fuente: Propia, 2019)

De acuerdo con los datos obtenidos en las Tabla 3.26 y Tabla 3.27 se grafica los resultados obtenidos en el ensayo de dureza en función de la distancia a lo largo de la sección transversal de la muestra, como se presenta en la Figura 3.14.

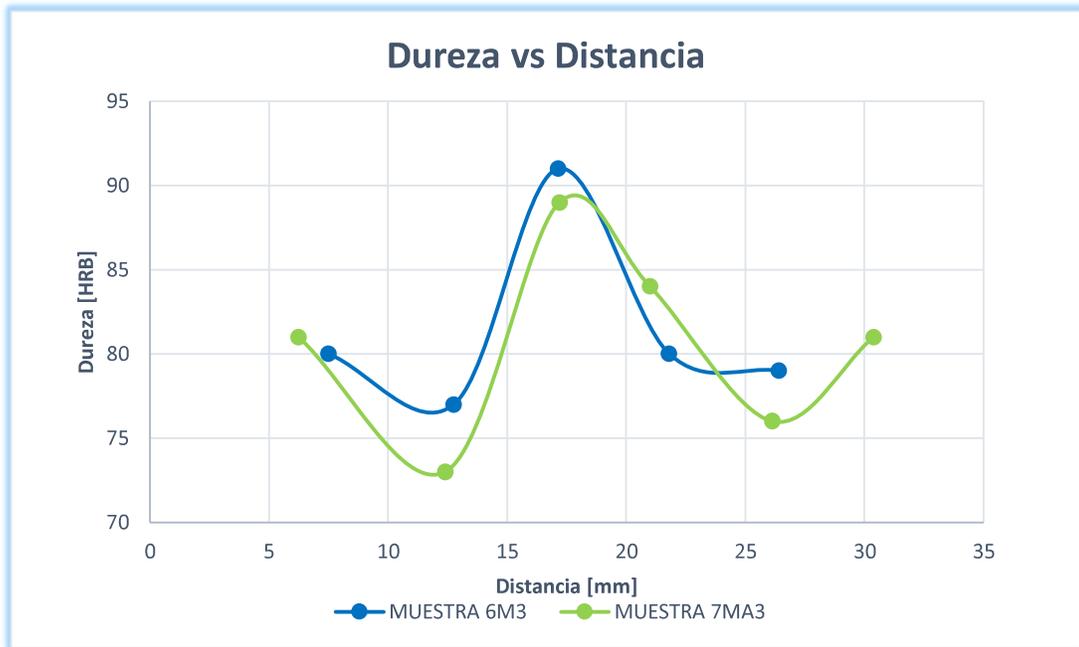


Figura 3.14. Gráfica de dureza vs distancia de las muestras 6M3 y 7MA3.
(Fuente: Propia, 2019)

3.8. Resumen general del proceso GMAW

Los resultados en forma general de los parámetros de soldadura y los ensayos de calificación para la Especificación del Proceso de Soldadura (WPS) según el código de la AWS D1.1, se detallan en la Tabla 3.28.

Tabla 3.28. Resumen general.

J. S	A. R	Prog.	V		I	Va	Gas de Protección	Qe	Ensayos para la calificación del WPS						Ensayo Adicional	Calificación de WPS		
			[mm]	[V]					[A]	[mm/min]	Insp. Visual		END (RX)				Tracción	
								[kJ/mm]	Apr.	No Apr.	Apr.	No Apr.	Apr.	No Apr.	Apr.	No Apr.	Apr.	No Apr.
1A3	3	Ascend.	15,5	90	55,02	CO ₂	1,52	X	X		X		X		X		Calificado	
2D3	3	Descen.	19	110	177,08	CO ₂	0,71	X	X	X			X		X		Rechazado	
3D2	2	Descen.	15	139	224,67	CO ₂	0,56	X		X			X		X		Rechazado	
4DTC	0	Descen.	15	140	150	CO ₂	0,84	X		X			X		X		Rechazado	
5A2	2	Ascend.	14,6	100	47,57	CO ₂	1,84	X	X		X		X		X		Calificado	
6M3	3	Descen.	15,3	124	171,14	Ar+ 20% CO ₂	0,67	X	X		X		X		X		Calificado	
7MA3	3	Ascend.	14	98	49,76	Ar+ 20% CO ₂	1,65	X	X		X		X		X		Calificado	

(Fuente: Propia, 2019)

3.9. Discusión

3.9.1. Material base

El material base al ser adquirido en la empresa NOVACERO debía verificarse que cumpla con sus especificaciones técnicas de acuerdo con la norma ASTM A572, las cuales correspondían a su composición química y propiedades mecánicas para el Grado 50. Al compararse la Tabla 1.11 con la Tabla 3.1 puede observarse que el material base cumple con lo especificado en la norma correspondiente a la composición química. Además, que los resultados obtenidos por el análisis químico por medio de espectrometría de emisión atómica de chispa nos dan elementos que no se encuentran en el estándar, resultados presentes en el ANEXO II.

Por otro lado, las propiedades mecánicas obtenidas después de realizarse el ensayo de tracción para el material base tiene valores superiores a los especificados en la norma mencionada, esto puede ser observado al comparar la Tabla 1.10 con la Tabla 3.2. En el ANEXO III se presenta el informe completo entregado por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones.

3.9.2. Inspección visual y líquidos penetrantes

Al realizarse el ensayo de inspección visual a las juntas soldadas 1A3, 2D3, 6M3 y 7MA3 no presentan ningún tipo de discontinuidad superficial. Mientras que en las juntas 3D2, 4DTC y 5A2 presentaron discontinuidades que no interfirieron para obtener las probetas correspondientes a los siguientes ensayos de calificación, debido a que se encuentran en partes descartables haciendo referencia a la Figura 2.9 correspondiente a la sección 2.5.1. Todas las juntas al ser relacionadas con los criterios de aceptación indicados en la Sección 2.7.1.1 correspondientes al código AWS D1.1 fueron aprobadas, lo mencionado anteriormente puede verificarse en la Tabla 3.5 y Tabla 3.6.

Al realizar el ensayo de líquidos penetrantes se confirmó lo anteriormente observado en la inspección visual y esto se presenta en la Tabla 3.7. El informe completo entregado por el Laboratorio de Ensayos No Destructivos se presenta en el ANEXO V.

3.9.3. Radiografía

El ensayo de radiografía industrial para la junta soldada 1A3 no muestra ninguna indicación. Las placas soldadas 5A2, 6M3 y 7MA3 presentan discontinuidades con dimensiones que no superan los límites requeridos. Se debe agregar que bajo los criterios mencionados en la Sección 2.7.3.1 de acuerdo con el código AWS D1.1, las juntas son aceptadas.

Por otra parte, las juntas soldadas 2D3, 3D2 y 4DTC presentan falta de fusión, falta de penetración y porosidades que superan los requerimientos establecidos en el código mencionado anteriormente, por lo que se llega a la no aceptación de estas. Hay que mencionar que en la Tabla 3.8 se tiene los resultados de todas las juntas y las imágenes de las tomas radiográficas se presentan en el ANEXO VI correspondiente al informe entregado por el Laboratorio de Ensayos No Destructivos.

3.9.4. Ensayo de doblado de cara y raíz

Al realizarse el ensayo de doblado de cara y raíz a las probetas obtenidas de las juntas soldadas 1A3, 5A2 y 6M3 se puede observar en la parte convexa que no existe ningún tipo de discontinuidad superficial. En lo referente a cada una de las probetas de la junta 7MA3 se examina indicaciones que no sobrepasan los 3 [mm]. Con respecto a lo mencionado anteriormente y tomando en cuenta los criterios citados en la Sección 2.8.2.1 se da por aceptado el ensayo.

En cuanto a las probetas extraídas de las juntas 3D2 y 4DTC resultan una o más fracturadas completamente, esto debido a la presencia de falta de penetración, fusión y discontinuidades internas en los cordones de soldadura. A su vez las probetas de la junta 2D3 presentan indicaciones que superan los 3 [mm] de dimensión. Se debe agregar que de acuerdo con los requerimientos de la AWS D1.1, estas juntas no cumplen con el ensayo. Es necesario recalcar que todos estos resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.16.

3.9.5. Ensayo de tracción de sección reducida

La resistencia a la tracción de las probetas obtenidas de las juntas 1A3, 2D3, 5A2, 6M3 y 7MA3 superan el valor mínimo de tracción de 450 [MPa] del metal base, quedando calificadas por el requerimiento de la AWS D1.1 para este ensayo. Dicho lo anterior las juntas 3D2 y 4DTC poseen un valor menor al requerido siendo no aceptadas, esto puede observarse en la Figura 3.3.

Las probetas de tracción de las juntas soldadas poseen tres tipos de fallas. Las muestras T1-1A, T1-3D, T2-3D, T2-4DTC, T1-5A y T2-5A exhiben falla en la zona afectada por el calor (ZAC). Las T2-1A, T1-2D, T2-2D, T1-4DTC, T1-6M y T1-7MA presentan falla en la junta soldada (FJS). Mientras que las T2-6M y T2-7MA poseen falla en el material base (FMB). Dicho lo anterior los resultados obtenidos hacen referencia a la Tabla 3.17 y en el ANEXO VII se presenta el informe completo entregado por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones.

3.9.6. Micrografía

Las metalografías obtenidas de las muestras respectivamente de las juntas soldadas, presenta un cambio microestructural en las tres zonas examinadas. En la zona correspondiente al material base (MB) se observa una estructura característica de las aleaciones ferrosas que son del tipo ferrita y perlita. Mientras que para la zona afectada por el calor (ZAC) se tiene la presencia de granos gruesos de ferrita con un objetivo de 100 X y al tener un aumento de 500 X se observa cristales de ferrita Widmanstätten, mismas que generan fragilidad en esta zona. Con respecto al material de aporte (MA) se tiene la presencia de ferrita pro-eutectoide característico de un cambio de fase, además puede verse el tipo de enfriamiento que es dendrítico columnar con un aumento de 100 X y con un objetivo de 500 X puede observarse como se forma la perlita alrededor de los granos de austenita, así como la presencia de ferrita Widmanstätten. Cabe mencionar que se observa manchas que se dan debido a la reacción del Nital con los componentes químicos de material de aporte, en nuestro caso son sulfuros de manganeso. En la Tabla 3.19 y ANEXO VIII se tienen los resultados correspondientes a las 7 muestras.

3.9.7. Macrografía

El análisis de las macroestructuras de las muestras 1A3, 2D3, 3D2, 4DTC y 7MA3 presentan valores de socavaciones que no superan el valor límite de 1[mm], además las muestras 5A2 y 6M3 no existe presencia de ninguna. En todas las muestras examinadas no se observan grietas y el valor de la sobremonta de la cara y raíz no excede el valor de 3 [mm] cumpliendo con los criterios citados en la Sección 2.10.1.1 y quedando calificadas por este ensayo. En la Tabla 3.20 se tienen los resultados correspondientes a las 7 muestras.

3.9.8. Ensayo de dureza

En el ensayo de dureza para cada muestra se tomó de a 5 a 6 indentaciones en el eje transversal del cordón de soldadura cuyas zonas representativas corresponden al material base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y material de aporte (MA). Las medidas tomadas fueron en escala Rockwell B.

Todas las muestras presentan un mayor valor en el material de aporte seguido por el material base y finalmente por la zona afectada por el calor, como se presentan en las Figuras 3.12, Figura 3.13 y Figura 3.14.

3.9.9. Parámetros de soldadura

Para cada una de las juntas soldadas se varió la apertura de raíz, progresión de soldadura, voltaje, amperaje, velocidad de avance, gas de protección como se observa en la Tabla 3.3. Se debe agregar que el objetivo principal es conocer el régimen de soldadura óptimo mediante el proceso GMAW empleado para fabricación de los vehículos de transporte de pasajeros.

Hay que mencionar, que cuando se aplica una progresión de soldadura de forma ascendente se obtiene velocidades de avance menores que implica que exista mayores valores de calor entregado (Q_e). Por el contrario, cuando la progresión es descendente se tiene que los valores el calor entregado (Q_e) disminuyen debido a que la velocidad de avance es mayor.

La apertura de raíz de 3 [mm] influyó sobre los otros valores utilizados de 0 o 2 [mm] para obtener juntas soldadas que cumplieron con todos los ensayos para la calificación de los WPS. Además, la junta soldada 5A2 correspondiente a una apertura de raíz de 2 [mm] fue una excepción para cumplir con todos los requisitos y obtener un WPS calificado. En la progresión de soldadura de forma ascendente se presenta valores de intensidad de corriente y voltaje incrementados comparados con los valores que se presentan en la progresión descendente.

Al utilizar una mezcla de gas de protección ($Ar + 20\%CO_2$) se obtuvieron juntas soldadas en la progresión de forma descendente y ascendente, tal es el caso de las 6M3 y 7MA3 que sus WPS fueron calificados. Se debe agregar que estas juntas tenían cordones de soldadura de una óptima calidad. Mientras que al utilizar un gas reactivo como el CO_2 se

obtuvieron juntas soldadas y con WPS calificados solo en la progresión ascendente, tal es el caso de 1A3 y 5A2. Para el resto juntas que utilizaron este mismo tipo de gas y una progresión descendente no cumplieron con los ensayos requeridos para que los WPS sean calificados, tal es el caso de 2D3, 3D2 y 4DTC. Todo lo anteriormente mencionado se observa en la Tabla 3.28.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Con los parámetros de soldadura obtenidos en la Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS) correspondiente a la junta 6M3 se define un proceso óptimo y calificado para ser implementado con el acero HSLA ASTM A572 Grado 50 en la fabricación de vehículos de transporte de pasajeros.
- Para garantizar que el ancho de raíz sea constante antes, durante y después del proceso de soldadura, se debe colocar puentes en las placas para restringir el movimiento.
- Se estableció que el material de aporte debe tener una composición química y propiedades mecánicas similares al material base, en este caso se usó un alambre electrodo ER70S-6 que cumple dichos requerimientos. El diámetro del alambre electrodo usado fue de 0,9 mm debido al espesor de 3 mm del material base.
- Se obtuvo que la apertura de raíz óptima es de 3 mm para lograr cordones de calidad y una soldabilidad adecuada de las juntas de acero HSLA ASTM A572 Grado 50, además, no se requiere una preparación de bisel previa ni un precalentamiento al material base.
- En lo referente al régimen de soldadura en el presente trabajo se ha comprobado que, con los valores de voltaje de 15,3 [V], una intensidad de corriente de 124 [A], una velocidad de alambre de 140 [pulg/min], una velocidad de avance de 171,14 [mm/min] y una mezcla de gas de protección de Ar + 20%CO₂ se obtiene resultados satisfactorios. Con estas variables del proceso se obtiene un cordón uniforme, con penetración completa y una zona afectada por el calor mínima, además de no presentar una distorsión al momento de ser soldada.
- Al usar en el proceso GMAW una mezcla de gas protección Ar + 20%CO₂ con un caudal en un rango de 20-30lt/min, se obtuvo cordones de soldadura óptimos y los WPS relacionados con la progresión de soldeo de forma ascendente y descendente cumplieron con la calificación del código de la AWS D1.1 esto debido a que el gas permite un arco de soldadura estable.
- El valor promedio de resistencia a la tracción (Sut) de la junta 6M3 es 470 [MPa], siendo un 4,44% mayor a la resistencia del material base y el promedio de porcentaje de elongación en 50 mm es 5,95% superior al que presenta material base. Se debe agregar que la parte convexa de las probetas después de realizado el ensayo de doblado de cara y raíz no presentaron discontinuidades, por lo que los

resultados obtenidos son tomados de referencia para establecer un régimen de soldadura óptimo.

- Como resultado del ensayo de dureza se concluye que en la junta soldada 6M3 en el material de aporte se obtuvo un valor de 91 [HRB] superando en 14,47% a la dureza del material base que posee un valor de 79,5 [HRB], esto debido a la microestructura ferrita - perlita presentada por el material base sufrió un cambio microestructural a ferrita Widmanstätten que hace que el material sea más frágil y su dureza superficial se incrementa.
- El valor obtenido de dureza en la zona afectada por el calor ZAC en la muestra 6M3 es 78,5 [HRB], siendo 1,26% más bajo que el valor presentado por el material base de 79,5 [HRB], esto puede justificarse al obtener un menor calor entregado de 0,67 KJ/mm comparado con las demás muestras calificadas.

4.2. Recomendaciones

- Se considera que para obtener cordones de soldadura óptimos ya sea con una progresión ascendente o descendente por medio del proceso GMAW, se debe utilizar una mezcla de gas de protección (Ar + 20%CO₂).
- Se recomienda que para trabajos futuros se utilice un acero HSLA diferente al utilizado en el presente estudio, además de utilizar el mismo proceso de soldadura GMAW para realizar una comparación del comportamiento de las juntas soldadas.
- Para futuros trabajos se recomienda utilizar el proceso de soldadura FCAW utilizando el acero HSLA A 572 y comparar con el presente documento las diferencias que puedan encontrarse.

Referencias Bibliográficas

- [1] Althouse, A. (2013). *Modern Welding*. United States: Goodheart Willcox.
- [2] Ashby, M. (2011). *Materials Selection in Mechanical Design*. United States: ELSEVIER.
- [3] ASM. (2002). ASM Handbook Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. United States of America: ASM International.
- [4] ASM. (2019). E18 Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallurgy. *ASM International*, 1-39.
- [5] ASTM. (2012). E165/E165M Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for General Industry. 19.
- [6] ASTM. (2014). A36/A36M Standard Specification for Carbon Structural Steel. *ASTM Internacional*, 1-3.
- [7] ASTM. (2014). E190 Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds. *ASTM International*, 1-4.
- [8] ASTM. (2017). E3 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. *ASTM International*, 1-12.
- [9] ASTM. (2017). E415 Standar Test method for Analysis of Carbon and Low-Alloy by Spark Atomic Emission Spectrometry. *ASTM International*, 1-11.
- [10] ASTM. (2018). A500/A500M Standard Specification for Cold Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Rounds and Shapes. *ASTM International*, 1-6.
- [11] ASTM. (2018). A572/A572M Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural. *AASHTO No: M223*, 1-4.
- [12] AWS. (2015). *Código de Soldadura Estructural para Aceros AWS D1.1*. Estados Unidos de América: American Welding Society.
- [13] Bhadeshia, H. (2006). *Steels: Microstructure and Properties*. Chennai: ELSEVIER.
- [14] Chain, S. (2016, Enero 13). *EAE Business School*. Obtenido de <https://retos-operaciones-logistica.eae.es/transporte-de-mercancias-eficiente/>
- [15] Company, L. E. (1995). Manual del Operador del equipo de soldadura por arco WIRE MATIC 255. Cleveland : Lincoln Electric.
- [16] CSM. (2015). *HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 & Offshore Engineering Steels 2015*. Hangzhou: WILEY.
- [17] Davis, J. (2001). *Alloying: Understanding The Basics*. United States of America: ASM International.

- [18] Electric, L. (2012). *Soldadura Semiautomática con Gas de Protección (MIG-MAG)*. Lincoln Electric.
- [19] Glick, L. (2016). *Alro Steel*. Obtenido de https://www.alro.com/divsteel/metals_gridpt.aspx?gp=0043&gpn=ASTM%20A572&Mat=CARBON%20STEEL&Type=Sheet
- [20] Higgins, R. (1993). *Engineering Metallurgy*. Sydney: Arnold.
- [21] Hyundai. (2019). *Hyundai*. Obtenido de <https://www.hyundai.ie/the-story-of-steel-strengthening-car-safety>
- [22] Illescas, S. (2007, Abril). *Universidad Politécnic de Catalunya UPCommons*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/4123>
- [23] INDURA. (2012). *Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura*. Chile: INDURA S.A.
- [24] INEC. (2018, Diciembre). *Instituto Nacional de Estadística y Censos*. Obtenido de http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Estadistica%20de%20Transporte/2017/2017_TRANSPORTE_PRESENTACION.pdf
- [25] Jeffus, L. (2016). *Welding: Principles and Applications*. United States of America: Cengage Learning.
- [26] Jinshi, H. (2015). *Hebei Jinshi Industrial Metal*. Obtenido de <https://www.steel-sections.com/steelsections/a572-i-beam.html>
- [27] Krauss, G. (2015). *Steels: Processing, Structure and Performance*. United States of America: ASM International.
- [28] Kumar, S. (2016, Marzo 31). *ISPAT GURU*. Obtenido de <http://ispatguru.com/high-strength-carbon-and-low-alloy-steels/>
- [29] Kumar, T. (2018). *Advanced High Strength Steel: Processing and Applications*. Singapore: Springer.
- [30] Kutz, M. (2002). *Handbook of Materials Selection*. New York: John Wiley & Sons.
- [31] LAMIERA. (2010, Octubre). *Meccanica News*. Obtenido de www.lamieranews.it
- [32] Leandro, F. (2016, Mayo 12). *SlideShare*. Obtenido de SlideShare: <https://es.slideshare.net/FLDuran/experimental-n1-estudio-de-aceros-estructurales-y-de-construccin-soldados-proceso-de-soldadura-test-de-doblado-analisis-metalografico-y-dureza>
- [33] Lippold, J. (2015). *Welding Metallurgy and Weldability*. Ohio: WILEY.
- [34] MATWELD. (2015). *MATUS Hard Working Brands*. Obtenido de <https://www.matus.co.za/catalogues/matweld/mobile/index.html#p=34>
- [35] Minnick, W. (2018). *GMAW/FCAW Handbook*. United States: Goodheart-Willcox.

- [36] MIPSAs. (2019). MIPSAs. Obtenido de <https://www.mipsa.com.mx/dotnetnuke/Sabias-que/Informacion-general-acero>
- [37] Mohrbacher, H. (2013, Abril). *Fundamentals and Applications of Mo and Nb Alloying in High Performance Steels*. Obtenido de https://www.imoa.info/download_files/proceedings/hps_TMS_Fundamentals_Applications_Mo_Nb_Alloying_High_Performance-Vol2.pdf
- [38] Mohrbacher, H. (2015). *Application of high strength steels in lightweight commercial vehicles*. Chennai: Springer.
- [39] Nadzam, J. (2014, Septiembre). LINCOLN ELECTRIC. Obtenido de www.lincolnelectric.com
- [40] Najafi, H. (2008, Julio). *As-cast mechanical properties of vanadium/niobium microalloyed steels*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.08.057>
- [41] O'Brien, A. (2011). *Welding Handbook, Volumen 4. Materials and Applications, Part 1*. Miami: American Welding Society.
- [42] O'Brien, R. (2002). *American Welding Society/ Manual de Soldadura*. México: Prentice Hall.
- [43] OERLIKON. (2012). *Manual de Soldadura & Catálogo de Productos*. Pfäffikon: OERLIKON Group.
- [44] OLYMPUS. (2019). OLYMPUS. Obtenido de [https://www.olympus-ims.com/es/microscope/szx7/#|cms\[tab\]=%2Fmicroscope%2Fszx7%2FOverview](https://www.olympus-ims.com/es/microscope/szx7/#|cms[tab]=%2Fmicroscope%2Fszx7%2FOverview)
- [45] Pan, T. (2015, Noviembre). *Precipitation Behavior of V-N Microalloyed Steels during Normalizing*. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(15\)30109-6](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(15)30109-6)
- [46] Pérez, J. (2012, Diciembre 14). *EOM*. Obtenido de <https://elordenmundial.com/el-transporte-maritimo/>
- [47] Praxair. (2015). *Shielding Gas Selection Manual*. Reino Unido: Praxair Technology.
- [48] Rana, R. (2017). *Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications*. Chennai: Woodhead Publishing.
- [49] Ríos, J. (2015). *SCRIBD*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/120288042/acero-A500>
- [50] Underwood, M. (2016, Noviembre). *Welding Productivity*. Obtenido de <https://weldingproductivity.com/article/handling-hsla/>
- [51] UNICOM. (2013). SlideShare. Obtenido de <https://es.slideshare.net/arcon7001/unicon-estructural-espanol-v20-i>
- [52] Velasteguí, J. (2014, Junio). *Estudio de los procesos de soldadura SMAW y GMAW sobre Acero ASTM A36, A500 y su incidencia en las propiedades mecánicas en las*

juntas soldadas de la estructura de buses. Ambato: Universidad Técnica de Ambato. Obtenido de <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/8305>

- [53] Verhoeven, J. (2007). *Steel Metallurgy for the Non Metallurgist*. Ohio: ASM International.
- [54] Xu, G. (2010, Junio). *The development of Ti-alloyed high strength microalloy steel*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.12.032>
- [55] Yuan, Q. (2015). *Effect of Ti on microstructure and properties of Ti-Nb microalloyed high strength steels*. Obtenido de <https://download.atlantispress.com/article/25837939.pdf>

ANEXOS