

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



TÍTULO

**ANÁLISIS DE LA CALIDAD MEDIANTE LA PRUEBA END ULTRASONIDO
DE UNIONES DE ACERO AISI-SAE 1520 SOLDADAS POR HLAW**

POR

LESLEY JASSIEL ZORRILLA GONZÁLEZ

REPORTE DE PROYECTO

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO, COAHUILA 31 DE OCTUBRE DE 2018

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ANÁLISIS DE LA CALIDAD MEDIANTE LA PRUEBA END ULTRASONIDO
DE UNIONES DE ACERO AISI-SAE 1520 SOLDADAS POR HLAW**

POR

LESLEY JASSIEL ZORRILLA GONZÁLEZ

REPORTE DE PROYECTO

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO, COAHUILA 31 DE OCTUBRE DE 2018

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales

Gerencia de Desarrollo Humano

División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que el Reporte de Proyecto **“ANÁLISIS DE LA CALIDAD MEDIANTE LA PRUEBA END ULTRASONIDO DE UNIONES DE ACERO AISI-SAE 1520 SOLDADAS POR HLAW”**, realizado por la alumna **Lesley Jassiel Zorrilla González**, con número de matrícula 17ES-229 sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

**Dra. Gladys Yerania Pérez
Medina**

Tutora Académica

Dr. Melvyn Álvarez Vera

Co-Director

**M.T. Leticia Loruhamá
Rodríguez López**

Asesora

Vo.Bo.

Dr. Pedro Pérez Villanueva
Coordinador de Posgrado

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales

Gerencia de Desarrollo Humano

División de Estudios de Posgrado

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Especialización de la alumna **Lesley Jassiel Zorrilla González**, una vez leído y revisado el Reporte de proyecto titulado “**ANÁLISIS DE LA CALIDAD MEDIANTE LA PRUEBA END ULTRASONIDO DE UNIONES DE ACERO AISI-SAE 1520 SOLDADAS POR HLAW**”, aceptamos que el referido Reporte de Proyecto revisado y corregido, sea presentado por la alumna para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa del Reporte de Proyecto correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente el día 31 de Octubre de 2018.

**Dr. Felipe de Jesús
García Vázquez**
Presidente

**Dr. José Jorge Ruíz
Mondragón**
Secretario

**Dra. Gladys Yerania Pérez
Medina**
Vocal

AGRADECIMIENTOS

A CONACYT y a COMIMSA, por haberme otorgado todos los medios necesarios para la realización de este posgrado. A mi comité tutorial, en especial a la Dra. Gladys y al Dr. Pedro. A mis colegas y a todo el personal académico y administrativo que me demostraron su gran capacidad profesional, pero sobre todo humana para superar la adversidad.

DEDICATORIA

Esto va dedicado muy especialmente a mi familia, amigos y a cada persona que ha coincidido en este difícil, pero fructuoso camino llamado vida.

La persistencia es para el carácter del hombre, como el carbono lo es para el acero.

Napoleon Hill.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1.....	2
1.1 Antecedentes	2
1.2 Planteamiento del problema.....	3
Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.4 Justificación.....	4
1.5 Alcances y delimitaciones	5
1.6 Aportación Industrial.....	6
CAPÍTULO 2.....	7
2.1.1 Aceros al carbono.....	7
2.1.2 Aceros al alto manganeso.....	10
2.1.3 Acero 1520	14
2.2 Soldadura láser	15
2.2.1 Aplicaciones generales.....	15
2.2.2 Características.....	16
2.2.3 Clasificación	18
2.3 Soldadura por arco eléctrico y gas (GMAW)	20
2.4 Soldadura híbrida.....	22
2.4.1 HLAW	23
2.4.2 Normatividad	34
2.5 Ensayos no destructivos	37
2.5.1 Clasificación	37
2.5.2 Ultrasonido	38
3.2 Metodología	48
3.2.1 Preparación de las muestras.....	49
3.2.2 Análisis metalográfico.....	49
3.2.3 Prueba de UT	50
3.2.4 Prueba de tensión.	52

3.2.5 Microdureza.....	52
CAPÍTULO 3.....	53
4.2 Análisis metalográfico	54
4.2.1 Macrografías.....	54
4.2.2 Micrografías.....	57
4.3 Prueba UT	61
4.4 Prueba de tensión	66
4.5 Prueba de microdureza	67
CAPÍTULO 4.....	71
Bibliografía.....	73
ÍNDICE DE FIGURAS	77
ÍNDICE DE TABLAS	78

SÍNTESIS

Se han dedicado muchos esfuerzos para el desarrollo e implementación de nuevos avances del campo de la soldadura industrial. Dentro de dichos esfuerzos se realiza una etapa de estudio de viabilidad del uso de alguna tecnología, en el cual se ejecuta un análisis de calidad a las partes soldadas, con el objetivo de constatar que estas uniones cumplen con especificaciones propias para su aplicación, por ejemplo.

La hibridación de procesos de soldadura ha sido objeto de estudio en últimos tiempos, debido a las excelentes características que le puede otorgar a la unión y a la mejora del proceso. Siguiendo esa línea de estudio y análisis de viabilidad de la implementación de nuevos procesos, en el presente documento se realiza un estudio del arte de la soldadura híbrida por arco láser (HLAW, por sus siglas en inglés) y un análisis de la calidad mediante ultrasonido de uniones elaboradas por este proceso en un acero AISI 1520 de 12 mm de espesor. Dicho estudio permitirá aportar información de interés para el empleo del proceso y material mencionado en la elaboración de un eje trasero de aplicación automotriz.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Siendo la soldadura una de los principales recursos empleados dentro de la industria automotriz, resulta de vital importancia que su mejora e innovación vayan a la par del avance de nuevas necesidades y especificaciones dentro del sector, en especial cuando se trata de la elaboración de piezas cruciales como lo es un eje automotriz para unidades de carga pesada.

En últimos tiempos, el empleo de la soldadura láser ha acaparado mucha atención debido a características que le otorgan una oportunidad única a la industria para mejorar los tiempos de elaboración y calidad de sus productos, sin embargo dicho proceso cuenta con una limitante sustancial debido a que solamente es útil su empleo en materiales con espesores pequeños. Dada esta circunstancia se han buscado alternativas para hacer posible su aplicación en espesores mayores, surgiendo la soldadura híbrida por láser y arco (HLAW, por sus siglas en inglés) como una de esas posibilidades, y que como su nombre lo sugiere, combina características destacables de ambos procesos obteniéndose en su conjunto velocidades, penetraciones y raíces mayores, cordones estrechos y menor tamaño de ZAC.

Con la intención de avanzar en esta línea de desarrollo, al área de posgrado de COMIMSA se le ha sido encomendada la tarea y de la cual el presente trabajo

forma parte, de analizar la factibilidad de utilizar un tipo de acero al medio carbono para la elaboración de ensambles de ejes traseros para vehículos motrices de carga pesada. La contribución de este proyecto consistirá en analizar la calidad de uniones de placas con espesores de 12.7 mm del acero AISI/SAE 1520 soldadas por HLAW mediante la aplicación de la prueba de END de ultrasonido industrial a placas soldadas con anterioridad en un proyecto vinculado con el sector automotriz.

1. 2 Planteamiento del problema

Una función importante que se desarrolla en la industria es la ocupación por optimizar las actividades que conlleva la realización de un bien, sin que ello involucre una disminución en la calidad del producto. Una compañía mexicana desea implementar una nueva forma de elaboración de los ejes traseros automotrices que produce, para lo cual plantea utilizar un acero al medio carbono en conjunto con el proceso de soldadura híbrido por láser y arco, siendo necesario analizar la factibilidad del empleo de dicho proceso como un primer paso en el desarrollo e implementación de su propuesta. El presente proyecto aportará información que contribuirá al análisis de dicha factibilidad por medio de la aplicación de la prueba END ultrasonido en la soldadura de placas de 12.7 mm de espesor de este acero para observar la presencia de discontinuidades características del proceso de soldadura HLAW, como lo son porosidades, grietas, falta de fusión o inclusiones.

Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar por medio de la aplicación de la prueba de END ultrasonido industrial el tipo de discontinuidades que pueden presentarse en uniones

soldadas por el proceso de HLAW de placas de acero AISI-SAE 1520 de espesores de 12.7 mm.

1.3.2 Objetivos específicos

- Compilar información acerca del estado del arte de la soldadura HLAW y aceros de medio carbono, características, efectos de los parámetros de soldado en las uniones y su relación con las discontinuidades que se presentan.
- Analizar las condiciones de la prueba de END de ultrasonido industrial para su aplicación en las uniones soldadas mediante HLAW.
- Relacionar los resultados de la prueba de END ultrasonido industrial con la caracterización microestructural de dichas uniones.

1.4 Justificación

La búsqueda de una optimización de los materiales y procesos que emplea la industria es continua y siguiendo esa línea, se tiene la intención de implementar el proceso soldadura híbrida por láser y arco para realizar un eje trasero automotriz para unidades de carga pesada con un acero de medio carbono y alto manganeso. La razón es que dicho proceso presenta varias características que lo convierten en una opción ideal para su empleo, entre ellas una mejora en la velocidad y penetración de soldado, además de menores afectaciones provocadas por la aplicación de calor en comparación a otros procesos convencionales.

Como parte del análisis de factibilidad que se desarrolla para el empleo de dicha tecnología y dentro de las actividades que se ejecutan en esta etapa del proyecto, se encuentra la parte del análisis de la calidad de uniones previamente realizadas con variados parámetros de soldadura. Dicho análisis se realizará con

la prueba de UT, ya que presenta ventajas importantes como no ser invasivo, portátil, interpretación de las mediciones inmediata y es de gran exactitud, razón por la cual resulta un recurso ideal para ser utilizado en este tipo de materiales y aplicaciones.

En el presente reporte de proyecto serán analizadas las uniones de placas de acero al medio carbono de 12.7 mm de espesor mediante la aplicación de ultrasonido industrial, mismo que permitirá aportar información importante para determinar si es viable o no realizar ejes traseros de unidades motrices empleando dichos recursos.

1.5 Alcances y delimitaciones

- El tipo de material con el que se trabajará es un acero de medio carbono SAE 1520, material previamente soldado en la Universidad Metodista del Sur en Dallas, Texas y cuenta con concentraciones y características específicas de aleantes que le otorgan propiedades mecánicas únicas.
- Las pruebas de ultrasonido se realizarán en las uniones de placas con espesores de 12.7 mm, previamente soldadas en la Universidad Metodista del sur en Dallas, Texas, USA.
- Los criterios de aceptación o rechazo en el que estará basado este análisis de la calidad estarán sujeto a estándares internacionales como ISO 12932:2013 (Welding -- Láser-arc hybrid welding of steels, nickel and nickel alloys -- Quality levels for imperfections) y AWS C7.6/C7.6M:2017 (Process Specification and Operator Qualification for Láser Hybrid Welding).

1.6 Aportación Industrial

Al profundizar en el conocimiento del tipo de discontinuidades que se pueden presentar en las uniones soldadas por el proceso HLAW y acero 1520 de ejes traseros automotrices (principal intención y contribución del presente proyecto), a fin de obtener información para determinar si es factible el empleo de estas tecnologías para la fabricación de la autoparte.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Aceros

Un acero es una aleación de hierro con uno o varios elementos químicos, siendo el carbono el principal aleante ocupando un 2% o menos del total de la concentración. Una característica importante de los aceros es que pueden ser deformados en frío o en caliente (a diferencia de los hierros fundidos). Para su identificación existen varias clasificaciones, mismas que se realizan a partir de sus propiedades químicas, por especificaciones, microestructura, resistencia, tratamiento térmico, nombre comercial, aplicación, entre otras. La figura 2.1 muestra una clasificación básica de los aceros a partir de su aplicación y estructura [1].

2.1.1 Aceros al carbono

En un acero al carbono no hay un contenido mínimo específico de cromo, cobalto, niobio, molibdeno, níquel, titanio, tungsteno, vanadio, aluminio o zirconio o de cualquier otro elemento; cuando el contenido mínimo de cobre no excede el 0.40% o en su defecto, cuando no se exceden los contenidos de manganeso

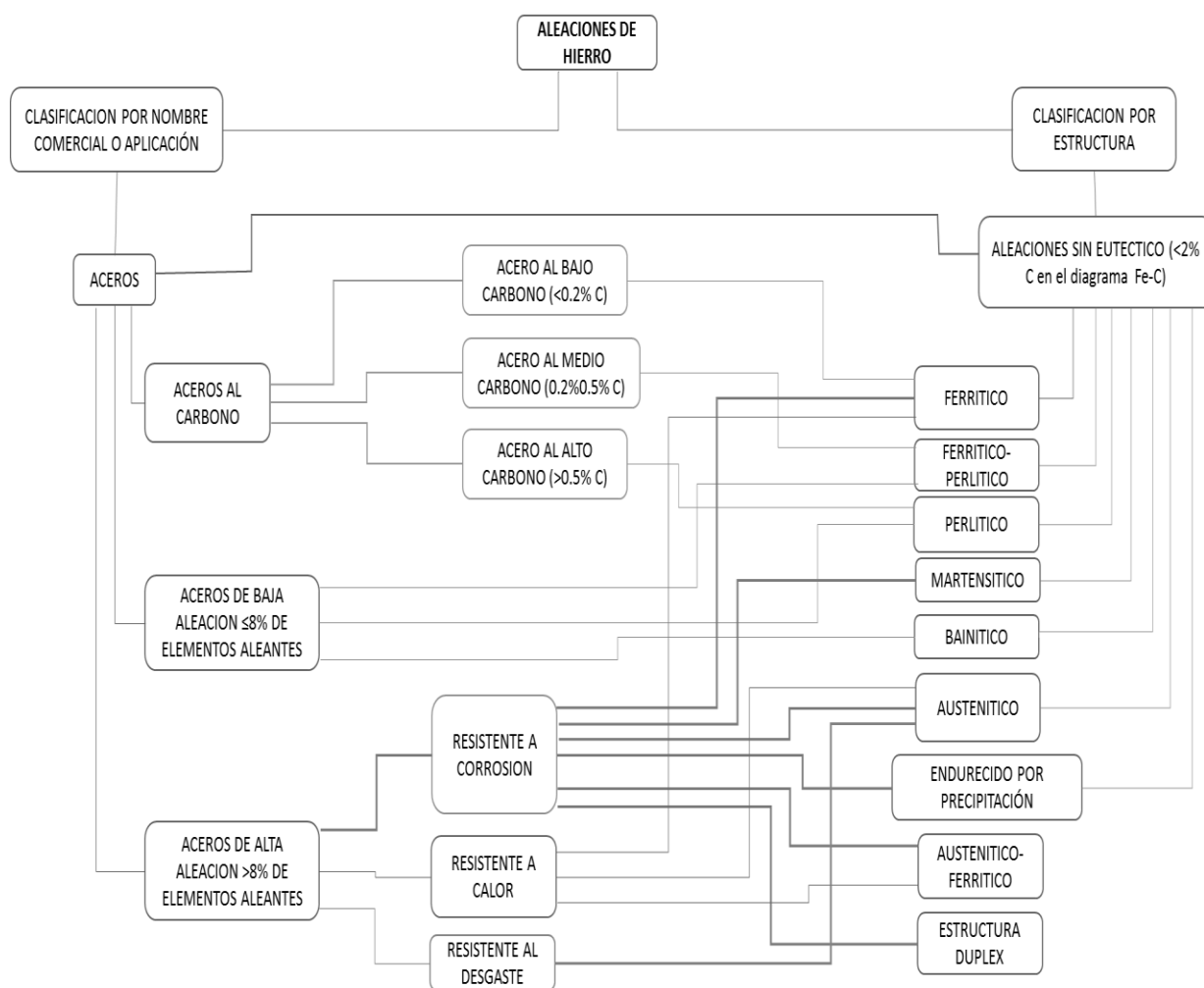


Figura 2.1: Diagrama de clasificación de los aceros.

(1.65%), silicio (0.60%) o cobre (0.60%). Se pueden categorizar de diferentes maneras (tal como la clasificación general de los aceros) sin embargo, al ser el carbono el elemento que más impacto tiene sobre las propiedades del acero, esta división también se realiza en base a su concentración química, por lo que se identifican los siguientes [2]:

Tabla 2.1: Clasificación de los aceros al carbono [1].

Clasificación	Concentración de carbono (%)
Aceros al bajo carbono	Menor a 0.2
Aceros al medio carbono	0.2-0.5
Aceros al alto carbono	Mayor a 0.5

Otra categoría adicional que puede ser encontrada es la de los aceros al ultra alto carbono, con concentraciones de 1.25% al 2.00% de C. Dicha clasificación se realiza en el ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys [3].

2.1.2.1 Aceros al medio carbono

Su contenido varía entre 0.20% y 0.50% de C (como puede observarse en la Tabla 2.1). Son menos dúctiles, presentan mayor dureza y tienen mayor resistencia mecánica que los aceros al bajo carbono. Adicionalmente presentan [2]:

- Incremento en características de maquinabilidad.
- Buena respuesta a los tratamientos térmicos.
- Modificación de propiedades por temple y revenido.

Un ejemplo de un acero al medio carbono típico es el C1020, C1025 o el C1030 con una dureza Brinell que oscila entre 140 y 210 y un índice de maquinabilidad del 0.65% y una temperatura de fusión de 1650 K.

Microestructura. Generalmente en los aceros al medio carbono (al igual que los de bajo carbono) al estar aleados con manganeso, molibdeno y silicio se forman estructuras bainíticas con ferrita y austenita (o martensita formada de la austenita), en lugar de la clásica estructura bainítica ferrita-carburo. Los

elementos de aleación de estos aceros, como el molibdeno, cromo o níquel hacen más difícil que ocurran las transformaciones de difusión controlada y como resultado, se puede formar martensita con enfriamientos menos drásticos, como el temple en aceite. [3]

2.1.2 Aceros al alto manganeso

El manganeso es un elemento de aleación esencial en la mayoría de los aceros. Se emplea para aumentar la resistencia en solución sólida y la dureza, así como la templabilidad. Es un formador de carburo débil (mayor que el hierro). Contrarresta la fragilidad causada por el azufre (sulfuro de hierro) a través de la formación de sulfuro de manganeso (MnS). Altos niveles de manganeso producen un acero austenítico con resistencia al desgaste y abrasión. [4].

Debido a diferencias muy importantes en sus propiedades, en específico la respuesta al tratamiento térmico, los aceros al carbono con contenidos altos en manganeso fueron removidos de la serie 10XX y separados en la serie 15XX. Es importante mencionar que son considerados aceros al carbono, pero debido a las características descritas, responden muy parecido a algunos aceros aleados. [5]

El sistema de clasificación del Instituto Americano del Hierro y del Acero (AISI, por sus siglas en inglés) y la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE, por sus siglas en inglés) basan sus designaciones solamente en las composiciones químicas de los materiales, contando con un código de 4 o 5 dígitos que indican la concentración de carbono y la clase del material. Durante mucho tiempo, ciertos grados de aceros al carbono y aleados fueron designados por el sistema numérico de 4 dígitos AISI/SAE. Sin embargo, debido a que AISI no emite especificaciones de los materiales, la relación entre ella y las designaciones de grado han sido discontinuadas. Desde la edición de 1995 del Strip Steel Manual de la Sociedad del Hierro y del Acero (ISS, por sus siglas en inglés), las designaciones de 4 dígitos son referidas solamente como designaciones SAE [6].

Es así que se tienen identificadas las siguientes clases: 10xx, 11xx, 12xx, 13xx y 15xx, basadas en la composición del mayor elemento aleante que constituye al material como se muestra en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2: Clasificación AISI/SAE de aceros al carbono [1].

Designación AISI/SAE	Concentración
10xx	Mn 1.00% máx.
15xx	Mn 1.00-1.60 %
13xx	Mn 1.60- 1.90%
11xx	Acero al carbono resultado
12xx	Acero al carbono resultado y refosforado.

La serie 15xx y 13xx representan aceros al carbono al alto manganeso. Niveles más altos de manganeso proporcionan dureza y resistencia mecánica a los materiales.

A continuación se muestra la Tabla 2.3 y 2.4 con los aceros de la gama 15XX identificados dentro de los estándares AISI-SAE como composiciones de acero al alto manganeso [1]:

Aplicable solamente a productos semielaborados para forjado, barras roladas en caliente y acabadas en frío, alambrado y tubos sin costura.

Tabla 2.3: Composición de aceros al carbono al alto manganeso* [3].

Designación		Composición			
AISI/ SAE No.	UNS No.	C	Mn	P _{max}	S _{max}
1513	G15130	0.10-0.16	1.10-1.40	0.040	0.050
1522	G15220	0.18-0.24	1.10-1.40	0.040	0.05
1524	G15240	0.19-0.25	1.35-1.65	0.040	0.05
1526	G15260	0.22-0.29	1.10-1.40	0.040	0.05
1527	G15270	0.22-0.29	1.20-1.50	0.040	0.05
1536	G15360	0.30-0.37	1.20-1.50	0.040	0.05
1541	G15410	0.36-0.44	1.35-1.65	0.040	0.05
1548	G15480	0.44-0.52	1.10-1.40	0.040	0.05
1551	G15510	0.45-0.56	0.85-1.15	0.040	0.05
1552	G15520	0.47-0.55	1.20-1.50	0.040	0.05
1561	G15610	0.55-0.65	.075-1.05	0.040	0.05
1566	G15660	0.60-0.71	0.85-1.15	0.040	0.05

*Para rangos o límites de Silicio, plomo y boro son aplicables los rangos y límites para aceros al carbono.

- Aplicable a acero estructural, placas, láminas, planchas, tiras y tubería para soldar.

Tabla 2.4: Composición de aceros al carbono al alto manganeso* [3].

Designación		Composición %				
AISI/SAE No.	UNS No.	C	Mn	Pmax	Smax	No. SAE formal
1527	G15270	0.22- 0.29	1.20 -1.55	0.040	0.050	1027
1536	G15360	0.30- 0.38	1.20–1.55	0.040	0.050	1036
1541	G15410	0.36- 0.45	1.30–1.65	0.040	0.050	1041
1548	G15480	0.43- 0.52	1.05 – 1.4	0.040	0.050	1048
1552	G15520	0.26–0.55	1.20–1.55	0.040	0.050	1052

*Para rangos o límites de Silicio requeridos son los usados más comúnmente: hasta SAE 1025 (incluido este): 10% máx., 0.10-0.25% o 0.15-0.35%. Superiores a SAE 1025: 0.10-0.25% o 0.15-0.35%.

Es importante mencionar que aparte de las concentraciones químicas, las características de un material también están definidas por la aplicación que se le dará. Es así que aunque AISI/SAE clasifica los materiales en base a su química, otro tipo de estándares como la Sociedad Americana de Pruebas en Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) contemplan factores adicionales a su composición tales como el uso que se le dará al material y sus propiedades mecánicas [7].

Aplicaciones

Los aceros al medio carbono se utilizan en la mayoría de los elementos de maquinaria que tienen necesidad de una resistencia mecánica de moderada a alta, con requisitos de ductilidad altos, dureza moderada y superficies resistentes al desgaste. A continuación se enlistan algunas de las aplicaciones que se le dan este tipo de material [1] [8] [9] :

- Componentes de maquinaria automotriz: Ejes, bielas, cabezales, cigüeñales, ejes y engranes.
- Equipo para prensas y tornos
- Equipo para estampado o presa
- Equipo para industria agrícola
- Equipo para industria petrolera
- Piezas de motores como rodillos de transmisión
- Equipo de ferrocarriles
- Producción de rieles
- Piezas para maquinaria de trabajado de metales.

2.1.3 Acero 1520

Bajo los criterios de clasificación del estándar SAE, el acero 1520 sería considerado un acero al alto manganeso. Los segundos dos dígitos expresan el porcentaje en contenido de carbono nominal, que para este caso se trata del 20% aproximadamente y lo categorizan en uno al medio carbono [1].

La composición química extraída de un análisis químico de las placas de acero utilizadas se presenta en la Tabla 2.5:

Tabla 2.5: Composición química del acero AISI 1520.

Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo
97.9	0.248	0.205	1.46	0.0052	<0.0030
Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti
0.0266	0.0246	<0.0020	0.0041	0.0379	0.0148
V	W	Pb	Ca	Zr	
0.0349	<0.04	<0.0150	0.0082	0.0044	

Debido a que los aceros al medio carbono pueden ser tratados para producir una amplia variedad de propiedades mecánicas y que en adición, las características de un acero al alto manganeso dependerán en su mayoría del tratamiento térmico al que sea sometido, es difícil precisar las características específicas de este acero, ya que se trata de un material elaborado concretamente para la compañía que encabeza el presente proyecto. Sin embargo, en base a la bibliografía analizada, en general este acero presenta buenas propiedades de relación resistencia y dureza, además de maquinabilidad y excelente respuesta a tratamientos térmicos, por lo que son ideales para aplicaciones industriales como lo podría ser un eje automotriz trasero. [10]

2.2 Soldadura láser

El láser es un acrónimo de Amplificación de luz estimulada por la emisión de radiación, en el que se genera un haz de luz coherente (longitud de onda constante) y en la que la fase y amplitud están relacionadas en cualquier instante de tiempo. La estructura básica de un láser consta de un medio de ganancia (que puede ser líquido, sólido o gaseoso), un resonador óptico, una fuente de excitación y un disipador de calor [11].

Actualmente se cuenta con una gran variedad de láseres para el procesamiento de materiales. Las longitudes de onda varían desde valores menores a 0.2 a 10 micrómetros y la duración de los pulsos desde 1 nanosegundo o hasta llegar a la onda continua [12].

2.2.1 Aplicaciones generales

El láser tiene muchas aplicaciones, en general es usado en varias áreas de la medicina para tratamientos oculares o estéticos por ejemplo, en la topografía es utilizado para la alienación de terrenos, telemetría, fusión láser (producción de energía), lectores electrónicos, comunicaciones entre otros.

La selección del tipo de láser y de la longitud en la que opere dependerá de la aplicación que vaya a tener. Para la soldadura son empleados generalmente dos tipos de tecnología: láseres de estado sólido o de gas. Los más populares son los Nd: YAG, Fibra, de Disco o CO₂, variando el medio activo que puede ser sólido o gaseoso, e inclusive líquido. El tipo de láser más utilizado en la industria es el láser Nd: YAG y el de CO₂, con radiaciones de 1.06 μm y 10.6 μm de longitud de onda, contando ambos con la posibilidad de operar de manera continua o pulsada.

2.2.2 Características

El láser emite radiación óptica o no ionizante, por lo que opera desde el espectro ultravioleta hasta el infrarrojo, pasando por el visible. El nanómetro (nm) es la unidad que se utiliza para expresar la longitud de onda. El principio con el que opera el láser es que al incidir una superficie (dependiendo de las propiedades), su energía será absorbida y elevará su temperatura, lo que provocará una alteración en el material, que en el caso de la soldadura se tratará de una fundición.

El término coherente es la característica más importante del láser y se utiliza para referir cuando las ondas de luz se encuentran en fase unas con otras en todos sus puntos. Adicionalmente el haz también es monocromático, lo que significa que emite en un solo tipo de longitud de onda o espectro y además es direccional.

Los elementos básicos que integran un dispositivo láser son:

- Medio activo: gas, líquido, solido cristalino o un semiconductor.
- Mecanismo de excitación: se trata de la fuente de energía con la que opera (bombeo óptico o corriente eléctrica).
- Mecanismo de realimentación: se encarga de reflejar y por tanto retornar la luz para que sea amplificada. Consiste en una serie de espejos alineados que reflejen la luz al medio activo.
- Acoplador de salida: es por donde sale el haz, cabe mencionar que solo sale una porción de toda la energía que está siendo reflejada en el interior, que es definida como la eficiencia.

Ventajas de la soldadura láser:

- Elaboración de uniones delgadas

- ZAC reducidas
- Distorsión mínima
- Acceso a una sola superficie para el soldado
- Rápidas velocidades
- Uniones disimilares
- No requiere de atmósferas controladas, más allá del uso de gas de protección
- El haz es invariable bajo efectos de campos magnéticos
- Dependiendo del procedimiento, se tiene la posibilidad de prescindir de precalentamientos o tratamientos térmicos posteriores.

En la Tabla 2.6 se enlistan los parámetros que deberán de cuidarse de este tipo de proceso:

Tabla 2.6: Parámetros de la soldadura láser [13].

Categoría	Parámetro
Material	Propiedades ópticas de la superficie a la radiación Propiedades térmicas Temperaturas de fusión y ebullición Facilidad de soldadura
Geometría de la unión	Diseño Tolerancias Accesibilidad
Láser	Potencia, promedio y de pico Modo continuo o pulsante Modo: distribución espacial de la potencia Longitud de onda
Proceso	Velocidad de la soldadura Longitud Focal utilizada Posición relativa del punto focal y de la pieza Tipo de gas de aporte

2.2.3 Clasificación

Láser CO₂. Es el tipo de láser de mayor potencia disponible y su funcionamiento se basa en el uso de un medio gaseoso que puede ser CO₂ mezclado con otros gases. Generalmente se utiliza para corte y soldadura de alta penetración. Su longitud de onda es 10.6 μm (espectro infrarrojo), lo que le permite ser utilizado en gran variedad de materiales debido a que su longitud de onda es absorbida por la mayoría de sólidos.

Láser Nd: YAG. Es un láser de estado sólido que utiliza una sustancia sólida como medio activo. La razón por la que se utiliza esta sustancia como anfitrión es porque tiene una conductividad térmica alta, alta resistencia mecánica, buena calidad óptica y ser producido en grandes proporciones. Presenta un umbral apto para operaciones continuas, emite en una longitud de onda de 1.06 μm , lo que permite que sea absorbida más fácilmente por metales y además puede ser fácilmente transmitida por fibras, lo que lo hace apto para aplicaciones industriales debido a que su sistema es más sencillo que el de CO₂ [14] .

Desde 1964 la mejor opción de material anfitrión para iones de neodimio conocida era el granate de aluminio e itrio dopado (Nd: YAG), descubierto por J. Geusic. Desde entonces Nd: YAG es la opción más versátil y ampliamente usada como material activo para láseres de estado sólido. En los años 70's se crearon los primeros láseres de diodo capaces de operar continuamente a temperatura ambiente. Las primeras aplicaciones para ellos fueron en plataformas aéreas y espaciales en donde su tamaño reducido y el consumo energético son de particular importancia [15].

El funcionamiento consta de energía generada por lámparas (xenón, krypton o diodos emisores de luz) que es reflejada al cristal anfitrión. Dicha luz excita a los átomos del neodimio, por lo que este emite en una longitud de onda de los 1.06 μm . Adicionalmente se agregan enfriadores o disipadores de calor a base

de agua para obtener mejores potencias. Este tipo de láser presenta eficiencias del 1% al 4%.

En general son utilizados de manera pulsada, sin embargo existen láseres de onda continua para aplicaciones que demandan potencias más altas para corte y soldado que pueden emitir pulsos de 0.1 milisegundos, velocidades de los 2000 KHz y potencias pico de 100 kW y ser enfocados en puntos de hasta 75um.

Láser de fibra. Son equipos que emplean fibras ópticas como medio de activo. Generalmente se tratan de fibras dopadas con elementos raros como el neodimio, erbio, iterbio, tulio o praseodimio y diodos para el bombeo (la mayoría de los láseres fibras trabajan con ese mecanismo). Aunque el funcionamiento de este tipo de láser es muy parecido a los de estado sólido, el efecto de la guía de onda y la pequeña área de modo efectivo provocan propiedades muy diferentes. Debido a ello operan con ganancias mucho más altas y presentan pérdidas en el resonador.

Láser de disco. Es un tipo de láser que utiliza Yb: YAG como medio activo (Ytterbium: Yttrium Aluminum Garnet), en el cual un delgado disco de este material es excitado en su superficie por láseres diodo. La superficie trasera del disco está montada a un sistema de enfriamiento, que tiene una superficie altamente reflectante y actúa como un espejo en el resonador del láser.

Este tipo de láser es muy atractivo para la generación de pulsos ultra cortos a potencias muy altas. Además de ello, la principal ventaja es la facilidad que presenta para lograr la operación de difracción limitada y el amplio ancho de banda del Yb: YAG (hasta ahora el medio de ganancia más apto para láseres de disco) y la pequeña no linealidad de un disco delgado. Esta linealidad ayuda a evitar excesivos cambios de fase no lineales a pesar de los altos picos de la potencia de intracavidad, lo que permite el uso de técnicas más simples en muchos casos [16]. En la Figura 2.2 se ejemplifica el funcionamiento del láser de disco, en donde se observan las trayectorias de los haces de luz.

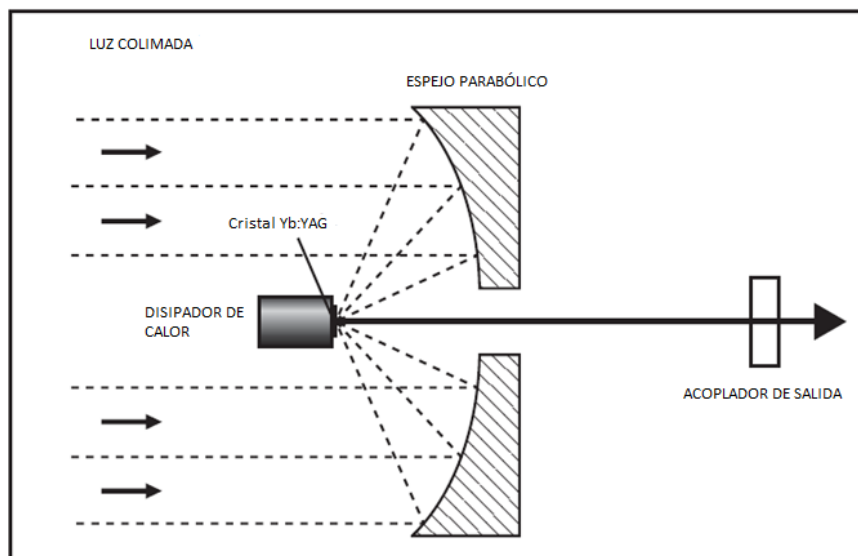


Figura 2.2: Principio de funcionamiento del disco láser [16].

Es importante mencionar que no hay un láser mejor que otro, sencillamente se trata de la aplicación que se le dé y de los recursos con los que se cuenta. Por ejemplo, a pesar de que los láseres de CO_2 tienen mayor potencia, es difícil su manipulación debido a que se necesitan espejos para realizar su trayectoria. Con un láser de estado sólido, el haz puede trasladarse mediante algún tipo de fibra óptica que podría resultar mejor en aplicaciones robotizadas.

2.3 Soldadura por arco eléctrico y gas (GMAW)

Es un proceso de soldadura en el cual el calor para fundir el material es generado por un arco eléctrico entre el electrodo y el metal base. Dicho electrodo es un alambre consumible y se alimenta de manera continua, la zona de soldadura es protegida de la contaminación mediante una corriente de gas de protección.

Desde un punto de vista macroscópico, el arco se considera como un convertidor de energía eléctrica a calor y una amplia gama de radiación electromagnética. La naturaleza del proceso de conversión y el comportamiento del arco están determinados por numerosos factores involucrados en el proceso tales como el tipo de gas, la composición química del electrodo, el voltaje, la corriente, la velocidad e inclusive limitaciones de espacio o estabilidad. Los arcos están caracterizados por la transferencia de masa entre los electrodos. En la soldadura con electrodos consumibles el movimiento de la masa involucra la transferencia de metal fundido de un electrodo a otro, dicho movimiento depende del modo de operación del arco. El flujo de gas es un factor de suma importancia debido a su influencia en la estabilidad del proceso y la consecuente integridad de la soldadura.

El modelado del arco es motivado por varias razones, dentro de las cuales destaca la comprensión de su física y la explicación del comportamiento de la descarga bajo diferentes condiciones de operación, así como predecir el desempeño del proceso de soldadura basado en principios físicos. Sin embargo, esta tarea es bastante difícil debido a la complejidad de los procesos involucrados y su variación en espacio y tiempo. Numerosos estudios y ecuaciones han surgido para tratar de realizar esta descripción.

El gas de protección que se utiliza puede ser inerte, activo o una mezcla de ellos, siendo comúnmente utilizado el dióxido de carbono, argón, oxígeno y otros gases en diferentes proporciones. Aquí recae la diferencia entre MIG y MAG, ya que su denominación se basará en el tipo de gas utilizado y erróneamente se usa de forma indiscriminada. Dichas mezclas permitirán una optimización del desempeño del arco o reducir el chisporroteo, como ejemplo. Respecto a la variedad disponible de modos de transferencia de calor se tiene la globular, por rociado, arco pulsado o corto circuito y el de alta tasa de deposición [17].

Ventajas:

Se puede emplear en cualquier material debido a todas las opciones que presenta respecto a los modos de arco que se pueden usar, así como los tamaños y características de electrodos y las mezclas de gases de protección posibles. La alimentación del electrodo es continua y presenta tasas de deposición más altas, por lo que hay un impacto en la productividad. Adicionalmente es realizable en cualquier posición y en uniones de longitudes grandes debido a la alimentación, además de que no se origina escoria. Se logran mayores penetraciones seleccionando un modo de transferencia adecuado, por lo que estas características hacen de GMAW un proceso apto para aplicaciones de producción en grandes escalas y automatizadas.

Respecto a la elaboración de fundas para ejes automotrices, el empleo de procesos por arco convencionales son los más populares (MIG y MAG generalmente), debido a la capacidad con la que cuentan para unir al tipo de materiales y espesores que son empleados en la elaboración de dichos componentes automotrices.

2. 4 Soldadura híbrida

Existen terminologías para clasificar el tipo de interacciones que tienen el arco y el láser, como lo son la soldadura de arco mejorada con láser o soldadura láser aumentada por arco, en la que la diferencia radica en quién proporciona la mayor cantidad de energía. Para cuestiones prácticas el término soldadura láser híbrida es el que se utiliza. El desarrollo comercial de esta tecnología empezó después de la gran aceptación de la soldadura láser en los años 90s, y que a partir de ahí se haya logrado un desarrollo en la óptica láser y aditamentos que soporten la combinación de ambos procesos [18].

Clasificación. De acuerdo a la fuente de energía secundaria se pueden identificar diferentes tipos de procesos híbridos como:

- Láser/TIG
- Láser/plasma
- Láser/GMAW (MIG-MAG)

2.4.1 HLAW

Descripción del proceso: Lo que ocurre con la HLAW es que la pieza de trabajo absorbe la energía del haz que choca en una pieza calentada por un arco eléctrico, en adición el vapor metálico inducido por el calentamiento del láser aumenta las condiciones de conducción de corriente del arco. Anteriormente se mencionaron las características de ambos procesos, por lo que a continuación en la Tabla 2.7 se muestra una breve recapitulación con el fin de observar las características más interesantes y ver cómo se conjugan para formar la soldadura híbrida:

Tabla 2.7: Comparación entre LBW y GMAW.

LBW:	GMAW:
<p>Se realiza por fusión, en la cual un haz incidente de luz coherente concentrado y enfocado incide en el material base y realiza la unión.</p> <p>Adicionalmente se emplean gases de protección para evitar la oxidación.</p> <p>La profundidad máxima es de 19 mm aproximadamente y su relación entre profundidad y anchura es de 5:1.</p> <p>Beneficios:</p>	<p>Soldadura por arco eléctrico</p> <p>Utiliza un electrodo consumible con alambre en lugar de varilla y un gas de protección. Por lo que no se requieren procesos de limpieza adicionales (ya que no se utilizan fundentes y velocidades de deposición altas).</p> <p>Unión de materiales ferrosos y no ferrosos</p>

Penetración profunda ZAC reducida Acabados de alta calidad.	Debido a la característica de que usa alambre de soldadura continuo, ofrece una ventaja sobre reducción del tiempo.
---	---

Es así, que ambos procesos aportan sus características más rescatables y se tiene para HLAW las siguientes ventajas y limitaciones [19] , [20], [21] :

- Velocidades, penetraciones y raices mayores: La soldadura por láser y arco de metal produce uniones más gruesas que el láser y mayor profundidad de que la GMAW de manera independiente, adicional a que son realizadas con mayores velocidades en una sola pasada.
- Menor ZAC derivada de la entrada de calor.
- Transiciones suaves entre soldadura y metal base.
- Microestructura: obtención de microestructuras deseadas en la unión ya que las tasas de enfriamiento pueden ser obtenidas más fácilmente que con la soldadura autógena.
- Menores cantidades de trabajos de terminado.
- Soldaduras con mejor calidad de terminados en comparación a otros procesos.
- Estabilidad del proceso.
- Propiedades mecánicas: características de fatiga y tenacidad en soldadura.
- Mayor eficiencia de fusión.
- Productividad mejorada.
- Flexibilidad adicional en el control del cordón de soldadura.
- Respecto al gas de protección, este se puede aplicar de manera coaxial o central al rayo láser o desconcentrado, con una boquilla externa y que es la técnica más popular.

Lo que ocurre al mezclar los dos procesos es que el láser otorga una mayor penetración del material con baja cantidad de calor y sus respectivas afectaciones, mientras que el proceso GMAW aporta material mejorando el relleno en la raíz y contorno, expande la tolerancia de las aberturas de raíz en la junta, facilita el control de la metalurgia de la soldadura, entre otras. Además, parte de la gran aceptación del proceso es que este se maneja bajo un control del proceso de manera cerrada. Se ha comprobado experimentalmente que las soldaduras láser logran vidas de fatiga de 2 a 3 veces mayores que los procesos convencionales. La Figura 2.3 ejemplifica las diferencias que presentan los procesos GMAW, láser e híbrido [19].

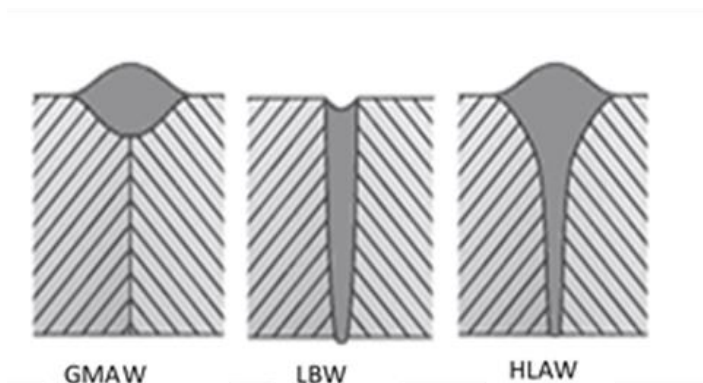


Figura 2.3: Diferencias de penetración de soldadura [22].

La soldadura MAG está limitada por la profundidad de penetración que alcanza, por lo que es necesario realizar varias pasadas. La soldadura láser por el contrario, puede alcanzar una profundidad mayor (limitada al espesor que alcanza dicha tecnología), sin embargo su poca tolerancia respecto a la abertura de raíz y la exactitud del acomodo de las piezas, además de las velocidades de rápido enfriamiento que pueden generar malas propiedades mecánicas puede provocar ciertas desventajas. La mezcla de estos dos procesos otorga características a las uniones en un grado intermedio de los dos.

Una instalación de soldadura híbrida consiste en una fuente de poder de láser y del arco, herramienta para soldar, sistema de control, sistema de enfriamiento,

sistema de distribución de gas, manipulador de soldadura, sistema de seguimiento del cordón y el sistema de monitoreo del proceso. En la Figura 2.4 se muestra la interacción de la antorcha y el láser, así como las principales zonas que se pueden identificar en el proceso:

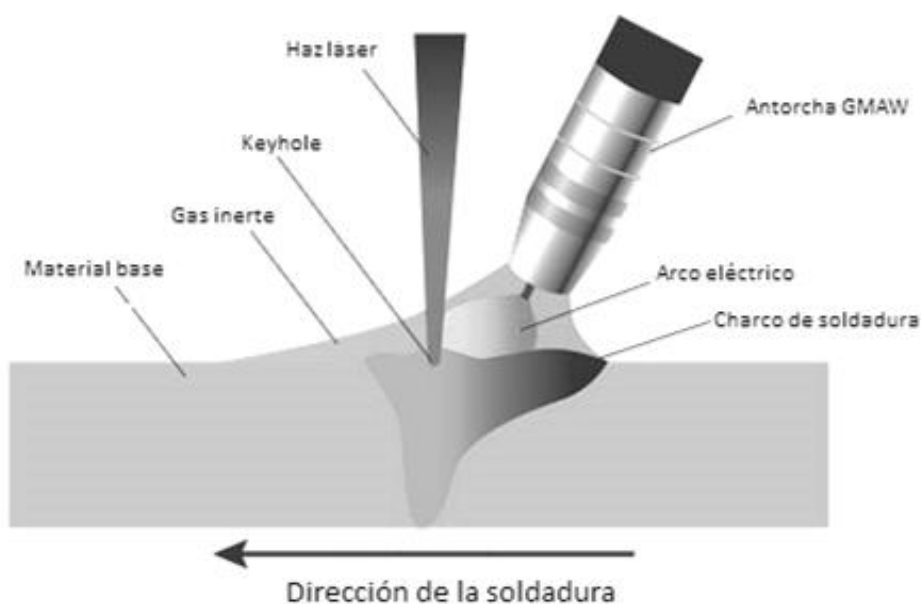


Figura 2.4: Esquema del proceso de soldadura HLAW [23].

La tecnología híbrida permite crear equipos tecnológicos móviles, dando como resultado un amplio número de ventajas. HLAW provee mayores posibilidades de controlar los parámetros de la estructura de fase, permitiendo decrementos en el nivel de tensión en la soldadura y su distorsión. En general, en comparación a los demás procesos de soldadura, no hay restricciones respecto al tipo de material que se puede usar en HLAW.

Respecto a los espesores que se pueden manejar, estos valores son los generalmente usados y aprobados [24]:

- Soldadura a tope: mínimo 4mm, máximo 30 mm (multi-layer), estándar 5mm a 12 mm.
- Soldadura de filete: mínimo 4mm, máximo 15 mm, estándar de 6 a 12mm.

Para obtener una soldadura de calidad es necesario que esta cuente con propiedades mecánicas satisfactorias que se derivan del empleo de una adecuada técnica de soldadura. Una de las técnicas más conocidas para obtener microestructuras y propiedades mecánicas adecuadas en HLAW es el uso de ciclos térmicos ultra rápidos, lo que puede ser logrado utilizando dos fuentes de calor una seguida de la otra, como en el caso del tándem por ejemplo, por lo que es necesario contar con el entendimiento del efecto de los ciclos de temperatura en las transformaciones estructurales y de fase del material, para lo cual se emplea la teoría cinética de las transformaciones de fase para obtener una descripción cuantitativa del efecto de la temperatura [25].

Realizar una descripción y relación de los parámetros de la soldadura híbrida es muy complejo, ya que de manera conjugada las variables de cada proceso se mezclan para formar un sistema de mayor dificultad. Durante la soldadura híbrida la energía juega un papel muy importante y su interacción con el material base, ya que estas provienen de fuentes diferentes. La Figura 2.5 intenta ejemplificar la complejidad y la interacción que tienen diferentes variables importantes en la soldadura híbrida [26].

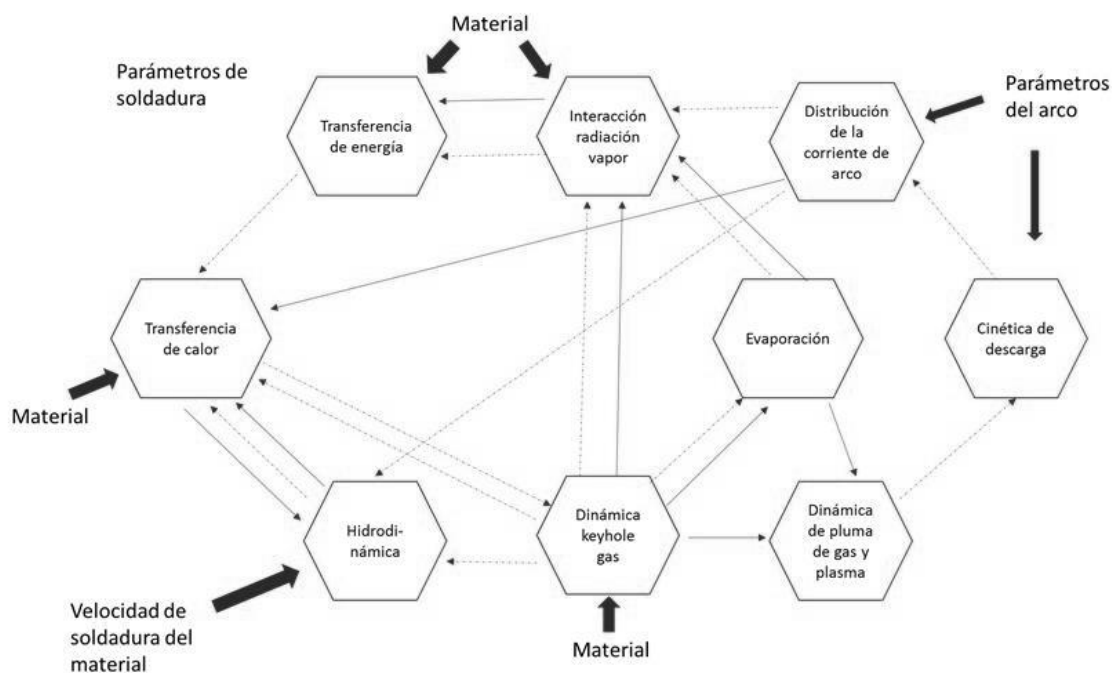


Figura 2.5: Estructura del modelo físico del proceso HLAW [20].

En el desarrollo del proyecto se variaron los siguientes parámetros:

- Velocidad de soldadura
- Velocidad de alimentación del cable de material de aporte
- Corriente-voltaje
- Potencia del láser

La distancia focal del láser o también conocido como profundidad de enfoque simbolizan la distancia entre el plano focal (que es el diámetro mínimo del haz) y la superficie de trabajo, que en este caso es el material base. Valores negativos de distancia focal indican el posicionamiento del plano focal del láser por debajo de la superficie de trabajo [27] y que se entiende gráficamente en la Figura 2.6.

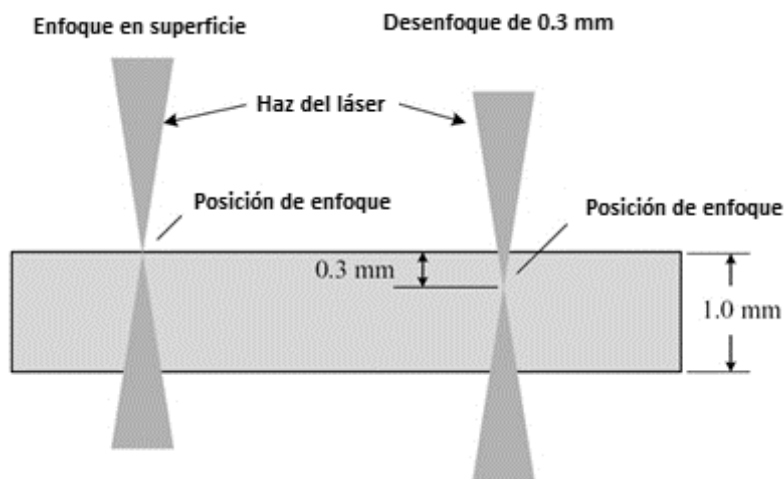


Figura 2.6: Profundidad de enfoque, ejemplo [28].

Aplicaciones. En general, la soldadura híbrida se ha utilizado para actividades en las cuales se involucran estructuras de pesos o dimensiones grandes, y en las que además es de vital importancia el aseguramiento de su calidad, ya que se tratan de estructuras con aplicaciones importantes como buques, puentes, vigas, muelles o ferrocarriles y que inclusive tiene aplicaciones militares y navales. [29]

Este proceso permite evitar situaciones tales como el encorvamiento de paneles y que es el caso de ferrocarriles y muelles, reducir pesos estructurales o emplear geometrías que no se podrían hacer bajo otro proceso como en el caso de puentes. En el caso de vigas la intención principal es reducir la distorsión y que además se incrementen las velocidades de soldado, la reducción de la distorsión tiene como consecuencia una reducción del empleo del enderezado pos-soldadura. En los muelles, específicamente con barcos se han logrado reducciones de oscilan en un 20 a 50 del peso de la estructura de la viga. En las tuberías el mayor impacto es en las velocidades que se pueden alcanzar con el soldado para diámetros grandes, adicional al hecho de que hay menores tensiones residuales y muy poco potencial de hidrogeno. [30]

Respecto al aseguramiento de la calidad, se sabe que la inspección de soldaduras para tuberías con procesos convencionales requiere de un retraso aproximado de 24 horas con el fin de verificar que no hay presencia de agrietamientos por hidrogeno, por lo que al reducir las posibilidades de la presencia de grietas al utilizar el proceso HLAW se harían inspecciones al momento.

En el caso de su uso para bajas temperaturas Ivan Bunaziv et all [31] comentan que el proceso híbrido puede emplearse en básicamente cualquier industria por todas las características mencionadas, especialmente si se trata con MIG o MAG. Sin embargo, resulta de mucho interés para actividades con temperaturas muy bajas de hasta -60°C (zonas árticas) debido al empleo de material de aporte que puede mejorar la resistencia a fractura y aumentar la productividad en general.

Aún hay un desconocimiento profundo de esta tecnología, no obstante es evidente la transformación que podría traer a la industria tanto económicamente o en sus procesos. [19]

Aplicaciones en el sector automotriz. Una de las primeras aplicaciones de este procesos fue en las puertas del Volkswagen Phaeton en donde se ejecutaban 48 uniones de 3.57 m de largo. Audi lo utilizó para unir los laterales del marco del techo del modelo A8, comprendido un total de 4.5 m de uniones soldadas. Otra aplicación incluye específicamente la sección de largo brazo de una grúa móvil de elevación pesada [32] o la construcción de transporte marítimo [29]. Respecto al presente trabajo la intención es emplearlo en la realización de ejes traseros automotrices de unidades de carga pesada.

2.4.1.1 Defectos presentes en HLAW

El análisis y una adecuada descripción del comportamiento dinámico del charco de soldadura es de gran importancia para comprender la formación de defectos tales como la acumulación de material en la superficie y a lo largo del espesor del material base (humping y spiking respectivamente, términos técnicos en inglés), porosidad, mordeduras o socavados. Como se describió anteriormente, es una tarea de muy alta complejidad, por lo que los estudios continúan para tratar de describir los fenómenos que ocurren [27].

Gerritsen [29] comenta que el mayor problema con uniones de espesores gruesos que se han observado con la soldadura híbrida son las fallas o defectos de solidificación. Estos defectos son grietas lineales internas formadas en el centro de la soldadura, las causas de su formación son atribuidas a la composición del acero, el calor de entrada y al espesor de las placas. Como resultado un cuidadoso control de dichos parámetros y muy particularmente en la composición es requerido en orden de evitar la aparición de estos defectos. En la Figura 2.7 se muestra un ejemplo de la aparición de defectos de solidificación con un láser Nd: YAG y MAG.

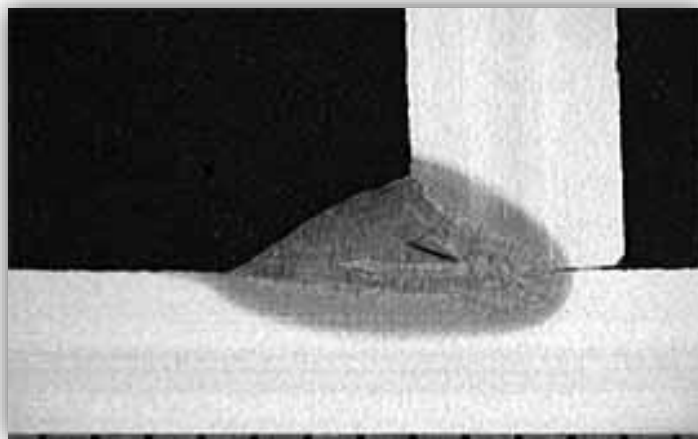


Figura 2.7: Defecto de solidificación en una unión tipo filete empleando soldadura híbrida con láser Nd: YAG y MAG. [29]

A pesar de las ventajas ya expuestas del proceso HLAW, tales como velocidades más altas de soldadura y penetraciones profundas, a dichas características también se les asocia la aparición de defectos dentro de los cuales los más comunes son la porosidad por la inestabilidad del keyhole y excesos de penetración o goteo, caracterizado por la formación de esferoides del material en la parte inferior de la unión. Conforme se desarrollan láseres de mayor potencia, se generan penetraciones de mayor profundidad, sin embargo, los defectos se vuelven más problemáticos, por lo que es necesaria la correcta comprensión de sus mecanismos de aparición. [30]

Hasta el momento se sabe que la gravedad, la tensión superficial y la fusión del material juegan un rol en la aparición de dichos defectos, por lo que se ha recurrido al empleo de fuerzas electromagnéticas en el fondo de la unión para brindarle un soporte al charco de soldadura, sin embargo bajo ambientes de producción puede no resultar práctico, además de que las fuerzas electromagnéticas pueden variar durante la soldadura. Por lo que Blecher et al [33] sugieren que la presencia de oxígeno en el material fundido tiene un efecto significativo en la tensión superficial, y que este puede ser controlado indirectamente con la remoción del óxido presente en las caras del material a soldar. El óxido actúa como una fuente de oxígeno que provoca una menor tensión superficial del metal, sin embargo, no es una condición necesaria para la formación de defectos en la raíz, el calor de entrada y el volumen del material fundido también intervienen: las entradas de calor grandes provocarán un incremento del tamaño del charco, que a su vez aumentará la cantidad de peso que debe ser sostenido por la tensión superficial de la parte baja.

La soldadura híbrida produce formas de poro y tamaños diferentes, mostrando porosidades grandes y alargadas que se extienden a la raíz de la soldadura en donde todas se interconectan con un poro y que pueden ser debidas a fuerzas adicionales presentes como la presión que ejerce el arco y el impacto del goteo del material de aporte. [33]

Falta de unión: un defecto propio de la soldadura láser y que también aplica para la soldadura por haz de electrones (EBW, por sus siglas en inglés) es la falta de unión, en donde el haz no concuerda con la alineación con la raíz o a lo largo de la unión, especialmente en uniones muy delgadas y que también puede ocurrir a lo largo de la unión por algún tipo de inclinación. Cuando ocurre a lo largo de toda la unión visiblemente es detectable este defecto, sin embargo puede ocurrir a lo largo de ella y no ser detectable.

En el caso de EBW esta desviación puede ocurrir por las fuerzas magnéticas presentes, sin embargo en el caso del láser pueden aparecer por ejemplo cuando se unen materiales con propiedades magnéticas disimiles.

Porosidad de raíz: también es un fenómeno común, ya que debido a la formación de gases que se da en el proceso y al rápido enfriamiento, estos pueden quedar atrapados al no tener tiempo suficiente para llegar a la superficie y escapar. Este tipo de espacios también se pueden formar cuando el material fundido no rellena completamente la cavidad que se forma conforme avanza el haz (keyhole). [33]

Rechupes, microfisuras y grietas pueden originarse cerca del centro de la soldadura debido que la unión solidifica desde las superficies hacia el centro, lo que ocasiona un estrés por contracción y puede ocasionar estos defectos.

Falta de penetración, ocurre principalmente en uniones de penetración parcial o cerca de la raíz en uniones completas. Puede ocurrir por cambios en el acoplamiento del haz de luz, mismo que ocurre debido a la reflexión del haz por el material o por los vapores que se forman. La falta de penetración siempre está acompañado por fusión incompleta en la raíz o lados de la soldadura y puede ser originada por un haz muy delgado, mal acoplamiento de las uniones o velocidades rápidas de soldado.

El exceso de penetración es la expulsión de material a través de la unión y puede deberse a diferentes factores, en el que comúnmente es el abuso de alguna de las variables, como exceso de energía o cantidad de material aportado.

Respecto a los parámetros de la soldadura híbrida que pueden generar defectos, se tiene que se podría incurrir en una absorción del láser por el arco, derivado del acoplamiento de la fuente, mismo que desestabiliza el movimiento de las gotas que se desprenden del aporte. En sí, la absorción del láser por el arco no es un gran problema ya que debido a su tamaño la longitud de la onda puede llegar a la soldadura. Sin embargo la desestabilización si representa un problema que puede ser solucionado optimizando los parámetros de soldadura, control del calor de entrada y la reducción del voltaje de arco. [34]

El arreglo del acomodo del láser y la antorcha pueden ocasionar defectos debido al tipo de flujo que se genera en el charco de soldadura. Habitualmente una configuración de arco principal (en la que el arco de la antorcha incide primero en el material) produce socavaduras con más frecuencia debido a que no hay una correcta fusión del material base. Esta configuración también puede desestabilizar el proceso debido a que es probable que el material de aporte que va depositándose tenga contacto con el keyhole. Una correcta elección del arco tiene un impacto importante en la penetración y también controla la parte superior de la unión referente al ancho, microestructura y aparición de imperfecciones [11].

2.4.2 Normatividad

En general, son varios los cuerpos que se encargan de emitir normatividad referente a la soldadura. Dependiendo de la aplicación o sector industrial, de la regulación geográfica que rijan, se elegirá la normatividad correspondiente. En el

caso de la soldadura híbrida, aún son pocos los documentos que la regulan pero hasta el momento se ha identificado lo sucesivo:

Respecto a AWS se identificaron los siguientes estándares [35] :

- AWS C7.2M:2010, Recommended Practices for Láser Beam Welding, Cutting, and Allied Processes
- AWS C7.6/C7.6M:2017, Process Specification and Operator Qualification for Láser Hybrid Welding.

En cuanto a ISO se tiene lo siguiente [36]:

- ISO 12932:2013, Welding -- Láser-arc hybrid welding of steels, nickel and nickel alloys -- Quality levels for imperfections.
- ISO 22826:2005, Destructive tests on welds in metallic materials -- Hardness testing of narrow joints welded by laser and electron beam (Vickers and Knoop hardness tests).
- ISO 15609-6:2013, Specification and qualification of welding procedures for metallic materials -- Welding procedure specification -- Part 6: Láser-arc hybrid welding.
- ISO 15614-14:2013, Specification and qualification of welding procedures for metallic materials -- Welding procedure test -- Part 14: Láser-arc hybrid welding of steels, nickel and nickel alloys.

El estándar AWS C7.6/C7.6M, Process Specification and Operator Qualification for Láser Hybrid Welding [37] recientemente terminó el proceso revisión y aprobación, por lo que ya se encuentra disponible para consulta. En el análisis de dicho estándar se observó que el capítulo 7 se enfoca al análisis de la calidad de las uniones por ensayos destructivos y no destructivos. Se establece en la tabla 7.1 [37] de dicho documento que en el caso de END ultrasonido el personal deberá de estar calificado en concordancia con ASNT. También estipula que los métodos de inspección para determinar la calidad de una unión deberán

de basarse en un documento de referencia en donde se delinear las especificaciones, estándares y métodos para dicho análisis. En ese contexto se podría utilizar como referencia el capítulo 6 del código el AWS D1.1/D1.1M:2015 Structural Welding Code—Steel, referente a inspección. Sin embargo, como se observó en el listado anterior, ISO ya ha emitido la norma 12932:2013, Welding -- Láser-arc hybrid welding of steels, nickel and nickel alloys -- Quality levels for imperfections. Sin embargo dicha norma es aplicable para el dimensionamiento visual de las imperfecciones. Del análisis del documento se desprende que los niveles de calidad están sujetos a la aplicación particular para la que fue realizada la unión, por lo que los criterios que se estipulan en la norma son de referencia. Inclusive en el documento se establece que hay dificultades para usar dichos criterios en ensayos diferentes al visual. [34]

Los métodos de examinación para las uniones con HLAW requieren un cuidado considerable. En primer paso la examinación visual es usada para analizar discontinuidades externas, y en el cual pueden detectarse [12]:

- Grietas y porosidades superficiales
- Falta de penetración
- Socavados
- Excesos de penetración
- Goteo y hundimiento de material
- Desalienación
- Deposiciones incompletas
- Concavidades

Posterior a esta prueba se realizan los exámenes volumétricos, que en este caso lo apropiado sería el UT o radiografiado industrial. Debido a la universalidad del uso del UT y otras ventajas que se describirán en el siguiente tema, es el tipo de ensayo que se emplea en el presente trabajo.

2.5 Ensayos no destructivos

En términos generales la examinación no destructiva consiste en una medición indirecta de la calidad de un material o componente, actividad que puede ser ejecutada sin causar la destrucción del objeto de prueba o su operación. La evaluación toma en cuenta los resultados de examinación y pruebas para determinar la idoneidad de un componente en términos de su calidad o desempeño. [38]

Es importante mencionar la diferencia entre tres conceptos importantes: discontinuidad, falla y defecto. La primera se refiere a una interrupción de la típica estructura del material, que en este caso se trata de la soldadura pero que no necesariamente se trata de un defecto ya que ningún material es perfecto. El término falla es generalmente confundido con el termino defecto, sin embargo el primero se refiere a una discontinuidad no deseada mientras que el defecto es un tipo de discontinuidad que por su naturaleza o efecto imposibilita que la pieza o soldadura pueda cumplir con especificaciones o estándares de aceptación, para este término es inherente un criterio de rechazo. El éxito de un END se basa en las habilidades del personal debidamente entrenado y calificado, un método que se encuentre escrito en un procedimiento, pruebas para reportar los resultados y un estándar en el cual se evalúan dichos resultados. [39]

2.5.1 Clasificación

Dentro de los ensayos no destructivos se puede encontrar la clasificación de la Tabla 2.8 basada en el tipo de inspección que se realiza:

Tabla 2.8: Clasificación de END de acuerdo a su aplicación.

Inspección superficial	Inspección volumétrica	Inspección de hermeticidad
Visual	Radiografía industrial o neutrónica	Prueba hidrostática
Líquidos penetrantes	Ultrasonido	
Partículas magnéticas	Emisión acústica	
Corrientes inducidas	Resonancia acústica	Prueba neumática
Termografía		

Así como existen criterios que se utilizan para seleccionar un tipo u otro de soldadura, electrodos, materiales de aporte, fundentes, etc., también los hay para la selección del método de inspección y éste dependerá totalmente de las características del material y la soldadura que se van a examinar. Para realizar las pruebas y evaluar los resultados se utilizan normas, códigos y estándares de referencia, entre los que se pueden encontrar ASME, ASTM, AWS y API. Es muy importante comentar que la calidad de las pruebas está directamente relacionada con la eficacia del personal que lleve a cabo dicha actividad, por lo que deberá estar calificado para manejar los equipos, las técnicas e interpretación de los resultados. [39]

2.5.2 Ultrasonido

Este tipo de examinación emite ondas de sonido de alta frecuencia al objeto de prueba para detectar discontinuidades. El principio de funcionamiento es cuando en el material se presenta un cambio en la continuidad del mismo (también llamada interface) y que pudiese tratarse de un material diferente o de ausencia de éste, el sonido es reflejado. Posteriormente la señal es procesada para poder ser mostrada en alguna pantalla.

Ya detectada la discontinuidad, mediante cálculos es posible determinar su ubicación ya que las velocidades del sonido son determinadas para un tipo específico de material. Con los conocimientos adecuados es posible determinar también la profundidad, orientación y tamaño de la discontinuidad. [40]

Funcionamiento

Un dispositivo de ultrasonido genera, recibe y mide la amplitud de una señal. Un transductor (que se entiende como un dispositivo capaz de convertir un tipo de energía a otra) convierte un pulso eléctrico en energía ultrasónica y viceversa. Otro dispositivo que es capaz de desplegar las magnitudes de la energía reflejada permite realizar las mediciones. Hace uso de las vibraciones mecánicas a altas frecuencias superiores a los 20 kHz, imperceptibles para el oído humano y que permiten que sean detectadas discontinuidades superficiales, subsuperficiales y volumétricas.

La cantidad de energía reflejada por la interface o discontinuidad dependen de las propiedades del reflector, lo que permite establecer dos de los parámetros básicos empleados en la inspección con ultrasonido: la amplitud de la energía reflejada y el tiempo requerido para alcanzarla. [41]

Un equipo UT se compone básicamente de:

- Fuente de poder
- Circuito pulsador
- La unidad de búsqueda
- Circuito receptor amplificador
- Osciloscopio/pantalla digital
- Reloj electrónico

El tipo de ultrasonido que se utiliza para detectar discontinuidades se llama detector de fallas, y resulta importante mencionarlo debido a que hay otro tipo de

dispositivos que funcionando bajo el mismo principio solo realiza medición de espesores de pared.

El transductor es el elemento más importante en el UT, ya que es el responsable de enviar y recibir la señal y este se encuentra dentro de la unidad de búsqueda. Ya se mencionó que opera con la propiedad de piezoelectricidad de algunos materiales, en la cual se induce energía eléctrica cuando se aplica presión en un material y viceversa. Es importante mencionar que esta propiedad solo es característica de algunos materiales, como los cuarzos, sulfatos de litio y cerámicas polarizadas, por ejemplo. La selección del tipo de unidad de búsqueda dependerá de la aplicación que requiera el ensayo, variando su espesor, área, forma, material o ángulo para cumplir con las necesidades de la prueba. [42]

La selección del transductor es fundamental para la ejecución de la inspección, y deberá basarse en el material a examinar y espesor, el tipo de unión soldada, las condiciones ambientales que lo rodean y la aplicación que vaya a tener. En base a la información presentada, durante este proyecto se relacionarán las características del acero 1520, las uniones soldadas y el equipo de ultrasonido.

Dependiendo del ángulo o modo de propagación de las ondas, estas se clasifican en longitudinales, transversales, superficiales o de tipo Lam y para el caso de la inspección de soldadura se utilizan las ondas de corte o transversales. Lo que ocurre en este tipo de onda es que las partículas que vibran de arriba hacia abajo en un plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda, asemejando el movimiento de una cuerda que oscila. Tienen una longitud de onda más corta que la del tipo longitudinal, lo que la hace más sensible para la detección de pequeñas discontinuidades. [43]

La selección de la frecuencia con la que se realice el examen depende de las condiciones del mismo, ya que una alta frecuencia permite alcanzar resoluciones y definiciones altas, mientras que una baja frecuencia permite alcanzar mayores

espesores por el efecto de la atenuación. La resolución se entiende como la habilidad de separar los ecos de discontinuidades cercanas [44].

Otro instrumento necesario es el empleo de acoplante, ya que las ondas ultrasónicas de alta frecuencia pueden propagarse en medios elásticos como sólidos o líquidos, más no en el aire o vacío debido a que son seriamente atenuadas, por lo que se emplea algún material que elimine esta barrera y crear un contacto casi directo con el material a inspeccionar. Generalmente se usan sustancias viscosas basadas en aceites, agua, glicerina, silicones, derivados de petróleo o celulosa. Su selección también varía de las condiciones en las que ocurra la prueba, por ejemplo el tipo de acabado del material, la temperatura, la compatibilidad del material y el acoplante o las condiciones de limpieza.

El tipo de observaciones que se realizan con el ultrasonido están basadas en comparaciones, ya que las características de una discontinuidad se determinan en base a un bloque patrón o estándar de referencia y no directamente. Esto se hace mediante una serie de pasos en las que el técnico realiza ajustes en las señales que se observan en el patrón y se ejecutan tareas de comparación. En general el rango de frecuencias utilizado es desde 1 MHz a 6 MHz, aunque la mayoría se realiza a 2.25 MHz. [34]

Un ultrasonido tiene la capacidad de detectar las siguientes discontinuidades [45] [46]:

- Grietas
- Falta de fusión
- Penetración incompleta o exceso de penetración
- Escoria
- Porosidad
- Socavaduras
- Concavidades

Presenta las siguientes ventajas:

- Discontinuidades en espesores gruesos son detectadas.
- El método es lo suficientemente sensible para detectar pequeñas discontinuidades, en especial las de tipo planar.
- Las ubicaciones de discontinuidades internas son localizables por esta prueba, al igual de que se puede determinar su tamaño, orientación y forma.
- Cuenta con un poder de penetración para detección de discontinuidades subsuperficiales e internas.
- Es posible realizar la prueba mediante el acceso a solo un lado de la pieza a inspeccionar.
- Se puede desempeñar soldadura en sitio debido a las características de portabilidad del equipo.
- Las actividades de inspección no intervendrán con otro tipo de trabajos realizándose a los alrededores.
- La capacidad de almacenar y procesar la información con posterioridad gracias al desarrollo de tecnología digital.
- Su operación no representa riesgos en el sentido de exposición a radiaciones como en el caso de rayos X.

Desventajas:

- El conocimiento para configurar el equipo, así como el entrenamiento de los inspectores es mayor y más caro.
- Las condiciones de la superficie deben de ser propicias para la prueba: las soldaduras de filete y en especial las soldaduras a tope que son irregulares en forma o configuración geométrica son ultrasónicamente difíciles de inspeccionar. Cuando se trata de materiales con superficies rugosas o irregulares se dificultan las actividades de inspección.

- Cuando las discontinuidades están muy cerca de la superficie (sub-superficiales) o ubicadas en el campo muerto, su reflexión en el material las hace muy difícil de detectar,
- Es necesario un acoplante para realizar la prueba, así como diferentes tipos de bloques de calibración y muestras si los materiales o las condiciones metalúrgicas del material varían.

Aplicaciones

En general, con el ultrasonido se pueden realizar diferentes funciones cuyas aplicaciones consisten por ejemplo en detección y caracterización de discontinuidades, mediciones de espesores, determinación de características físicas como estructura metalúrgica, tamaño de grano y constantes eléctricas, evaluación de variables de proceso en un material, limpieza de materiales, etc.

Aplicaciones del UT para detección de fallas. Algunos de los componentes más importantes que son inspeccionados por ultrasonido son [47]:

- Equipos de potencia: piezas forjadas para turbinas, rotores de generador, tuberías a presión, soldaduras, recipientes a presión, elementos de uso nuclear y de reactores
- Maquinaria: troqueles, herramientas de acero y tubería de perforación.
- Piezas de ferrocarril: ejes, ruedas y carriles
- Partes automotrices: piezas forjadas, componentes soldados, por brazing o de fundiciones.

Ondas de propagación. Dentro del tipo de funcionamiento de un UT, se debe de tener conocimiento del tipo de onda que emite el transductor. Debido a que en el presente proyecto se trabajará en la examinación de uniones soldadas, el tipo de onda que se describirá es la de tipo corte. En las ondas de corte o transversales el movimiento de la propagación de la onda es principalmente perpendicular a la dirección de movimiento de las partículas. La velocidad que se alcanza en este tipo de propagación es de la mitad de una onda longitudinal, estas pequeñas velocidades permiten una mayor sincronización y mayor sensibilidad a pequeñas discontinuidades. La manera en que son originadas estas ondas es a partir de una fuente que emita ondas longitudinales pero que con un correcto acomodo o ángulo del dispositivo (transductor y zapata) estas quedan direccionadas de manera perpendicular al material [46].

Criterios de aceptación. Los criterios de aceptación o rechazo dependerán del código que se siga como referencia pero en general cualquier tipo de grieta debe de ser rechazada. La escoria y porosidad dependerá del criterio de aceptación que se siga y de eso que se determine como defecto. Para ello se pueden tener de referencia los siguientes códigos para aplicaciones generales [34]:

- Structural Welding Code-Steel AWS D1.1:2000
- Estándar Practice for Ultrasonic Contact Examination ASTM E 164

En el caso de HLAW, ISO ha expedido un documento específico para este tipo de proceso: ISO 12932:2013, Welding -- Laser-arc hybrid welding of steels, nickel and nickel alloys -- Quality levels for imperfections, (que podría traducirse como Soldadura hibridada Láser-arco de aceros, níquel y aleaciones de níquel— Niveles de calidad de imperfecciones.

Cabe mencionar que para que una discontinuidad pueda ser detectada en el UT, su ancho deberá de ser más grande que la mita de la longitud de onda [48].

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 Antecedentes

Las uniones se efectuaron previamente como parte de las actividades de desarrollo del proyecto al que se incorpora el presente trabajo, dichas uniones se realizaron en la Universidad Metodista del Sur de Texas, en su Centro de Manufactura asistida por Láser (CLAM por sus siglas en inglés). Dicho sistema consta de un Láser de 10 kW y de un equipo convencional de soldadura GMAW que son maniobrados por un robot KUKA de 6 grados de libertad (Figura 3.1).

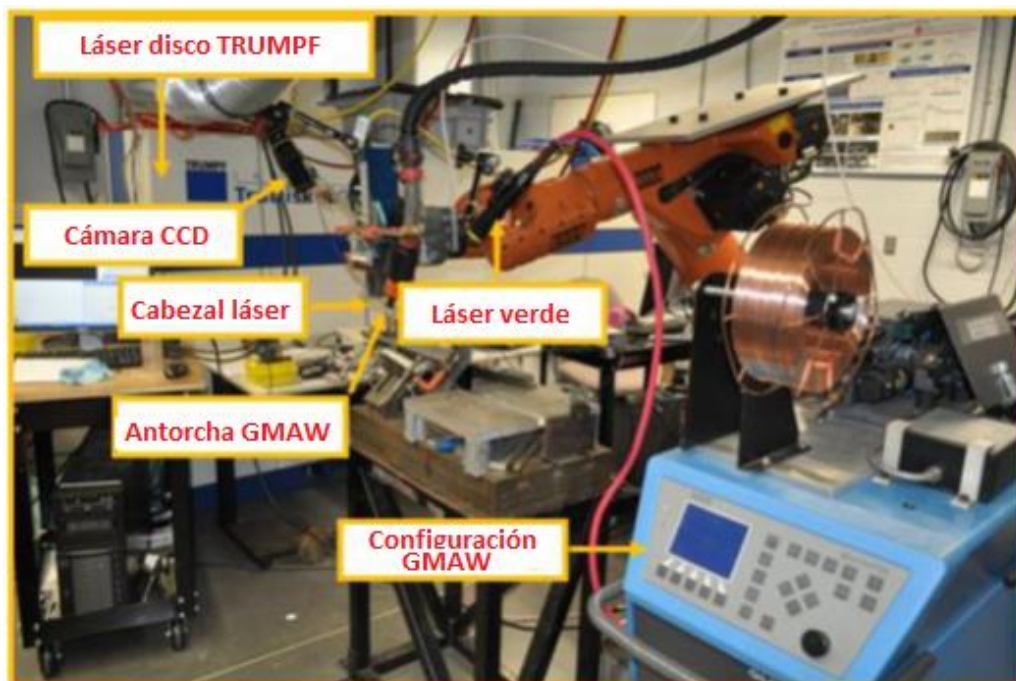


Figura 3.1: Sistema HLAW del CLAM de la Universidad Metodista del Sur [49].

Para las uniones se utilizó el láser TRUMPF modelo TruDisk 10003 de 10 kW de potencia. Dicho equipo es un sistema láser de estado sólido utilizado para la realización de soldadura, corte y mecanizado de superficies de metales, ver la Tabla 3.1 para la descripción de sus especificaciones.

Tabla 3.1: Especificaciones técnicas del láser TRUMPF modelo 10003 [50].

Longitud de onda	1030 nm
Color	Infrarrojo
Potencia de salida	200 a 10000 W
Aplicación	Welding, Cutting, Chopper with LMD Contour, Láser Metal Deposition
Divergencia del haz	12 mrad
Modo	Multimodo
Apertura numérica	0.1
Temperatura de operación	10-50 °C

Parámetros de unión

Se realizaron en total once uniones de placas de 12.7 mm de espesor, los parámetros que permanecieron fijos fueron:

- El ángulo de la antorcha
- Stickout (distancia entre el material aporte y el material base)
- El flujo y concentraciones del gas de protección
- Características del material de aporte
- GAP
- Stand-off (distancia de la boquilla)

Los parámetros que se variaron se muestran en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2: Parámetros que se variaron en las uniones.

No.	Velocidad de soldadura mm/s	Velocidad del cable de alimentación m/min	Voltaje V	Potencia de láser kW	Distancia focal
1	22	14	40	9	0
2	22	14	40	8	0
3	22	10	38	8	0
4	22	10	38	7	0
5	30	10	38	8	0
6	30	10	38	8.5	0
7	30	10	39	8	-3
8	30	11	39	8	-3
9	30	11	39.3	8	-3
10	30	11.5	35	8	-3
11	30	12	36	8.5	-3

El material de aporte que se empleó fue el electrodo ER70S-6 y se trata de una aleación de soldadura de propósito general, manual o semiautomática. Se trata de un consumible para aceros al carbono. La cantidad de desoxidante que contiene le ofrece humectabilidad, provocando formas más planas y velocidades de desplazamiento altas. Se utiliza con gas de protección compuesto generalmente por argón CO₂ en una razón de 75/25 o 90/100 con mayor contenido de argón o 100% de CO₂. Cumple con la especificación de AWS A5.18 ER70S-6. Bajo esta especificación son diseñados para soldadura de pasada sencilla o múltiples, aplicaciones en láminas metalizadas, consiguiéndose cordones suaves y en placas que óxidos o costras/ rebabas. Estos electrodos permiten el uso de rangos altos de corriente para los gases de protección ya mencionados. [51]

AWS A5.18/A5.18M:2005 Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding establece para el tipo de electrodo ER70S-6 la siguiente composición química mostrada en la Tabla 3.3:

Tabla 3.3: Composición química del electrodo ER70S-6 según AWS 5.18

Clasificación AWS		Número UNS	Porcentaje en peso												
A5.18	A5.18M		C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Ti	Zr	Al
ER70S-6	ER48S-6	K11140	0.06 a 0.15	1.4 a 1.85	0.8 a 1.15	0.025	0.035	0.15	0.15	0.15	0.03	0.5	-	-	-

3.2 Metodología

El siguiente esquema (Figura 3.2) muestra de manera general la serie de actividades experimentales que se realizaron durante el desarrollo del proyecto:

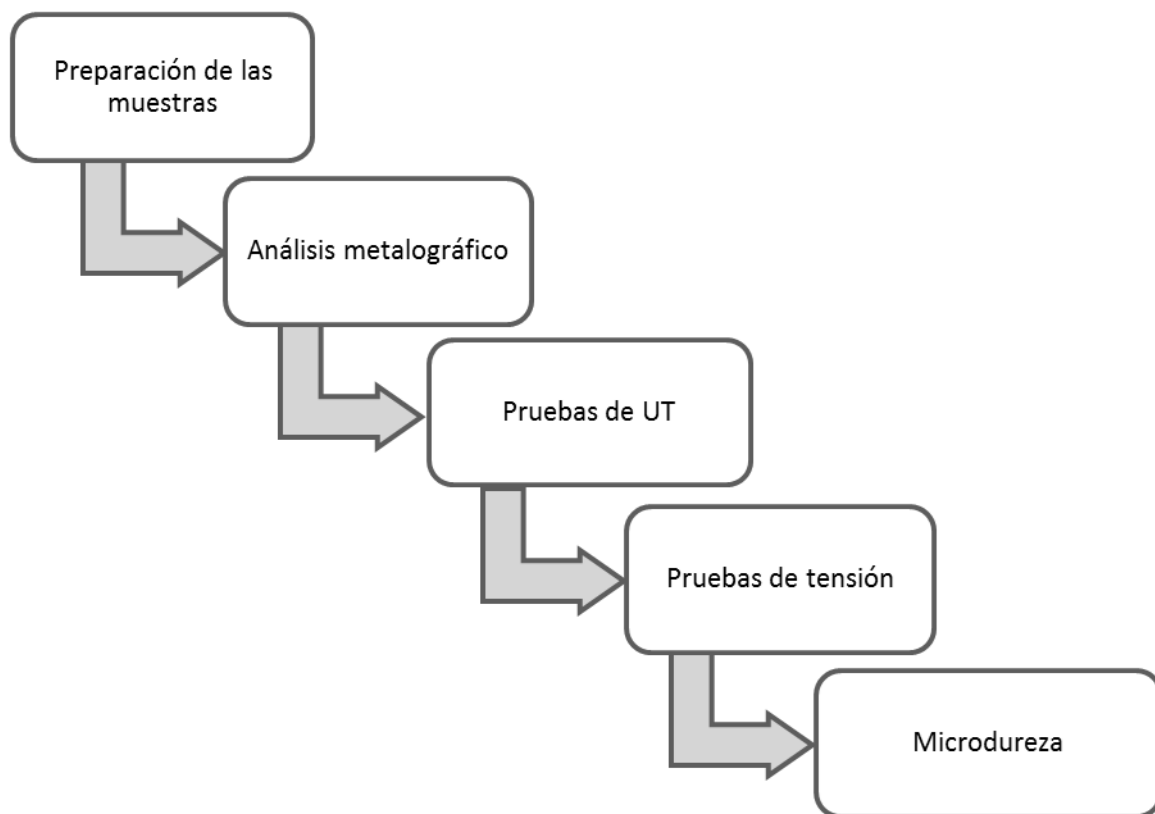


Figura 3.2: Metodología.

3.2.1 Preparación de las muestras

Se obtiene una muestra de cada una de las uniones, se realizan cortes transversales de 5mm de espesor, desestimando una pulgada en cada extremo de las uniones. En la figura 3.3 se ejemplifica la manera en la que se toman las muestras:

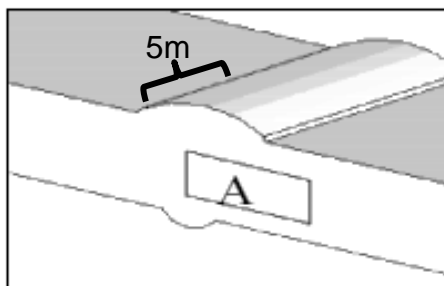


Figura 3.3: Tipo de corte que se realiza para las muestras.

Obtenido el ejemplar de 5mm de ancho en cada una de las piezas, este es montado en caliente en una base de baquelita para su preparación metalográfica.

3.2.2 Análisis metalográfico

En el análisis metalográfico se realizaron dos tipos de pruebas: Para la toma de las macrografías se utilizará un estereoscopio marca Nikon, modelo MZ 745 y para las micrografías se utilizará un equipo microscópico metalográfico invertido marca NIKON, modelo MA200, mismos que se muestran en la figura 3.4.

Se emplearon herramientas para actividades de desbaste y pulido de las muestras y posteriormente el empleo de una solución de Nital para realizar ataque químico.



Figura 3.4: Estereoscopio (a) y microscopio (b) utilizados. [52].

En ambas pruebas se seguirán las especificaciones correspondientes para la determinación del reactivo. En el caso del macroataque se seguirá la norma ASME E304 y para el caso del microataque será la norma ASME E407, mismas que toman como principio el tipo de material que se analizará y que en este caso se trata de uno base Hierro.

3.2.3 Prueba de UT

El equipo de ultrasonido que se utiliza corresponde a un detector de fallas marca OLYMPUS modelo MX2. Presenta dos módulos para realizar ultrasonidos mediante Phase array o convencional, y que para el caso de este proyecto se realizará de manera convencional.

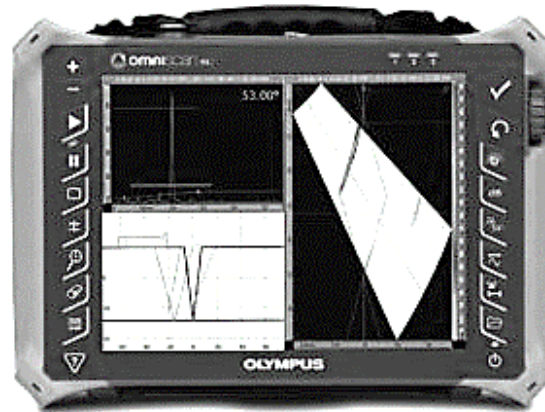


Figura 3.5: Equipo de ultrasonido industrial para detección de fallas marca OLYMPUS modelo MX2 [53].

Se emplea un transductor estándar modelo A403S, de tipo haz angular y opera en una frecuencia de 2.25 MHz y dimensiones de 0.625 por 0.625 in.



Figura 3.6: Transductor Olympus modelo A403S [53].

3.2.4 Prueba de tensión.

Seguido del ensayo de UT, se realizaron pruebas de tensión con la finalidad de observar y analizar las propiedades mecánicas que presentan las uniones, mismas que fueron realizadas en el laboratorio de COMIMSA y que se apegan al estándar ASTM E8-04.

3.2.5 Microdureza.

Enseguida, se realizan pruebas de microdureza con la intención de observar las variaciones en la propiedad de dureza del material, variaciones que podrían ser analizadas y relacionadas respecto a la zona y a la variación de alguno de los parámetros del proceso. La prueba se realiza en las muestras metalográficas que se prepararon previamente en un equipo marca Wilson modelo Tukon 2500 y la escala utilizada fue Vickers.

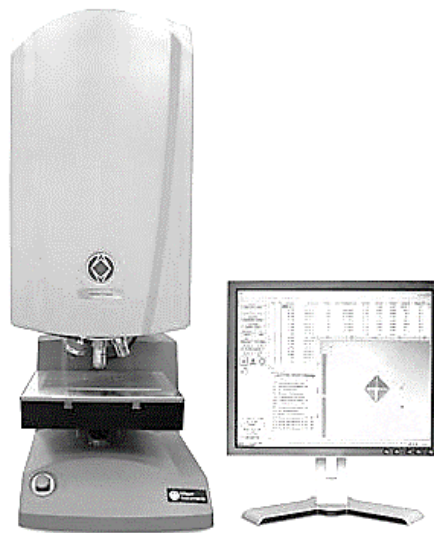


Figura 3.7: Durómetro Tukon 2500 [54].

CAPÍTULO 4

DESARROLLO Y RESULTADOS

4.1 Preparación de las muestras

El material que se utilizó para la realización de las uniones fue un acero al medio carbono AISI 1520, al cual en el capítulo anterior se describieron con mayor detalle sus características. En términos generales es un acero al alto manganeso (1.0-1.6 % de contenido) y con 0.20% de contenido de carbono aproximadamente. En la Figura 4.1, se exhibe un ejemplar con los cortes que se le realizaron para la extracción de la muestra.

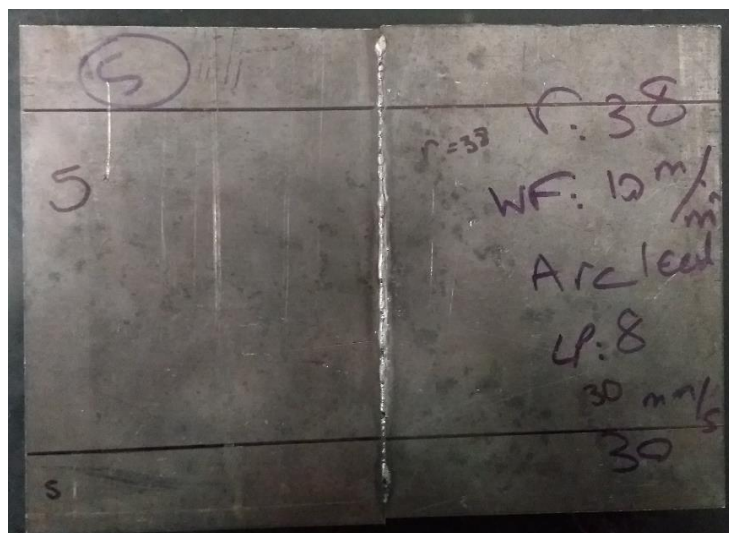


Figura 4.1: muestra número 5.

4.2 Análisis metalográfico

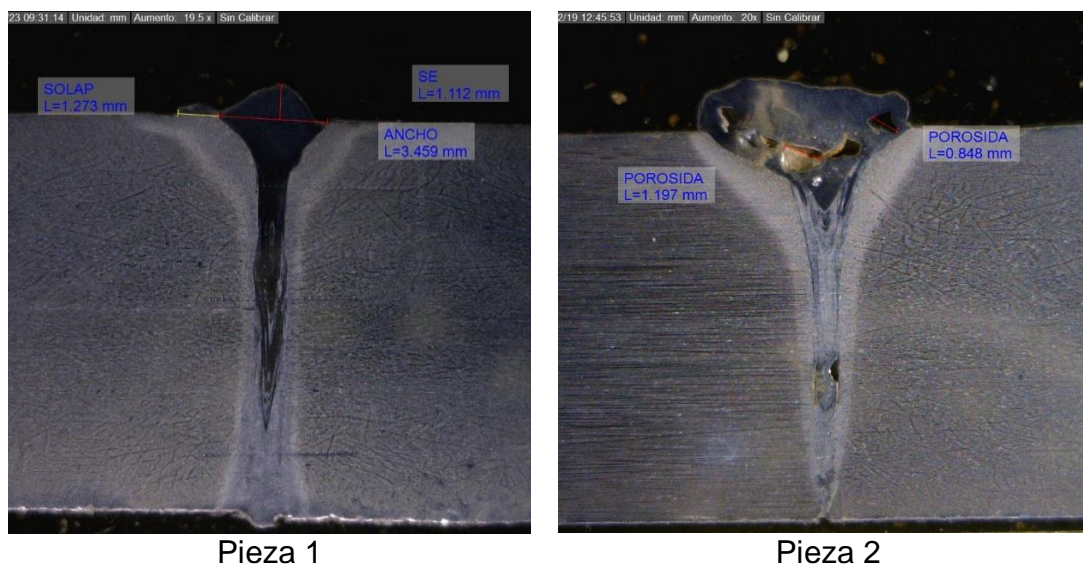
Se obtuvieron cortes transversales de espesor de 5mm de cada unión soldada. Las secciones fueron sometidas a una serie de procesos de corte, montaje, desbaste, pulido y posteriormente ataque químico con Nital con la finalidad de identificar cada zona en las uniones y observar las fases presentes. Las muestras obtenidas se observan en la Figura 4.2:

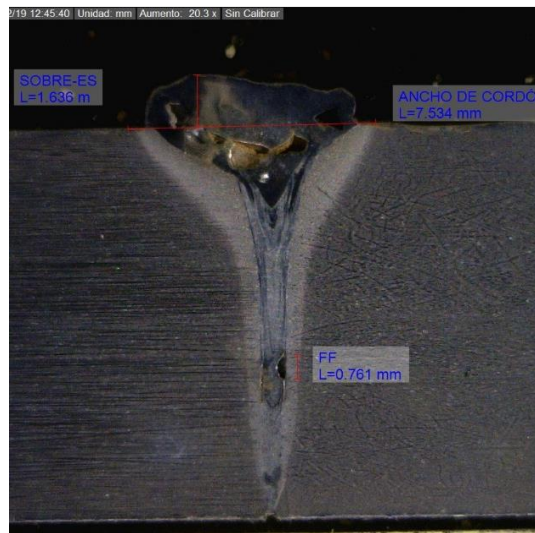


Figura 4.2: muestras obtenidas de las piezas 1, 3, 5 y 9.

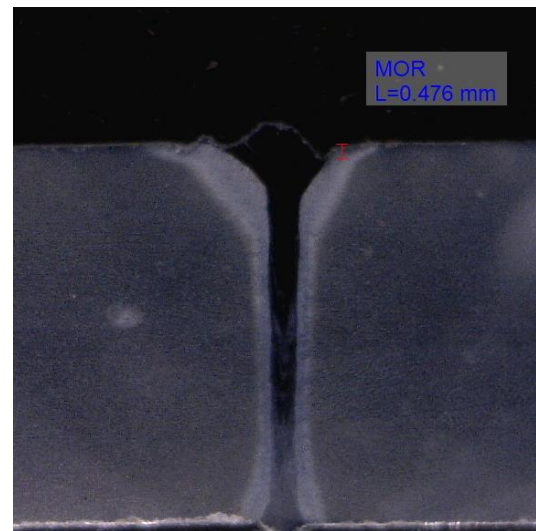
4.2.1 Macrografías

Como parte inicial del análisis se obtuvieron las macrografías, en la figura 4.3 se muestran algunas secciones transversales vistas mediante estereoscopio donde como primera e interesante observación es evidente la reducción de la

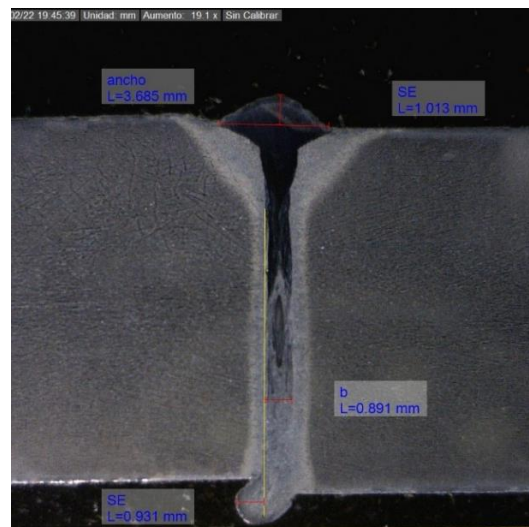




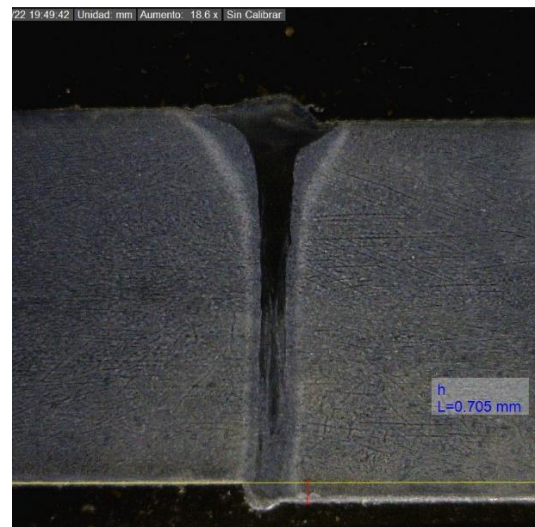
Pieza 3



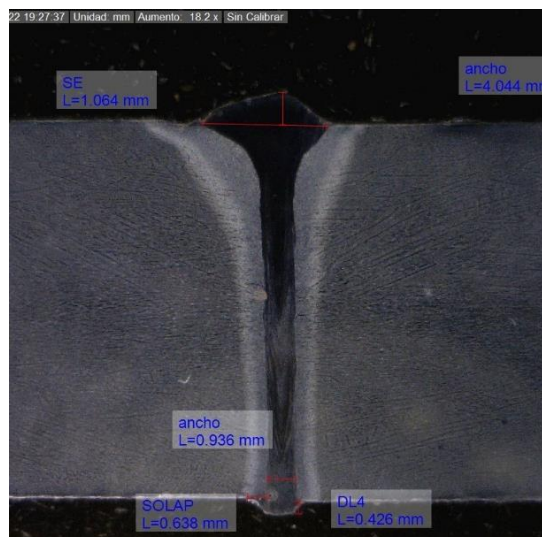
Pieza 4



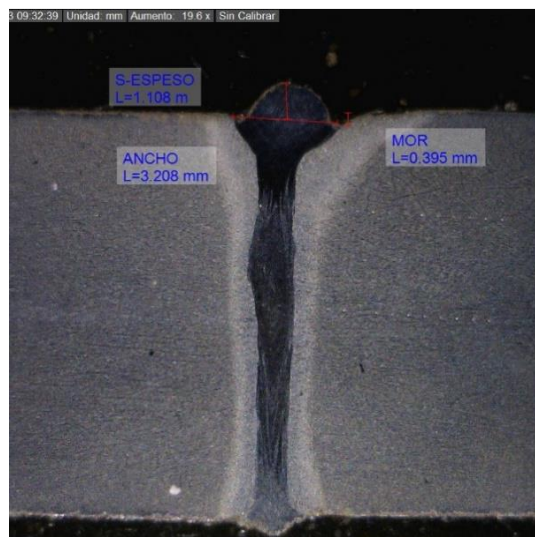
Pieza 5



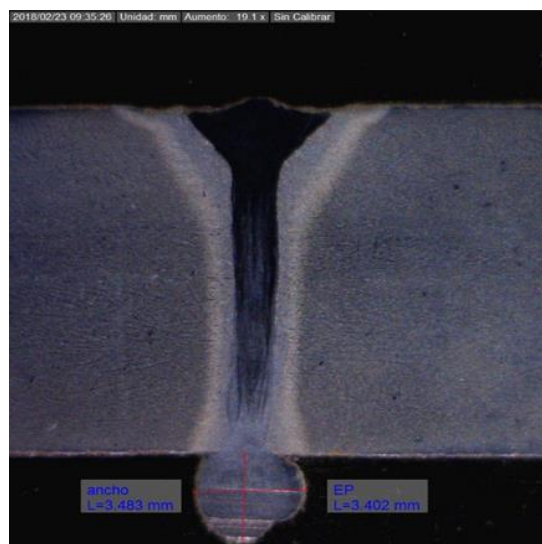
Pieza 6



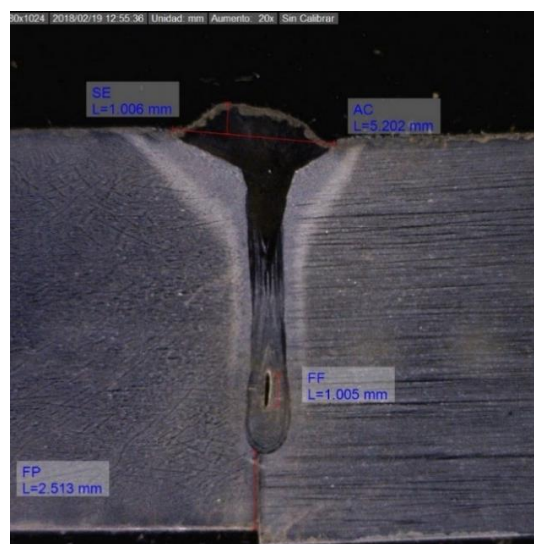
Pieza 7



Pieza 8



Pieza 9



Pieza 10

Figura 4.3: macrofotografías correspondientes a las piezas 1 a la 10.

ZAC en comparación a otros tipos de procesos de soldadura: en la parte más ancha se midieron cordones entre 3 y 5 mm, mientras que en la unión fueron anchos de 1 mm aproximadamente.

En general, tres zonas son las que se observan en la Figura 4.4 la parte superior de la unión corresponde al área en la que predominan los efectos del arco eléctrico (marcada en color amarillo) y la parte inferior a la del láser (en color rojo). Como se describió anteriormente el arco tiene una entrada de calor más ancha pero con poca penetración, mientras que la del láser es estrecha pero profunda, por lo que en la parte intermedia se observa la transición de un proceso al otro. Inclusive se observa con las diferentes tonalidades la manera en que el material de aporte se fusiona con el material base y a su vez, con la zona marcada en rojo, cómo es que al final es menor la cantidad de material que se deposita. En las micrografías se observará con más detalle cómo está conformada cada zona.

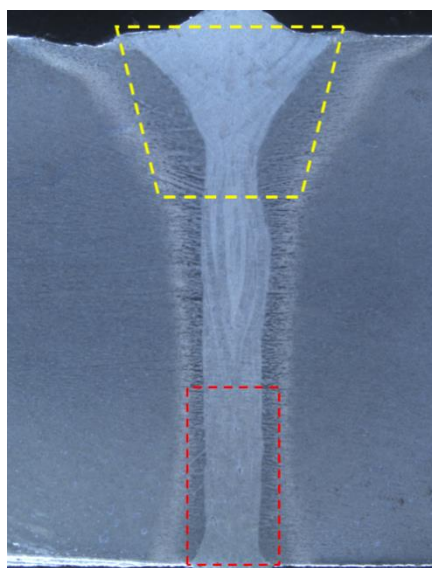


Figura 4.4: Identificación de las diferentes zonas de los arcos de la unión HLAW.

4.2.2 Micrografías.

Para continuar se obtuvieron las micrografías con el propósito de observar las microestructuras en 3 zonas: ZF (zona de fusión) o de soldadura, ZAC (zona afectada por el calor) y MB (material base). La figura 4.5 ejemplifica dichas zonas, mismas que en el siguiente párrafo son descritas

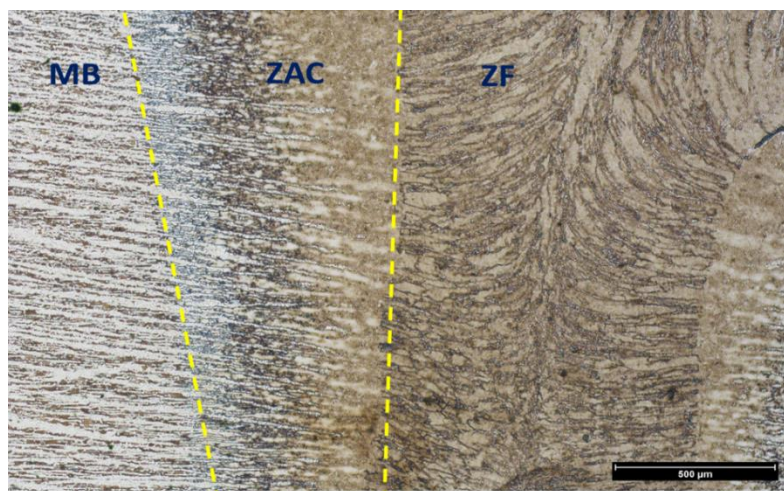


Figura 4.5: Micrografía que muestra la ZF, ZAC y MB.

Material base

Se observa la alternancia de islas de diferentes tonalidades, la zona más clara trata de ferrita mientras que las zonas oscuras corresponden a la fase perlita. Mediante el microscopio electrónico de barrido (MEB) se realizó el análisis dicho material para confirmar la información obtenida, en el que se observa una matriz ferrítica (zona oscura) con presencia de perlita (en blanco). Se evidencia la típica formación con el estilo de la huella dactilar, misma que puede apreciarse en la figura 4.6.

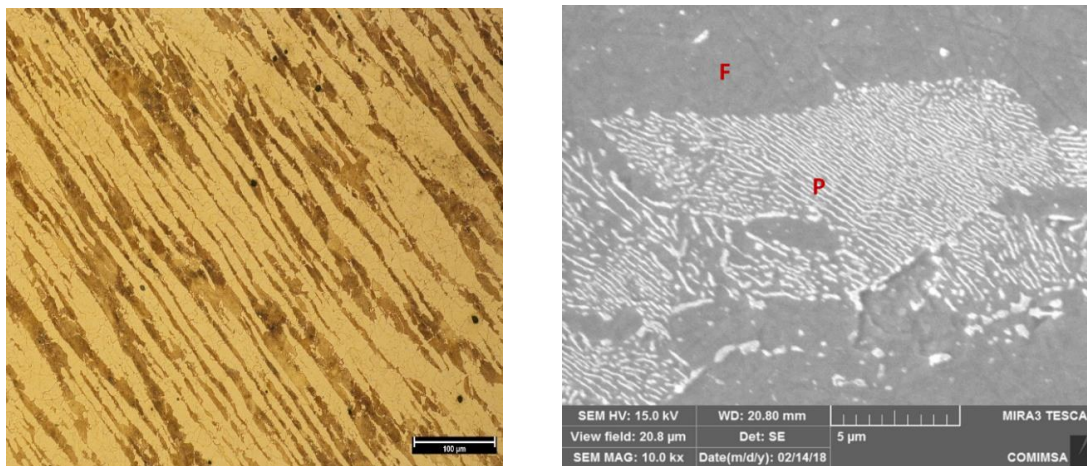


Figura 4.6: Micrografía del material base.

Zona de fusión

Previamente se comentó que dadas las características del proceso híbrido (en el cual se involucran la soldadura por arco y láser) se identifican diferentes secciones: la zona del arco, la zona de transición entre ambos procesos y la del láser.

Es por esta razón, que en la caracterización de la zona de fusión se observan varios cambios microestructurales debido a que dependiendo de la zona, esta atraviesa diferentes tasas de calor y por lo tanto de enfriamiento, por lo que es natural esperar una variación en la microestructura. La parte superior de la unión experimenta los efectos principalmente del arco, la parte medio de los dos procesos (MAG+láser) y la inferior la del láser. Adicionalmente, se pueden observar diferencias entre la parte superior de la soldadura y la inferior (aparte del efecto del calor) debido a la distribución y segregación de los elementos aleantes provenientes del material de aporte (Mn, Si, Ni, Cr, Mo, entre otros). La tarea del material de aporte es crear una soldadura fuerte y dura, por lo que contienen partículas finas de óxido que permiten la nucleación de granos muy finos.

Debido a lo comentado, en la zona del arco se observa la formación de ferrita alotriomórfica, ferrita widmasttaten, martensita y posiblemente algunas inclusiones (figura 4.7), mientras que en la zona inferior se observa ferrita acicular y poligonal principalmente (Figura 4.8). La zona intermedia presenta una mezcla de todas las microestructuras mencionadas.

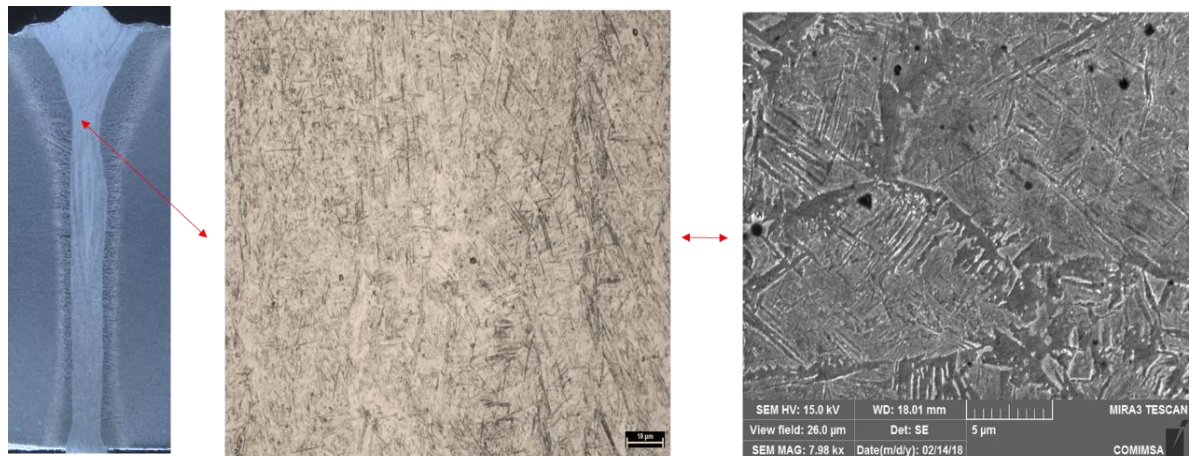


Figura 4.7: vista microscópica de la parte superior de la soldadura.

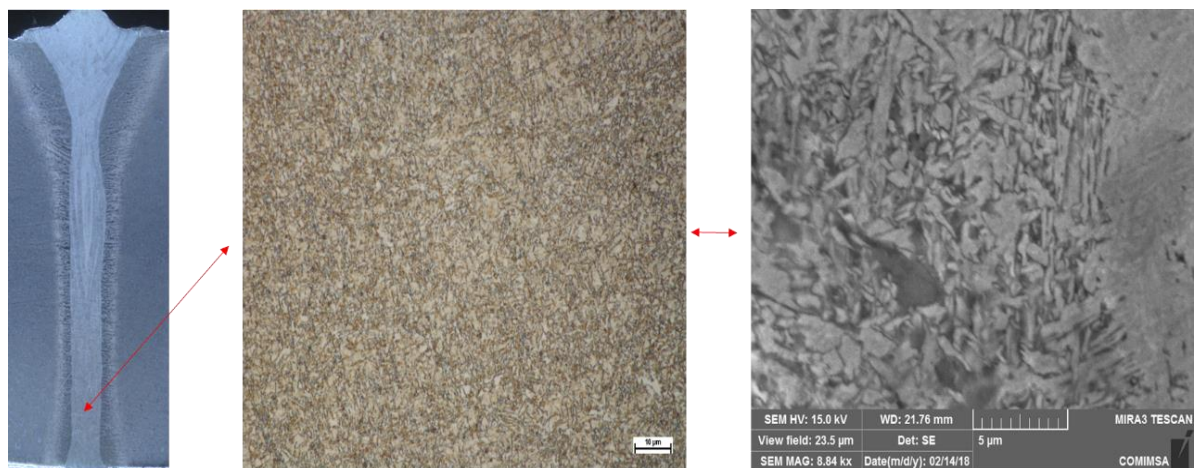


Figura 4.8: vista microscópica de la parte inferior de la soldadura.

Zona afectada por el calor (ZAC)

En el caso de la soldadura híbrida la entrada de calor es muy alta, aunque dimensionalmente pequeña, por lo que la ZAC adyacente a la soldadura experimenta grandes cambios en la microestructura.

Esta zona se caracteriza por tasas de enfriamiento rápidas, comparada a otros procesos, lo que conlleva a la formación de martensita en la ZAC (figura 4.9). Dependiendo del contenido de carbono en la martensita, se podrán o no afectar de manera negativa las propiedades mecánicas. Conforme se va alejando de la ZAC se observa un aumento en la formación de ferrita.

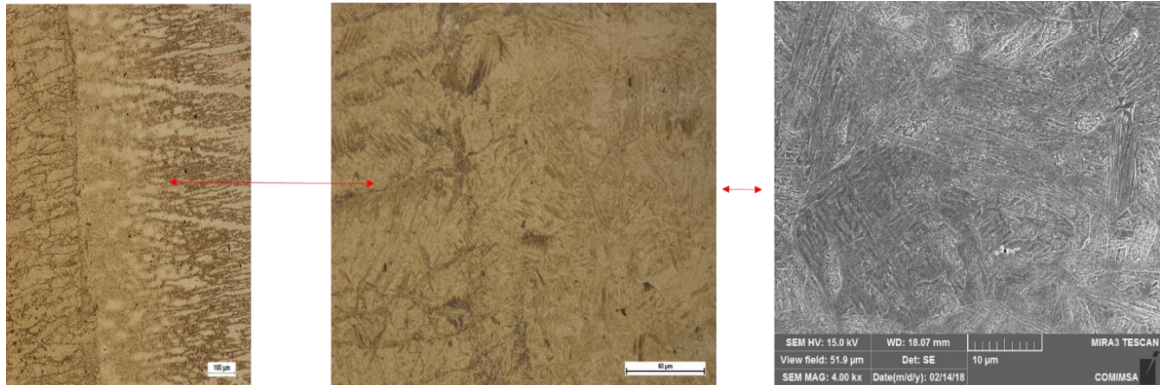


Figura 4.9: Microestructura de la ZAC.

4.3 Prueba UT

El desarrollo de esta prueba fue la parte sustancial del presente proyecto, el equipo utilizado ha sido descrito en el capítulo anterior. Para la ejecución de la prueba se utilizó el código AWS D1.1 y para efectuar el análisis de la calidad se acudió como referencia a los criterios de aceptación y rechazo de la norma AWS C7.6 y la norma ISO 12932:2013. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.1, mientras que las imágenes obtenidas durante la realización de esta prueba se observan en las figuras 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13.

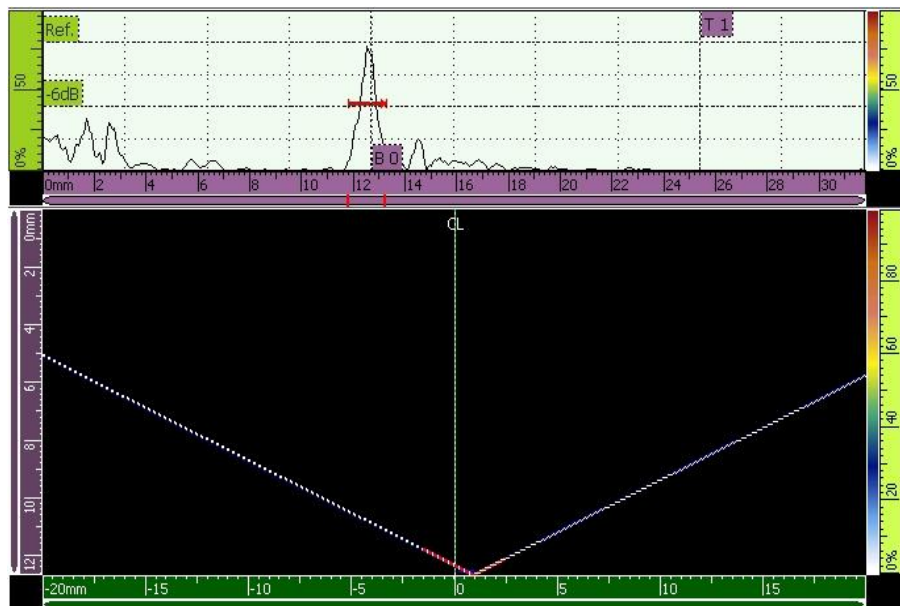


Figura 4.10: imagen de UT correspondiente a la detección de discontinuidades de la pieza 2.

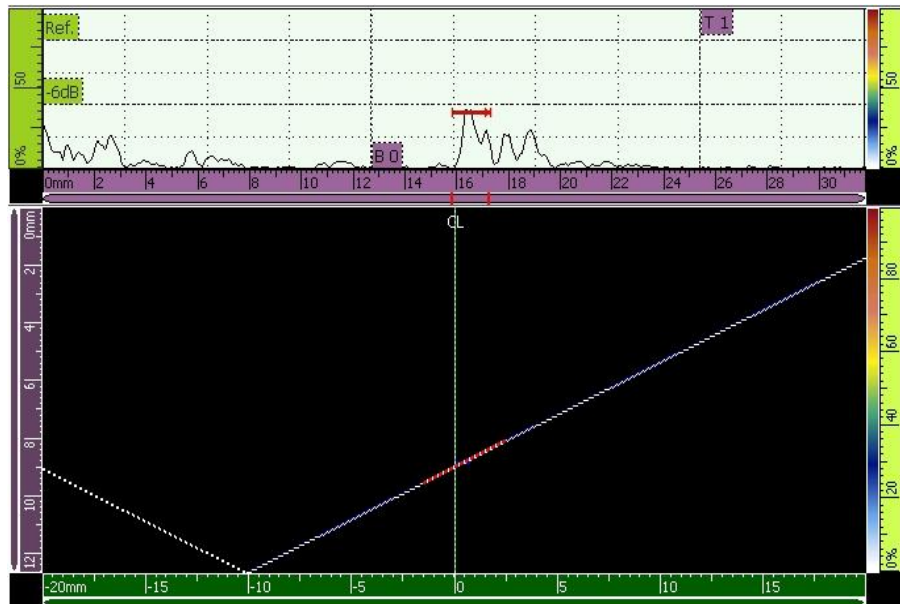


Figura 4.11: imagen de UT correspondiente a la pieza 4, en donde mediante cálculos se puede determinar una falta de penetración de aproximadamente un 30%.

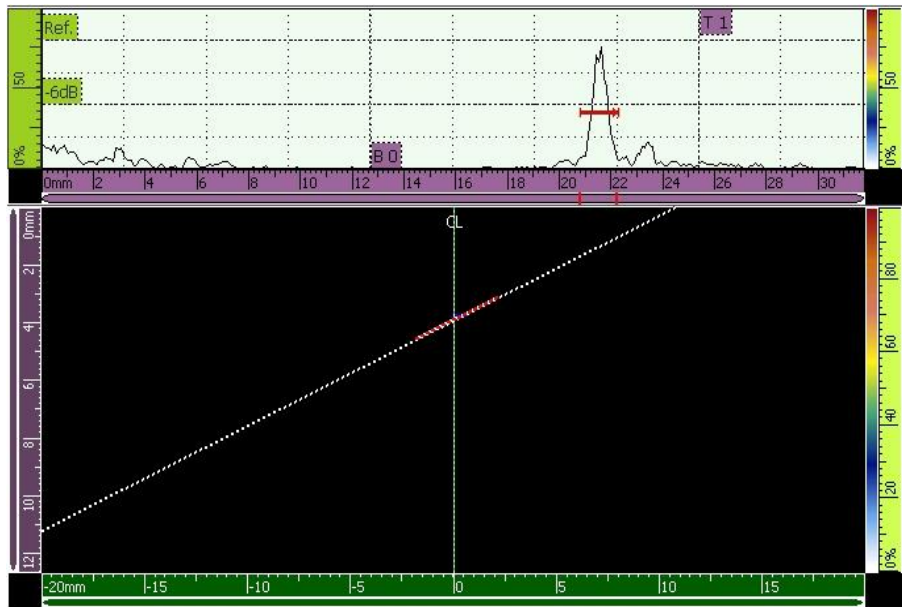


Figura 4.12: imagen de UT correspondiente a la pieza 8 en la cual se reporta una penetración aproximada del 90%.

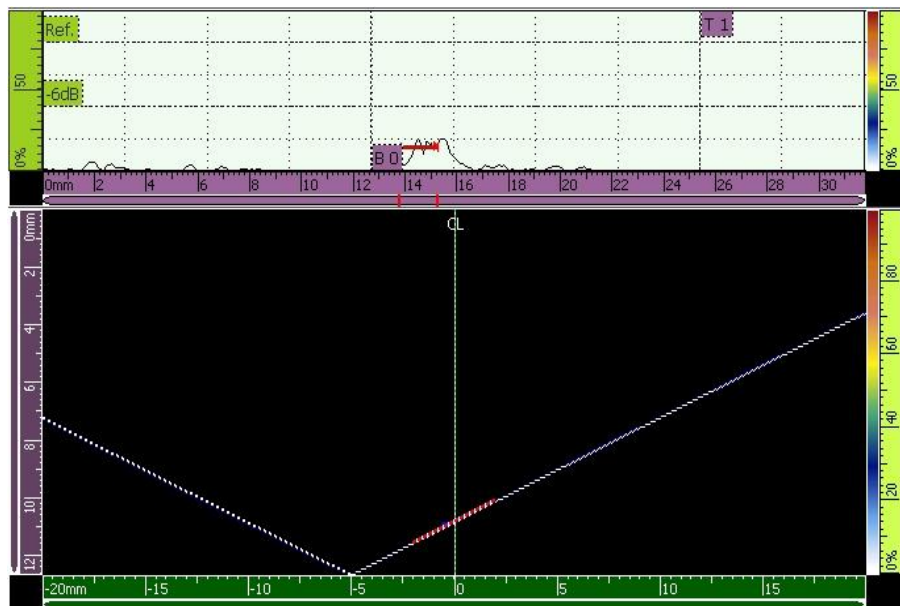


Figura 4.13: imagen de UT correspondiente a la pieza 10 en la cual se reporta una penetración aproximada del 85%.

Tabla 4.1: Resultados de la prueba de UT.

Muestra	Discontinuidades	Observaciones
1	1	Se observa una indicación con una atenuación de energía de 10 dB respecto a la referencia.
2	2	Se observa indicación clase C y D
3	0	Unión libre de discontinuidades
4	1	Se observa una penetración del 70%
5	1	Se observa una indicación con una atenuación de energía de 11.2 dB respecto a la referencia.
6	S/N	Señales intermitentes a lo largo de toda la unión, presuntamente porosidad.
7	S/N	Señales intermitentes a lo largo de toda la unión, presuntamente porosidad.
8	2	Se observa una penetración del 90% e indicación clase C.
9	0	Unión libre de discontinuidades
10	1	Se observa una penetración del 85%
11	0	Unión libre de discontinuidades

Anteriormente se explicó el mecanismo básico del ultrasonido: un haz de sonido es emitido y mientras realiza su recorrido y si se encuentra con un medio diferente por el que se disipa, una parte del haz es reflejado. Dicho reflejo es detectado por el transductor y mediante algunas operaciones analógicas o digitales es exhibido en la pantalla. La manera en que se observa es con la representación gráfica de un pico, cuya forma variará dependiendo de la intensidad del haz, de la ubicación y de la geometría de la discontinuidad.

La interpretación de las señales que se observan en la pantalla es la que ayudará a determinar si una discontinuidad es de interés y poder determinar si se trata de un defecto o no. Para lograrlo se toman en cuenta las características de las señales (dimensionamiento) y los criterios de aceptación o rechazo a los que se apege la inspección. Estos criterios dependerán por ejemplo de la

aplicación que vaya a tener el objeto inspeccionado, niveles de calidad establecidos o el código o especificación de referencia.

De acuerdo a los resultados de la tabla se determina que las muestras 3, 9 y 11 son las que presentan mejores características respecto a la ausencia de discontinuidades. Las piezas 1 y 5 se consideran de calidad aceptable por las características de las indicaciones observadas ya que los niveles de atenuación de energía son bajos.

La clasificación de niveles de calidad en AWS D1.1 [55] se hace a partir de 4 categorías: indicaciones tipo A, B, C y D siendo las del tipo A las más severas e inaceptables. Las del tipo D son aceptables siempre, mientras que las C y B dependerán de su longitud y ubicación.

Dichas clasificaciones se realizan a partir de cálculos mediante diferencias algebraicas descritas en el código, mismas que toman en cuenta el nivel de referencia (calibración), el valor de la indicación (en la medición) y un factor de corrección de atenuación (en la medición). El valor obtenido en el cálculo se ubicará dentro de las 4 categorías mencionadas. En el código de referencia las clasificaciones también dependen del tipo de carga (cíclica o estática) y niveles de espesores, tablas 6.2 y 6.3 del código D1.1 respectivamente [55]. En la muestra 2 se observan indicaciones tipo C y D, sin embargo la tipo C no alcanza las proporciones para ser rechazada.

En el caso de la placa 4 se observó una falta de penetración, alcanzó un valor estimado de 70% del total de la unión (8.9 mm) y en la placa 8 se observan también falta de penetración, alcanzando un valor de penetración estimado del 90% (11.52 mm) al igual que en la placa 10, en donde se observa únicamente 85% (10.8 mm) del total del espesor del material base. Las placas 6 y 7 presentan discontinuidades a lo largo de toda la unión, por lo que de inmediato se consideran rechazadas.

Determinar exactamente el tipo de discontinuidad que se presenta resulta una tarea compleja debido a que aunque hay varias características que pueden contribuir a determinar la existencia de diversas discontinuidades, estas no son definitivas. Un pico con altos niveles de energía es un indicio de la presencia de agrietamiento, un pico bajo y difuso puede indicar la presencia de porosidad o un grupo de porosidades pero también pueden presentarse otras situaciones que provoquen la dispersión de la energía y que en consecuencia aparezcan dichas señales.

A pesar de ello, el UT resulta muy útil para determinar faltas de penetración debido a que las señales son observables en el display, como se muestra en las imágenes y resultó de mucha ayuda en la realización de este trabajo. Sin embargo es importante tener siempre en cuenta que la aplicación de una sola variedad de ensayos no es necesaria y hay que complementarse con otra prueba, razón por la que también son elaborados los demás ensayos de manera complementaria.

Para poder relacionar la presencia de ciertas discontinuidades con parámetros o condiciones que originaron dicha aparición resultaría necesario elaborar una mayor cantidad de muestras que permitan hacer dichas relaciones, Sin embargo el objeto del presente trabajo no lo es por lo que se propone como trabajo a futuro.

4.4 Prueba de tensión

Se prepararon 4 especímenes correspondientes a las muestras 1, 3, 5 y 9 para la realización de la prueba de tensión. Con la información obtenida, se obtuvo un promedio de esfuerzo máximo correspondiente a 577 MPa. Se identificó que la zona de ruptura fue en la soldadura en tres probetas.

Tabla 4.2: Resultados de la prueba de tensión

Identificación	Carga máxima kgf	Esfuerzo máximo MPa	Ruptura
Muestra 1	4860	591	Soldadura
Muestra 3	4780	602	Metal base
Muestra 5	4770	581	Soldadura
Muestra 9	4200	534	Soldadura

4.5 Prueba de microdureza

Se realizaron pruebas de microdureza a cuatro de las muestras soldadas, las mismas que se seleccionaron para realizar prueba de tensión, dado que presentaban una mayor penetración, identificadas con el número 1,3,5 y 9; los resultados se graficaron y se muestran en las figuras 4.14, 4.15, 4.16 y 4.17 respectivamente. En la figura 4.14 se observa un ejemplo de la manera en que se realizaron las indentaciones en tres zonas: MB, ZF y ZAC (recordando que la razón se debe a que cada una de ellas muestra diferentes propiedades debido a la cantidad de deposición del material de aporte y de la entrada de calor). De manera general se muestra un incremento de dureza en la ZAC de 450 y/o 550 HV comparado con el metal base con un valor de 200 HV, situación que se puede apreciar en el ejemplo de la figura 4.14 y en cada una de las gráficas. Se presentó variación respecto a la cantidad de indentaciones realizadas debido a que algunas muestras presentaban anchos de cordón o de ZAC mayores que otras, situación característica del proceso. La muestra número 3 que resultó libre de discontinuidades presentó dureza en las ZAC entre 420 y 470 HV y en la ZF 350 HV, únicamente 100 HV de diferencia comparada con el MB, en donde ocurrió la fractura durante la prueba de tensión.

Al realizar un análisis de los resultados microestructurales previos donde las fases resultantes de la ZAC se caracterizan por presentar martensita, cuya fase da como resultado propiedades de dureza más altas lo que a su vez proporciona fragilidad, por lo que esa podría ser la principal razón de que probablemente las pruebas de tensión tuvieron ahí su origen de falla. La ZF presenta una microestructura acicular y ferrítica principalmente, lo que le otorga propiedades de dureza menores y que se evidencia en la gráfica que pareciera una planicie, el MB presenta una dureza constante, como se esperaba.

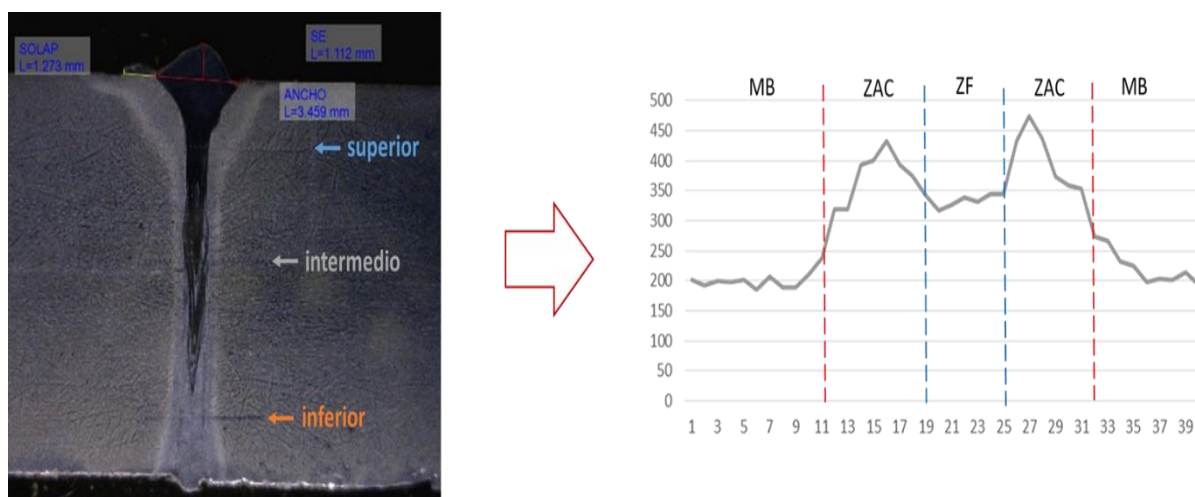


Figura 4.14: a) indicación de las áreas donde se tomaron las muestras y b) identificación de las zonas de la soldadura y material base en las correspondientes gráficas.

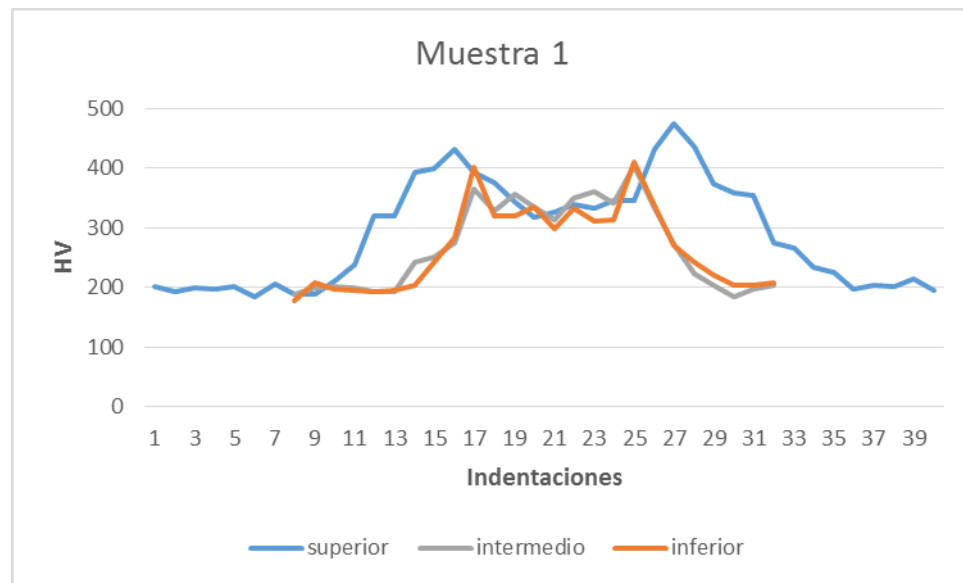


Figura 4.15: Gráfica de microdurezas correspondiente a la muestra 1.

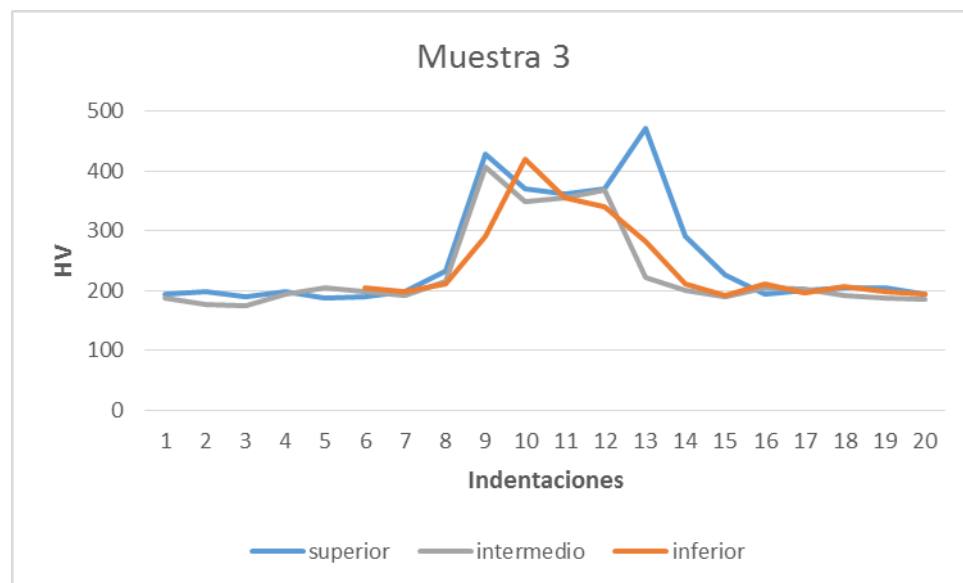


Figura 4.16: Gráfica de microdurezas correspondiente a la muestra 3.

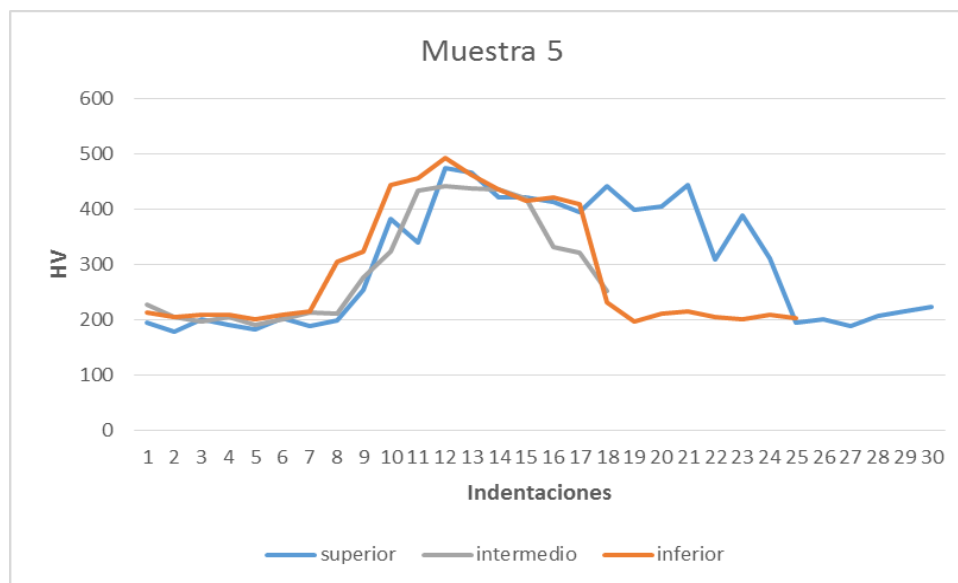


Figura 4.17: Gráfica de microdurezas correspondiente a la muestra 5.

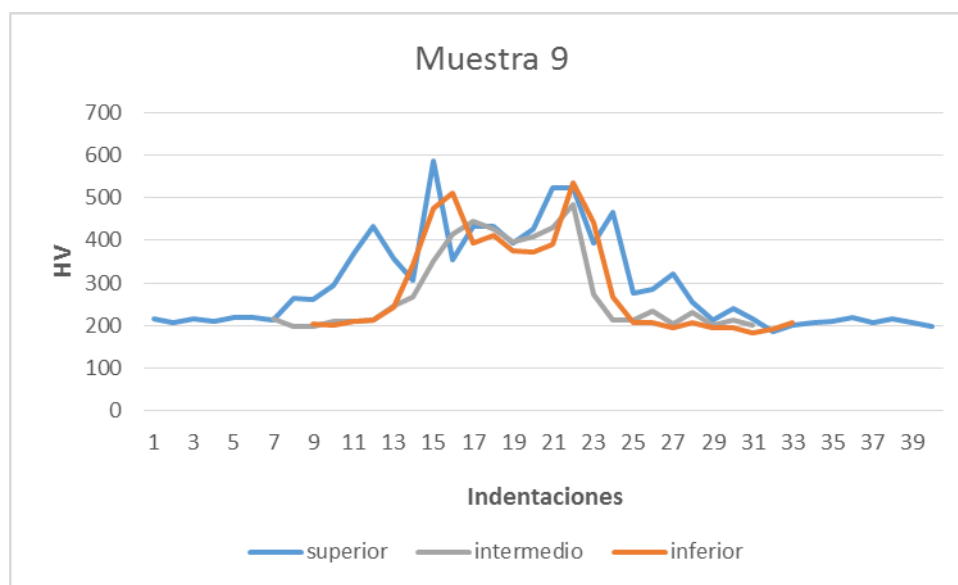


Figura 4.18: Gráfica de microdurezas correspondiente a la muestra 9.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

En el desarrollo de este proyecto se lograron identificar las siguientes discontinuidades mediante la prueba de Ultrasonido y ensayos auxiliares: Poro y porosidad agrupada, vermicular o cavidad alargada, falta de fusión y falta de penetración.

Mediante la prueba de UT el defecto más prominente que se observó fue la falta de penetración, con valores que se encuentran en un rango de porcentaje del 70% al 90% del espesor total. El valor mínimo se obtuvo en la muestra 4 con 70 % de penetración debido a la baja cantidad de potencia utilizada, en este caso fue de 7kW combinada con los siguientes parámetros: 22 mm/s de velocidad, 10 m/min de alimentación, 38 V, y una distancia focal de 0 mm. En la muestras 3, 9 y 11 se observó una penetración completa. En la unión asignada con número 3 se empleó una velocidad de avance de 22 mm/s, mientras que en la muestras 9 y 11 se empleó una velocidad de avance de 30 mm/s; aunque la velocidad empleada en las muestras 9 y 11 es mayor, parámetro que influiría en una menor penetración, la distancia focal empleada en estas últimas muestras fue de -3 mm comparada con 0 mm de la muestra 3, parámetro que influye indudablemente para alcanzar la penetración completa de las muestras 9 y 11.

Microestructuralmente, en la parte superior de las uniones se observaron variedades de ferrita como la alotriomórfica y Widmannstätten, además de

martensita y posiblemente inclusiones. Esta formación se deriva de una entrada de calor menor proveniente del láser. En la zona inferior se observa ferrita acicular y poligonal principalmente a consecuencia del material de aporte utilizado ER70S-6 en el proceso GMAW. La zona intermedia presenta una mezcla de todas las microestructuras mencionadas.

Respecto a las pruebas mecánicas, en los resultados de la prueba de tensión se observó una ruptura en la soldadura en tres de las probetas con valores de 534 a 391 MPa, situación relacionada a la presencia de fases duras derivadas de los rápidos enfriamientos que caracterizan a este proceso. En las pruebas de microdurezas se observan valores altos que oscilan entre 475 y 585 HV en la zona de fusión y ZAC en comparación con el material base cuyos valores son entre 190 a 200 HV.

Bibliografía

- [1] ASM INTERNATIONAL, *Metallographer's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels*, Ohio, USA: ASM INTERNATIONAL, 2002.
- [2] Y. Weng, H. Dong y Y. Gan, *Advanced Steels*, Berlin: Springer, 2011.
- [3] ASM International, *ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*, ASM International, 2005.
- [4] Center of Automotive Technology , «Materials Lightweighting,» [En línea]. Available: http://autocaat.org/Technologies/Materials_Lightweighting/. [Último acceso: 10 07 2017].
- [5] J. L. Dosset y H. E. Boyer, «Heat Treating of Carbon Steels,» de *Practical Heat Treating: Second Edition*, ASM International, 2006, pp. 97-124.
- [6] ASTM International, *Handbook of Comparative World Steel Standards 3era edición*, ASTM International , 2004.
- [7] M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna*, Mexico, D.F.: McGraw Hill, 2007.
- [8] H. V. Johnson, *Manufacturing processes 2da edición*, Peoria, IL: McGraw-Hill, 1984.
- [9] SME, *Tool and manufacturing engineers hanbook*, Society of Manufacturing Engineers , 1989.
- [10] F. Cardarelli, «Materials Handbook,» London, Springer , 2008.
- [11] R. Mesra, «Hybrid laser arc welding: State-of-art review,» *Optics and Laser Technology*, nº 99, pp. 60-71, 2017.
- [12] N. B. Dahotre y S. P. Harimkar, *Laser Fabrication and Maching of Materials*, Springer Science+Bussines Media, 2008.
- [13] L. Bach, J. Cuesta y N. Carles, *Aplicaciones industriales del láser*, Barcenola, España: Marcombo, 1988.
- [14] M. Shome y M. Tumuluru, «Introduction to welding and joining of advanced high-strength steels,» *Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS)*, p. 1 a 8, 2015.
- [15] «European Comission,» 7 12 2017. [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policias/transport/vehicules/cars_en. [Último acceso: 07 07 2017].

- [16] AWS, Recommended Practices for Laser Beam Welding, Cutting, and Allied Processes (2nd Edition) C7.2M:2010, AWS, 2010.
- [17] American Welding Society, Welding Handbook, Miami, FL: AWS, 2001.
- [18] I. Richardson, «Arc Welding and Hybrid Laser-Arc Welding,» de *The Theory of Laser Materials Processing*, Springer, 2009, pp. 167-215.
- [19] J. Defalco, «Aplicaciones Prácticas para la Soldadura Láser Híbrida,» *Welding Journal*, vol. 34 al 37, p. 33, 2008.
- [20] L. Zhang, X. Gao, M. Sun y Jiansun Zhang, «Weld outline comparison between various pulsed Nd:YAG laser welding and pulsed Nd:YAG laser-TIG arc welding,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 75, pp. 153-160, 2014.
- [21] H. L. Wei, J. J. Blecher, T. Palmer y T. Debroy, «Fusion Zone Microstructure and Geometry in Completw-Joint-Penetration Laser-Arc Hybrid Welding of Low-Alloy Steel,» *Welding Journal*, vol. 94, pp. 135-144, 2015.
- [22] ESAB, «ESAB: HLAW - THE PROCESS,» [En línea]. Available: <http://www.esabna.com/us/en/automation/process-solutions/hlaw/process.cfm>. [Último acceso: 12 10 2017].
- [23] «Lincoln Electric: Hybrid Laser GMAW,» [En línea]. Available: <http://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/nx150.pdf>. [Último acceso: 12 10 2017].
- [24] DNV GL, Class guideline: Hybrid laser.arc welding, DNV GL, 2015.
- [25] G. Turichin, «Laser and Hybrid Laser-Arc Welding,» de *Joining Technologies*, Intech, 2016, pp. 131-157.
- [26] G. Turichin, «Laser and Hybrid Laser-Arc Welding,» de *Joining Technologies*, InTech, 2016, pp. 131-157.
- [27] R. Lasulau y R. Boboescu, «Laser beam defocusing effects on laser welds surfaces,» *INTERNATIONAL CONFERENCE OF SCIENTIFIC PAPER AFASES 2011*, pp. 901-906, 2011.
- [28] «On-line depth measurement for laser-drilled holes based on the intensity of plasma emission,» *Measurement Science and Technology*, vol. 25, 2014.
- [29] C. Gerritsen, «A Review of the development and application of laser and laser-arc hybrid welding in European shipbuilding,» 9 06 2005. [En línea]. Available: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/a-review-of-the-development-and-application-of-laser-and-laser-arc-hybrid-welding-in-european-shipbuilding/>. [Último acceso: 12 10 2017].
- [30] P. Kah, «Overview of the exploration status of laser-arc hybrid welding processes,» *Rev. Adv. Mater. Sci.*, vol. 30, pp. 112-132, 2012.

- [31] I. Bunaziv, O. M. Akeselen, X. Ren y A. Salminen, «Hybrid welding possibilities of thick sections for arctic applications,» *Physics Procedia*, vol. 78, pp. 74-83, 2015.
- [32] Industrial laser solutions, «Industrial laser solutions for manufacturing,» 9 4 2013. [En línea]. Available: <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-28/issue-5/features/laser-hybrid-welding-powerful-factory-floor-process.html>. [Último acceso: 16 10 2017].
- [33] J. J. Blecher, T. A. Palmer y T. DebRoy, «Mitigation of Root Defect in Laser and Hybrid Laser-Arc Welding,» *Welding Journal*, vol. 94, pp. 73-82, 2015.
- [34] S. R.P., Applied Welding Engineering : Processes, Codes, and Standards, 1st ed., Butterworth-Heinemann, 2012.
- [35] AWS, «AWS: C7 Committee on High Energy Beam Welding and Cutting,» [En línea]. Available: <https://www.aws.org/standards/committee/c7-committee-on-high-energy-beam-welding-and-cutting>. [Último acceso: 16 10 2017].
- [36] International Organization for Standardization, «International Organization for Standardization,» [En línea]. Available: <https://www.iso.org/>. [Último acceso: 12 16 2017].
- [37] AWS, AWS C7.6/C7.6M:2017 Process Specification and Operator Qualification for Láser Hybrid Welding, AWS, 2017.
- [38] C. L. Jenney, «Welding inspection and nondestructive examination,» de *Welding Handbook, Volume 1*, American Welding Society, 2001, pp. 579-636.
- [39] D. Singh, «Quantum Non Destructive Evaluation,» [En línea]. Available: <http://www.qndt.org/astmlist.pdf>. [Último acceso: 25 07 2017].
- [40] D. C. Jiles, Introduction to the Principles of Materials Evaluation, Taylor & Francis Group, 2007.
- [41] A. Hijazi, Introduction to Non-Destructive Testing Techniques.
- [42] R. Ospina Lopez y C. Hernando Trujillo, «Aplicación y selección de ensayos no destructivos para la evaluación de uniones soldadas,» *Scientia Et Technica*, vol. XVU, nº 48, p. 196 a 201, 2011.
- [43] International atomic energy Agency, Ultrasonic testing of materials at level 2, Vienna: International atomic energy Agency, 1998.
- [44] OLYMPUS, «Ultrasonic transducers technical notes,» OLYMPUS NDT, 2006.
- [45] C. Hellier, Handbook of nondestructive evaluation, McGraw Hill, 2003.
- [46] F. Campbell, «Inspection of Metals,» ASM International, 2014.

- [47] ASM International, «Ultrasonic Inspection,» de *Inspection of Metals- Understanding the basics*, ASM International , 2013, pp. 267-292.
- [48] American Welding Society , *Certified Welding Supervisor Manual fir Quality and Productivity Improvement*, Miami, FL: American Welding Society , 2005.
- [49] «Research gate,» 02 2017. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Radovan_Kovacevic/publication/279394924_Principles_of_Abrasive_Water_Jet_Machining/links/589353faaca27231daf61a1a/Principles-of-Abrasive-Water-Jet-Machining.pdf. [Último acceso: 2017 10 31].
- [50] TRUMPF, «Trudisk laser- TECHNICAL DATA,» 2017. [En línea]. Available: https://www.trumpf.com/en_US/products/lasers/disk-lasers/trudisk/. [Último acceso: 30 10 2017].
- [51] Linconl Electric, «Harris Products Group,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.harrisproductsgroup.com/es/Products/Alloys/Welding/Mild-Steel/ER70S-6-GMAW-MIG.aspx>. [Último acceso: 10 10 2017].
- [52] NIKON, «Nikon Metrology Inc.,» [En línea]. Available: www.nikonmetrology.com. [Último acceso: 02 11 2017].
- [53] OLYMPUS CORP US., «OLYMPUS,» [En línea]. Available: <https://www.olympus-ims.com/es/omniscan-mx2/#!>. [Último acceso: 10 12 2017].
- [54] «LabWrench,» [En línea]. Available: <http://www.labwrench.com/?equipment.view/equipmentNo/10613/Wilson-Hardness/Tukon-2500/>. [Último acceso: 15 junio 2018].
- [55] AWS, D1.1/D1.1M:2015, *Structural Welding Code—Steel*, USA: American Welding Society , 2015.
- [56] C. Garcia, «High Strenght low alloyed (HSLA) steels,» 2017.
- [57] J. R. Davis, *Alloying: Understaning the Basics*, 2001: ASM Internatinal.

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1: Diagrama de clasificación de los aceros.</i>	8
<i>Figura 2.2: Principio de funcionamiento del disco láser [16].</i>	20
<i>Figura 2.3: Diferencias de penetración de soldadura [22].</i>	25
<i>Figura 2.4: Esquema del proceso de soldadura HLAW [23].</i>	26
<i>Figura 2.5: Estructura del modelo físico del proceso HLAW [20].</i>	28
<i>Figura 2.6: Profundidad de enfoque, ejemplo [28].</i>	29
<i>Figura 2.7: Defecto de solidificación en una unión tipo filete empleando soldadura híbrida con láser Nd: YAG y MAG. [29].</i>	31
<i>Figura 2.1: Sistema HLAW del CLAM de la Universidad Metodista del Sur [49].</i>	45
<i>Figura 2.9: Metodología.</i>	48
<i>Figura 2.10: Tipo de corte que se realiza para las muestras.</i>	49
<i>Figura 2.11: Estereoscopio (a) y microscopio (b) utilizados. [52].</i>	50
<i>Figura 2.12: Equipo de ultrasonido industrial para detección de fallas marca OLYMPUS modelo MX2 [53].</i>	51
<i>Figura 2.13: Transductor Olympus modelo A403S [53].</i>	51
<i>Figura 2.14: Durómetro Tukon 2500 [54].</i>	52
<i>Figura 3.1: muestra número 5.</i>	53
<i>Figura 3.2: muestras obtenidas de las piezas 1, 3, 5 y 9.</i>	54
<i>Figura 3.3: macrofotografías correspondientes a las piezas 1 a la 10.</i>	56
<i>Figura 3.4: Identificación de las diferentes zonas de los arcos de la unión HLAW.</i>	57
<i>Figura 3.5: Micrografía que muestra la ZF, ZAC y MB.</i>	58
<i>Figura 3.6: Micrografía del material base.</i>	58
<i>Figura 3.7: vista microscópica de la parte superior de la soldadura.</i>	60
<i>Figura 3.8: vista microscópica de la parte inferior de la soldadura.</i>	60
<i>Figura 3.9: Microestructura de la ZAC.</i>	61
<i>Figura 3.10: imagen de UT correspondiente a la detección de discontinuidades de la pieza 2.</i>	62
<i>Figura 3.11: imagen de UT correspondiente a la pieza 4, en donde mediante cálculos se puede determinar una falta de penetración de aproximadamente un 30%.</i>	62
<i>Figura 3.12: imagen de UT correspondiente a la pieza 8 en la cual se reporta una penetración aproximada del 90%.</i>	63
<i>Figura 3.13: imagen de UT correspondiente a la pieza 10 en la cual se reporta una penetración aproximada del 85%.</i>	63
<i>Figura 3.14: a) indicación de las áreas donde se tomaron las muestras y b) identificación de las zonas de la soldadura y material base en las correspondientes gráficas.</i>	68
<i>Figura 3.15: Gráfica de microdurezas correspondiente a la muestra 1.</i>	69
<i>Figura 3.16: Gráfica de microdurezas correspondiente a la muestra 3.</i>	69
<i>Figura 3.17: Gráfica de microdurezas correspondiente a la muestra 5.</i>	70
<i>Figura 3.18: Gráfica de microdurezas correspondiente a la muestra 9.</i>	70

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1: Clasificación de los aceros al carbono [1].</i>	9
<i>Tabla 2.2: Clasificación AISI/SAE de aceros al carbono [1].</i>	11
<i>Tabla 2.3: Composición de aceros al carbono al alto manganeso* [3].</i>	12
<i>Tabla 2.4: Composición de aceros al carbono al alto manganeso* [3].</i>	12
<i>Tabla 2.5: Composición química del acero AISI 1520.</i>	14
<i>Tabla 2.6: Parámetros de la soldadura láser [13].</i>	17
<i>Tabla 2.7: Comparación entre LBW y GMAW.</i>	23
<i>Tabla 2.8: Clasificación de END de acuerdo a su aplicación.</i>	38
<i>Tabla 3.1: Especificaciones técnicas del láser TRUMPF modelo 10003 [50].</i>	46
<i>Tabla 3.3: Parámetros que se variaron en las uniones.</i>	47
<i>Tabla 3.4: Composición química del electrodo ER70S-6 según AWS 5.18</i>	48
<i>Tabla 4.1: Resultados de la prueba de UT.</i>	64
<i>Tabla 4.2: Resultados de la prueba de tensión.</i>	67