

Estudio de propiedades mecánicas y análisis microestructural de las juntas soldadas en aceros
ASTM A36 bajo tres modelos de transferencia GMAW.

Diego Armando Diaz Nova

Juan Camilo Rey Pava

Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniero Mecánico

Director

Alberto David Pertuz Comas

PhD. Ingeniería Mecánica

Codirector

Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra

Ing. Mecánico Especialista en Evaluación y Gerencia de Proyectos

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingeniería Físicomecánicas
Escuela de Ingeniería Mecánica
Bucaramanga

2021

Dedicatoria

Principalmente a Dios Todopoderoso por permitirme finalizar este proyecto, en estos tiempos de pandemia, cuidando mi salud y la de los que más quiero

A mis padres, mi hermana Dianita y Jairito por su comprensión, amor, paciencia y esfuerzo porque sin ellos esto no habría podido ser culminado

A Laurita mi novia y amiga incondicional, aquella que siempre ha estado para mí en los momentos más decisivos en lo que ha transcurrido de mi vida

A mi codirector Oscar Bohorquez por sus consejos, paciencia y por compartirme su experiencia en todas las situaciones laborales complicadas que ha sobrellevado, una gran persona y profesional

A Juan Camilo mi compañero de proyecto, quien a pesar de todas las dificultades que se presentaron en el desarrollo de esta investigación, busco la forma de animarme y seguir adelante

A mis amigos Felipe, Carlos, Luchito, Güicho, William, Camilo, el equipo dinamita, Karencita, y Alejo, quienes compartieron mis alegrías, tristezas y por estar siempre para mí en todas las situaciones difíciles.

DIEGO ARMANDO DIAZ NOVA

Este trabajo lo dedico a mi familia quienes son el principal motor de mi motivación.

A mi madre Luz Andrea quien es la persona que confió en mi en todo momento y será quien recoja los frutos de mi éxito y mi trabajo.

También quiero dedicar este esfuerzo a todos mis compañeros de universidad Diego Diaz, Diego Campillo, Luchito, Karencita, Karen porras, Carlos Serrano entre otros. Quienes por estos años han sido los acompañantes en este proceso de formación y me permitieron pasar una de las mejores épocas de mi vida.

Por último, a mi codirector y director Oscar Bohorquez y Alberto Pertuz y todos los demás docentes quienes han sido los guías de mi formación y a mis compañeros de trabajo Hugo y Carlos quienes me han brindado su apoyo y conocimiento para sacar adelante este proyecto.

JUAN CAMILO REY PAVA

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Objetivos.....	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Justificación	17
3. Marco Conceptual.....	18
3.1 Procesos de Soldadura	18
3.1.1 SMAW	18
3.1.2 FCAW	18
3.1.3 GTAW.....	18
3.1.4 SAW.....	19
3.1.5 GMAW	19
3.1.5.1 Globular.	20
3.1.5.2 Corto Circuito (GMAW – S).	21
3.1.5.3 Transferencia Spray.	21
3.2 Materiales.....	22
3.2.1 Metales.....	22
3.2.1.1 Aceros.	22
3.3 Soldabilidad	25
3.3.1 Metal Base	25
3.3.2 Metal de Aporte	26
3.3.2.1 Alambre Solido..	26
3.3.2.2 Alambre Tubular.....	26
3.3.3 Zona de Fusión.....	27
3.3.4 Zona Afectada por Calor.....	27
3.3.5 Discontinuidad	28
3.3.5.1 Defecto.....	28

3.3.6 Precalificación del Procedimiento	29
3.3.6.1 Junta Precalificada a Tope de Ranura en Escuadra.	29
3.4 Ensayo de Laboratorio	30
3.4.1 Ensayo de Tracción.....	30
3.4.2 Ensayo de Dureza	31
3.4.3 Microscopia Metalográfica	33
3.5 Diseño Experimental.....	33
4. Marco Teórico.....	35
4.1 Antecedentes Internacionales.....	35
4.1.1 “Efecto de la Composición Química del Metal de Aporte y del Calor Aportado Sobre la Microestructura y las Propiedades Mecánicas de Juntas Soldadas de Aceros Inoxidables Dúplex.”.	35
4.1.2 “Estudio Comparativo de la Soldabilidad en Aceros (ASTM A36, A588 Y A572) Mediante el Proceso FCAW”.....	36
4.1.3 “Análisis del comportamiento mecánico y microestructural de las transformaciones de fase en la zona afectada por el calor (ZAC) en juntas soldadas a tope para acero estructurales por medio del proceso gas metal arc welding (GMAW) y con alambre para soldar ER70S-6”.....	36
4.2 Antecedentes Nacionales	37
4.2.1 “Influencia de la Transferencia en la Resistencia y Dureza de las Uniones Soldadas Obtenidas por el Proceso de Soldadura GMAW.”.....	37
4.2.2 “Influencia de la Transferencia por Arco Sobre la Microestructura de Uniones Soldadas Usando Arco Pulsado.”.....	37
4.2.3 “Efectos de los active flux sobre soldaduras GMAW aplicadas a un acero AISI/SAE 1020.”	38
4.3 Antecedentes Regionales	39
4.3.1 “Diseño y Calificación de un WPS, PQR y WPQ de Soldadura Según Norma API 1104 Para la Estación de Recolección Campo Escuela Colorado”	39
5. Metodología	40
5.1 Procedimiento	40
5.1.1 Adquisición del Acero ASTM A36	40
5.1.2 Corte y Preparación de las Secciones a Soldar.	40

5.1.3 Elaboración de Formatos WPS	42
5.1.4 Ajuste de Parámetros Esenciales Para la Obtención de los Tres Modos de Transferencia .	42
5.1.5 Pruebas de Soldadura Mecanizada.....	44
5.1.6 Preparación de las Probetas de Tracción Según la Norma ASTM E8.....	47
5.1.7 Preparación de las Probetas de Micro Dureza Según la Norma ASTM E384 - 17	47
5.1.8 Preparación de Probetas de Microscopia Metalográfica Según la Norma ASTM E3 – 11.	49
5.1.9 Proceso de Cortado de las Platinas con Corte por Chorro de Agua para Obtener la Forma de las Probetas de Tracción y Micro Dureza.	50
5.1.10 Ensayo de Tracción.....	51
5.1.11 Ensayo de Dureza	52
5.1.12 Pruebas de Microscopia	54
5.2 Materiales y Equipos.....	55
5.2.1 Materiales.....	55
5.2.1.1 Acero ASTM A36.....	55
5.2.1.2 Alambre ER70S-6.....	56
5.2.1.3 Gas de Protección.	56
5.2.1.4 Papel Abrasivo.....	58
5.2.1.5 Nital.....	58
5.2.2 Equipos.	58
5.2.2.1 Cizalla Hidráulica ALPMAC Model V16- 3100.....	58
5.2.2.2 Soldador SKYMIG 5060.	58
5.2.2.3 Aplicador de Soldadura Mecanizado HUAWEI HK12 Max-3.	60
5.2.2.4 Cortadora por Chorro de Agua Flow Serie Mach 3b.....	60
5.2.2.5 Sistema de Ensayos MTS Bionix Axial 370.02.....	61
5.2.2.6 Tribómetro BRUKER UMT TriboLab.	61
5.2.2.7 Microscopio Invertido ViewMet BUEHLER.	62
5.2.2.8 Amoladora Pulidora de Banco BUEHLER MetaServ 250 Twin.....	63
6. Resultados y Discusión.....	64

6.1 Determinación de la Resistencia a la Tensión de los Tres Modos de Transferencia GMAW.	64
6.2 Determinación del Perfil de Dureza Vickers en los Tres Modos de Transferencia GMAW..	66
6.3 Cuantificación de la Influencia de la Zona Afectada por el Calor con el Uso de Microscopia.	67
6.3.1 Cuantificación de la ZAC con el uso de macrografías.	67
6.3.2 Análisis Metalográfico de las Micrografías.	68
6.4 Estimación de la Mejora o Deterioro en las Propiedades Mecánicas y la Microestructura en la Junta Soldada Respecto al Material Base.	73
7. Conclusiones	75
Referencias Bibliográficas	78

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Elementos aleantes del acero ASTM A36.	24
Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero ASTM A36.	24
Tabla 3. Dimensiones de la probeta de tracción.	48
Tabla 4. Procedimiento de pulido de las probetas de dureza y microscopia.	49
Tabla 5. Composición química y propiedades mecánicas del metal base ASTM A36.	55
Tabla 6. Especificaciones generales del alambre Weld 70S-6.	56
Tabla 7. Especificaciones eléctricas recomendadas del alambre Weld 70S-6.	57
Tabla 8. Especificaciones del equipo de soldadura SKYMIG 5060.	59
Tabla 9. Puntos importantes del diagrama esfuerzo vs deformación para los tres modos de transferencia y para el acero ASTM A36.	66
Tabla 10. Mediciones a nivel macro del metal base, la ZAC y la zona de fusión para los tres modos de transferencia.	68
Tabla 11. Comparación de propiedades como esfuerzo de fluencia, esfuerzo último, alargamiento máximo y dureza de los tres modos de transferencia respecto del acero ASTM A36 sin soldar para determinar su afectación.	74

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Modos de transferencia de metal de aporte sobre una junta soldada.	20
Figura 2. Diagrama de fases de la aleación hierro-carbono.	23
Figura 3. Microestructura del acero ASTM A36.	25
Figura 4. Zona de fusión y ZAC en junta soldada.	27
Figura 5. Junta a tope de ranura en escuadra .	30
Figura 6. Probeta del ensayo de tracción para una junta soldada.	31
Figura 7. Diseño experimental planteado.	34
Figura 8. Láminas de 15 cm por 40 cm y 30 cm por 40 cm.	41
Figura 9. Mezcla de gases de protección de argón y dióxido de carbono.	43
Figura 10. Parámetros establecidos para el modo de transferencia en corto circuito.	43
Figura 11. Parámetros establecidos para el modo de transferencia globular.	44
Figura 12. Parámetros establecidos para el modo de transferencia spray.	45
Figura 13. Lámina soldada por el modo de transferencia metálica de corto circuito.	46
Figura 14. Lámina soldada por el modo de transferencia metálica globular.	46
Figura 15. Lámina soldada por el modo de transferencia metálica spray.	47
Figura 16. Probeta para microindentación Vickers.	48
Figura 17. Corte de las probetas por chorro de agua.	50
Figura 18. Obtención de probetas luego del corte.	51
Figura 19. Realización del ensayo de tracción.	53
Figura 20. Indentaciones realizadas a la probeta de dureza.	53
Figura 21. Ensayo de dureza en ejecución.	54

ESTUDIO DE PROPIEDADES EN JUNTAS SOLDADAS	10
Figura 22. Pruebas de microscopia.	55
Figura 23. Alimentador de alambre del equipo SKYMIG 5060.	57
Figura 24. Equipo de soldadura SKYMIG 5060.	58
Figura 25. Aplicador de soldadura HUAWEI HK12 Max-3.	60
Figura 26. MTS Bionix Axial 370.02.	61
Figura 27. Equipo para realización de pruebas de dureza Tribómetro BRUKER UMT.	62
Figura 28. Microscopio invertido ViewMet BUEHLER.	63
Figura 29. Zonas de fractura para acero ASTM A36 sin soldar y para las juntas soldadas.	64
Figura 30. Diagrama Esfuerzo vs Deformación para tres modos de transferencia y acero ASTM A36 sin soldar.	65
Figura 31. Barridos de dureza Vickers desde el metal base, pasando por la ZAC y finalizando en la zona de fusión para los tres modos de transferencia y el acero ASTM A36 sin soldar.	66
Figura 32. Diagrama T.T.T para acero hipoeutectoide.	69
Figura 33. Lugar en el que se determinó la microestructura de la zona de fusión.	70
Figura 34. Microestructura de la zona de fusión para el modo de transferencia corto circuito.	70
Figura 35. Lugar en el que se determinó la microestructura del metal base.	71
Figura 36. Microestructura del metal base para el modo de transferencia corto circuito.	71
Figura 37. Microestructura de la ZAC para el modo de transferencia corto circuito.	72
Figura 38. Microestructura de la ZAC para el modo de transferencia globular.	72
Figura 39. Microestructura de la ZAC para el modo de transferencia Spray.	74

Lista de Apéndices

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice A. Formato WPS Corto Circuito.

Apéndice B. Formato WPS Globular.

Apéndice C. Formato WPS Spray.

Apéndice D. Diagrama de Flujo para Realizar Junta Soldada Precalificada.

Apéndice E. Plano Probeta de Tracción.

Apéndice F. Plano Probeta de Dureza

Apéndice G. Certificado de Calidad Acero ASTM A36.

Apéndice H. Certificado de Calidad del Microalambre ER70s-6.

Resumen

Título: Estudio de propiedades mecánicas y análisis microestructural de las juntas soldadas en aceros ASTM A36 bajo tres modelos de transferencia GMAW.**

Autores: Diego Armando Diaz Nova, Juan Camilo Rey Pava.††

Palabras Clave: Soldadura, ensayo de tensión, dureza, microscopia.

Descripción: Los procesos de unión permanente como la soldadura garantizan grandes ventajas como alta resistencia y fiabilidad de la junta. La soldadura por fusión de arco eléctrico bajo denominación soldadura a gas y arco metálico (GMAW) es uno de los procesos de soldadura más utilizado por la calidad de sus uniones y su tasa de productividad. Cuando se parametriza la aplicación de la soldadura permite que se desarrolle tres modos de transferencia los cuales dependen del voltaje y amperaje. La microestructura y las propiedades mecánicas del material base se modifican con cada modo de transferencia de metal, debido al aporte de calor que se debe realizar para lograr la coalescencia de los metales base. Como no se tiene cuantificado numéricamente la afectación por calor sobre el metal base, se hace necesario la revisión del comportamiento mecánico y de la microestructura para estimar el nivel de afectación que produce cada modo de transferencia sobre la junta soldada. En este trabajo se desarrolló la aplicación de los modos de transferencia, sobre acero estructural ASTM A36 siguiendo los modelos normativos que rigen la tecnología y la industria. Se realizaron procedimientos experimentales de microscopia y pruebas mecánicas, con el propósito de determinar el nivel de afectación entre las propiedades mecánicas y los parámetros establecidos durante la aplicación de la soldadura, además se revisaron las microestructuras para complementar los resultados obtenidos.

** Trabajo de Grado

†† Facultad de Ingeniería Mecánica. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Alberto David Pertuz Comas. PhD. Ingeniería mecánica. Codirector: Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra. Ingeniero mecánico especialista en evaluación y gerencia de proyectos.

Abstract

Title: Study of the mechanical properties and microstructural analysis of welded joints in ASTM A36 steels under three GMAW transfer models.^{‡‡}

Author: Diego Armando Diaz Nova, Juan Camilo Rey Pava.^{§§}

Key Words: Welding, stress test, hardness, microscopy.

Description: Permanent joining processes such as welding guarantee great advantages like high strength and reliability of the joint. Electric arc fusion welding widely known as Gas Metal Arc Welding (GMAW) is one of the most popularly implemented welding processes due to the quality of its joints and its productivity rate. Whenever the welding application is parameterized, it allows three transfer modes to be developed which depend on voltage and amperage. The microstructure and mechanical properties of the base material change with each mode of metal transfer, due to the heat input required to achieve coalescence of the base metals. As the heat damage on the base metal has not been numerically quantified, it is necessary to review the mechanical behavior and microstructure to estimate the damaging level produced by each transfer mode on the welded joint. This research developed the application of the transfer modes on ASTM A36 structural steel following the normative models that govern technology and the industry. Experimental procedures of microscopy and mechanical tests were carried out, in order determine the level of affectation between the mechanical properties and the parameters established during the application of the welding; in addition, the microstructures were reviewed to complement the results obtained.

^{‡‡} Degree Work

^{§§} Faculty of Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering. Director: Alberto David Pertuz Comas. PhD. Mechanical Engineering. Co-director: Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra. Mechanical engineer specialized in project evaluation and management.

Introducción

El proceso de soldar se conoce como la unión de dos piezas metálicas mediante el uso de calor, esto genera que el metal base y el metal aporte se fundan para que al enfriarse conformen una pieza única (Rowe & Jeffus, 2008). Este proceso tiene aplicaciones en el desarrollo de estructuras metálicas, recipientes a presión, tuberías para el transporte de crudo, obras civiles, entre muchos más procesos en los que su estudio es importante pues su durabilidad crea productos con altos estándares de seguridad y confiabilidad.

Dentro de los múltiples procesos de soldadura existe uno denominado GMAW el cual consiste en abrir un arco eléctrico entre un electrodo continuo de metal de aporte y un charco de soldadura. Todo este proceso se realiza bajo un ambiente gaseoso de presión, el cual se agrega de manera externa. La Soldadura Eléctrica Protegida por Gas (GMAW) es considerada como uno de los procesos de soldadura de mayor productividad en la industria metalmeccánica (Rodríguez Salgado, 2010), debido a sus ventajas tales como: la realización de cordones de soldadura de buena calidad, la alta velocidad de deposición de material y disminuir la afectación por calor en las áreas contiguas a la zona de fusión. (Rowe & Jeffus, 2008).

El proceso de soldadura GMAW se puede clasificar a su vez en tres tipos diferentes de modos de transferencia del metal, los cuales son función de la densidad de energía y la velocidad a la que se deposita el material de aporte, estos son: Corto circuito, globular y Spray.

Conociendo que existen tres métodos de transferencia surge la pregunta ¿Cuál es el nivel de afectación metalúrgica y de las propiedades mecánicas que puede tener sobre la unión realizada, cada modo de transferencia GMAW?

El presente proyecto de investigación pretende estudiar la influencia de los diferentes modelos de transferencia GMAW sobre un acero estructural ASTM A36 el cual es ampliamente

utilizado en estructuras de acero, aleaciones de aluminio, fabricación de piezas metálicas e incluso industria naval. Con la finalidad de determinar la afectación sobre las propiedades mecánicas de la junta tales como la tracción y la dureza y cuantificar su influencia sobre la zona afectada por calor, que puede servir como un elemento de juicio para el diseño de juntas soldadas o también para determinar las medidas de integridad estructural de los elementos soldados a partir de las propiedades mecánicas obtenidas.

El desarrollo de este proyecto comprende una etapa de preparación y aplicación de la soldadura para la creación de las juntas soldadas, la cual consiste en determinar cada una de las variables esenciales (voltaje, amperaje, flujo de gas etc.) para obtener cada modo de transferencia y de esta manera poder realizar el diseño de la junta precalificada según la norma AWS D.1.1/D1.1:2020, posteriormente se generan los diferentes formatos WPS, los cuales especifican de manera detallada todo el proceso y los parámetros para así posteriormente aplicar la soldadura.

La siguiente etapa comprende el desarrollo de diferentes pruebas experimentales de tracción, dureza y microscopia para obtener los diferentes resultados de este proyecto de investigación. La etapa final contempla el análisis de los resultados y discusión de estos, así como la fase final de conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones relacionadas con este proyecto.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Estudiar la influencia de los modelos de transferencia GMAW sobre las propiedades mecánicas y analizar dicha influencia con el estudio de microscopía de la junta soldada.

1.2 Objetivos Específicos

Determinar la resistencia a la tensión de una unión soldada para un acero ASTM A36 bajo tres modelos de transferencia del proceso de soldadura GMAW basados en la norma ASTM E8/AWS B4.0.

Determinar el perfil de dureza desde el metal base pasando por la zona afectada por calor hasta la zona de fusión de la junta soldada, basados en la norma ASTM E384 - 17.

Cuantificar la influencia de la zona afectada por el calor debido a cada modelo de transferencia GMAW mediante el uso de microscopía.

Estimar la mejora o deterioro en las propiedades mecánicas y la microestructura en la junta soldada respecto al material base.

2. Justificación

La ANDI afirma que en la actualidad la industria de la manufactura genera un 12% del PIB de Colombia representando esta la tercera actividad más productiva en nuestro país y los procesos de construcción un 7% al PIB (ANDI, n.d.) siendo estos sectores los que utilizan en su mayoría procesos de soldadura.

Según la AWS A3.0 (American Welding Society) existen más de 87 procesos de soldadura disponibles (American Welding Society, 2020a), sin embargo, en el mercado actual la mayoría de procesos se realizan mediante el modelo de transferencia GMAW debido a su bajo costo y alta velocidad, por esto se propone desarrollar un proyecto de investigación que permita diferenciar el nivel de afectación de los tres modos de transferencia del proceso GMAW, y su posible aplicación en diferentes escenarios industriales, teniendo en cuenta como principales factores el nivel de afectación a la microestructura y las propiedades mecánicas de una junta soldada de acero ASTM A36.

Este trabajo de investigación pretende originar mejoras en el desarrollo de la economía e industria del país a partir del conocimiento producido por la investigación gracias a que se podrán generar bases para la elección del modo de transferencia más adecuado según la aplicación requerida.

Establecer bases de investigación para modelos de transferencia GMAW permite a futuro la ejecución de diferentes proyectos de estudio para otros procesos, generando un mayor aporte a la industria manufacturera y metalmecánica, y beneficiando los diferentes procesos de producción en donde sea necesario el uso de la soldadura.

3. Marco Conceptual

3.1 Procesos de Soldadura

La AWS reconoce 87 procesos de soldadura y unión (American Welding Society, 2020a), los cuales se encuentran estandarizados y calificados por cada una de las normas que la AWS crea. Se hará hincapié en los procesos de soldadura de fusión por arco eléctrico, de los cuales se mencionaron cinco de los procesos más frecuentemente usados en la industria de la soldadura.

3.1.1 SMAW

Shielded Metal Arc Welding. Soldadura Metálica por Arco Revestido por sus siglas en inglés, es un proceso de soldadura que produce la unión de dos o más metales, debido a la interacción de un arco eléctrico entre un electrodo revestido y un metal base.

El proceso SMAW crea una atmosfera inerte originado por la descomposición del revestimiento del electrodo sin la aplicación de presión y con adición de metal de aporte proveniente del electrodo (American Welding Society, 2020a).

3.1.2 FCAW

Flux Cored Arc Welding. Proceso de soldadura que produce un arco eléctrico formado entre un electrodo alimentado continuamente, que es el metal de aporte, y produce el charco de soldadura. En el núcleo del alambre tubular existe un fundente el cual al fundirse produce un gas que protege el metal líquido cuando el arco este encendido, el proceso puede tener o no protección adicional suministrándole un gas externamente (American Welding Society, 2020a).

3.1.3 GTAW

Gas Tungsten Arc Welding. Proceso de soldadura que usa un arco entre un electrodo de tungsteno (No consumible) y el charco de soldadura. El proceso se lleva a cabo con la utilización

de un gas inerte que actúa como revestimiento y estabilizador del arco eléctrico y sin la aplicación de presión (American Welding Society, 2020a).

3.1.4 SAW

Submerged Arc Welding. Proceso de soldadura automático, en el que un alambre desnudo es alimentado continuamente hacia la pieza, se caracteriza porque el arco se mantiene protegido por una capa de flujo granular, la cual es suministrada a través de una tolva que se desplaza delante del electrodo. Este proceso se realiza sin presión y con metal de relleno proveniente del electrodo (American Welding Society, 2020a).

3.1.5 GMAW

Gas Metal Arc Welding. Es un proceso de soldadura en el que la fusión se produce por calentamiento con un arco eléctrico entre un alambre sólido metálico de aporte continuamente alimentado y el charco de soldadura. El proceso utiliza un gas inerte suministrado externamente, el cual se encarga de crear un ambiente que protege y estabiliza el arco eléctrico (American Welding Society, 2020a).

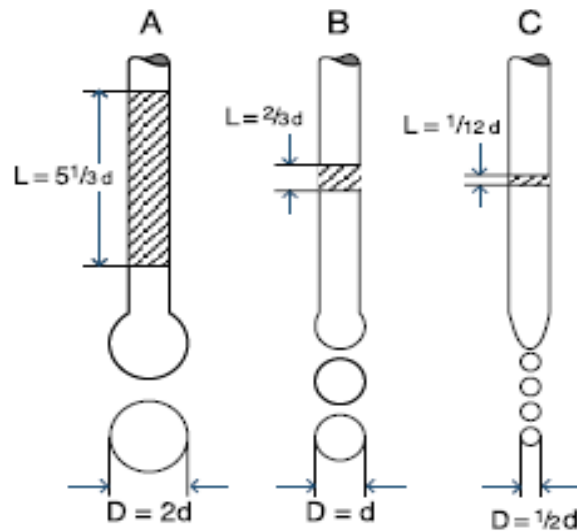
Este proceso ofrece varias ventajas como son: alta velocidad, una mayor tasa de deposición horaria, su capacidad para soldar materiales tanto ferrosos como no ferrosos, la facilidad que otorga para trabajar en cualquier entre otras características que hace que sea este el proceso elegido por la mayoría de los soldadores en el mundo y es por ello lo que se decide abordar esta forma de soldar sobre las otras disponibles en la ingeniería.

El proceso de soldadura GMAW permite desarrollar tres modos de transferencia de metal que se pueden obtener variando el voltaje, amperaje y tipo de gas. La transferencia de metal fundido ocurre desde el electrodo hasta la soldadura, los modos de transferencia de metal son corto circuito, globular, spray. en la Figura 1 se muestra de forma comparativa la manera en cómo se

aplican los diferentes modelos de transferencia sobre una junta, los cuales se obtienen como función del diámetro del microalambre.

Figura 1

Modos de transferencia de metal de aporte sobre una junta soldada.



Nota. La imagen representa la forma en que varía el tamaño y consumo del metal de aporte por cada gota de metal fundido transferido al pozo de soldadura (A) globular (B) Corto circuito (C) Spray. Adaptado de *Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura* (p. 84) [Imagen], por Indura, 2020 (<https://www.indura.cl/Web/CL/Menu/100>).

3.1.5.1 Globular. Es la transferencia de metal fundido en gotas de tamaño grande desde un electrodo consumible a través de un arco. Existe una transición en donde la transferencia por corto circuito finaliza y empieza la transferencia globular. La cual se caracteriza por dar una apariencia de grandes gotas fundidas de forma irregular de mayor tamaño al diámetro del electrodo (Lincoln, 2014 & American Welding Society, 2020a).

La separación de las gotas se debe al gran tamaño de estas, las cuales se depositan en el metal base debido al peso de las gotas que vencen la tensión superficial que la tiende a sujetar al

electrodo. Este modo de transferencia garantiza buena penetración en la junta soldada por eso, es usado con frecuencia en espesores mayores a 10 mm (INDURA, n.d.).

3.1.5.2 Corto Circuito (GMAW – S). Modo de transferencia en la que el metal fundido de un electrodo consumible se deposita durante corto circuitos repetidos, el metal fundido no se traspa a través del arco, sino que se deposita cuando el electrodo toca el metal base. Se caracteriza por tener una baja entrada de calor en la zona de fusión de la unión soldada lo cual reduce las distorsiones y los efectos metalúrgicos perjudiciales al mínimo. La transferencia ocurre cuando el electrodo está eléctricamente en corto circuito y alcanza hasta 200 o más cortos circuitos por segundo produciendo un arco muy estable debido al bajo nivel de energía (INDURA, n.d.).

3.1.5.3 Transferencia Spray. Modo de transferencia de mayor energía debido a que la tasa de deposición de metal fundido ocurre a alta velocidad en partículas muy finas a través del arco, la tasa de deposición es de 100 a 300 gotas de metal por segundo.

Este modo de transferencia utiliza altos valores de corriente y voltaje, con el cual se logra que el material fundido sea impulsado axialmente en forma de gotas desde la punta del electrodo, de manera colineal con el eje del electrodo a lo largo del arco debido a que la fuerza electromagnética es mayor a la tensión superficial de la gota, su aplicación se centra en secciones del material más gruesas y para uso en juntas de soldadura de tipo ranura (INDURA, n.d.).

Para lograr este modo de transferencia se recomienda la utilización del gas de protección argón o mezclas de gas Ar-CO₂. A su vez existe una variante del modo de transferencia Spray denominada transferencia spray arco pulsado.

3.1.5.3.1 Arco Pulsado. (GMAW – P). Variación del modo de transferencia spray, en el cual la corriente de soldadura tiene una frecuencia entre un nivel de corriente pico alto a un bajo nivel de corriente, la transferencia ocurre durante el nivel máximo de alta energía en forma de una

sola gota fundida. Este modo de transferencia se desarrolló para eliminar los defectos de fusión incompletos y disminuir la salpicadura de la soldadura. (Lincoln Electric Company, 2014).

3.2 Materiales

Se pueden clasificar los materiales que se encuentran en el entorno que rodea al ser humano en cinco grupos, metales cerámicos, polímeros, semiconductores y materiales compuestos (Askeland, 2021). Cada uno de estos tipos de materiales estudiados poseen una estructura y serie de propiedades distintas, debido al alcance del proyecto se hizo énfasis en los materiales metálicos.

3.2.1 Metales

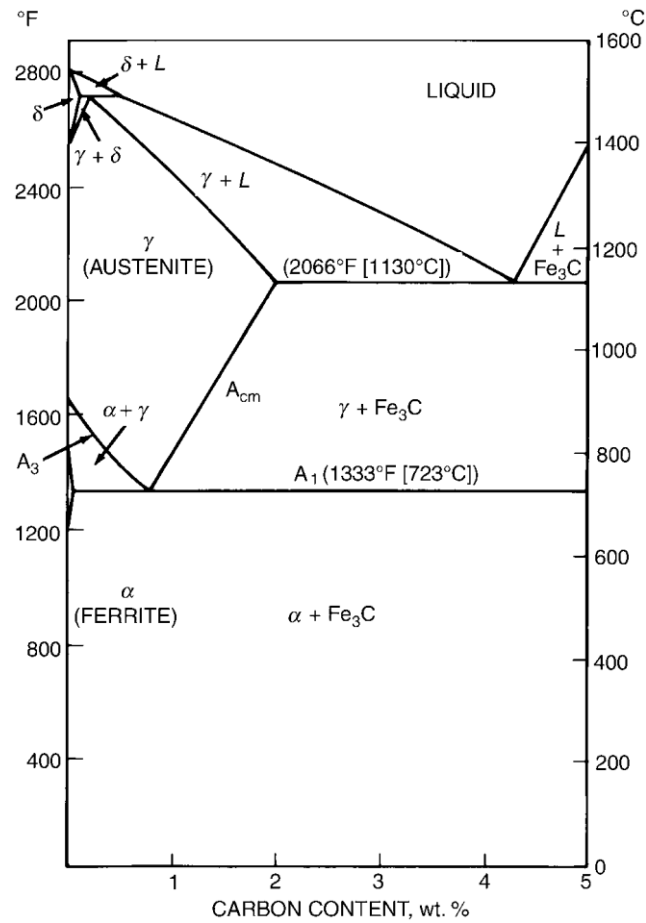
Son excelentes conductores de la electricidad y la energía térmica, tienen alta resistencia y también alta rigidez. Además de lo anterior son dúctiles y son resistentes al impacto. Sus principales aplicaciones se dirigen a la parte estructural o de carga. Se pueden combinar dos o más metales para producir una aleación, la cual puede proporcionar mejores propiedades para alguna aplicación deseada (Askeland, 2021). Los metales pueden clasificarse de diversas formas una de ellas es clasificarlos en ferrosos y no ferrosos. Los primeros tienen como elemento base el hierro, en cambio los segundos no poseen este elemento en su composición, para este trabajo de investigación se hará énfasis en un tipo de metal ferroso el cual es el acero.

3.2.1.1 Aceros. Aleación de hierro con una cantidad de carbono entre 0.03% y 1.075% en peso de su composición. No se debe confundir el acero con el hierro pues el segundo es un material duro y tenaz. (Black & Kohser, 2019).

El diagrama hierro-carbono mostrado en la Figura 2 representa las transformaciones que sufren los aceros al carbono con la temperatura. En este caso, se desea analizar mayormente los aceros hipotectoides que según el diagrama Hierro-Carbono tienen un contenido inferior a la composición eutectoide (0.77%), el cual es una mezcla de ferrita más perlita.

Figura 2

Diagrama de fases de la aleación hierro-carbono.



Nota. Adaptado de *Iron-Carbon Phase Diagram* (p. 123), por Welding Handbook Committee, 2001, AWS.

Debido a la gran variedad de aceros que existen, el enfoque de esta investigación se remitirá solo al acero utilizado como material base. Un tipo de acero estructural el cual tiene excelentes propiedades de resistencia de tensión, compresión, rigidez y elasticidad. Ya que es un acero que puede soportar grandes esfuerzos y dar mayor seguridad a las estructuras.

3.2.1.1.1 Acero ASTM A36. Es un tipo de acero que pertenece al grupo de aceros al carbono y es utilizado en abundancia para la construcción de estructuras industriales y civiles en todo el mundo, también usado en aplicaciones más generales como el uso en artículos de la

construcción y la ingeniería. Es un acero muy versátil pues su producción se da en formas muy variadas como láminas, barras, tubos y perfiles estructurales. Su composición se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1

Elementos aleantes del acero ASTM A36.

%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cu
0.26	...	0.04	0.05	0.4 (máx.)	0.20

Nota. Composición química exigida para el acero ASTM A36. Adaptado de *Chemical Requirements* (p. 3), por American Society for Testing and Materials, 2019, Standard Specification for Carbon Structural Steel ASTM A36/A36M -19.

Según la ASTM, las propiedades de este tipo de acero son las relacionadas en la Tabla 2.

Tabla 2

Propiedades Mecánicas del Acero ASTM A36.

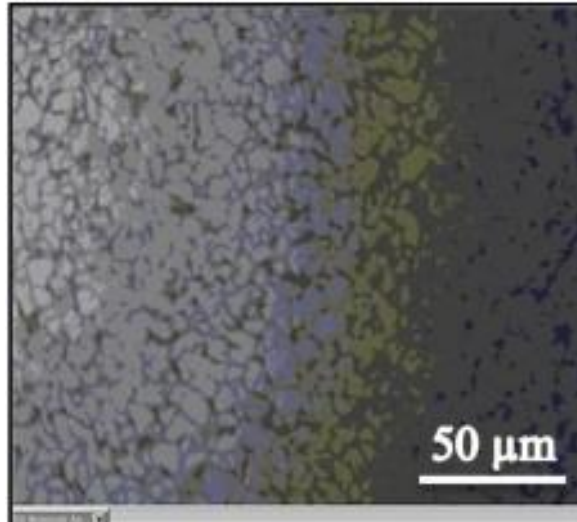
Punto de Fluencia		Resistencia a la tensión		Mínima Elongación	
Ksi	[Mpa]	Ksi	[Mpa]	En 2 pulgadas min%	En [50 mm] min%
36	250	58 - 80	[400 – 550]	23	23

Nota. Adaptado de *Tensile Requirements* (p. 2), por American Society for Testing and Materials, 2019, Standard Specification for Carbon Structural Steel ASTM A36/A36M -19.

La microestructura del acero estructural ASTM A36, se muestra en la Figura 3, dicha micrografía fue realizada con un microscopio óptico Epihot Nikon con un lente 200X, además se debe tener en cuenta que esta imagen fue tomada en un acero al cual no se le había realizado ningún tratamiento térmico. La microestructura que se puede observar en la imagen es una estructura que consiste en granos de ferrita y en algunas locaciones se evidencian colonias de perlita (Shibe & Chawla, 2018).

Figura 3

Microestructura del acero ASTM A36.



Nota. Adaptado de “*Characterization of Fe-C-Cr Based Hard facing Alloys*” (p. 2213), por V. Shibe y V. Chawla, 2018, The Indian Institute of Metals (71).

3.3 Soldabilidad

Es la cualidad que tiene un material para unirse por medio de la soldadura, se deben tener en cuenta aspectos como el diseño de la pieza a soldar, la composición química del material a soldar. Un material soldable es aquel que puede conseguir una soldadura sana de modo que cumpla con las exigencias prescritas (American Welding Society, 2020a).

3.3.1 Metal Base

Es el metal o aleación que será soldado o cortado, se usa principalmente el acero, acero aleado, acero inoxidable, aluminio y cobre en el proceso de soldadura GMAW (Viada-Estevez & Fernandez-Columbie, 2020). Se debe tener presente la composición química y el contenido de carbono equivalente del metal base, para tener claro qué tipo de metal de aporte utilizar y que tratamientos térmicos hacer, antes y después de aplicar la soldadura.

3.3.2 *Metal de Aporte*

Es el material ya sea metal o aleación que se añade para realizar la unión soldada, en el caso del proceso GMAW, su elección depende de diversos factores como, clasificación del electrodo, propiedades mecánicas, composición química, criterios de aceptación, entre otros. Se pueden utilizar microalambres sólidos y tubulares (American Welding Society, 2020a).

3.3.2.1 Alambre Sólido. Es un alambre macizo de sección transversal circular y altamente recomendados especialmente para aceros de bajo carbono. Son especialmente seleccionados porque no dejan salpicaduras sobre el cordón y son de enfriamiento rápido, por eso son más utilizados en materiales de poco espesor.

La AWS clasifica el material de aporte usando una combinación de números y letras. Por ejemplo, ER-70S-6, la primera letra significa electrodo para soldadura por arco, la segunda es el tipo de electrodo en este caso electrodo tipo alambre, los dos números siguientes indican la resistencia a la tracción en miles de libras/pulgada cuadrada del material de aporte, la S indicaría el tipo de alambre sólido o tubular y finalmente el 6 indica la composición química especial del electrodo. (American Welding Society, 2021).

3.3.2.2 Alambre Tubular. Conocido también como alambre para MIG tubular, este proceso utiliza como material de aporte un alambre tubular, el cual contiene el fundente al interior del alambre, cuando se utiliza este tipo de alambre puede ser requerido o no el uso de una protección gaseosa.

La codificación establecida para este tipo de alambre según la AWS será por ejemplo E71T-1C, en el que los únicos cambios serían la T que indicaría alambre de tipo tubular con núcleo fundente. El dígito después del guion indica la posición y uso adecuado del electrodo, (American

Welding Society, 2020a) finalmente la C indicaría el gas de protección recomendado para utilizar el electrodo tubular.

3.3.3 Zona de Fusión

Es una mezcla cuyos componentes son el metal base fundido y metal de aportación depositado, si se utiliza. En algunas ocasiones el metal de soldadura se compone solamente de metal base fundido y estas se conocen como soldaduras autógenas.

Sin embargo, gran parte de los procesos de soldadura por arco eléctrico utilizan un material de aporte. Para obtener propiedades mecánicas similares a las del metal base, con frecuencia se agrega un material de soldadura que tenga una composición química parecida a la del metal base. Aunque no siempre es obligatorio, pues a veces la composición química del metal de soldadura se diseña para que sea diferente de la del metal base (Alatorre et al., 2014).

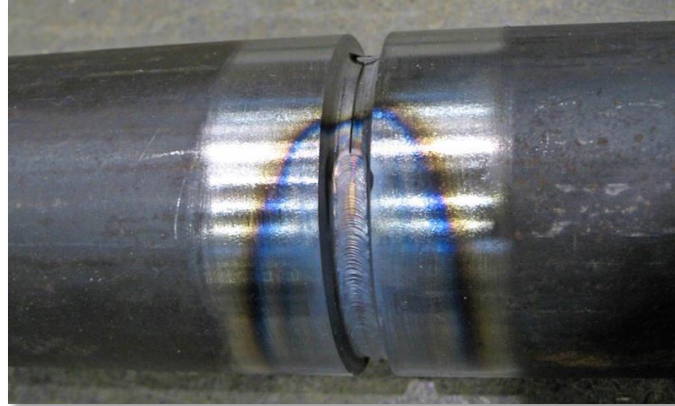
3.3.4 Zona Afectada por Calor

Es la porción de metal base en la cual las propiedades mecánicas y la microestructura se alteran por el calor inducido por la soldadura o el corte térmico (American Welding Society, 2020a).

Una zona afectada por calor significa problemas mecánicos y de resistencia a la corrosión, la extensión de la ZAC depende de la cantidad de calor aplicada, la duración de la exposición y el tipo de zona afectada puede observarse en la Figura 4, un ejemplo de una zona afectada por el calor cuando se sometió a una gran exposición de calor.

Figura 4

Zona de fusión y ZAC en junta soldada.



Nota. Adaptado de *Zona afectada por el calor* [Fotografía], por Área Académica de Metalurgia, (<https://www.areametalurgia.com/post/qu%C3%A9-es-la-zona-afectada-por-el-calor-zat>).

3.3.5 Discontinuidad

Una discontinuidad es la interrupción física, de la estructura típica de un material, como la falta de homogeneidad en sus características mecánicas, metalúrgicas o físicas. Una discontinuidad no es necesariamente un defecto. Las discontinuidades que afectan a la soldadura en sus propiedades, pudiendo causar falla en servicio son llamados defectos

3.3.5.1 Defecto. Es una discontinuidad que por su tamaño, forma, orientación y localización no es aceptada por el estándar de soldadura aplicable. Lo que indica que el elemento donde es encontrado no es apto para su uso o servicio (Sumesh et al., 2017).

3.3.5.1.1 Porosidad. Discontinuidad formada por gas atrapado durante la solidificación del metal de soldadura. A su vez las porosidades pueden clasificarse en relación con su tamaño y ubicación dentro de la junta, como porosidades uniformemente dispersas, porosidades agrupadas, porosidades alineadas y porosidades ventriculares (Sumesh et al., 2017).

3.3.5.1.2 Inclusión. Es causada debido a la insuficiente protección de arco o cuando el diseño de la junta no es el adecuado, y suele producir inclusiones de sólidos no metálicos que quedan atrapados en el metal de soldadura.

3.3.5.1.3 Fusión Incompleta. Es una discontinuidad bidimensional que se genera por la falta de unión entre el metal base y los cordones de soldadura. Regularmente ocurre por un bajo nivel de calor de aporte o porque falta acceso a todas las superficies que alcanzaran su temperatura de fusión.

3.3.5.1.4 Falta de Penetración. Ocurre cuando el metal de la soldadura no se extiende de forma completa por todo el espesor de la junta, y se produce por falta de aporte de calor o un mal diseño de la junta. La falta de penetración implica una fusión incompleta (Amo & Durán, 1998).

3.3.5.1.5 Fisura. Ocurren en el metal base y en el metal de soldadura cuando las tensiones localizadas exceden la resistencia última del material, se clasifican según su proceso en fisuras en caliente o frío. O según su forma en longitudinales, transversales, cráteres, de garganta, de borde y de raíz.

3.3.6 Precalificación del Procedimiento

Las especificaciones del procedimiento de soldadura que son precalificadas son exentas de los ensayos de calificación del procedimiento de soldadura. Para que una junta se considere precalificada deberá cumplir con todos los requerimientos, exigidos en la sección 5 de la norma AWS D1.1/D1.1M:2020 y para propósito de esta investigación se consideran complementados las variables que no son mencionadas, ya que son tomadas de valores estándar ya sea los definidos por la norma o por los proveedores de los materiales.

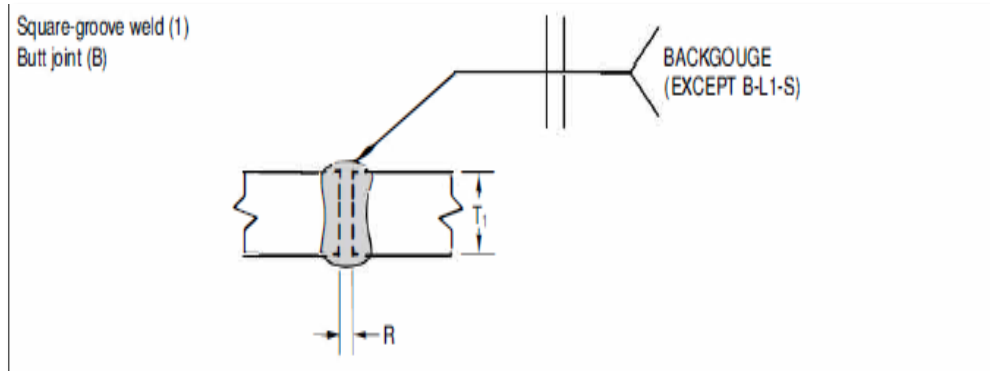
El alcance propuesto para este proyecto contempla el uso de las juntas precalificadas descritas a continuación, por tanto, el objetivo fundamental consiste en revisar los niveles de afectación en las propiedades mecánicas y la zona afectada por calor de la junta soldada.

3.3.6.1 Junta Precalificada a Tope de Ranura en Escuadra y de Penetración Completa en la Junta. La soldadura de “ranura a tope en Escuadra” de penetración completa en la junta, se

puede utilizar sin realizar la prueba de calificación y siguiendo los requerimientos de medidas y geometrías mostradas en la Figura 5 (American Welding Society, 2020b).

Figura 5

Junta a tope de ranura en escuadra .



Nota. La junta a tope de penetración completa en la junta no se realiza con biselos debido al espesor del material base, las demás cotas mostradas se toman de acuerdo con los valores indicados en la figura 5.1. Adaptado de *Prequalified CJP Groove Welded Joint Details* (p. 82), por American Welding Society, 2020, Structural Welding Code-Steel AWS D1.1/D1.1M:2020.

3.4 Ensayo de Laboratorio

Es un procedimiento (normalmente una operación técnica) que determina las características de un material o producto en un laboratorio o en sitio. A través de un ensayo se puede verificar las propiedades de un material. Los datos recogidos en el laboratorio son comparados y analizados para el diseño y el análisis de las estructuras soldadas, además los ensayos son aplicables también para la calificación de los procedimientos (PQR) y del personal de soldadura (WPQ).

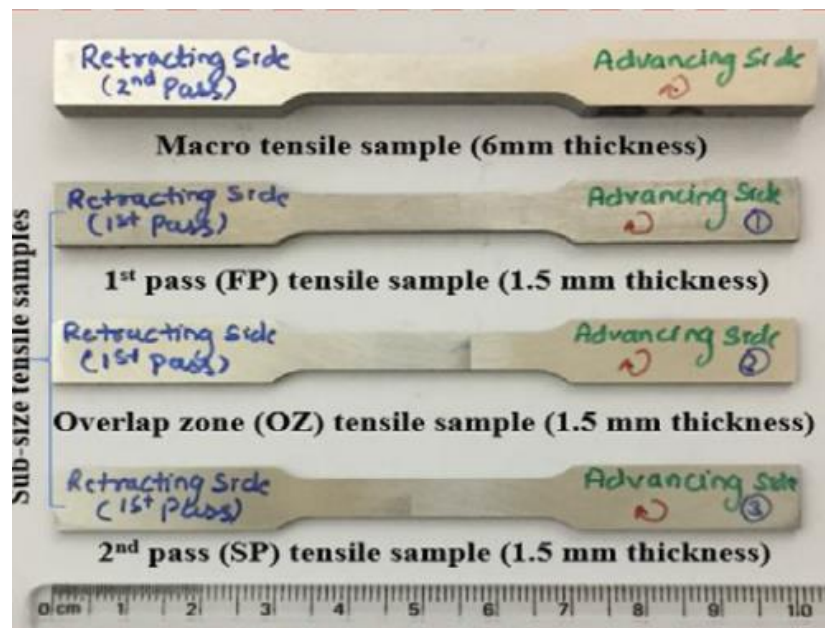
3.4.1 Ensayo de Tracción

Un ensayo de tracción proporciona información sobre la resistencia y la ductilidad del material bajo esfuerzos de tracción uniaxial, con este método se puede calcular la resistencia a la

tracción, resistencia a la fluencia, elongación y el porcentaje de reducción de área del material. Cuando se realiza el ensayo de tracción de una unión soldada como se ve en la Figura 6, se debe emplear con el metal base y con el metal de soldadura juntos para evaluar la eficiencia de la junta, y solamente la resistencia a la tracción puede ser determinada. En este trabajo de investigación se abordará la norma ASTM E8/E8M – 16ae1, para realizar este ensayo (ASTM International, 2016).

Figura 6

Probeta del ensayo de tracción para una junta soldada.



Nota. Adaptado de “Effect of tool tilt angle on weld joint strength and microstructural characterization of double-sided friction stir welding of AZ31B magnesium alloy” (p. 135), por A. Thakur, V. Sharma y S. Sing, 2021, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology (35).

3.4.2 Ensayo de Dureza

Ensayo que mide la resistencia de la superficie del material a la penetración por un objeto duro. Para ello se debe introducir un indentador de forma cónica, piramidal o esférica, con una cantidad de fuerza durante cierto tiempo en el material, generando una indentación sobre la superficie de la probeta, la medición de dicha huella es una expresión de la dureza del material.

Para la medición de dureza en la zona afectada por calor o en áreas del metal de soldadura específicas se utilizan ensayos de micro dureza Knoop y/o Vickers. (Díaz & Rojas, 2014).

3.4.2.1 Dureza Brinell. Se identifica por su indentador de forma esférica de 10mm de diámetro como se observa en la, el cual está compuesto usualmente por carburo de tungsteno. Para calcular la dureza, luego de aplicar la carga sobre la muestra a ensayar, se mide el diámetro medio del casquete en la superficie y éste se utiliza como base para el cálculo del número de la dureza Brinell.

El rango de cargas utilizado es de 3000 kgf para materiales duros y una carga de 500kgf o 1500kgf para materiales blandos o secciones finas, sin embargo, no es raro utilizar otro rango de cargas (ASTM International, 2014).

3.4.2.2 Dureza Knoop. Utiliza un indentador de diamante de base rómbica y forma piramidal, los ángulos de los bordes de sus caras son de $A=172^{\circ}30'$ y $B=130^{\circ}$, se utiliza especialmente para determinar la dureza de materiales muy frágiles o láminas delgadas. Cuando se determina la dureza con microindentaciones el rango de cargas aplicadas es 1 gf a 1000 gf y sus diagonales suelen medirse con un microscopio luego de haberse aplicado la carga durante una cantidad de tiempo que depende de la dureza del material. (ASTM International, 2017).

3.4.2.3 Dureza Rockwell. Es uno de los métodos más usados para medir la dureza ya que permite obtener el valor de dureza directamente en la pantalla. Para indentar el material puede utilizarse dos tipos de indentadores, ya sea uno de forma cónica de diamante para materiales más duros o en forma esférica hecho de carburo de tungsteno, especial para aceros de baja resistencia.

Para determinar la dureza, se aplica una carga inicial de 10 kgf que fija el indentador en el material y luego se aplica una carga mayor que depende del tipo de escala Rockwell que se utilice. Posteriormente a la aplicación de la carga se obtiene el número de dureza Rockwell, que es

proporcional a la diferencia de la indentación entre la carga mayor y la carga menor (ASTM International, 2014).

3.4.2.4 Dureza Vickers. Utiliza un microindentador de diamante el cual tiene una base cuadrada y forma piramidal con ángulos de cara de 136° . El rango de cargas que se pueden aplicar es de 1 [gf] a 1000 [gf], por ello se utiliza para evaluar la dureza de materiales frágiles o muy finos.

Para medir la dureza, se utilizan lentes de aumentos a escala micras, debido al tamaño de sus microindentaciones y se deben medir las longitudes de sus diagonales, las cuales son esenciales para determinar la dureza (ASTM International, 2017).

Este fue el ensayo de dureza realizado, debido al tipo de indentador con el que contaba el tribómetro y los criterios seguidos para la realización del ensayo fueron los exigidos por la norma ASTM E384 – 17 (ASTM International, 2017).

3.4.3 Microscopia Metalográfica

La metalografía se define como la preparación de probetas para realizar una examinación microscópica seguida de un estudio de la microestructura con relación a las propiedades mecánicas y físicas y del método de fabricación de un material particular. Para desarrollar un ensayo metalográfico se debe realizar los siguientes pasos; corte, montaje, desbaste, pulido, ataque químico y análisis microestructural. Para la realización de las muestras metalográficas de este ensayo se aplicará la norma ASTM E3 – 11 (ASTM International, 2011).

3.5 Diseño Experimental

Es una estrategia para la planificación de experimentos. Un experimento que sea realizado debidamente permite un adecuado análisis de resultados y una adecuada interpretación de los resultados. Los experimentos factoriales son de gran importancia ya que son mucho más eficientes

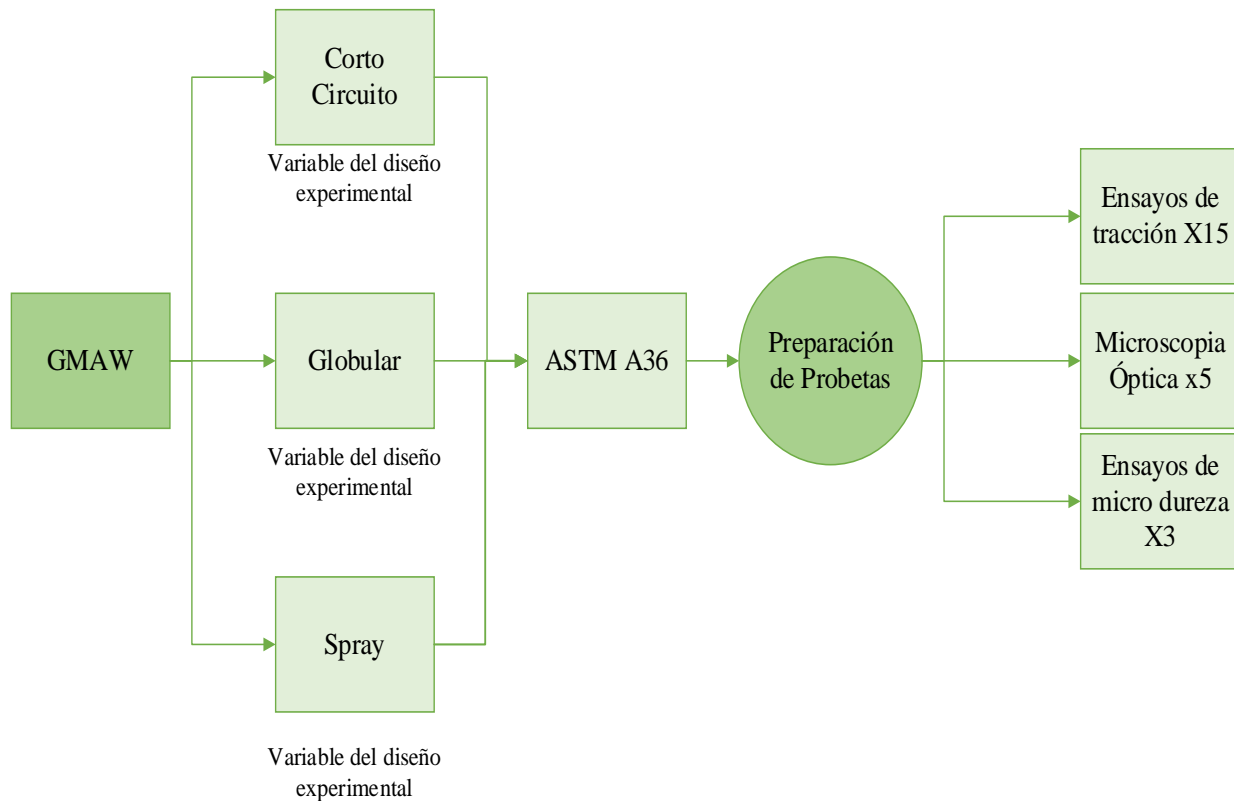
y efectivos que los experimentos intuitivos. Están bien ajustados pues permiten determinar que un factor procede en forma diferente a niveles diferentes de otros factores (Taguchi, 1987).

Para una adecuada comprensión, se plantea el diseño experimental elaborado para este proyecto de investigación el cual se muestra en la

Figura 7. En dicha figura se observa el proceso de soldadura a utilizar, las variables experimentales del diseño experimental serán los modos de transferencia y finalmente dichas variables serán evaluadas y caracterizadas a través de los ensayos de tracción, micro dureza y microscopía. Todos estos ensayos serán realizados según la norma ASTM correspondiente.

Figura 7

Diseño experimental planteado.



Nota. El diagrama de flujo explica el diseño experimental que se siguió y el número de probetas a utilizar por cada uno de los ensayos realizados.

4. Marco Teórico

4.1 Antecedentes Internacionales

4.1.1 “Efecto de la Composición Química del Metal de Aporte y del Calor Aportado Sobre la Microestructura y las Propiedades Mecánicas de Juntas Soldadas de Aceros Inoxidables Dúplex.” (Zappa et al., 2017).

El objetivo de este trabajo fue estudiar la influencia de la composición química del metal de aporte y el calor aportado sobre la microestructura y las propiedades mecánicas en juntas soldadas de cañerías de acero inoxidable dúplex. Mediante el proceso de soldadura semiautomático bajo protección gaseosa, soldados con alto y bajo calor aportado. De cada probeta se extrajeron muestras donde se determinó la composición química, se realizó la caracterización microestructural y se determinaron las propiedades mecánicas (dureza, tracción y Charpy-V).

La importancia para este proyecto de investigación radica en que permite ver la relación que existe entre la composición química del metal de aporte que es una variable de entrada fundamental en cualquier proceso de soldadura y como este afecta la microestructura y propiedades mecánicas de la junta.

Todos los procesos plasmados en esta investigación se realizan bajo el modelo de transferencia GTAW el cual es otro modo que se basa en la utilización de un electrodo permanente de Tungsteno, a pesar de ser un modelo de transferencia diferente al de este trabajo permite observar la influencia de variables como el de metal aporte sobre la microestructura y la importancia de este al momento de elegir la manera más óptima de realizar una soldadura.

4.1.2 “Estudio Comparativo de la Soldabilidad en Aceros (ASTM A36, A588 Y A572) Mediante el Proceso FCAW”. (Calderón, 2014).

Este trabajo de investigación estudia la soldabilidad de los aceros ASTM A36 el cual es el mismo material base de esta investigación y por ende es importante conocer su comportamiento ante otros procesos de soldadura como el FCAW ya que permitió generar puntos de comparación respecto a los resultados que se obtuvieron en esta investigación, además el autor de la tesis describe exhaustivamente todo el procedimiento para la evaluación de los cordones de soldadura conforme a la norma especificada (AWS B4.0M 2000) el cual será el estándar que se utilizará para los diferentes ensayos y estudios microestructurales de esta investigación.

4.1.3 “Análisis del comportamiento mecánico y microestructural de las transformaciones de fase en la zona afectada por el calor (ZAC) en juntas soldadas a tope para acero estructurales por medio del proceso gas metal arc welding (GMAW) y con alambre para soldar ER70S-6” (Ordoñez Morales et al., 2013).

El artículo hace énfasis en mostrar los cambios microestructurales que causa el proceso de soldadura GMAW en la zona afectada por calor, en el metal base y en las propiedades mecánicas del cordón de soldadura, para ello se hicieron pruebas de tracción, un barrido de micro dureza, pruebas de doblado y ensayos de impacto en aceros estructurales como son el ASTM A36, ASTM A516 grado 70 y ASTM A131.

Los procedimientos seguidos para realizar los ensayos de tensión, micro dureza y microscopía electrónica de barrido de la junta soldada serán similares a los procedimientos que se realizaron en esta investigación y permiten conocer a fondo los criterios y normas que se deben cumplir, para obtener resultados aceptables según la norma y el ensayo que corresponda.

Las conclusiones de esta investigación indican, que en la zona afectada por calor se pueden identificar dos tipos de granos de diferente morfología y tamaño, debido al ciclo térmico del proceso de soldadura.

4.2 Antecedentes Nacionales

4.2.1 “Influencia de la Transferencia en la Resistencia y Dureza de las Uniones Soldadas Obtenidas por el Proceso de Soldadura GMAW.” (Patricia & Olaya, 2012).

Este trabajo de investigación describe el comportamiento del proceso de soldadura GMAW con alambre compuesto de núcleo metálico, en uniones soldadas de acero ASTM A131, grado AH32, utilizando dos composiciones de gas de protección y las transferencias de arco pulsado y corto circuito, además se evalúan las propiedades mecánicas y las microestructuras indicando que se logra mayor resistencia a la tensión y un perfil de dureza más homogéneo utilizando la transferencia de arco pulsado.

Esta es una investigación con un enfoque similar a la planteada en este trabajo de grado sin embargo aporta más información sobre el modo de transferencia spray pulsado, el cual es conocido por qué no afecta térmicamente el material en comparación con los modos de transferencia en esta investigación. Es importante también resaltar las pruebas de fractura que realizaron, pues permiten conocer la ductilidad de la junta soldada.

4.2.2 “Influencia de la Transferencia por Arco Sobre la Microestructura de Uniones Soldadas Usando Arco Pulsado.” (Patricia & Olaya, 2013).

Este artículo estudia la influencia de la transferencia de arco pulsado en el proceso de soldadura por arco eléctrico con gas de protección (GMAW, Gas Metal Arc Welding), sobre la microestructura, utilizando dos composiciones de gas de protección y los modos de transferencia de arco pulsado y corto circuito. Se caracterizó la microestructura y las propiedades mecánicas y

los resultados indican que se logra una mayor resistencia a la tensión y un perfil de dureza más homogéneo utilizando el modo de transferencia de arco pulsado, debido a que con esta existe una distribución más uniforme del tamaño de grano en las tres zonas de soldadura.

La presencia de ferrita acicular fue una constante en todos los tratamientos evaluados, mientras la ferrita widmstätten se presentó con preferencia en la transferencia de arco pulsado. Como el proceso que se estudió en este artículo es similar al que se estudiará en esta investigación (GMAW) los valores obtenidos y los parámetros que se consideran oportunos para ver la influencia en la microestructura se tienen que tomar en cuenta para tener una buena base desde donde comenzar esta investigación.

4.2.3 “Efectos de los active flux sobre soldaduras GMAW aplicadas a un acero AISI/SAE 1020.” (Madariaga Rosas et al., 2020).

Esta investigación es un trabajo conjunto entre la Universidad Industrial de Santander y la Universidad Federal de Minas (Belo Horizonte, Brasil) en donde se estudia el efecto de la variante active flux en el proceso de soldadura GMAW, esta consiste en la adición de una fina capa de óxidos o haluros en polvo (CaCO_3 y SiO_2).

En la investigación se logra demostrar que si existe una influencia en los cambios morfológicos como lo puede ser la penetración de la soldadura y alteraciones en los modos de transferencia. Conocer acerca de los resultados sobre los efectos morfológicos del cordón permite a esta investigación observar la manera cómo se analizaron los diferentes resultados y la manera en la que logran establecer la relación entre el efecto active flux y las características mecánicas y morfológicas de las soldadura, este tipo de análisis entre una variable fundamental (en este caso la capa de óxidos) y los efectos sobre la soldadura evidencia que si es posible encontrar correlaciones

entre parámetros seleccionados que para el caso de esta investigación será los efectos mecánicos y de la zona afectada por calor con respecto al modelo de transferencia utilizado.

La investigación referente muestra de manera clara y precisa la manera de realizar la metodología experimental, es decir el tamaño de la probeta, ubicación del cordón de soldadura, distancias entre el punto de contacto y la probeta entre otras teniendo en cuenta claramente los equipos disponibles con los que estos investigadores cuentan, lo cual sirve como referente para hacer la metodología experimental de este proyecto.

La investigación hace una comparación entre los resultados obtenidos para 3 valores de corriente entre los procesos GMAW-S y GMAW-G permitiendo ver que existen otras maneras de aprovechar el proceso GMAW y mejorar su efectividad abriendo así puntos de comparación a futuro entre los resultados de la investigación y los obtenidos por la mencionada en esta sección.

4.3 Antecedentes Regionales

4.3.1 “Diseño y Calificación de un WPS, PQR y WPQ de Soldadura Según Norma API 1104 Para la Estación de Recolección Campo Escuela Colorado” (Sáenz González & Ramirez Celis, 2010).

El proyecto de grado desarrollado por estudiantes de ingeniería metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander buscaba implementar formatos que permitieran generar mejores controles de los procesos de soldadura en la estación de recolección Campo Escuela Colorado. Los formatos desarrollados fueron los formatos WPS y WPQ.

Los resultados de la investigación permitieron calificar el procedimiento de soldadura, de acuerdo con los requerimientos de la estación de recolección y también permitió calificar las habilidades del soldador al realizar ensayos destructivos y no destructivos como fueron las pruebas de tensión, dobléz, inspección visual, líquidos penetrantes y radiografía industrial.

El aporte de este proyecto a esta investigación fue la importancia de desarrollar el formato de especificación del procedimiento siguiendo lo establecido por un código de soldadura, para registrar todas las variables esenciales y no esenciales que permitan la repetibilidad de la aplicación. Además, debido a que se realizó ensayos de tracción para verificar la calidad de la junta soldada, se puede revisar la metodología que siguieron, para aplicarla en esta investigación.

5. Metodología

5.1 Procedimiento

5.1.1 Adquisición del Acero ASTM A36

El material base utilizado fue una lámina con un espesor de 4,5 [mm] fabricado por la empresa Rizado Steel y se importó de forma directa a Colombia con el proveedor Aceros Steckerl. Las medidas de la lámina usada fueron de 4 pies de ancho por 8 pies de largo, esa longitud era la necesaria, ya que permitía obtener espacio suficiente para obtener las probetas de tracción, las probetas de dureza y obtener las micrografías para cada par de platinas que fueran soldadas por cada modo de transferencia.

Además, se tuvo en cuenta que a cada par de platinas una longitud de aproximadamente 3 [cm] en los extremos, las cuales no se pueden incluir en las probetas, pues en esa longitud el arco eléctrico aún no se estabiliza debido a que se soldó con un proceso de soldadura mecanizado (American Welding Society, 2016).

5.1.2 Corte y Preparación de las Secciones a Soldar.

Para obtener cada par de láminas a soldar, se utilizó el proceso de corte por cizalla hidráulica y se garantizó que las láminas a soldar fueran consecutivas respecto al corte, para ello se realizaron marcas sobre la lámina y poder encontrar fácilmente los pares de láminas

correspondientes y así garantizar una homogeneidad en las propiedades mecánicas del material base.

Luego de cortar la lámina en varias secciones más pequeñas se obtuvieron 12 platinas de la misma longitud y 3 platinas de mayor tamaño, es decir 6 pares de platinas de 15 cm de ancho por 40 cm de largo que fueron las utilizadas para ser soldadas y 3 platinas de 30 cm de ancho por 40 cm de largo, para determinar las propiedades mecánicas del material base. Las láminas mencionadas se muestran en la Figura 8.

Figura 8

Láminas de 15 cm por 40 cm y 30 cm por 40 cm.



Nota. Las láminas más pequeñas fueron las seleccionadas para soldarlas y las más grandes fueron las elegidas para determinar las propiedades mecánicas del metal base.

Como se menciona en la especificación del procedimiento de soldadura WPS (Ver Apéndice A, Apéndice B y Apéndice C) no fue necesario realizar bisel a las láminas ya que la especificación de la junta precalificada permite soldar juntas a tope de penetración completa sin realizar una preparación de la junta.

5.1.3 Elaboración de Formatos WPS

Para la realización de los formatos de especificación del procedimiento de soldadura (WPS), se elaboró el formato basado en el anexo J de la norma AWS D1.1/D1.1:2020 y en la sección 5 de precalificación de procedimientos de la misma norma, dichos WPS se indican en los apéndices A, B y C y se muestran los valores obtenidos de las variables esenciales que se deben considerar cuando se hace una junta soldada. En el Apéndice D, se evidencia la realización del diagrama de flujo que se contempló para precalificar la junta soldada de esta investigación.

5.1.4 Ajuste de Parámetros Esenciales Para la Obtención de los Tres Modos de Transferencia

Para lograr cada modo de transferencia es necesario alcanzar unos valores suficientes de voltaje y amperaje, flujo de gas y distancia entre el metal base y tubo de contacto, que muestren un cambio en la forma del cordón de soldadura aplicado y un cambio en el sonido del equipo de soldadura al iniciar el arco eléctrico que es sinónimo en una variación de la transferencia del material de aporte. Dichos valores se encuentran establecidos de anteriores practicas realizadas por el equipo, sin embargo, se utilizaron seis platinas de prueba para verificar esos valores y comprobar que el cordón no presenta defectos y discontinuidades, luego de su aplicación.

Debido a que se utilizó un sistema de soldadura mecanizado, para que realizará la aplicación de la soldadura, el parámetro de distancia entre el electrodo y tubo de contacto se mantiene constante y también se estableció el valor del flujo de la mezcla de gas argón y dióxido de carbono en 20 [lpm] para el modo de transferencia corto circuito, como se muestra en la Figura 9, lo que permitió que solo fuera necesario variar el voltaje y el amperaje del equipo para lograr cada modo de transferencia. El modo de transferencia por corto circuito se logró para un valor de voltaje promedio de 21 [V] y un amperaje promedio de 198 [A], el flujo de gas utilizado fue de 20

[lpm] y una distancia entre el metal base y tubo de contacto de 15 mm, los valores establecidos en el equipo de soldadura Sweiss Sky Mig 5060, se muestra en la Figura 10.

Figura 9

Mezcla de gases de protección de argón y dióxido de carbono.



Nota. El caudal de la mezcla de gases se configuro en 20 [lpm] para el modo de transferencia corto circuito y 30 [lpm] para el modo de transferencia globular y spray.

Figura 10

Parámetros establecidos para el modo de transferencia en corto circuito.



Nota. Las variables esenciales que se deben establecer primordialmente en el equipo de soldadura son el voltaje y el amperaje.

Para el modo de transferencia globular, se utilizó un caudal de gas de 30 [lpm] y se mantuvo constante la distancia entre el metal base y el tubo de contacto, sin embargo, se tuvo que incrementar los valores de voltaje y amperaje a 20.9 [V] y 239 [A] respectivamente. Para verificar dichos valores se muestra la Figura 11.

Figura 11

Parámetros establecidos para el modo de transferencia globular.



Finalmente, para el modo de transferencia spray, fue necesario incrementar los valores de voltaje hasta 25.5 [V] y disminuir el amperaje hasta 184 [A] para evitar que la lámina se fundiera debido al exceso de calor que se aportaba, del mismo modo que en el modo de transferencia por corto circuito se utilizaron los mismos valores de caudal de gas y distancia entre metal base y tubo de contacto, los valores mencionados anteriormente se muestran en la

Figura 12.

5.1.5 Pruebas de Soldadura Mecanizada

Seis de las platinas cortadas se utilizaron solo para realizar pruebas y conocer los valores de amperaje, voltaje, flujo de gas y distancia del electrodo al tubo de contacto para obtener cada modo de transferencia y un cordón de soldadura que sea aceptado según la norma AWS D1.1 2020.

Figura 12

Parámetros establecidos para el modo de transferencia spray.



El equipo de soldadura utilizado fue el Swiss Sky MIG 5060 se usó en conjunto con un aplicador de soldadura HUAWEI HK12 MAX 3, el cual garantizaba oscilaciones del mismo tamaño, velocidad de avance y una distancia constante del tubo de contacto al material base.

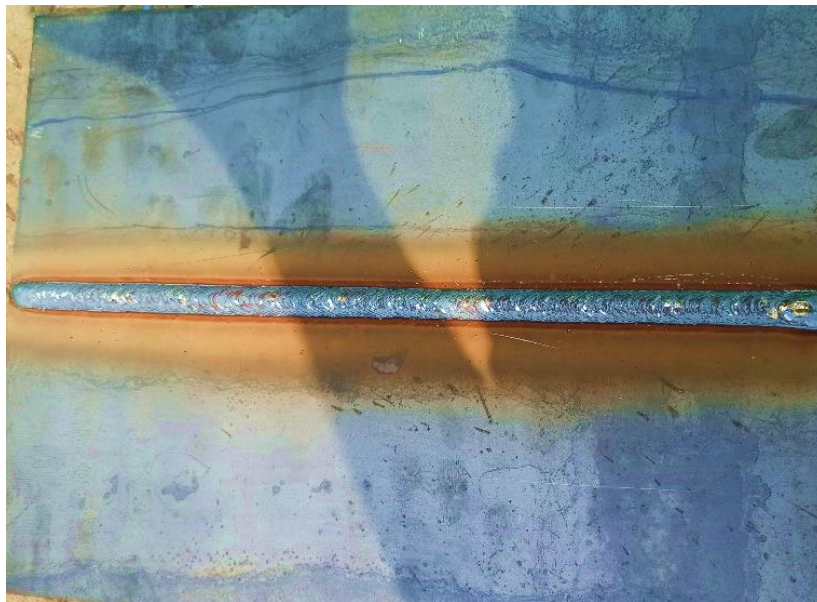
Este conjunto de equipos permitió aplicar la soldadura variando solo los parámetros de amperaje y voltaje, hasta que se garantizaran los valores de variables necesarios para lograr cada modo de transferencia y que se puedan rehacer cuando se aplicarán las soldaduras sobre los tres pares de platinas que serían sometidas a las pruebas de tracción, dureza y ensayos de microscopía.

En la Figura 13 puede observarse la junta soldada, cuando se obtuvo el modo de transferencia por corto circuito, en esa platina no se examinaron discontinuidades y el cordón de soldadura tuvo homogeneidad, debido al proceso de soldadura mecanizado que se utilizó.

En la Figura 14 se muestra la junta soldada, cuando se obtuvo el modo de transferencia globular.

Figura 13

Lámina soldada por el modo de transferencia metálica de corto circuito.



Nota. Uno de los tres cupones de soldadura del cual se obtendrán las probetas de tracción y dureza.

Se observa también el cordón de soldadura y la sombra dejada por el aporte de calor.

Figura 14

Lámina soldada por el modo de transferencia metálica globular.



En la Figura 15, se muestra la junta soldada bajo el modo de transferencia Spray.

Figura 15

Lámina soldada por el modo de transferencia metálica spray.

**5.1.6 Preparación de las Probetas de Tracción Según la Norma ASTM E8**

Para la preparación de la probeta de tracción se revisaron las normas AWS B4.0:2016 en su capítulo 4 para el direccionamiento del corte y de la norma ASTM E8/E8M – 16^a, se siguieron las indicaciones de la norma ASTM E8/E8M – 16^a. En la Tabla 3, se puede observar las dimensiones que se tomaron para una probeta de 6 mm de ancho, estas dimensiones fueron elegidas porque están dentro del rango de espesor que acepta la norma. Es necesario aclarar que existen algunas dimensiones de la probeta de tracción que se pueden ajustar. El espesor de 4,5 [mm], fue la dimensión modificada según la Tabla 3, se puede consultar las dimensiones finales de la probeta de tracción en el Apéndice E.

5.1.7 Preparación de las Probetas de Micro Dureza Según la Norma ASTM E384 - 17

Los tamaños de probeta fueron realizados de modo que se pudiera obtener suficientes microindentaciones en las probetas en la zona de fusión, la zona afectada por calor y el metal base. La norma ASTM E384-17 establece que para microindentaciones la carga que debe aplicarse tiene un rango de 1 a 1000 [gf] y una separación entre huellas de 2,5 veces el tamaño de la indentación.

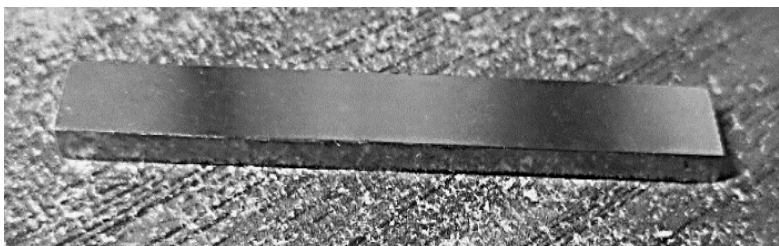
Tabla 3*Dimensiones de la probeta de tracción.*

Dimensiones para la probeta de 6 mm ancho [0.250] mm [in.]	
G – Longitud de Calibre	25,0 ± 0,1 [1,000 ± 0,003]
W - Ancho	6,0 ± 0.1 [0,250 ± 0,005]
T - Espesor	4,5 [0,1875]
R – Radio de filete, min	6 [0,250]
L – Longitud total, min	100 [4]
A – Longitud de la sección paralela reducida, min	32 [1,25]
B – Longitud de la sección de agarre, min	30 [1,25]
C – Ancho de la sección de agarre, aprox.	10 [0,375]

Nota. Medidas representativas de la probeta de tracción de sección transversal rectangular según la norma ASTM E8/E8M – 16a. Adaptado de *Rectangular Tension Test Specimens* (p. 4) por International Association for Tasting and Materials, 2016, Standard Test Methods for tension Testing of Metallic Materials ASTM E8/E8M – 16a.

Debido a que el tribómetro utilizado fue el BRUKER UMT TriboLab, el cual posee un durómetro Vickers, fue necesario garantizar que las superficies a evaluar fueran totalmente planas y sin rayaduras, para ello se siguió el procedimiento descrito en el inciso 5.1.8 y las demás consideraciones exigidas según la norma ASTM E384 – 17. Se puede observar el resultado final del pulido para las probetas de dureza en la Figura 16, también se muestran las medidas de la probeta en el Apéndice F.

Figura 16*Probeta para microindentación Vickers.*



Nota. Probeta de dureza Vickers luego de ser pulida según las indicaciones de la Tabla 4.

5.1.8 Preparación de Probetas de Microscopia Metalográfica Según la Norma ASTM E3 – 11.

Para la realización de las micrografías se utilizó una de las caras transversales a la dirección de aplicación de la soldadura de las probetas de dureza. Además, se siguió lo establecido en la tabla 5, de la norma ASTM E3-2011, para ello la probeta luego de ser cortada se sometió a un pulido con papel abrasivo el cual inicio con papel abrasivo No. 120 y termino con un papel abrasivo No. 5000 cada vez que se cambiaba el papel abrasivo por uno de tamaño de grano más fino, se giraba la dirección lijada a 90°, para evitar dejar rayaduras muy profundas en un solo sentido, y se garantizó una limpieza y refrigeración permanente para evitar elevar la temperatura de las probetas.

Finalmente, para terminar de eliminar las rayaduras que deja el último papel abrasivo se aplicó alúmina a cada probeta con un paño, mediante la utilización de una máquina lijadora-pulidora refrigerada por agua BUEHLER MetaServ. La Tabla 4 indica el orden en que se utilizó cada papel tipo lija hasta dejar la superficie de las probetas de dureza y microscopia, tipo espejo.

Tabla 4

Procedimiento de pulido de las probetas de dureza y microscopia.

Secuencia de lijado	No. Papel Abrasivo	Dirección de Lijado
Primera	P120	Vertical (Ambos sentidos)
Segunda	P220	Horizontal (Ambos sentidos)
Tercera	P400	Vertical (Ambos sentidos)
Cuarta	P600	Horizontal (Ambos sentidos)
Quinta	P1200	Vertical (Un solo sentido)

Sexta	P2000	Horizontal (Un solo sentido)
Séptima	P3000	Vertical (Un solo sentido)
Octava	P5000	Horizontal (Un solo sentido)
Novena	Paño Abrasivo y Alúmina	Dirección contraria al sentido de giro del paño abrasivo.

Nota. Serie y orden de papel abrasivo usado en el acabado tipo espejo de las probetas de dureza y microscopia.

5.1.9 Proceso de Cortado de las Platinas con Corte por Chorro de Agua para Obtener la Forma de las Probetas de Tracción y Micro Dureza.

Posteriormente a la aplicación de la soldadura, por cada uno de los tres modos de transferencia, se obtuvo la forma de las probetas de tracción y dureza por medio del corte con chorro de agua, se realizaron seis probetas de tracción y dos de dureza. También a las láminas que no se soldaron, se cortaron seis probetas de tracción y una más de dureza para determinar y poder comparar las propiedades mecánicas de las juntas soldadas, con el material base sin soldar.

No se utilizó ningún corte que afectará térmicamente el metal base o la zona de fusión, pues no se deseaba modificar la microestructura por el proceso de corte, se puede evidenciar el procedimiento de corte en la Figura 17.

Figura 17

Corte de las probetas por chorro de agua.

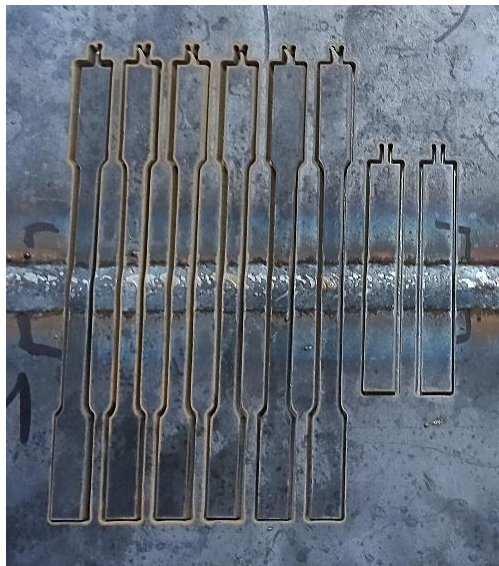


Nota. El proceso de corte de las probetas se realizó con la cortadora Flow Serie Mach 3.

La forma de las probetas después de cortadas se puede observar en la Figura 18 se debe considerar que a las probetas de dureza se les realizó un fresado en la sobre monta del cordón de soldadura, ya que esto es requisito de la norma ASTM E384 - 17 para realizar las medidas de la microindentación correctamente.

Figura 18

Obtención de probetas luego del corte.



Nota. El número de probetas por cada lámina soldadas fue de 6 probetas de tracción y dos de dureza de las cuales se utilizaron las mismas probetas de dureza para obtener las micrografías.

5.1.10 Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción se realizó con una máquina universal de ensayos MTS BIONIX, la variable controlada fue la velocidad de deformación de 4 mm/min y una tasa de muestreo de 50 datos por segundo.

Este ensayo utilizó los mismos parámetros para las 24 probetas de tracción realizadas, (18 probetas soldadas y 6 probetas para determinar la resistencia y punto de fluencia del material base).

Para obtener la curva esfuerzo vs deformación es necesario aplicar las ecuaciones (1) y (2), debido a que los datos suministrados por el software son los valores de carga y elongación, de cada probeta, también se aplicó la ecuación (3) para determinar el módulo de elasticidad de cada probeta. En la Figura 19 se muestra el ensayo de tracción en ejecución.

$$\sigma = \frac{P}{A_o} \quad (1)$$

Donde σ es el esfuerzo en $[Pa]$ P es la carga axial en $[N]$ y A_o área inicial de la sección transversal de la probeta en m^2 .

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_o}{l_o} \quad (2)$$

Donde ε es la deformación unitaria l_f y l_o las longitudes final e inicial de la probeta.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

Donde E es el módulo de elasticidad en $[Gpa]$, σ el esfuerzo en la zona elástica en $[Mpa]$, y ε la deformación unitaria $[mm]$.

El esfuerzo de fluencia σ_y fue calculado para todos los modos de transferencia y el material base según el método offset de la sección 7.7.1 de la norma ASTM E8/E8M – 16^a. Con este método se determina el esfuerzo de fluencia con una línea paralela a la línea elástica, la cual debe interceptar al eje x, en 0.2% de la deformación unitaria y en el punto en el que se intercepte la línea paralela con la curva del diagrama esfuerzo vs deformación, ese será el esfuerzo de fluencia σ_y (ASTM International, 2016).

5.1.11 Ensayo de Dureza

Se realizaron 30 microindentaciones por cada una de las caras de las probetas de dureza con el tribómetro BRUKER UMT TriboLab. La carga aplicada fue de 4 [N] y con un tiempo de

aplicación de carga de 15 [s], el cálculo de la dureza Vickers se puede obtener con el uso de la ecuación (4), conociendo la longitud de las diagonales y el valor de la carga aplicada.

$$HV = 1854.4 \cdot \frac{P}{d^2} \quad (4)$$

Donde P es la fuerza en [gf] y d la longitud de la diagonal en [μm].

Figura 19

Realización del ensayo de tracción.

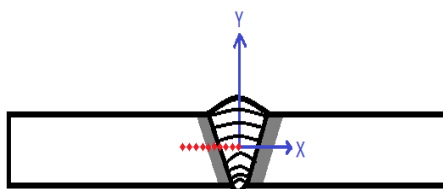


Nota. El ensayo de tensión se realizó con el equipo MTS Bionix Axial 370.02.

Se procuró iniciar las indentaciones por el metal base y terminar la indentación trigésima en la zona de fusión, para realizar un barrido completo de las 3 zonas de interés de cada junta soldada. En la Figura 20 se puede observar una imagen ilustrativa de cómo se realizaron las indentaciones y en la Figura 21 se muestra la ejecución del ensayo de dureza Vickers.

Figura 20

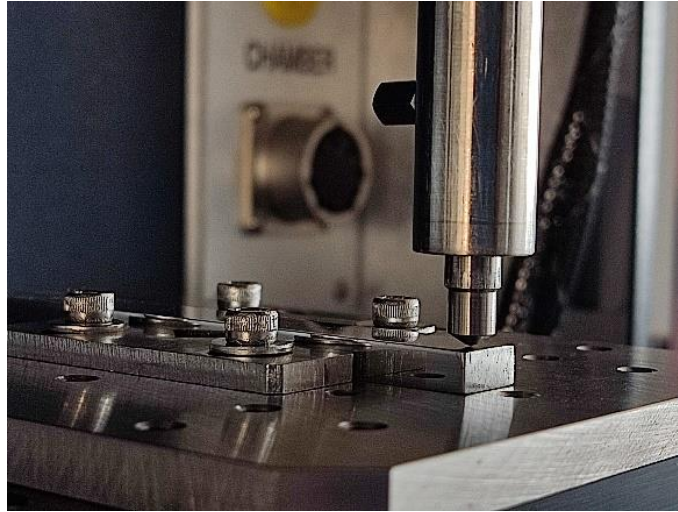
Indentaciones realizadas a la probeta de dureza.



Nota. El sistema de coordenadas indica el punto de origen desde donde se iniciaron las microindentaciones y los puntos rojos indican las huellas a modo de representación, dejadas por la aplicación de la carga del durómetro.

Figura 21

Ensayo de dureza en ejecución.



Nota. La realización del ensayo de dureza se hizo con el tribómetro Bruker.

5.1.12 Pruebas de Microscopia

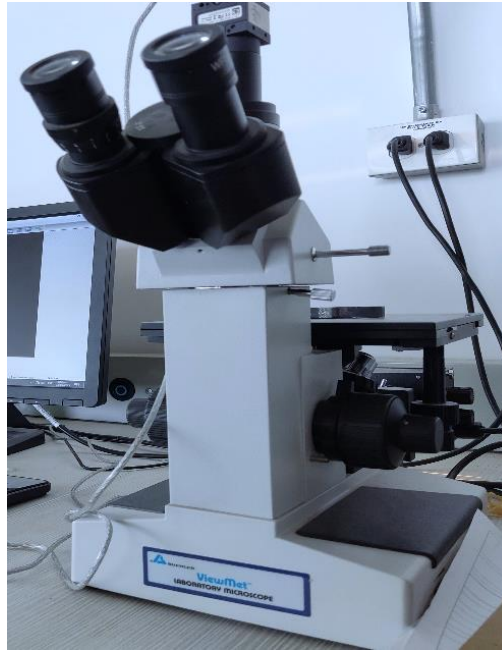
Para la realización de las micrografías, se utilizó el microscopio invertido ViewMet BUEHLER con el lente de 10x, una de las caras de la probeta de dureza para corto circuito se empleó para tomar tres micrografías una del metal base, otra de la zona de fusión y otra ZAC. De las otras dos probetas de dureza se tomó una micrografía por probeta ya que el principal interés fue observar el cambio entre la microestructura de la ZAC y la zona de fusión.

Además, se aplicó un ataque químico a la probeta pulida tipo espejo con Nital al 3% durante 6 segundos evitando que la probeta se quemará por esta sustancia. Luego de aplicado el ataque químico se revelaron las 3 zonas de interés de la junta soldada y posteriormente se realizaron las micrografías observando los cambios en las microestructuras del metal base, la zona afectada por

el calor y la zona de fusión. En la Figura 22 se observa el microscopio utilizado para la realización de las micrografías.

Figura 22

Pruebas de microscopia.



Nota. La realización de la prueba de microscopia se hizo con el microscopio invertido ViewMet.

5.2 Materiales y Equipos

5.2.1 Materiales

5.2.1.1 Acero ASTM A36. El acero utilizado se adquirió en forma de lámina de 1.2 [m] por 2.4 [m] y se eligió debido a que es uno de los aceros precalificados en el grupo I de la norma AWS D1.1/D1.1M:2020, las propiedades mecánicas y la composición química son mostradas en la Tabla 5 de acuerdo con el certificado de calidad emitido por el fabricante. En el Apéndice G se muestra el certificado de calidad emitido por la empresa RIZHAO STEEL.

Tabla 5

Composición química y propiedades mecánicas del metal base ASTM A36

Roll Steel No.	Chemical Composition						Mechanical properties		
	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	Yield Stress [N/mm ²]	Tensile Stress [N/mm ²]	Elongation [%]
H622032201	0.15	0.1	0.28	0.012	0.007	0.032	351	465	30.5

5.2.1.2 Alambre ER70S-6. El alambre utilizado fue el Weld 70S-6 de 0.9 mm de diámetro y 15 kg de peso fabricado por la empresa ESAB, en el Apéndice H se encuentra el certificado de calidad. El tipo de material de aporte usado es el que más se relaciona con el metal base usado y a su vez es uno de los recomendados por la norma AWS D1.1/D1.1M:2020, se selecciono esté material de aporte, debido a su disponibilidad de compra, su valor económico y sus características de rendimiento. En la Tabla 6 se mencionan sus propiedades mecánicas y su composición química.

Tabla 6

Especificaciones generales del alambre Weld 70S-6.

Lote No.	Chemical Composition						Mechanical properties		
	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	Yield Stress [Mpa]	Tensile Stress [Mpa]	Elongation [%]
20444314	0.076	1.48	0.92	0.008	0.013	0.124	447	537	24

Nota. Composición química y propiedades mecánicas del material de aporte ER70S-6, suministradas por el distribuidor de ESAB.

En la Tabla 7, se encuentran las especificaciones eléctricas del alambre WELD 70S-6 ESAB para diferentes diámetros, en la Figura 23 se muestra el carrete de alambre WELD 70S-6 ya instalado en el equipo.

5.2.1.3 Gas de Protección. La mezcla de gases de protección utilizada fue 80% Ar y 20% CO₂ como lo establece la norma. El gas es suministrado desde un tanque de la empresa LINDE Colombia S.A. de 7 m³ de capacidad. Con esta mezcla de gases se obtuvo una mejor visibilidad

del baño de soldadura, una mejor presentación del cordón, menos proyecciones, y un arco más estable.

Tabla 7

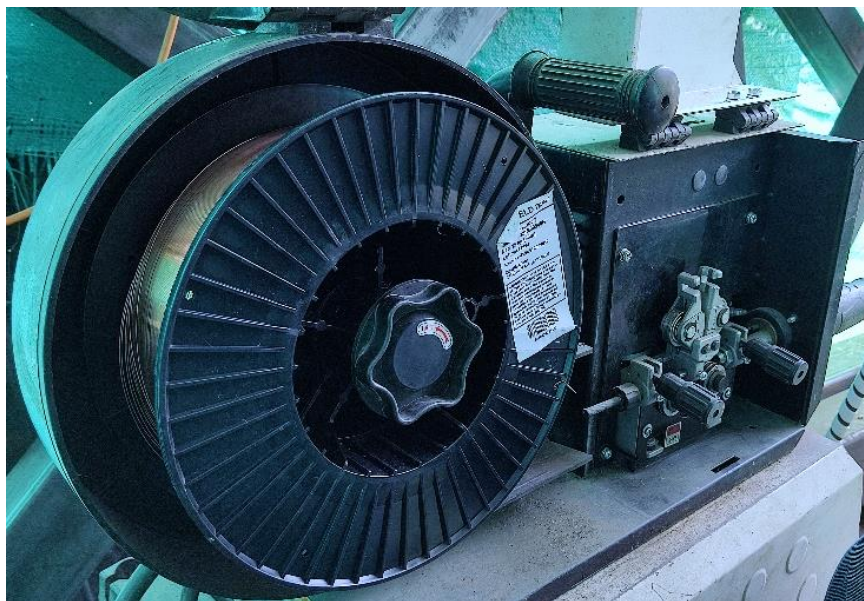
Especificaciones eléctricas recomendadas del alambre Weld 70S-6.

Amperaje	Modo de transferencia	Diámetro	Unidad del electrodo	Amperios óptimos	Voltaje	Velocidad alimentación de alambre
180-230A	Spray	0.9 mm	206 m/kg	200A	25-27V	1016-1397 cm/min
90-160A	Corto circuito	0.9 mm	206 m/kg	130A	15-19V	457-762 cm/min
130-200A	Corto circuito	1.2 mm	124 m/kg	160A	17-19V	318-508 cm/min
260-340A	Spray	1.2 mm	124 m/kg	300A	25-30V	762-1270 cm/min

Nota. Adaptado de *Datos de deposición* [Tabla], por ESAB, 2020, (<https://www.esab.ca/mx/sp/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/mild-steel-wires/weld-70s-6.cfm>).

Figura 23

Alimentador de alambre del equipo SKYMIG 5060.



Nota. El equipo SKYMIG 5060, tiene el módulo de alimentación en la parte superior externa del equipo, además cuenta con dos controles para regular la velocidad de alimentación del microalambre.

5.2.1.4 Papel Abrasivo. Los papeles abrasivo se utilizaron para preparar, desbastar y suavizar las superficies que iban a ser microindentadas, ya que luego de los procesos de corte por agua o cizalla hidráulica quedan algunas irregularidades sobre la superficie que afectarían los resultados de dureza. Se utilizaron los papeles de lija de tipo de grano de óxido de aluminio y de tamaño de grano desde 120 hasta 5000 por pulgada cuadrada.

5.2.1.5 Nital. Fue utilizada para realizar un ataque químico de las juntas soldadas, luego de realizar el proceso de lijado y antes de realizar las micrografías.

5.2.2 Equipos.

5.2.2.1 Cizalla Hidráulica ALPMAC Model V16- 3100. La cizalla hidráulica tiene controladores CNC Elgo P40 Touch, y posee un sistema de sujeción de hoja hidráulico el cual mantiene la hoja fija para el proceso de corte con una capacidad de corte de 420 N/mm^2 .

5.2.2.2 Soldador SKYMIG 5060. El equipo soldador utilizado es el mostrado en la Figura 24, es un equipo multipropósito de construcción robusta y posee un motor de arrastre con cuatro rodillos para alimentar el alambre, además cuenta con una pantalla digital. El máximo amperaje que puede logra es 500 amperios y se recomienda para alambres 1.2 [mm]. En la Tabla 8 se adicionan las principales características del equipo.

Figura 24

Equipo de soldadura SKYMIG 5060.



Nota. Adaptado de SKYMIG 5060 [Fotografía], por SWEISS, 2021,

(<https://sweissweld.com/skymig-5060/>).

Tabla 8

Especificaciones del equipo de soldadura SKYMIG 5060.

Especificaciones	
Soldadura	MIG/MAG/MMA
Ciclo de trabajo a 40°C	60%
Carrete	15 kg Separado
Voltaje Entrada	220 V – 440V (3ph)
Frecuencia	50/60 Hz
Tipo Electrodo	E6013, E7018, E6010, E6011, ER70S-6...
Peso	60 kg
Alambres	0.6 mm – 2.0 mm

Nota. Adaptado de *Principales Características y Especificaciones Técnicas* [Tabla], por

SWEISS, 2021, (<https://sweissweld.com/skymig-5060/>).

5.2.2.5 Sistema de Ensayos MTS Bionix Axial 370.02. Es un equipo que se utiliza con frecuencia para realizar pruebas precisas de fatiga y crecimiento de fracturas, se puede observar en la Figura 26. Su capacidad máxima es de hasta 25 KN, con un desplazamiento máximo de hasta 50 mm. Este sistema se diseñó especialmente para pruebas estáticas y dinámicas de materiales y componentes biomédicos.

Algunas de los ensayos que se pueden realizar con este equipo son pruebas de tracción, compresión, fatiga a tensión-compresión, fatiga a flexión 3 puntos, fatiga a flexión 4 puntos, entre otros. Además, debido a su diseño de software puede realizarse un control de diversas variables, con una velocidad de muestreo de hasta 1000 datos por segundo. (MTS Systems Corporation, 2017).

5.2.2.6 Tribómetro BRUKER UMT TriboLab. La plataforma de ensayos mecánicos UMT es uno de los tribómetros más versátiles y utilizados mundialmente. Se basa en diferentes módulos que permiten desarrollar casi todas las pruebas tribológicas posibles.

Figura 26

MTS Bionix Axial 370.02.



Nota. Equipo utilizado para realizar los ensayos de tensión de las juntas soldadas.

Sus diferentes tipos de módulos se pueden cambiar de forma rápida con métodos de sujeción sin herramientas complejas y en solo segundos. A su vez el software de este equipo mostrado en la Figura 27, reconoce el tipo de módulo agregado y comprende la configuración sin comandos. (BRUKER, 2021)

Algunos de los ensayos que se pueden realizar con este equipo son los ensayos para materiales de frenado, ensayos para materiales tipo embrague, ensayos para determinar las propiedades superficiales de recubrimientos, entre otros.

5.2.2.7 Microscopio Invertido ViewMet BUEHLER. Es un microscopio invertido útil para muestras metalográficas planas como se observa en la Figura 28. Compacto y perfecto para aplicaciones de propósito general en las pruebas de dureza. Su mesa mecánica tiene un recorrido libre XY de 15x15 mm.

Figura 27

Equipo para realización de pruebas de dureza Tribómetro BRUKER UMT.



Nota. Maquina utilizada para realizar los ensayos de dureza, rayado, entre otros.

Posee iluminación de 6V/30W y contiene un par de oculares 10x y objetivos Plan Achromat 5x, 10x, 20x y 50x. También contiene un cable de alimentación y cubierta antipolvo (Buehler Ltd, 2021).

5.2.2.8 Amoladora Pulidora de Banco BUEHLER MetaServ 250 Twin. La amoladora-pulidora ofrece un par de platos gemelos que se controlan simultáneamente, puede utilizarse de forma manual o semiautomático.

Figura 28

Microscopio invertido ViewMet BUEHLER.



Nota. El microscopio cuenta con los controles necesarios para la iluminación y desplazamiento de la mesa donde se pondrá la muestra metalográfica.

6. Resultados y Discusión

6.1 Determinación de la Resistencia a la Tensión de los Tres Modos de Transferencia GMAW.

Estadísticamente los datos fueron tratados y analizados, eliminando los datos más dispersos y generando las curvas para los tres modos de transferencia y para el material base. Gran parte de las probetas soldadas fallaron por la zona del metal base como se muestra en la Figura 29 y en la Figura 30 se muestran las curvas del diagrama esfuerzo y deformación para los cuatro modos de transferencia y para el acero ASTM A36 sin soldar.

Figura 29

Zonas de fractura para acero ASTM A36 sin soldar y para las juntas soldadas.



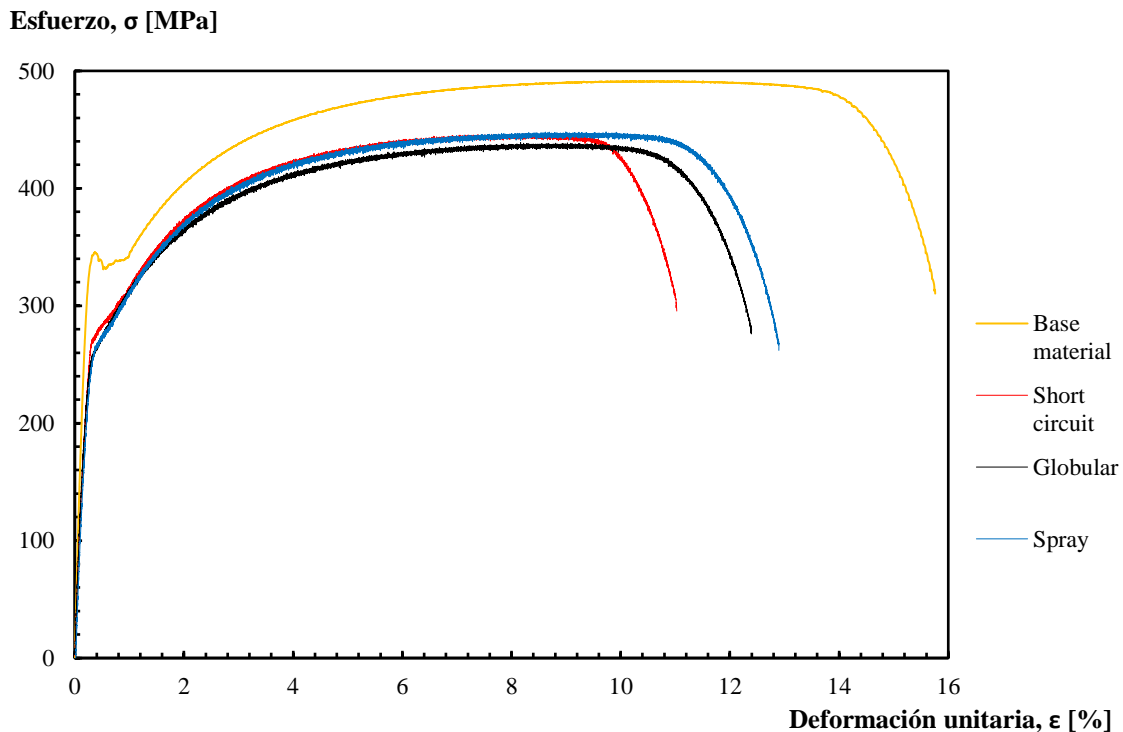
Nota. En la parte izquierda de la figura se observan tres probetas para el acero ASTM A36 sin soldar y en la parte derecha tres probetas que fallaron en las zonas del metal base.

El acero ASTM A36 sin procesos de soldadura presenta la mayor elongación, antes de lograr su punto de ruptura. El modo de transferencia spray mostrado en la curva azul soportó el

mayor esfuerzo antes de fallar y a su vez su porcentaje de alargamiento fue mayor. Los modos de transferencia corto circuito y globular experimentaron un menor punto de ruptura y alargamiento, como se evidencia en las curvas de color rojo y negro respectivamente.

Figura 30

Diagrama Esfuerzo vs Deformación para tres modos de transferencia y acero ASTM A36 sin soldar.



Los demás puntos de interés como el módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia, esfuerzo último, deformación máxima, se presentan en la Tabla 9, en la cual se observa que las variaciones entre cada modo de transferencia no muestran un cambio significativo para el módulo de Young, el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último.

También se agregó la columna de comparación de porcentajes de alargamiento con la finalidad de verificar la reducción de elongación de cada modo de transferencia respecto al material de control ASTM A36.

Tabla 9

Puntos importantes del diagrama esfuerzo vs deformación para los tres modos de transferencia y para el acero ASTM A36.

Modo de Transferencia	E [GPa]	σ_y [MPa]	σ_{ult} [MPa]	ϵ_{max} [%]	Comparación de alargamiento (%)
Control	192,7	323,1	491,2	15,7	0
Corto Circuito	190,2	274,9	446,5	11,1	-29.3
Globular	187,3	262,3	438,9	12,4	-21.1
Spray	186,9	269,3	448,1	12,9	-17.8

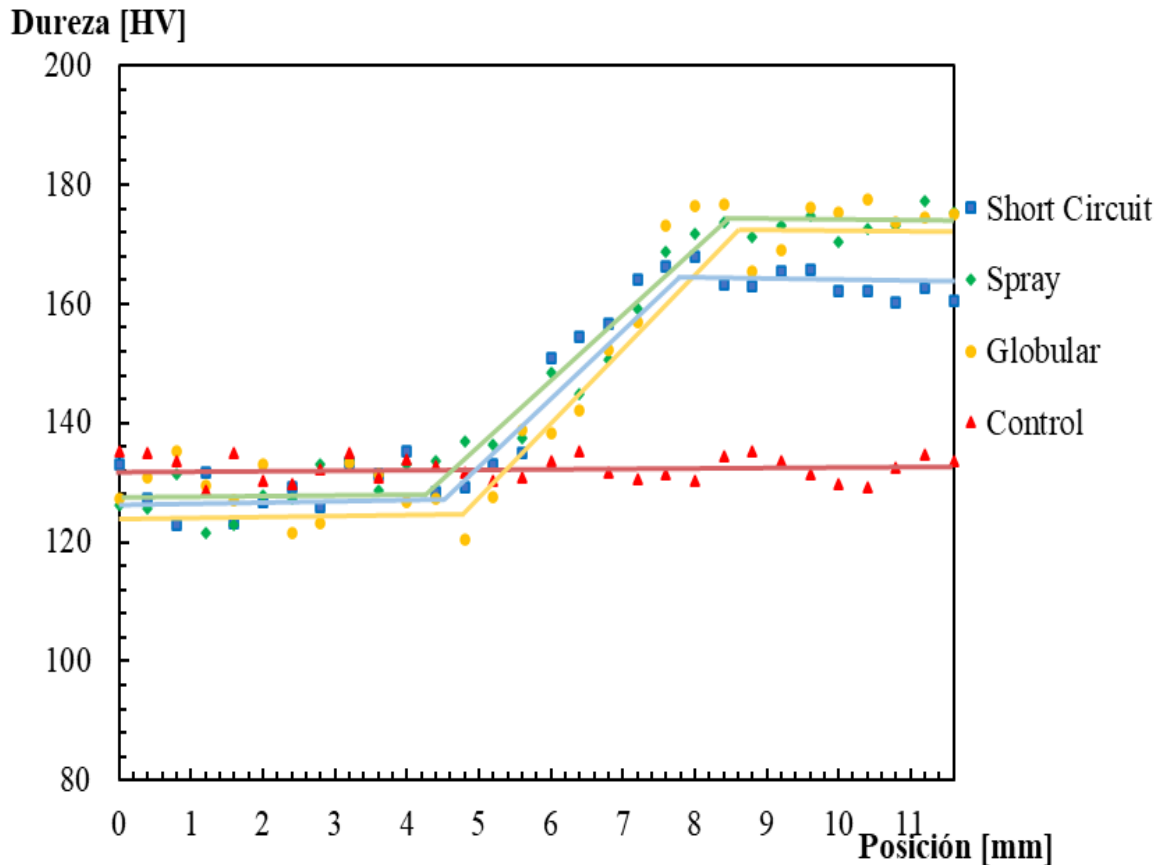
6.2 Determinación del Perfil de Dureza Vickers en los Tres Modos de Transferencia GMAW.

Los barridos de dureza Vickers se muestran en la Figura 31. En general se presenta un comportamiento similar en el aumento de dureza entre la zona de transición de la zona afectada por calor y el metal base para los tres modos de transferencia de metal, ese aumento de dureza se puede identificar a partir de las posiciones 4,4 [mm], 4,8 [mm] y 4 [mm] para los modos de transferencia corto circuito, globular y spray respectivamente.

Las zonas de metal de soldadura presentan mayor dureza respecto al material base y tienden a iniciar en las posiciones 7,6 [mm], 8,4 [mm] y 8,4 [mm] para los modos de transferencia corto circuito, globular y spray. También se observa que la probeta de acero ASTM A36 sin soldar presenta una dureza constante a lo largo de todo el barrido, situación esperada pues el material no sufrió ningún tratamiento térmico adicional al proceso de laminado que el material traía desde su fabricación, que puede aportar modelos de acritud generando incrementos leves en la dureza.

Figura 31

Barridos de dureza Vickers desde el metal base, pasando por la ZAC y finalizando en la zona de fusión para los tres modos de transferencia y el acero ASTM A36 sin soldar.



En general el modo de transferencia spray presenta la mayor dureza en la zona afectada por calor y la zona de fusión con un promedio de 173,5 [HV] en la zona de fusión, el segundo modo de transferencia más duro es el modo de transferencia globular con un promedio de dureza de 173,3 [HV] en la zona de fusión y finalmente en tercer lugar el modo de transferencia corto circuito con un promedio de dureza de 163,6 [HV] en la zona de fusión.

6.3 Cuantificación de la Influencia de la Zona Afectada por el Calor con el Uso de Microscopia.

6.3.1 Cuantificación de la ZAC con el uso de macrografías.

Para la cuantificación del tamaño de la ZAC y la zona de fusión se realizaron macrografías en las que se trazó una línea referencial vertical en la mitad de la probeta y a partir de ese punto se

midieron las dimensiones de la zona de fusión y la zona afectada por calor. Confirmando el comportamiento de las microindentaciones para las diferentes zonas de las juntas soldadas. Las dimensiones de la ZAC y del metal soldadura se observan en la Tabla 10.

Tabla 10

Mediciones a nivel macro del metal base, la ZAC y la zona de fusión para los tres modos de transferencia.

Modo de transferencia	ZAC [mm]	ZF [mm]
Corto circuito	3,2	4,0
Globular	4,0	2,8
Spray	4,4	3,2

Se comprueba que en el modo de transferencia spray por los altos niveles de calor que son aportados a la pieza por el material de aporte, el tamaño de la ZAC es superior a los modos de transferencia globular y corto circuito. En este caso el modo de transferencia que presentó menor tamaño de ZAC fue el globular.

En cuanto a la zona de fusión el cordón de soldadura que presentó mejor apariencia y mayores dimensiones en cuanto al ancho y la penetración del metal depositado fue el modo de transferencia en corto circuito como consta en la Figura 13, Figura 14 y Figura 15.

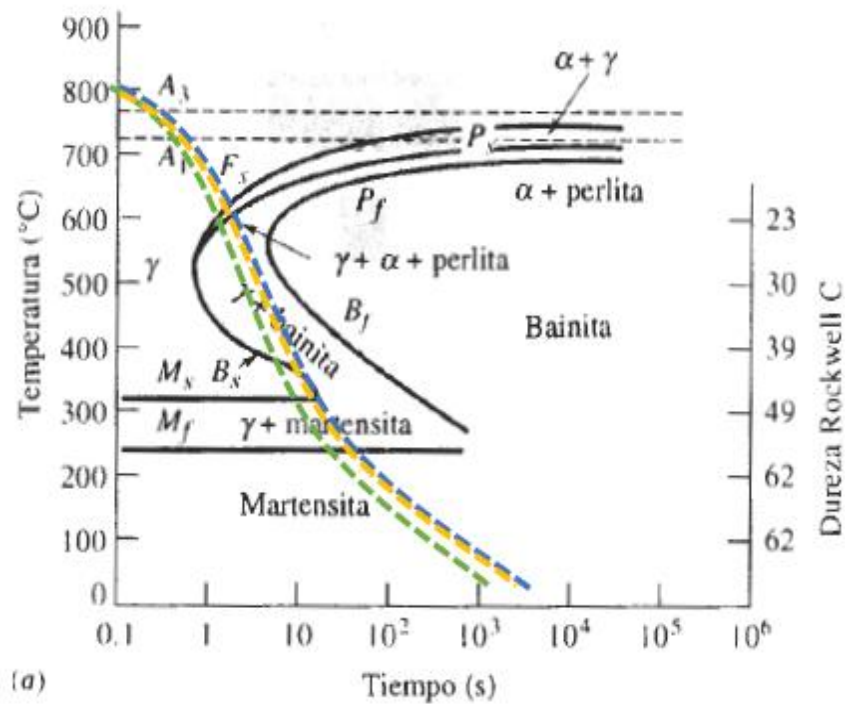
6.3.2 Análisis Metalográfico de las Micrografías.

En las juntas soldadas se generan estructuras cristalinas que dependen de la composición química del metal base, del metal de aporte y de los procedimientos utilizados durante la aplicación. Para este caso las estructuras cristalográficas fueron las generadas para diferentes curvas de enfriamiento de un acero hipoeutectoide con 0.15% de carbono como se observa en el diagrama T.T.T de la Figura 32.

El diagrama de T.T.T permite estimar la estructura cristalográfica de las juntas soldadas, en este caso no existen velocidades de enfriamiento altas ya que los valores se interpolaron para los procesos de enfriamiento, pues la transferencia de calor con el ambiente se realiza por mecanismos de convección natural a velocidades de flujo libre de aire de 5 [m/s] (Cengel & Afshin, 2009).

Figura 32

Diagrama T.T.T para acero hipoeutectoide.



Nota. La curva azul, amarillo y verde representa las velocidades de enfriamiento de los modos de transferencia corto circuito, globular y spray, respectivamente. Adaptado de *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (p. 327), por D. R. Askeland, 1998, International Thomson.

La Figura 33, muestra el lugar en el que se tomó la macrografía correspondiente a la microestructura del metal de soldadura y en la Figura 34 se presenta la microestructura de la zona de fusión. En esta zona se suele solidificar primero los granos más cercanos al metal no fundido y

la estructura cristalina del metal de soldadura tiene un crecimiento de forma dendrítica, que exhibe un comportamiento adaptado por la interfaz liquido solido durante la solidificación. En este caso no se distingue ninguna orientación clara de los granos y se observa una estructura de matriz ferrítica (área clara) con algunos cristales de perlita de grano fino (área oscura).

Figura 33

Lugar en el que se determinó la microestructura de la zona de fusión.

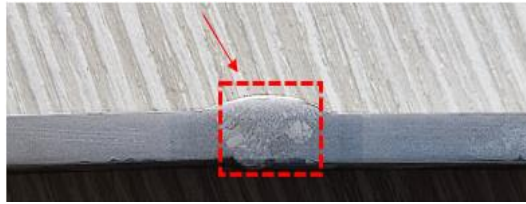
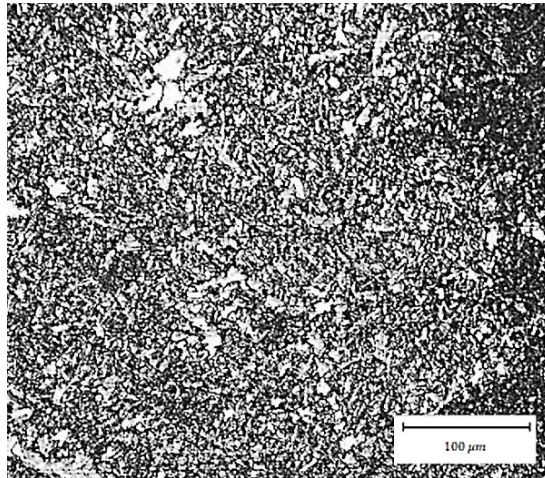


Figura 34

Microestructura de la zona de fusión para el modo de transferencia corto circuito.



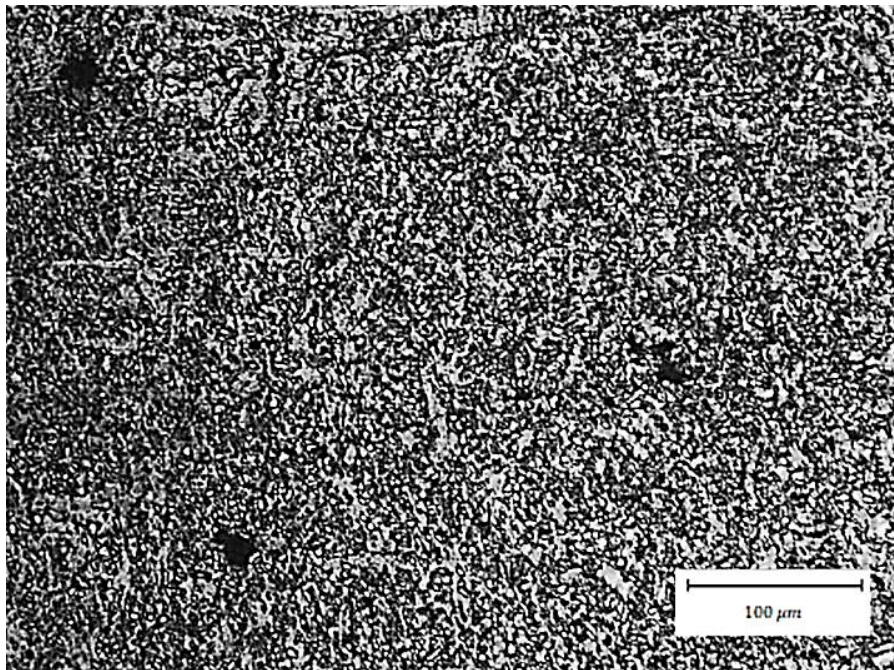
En las Figura 35 y Figura 36 se observa la macrografía en la zona en que fue realizada la microestructura y también la micrografía del metal base, la cual tiene bajo contenido de carbono y presentó una estructura equiaxial de matriz ferrítica y perlita en los bordes de grano, que es particularmente característica para este tipo de material. Debido a los procesos de laminado en frío se encuentra una distribución uniforme de la ferrita.

Figura 35

Lugar en el que se determinó la microestructura del metal base.

**Figura 36**

Microestructura del metal base para el modo de transferencia corto circuito.



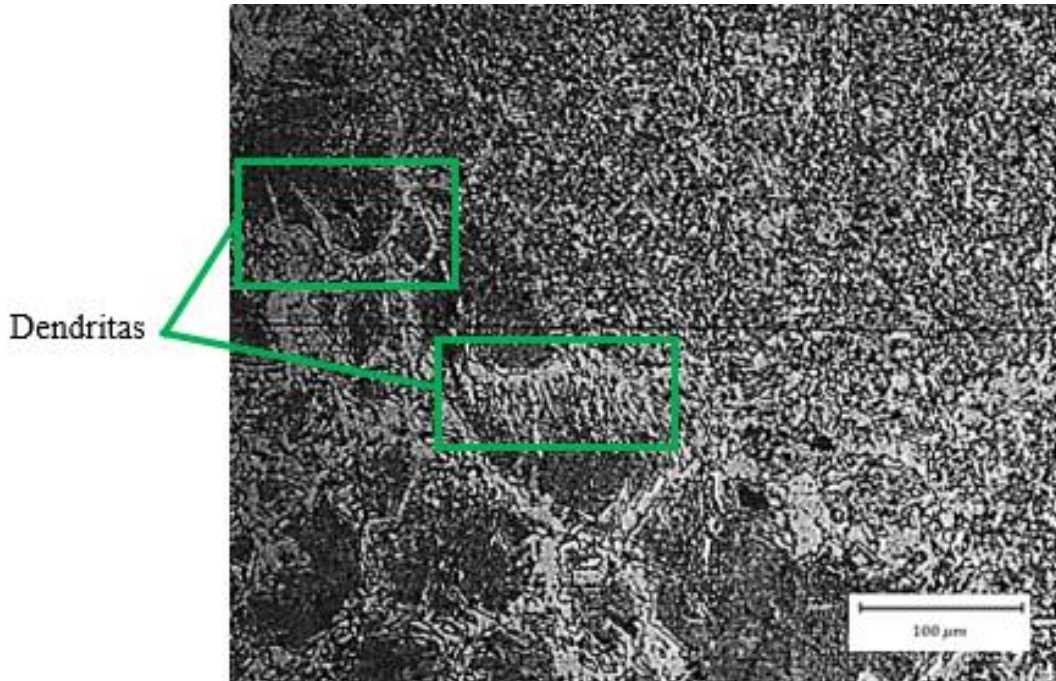
En la Figura 37 se muestra la microestructura de la probeta soldada bajo el modo de transferencia corto circuito. En la zona izquierda se observa la ZAC con granos de perlita fina (más oscuros), que incluyen una matriz ferrítica (zona más clara), éstas se originan cuando se transforma la austenita ya que la temperatura decrece por debajo de la temperatura crítica $A1 = 723^{\circ}\text{C}$ según la Figura 2.

Se presentan escasos granos en la ZAC que muestran una forma dendrítica en el límite de grano de la perlita, que pueden ser producto de la velocidad de enfriamiento como se observa en

la Figura 32 para la curva azul. En la zona derecha se ve la zona de fusión que tiene una estructura similar a la presentada en la Figura 34.

Figura 37

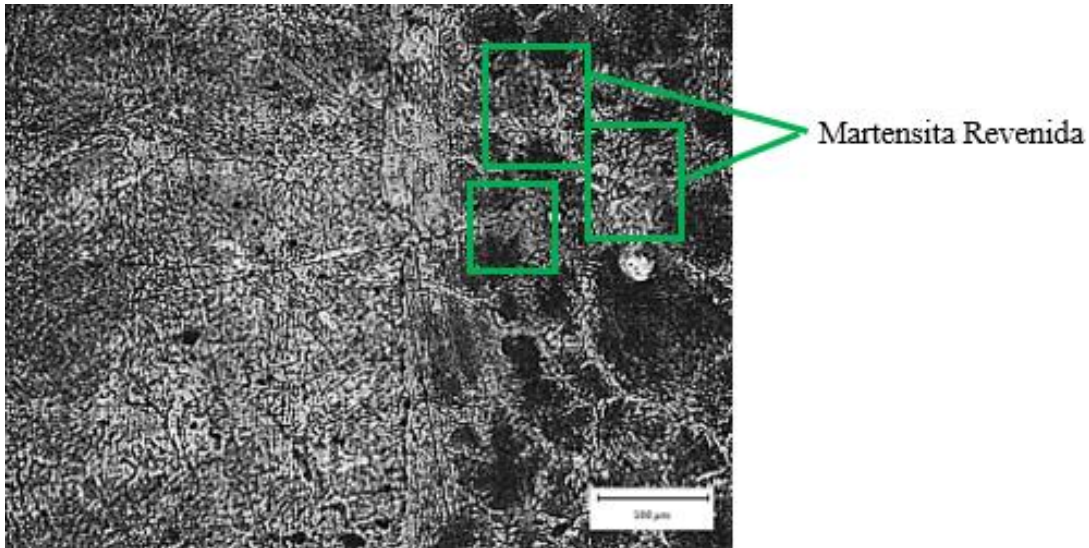
Microestructura de la ZAC para el modo de transferencia corto circuito.



En la Figura 38 se muestra la microestructura de la probeta soldada bajo el modo de transferencia globular. En la zona izquierda se observa la zona de fusión la cual presenta un grano de mayor contenido de carbono respecto a la zona de fusión del modo de transferencia corto circuito. En la zona derecha la ZAC presenta una combinación de una estructura de martensita revenida con granos de perlita, según lo esperado en la curva amarilla de la Figura 32, con un tamaño aproximado de 50 μm , que incluye ferrita en el límite de grano.

Figura 38

Microestructura de la ZAC para el modo de transferencia globular.



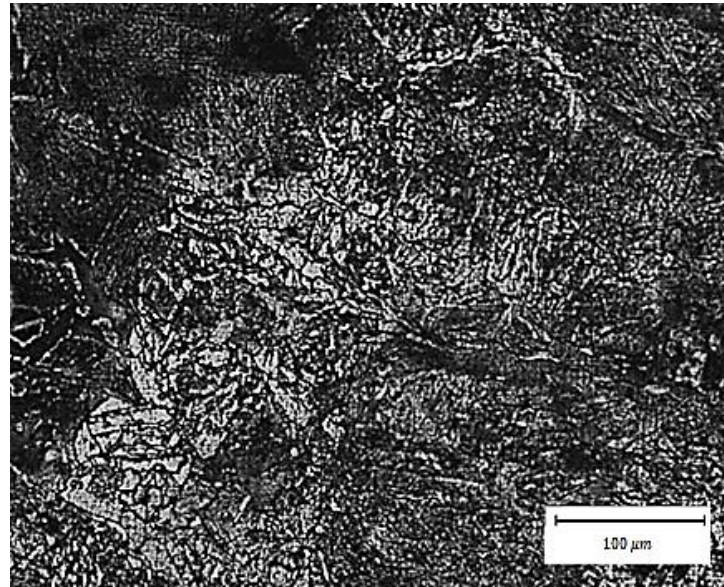
La Figura 39 muestra la microestructura de la probeta soldada bajo el modo de transferencia spray, en este caso los niveles de afectación térmica se evidencian aún más, por la tonalidad de la estructura cristalina. En la zona izquierda se observa la zona de fusión la cual presenta un arreglo cristalográfico de mayor contenido de perlita con una morfología dendrítica, en la zona derecha la ZAC presenta una combinación de martensita, como se evidencia en la curva verde de la Figura 32 con un mayor contenido de cementita y el contenido de ferrita disminuyó como consecuencia al aporte del contenido de carbono suministrado por el material de aporte.

6.4 Estimación de la Mejora o Deterioro en las Propiedades Mecánicas y la Microestructura en la Junta Soldada Respecto al Material Base.

La Tabla 11 resume la comparación de los datos obtenidos para cada modo de transferencia, de propiedades como el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo último y la dureza promedio en la zona de fusión, respecto al acero ASTM A36 sin soldar, para poder determinar de ese modo la mejora o deterioro de las propiedades mecánicas estudiadas en esta investigación. La columna de dureza promedio muestra los valores obtenidos para los tres modos de transferencia en el metal de soldadura.

Figura 39

Microestructura de la ZAC para el modo de transferencia Spray.

**Tabla 11**

Comparación de propiedades como esfuerzo de fluencia, esfuerzo último, alargamiento máximo y dureza de los tres modos de transferencia respecto del acero ASTM A36 sin soldar para determinar su afectación.

Modo de transferencia	σ_y [MPa]	Afectación	σ_{ult} [MPa]	Afectación	Alargamiento [%]	Afectación	Dureza Prom. [HV]	Afectación
ASTM A36 (referencia)	323.1	N.A.	491.2	N.A.	15.7	N.A.	132.4	N.A.
Corto circuito	-14.9%	Disminuyó	-9.1%	Disminuyó	-29.3%	Disminuyó	23.6%	Aumentó
Globular	-18.8%	Disminuyó	- 10.6%	Disminuyó	-21.1%	Disminuyó	30.9%	Aumentó
Spray	-16.7%	Disminuyó	-8.7%	Disminuyó	-17.8%	Disminuyó	31%	Aumentó

A pesar de tener valores de modificación, pueden considerarse dentro de los rangos aceptables de distorsión para procesos experimentales, sin superar una variación mayor al 10% para el caso de los esfuerzos últimos. Cuando se compara el material ASTM A36 sin soldar con los modos de transferencia de soldadura GMAW se encuentra, que el esfuerzo de fluencia se

reduce, en especial para el modo de transferencia globular con una disminución de la fluencia en un 18.8%. También se evidencia que el esfuerzo último del material disminuye en especial para el modo de transferencia globular con un porcentaje de 10.6% menor a la resistencia del material de control.

En el caso del alargamiento el material sufre una reducción por los niveles de calor que afectan la microestructura del material volviendo el material más rígido, el modo de transferencia con el menor decremento en el alargamiento fue el spray con un porcentaje de 17.8%. De igual forma la mayor dureza en el metal de soldadura, se presentó para el modo de transferencia spray como consecuencia del calor aportado a la junta soldada durante la aplicación de la soldadura con un valor porcentual de 31% respecto al material sin soldar.

7. Conclusiones

El modo de transferencia spray presenta las mejores propiedades de resistencia axial de los tres modos de transferencia con una disminución en la resistencia última de 8.7% respecto a las propiedades del acero ASTM A36.

El porcentaje de alargamiento se redujo en un 17.8% respecto al acero ASTM A36 sin soldar para el modo de transferencia spray y en un 29.3% para el modo de transferencia corto circuito, garantizando que para aplicaciones que demanden integridad y confiabilidad, se recomiende el uso del modo de transferencia spray pues las juntas soldadas por este modo de transferencia se elongan más antes de fallar, dando tiempo para detectar la deformación y hacer el cambio del elemento estructural.

En general la dureza se ve relacionada con el aporte de calor que recibió la junta soldada, por ello el modo de transferencia spray es el que genera mayor dureza en la zona de fusión y en la

zona afectada por calor situación que favorece el uso de este modo de transferencia en procesos de restauración de elementos de máquinas de excavación o hardfacing.

Debido al proceso de laminado en frío del acero ASTM A36, la dureza del acero sin soldar es superior a la del material base por los modelos de acritud en su fabricación que generan durezas superficiales por la deformación en frío.

Las mediciones de las ZAC y la zona de fusión para los tres modos de transferencia por medio de micrografías se relacionan con los barridos de dureza Vickers. El modo de transferencia spray fue el que presentó una ZAC de mayor tamaño debido al nivel de calor que absorbió el material, con una dimensión de 4.8 [mm], se puede comprobar esta dimensión con el cambio de dureza que se obtiene en la ZAC según la Figura 31.

El análisis metalográfico evidenció en general una matriz ferrítica con granos de perlita que varían su tamaño de acuerdo con la tasa de deposición de metal de soldadura, dicha estructura cristalina modifica las propiedades mecánicas de la junta soldada a nivel macro. Cuando se tienen altas velocidades de deposición de metal de soldadura, la microestructura se modifica generando juntas soldadas de alta dureza debido a la presencia de perlita de grano grueso en la microestructura. En contraste cuando se bajan los niveles de calor la perlita disminuye y produce juntas soldadas de menor dureza.

En términos generales puede mencionarse que las variaciones de las propiedades mecánicas no representan modificaciones de gran valor, exceptuando el porcentaje de alargamiento, que en diversos escenarios como los modelos de carga dinámica o sistemas de análisis por integridad requieren una plasticidad del material que permite advertir una falla próxima. La generación de esta afectación a la plasticidad corresponde a analizar el elemento soldado como un único elemento, que, siguiendo un concepto natural, fallara por su zona más débil, la cual en este caso

se presenta por el reblandecimiento de la acritud generada en el proceso habitual de laminado del material base.

Referencias Bibliográficas

- Alatorre, N., Ambriz, R. R., Nouredine, B., Amrouche, A., Talha, A., & Jaramillo, D. (2014). Tensile properties and fusion zone hardening for GMAW and MIEA welds of a 7075-T651 aluminum alloy. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 27(4), 694–704. <https://doi.org/10.1007/S40195-014-0103-X>
- American Welding Society. (2016). *Standard Methods for Mechanical Testing of Welds AWS B4.0:2016*. <https://pubs.aws.org/p/1675/b402016-standard-methods-for-mechanical-testing-of-welds>
- American Welding Society. (2020a). *Standard Welding Terms and Definitions AWSA3.0M/A3.0*. <https://pubs.aws.org/p/1967/a30ma302020-standard-welding-terms-and-definitions-including-terms-for-adhesive-bonding-brazing-soldering-thermal-cutting-and-thermal-spraying>
- American Welding Society. (2020b). *Structural Welding Code - Steel AWS D1.1/D1.1M:2020*. https://pubs.aws.org/Download_PDFS/D1_1_D1_1M_2020_index_PV.pdf
- American Welding Society. (2021). *Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding AWS A5.18/A5.18M:2005*. <https://pubs.aws.org/p/2069/a518a518m2021-specification-for-carbon-steel-electrodes-and-rods-for-gas-shielded-arc-welding>
- Amo, J. M., & Durán, J. (1998). Comportamiento a fatiga de uniones a tope en chapas recubiertas soldadas por proceso láser. *Revista de Metalurgia*, 34(Extra), 179–183. <https://doi.org/10.3989/REVMETALM.1998.V34.IEXTRA.734>
- ANDI. (n.d.). *Colombia: Balance 2018 y Perspectivas 2019*. http://www.andi.com.co/Uploads/ANDI - Balance y Perspectivas_636882495815285345.pdf

- Askeland, D. R. (2021). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (1st ed.).
<https://latinoamerica.cengage.com/ls/ciencia-e-ingenieria-de-materiales/>
- ASTM International. (2011). Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. In *Annual Book of ASTM Standards* (Issue July). <https://doi.org/10.1520/E0003-11R17.1>
- ASTM International. (2014). A370: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. *ASTM International*, 1–50. <https://doi.org/10.1520/A0370-20>
- ASTM International. (2016). ASTM E8/E8M - 16a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. In *Annual Book of ASTM Standards* (Issue C). <https://doi.org/10.1520/E0008>
- ASTM International. (2017). Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials - ASTM E384 - 17. In *Annual Book of ASTM Standards*. <https://doi.org/10.1520/E0384-17>
- Black, J., & Kohser, R. (2019). *Materials and processes in manufacturing* (13th ed.). <https://www.wiley.com/en-us/DeGarmo%27s+Materials+and+Processes+in+Manufacturing%2C+13th+Edition-p-9781119492825>
- BRUKER. (2021). *UMT TriboLab Bruker*. <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/test-and-measurement/tribometers-and-mechanical-testers/umt-tribolab.html>
- Buehler Ltd. (2021). *Microscopio invertido ViewMet™*. <https://www.buehler.com.es/viewmet-inverted-microscope.php>
- Calderón Jimmy, E. D. (2014). *Estudio comparativo de la soldabilidad en aceros (ASTM A36, A588 Y A572) mediante el proceso FCAW* [Escuela Politecnica Nacional]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7332>
- Cengel, Y., & Afshin, G. (2009). Transferencia de calor y masa. In *Termodinamica* (4th ed.).

[https://doi.org/10: 0-8400-5444-0](https://doi.org/10.0-8400-5444-0)

Díaz, C., & Rojas, F. (2014). *Análisis ultrasónico y microestructural del acero ASTM A572 grado 50, tratado térmicamente por temple a temperaturas 900°C, 950°C y 1000°C.*

INDURA. (n.d.). *Manual de soldadura y materiales de soldadura.* Retrieved August 7, 2021, from <http://www.indura.com.pe/web/pe/menu/1872/metalmecánica>

Lincoln Electric Company. (2014). *Gas Metal Arc Welding Product and Procedure Selection.* https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-50/c4200.pdf

Madariaga Rosas, C. H., Modenesi, P. J., & Rincón Ortiz, M. (2020). Efectos de los Active Flux sobre Soldaduras GMAW Aplicadas a un Acero AISI/SAE 1020. *Soldagem & Inspeção*, 25, 1–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/0104-9224/si25.02>

MTS Systems Corporation. (2017). *MTS Bionix Servohydraulic Test Systems.* https://corp.mts.com/en/forceandmotion/biomaterialstesting/MTS_006241?article=2

Ordoñez Morales, E. A., Romero Rueda, V. J., & Torres Camargo, J. C. (2013). *Análisis del comportamiento mecánico y microestructural de las transformaciones de fase en la zona afectada por el calor en juntas soldadas a tope para aceros estructurales por medio del proceso gas metal arc welding (GMAW) y con alambre para soldar ER70s* [Universidad Libre]. <https://hdl.handle.net/10901/7837>

Rodríguez Salgado, D. (2010). *Soldadura tecnología y técnica de los procesos de soldadura.* <https://www.casadellibro.com/libro-soldadura-tecnologia-y-tecnica-de-los-procesos-de-soldadura/9788496486959/1693485>

Romero Nieto, S. P., & Olaya Flórez, J. J. (2012). Influencia de la transferencia en la resistencia y dureza de las uniones soldadas obtenidas por el proceso de soldadura GMAW. *Revista de*

- Ingeniería*, 37, 38–45. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.16924%2Friua.v0i37.117>
- Romero Nieto, S. P., & Olaya Flórez, J. J. (2013). Influencia de la transferencia por arco sobre la microestructura de uniones soldadas usando arco pulsado. *Ingeniería Mecánica*, 16, 1–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/0104-9224/si25.02>
- Rowe, R., & Jeffus, L. (2008). *Manual de soldadura gmaw (MIG-MAG)*. <https://editorial.tirant.com/es/libro/manual-de-soldadura-gmaw-mig-mag-9788428329385>
- Sáenz González, J. G., & Ramirez Celis, S. (2010). *Diseño y calificación de un WPS, PQR y WPQ de soldadura según norma API 1104 para la estación de recolección campo escuela Colorado* [Universidad Industrial de Santander]. <https://docplayer.es/11384216-Diseno-y-calificacion-de-un-wps-pqr-y-wpq-de-soldadura-segun-norma-api-1104-para-la-estacion-de-recoleccion-campo-escuela-colorado.html>
- Shibe, V., & Chawla, V. (2018). Characterization of Fe–C–Cr Based Hardfacing Alloys. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 71(9), 2211–2220. <https://doi.org/10.1007/s12666-018-1352-6>
- Sumesh, A., Rameshkumar, K., Raja, A., Mohandas, K., Santhakumari, A., & Shyambabu, R. (2017). Establishing correlation between current and voltage signatures of the arc and weld defects in GMAW Process. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(11), 4649–4665. <https://doi.org/10.1007/S13369-017-2609-9>
- Taguchi, G. (1987). *System of experimental design : engineering methods to optimize quality and minimize costs* (1st ed.). <https://www.goodreads.com/book/show/4806484-system-of-experimental-design>
- Viada-Estevez, A., & Fernandez-Columbie, T. H. (2020). Comportamiento de la microestructura de uniones de hierro fundido con diferentes materiales de aporte. *Minería y Geología*, 36(1),

92–105. http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/art7_No1_2020

Zappa, S., Zalazar, M., & Surian, E. (2017). Efecto de la composición química del metal de aporte y del calor aportado sobre la microestructura y las propiedades mecánicas de juntas soldadas de aceros inoxidables dúplex. *Soldagem & Inspeção*, 22(2), 116–128. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2202.02>