

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ESTUDIO DE LAS DISCONTINUIDADES GENERADAS EN LA APLICACIÓN
DE SOLDADURA HÍBRIDA LÁSER-GMAW EN COMPONENTES
AUTOMOTRICES**

POR

LUIS ARMANDO AGUILAR PÉREZ

TESIS

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

SALTILLO, COAHUILA, MÉEXICO A 15 DE DICIEMBRE DE 2017

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ESTUDIO DE LAS DISCONTINUIDADES GENERADAS EN LA APLICACIÓN
DE SOLDADURA HÍBRIDA LÁSER-GMAW EN COMPONENTES
AUTOMOTRICES**

POR

LUIS ARMANDO AGUILAR PÉREZ

TESIS

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

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A 15 DE DICIEMBRE DE 2017

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales
Gerencia de Desarrollo Humano
División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Tesis, **ESTUDIO DE LAS DISCONTINUIDADES GENERADAS EN LA APLICACIÓN DE SOLDADURA HÍBRIDA LÁSER-GMAW EN COMPONENTES AUTOMOTRICES**, realizada por el alumno (a) **LUIS ARMANDO AGUILAR PÉREZ**, con número de matrícula **15-MS045** sea aceptada para su defensa como Maestro en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

Dra. Gladys Yerania Pérez Medina
Tutor Académico

Ing. Gabriel Sandoval
Vázquez
Tutor en Planta

Dra. Alejandra Hernández
Rodríguez
Asesor

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 Grado del alumno **LUIS ARMANDO AGUILAR PÉREZ**, una vez leída y revisada la Tesis titulada **ESTUDIO DE LAS DISCONTINUIDADES GENERADAS EN LA APLICACIÓN DE SOLDADURA HÍBRIDA LÁSER-GMAW EN COMPONENTES AUTOMOTRICES**, aceptamos que la referida Tesis revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestro en Tecnología de la Soldadura Industrial durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 15 días del mes de diciembre del año 2017

Dr. Rene de Jesús Cerda
Rojas
Presidente

Dr. Melvyn Álvarez Vera
Secretario

Dra. Gladys Yerania Pérez
Medina
Vocal

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la vida y la oportunidad de recibir su amor y bendiciones día con día.

A mis padres Paulino Aguilar Tapia y Ma. Elizabeth Pérez Aguilar por todo el apoyo y amor mostrados a lo largo de mi vida y en este episodio especial.

A mis hermanos, Paulino, Miguel e Irais por la paciencia, el apoyo, la fe, todos sus consejos y atenciones, por ayudarme a levantarme siempre.

A mis sobrinas Danna y Abril por ser motor de mi alma y motivación diaria de mí ser para convertirme en una mejor persona.

A la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, a través del programa de Maestría en Tecnología de la Soldadura Industrial, por las enseñanzas y apoyos recibidos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por su apoyo durante los estudios de posgrado.

A mi comité tutorial encabezado por la Dra. Gladys Yerania Pérez Medina como excelente tutor académico e inmejorables complementos: la Dra. Alejandra Hernández Rodríguez como asesora y el Ing. Gabriel Sandoval Vázquez como tutor en planta. Por guiarme por un camino desconocido y brindarme luz para salir adelante humana y profesionalmente.

Al personal de las distintas áreas de COMIMSA, en especial el área de pregrado, posgrado y también de la subgerencia de Capacitación y Desarrollo, por brindarme todas las facilidades necesarias para mi correcto desempeño dentro de la corporación.

Al personal de SISAMEX, por permitirme interactuar con la aplicación industrial del proyecto de investigación, conocimientos y brindarme siempre su apoyo, en especial a los miembros del Laboratorio de Materiales y del Centro de Desarrollo Tecnológico y Humano.

A todos los catedráticos que compartieron conocimientos conmigo.

A todos los amigos, compañeros, y colegas que fueron parte de esta etapa formativa, y personas que siempre contribuyeron de algún modo para cumplir con mis objetivos y por ende me motivaron a continuar hasta lograrlos.

A *mi familia* y a *dios* por la bendición de que sean ellos el más grande éxito en mi vida.

Gracias.

ÍNDICE

SÍNTESIS	1
CAPÍTULO 1	2
1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	2
1.1. Antecedentes	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general.....	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. Justificación del proyecto	4
1.4. Planteamiento del problema.....	5
1.5. Aportación	6
1.5.1. Aportación Científica.....	6
1.5.2. Aportación Tecnológica/Industrial.....	6
1.6. Alcance	6
1.7. Hipótesis	7
CAPÍTULO 2.....	8
2. ESTADO DEL ARTE.....	8
2.1. Aceros usados en componentes automotrices.....	8
2.1.1. Clasificación de los aceros usados en componentes automotrices	9
2.1.2. Aceros utilizados en la fabricación del eje motriz trasero de tractocamiones	10
2.1.3. Propiedades mecánicas y microestructurales.....	12
2.2. Soldadura híbrida por arco – láser	13

2.2.1.	Ventajas y limitantes del proceso	15
2.2.2.	Propiedades de las juntas producidas mediante HLAW	16
2.2.3.	Parámetros del proceso y su influencia en las propiedades de la unión	21
2.3.	Discontinuidades en HLAW	23
2.4.	Control y evaluación de la calidad en soldaduras HLAW	23
2.4.1.	Imperfecciones y defectos de soldadura	24
2.4.2.	Clasificación de la calidad de la soldadura	25
2.4.3.	Evaluación de las propiedades de la soldadura.....	26
2.4.4.	Inspección de la soldadura	27
2.5.	Ensayos no destructivos	29
2.5.1.	Líquidos penetrantes	29
2.5.2.	Arreglo de Fases	31
CAPÍTULO 3.....		33
3. METODOLOGÍA.....		33
CAPÍTULO 4.....		37
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....		37
4.1.	Obtención de probetas	37
4.2.	Aplicación de ED y END.....	40
4.2.1.	Inspección visual	41
4.2.2.	Líquidos penetrantes	41
4.2.3.	Arreglo de Fases	42
4.2.4.	Metalografía.....	48
CAPÍTULO 5.....		49
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		49
5.1.	Aplicación de ED y END.....	50
5.1.1.	Inspección visual	53
5.1.2.	Líquidos penetrantes	55
5.1.3.	Arreglo de Fases	56
5.1.4.	Metalografía.....	66
CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO		78

BIBLIOGRAFÍA.....	81
LISTADO DE TABLAS.....	84
LISTADO DE FIGURAS.....	86
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO	88

SÍNTESIS

La utilización del proceso de soldadura híbrido láser arco (HLAW, por sus siglas en inglés, Hybrid Laser Arc Welding) genera imperfecciones y por ende se adquiere la necesidad de clasificar, tipificar y dimensionar dichas imperfecciones para determinar la aceptación o rechazo de acuerdo a la norma ISO 12932; adquiriendo de esa manera el nivel de calidad final del componente al que se le aplica HLAW. En el presente trabajo se lleva a cabo la inspección de la unión mediante ensayos no destructivos (END) para determinar la aparición de discontinuidades superficiales, sub-superficiales y volumétricas aplicados a diversos cordones, analizando por medio de criterios de aceptación. La búsqueda de imperfecciones se realizó con la tecnología Ultrasonido con Arreglo de Fases (UT-PA, por sus siglas en inglés, Ultrasonic Testing-Phased Array) para la parte volumétrica, con Líquidos Penetrantes (PT, por sus siglas en inglés, Penetrant Testing) para la parte sub-superficial y con Inspección Visual (VT, por sus siglas en inglés, Visual Testing) para la parte superficial. También se muestra la microestructura de placas de acero AISI 1018 sometidas al proceso HLAW con aporte ER-70S, y se describen las fases presentes generadas por el aporte térmico nominal, la composición química de los metales base y de aporte.

Palabras clave:

Proceso HLAW, Ensayos Destructivos (ED), Ensayos no Destructivos (END), Arreglo de Fases.

Campo específico:

Calidad de la Unión Soldada, Metalurgia de la Soldadura.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

1.1. Antecedentes

La evolución de la ciencia de los materiales ha generado que diversas industrias, incluida la industria manufacturera de componentes utilizados en el ramo automotriz, implemente nuevas tecnologías y materiales, generando así avances significativos en cuanto al aumento de la seguridad del usuario final, una optimización del desempeño, innovadores diseños, y la disminución del costo económico y ambiental que representa la producción de dichos componentes.

La unión de aceros estructurales en fundas de eje motriz trasero de tractocamiones se viene desarrollando desde que la industria automotriz demanda este tipo de componentes. A su vez, la correcta elección y utilización de los procesos de soldadura juega un papel crucial para que se pueda cumplir con las características y especificaciones necesarias en la industria automotriz.

Como alternativa para la unión de componentes de la industria automotriz se pretende migrar de un proceso de soldadura usado actualmente: soldadura por arco de metal y gas (GMAW, por sus siglas en inglés, Gas Metal Arc Welding), a

otro proceso que logrará aumentar la velocidad de operación y aumentará con ello la producción, dicho proceso será el de soldadura híbrida láser-arco (HLAW, por sus siglas en inglés).

Una de las variables más importantes a considerar es la de la evaluación y aseguramiento de la calidad, parte fundamental en cualquier proceso de producción de componentes empleados en la industria automotriz, dicha evaluación se realiza mediante ensayos destructivos (ED) y no destructivos (END) para la aplicación de los cuales se necesitan verificar las normativas vigentes para su correcto uso y así determinar si la unión del componente cumple con las características y especificaciones requeridas para su uso.

La evaluación y medición de las discontinuidades generadas por la aplicación de un proceso de unión sirve para determinar el nivel de calidad de la soldadura empleada.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Determinar mediante la utilización de los ensayos no destructivos: que la calidad de la unión soldada mediante el proceso HLAW cumple con las características y especificaciones necesarias para satisfacer los criterios de aceptación de acuerdo a la norma ISO 12932.

1.2.2. Objetivos específicos

- Identificar las características microestructurales generadas con la aplicación del proceso HLAW en la unión de aceros estructurales similares a los usados en la funda del eje motriz trasero de tractocamiones.
- Determinar mediante la utilización del ensayo no destructivo arreglo de fases, la clase de las discontinuidades de acuerdo a sus características

generadas mediante el proceso HLAW al momento de unir aceros estructurales similares a los usados en la funda del eje motriz trasero de tractocamiones.

- Generar una metodología para la inspección apegada a la norma ISO 12932 que permita evaluar las uniones de acero AISI 1018 soldadas por HLAW.
- Evaluar la unión generada por el proceso HLAW, de acuerdo a la norma ISO 12932 y usando el método de ensayo no destructivo: arreglo de fases.
- Determinar el efecto de las variables del proceso HLAW en la formación de discontinuidades en uniones de acero AISI 1018.

1.3. Justificación del proyecto

La transformación de los productos fabricados mediante el talento y la tecnología presentes en Sistemas Automotrices de México (SISAMEX), en soluciones integrales, brinda como resultado la generación de valor a clientes y accionistas.

La unión de aceros estructurales en fundas de eje motriz trasero de tractocamiones con capacidad de carga de 23,000 lb con 16 mm de espesor se ha realizado mediante el proceso de soldadura GMAW.

El proceso de soldadura actualmente utilizado puede ser optimizado para ahorrar tiempo de producción y con ello costos operacionales, al momento de intentar realizar esta optimización se debe considerar la investigación y así determinar si es o no viable migrar a otro proceso de soldadura tomando en cuenta todo las variables involucradas.

El proceso al cual se pretende migrar y verificar si optimiza la producción de las fundas de eje motriz trasero es el proceso HLAW, el cual combina los beneficios de la soldadura láser y la soldadura por arco.

La aplicación de la soldadura HLAW puede otorgar mejores características microestructurales al disminuir el área de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) y

aumentar la velocidad de soldadura respecto del proceso GMAW, añadiendo también una reducción en los costos de producción y una mejor apariencia en las uniones.

Las características de calidad de la unión que genera la aplicación de soldadura sobre medias fundas, se determinan mediante ED y END, los cuales también pueden aumentar el ahorro en cuanto a tiempos y costos, migrando a procedimientos y metodologías de inspección más rápidas y completas que las usadas actualmente.

1.4. Planteamiento del problema

En la actualidad hay una competencia constante en cuanto a la selección del proceso de unión adecuado, debido a la existencia de procesos relativamente nuevos y a la tecnología desarrollada para llevarlos a cabo, por consiguiente, es imperante verificar las ventajas que brinda el uso de un proceso de unión avanzado, y adaptación en el proceso de producción.

La fabricación de las fundas de eje motriz trasero empleadas en tractocamiones requiere un estricto control de calidad, ya que una deficiencia en el cordón de soldadura puede ocasionar consecuencias trágicas para los usuarios finales.

El momento en el que se piensa en migrar o evolucionar a un proceso que en teoría brinda más ventajas, es cuando se requiere el análisis de los efectos en el material base, y en la unión generada, garantizar que se obtienen mejoras a nivel microestructural, de propiedades mecánicas y no se compromete el papel de la calidad en la soldadura.

La medición o aseguramiento de dicha calidad de soldadura es indispensable y por ello se pretende la utilización del ensayo no destructivo: arreglo de fases.

1.5. Aportación

1.5.1. Aportación Científica

La presente investigación cuenta con información acerca de los cambios microestructurales que se generan con la utilización del proceso HLAW al momento de unir aceros estructurales similares a los usados en la funda del eje motriz trasero de tractocamiones, así como la relación que existe entre los parámetros propios del proceso HLAW para que la unión obtenida cumpla con los requisitos de confiabilidad y desempeño en aplicación.

1.5.2. Aportación Tecnológica/Industrial

La utilización del ensayo no destructivo: arreglo de fases, es una tecnología avanzada que brinda un complemento muy efectivo para la realización de una prueba de calidad más eficaz.

El presente trabajo concentra información que permite conocer las características de las discontinuidades generadas por la unión con proceso HLAW de fundas elaboradas con acero estructural de eje motriz trasero usadas en tractocamiones mediante la metodología de inspección propuesta.

1.6. Alcance

Análisis de las características (tipo, tamaño y ubicación) de discontinuidades resultantes de la aplicación del proceso HLAW en aceros estructurales similares a los utilizados en fundas para eje motriz trasero empleado en tractocamiones. Utilizando los métodos de Inspección Visual, Líquidos Penetrantes, Ultrasonido con Arreglo de Fases y macrografías; aplicados a placas de acero AISI 1018 unidos mediante HLAW y los criterios de aceptación de la norma ISO 12932.

1.7. Hipótesis

La utilización de ensayos destructivos y no destructivos para la determinación de las características (tipo, tamaño y ubicación) de las discontinuidades, posibilitará determinar el nivel de calidad final de la unión soldada, y con ello la aceptación o rechazo bajo las especificaciones de la norma ISO 12932.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1. Aceros usados en componentes automotrices

El mundo de los materiales se divide en dos grandes grupos principalmente: los materiales metálicos y los no metálicos. Dentro de los materiales metálicos se puede encontrar a su vez una subdivisión entre los ferrosos (contienen al hierro como principal constituyente) y los no ferrosos (que utilizan a otros elementos diferentes del hierro como principales constituyentes).

Los materiales ferrosos se pueden clasificar de acuerdo a su contenido de hierro como:

- Aceros (menos del 2.0% en peso de carbono)
- Hierros o fundiciones (más del 2.0 y menos del 6.67% en peso de carbono)

Debido a la demanda de fabricación de materiales que cumplan con las características requeridas en base a su uso como componentes automotrices, se ha determinado y evaluado que a lo largo de los años el acero sigue siendo uno de los materiales más rentables para dicho fin.

2.1.1. Clasificación de los aceros usados en componentes automotrices

El Instituto Americano del Hierro y el Acero, AISI (por sus siglas en inglés: American Iron and Steel Institute), y la Sociedad de Ingenieros Automotrices, SAE (por sus siglas en inglés: Society of Automotive Engineers), tienen sistemas para clasificar a los aceros (Tabla 2.1) utilizando un número de cuatro o cinco dígitos. Los dos primeros números se refieren a los principales elementos de aleación presentes y los últimos dos o tres se refieren al porcentaje de carbono (1).

Tabla 2.1. Sistema de clasificación de aceros AISI/SAE (2)

Números y dígitos	Tipo de acero y contenido nominal del elemento de aleación principal, %
10xx(a)	Acero al carbono (Mn 1.00 máx.)
11xx	Resulfurizado
12xx	Resulfurizado y Refosforizado
15xx	Acero al carbono (Rango máximo de Mn: 1.00-1.65)

(a) Las xx en los últimos dos dígitos de estas designaciones indican el contenido de carbono presente (en centésimas del porcentaje en peso).

2.1.1.1. Aceros al carbono

El proceso de fabricación del acero tiene un efecto sobre las características y propiedades del acero, así como su composición química. Sin embargo, las variaciones en el contenido de carbono tienen un efecto mayor sobre las propiedades mecánicas, al aumentar el contenido de carbono aumenta la dureza y la resistencia. Como tal, los aceros al carbono se clasifican generalmente según su contenido de carbono.

En términos generales, los aceros al carbono contienen hasta un 2% de elementos de aleación en total y se pueden subdividir en aceros de bajo carbono, aceros de medio carbono, aceros de alto contenido de carbono y aceros de ultra alto carbono (2).

2.1.2. Aceros utilizados en la fabricación del eje motriz trasero de tractocamiones

El acero de bajo carbono se utiliza principalmente en paneles de carrocería de automóviles, y productos de alambre.

Para placas y secciones estructurales de acero laminado, el contenido de carbono se puede aumentar hasta aproximadamente 0.30%, con un contenido de manganeso de hasta 1.6%. Estos últimos materiales pueden ser utilizados para piezas estampadas, piezas forjadas, tubos sin costura, y placas de calderas.

La serie 15xx de la clasificación ya mencionada se utiliza dentro de la industria de fabricación de componentes automotrices.

La Figura 2.1 (3) muestra la ubicación del eje motriz trasero en el tractocamión, la unión de dicho componente es el objeto de estudio en la presente investigación.

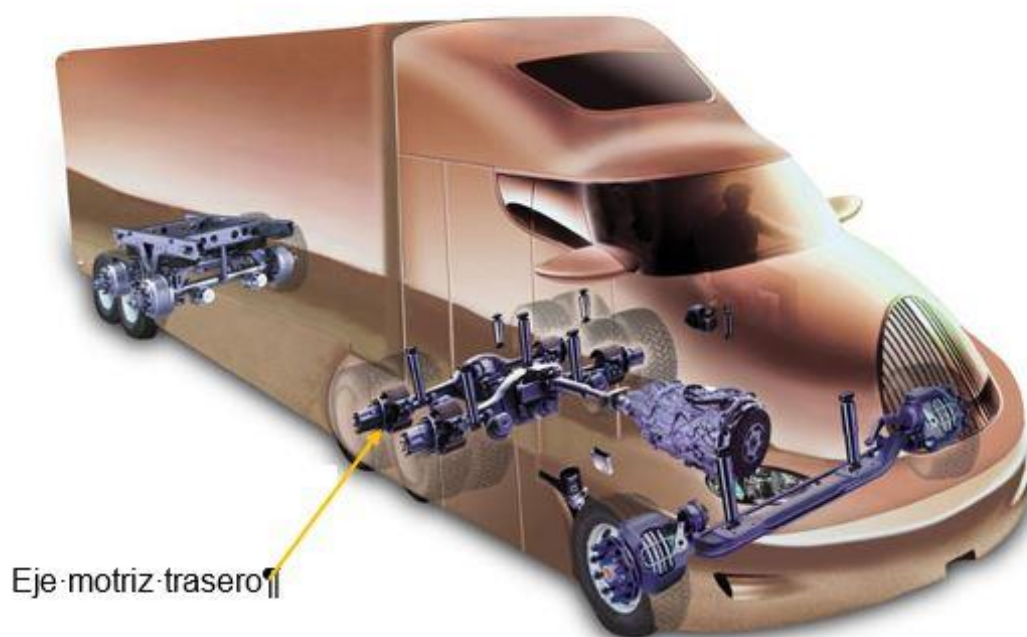


Figura 2.1 Ubicación del eje motriz trasero en el tractocamión (3)

La Figura 2.2 muestra una representación del eje motriz trasero ampliada.



Figura 2.2 Eje motriz trasero (3)

2.1.3. Propiedades mecánicas y microestructurales

Las propiedades mecánicas que tiene el material base con que se fabrican las fundas de ejes traseros automotrices se muestran en la Tabla 2.2 (4). En la Tabla 2.3 (4) se muestra la composición química del acero en cuestión.

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas (4).

Propiedad Mecánica	Requerimiento
Módulo de Elasticidad	380 MPa min
Resistencia a la tensión	510 MPa min
Elongación	19% min
Impacto-Charpy	20 ft-lbs

Tabla 2.3 Composición química (4)

Elemento	%
C	0.17-0.22
Mn	1.6 máx.
Si	0.15-0.6
V	0.02-0.11
Al	0.02-0.05

La curva esfuerzo deformación muestra el comportamiento elástico del material se muestra en la Figura 2.3.

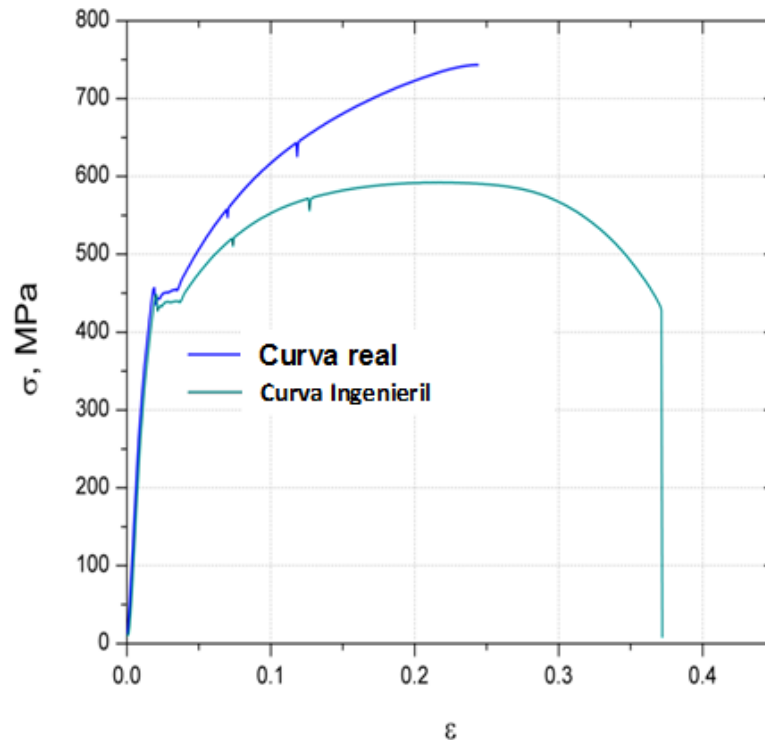


Figura 2.3 Curva esfuerzo deformación (4)

2.2. Soldadura híbrida por arco – láser

El proceso de soldadura híbrida por arco láser, HLAW (por sus siglas en inglés: Hibryd Laser Arc Welding), utiliza ventajas de la soldadura láser, LBW (por sus siglas en inglés: Laser Beam Welding), y la soldadura por arco de metal y gas, GMAW (por sus siglas en inglés: Gas Metal Arc Welding). Algunos de los beneficios de la soldadura láser son: bajo calor de entrada, elevada profundidad de penetración y una alta velocidad de soldadura. Cuando la soldadura láser se combina con el arco, genera un efecto sinérgico que incrementa la profundidad de la penetración, el llenado de la ranura con metal de aporte y la posibilidad de un mejor control en la composición de la soldadura (5).

La hibridación se hace con la intención de combinar la velocidad de la soldadura láser y las buenas uniones de la soldadura por arco, creando un proceso novedoso y de excelentes resultados (6).

La normatividad aplicable a éste tipo de proceso está incluida básicamente en las siguientes normas ISO:

- Soldeo híbrido por láser-arco de aceros, níquel y aleaciones de níquel. Niveles de calidad para las imperfecciones. (ISO 12932:2013).
- Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Especificación del procedimiento de soldeo. Parte 6: Soldeo híbrido por arco-láser. (ISO 15609-6:2013).
- Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Ensayo de procedimiento de soldeo. Parte 14: Soldeo híbrido por láser-arco de aceros, níquel y aleaciones de níquel. (ISO 15614-14:2013).

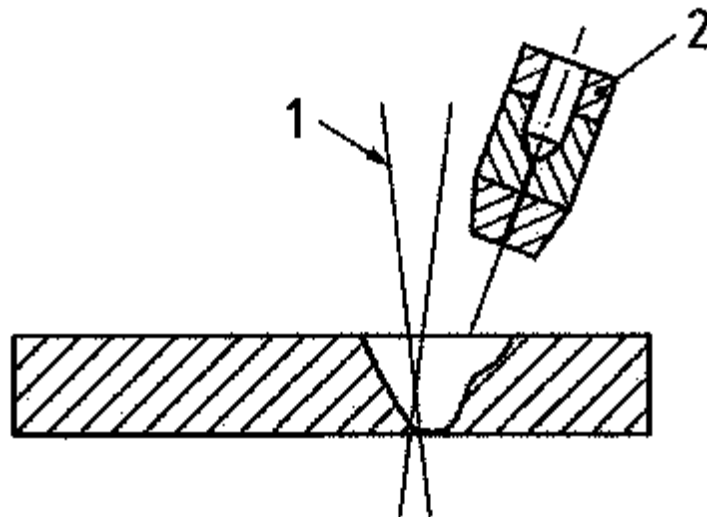


Figura 2.4 Proceso híbrido; 1 – Fuente láser, 2 – Antorcha proceso por arco (GMAW) (7).

De acuerdo a las normas ISO mencionadas, un soldeo híbrido se define como: Soldeo en el cual se emplean dos o más procesos de forma simultánea en el

mismo baño de fusión (7). La Figura 2.4, muestra un bosquejo de la definición mencionada.

2.2.1. Ventajas y limitantes del proceso

Ventajas

Es un proceso con alta productividad porque combina el rayo láser y el arco eléctrico en el charco de soldadura. Puede ofrecer las siguientes ventajas (6) (8) (9):

- Penetración profunda.
- Elevada velocidad de proceso.
- Se puede llevar a cabo en todas las posiciones de soldadura existentes, siempre y cuando tenga los parámetros apropiados.
- Provee menor calor de entrada y menos distorsión que la soldadura por arco convencional.
- La zona afectada térmicamente es más pequeña en comparación con procesos de arco convencionales.
- Se pueden reducir el número de pasadas debido a que el material de aporte penetra más profundamente.
- El material de aporte del proceso GMAW facilita la deposición de elementos aleantes y el relleno de la junta, lo cual no es posible con la soldadura láser autógena (sin material de aporte).

Limitantes

Así como se presentan ventajas, se pueden presentar ciertas limitantes a la hora de aplicar el proceso HLAW, se puede mencionan algunas a continuación (6) (8) (9):

- Se requiere una alineación precisa y una estricta colocación de los elementos a unir para poder obtener una soldadura consistente y de calidad con dicho proceso.
- Solo se utiliza en aplicaciones automatizadas o mecanizadas.
- Es difícil soldar materiales con un gap mayor a 1 mm en soldadura a tope para placas gruesas, debido al diámetro del sitio focal pequeño de la soldadura láser.
- A pesar de que se ha estudiado la hibridación láser - arco, el proceso HLAW ha tenido una implementación limitada en la producción manufacturera hasta ahora.
- Se requieren medidas de seguridad adicionales a las utilizadas en la soldadura por arco convencional, para proteger al personal operario de los riesgos que implica trabajar con un rayo láser.

2.2.2. Propiedades de las juntas producidas mediante HLAW

Los aceros comunes, que no presentan problemas para ser soldados mediante los procesos convencionales GMAW o LBW, tampoco presentan inconvenientes para ser soldados mediante HLAW.

Tanto la zona afectada térmicamente (ZAT) como la zona de fusión (ZF) tienden a ser más anchas que las obtenidas mediante proceso láser y más estrechas que las obtenidas por proceso de arco eléctrico. Lo que provoca diferencias en las propiedades mecánicas y la corrosión de la soldadura (9). La Figura 2.5 muestra una comparación de la geometría del cordón de soldadura entre los tres procesos, el híbrido láser - arco, el de soldadura láser y el de soldadura GMAW utilizando gas inerte, MIG (por sus siglas en inglés: Metal Inert Gas) (10).

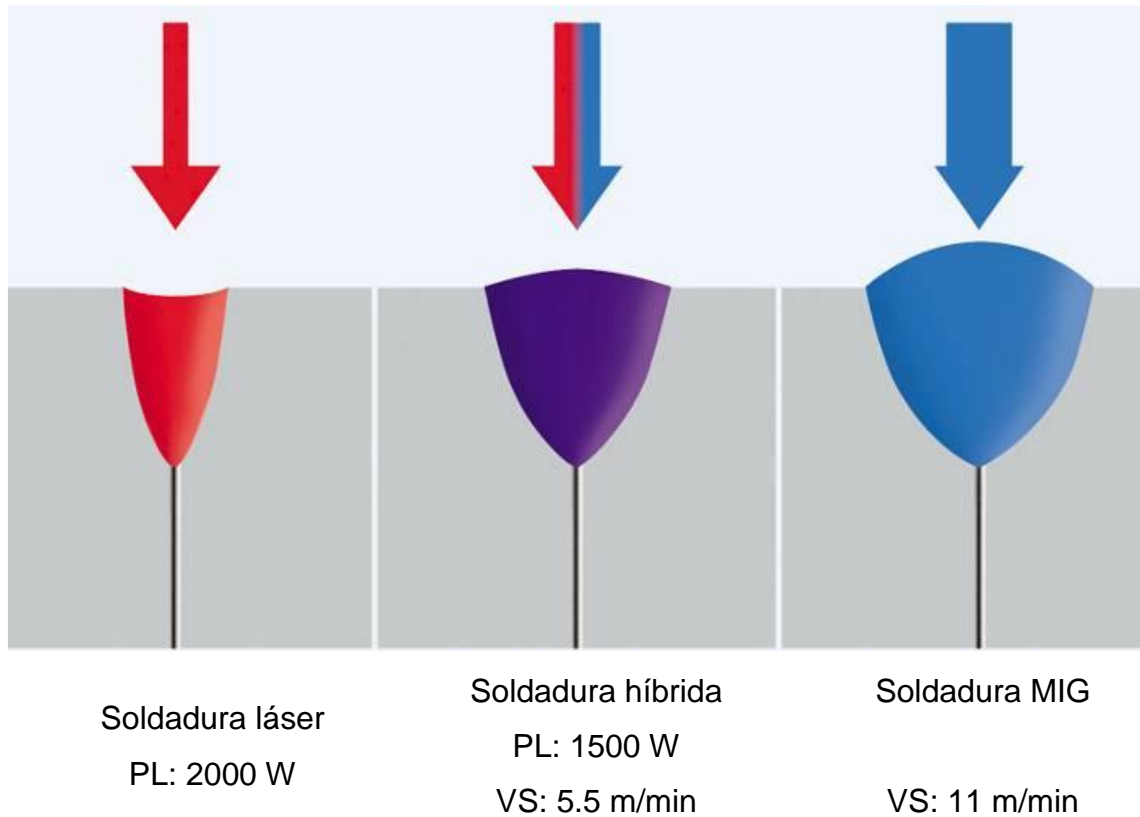


Figura 2.5 Comparación de geometría del cordón en sección transversal; PL – Potencia Láser, VS – Velocidad de Soldadura (10).

En 2015 Wei y colaboradores (11) analizan la zona de fusión de una soldadura HLAW y verifican cómo cambia el tamaño de las zonas respecto de procesos convencionales, la Figura 2.6 muestra como el proceso HLAW (B) con mayor velocidad de soldadura genera zonas más delgadas en comparación al proceso GMAW (A) que utiliza menor velocidad de soldadura (11).

Microestructura obtenida en las soldaduras del proceso HLAW

La microestructura de la zona de fusión en este proceso de soldadura se rige al igual que en cualquier proceso de soldadura, por la velocidad de enfriamiento y la composición, así como los ciclos térmicos a los que se somete(n) la(s)

pieza(s). La zona afectada térmicamente tiene como microestructura una mezcla alterada de constituyentes del metal de aporte y el metal base, a su vez el metal base consta de su misma microestructura.

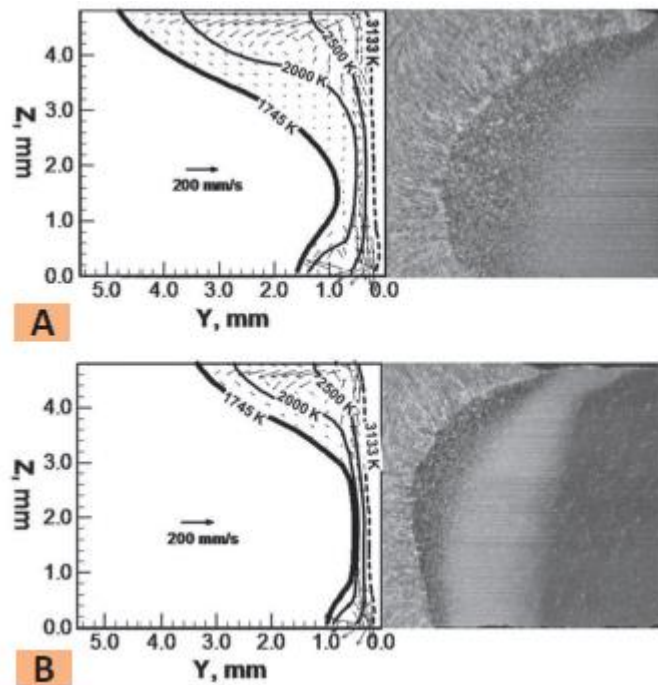


Figura 2.6 Comparación de la sección transversal de soldadura: A - GMAW, B – HLAW (11).

La microestructura obtenida depende desde luego de los constituyentes del acero en cuestión, en 2013 Shu Zhen y colaboradores (12) experimentan con un acero HSLA: S355J2W+N que es un acero aleado con pequeñas cantidades de P, Cu, Cr y Ni, lo cual crea una capa fina en la superficie, lo que le permite proteger la matriz interior de factores externos como la suciedad y la oxidación.

Se indica que una característica típica de la soldadura generada por el proceso HLAW es que solidifica de manera epitaxial.

En la Figura 2.7 se muestra la zona de fusión que se encuentra compuesta principalmente de ferrita columnar, ferrita acicular y pequeñas cantidades de

perlita; también se observa que los granos de la zona de fusión son más finos que los de la zona del arco.

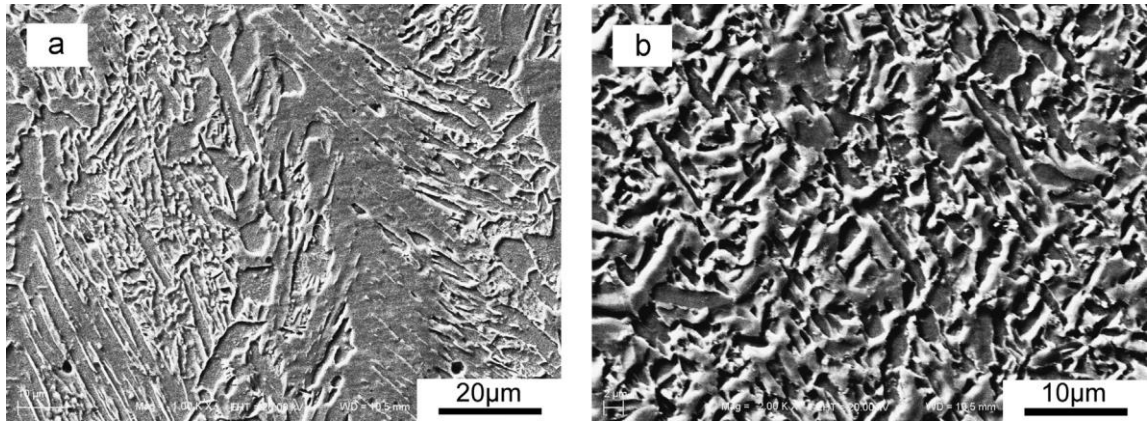


Figura 2.7 Zona de fusión: a) Zona del arco; b) Zona del láser (12)

La Figura 2.8 muestra las micrografías de la zona afectada térmicamente (ZAT), en la zona sobrecalentada se muestra una pequeña cantidad de perlita, acompañada de Ferrita Widmanstatten, en la zona de recristalización hay principalmente ferrita fina y una pequeña cantidad de perlita. La zona de recristalización parcial también muestra ferrita pero alternada entre gruesa y fina, con algo de perlita.

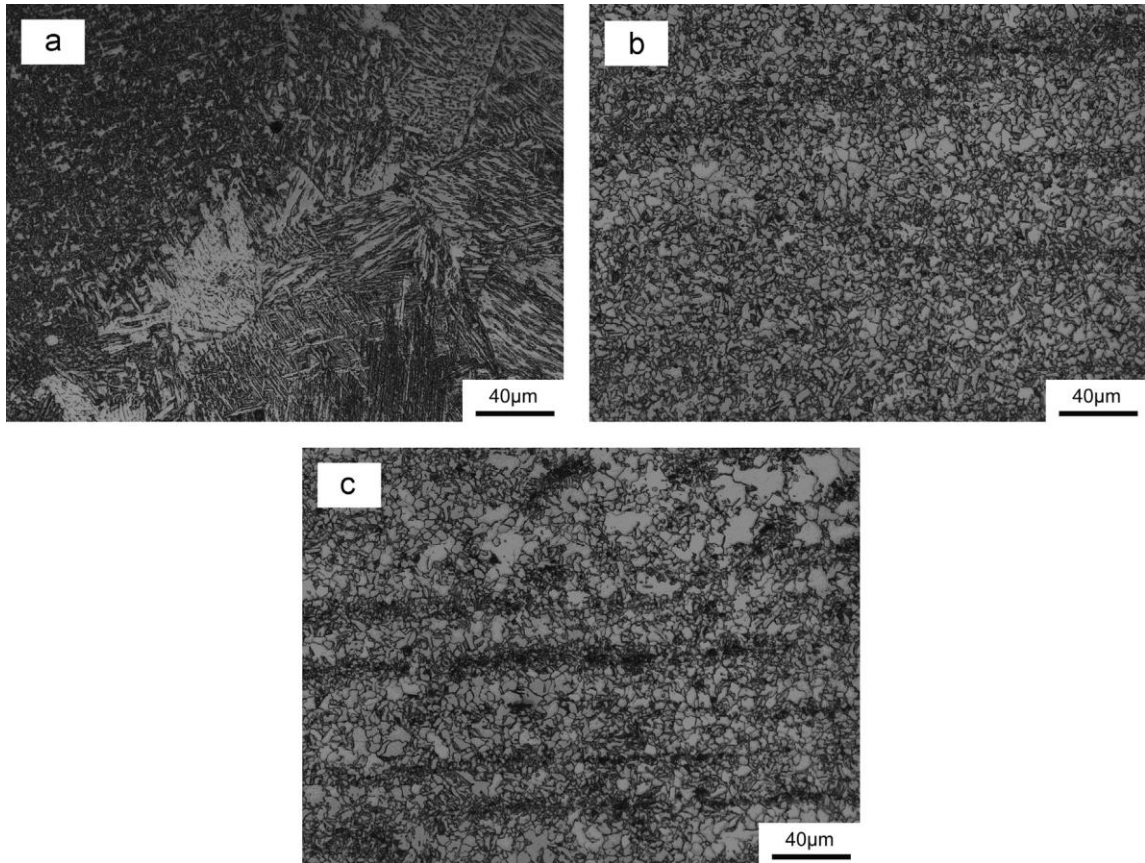


Figura 2.8 Microestructura de la ZAT: a) zona sobrecalentada; b) zona de recrystalización; c) zona de recrystalización parcial (12).

Soldadura híbrida en aceros estructurales

En la Figura 2.9 se muestra la sección transversal de una soldadura híbrida aplicada en un acero estructural de 12 mm de espesor, junto con una sección transversal de una soldadura láser.

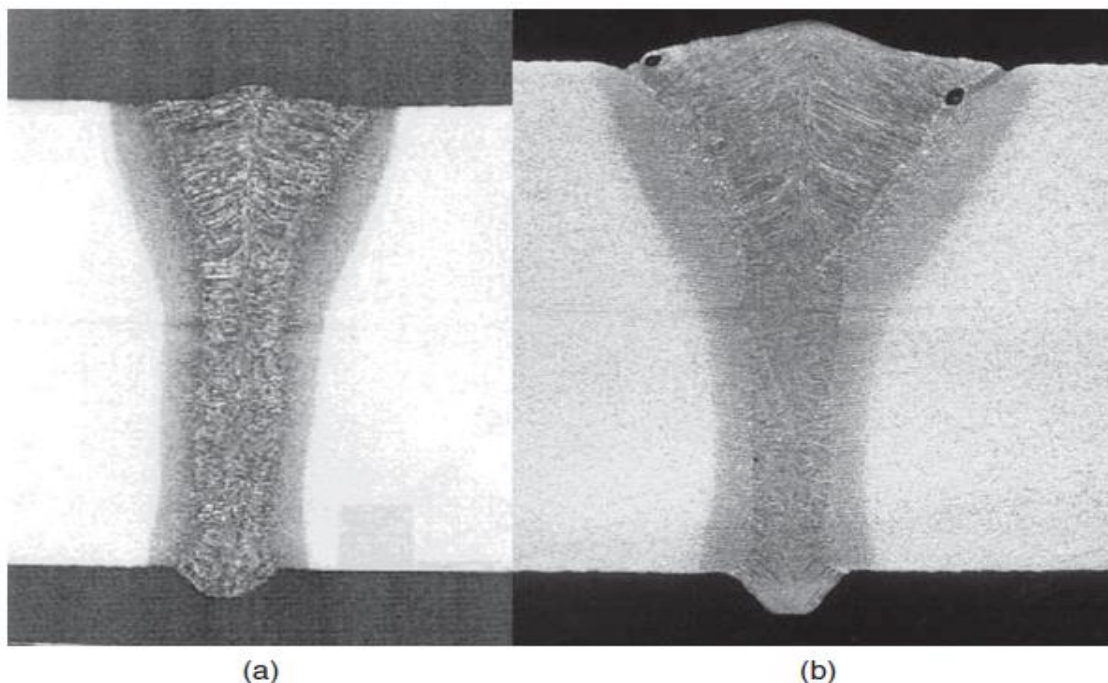


Figura 2.9 Sección transversal de acero estructural de 12 mm: a) soldadura láser (PL: 9kW, VS: 0.8 m/min, Gap: 0); y b) soldadura híbrida (PL: 11 kW, PA: 7.0 kW, VS: 1.4 m/min, VA: 15.8 m/min, Gap: 0.5 mm) (9)

PL: Potencia del láser

VS: Velocidad de soldadura

VA: Velocidad de alimentación del alambre

2.2.3. Parámetros del proceso y su influencia en las propiedades de la unión

En 2011 Brian M. (8) publica en conjunto con ASM texto donde expresa varias características del proceso HLAW. Los principales parámetros del proceso, al ser modificados, dan como resultado cambios en las propiedades de la unión, dichos cambios se analizan cuantitativa y cualitativamente mediante varias técnicas para al final ofrecer un panorama general de lo que pasa con la unión al modificar un parámetro, dicho panorama general se expresa en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Efectos de las variables del proceso HLAW en las propiedades de la unión (7).

Variable de soldadura	Cambio deseado en las propiedades de la soldadura							
	Penetración		Deposición		Ancho del cordón superior		Ancho del cordón de raíz	
	I	R	I	R	I	R	I	R
Velocidad de avance	R	I	R	I	R	I	R	I
Poder del láser	I	R	SE	SE	EM	EM	EM	EM
Tamaño del haz láser	R	I	SE	SE	EM	EM	I	R
Velocidad de alimentación y corriente	EM	EM	I	R	EM	EM	SE	SE
Voltaje	SE	SE	SE	SE	I	R	SE	SE
Diámetro del alambre	EM	EM	R	I	EM	EM	SE	SE
Orientación del proceso	EM	EM	SE	SE	LF	AF	EM	EM
Separación de procesos	EM	EM	SE	SE	EM	EM	R	I

(I = Incremento, R= Reducción, EM = Efecto Mínimo, SE = Sin Efecto, LF = Láser al Frente y AF = Antorcha al Frente).

En febrero de 2011 X. Cao y colaboradores (13) publicaron un artículo al respecto de soldadura híbrida láser – arco, donde experimentan para lograr una penetración total en una placa de acero HSLA de 9.3mm de espesor. Los parámetros que controlaron básicamente fueron los de apertura de raíz (gap) y la velocidad de soldadura, poniendo un gap de 0mm y velocidades de soldadura

en un rango desde 1.0 m/min hasta 2.4 m/min y obteniendo como resultado la falta de penetración en todas las uniones (13).

La calidad y la resistencia de una soldadura hecha mediante HLAW están determinada en gran parte por la geometría de la unión como resultado de la solidificación durante un flujo de fluido complejo (14).

2.3. Discontinuidades en HLAW

La aparición de discontinuidades a partir de la aplicación de soldadura con el proceso HLAW sobre placas de acero puede distribuirse en diversas zonas dependiendo de su tipo y por ende de su naturaleza de aparición (15).

La revisión bibliográfica indica que; las discontinuidades que comúnmente aparecen al momento de aplicar soldadura con el proceso HLAW sobre acero son las siguientes:

- Porosidad.
- Socavados.
- Concavidades.
- Inestabilidad del cordón de raíz.
- Fusión incompleta.
- Penetración incompleta.

2.4. Control y evaluación de la calidad en soldaduras HLAW

La soldadura híbrida láser - arco aplicada en aceros estructurales ha sido sujeto de intensa investigación y desarrollo en las últimas dos décadas.

El hecho de ser un proceso automatizado conduce a un estricto control en cuanto a la repetitividad en los diversos elementos que conforman el sistema de soldadura.

Éste estricto control debe tenerse antes, durante y después de la aplicación de la soldadura para asegurar que el objetivo de la aplicación del proceso será cumplido, configurando de manera adecuada las partes que contribuyen al

aseguramiento de la calidad final, las partes son: sistemas de control, parámetros de soldadura y el sistema de sujeción para evitar las variaciones de la junta (8).

Los retos que han traído consigo el intento de implementar este proceso, se pueden mencionar a continuación (9):

- Equipo
- Parámetros de proceso
- Calidad
- Monitoreo
- Ensayos no destructivos
- Temas relacionados con el material

2.4.1. Imperfecciones y defectos de soldadura

Las imperfecciones físicas y defectos se relacionan con causas simples como desalineamiento o una preparación inadecuada de la junta. Algunas, sin embargo, son ocasionadas por una interacción compleja entre varios parámetros como la composición del acero, la geometría de la junta y las variables propias del proceso de soldadura. Además se pueden producir defectos físicos durante el soldeo, las estructuras pueden presentar grietas o fallas producidas por el uso o aplicación del material soldado, por ejemplo el agrietamiento debido al medio donde el componente desempeña su función, la corrosión o la fatiga (9).

La aparición de discontinuidades a partir de la aplicación de soldadura con el proceso HLAW sobre placas de acero puede distribuirse en diversas zonas dependiendo de su tipo y por ende de su naturaleza de aparición.

La revisión bibliográfica realizada, indica que; las discontinuidades que comúnmente aparecen al aplicar soldadura HLAW sobre acero son las siguientes (8):

- Porosidad.
- Socavados.
- Concavidades.
- Inestabilidad del cordón de raíz.

- Fusión incompleta.
- Penetración incompleta.

2.4.2. Clasificación de la calidad de la soldadura

Las imperfecciones en la calidad de la soldadura describen posibles desviaciones de la soldadura perfecta y se pueden agrupar a grosso modo como se muestra a continuación:

Defectos superficiales

- Falta de aporte o aporte excesivo,
- desalineamiento vertical,
- desalineamiento angular,
- socavado

Defectos e imperfecciones internas

- Falta de unión,
- falta de penetración,
- agrietamiento o defectos por solidificación, y
- porosidad

Geometría de la sección transversal

- Ancho de la ZF,
- ancho de la ZAT,
- abultamiento

2.4.3. Evaluación de las propiedades de la soldadura

Existen métodos destructivos y métodos no destructivos para llevar a cabo la evaluación de las propiedades de la soldadura, la inspección visual de la soldadura es una de las técnicas de evaluación más utilizada, combinada con el seccionamiento de la unión, se puede obtener mucha información.

Ensayos Destructivos (ED)

Para verificar que el material no llegue a fallar en servicio, se utilizan las pruebas mecánicas y con ello poder asegurar que la unión presenta los requerimientos necesarios en cuanto a propiedades mecánicas (por ejemplo la ductilidad o la tenacidad).

Es necesario evaluar el material unido con soldadura, mediante ensayos destructivos:

- Dureza
- Resistencia y ductilidad
- Tenacidad al impacto

En la sección transversal de la soldadura se puede medir la dureza en varias posiciones o puntos. El ensayo Vickers para la medición de la dureza es el método más apropiado para soldadura láser.

El ensayo de tensión se utiliza para determinar la resistencia y la ductilidad de la pieza.

La prueba estandarizada Charpy con muesca en V se usa para para evaluar la tenacidad al impacto.

Ensayos No Destructivos (END)

Existe una variedad amplia de ensayos no destructivos de los cuales se pueden destacar los de la siguiente sección: 2.4.4 Inspección de la soldadura.

En 2011 G. Turichina y colaboradores (16) realizaron un estudio sobre la simulación y la tecnología del proceso de soldadura híbrida láser- arco para placas de espesores grande. Experimentaron en placas de diferentes aceros con diferentes espesores (8, 10, 12 y 24 mm), la calidad de todos los cordones de soldadura se estimó; primero visualmente al observar su apariencia, metalográficamente mediante las secciones transversales, volumétricamente con el apoyo de la técnica de inspección RT (inspección por radiografía), y mecánicamente con pruebas mecánicas estandarizadas.

La falta de penetración y otros aspectos geométricos fueron determinados de la inspección realizada, así como la presencia de los defectos (porosidad, agrietamiento en caliente, e inestabilidad en el cordón de raíz) y las propiedades del material sobre el cordón de soldadura y la zona afectada térmicamente (16) (17).

En 2013 J. Lamas y colaboradores (14) determinaron que la calidad de una unión HLAW está en función de la variación en su geometría y ésta a su vez depende de dos parámetros esenciales: el gap y el desalineamiento vertical de las placas (14).

2.4.4. Inspección de la soldadura

Para llevar a cabo la inspección visual primero se debe entender los diversos tipos de inspecciones y sus criterios de aceptación, los tipos de inspecciones más comunes son los ensayos no destructivos algunos de los cuales se muestran a continuación:

- Inspección visual
- Líquidos penetrantes
- Partículas magnéticas
- Ultrasonido
 - Arreglo de fases
- Radiografía

En 2014 D. Lévesque y colaboradores (18), publicaron una investigación sobre la aplicación de una alternativa de ensayos no destructivos aplicados a uniones realizadas con el proceso HLAW sobre placas de acero HSLA-65 de 9.3mm de espesor, una investigación subsecuente a la realizada por X. Cao en 2011.

Lévesque utiliza la inspección por ultrasonido-láser combinada con la técnica sintética de apertura focal (SAFT, por sus siglas en inglés). Y determina que la inspección puede detectar y visualizar completamente la presencia de defectos como; porosidad, falta de fusión y grietas internas (18). Lo cual confirma con la técnica de inspección por radiografía (RT) y mediante metalografía.

Criterios de aceptación

Los criterios de aceptación son el estándar que la persona que realiza la inspección evalúa en una soldadura.

Cuando se conocen y están claramente definidos los criterios de aceptación, se facilita la supervisión de la soldadura, evaluando así la necesidad de llevar a cabo una vez más la unión o aprobarla de acuerdo a la normativa establecida.

Para un trabajo en particular, se debe definir un procedimiento de soldadura, el cual sirve como evaluador de calidad para definir el método de inspección y los criterios de aceptación.

Además de tener acceso a los criterios de aceptación visuales y saber cómo usarlos, el supervisor también debe tener conocimiento de los métodos comunes de inspección no destructivos que se utilizan para evaluar las soldaduras realizadas (19).

2.5. Ensayos no destructivos

2.5.1. Líquidos penetrantes

Es recomendable que los técnicos consideren ciertos factores de importancia y discutirlos en conjunto con el proveedor de materiales y equipos de inspección por líquidos penetrantes antes de tomar la decisión de cual sistema se va a instalar y/o utilizar (20). Algunos factores de relevancia son mencionados a continuación:

1. Composición de la pieza a inspeccionar, por ejemplo: si son de aluminio, magnesio, acero inoxidable austenítico, aleaciones de cobre, bronce, latón, aleaciones de níquel, titanio, hierro, acero, plástico, cerámico, etc.
2. Número de piezas a inspeccionar o zonas de prueba por unidad de tiempo, o lote.
3. Tamaño y peso del objeto a manipular e inspeccionar.
4. Lugar donde se necesitan las pruebas, es decir: recepción de materias primas, durante el proceso de producción, inspección final, durante el montaje, en el campo, en operaciones de mantenimiento y/o en servicio.
5. Tipos de discontinuidades que se espera detectar, por ejemplo: grietas, porosidades, costuras, traslapes, etc.
6. Tamaño de las discontinuidades que se pueden detectar: pequeñas, grandes, profundas, poco profundas, anchas, agrupadas, dispersas, etc.
7. Condiciones de la superficie de la pieza a inspeccionar, por ejemplo: como fue fundida, como fue forjada, maquinada, doblada, laminada, pulida, pintada, corroída, erosionada, engrasada, recubierta, rayada, desescamada, etc.
8. Su uso intencionado o destino final de la pieza, por ejemplo: uso médico, energía nuclear, sistemas de oxígeno, soldadura,

revestimiento o acabados, alta temperatura, industria aeroespacial, industria en general, transporte, lugares de difícil acceso o productos de consumo.

Debido a la naturaleza de la investigación y los factores mencionados con anterioridad se opta por elegir para la inspección y de acuerdo a su clasificación; el método C, tipo II, según la norma ASTM E165 (21). El método se nombra entonces: “líquidos penetrantes visibles, removibles con solvente” del cual se describen a continuación sus ventajas y limitaciones:

Ventajas

- Son portátiles.
- No necesitan del suministro de una fuente de iluminación especial (luz negra) para la detección de indicaciones.
- Ampliamente usado en el campo y en sitio.
- De buen contraste y visibilidad.
- No requieren del uso de agua.
- El color del penetrante en contraste con el revelador entrega indicaciones de fácil detección por el ojo humano en condiciones normales de iluminación.
- La remoción del exceso del penetrante de la superficie se realiza de forma simple y rápida.
- Su aplicación se puede realizar mediante brocha o por aspersión (aerosol).

Limitantes

- Altamente inflamables
- En superficies muy rugosas el método pierde eficiencia

- La inspección de piezas de grandes dimensiones en su totalidad lo vuelve impráctico y costoso
- Al aplicar el penetrante por aerosol en áreas localizadas se puede desperdiciar mucho penetrante y la limpieza posterior requiere de más tiempo

2.5.2. Arreglo de Fases

El arreglo de fases surge como una alternativa para la inspección volumétrica en diversos componentes producidos, se le han encontrado muchas aplicaciones en el área metal-mecánica, principalmente en el área de detección de defectos en soldadura.

La utilización de ésta tecnología cumple con el requerimiento de inspección del 100% del volumen soldado teniendo acceso a ellas únicamente por la parte superficial externa del componente a inspeccionar, se puede usar en cualquier espesor, únicamente hay que seleccionar de manera adecuada los elementos que se usarán como accesorios al momento de llevar a cabo la inspección (22).

Dentro de la normatividad aplicable a éste método se encuentra: la práctica estándar: ASTM E2700 – 14, la cual describe las técnicas ultrasónicas para la inspección de soldaduras usando métodos ultrasónicos con arreglo de fases (23).

2.5.2.1. Ventajas y limitantes del método

Ventajas principales

- Escaneo más rápido mediante la configuración de múltiples ángulos de inspección en el display al mismo tiempo.
- Mejor visualización mediante la tecnología “true depth” en un escaneo sectorial (S-scan).

- Registro y almacenamiento de datos, por ejemplo, palpadores usados, transductores, generación de reportes con una amplia gama de datos para posteriores auditorías o archivo de inspección.
- Realización de configuraciones más rápidas y reproducibles mediante software especializado o el mismo equipo de inspección.

Limitantes principales

- Una configuración de la junta que sea diferente a la de tope o “T” puede causar serias dificultades para la aplicación del método.
- El costo del equipo y accesorios es mucho mayor respecto del método ultrasónico convencional.
- Se requiere una capacitación más extensa y dependiendo el caso una experiencia mayor del operador del equipo.

2.5.2.2. Bases de aplicación

Para la aplicación del método se requiere cubrir con los siguientes factores para llegar a una inspección completa de acuerdo a lo esperado por las partes contractuales interesadas en la inspección.

- Calificación del personal.
- Procedimientos y técnicas.
- Preparación superficial.
- Tiempo de inspección.
- Extensión de la inspección (porcentaje principalmente, se determina de acuerdo a los ensayos necesarios por volumen de soldadura aplicado).
- Reporte de inspección con criterios de aceptación usados.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

La metodología es propuesta para llevar a cabo de una manera ordenada y secuencial la investigación a manera que se abarquen pasos que permitan obtener de manera adecuada la consecución de los objetivos y la validación de la hipótesis planteada, a continuación se detalla paso a paso dicha metodología:

Primer paso.

Obtención de información y análisis del estado del arte acerca del proceso de soldadura HLAW, y su aplicación en los aceros al carbono con espesores gruesos, por encima de los 12 mm, además de los ensayos no destructivos que aplican y particularizar en caso donde se utiliza el ultrasonido en su modalidad de arreglo de fases.

Segundo paso.

Obtener información referente a los criterios de aceptación dependientes de la indicación generada y el método de ensayo no destructivo en el caso de la aplicación del proceso HLAW sobre los aceros al carbón.

Tercer paso.

Obtención de placas de acero para la experimentación preliminar y definitiva. Además se estipula obtener probetas del mismo material utilizado en la industria unido mediante proceso de soldadura GMAW. Una vez teniendo el material se llevará a cabo la evaluación mediante los procedimientos adecuados y se determinará un diseño de experimentos para llevar a cabo la experimentación definitiva con el proceso HLAW.

Cuarto paso.

Se unen las placas mediante el proceso soldadura HLAW. Las placas se preparan mecánicamente mediante un bisel.

Quinto paso.

A las placas unidas se les aplica una evaluación de calidad utilizando los ensayos destructivos y no destructivos seleccionados para tal fin. El uso del método de inspección por ultrasonido en su variante de arreglo de fases se propone como una alternativa que permite ahorro de tiempos y costos, y que con el personal calificado para la aplicación del método, se establece que es el método más eficaz para la evaluación de la calidad de las uniones generadas por el proceso de soldadura HLAW en placas de acero AISI 1018 con espesor de 16mm.

Sexto paso.

En el sexto paso se determina qué tipo de discontinuidades son generadas por el proceso de soldadura y se estudia la correlación de dichas discontinuidades con los parámetros de soldadura.

Séptimo paso.

El análisis de los resultados obtenidos en la experimentación preliminar y definitiva, se realiza en éste paso, se busca encontrar las correlaciones existentes entre el proceso de soldadura y los parámetros que influyen directamente en la aplicación de las discontinuidades encontradas mediante la inspección por el método de ultrasonido en su variante de arreglo de fases.

Octavo paso.

Se expresan los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo del proyecto, captando principalmente el cumplimiento de la hipótesis, esto lleva a concluir de manera concisa y clara el cumplimiento de los objetivos planteados al inicio y la viabilidad de la utilización del procedimiento de evaluación de la calidad propuesto en el quinto paso.

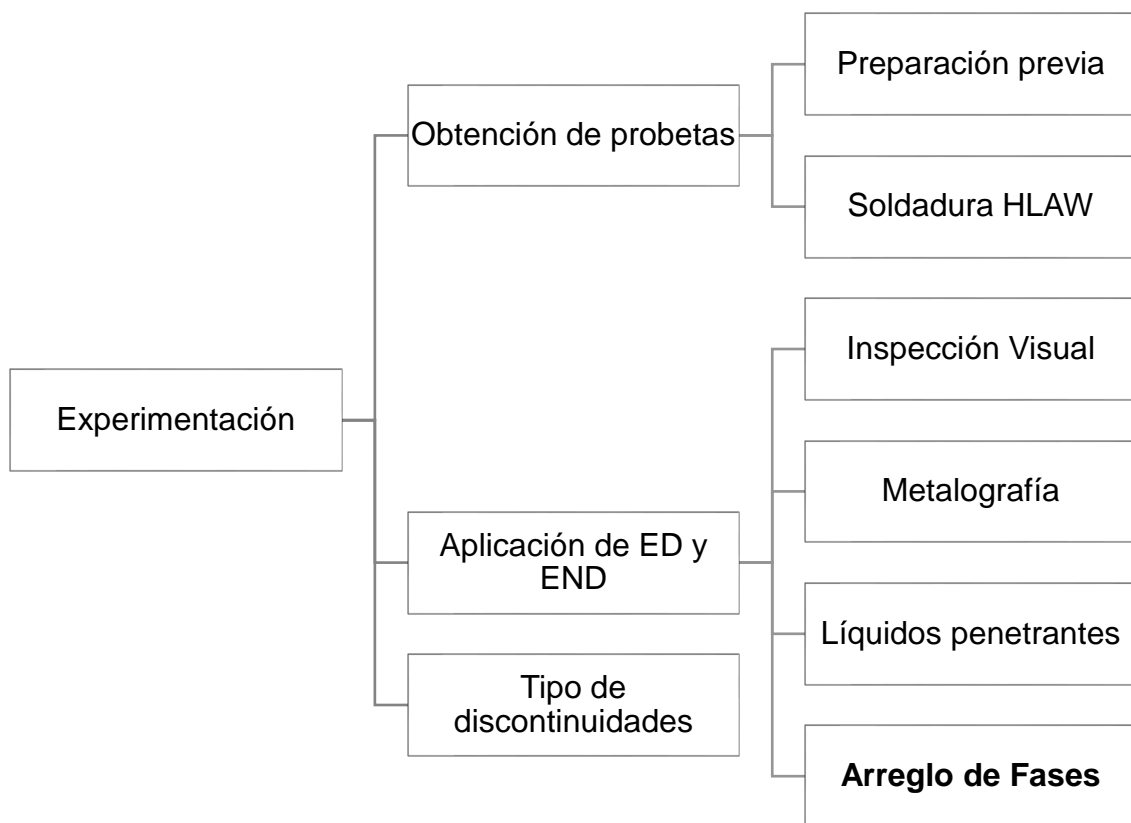


Figura 3.1 Metodología propuesta

En la Figura 3.1 se muestra un diagrama de flujo de la metodología propuesta para llevar a cabo el desarrollo de la investigación.

CAPÍTULO 4

DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1. Obtención de probetas

En la parte experimental, un punto importante para el correcto desarrollo y evolución del proyecto de investigación es la obtención de las probetas que permitirán un análisis mayormente detallado.

Se reciben 17 placas de acero AISI 1018, con medidas de 300 x 150 x 16 mm de largo, ancho y espesor respectivamente, todas unidas mediante el proceso HLAW. También fue corroborada la composición química mediante espectrometría de emisión acústica.

El equipo empleado para la aplicación de la soldadura HLAW consta de una Fuente de Poder Láser Marca TRUMPF Modelo TruDisk 10003 de 10 kW de potencia. Con un Robot de 6 grados de libertad Marca KUKA Modelo KR-60-3 con el cual fue lograda la movilidad necesaria durante la soldadura. Y una Fuente de poder GMAW Marca CLOOS Modelo GLC 403 QUINTO. El aporte usado fue un ER70S-6 con diámetro de 1.14 mm. El gap de las primeras nueve placas es de 0 mm mientras que para las siguientes ocho placas es de 0.5mm.

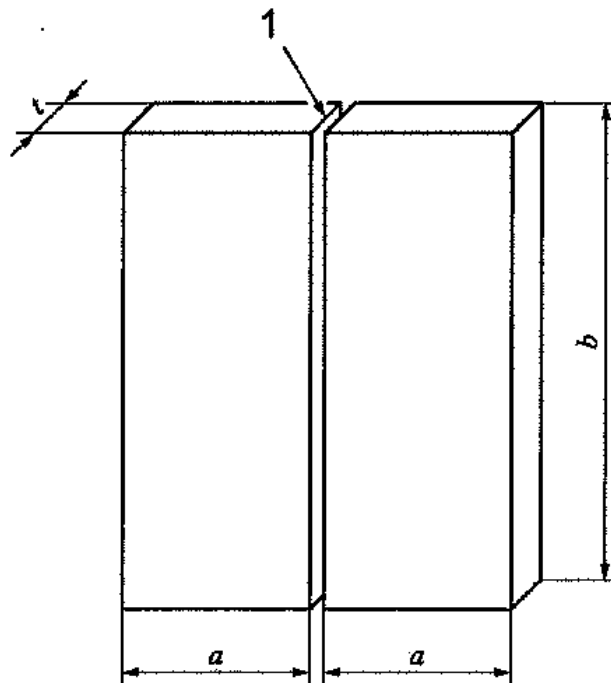


Figura 4.1 Configuración de la junta; 1 - Gap, a - ancho (10 mm), b - largo (30 mm), t - espesor (16 mm). (20)

Una descripción gráfica de la configuración de la junta se observa en la Figura 4.1. Los parámetros utilizados para la soldadura HLAW se describen en la Tabla 4.1. Las 17 placas fueron identificadas y almacenadas como se muestra en la Figura 4.2 y la Figura 4.3 para su posterior procesamiento.



Figura 4.2 Placas unidas mediante HLAW parte 1 de 2



Figura 4.3 Placas unidas mediante HLAW parte 2 de 2

Tabla 4.1 Parámetros usados en la aplicación de soldadura HLAW.

#	Velocidad de Soldadura (mm/s)	Velocidad de Alimentación (m/min)	Voltaje (V)	Potencia de Láser (KW)	Gap (mm)
1	20	12	29.1	9.5	0
2	25	13	32.5	9.5	0
3	30	13	31.5	9.5	0
4	25	13	29.2	9.5	0
5	23	13	29.2	9.5	0
6	22	13	29.2	9.5	0
7	22	13	29.2	9.5	0
8	23	13	29.2	9.5	0
9	23	13	29.2	9.5	0
10	23	13	29.2	9.5	0.5
11	23	13	29.9	9.5	0.5
12	23	13	29.9	8	0.5
13	23	13	30	8.5	0.5
14	23	13	30	8.8	0.5
15	20	13	29.8	8	0.5
16	23	13	29.8	8	0.5
17	23	13	29.8	8	0.5

4.2. Aplicación de ED y END

La aplicación de métodos para determinar la calidad de la unión soldada conlleva el uso de criterios de aceptación que permiten conocer el intervalo en que los resultados obtenidos generan o no rechazo del cordón aplicado. Una vez aplicada la soldadura híbrida realizada durante ésta experimentación se estipula el uso de la norma ISO 15614-14: “Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Ensayo de procedimiento de soldeo. Parte 14: Soldeo híbrido por láser-arco de aceros, níquel y aleaciones de níquel” (24), la cual menciona las características bajo las cuales se pueden aplicar los ensayos destructivos (ED) y ensayos no destructivos (END) de acuerdo al tipo y configuración de soldadura empleadas para el presente análisis. La Tabla 4.2 muestra el escenario mediante el cual se guía la aplicación de los tipos ensayos mandatorios según la norma antes descrita.

Tabla 4.2 Examen y ensayos de los cupones (24).

Cupón de ensayo	Tipo de ensayo	Alcance del ensayo
Unión a tope con penetración completa (Figura 4.1)	Visual	100%
	Radiográfico o ultrasónico ^a	100%
	Detección de grietas superficiales ^b	100%
	Examinación macroscópica ^f	Al menos una probeta
^a El ensayo ultrasónico no se debe emplear para $t < 8$ mm ^b Líquidos penetrantes o partículas magnéticas. Líquidos penetrantes para materiales no magnéticos. ^f Se requiere una sección por soldadura a tope de chapas o placas.		

El inicio del proceso de inspección de la calidad de las uniones se lleva a cabo con el uso de los ensayos no destructivos; inspección visual, que se llevó a cabo

en conjunto con la detección de grietas superficiales, para la cual se selecciona el método de líquidos penetrantes, posteriormente para la inspección con el método ultrasónico (UT, por sus siglas en inglés) se hace un análisis de las ventajas de implementar un método ultrasónico con arreglo de fases (UT-PA, por sus siglas en inglés) que sirve para lograr la inspección volumétrica necesaria del 100% con un tiempo de inspección más corto respecto del UT. El proceso continúa con el uso del ensayo destructivo: corte de sección transversal y desbaste grueso y fino para determinar macroscopía y microscopía de las uniones.

4.2.1. Inspección visual

La inspección visual se lleva a cabo en el 100% de las soldaduras por ambas caras (superior e inferior) de las placas unidas, se puede llevar una vez terminado el proceso de limpieza de la técnica siguiente (líquidos penetrantes).

4.2.2. Líquidos penetrantes

Se utilizó la técnica de END líquidos penetrantes (PT, por sus siglas en inglés), el método escogido como ya se mencionó anteriormente en el estado del arte es el de: “líquidos penetrantes visibles, removibles con solvente”. Cuya aplicación fue regida por la norma ASTM E-1220: Método de prueba estándar para la examinación por líquidos penetrantes visibles, removibles con solvente.

Cabe mencionar que el método elegido se llevó a cabo con el adecuado uso de equipo de seguridad y los materiales y consumibles necesarios para la inspección, a continuación dichos materiales se muestran en la Figura 4.4.

La zona inspeccionada fue el cordón de soldadura y la zona adyacente (una pulgada a cada lado de la parte central del cordón), para lo cual dicha zona fue preparada previamente para cumplir con un acabado liso mediante limpieza mecánica con carda y cepillo de alambre metálico. Para el posterior uso del kit marca MagnaFlux Spotcheck. La iluminación utilizada fue luz de día (1100 lx).

Los tiempos de aplicación de los líquidos fueron:

- Limpiador/removedor (SKC-S); tiempo necesario hasta evaporación total del líquido.
- Penetrante (SKL-SP2); 10 minutos.
- Revelador (SKD-S2); 5 minutos.

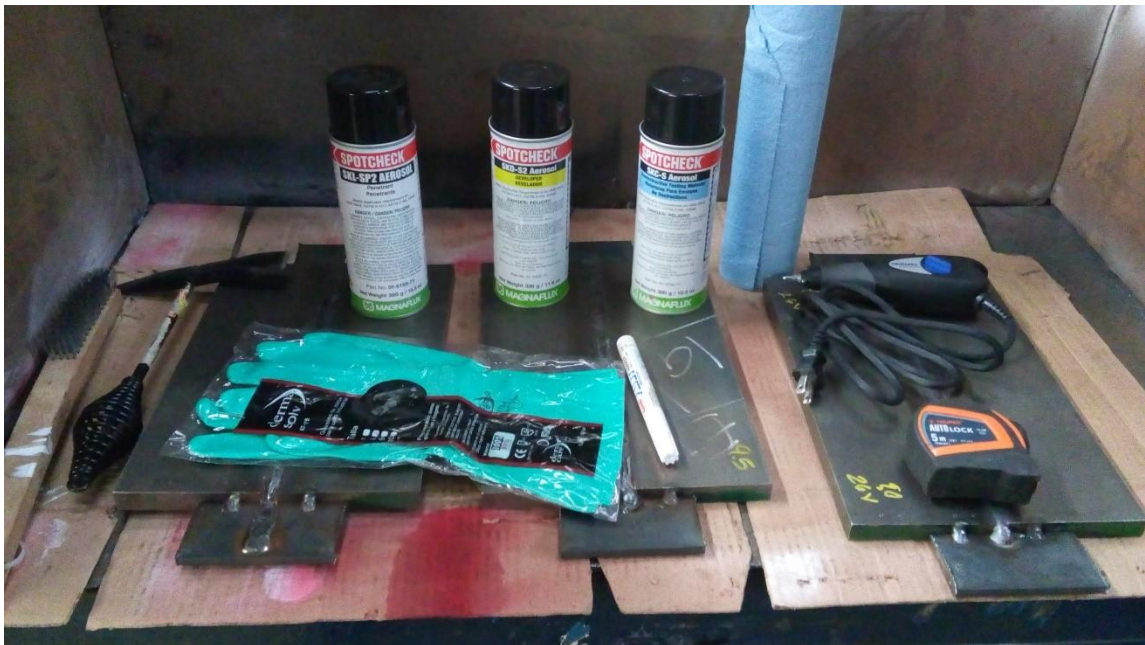


Figura 4.4 Materiales utilizados en la inspección por PT.

4.2.3. Arreglo de Fases

Como se mencionó con anterioridad la aplicación del método UT-PA es aplicado a las 17 placas unidas mediante HLAW, sin embargo antes de aplicarse, se hace un estudio sobre las ventajas que tiene dicho método respecto del método convencional UT que se usa actualmente para la inspección del componente, llevándose a cabo una experimentación previa que arroja como resultado la metodología que usa el método UT-PA la cual resulta ser más eficaz

en cuanto a velocidad de inspección y visualización tridimensional para llevar a cabo la inspección volumétrica del cordón aplicado.

4.2.3.1. Experimentación previa

La metodología inicia con la limpieza de la superficie que sirve como zona de palpado o acoplamiento para el transductor de UT y UT-PA, para posteriormente realizar el barrido con haz angular (UT, A-Scan) como se muestra en la Figura 4.5, de acuerdo a la “Hoja de instrucciones para verificar la penetración de soldadura en medias fundas por el método de ultrasonido” con clave de documento confidencial por parte de laboratorio de materiales (SISAMEX): “HIMT-221”; y el barrido sectorial con ondas cortantes (UT-PA, A-Scan, S-Scan, RayTracing). Ambos barridos para determinar así la identificación, ubicación y medición de discontinuidades en la unión.

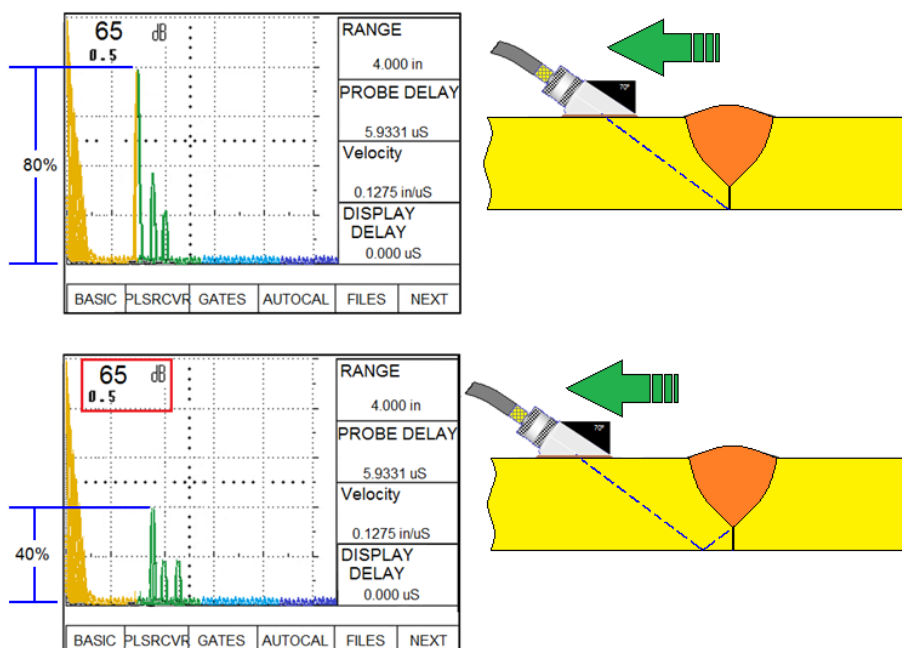


Figura 4.5 Esquema para el barrido por el método de UT con el equipo marca Krautkramer modelo USN 58L.

El equipo utilizado para llevar a cabo las inspecciones fue el OmniScan MXU con un transductor 2.25L16 AWS1 y usando ángulos de inspección de 45° a 70° en incrementos de 1° por elemento que presenta la interfaz se muestra en la Figura 4.6. La calibración fue llevada cabo con la ayuda de un bloque patrón de calibración IIW tipo II.

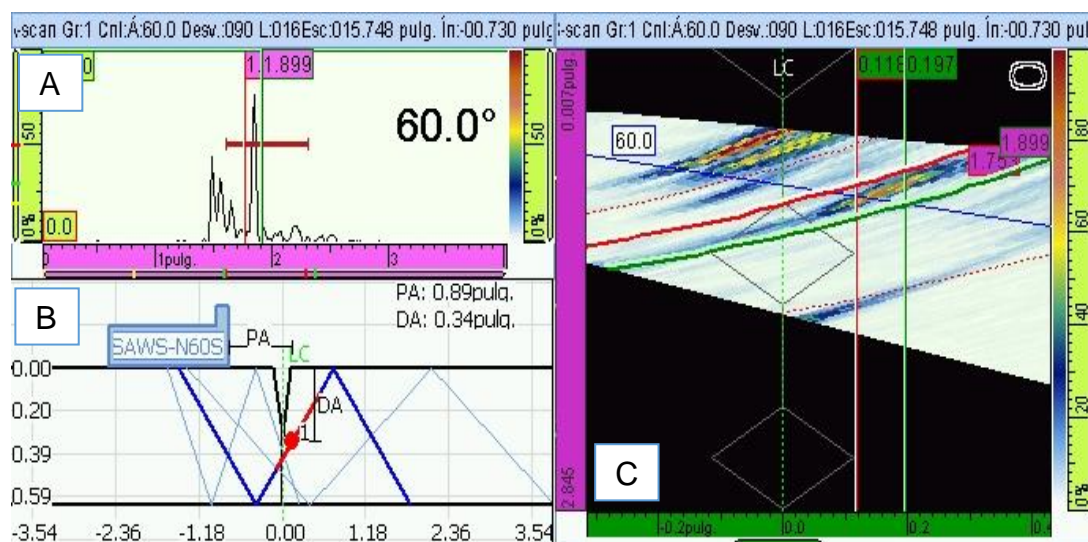


Figura 4.6 Interfaz para el usuario en la pantalla del equipo usado en la inspección. a) A-Scan, b) RayTracing, c) S-Scan

4.2.3.2. Experimentación HLAW

La inspección mediante UT-PA de las 17 placas y posteriormente 4 más para validación se realizó con apoyo de la práctica estándar: ASTM E2700 – 14, la cual describe las técnicas ultrasónicas para la inspección de soldaduras usando métodos ultrasónicos con arreglo de fases (23).

Para la aplicación del método PA-UT es necesario identificar qué factores influyen para llevar a cabo una correcta inspección para lo cual es muy importante el saber generar las leyes focales o configuración. Se toma en cuenta la configuración de la junta, la cual se muestra en la Figura 4.1.

El equipo utilizado para llevar a cabo las inspecciones fue el Prisma Sonatest con un transductor Sonatest-T1-PE-5.0M32E0.8P montado en una zapata Sonatest-T1-37-WOD-REXO, usando ángulos de inspección de 40° y 70° en inicio y fin respectivamente con incrementos de 0.5° por elemento, los elementos utilizados fueron del 16 al 31, en la parte geométrica se definió un índice W1 de 0.5 plg con una rotación en W1 de 90°. Todo lo anterior sumado al uso de ondas cortantes para generar un barrido sectorial angular, genera la configuración de leyes focales que puede visualizarse mediante la Figura 4.7 que muestra una imagen tridimensional donde se representan todos los elementos requeridos para el barrido realizado. La calibración fue llevada cabo con la ayuda de un bloque patrón de calibración de IIW tipo I. La configuración queda guardada en el equipo Prisma Sonatest y está disponible para su uso en SISAMEX para la inspección de calidad de los componentes producidos.

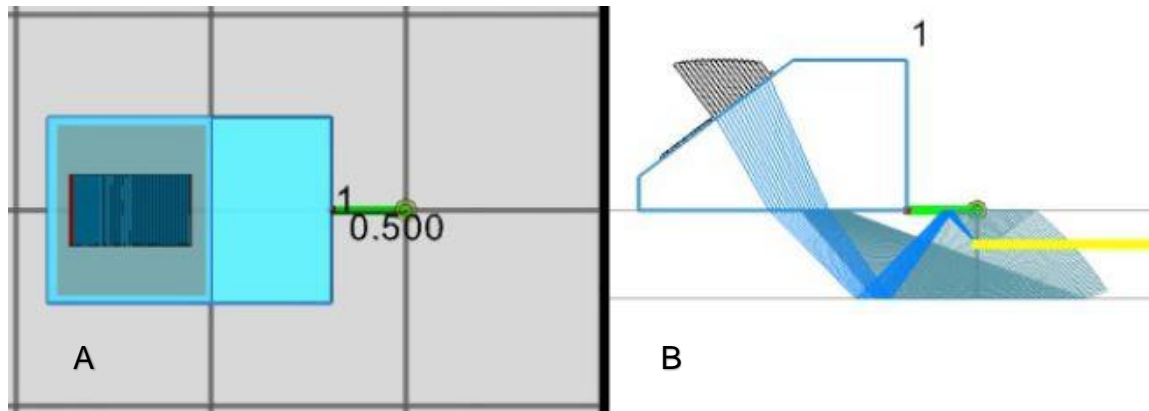


Figura 4.7 Imagen 3D para la visualización de la configuración de leyes focales generada; A – Vista de planta, B – Vista frontal.

El proceso de inspección mediante PA-UT inicia con la calibración del equipo utilizado, como se muestra en la Figura 4.8.

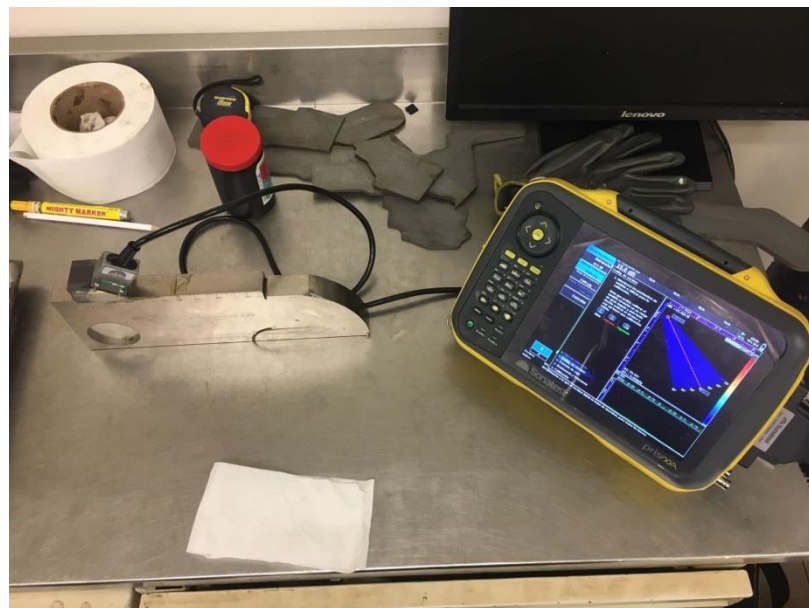


Figura 4.8 Calibración del equipo Prisma Sonatest previo a la inspección.

Una vez terminadas las tres calibraciones esenciales (Velocidad, Retardo de zapata y sensibilidad) para inspección se procede a elegir el método de visualización en pantalla del equipo, que para este caso se seleccionaron las vistas A-Scan, S-Scan y Vista 3D como se muestra en la Figura 4.9.

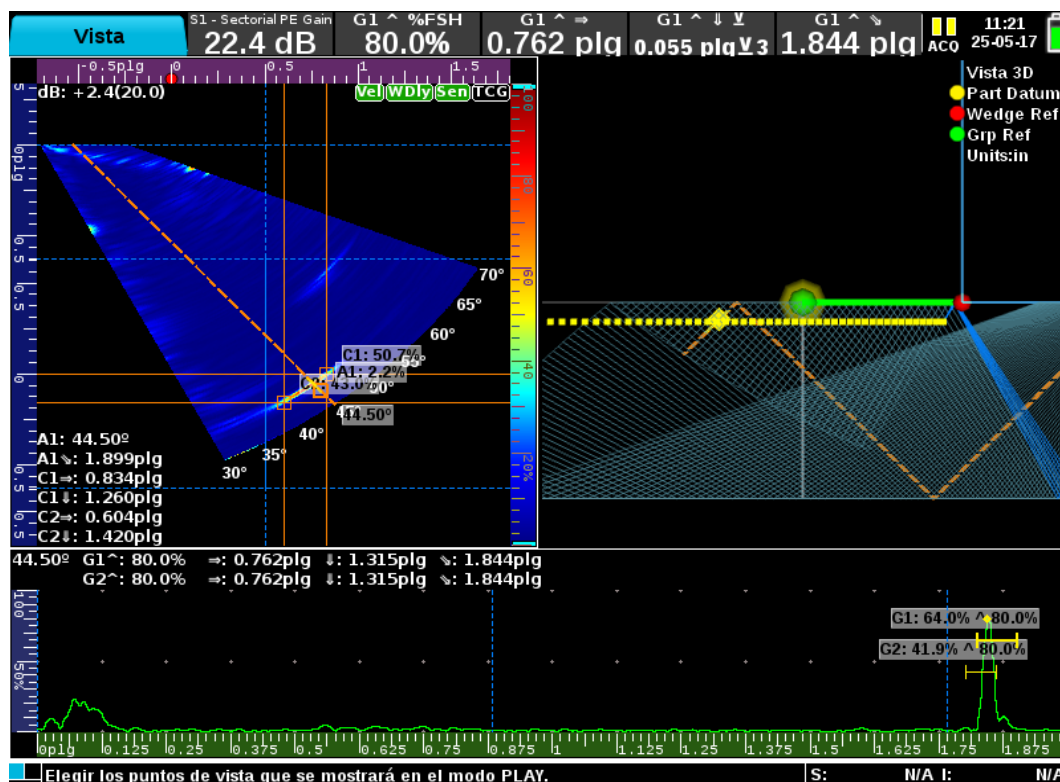


Figura 4.9 Visualización durante el barrido. S-Scan; Arriba izq. Vista 3D; Arriba der. A-Scan; abajo

Se detecta una cantidad de discontinuidades diferente para cada placa, dichas discontinuidades se analizan en cuanto a dimensionamiento de acuerdo a los límites de imperfecciones. A su vez se encuentra la penetración promedio de cada una de las placas en zonas donde no se excede la penetración.

4.2.4. Metalografía

Las probetas se prepararon metalográficamente, iniciando con un pulido grueso mediante desbaste automático (lijas de SiC con una granulometría que va desde 80 a 600) con agua como agente limpiador-enfriador durante 2 minutos; y un pulido fino que consta de paños con una agente abrasivo acuoso en el cual se encuentran suspendidas partículas de diamante de 3, 6 y 9 μm para cada uno de los cuales se emplea un tiempo de 3 minutos. Una vez que se obtiene un acabado que permita la reflexión de los rayos de luz para realizar un análisis microscópico se procede al ataque químico con reactivo Nital al 5% (Ácido nítrico 5% + alcohol etílico 95%) durante 5 segundos con el objetivo de hacer reaccionar las fases y revelar la microestructura generada por la unión.

Una vez teniendo listas las muestras se analizaron mediante estereoscopio para realizar medición de la penetración e identificar las 3 zonas: metal base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y zona de fusión (ZF). Así mismo, se obtuvieron micrografías de cada zona para determinar las fases presentes en la unión.

El equipo utilizado para llevar a cabo las mediciones de penetración fue el estereoscopio Nikon SMZ 745T, cámara Infinity 1. El software analizador de imágenes usado fue el NisElements Nikon versión 4.13.

La microscopia óptica se realizó con un microscopio óptico Carl Zeiss MTB2011 y el software para adquisición de micrografías Carl Zeiss AxioCam IC, procesadas mediante AxioVision 4.

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Al realizar el ensayo de análisis químico por espectrometría de chispa al material base, los resultados demostraron que efectivamente se trata de un acero AISI 1018. En lo que respecta al material de aporte utilizado; la composición química es la que viene dada por el proveedor.

Los resultados en cuanto a composición química del material base así como del material de aporte se muestran en la Tabla 5.1


Tabla 5.1 Composición química de materiales.



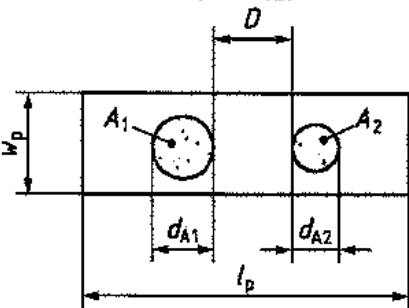
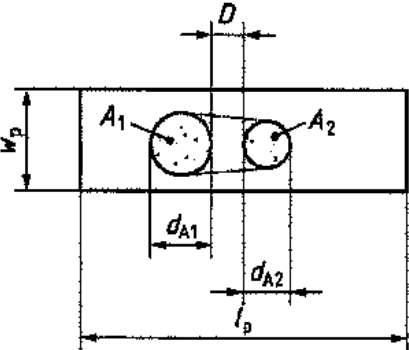
	Composición Elemental (% en peso)				
	C	S	Mn	P	Si
SISAMEX Metal Base	0.159	0.037	0.760	0.044	0.176
Certificado Proveedor Metal Base	0.16	0.02	0.74	0.017	0.18
Aporte ER70S-6	0.07	<0.03	1	<0.015	0.56

5.1. Aplicación de ED y END

Los criterios de aceptación pertinentes para el tipo de soldadura HLAW se estipulan en la norma ISO 12932 – 13: “Soldeo híbrido por láser-arco de aceros, níquel y aleaciones de níquel. Niveles de calidad para las imperfecciones” (25). Dicha norma da los límites para las imperfecciones presentes en la soldadura finalizada para espesor mayor a 0.5 mm. Se establecen 3 niveles de calidad que se designan mediante B, C y D. El nivel B es el requisito más alto sobre la soldadura finalizada. Los niveles de calidad se refieren a la calidad de producción y no de la adecuación al servicio del producto fabricado (25). Los límites para las imperfecciones se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Límites de las imperfecciones (25).

N°	Designación de la imperfección	Observaciones	t mm	Límite D.
1. Imperfecciones superficiales				
1.1	Grietas	-		No admisible
1.3	Poros superficial	Medida máxima de un poro aislado	>3	$d \leq 0.3 s$, máx. 3 mm o anchura de la soldadura, el menor valor $d \leq 0.5 a$, máx. 3 mm.
1.6	Falta de penetración en la raíz	Para soldaduras a tope por un solo lado 		Imperfecciones cortas $h \leq 0.15 t$, máx. 1 mm.

1.7	Mordedura continua o discontinua.	Se requiere una transición gradual. 		$h \leq 0.2 t$, máx. 1mm.
1.11	Exceso de penetración		>3	$h \leq 1 \text{ mm} + 1.0 b$, o 5 mm (el valor menor)
2. Imperfecciones internas				
2.1	Grietas	Todos los tipos de grietas		No admisible
2.3	Poro	Se deben cumplir las siguientes condiciones y límites para las imperfecciones. b) Medida máxima para un poro aislado en soldaduras a tope		$d \leq 0.5 s$, máx. 5 mm.
2.4	Porosidad agrupada	<p style="text-align: center;">Caso 1 ($D > d_{A2}$)</p>  <p style="text-align: center;">Caso 2 ($D < d_{A2}$)</p> 		$\leq 16\%$

		<p>Suma de las diferentes áreas porosas ($A_1 + A_2 + \dots$) referida el área de evaluación $l_p \times w_p$ (caso 1)</p> <p>La longitud de referencia para l_p es de 100 mm</p> <p>Si D es inferior al menor valor de d_{A1} o d_{A2}, se debe considerar un envolvente que englobe las áreas porosas ($A_1 + A_2$) como un solo área de imperfección (caso 2)</p> <p>Se deben cumplir las siguientes condiciones y límites para las imperfecciones:</p> <p>a) La medida máxima de la suma del área proyectada de la imperfección.</p>		
--	--	---	--	--

a = espesor nominal de la garganta de la soldadura en ángulo.

d = diámetro de poro.

s = profundidad en la sección transversal de la soldadura o espesor nominal de la soldadura a tope.

A = área rodeada de poros.

d_A = diámetro de poro dentro del área rodeada de poros.

h = altura o ancho de la imperfección.

l = longitud de la imperfección en la dirección longitudinal de la soldadura.

l_p = longitud del área proyectada o del área de la superficie de rotura.

w_p = anchura de la soldadura o anchura o altura en el caso del área de fractura.

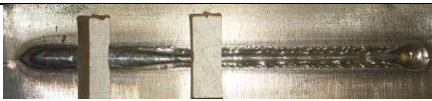
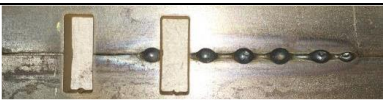




















t = espesor del material base.













5.1.1. Inspección visual

Si se realiza de manera adecuada permite descartar el uso de las demás técnicas al rechazar de manera inicial las soldaduras que no cumplen con los criterios de aceptación en éste primer filtro de inspección de calidad.

Los resultados obtenidos por la inspección visual se muestran a continuación en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Evidencia de inspección visual.

Cupón	Cara superior	Cara inferior
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		

12		
13		
14		
15		
16		
17		

Los cupones de ensayo con la numeración: 1, 2, 5 al 11, y 14 al 17 exceden el límite permitido en la Tabla 5.2, N° 1.11 – Exceso de penetración, determinando así que únicamente las placas: 3, 4, 12 y 13 son aprobadas para la siguiente inspección.

La inspección visual de las placas 3 y 4 genera dudas sobre la medida de algunas posibles indicaciones relevantes en la zona del cordón y adyacente a esta.

La inspección visual para las placas 12 y 13 genera resultados completamente satisfactorios, con una calidad superficial del cordón que aprueba cualquier criterio de aceptación superficial en la unión por lo que pasan a la inspección por PA-UT.

5.1.2. Líquidos penetrantes

Placa 3

El espécimen (Figura 5.1) muestra las indicaciones no relevantes 3^a-1R Y 3^a-2L que no exceden los criterios de aceptación aplicados, sin embargo, la indicación 3^a-3L es una indicación relevante, muestra una socavación (mordedura, para fines de lenguaje utilizado en la norma que incluye los criterios de aceptación) adyacente de 2 mm de profundidad en el cordón, acompañada de una convexidad en la cara del cordón, lo cual representa un defecto perjudicial en la soldadura de acuerdo a la Tabla 5.2, N° 1.7 – Mordedura discontinua. Por lo que la placa se considera INACEPTABLE.

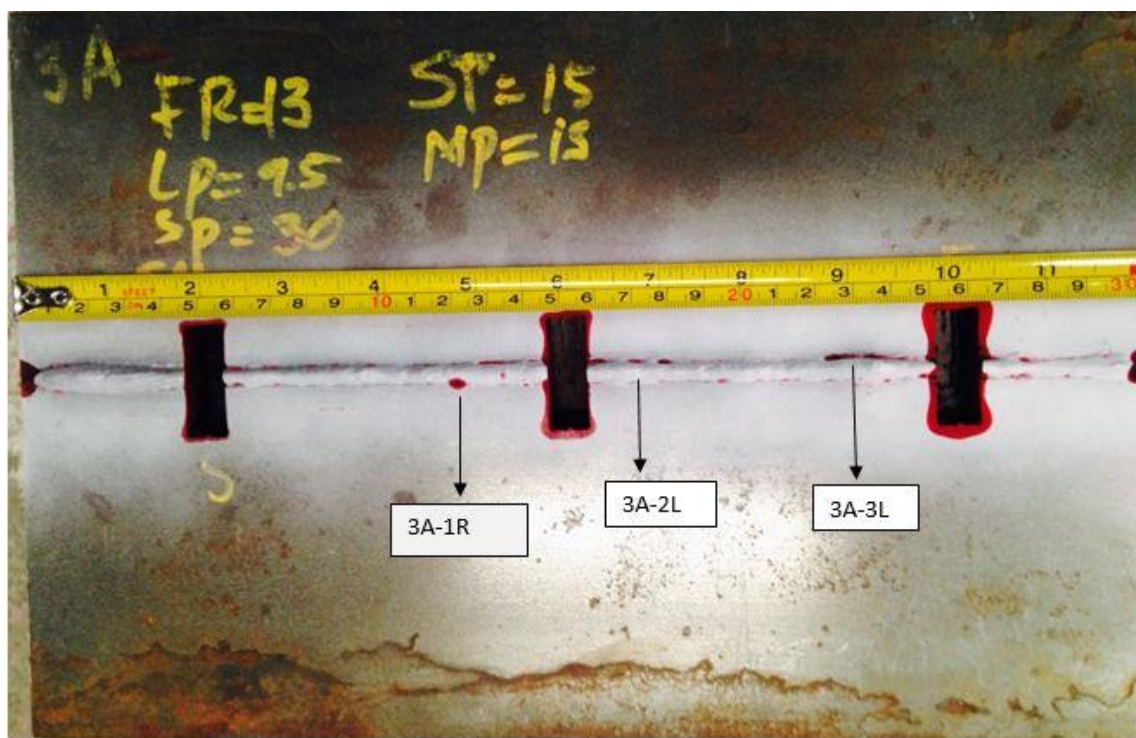


Figura 5.1 PT Placa 3

Placa 4

El espécimen (Figura 5.2) muestra sanidad en el cordón de soldadura y la zona adyacente, libre de indicaciones relevantes, por lo que se puede considerar de acuerdo a los criterios de aceptación de la Tabla 5.2, es una placa ACEPTABLE cumpliendo con los requerimientos de la norma aplicada.



Figura 5.2 PT - Placa 4

5.1.3. Arreglo de Fases

5.1.3.1. Experimentación Previa

Se realizó la evaluación de la calidad del criterio “penetración” mediante el uso de la tecnología de arreglo de fases y la aplicación de los criterios de aceptación se generó a partir de la especificación actual usada en SISAMEX.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 Parámetros de soldadura usados en experimentación previa (soldadura GMAW)

Probeta	Alimentación (m/min)	Voltaje (V)	Velocidad (m/min)	Penetración (%)
P1	9.8	31	0.47	59.9375
P2	9.5	31	0.45	64.875
P3	9	31	0.43	<u>66</u>
P4	8.5	31	0.41	65.8125
P5	9	29	0.43	64.1875
P6	8.5	29	0.41	<u>59.0625</u>

5.1.3.2. Experimentación HLAW

El tipo de medición empleado con UT-PA fue la técnica de la caída de los 6dB (o 50% energético), dicha técnica es un estándar ampliamente utilizado para la inspección y dimensionamiento de discontinuidades en soldadura (26). Mediante el software del equipo Prisma Sonatest (Figura 5.3), se realizó la medición que consiste en el posicionamiento de indicadores denominados “cursores”, la diferencia entre los valores del posicionamiento una vez aplicada la técnica de la caída de los 6dB de dimensionamiento, como lo expresan los valores C1 y C2 en X, C1 y C2 en Y de los cuales se tiene un “DELTA” para X y otro para Y, donde el valor “DELTA” de Y representa la profundidad real de la discontinuidad, dimensión que se utiliza como el diámetro cuando se hace referencia a la porosidad, una vez determinado que es el tipo de imperfección. A su vez a la hora de hacer el barrido para ir detectando las posibles discontinuidades se pudo ir midiendo la penetración, dicha medición se registró a lo largo de las placas y se promedió para obtener los valores de la

Tabla 5.5, donde podemos observar en la columna de penetración promedio muestra resultados en milímetros, dichos resultados se puede comparar con el límite de imperfección que está dado por la siguiente condición: $h \leq 0.15 t$, máx. 1 mm (donde 't' = espesor de la placa). Por lo tanto se puede deducir de dicha condición que el valor mínimo que puede tener la penetración en la raíz es de 14.875 mm, dicha condición genera un rechazo por falta de penetración de la placa 1 únicamente, la cual se resalta en la Tabla 5.5.

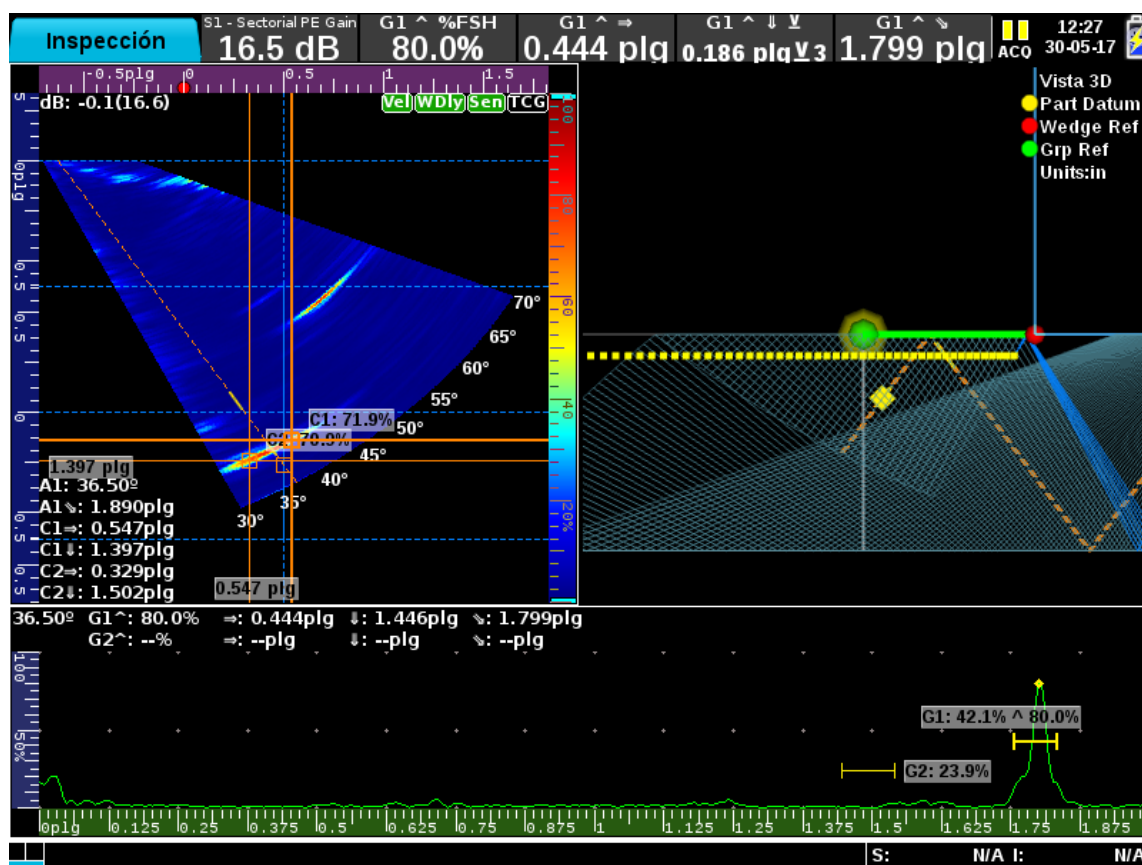


Figura 5.3 Medición de discontinuidad PO1 en placa 4

Tabla 5.5 Resultados de penetración promedio de los cordones en configuración a tope.

#	Velocidad de soldadura (mm/s)	Potencia láser (kW)	Velocidad de alimentación (m/min)	Voltaje (Volts)	GAP (mm)	Penetración promedio (mm)
1	20	9.5	12	29.1	0	<u>14.68</u>
2	25	9.5	13	32.5	0	15.07
3	30	9.5	13	31.5	0	15.02
4	25	9.5	13	29.2	0	15.38
5	23	9.5	13	29.2	0	15.88
6	22	9.5	13	29.2	0	15.88
7	22	9.5	13	29.2	0	15.34
8	23	9.5	13	29.8	0	15.49
9	23	9.5	13	29.4	0	15.88
10	23	9.5	13	29.3	0.5	15.88
11	23	9.5	13	29.4	0.5	15.88
12	23	8	13	29.9	0.5	15.51
13	23	8.5	13	30	0.5	15.45
14	23	8.8	13	30	0.5	15.66
15	20	8	13	30.1	0.5	15.77
16	23	8.5	13	30	0.5	15.75
17	23	8.6	13	29.8	0.5	15.88

El tiempo de inspección una vez llevada a cabo la configuración y calibración del equipo para UT-PA es de 2 minutos, mientras que para la inspección por UT convencional el tiempo de inspección para determinar la penetración promedio es de 5 minutos.

El mínimo de penetración permitido por la especificación de SISAMEX es superado con 5.94 mm, por el mínimo obtenido mediante la experimentación con HLAW.

Una vez obtenidos los resultados de penetración se procede a modelar el proceso HLAW. Realizando la modelación, utilizando una regresión cuadrática completa para la respuesta penetración, se obtienen los siguientes resultados mostrados en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6 Tabla de los coeficientes estimados para la respuesta Penetración (mm).

<u>Término</u>	<u>Coef</u>	<u>SE Coef</u>	<u>To</u>	<u>P-value</u>
Constante	4.443	3.894	1.14	0.2782
Velocidad de soldadura (mm/s)	-0.05353	0.03313	-1.62	0.1345
Potencia láser (kW)	0.1515	0.1376	1.10	0.2946
<u>Velocidad de alimentación (m/min)</u>	<u>1.1577</u>	<u>0.2329</u>	<u>4.97</u>	<u>0.0004</u>
Voltaje (Volts)	-0.13828	0.07211	-1.92	0.0815
GAP (mm)	0.4975	0.2915	1.71	0.1160

La Tabla 5.6 muestra las pruebas de hipótesis en las variables de entrada del proceso HLAW. Esta prueba permite relacionar la significancia entre las variables del modelo de regresión. El valor T_o de la Tabla 5.6 es la prueba t – student. Así también si el P – value < 0.05 , esto quiere decir que el coeficiente de la variable tiene significancia en el modelo, por lo tanto, tiene efecto en la respuesta (% penetración). En el caso del proceso HLAW las variables analizadas tienen un efecto principal. De la Tabla 5.6 se puede notar que la variable con efecto principal es la velocidad de alimentación con un: P -value = 0.0004, por lo tanto, indica que tiene una significancia alta en la respuesta penetración.

Por lo tanto, la ecuación del modelo de regresión completo para la respuesta penetración queda de la siguiente forma:

$$\text{Penetración (mm)} = 4.443 - 0.05353 * [\text{Velocidad de soldadura (mm/s)}] + 0.1515 * [\text{Potencia láser (kW)}] + 1.1577 * [\text{Velocidad de alimentación (m/min)}] - 0.13828 * [\text{Voltaje (Volts)}] + 0.4975 * [\text{GAP (mm)}] \quad (1)$$

Ahora bien, para realizar un mejor ajuste de este modelo se eliminaron las variables que no tienen significancia en el modelo es decir aquellas que tienen P - value ≤ 0.05 quedando las variables mostradas en la Tabla 5.7

Tabla 5.7. Tabla de los coeficientes estimados ajustados para la respuesta Penetración (mm).

<u>Término</u>	<u>Coef</u>	<u>SE Coef</u>	<u>To</u>	<u>P-value</u>
Constante	5.430	3.199	1.70	0.1134
<u>Velocidad de soldadura (mm/s)</u>	<u>-0.05595</u>	<u>0.02975</u>	<u>-1.88</u>	<u>0.0526</u>
<u>Velocidad de alimentación (m/min)</u>	<u>1.2420</u>	<u>0.2229</u>	<u>5.57</u>	<u>0.0001</u>
<u>Voltaje (Volts)</u>	<u>-0.15585</u>	<u>0.06899</u>	<u>-2.26</u>	<u>0.0417</u>

Por lo tanto, la ecuación del modelo de regresión ajustado para la respuesta penetración queda de la siguiente forma:

$$\text{Penetración (mm)} = 5.430 - 0.05595 * [\text{Velocidad de soldadura (mm/s)}] + 1.2420 * [\text{Velocidad de alimentación (m/min)}] - 0.15585 * [\text{Voltaje (Volts)}] \quad (2)$$

Al modelo ajustado también se realizó una función objetivo, es decir, con la ecuación (2) se les dio un objetivo: se igualó la ecuación a una penetración de 15.88 mm.

Esta función fue optimizada usando un algoritmo genético dando como resultado los siguientes parámetros óptimos para cada una de las variables de entrada mostradas en la Tabla 5.8

Tabla 5.8 Parámetros óptimos obtenidos para la validación de los modelos de regresión calculados usando algoritmos genéticos.

#	Velocidad de soldadura (mm/s)	Potencia láser (kW)	Velocidad de alimentación (m/min)	Voltaje (V)	GAP (mm)	Penetración (Predicción)
1	20.1	9.3	12.9	29.4	0.3	15.88
2	22.6	9	12	29.1	0.1	15.88
3	20.3	9.1	13	29.2	0.1	15.88
4	20	8.8	13	29.2	0.3	15.88

Tabla 5.9 Resultados de penetración promedio en placas de validación.

#	Velocidad de soldadura (mm/s)	Potencia láser (kW)	Velocidad de alimentación (m/min)	Voltaje (V)	GAP (mm)	Penetración (mm)
1	20.1	9.3	12.9	29.4	0.3	15.88
2	22.6	9	12	29.1	0.1	<u>15.28</u>
3	20.3	9.1	13	29.2	0.1	15.62
4	20	8.8	13	29.2	0.3	15.72

De la Tabla 5.9 se puede dar aceptación a las 4 placas una vez determinado el valor de penetración promedio en mm, recordando que el mínimo aceptable es de 14.875 mm.

Las placas: 4, 12 y 13 no han causado rechazo por las demás técnicas utilizadas previo a la aplicación del ensayo de UT-PA, por lo tanto se realiza un barrido sectorial donde se encuentran discontinuidades del tipo poro y se definen sus dimensiones, pudiendo así someter dichas dimensiones de cada imperfección al criterio: 2 imperfecciones internas de la Tabla 5.2. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10 Poros y sus dimensiones encontradas mediante UT-PA.

#	DISTANCIA Y (IN)			DISTANCIA Y (mm)		
	C1	C2	DELTA	C1	C2	DELTA
4						
PO1	1.397	1.502	0.105	35.4838	38.1508	2.667
PO2	1.404	1.492	0.088	35.6616	37.8968	2.2352
PO3	1.401	1.478	0.077	35.5854	37.5412	1.9558
12						
PO2	1.335	1.405	0.07	33.909	35.687	1.778
13						
PO1	1.338	1.422	0.084	33.9852	36.1188	2.1336

Entonces como lo indica la tabla anterior; ninguno de los tamaños de poro de los encontrados en las placas 4, 12 y 13 causa rechazo debido a que en la Tabla 5.2, sección N° 2.3 – poro, el límite de imperfección está dado por la siguiente condición: $d \leq 0.5 s$, máx. 5 mm (donde 'd' = diámetro del poro y 's' = espesor de la placa). Se puede deducir de dicha condición que el tamaño máximo que puede tener una distancia en delta de Y es de 0.196 plg, criterio que se usa también para verificar la aceptación de las probetas de validación que arrojan los valores dimensionales mostrados en la Tabla 5.11, donde se observa que 2 probetas de validación ocasionan rechazo por tamaño de poro dichas dimensiones se marcan con el color amarillo de fondo en la tabla.

Tabla 5.11 Poros y sus dimensiones encontradas mediante UT-PA, ensayos de validación.

#	DISTANCIA X (Pulgadas)			DISTANCIA Y (Pulgadas)		
	C1	C2	DELTA	C1	C2	DELTA
1						
P1	0.444	0.131	0.313	1.245	1.384	0.139
P2	0.429	0.135	0.294	1.262	1.395	0.133
2						
P1	0.711	0.436	0.275	1.268	1.422	0.154
P2	0.669	0.256	0.413	1.273	1.485	<u>0.212</u>
P3	0.724	0.291	0.433	1.266	1.495	<u>0.229</u>
3						
P1	0.679	0.273	0.406	1.262	1.461	0.199
4						
P1	0.592	0.266	0.326	1.259	1.422	0.163
P2	0.585	0.193	0.392	1.259	1.443	0.184

Se inspeccionaron 17 placas del diseño de experimentos inicial y 4 de validación mediante UT-PA para registrar valores de penetración y la comparación de dichos métodos con el obtenido realmente en el corte por sección transversal. Se observó que todas las placas presentan porosidad agrupada, la cual se atiende según el caso 2 del N° 2.4 – porosidad agrupada de la Tabla 5.2 donde el límite no permite valores superiores al 16% de la medida máxima de la suma del área proyectada. Por lo tanto y como se puede observar en la Tabla 5.12; ninguna de las 17 placas cumple con los criterio de aceptación para porosidad agrupada. También se puede observar en la Tabla 5.13 que ninguno de los ensayos de validación cumple tampoco con los criterios mínimos de aceptación para porosidad agrupada.

Tabla 5.12 Porosidad agrupada encontrada mediante UT-PA.

Cupón	Medida máxima de la suma	
	mm	%
1	180	60
2	240	80
3	160	53.33333333
4	160	53.33333333
5	70	23.33333333
6	110	36.66666667
7	150	50
8	195	65
9	150	50
10	300	100
11	190	63.33333333
12	110	36.66666667
13	160	53.33333333
14	50	16.66666667
15	110	36.66666667
16	160	53.33333333
17	200	66.66666667

Tabla 5.13 Porosidad agrupada encontrada mediante UT-PA, ensayos de validación

Validación	Medida máxima de la suma	
	mm	%
1	65	43.33333333
2	130	86.66666667
3	75	50
4	40	26.66666667

5.1.4. Metalografía

5.1.4.1. Estereoscopía

Experimentación previa

Se realizaron mediciones de penetración y tamaño de área en la zona afectada térmicamente mediante estereoscopía.

Los resultados obtenidos en cuanto a penetración se acercan mucho a los mínimos aceptados, obtener dichos resultados valida la metodología planteada.

Experimentación HLAW

Se obtienen secciones transversales de las zonas donde se detectaron discontinuidades mediante UT-PA y se llevan a cabo mediciones mediante estereoscopía de las discontinuidades como se muestra en la Figura 5.4 para compararlos con los encontrados previamente.

La estereoscopía muestra la sección transversal de la configuración elegida, como ya se mencionó con anterioridad fue una configuración a tope sin preparación de bisel, se utilizó una sola pasada de soldadura lo cual muestra una sección transversal donde se distinguen tres de las zonas características para un metal soldado: ZF – Zona de Fusión, ZAC – Zona Afectada por el Calor y el MB - Metal Base. Así como la interface entre cada zona (Figura 5.5).

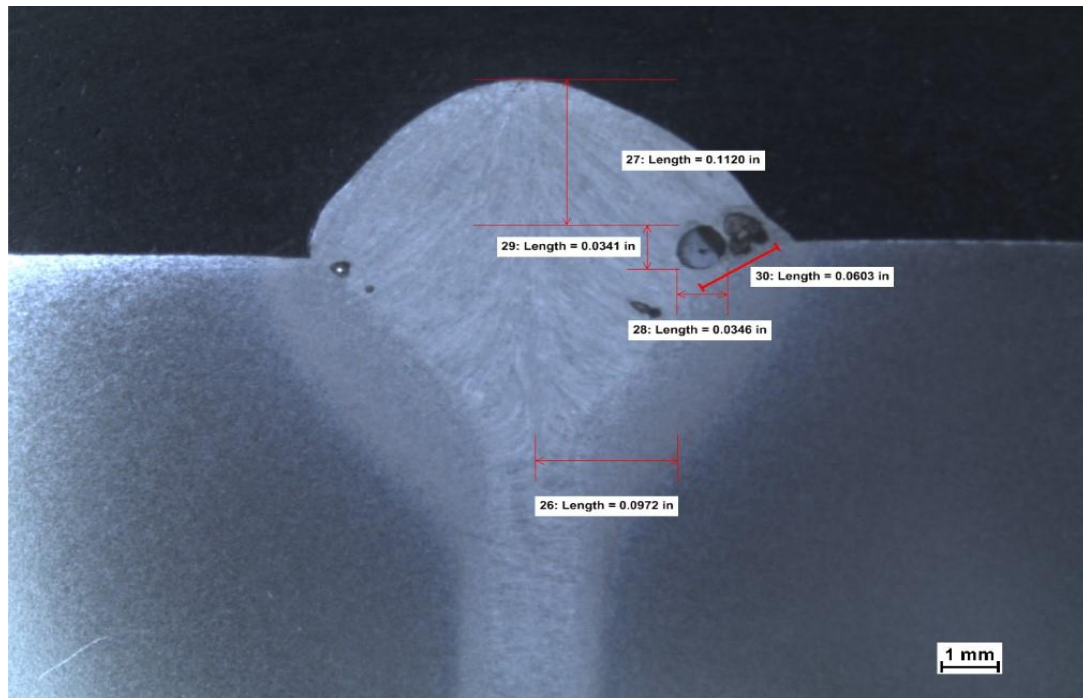


Figura 5.4 Identificación, medición y ubicación mediante sección transversal. Probeta 11A_T21

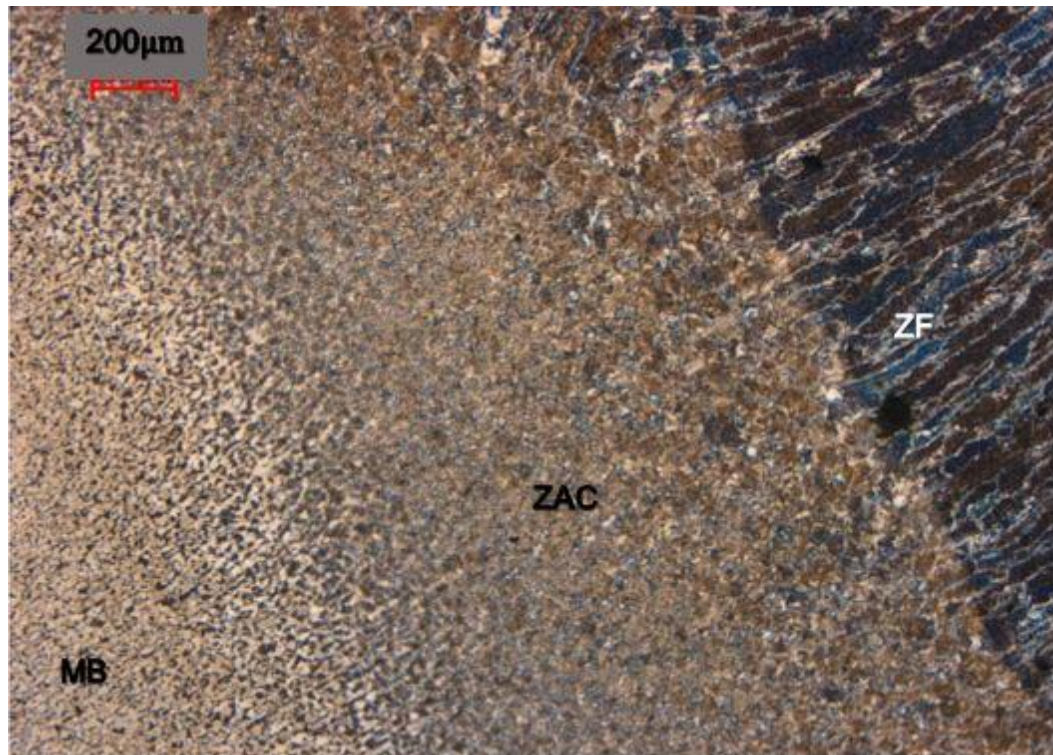


Figura 5.5 Zonas de soldadura; MB – Metal base, ZAC – Zona afectada por el calor y ZF – Zona de fusión

5.1.4.2. Microscopía

La aplicación de un proceso avanzado de soldadura como lo es el proceso HLAW involucra cambios microestructurales dentro de la unión soldada respecto de procesos convencionales como es el caso de la soldadura GMAW, el cambio microestructural se da principalmente por la manera en que el calor aplicado al material base interactúa en el baño de soldadura combinando factores como lo son; la composición química de metal base y material de aporte. A su vez, los parámetros de soldadura del proceso HLAW aplicados a las 17 placas iniciales generan el valor del aporte térmico nominal que se muestra en la Tabla 5.14; el cual es calculado mediante la siguiente formula (24):

$$Q_{nom} = \frac{(P + U \times I)}{v} 10^{-3}$$

Donde

Q_{nom} es el aporte térmico nominal, en kilojulios por milímetro;

P es la potencia láser, en kilo watts;

U es el voltaje del arco, medido tan cerca del arco como sea posible,
en volts;

I es la intensidad de soldadura, en amperes;

V es la velocidad de soldadura, en milímetros por segundo.

Tabla 5.14 Aporte térmico nominal para 17 placas iniciales.

#	Velocidad de soldadura (mm/s)	Potencia láser (KW)	Voltaje (Volts)	Intensidad (A)	Q_{nom} (KJ/mm)
1	20	9.5	29.1	180	13.06
2	25	9.5	32.5	215	13.93
3	30	9.5	31.5	205	10.73
4	25	9.5	29.2	181	<u>10.54</u>
5	23	9.5	29.2	181	11.46
6	22	9.5	29.2	181	11.98
7	22	9.5	29.2	181	11.98
8	23	9.5	29.8	187	12.08
9	23	9.5	29.4	183	11.67
10	23	9.5	29.3	182	11.56
11	23	9.5	29.4	183	11.67
12	23	8	29.9	188	12.19
13	23	8.5	30	189	12.29
14	23	8.8	30	189	12.29
15	20	8	30.1	190	<u>14.26</u>
16	23	8.5	30	189	12.29
17	23	8.6	29.8	187	12.08

De acuerdo a la norma ISO 15614-14, la cual indica que se puede considerar una microestructura uniforme: sí; tanto la variación de los límites superior e inferior del aporte térmico nominal no exceden un 30%

En la Tabla 5.14 se puede observar que no existe variación considerable en el valor de Q_{nom} para el supuesto de una microestructura uniforme debido a que valor mínimo: 10.54 KJ/mm no excede el límite inferior del 30% aplicado al valor máximo registrado: 14.06 KJ/mm. Por lo que podemos deducir que las características microestructurales no presentan variación al momento de aplicar los 17 cupones de ensayo.

A su vez, en la Tabla 5.15 se observa que tampoco existe variación considerable del valor de Q_{nom} obteniendo como resultado que la microestructura obtenida en los 4 cupones de validación es repetitiva para cada una de ellos. El valor mínimo 11.56 KJ/mm no excede el límite inferior del 30% aplicado al valor máximo registrado: 13.35 KJ/mm.

Tabla 5.15 Aporte térmico nominal para 4 placas de validación.

Validación	Velocidad de soldadura (mm/s)	Potencia láser (KW)	Voltaje (Volts)	Intensidad (A)	Q_{nom} (KJ/mm)
1	20.1	9.3	29.4	183	<u>13.35</u>
2	22.6	9	29.1	180	<u>11.56</u>
3	20.3	9.1	29.2	181	12.98
4	20	8.8	29.2	181	13.18

5.1.4.3. Metal Base

El metal base no muestra modificaciones microestructurales una vez aplicado el proceso de soldadura debido a que en esta zona no existen afectaciones térmicas ni fisicoquímicas, lo cual no permite evolución microestructural. La Figura 5.6 muestra la composición microestructural del acero, donde se observa

que consta de una matriz ferrítica (áreas claras), rodeada principalmente de austenita en el límite de grano, y perlita (áreas oscuras).

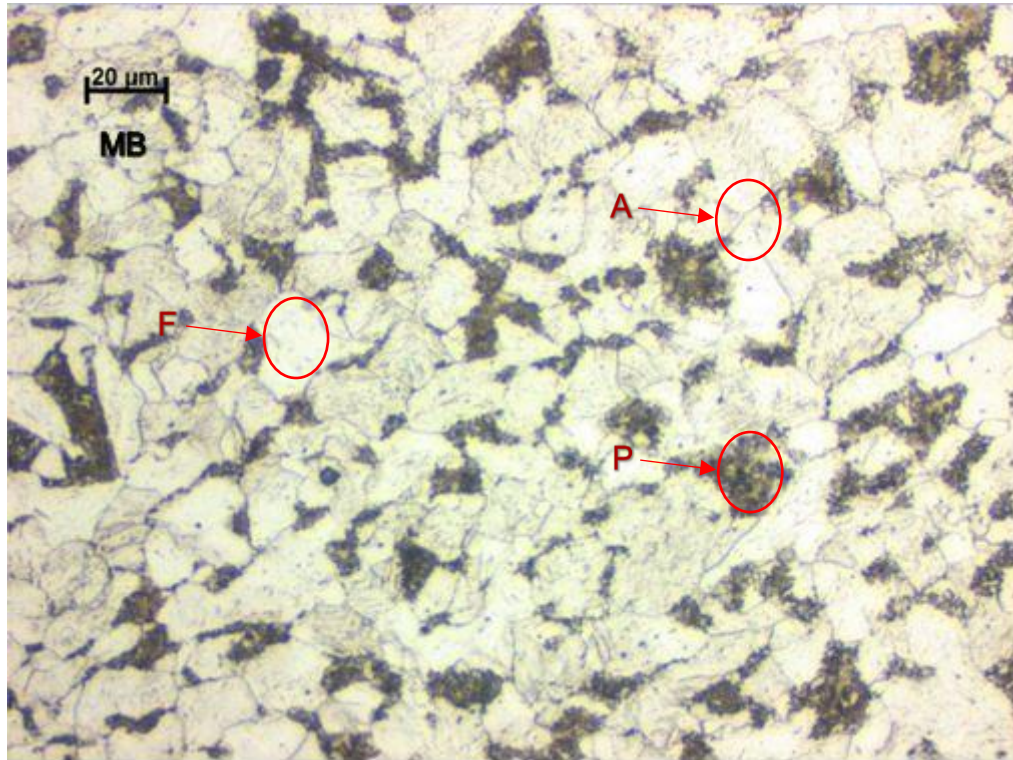


Figura 5.6 Micrografía del Metal Base; donde F - Ferrita, P – Pearlita, A - Austenita.

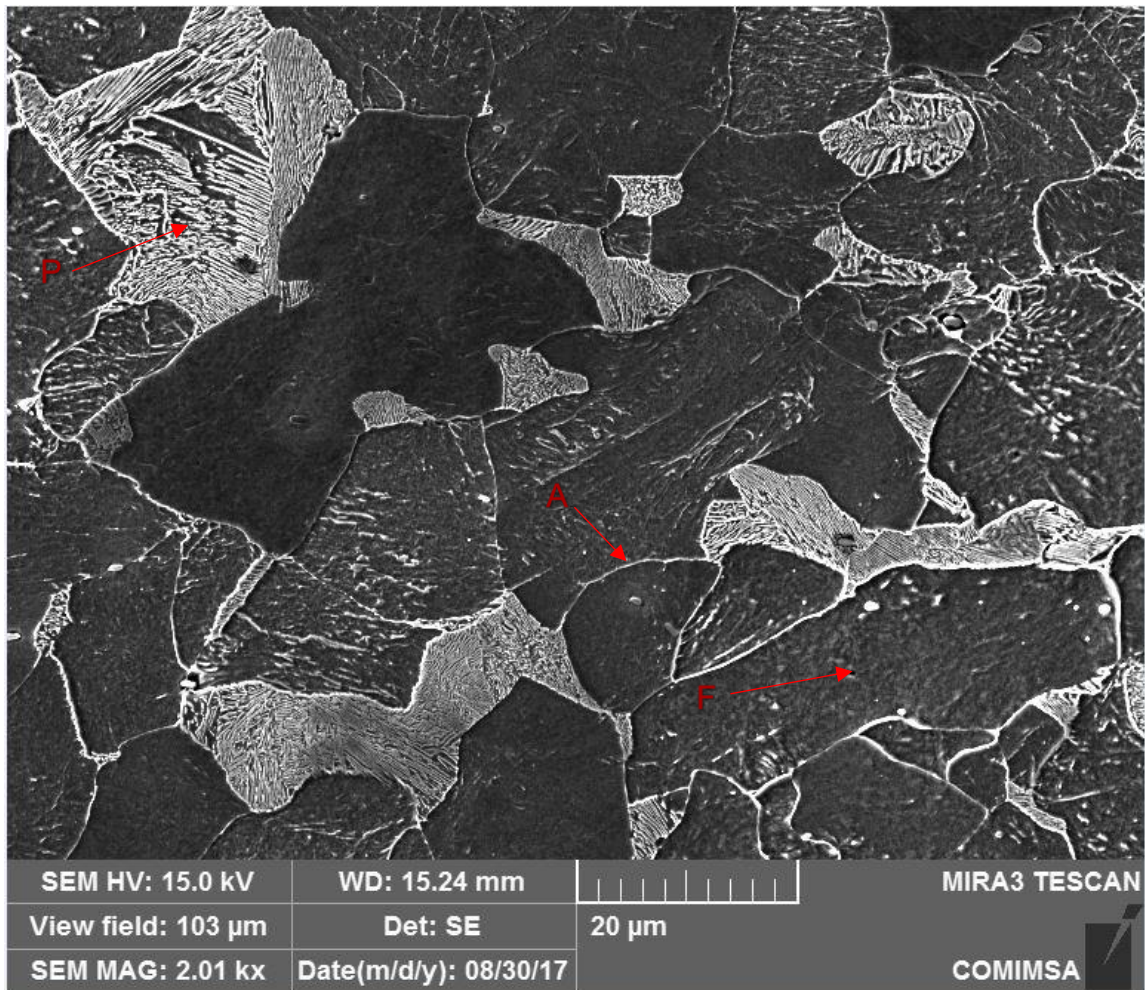


Figura 5.7 Imagen obtenida mediante MEB del MB; F – Ferrita, A – Austenita, P - Perlita.

En la Figura 5.7 adquirida mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) se corrobora lo que se mencionó anteriormente; la presencia de ferrita (zonas oscuras) rodeadas por austenita en los límites de grano y perlita (zonas claras).

5.1.4.4. Zona Afectada por el Calor

La microestructura de la ZAC se puede dividir esencialmente en tres regiones: región de refinamiento parcial del grano, región de refinamiento del grano y región de crecimiento del grano. Estas tres regiones se pueden observar físicamente en la Figura 5.8 Las temperaturas máximas en estas posiciones se indican en el diagrama de fase mostrado en la Figura 5.9 (27).

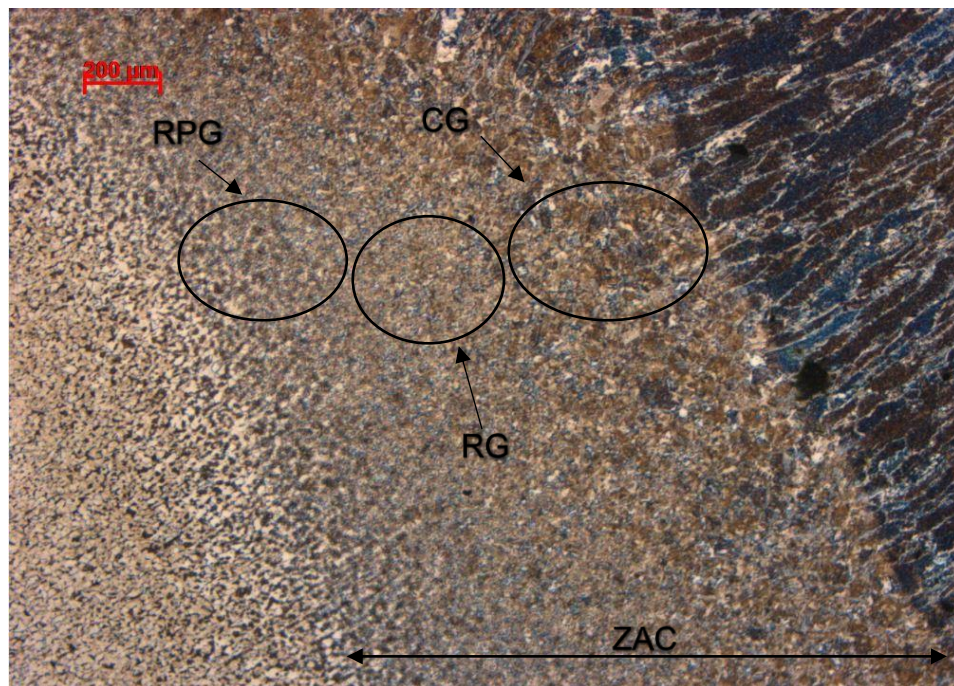


Figura 5.8 Regiones en la ZAC; RPG - Refinamiento Parcial del Grano, RG - Refinamiento del Grano, CG - Crecimiento del Grano.

En la parte de la ZAC junto al MB (RPG - Refinamiento Parcial del Grano) se formó martensita con alto contenido de carbono (y una pequeña cantidad de austenita retenida) formada a partir de las zonas de perlita.

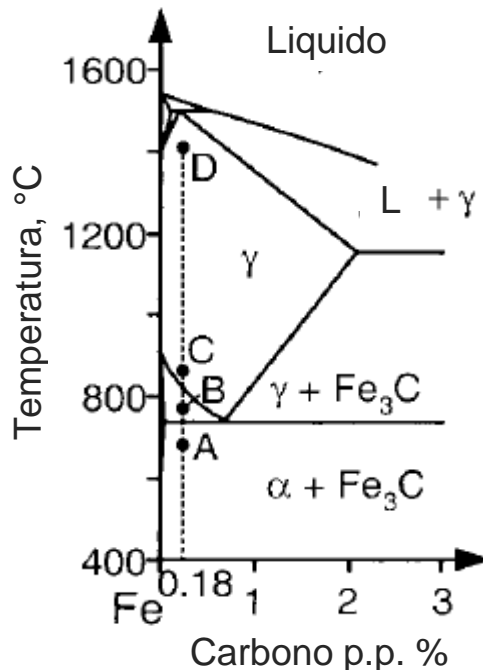


Figura 5.9 Diagrama de fase para acero 1018, donde; A - Metal Base, B - Refinamiento parcial del grano, C - Refinamiento del grano, D - Crecimiento del grano. Modificado de (27).

La austenita con alto contenido de carbono formada en estas colonias durante el calentamiento no tuvo tiempo de permitir que el carbono se difundiera, y se transformó en martensita alta en carbono, dura y quebradiza, debido al enfriamiento rápido posterior. La martensita se encuentra incrustada en una matriz de ferrita mucho más blanda que puede degradar significativamente las propiedades mecánicas de la ZAC. Cuando nos acercamos a la ZF aún dentro de la ZAC (RG – Refinamiento del grano y CG – Crecimiento del Grano), tanto la temperatura máxima como el tiempo de difusión aumentaron. Como resultado, las zonas de perlita previa se expandieron mientras se transformaban en austenita y formaron colonias de martensita de contenido de carbono más bajo durante el enfriamiento posterior. La alta velocidad de enfriamiento y el gran tamaño de grano fomentan que la Ferrita forme placas laterales a partir de los límites del grano, llamada ferrita Widmanstatten. La Figura 5.10 y Figura 5.11 tiene evidencia de la formación de las fases mencionadas con anterioridad.

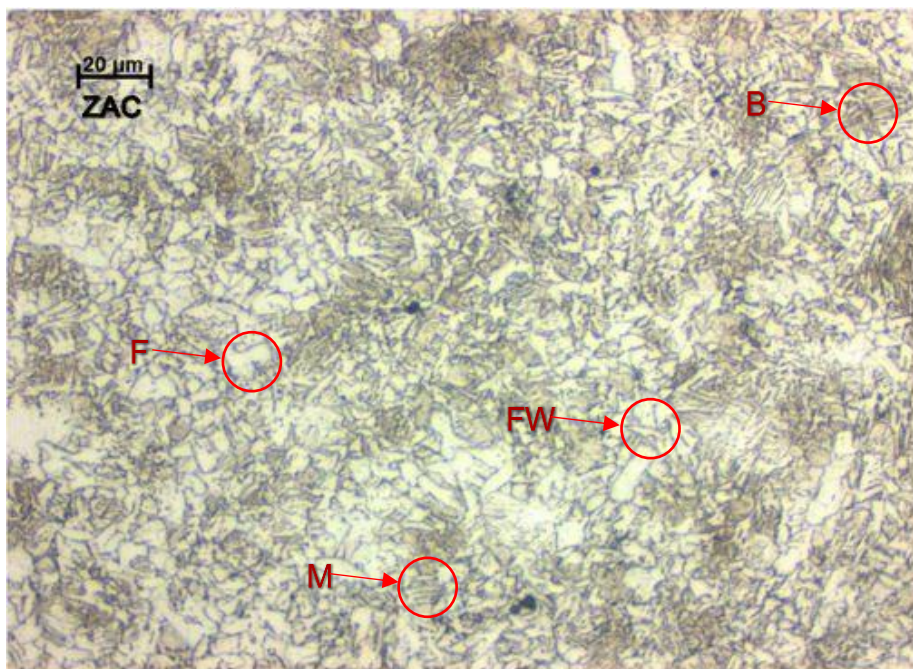


Figura 5.10 Micrografía de la Zona Afectada por el Calor; donde F - Ferrita, B – Bainita, M - Martensita, FW - Ferrita

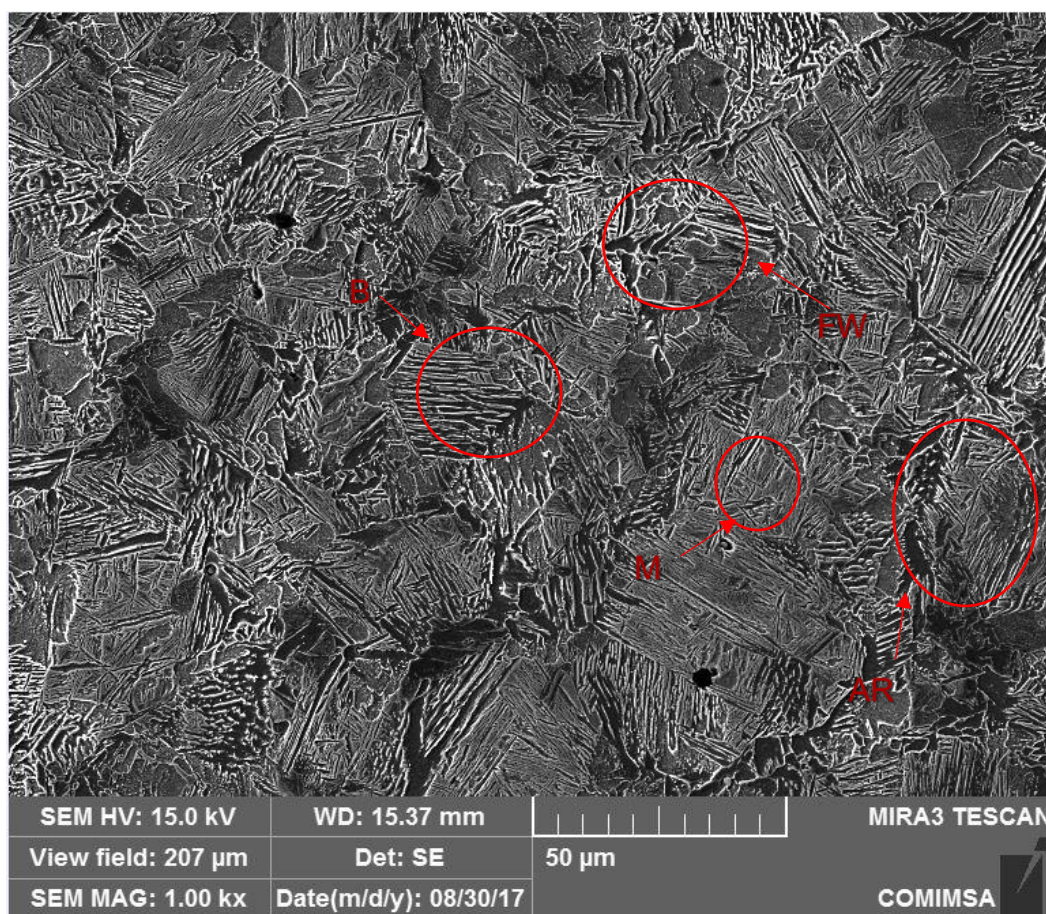


Figura 5.11 Imagen obtenida mediante MEB de la ZAC; FW – Ferrita Widmanstätten, AR – Austenita Retenida, B - Bainita, M - Martensita.

5.1.4.5 Zona de Fusión

El crecimiento del grano cerca del límite de la Zona de Fusión resulta en granos columnares gruesos en la Zona de Fusión que son significativamente más grandes que los granos de la ZAC en promedio.

En esta zona se encontraron bandas de Ferrita acompañadas de Ferrita Widmanstätten, el rápido enfriamiento genera la formación de Martensita como se muestra en la Figura 5.12.

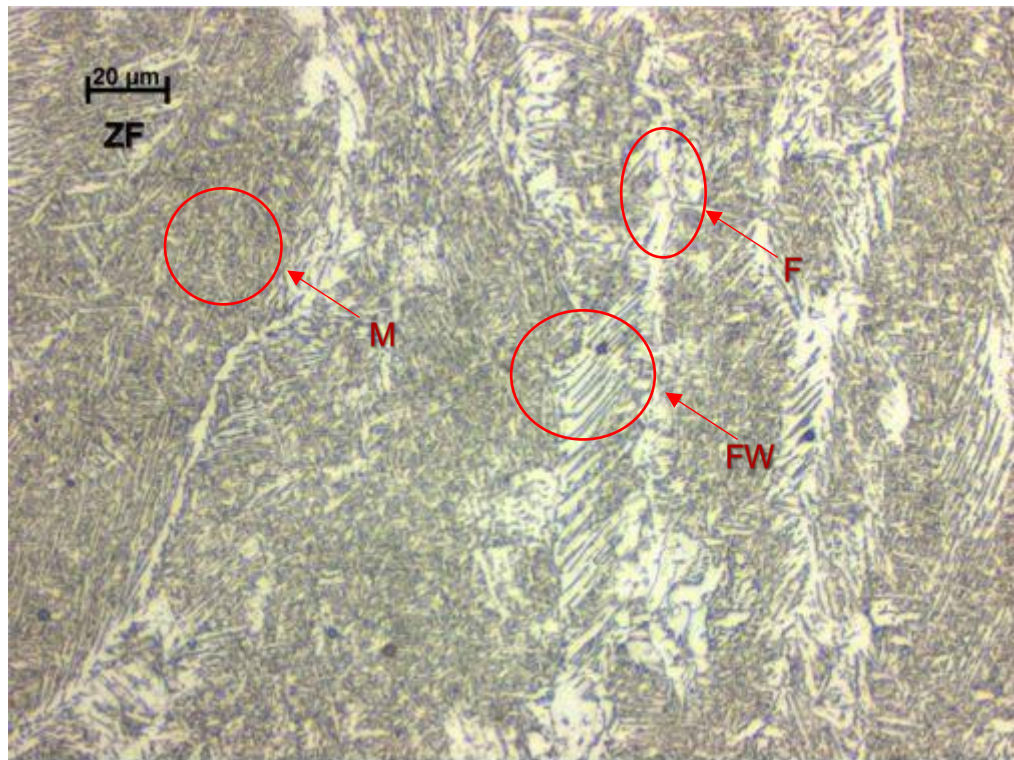


Figura 5.12 Micrografía de la Zona de Fusión; donde F - Ferrita, M - Martensita, FW - Ferrita Widmanstätten.

La Figura 5.13 muestra una ampliación mediante Microscopía Electrónica de Barrido de la Zona de Fusión.

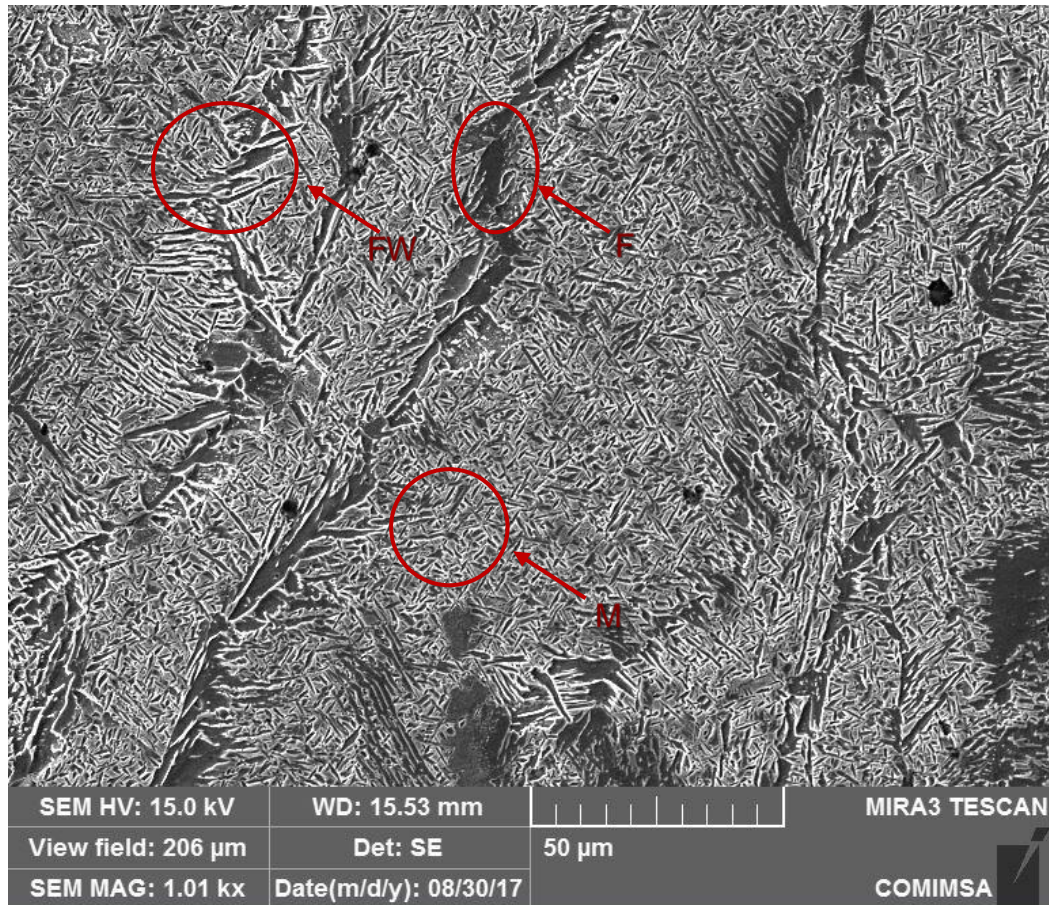


Figura 5.13 Imagen obtenida mediante MEB de la ZF; F – Ferrita, FW – Ferrita Widmanstatten, M - Martensita.

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Conclusiones

A partir de lo descrito en este documento se llega a las siguientes conclusiones:

- Se identifican las características (tipo, tamaño y ubicación) de las discontinuidades generadas por la aplicación del proceso HLAW permitiendo determinar así el nivel de calidad final de la unión y validar la metodología de inspección. Los resultados que arroja la investigación permiten determinar los parámetros para la aplicación de soldadura con el proceso HLAW sobre placas de acero AISI 1520 modificado.
- La utilización conjunta de los ensayos no destructivos; VT, PT y UT-PA, cumple con el requisito de inspección del 100% del volumen de los cordones aplicados, siendo de principal ventaja radica en que estos ensayos permiten detectar las características (tipo, tamaño, ubicación) de las imperfecciones generadas al aplicar el proceso HLAW; para aplicar la norma ISO 12932 y determinar, de manera eficaz, el nivel de calidad de las uniones.

- La metodología de inspección y la configuración del equipo Prisma Sonatest, generadas en esta investigación para la inspección mediante el ensayo de UT-PA puede transferirse a su uso para la inspección de calidad del componente final, pudiendo determinar; tipo, medición y ubicación de imperfecciones. Siendo este procedimiento 250% más rápido en comparación con el procedimiento de inspección utilizado con la técnica UT convencional.
- Los resultados obtenidos en cuanto a penetración, de la primera corrida experimental; el valor mínimo obtenido para la penetración muestra estar 37.47% por encima del criterio mínimo de SISAMEX y 1.23% por debajo del criterio mínimo establecido la norma ISO 12932. de la corrida de validación; el valor mínimo obtenido para la penetración muestra estar 41.25% por encima del criterio mínimo de SISAMEX y 2.55% por encima del criterio mínimo establecido la norma ISO 12932. Dichos resultados validan la metodología planteada y el uso del modelo matemático propuesto para la optimización de los parámetros para la penetración.
- De acuerdo al análisis estadístico realizado, con modelado por regresión lineal y redes neuronales de base radial, no se pudo ajustar adecuadamente el modelo para la respuesta de porosidad agrupada; motivo por el cual se requiere otro tipo de modelo; no lineal u otro tipo de red neuronal.
- Se logra identificar las características microestructurales generadas por la aplicación del proceso HLAW a las placas AISI 1018, permitiendo mostrar un preámbulo de las fases que se pudieran presentar una vez terminada la aplicación del proceso HLAW en placas de acero AISI 1520 modificado.

Recomendaciones

Las recomendaciones o sugerencias que se desprenden de este trabajo para futuras investigaciones en la línea de inspecciones de calidad de soldaduras mediante técnicas avanzadas de Ultrasonido son las siguientes:

- Usar técnicas de dimensionamiento de acuerdo a la práctica estándar: ASTM E2700 – 14, con asistencia de bloques patrón de calibración, apropiados para técnicas avanzadas de ensayos Ultrasónicos con Arreglo de Fases.
- Considerar el uso del ensayo UT-PA para medición de penetración de soldadura GMAW aplicada en componentes automotrices, debido a la elevada efectividad del método respecto al uso de UT convencional.
- Seguir la metodología propuesta en este documento para determinar las características de las imperfecciones de los productos finales unidos mediante HLAW.
- Verificar las normativas emergentes para la inspección de soldaduras realizadas con el proceso HLAW, debido a que este proceso por su naturaleza innovadora, requiere de procedimientos de soldadura específicos para poder presentar repetividad en caso de su implementación industrial.
- Se propone que para el análisis de la respuesta: porosidad agrupada, se consideren otras variables de entrada adicionales al cambio de parámetros utilizados en las variables del presente estudio para que se pueda inferir estadísticamente sobre qué variables y parámetros tienen efecto en la respuesta antes mencionada.
- Se recomienda el uso de acero AISI 1520 modificado, el cual muestra menor aparición de porosidad agrupada que los mostrados, en la presente investigación, con acero AISI 1018.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Askeland, Donald.** *Ciencia e Ingeniería de los Materiales.* Mexico : International Thomson Editores, 1998.
2. **ASM Handbook.** *Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys.* s.l. : ASM International, 2005.
3. **2016 Meritor, Inc.** © 2016 Meritor, Inc. All Rights Reserved. [En línea] [Citado el: 10 de Enero de 2016.] <http://www.meritor.com>.
4. **Orona, Jesús.** *PROIAT SISAMEX-COMIMSA.* Saltillo : s.n., 2015.
5. **Kovacevic, R., y otros.** *Pore formation and its mitigation during hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel.* s.l. : Elsevier, 2014.
6. **Fernández, Juan.** *Metalurgia de la Soldadura Aplicada en Aceros API 5L X70 con el Proceso de Soldadura Láser Híbrido GMAW-LBW.* Saltillo : s.n., 2014.
7. **International Organization of Standardization: ISO.** *Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Especificación del procedimiento de soldeo. Parte 6: Soldero híbrido por arco-láser.* Madrid : AENOR, 2014.
8. **Brian, Victor.** *Hybrid Laser Arc Welding.* s.l. : ASM International, 2011. Vol. 6A.
9. **Ove Olsen, Flemming.** *Hybrid laser - arc welding.* cambridge : Woodhead Publishing, 2009.
10. **AIMEN Centro Tecnológico.** *Soldero láser de materiales metálicos.* Portiño : aimen, 2011.

11. **H. L. Wei, J. J. Blecher, T. A. Palmer, T. Debroy.** *Fusion Zone Microstructure and Geometry in Complete-Joint-Penetration Laser-Arc Hybrid Welding of Low-Alloy Steel.* s.l. : Welding Journal, 2015.
12. **Shu Zhen, Zhenzhen Duan, Daqian Sun, Yexiong Li, Dandan Gao, Hongmei Li.** *Study on microstructures and mechanical properties of laser-arc hybrid welded S355J2W+N steel.* Changchun : ELSEVIER, 2013.
13. **X. Cao, P. Wanjara, J. Huang, C. Munro, A. Nolting.** *Hybrid fiber laser – Arc welding of thick section high strength low alloy steel.* Montreal, Canada : ELSEVIER, 2011.
14. **J. Lamas y J. Karlsson, P. Norman, J. Powell, A. F. H. Kaplan, and A. Yañez.** *The effect of fit-up geometry on melt flow and weld quality in laser hybrid welding.* s.l. : Journal of Laser Applications, 2013. Vol. 032010.
15. **Mahmoud Moradi, Nahid Salimi, Majid Ghoreishi, Hadi Abdollahi, Mahmoud Shamsborhan, Jan Frostevarg, Torbjörn Ilar, and Alexander F. H. Kaplan.** *Parameter dependencies in laser hybrid arc welding by design of experiments and by a mass balance.* s.l. : JOURNAL OF LASER APPLICATIONS, 2014. Vol. 26.
16. **G. Turichina, E. Valdaytsevaa, I. Tzibulskya, A. Lopotab, O. Velichkob.** *Simulation and Technology of Hybrid Welding of Thick Steel Parts with High Power Fiber Laser.* St. Petersburg, Russia : s.n., 2011.
17. **G. Wiklund, O. Akselsen, A. J. Sjørgjerd, and A. H. Kaplan.** *Geometrical aspects of hot cracks in laser-arc hybrid welding.* s.l. : Journal of Laser Applications, 2014.
18. **D. Lévesque, G. Rousseau, P. Wanjara, X. Cao, and J.-P. Monchalín.** *Laser-ultrasonic inspection of hybrid laser-arc welded HSLA-65 steel.* s.l. : AIP Conference Proceedings, 2014.
19. **Barckhoff, Jack, Kerluke, Kenneth y Lynn, Don.** *Certified Welding Supervisor Manual for Quality and Productivity Improvement.* Miami : American Welding Society, 2005.
20. **COMIMSA.** *Líquidos Penetrantes, Manual para Niveles I y II.* Saltillo : s.n., 2011.

21. **ASTM.** Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for General Industry. *Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for General Industry*. s.l. : ASTM International, 2012.

22. **Ducharme, Philip, y otros.** *Automated Ultrasonic Phased Array Inspection of Fatigue Sensitive Riser Girth Welds with a Weld Overlay Layer of Corrosive Resistant Alloy (CRA)*. 2012.

23. **ASTM.** *Standard Practice for Contact Ultrasonic Testing of Welds Using Phased Arrays*. Philadelphia : ASTM International, 2014.

24. **International Organization of Standardization: ISO.** *Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Ensayo de procedimiento de soldeo. Parte 14: Soldeo híbrido por láser-arco de aceros, níquel y aleaciones de níquel*. Madrid : AENOR, 2014.

25. **International Organization of Standardization: ISO.** *Soldo híbrido por láser-arco de aceros, níquel y aleaciones de níquel. Niveles de calidad para las imperfecciones*. Madrid : AENOR, 2013.

26. **AWS.** *Structural Welding Code—Steel AWS D1.1/D1.1M:2006*. Miami : American Welding Society, 2006. 0-87171-025-0.

27. **Kou, Sindo.** *Welding Metallurgy*. New Jersey : Wiley, 2003. ISBN 0-471-43491-4.

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.1. Sistema de clasificación de aceros AISI/SAE (2).....	9
Tabla 2.2 Propiedades mecánicas (4).	12
Tabla 2.3 Composición química (4)	12
Tabla 2.4 Efectos de las variables del proceso HLAW en las propiedades de la unión (7).....	22
Tabla 4.1 Parámetros usados en la aplicación de soldadura HLAW.	39
Tabla 4.2 Examen y ensayos de los cupones (24).	40
Tabla 5.1 Composición química de materiales.	49
Tabla 5.2 Limites de las imperfecciones (25).....	50
Tabla 5.3 Evidencia de inspección visual.	53
Tabla 5.4 Parámetros de soldadura usados en experimentación previa (soldadura GMAW)	57
Tabla 5.5 Resultados de penetración promedio de los cordones en configuración a tope.....	59
Tabla 5.6 Tabla de los coeficientes estimados para la respuesta Penetración (mm).	60
Tabla 5.7. Tabla de los coeficientes estimados ajustados para la respuesta Penetración (mm).	61
Tabla 5.8 Parámetros óptimos obtenidos para la validación de los modelos de regresión calculados usando algoritmos genéticos.....	62
Tabla 5.9 Resultados de penetración promedio en placas de validación. ...	62
Tabla 5.10 Poros y sus dimensiones encontradas mediante UT-PA.	63

Tabla 5.11 Poros y sus dimensiones encontradas mediante UT-PA, ensayos de validación.....	64
Tabla 5.12 Porosidad agrupada encontrada mediante UT-PA.	65
Tabla 5.13 Porosidad agrupada encontrada mediante UT-PA, ensayos de validación.....	65
Tabla 5.14 Aporte térmico nominal para 17 placas iniciales.	69
Tabla 5.15 Aporte térmico nominal para 4 placas de validación.....	70

LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1 Ubicación del eje motriz trasero en el tractocamión (3)	11
Figura 2.2 Eje motriz trasero (3)	11
Figura 2.3 Curva esfuerzo deformación (4)	13
Figura 2.4 Proceso híbrido; 1 – Fuente láser, 2 – Antorcha proceso por arco (GMAW) (7).....	14
Figura 2.5 Comparación de geometría del cordón en sección transversal; PL – Potencia Láser, VS – Velocidad de Soldadura (10).....	17
Figura 2.6 Comparación de la sección transversal de soldadura: A - GMAW, B – HLAW (11).....	18
Figura 2.7 Zona de fusión: a) Zona del arco; b) Zona del láser (12)	19
Figura 2.8 Microestructura de la ZAT: a) zona sobrecalentada; b) zona de recristalización; c) zona de recristalización parcial (12).	20
Figura 2.9 Sección transversal de acero estructural de 12 mm: a) soldadura láser (PL: 9kW, VS: 0.8 m/min, Gap: 0); y b) soldadura híbrida (PL: 11 kW, PA: 7.0 kW, VS: 1.4 m/min, VA: 15.8 m/min, Gap: 0.5 mm) (9).....	21
Figura 3.1 Metodología propuesta	36
Figura 4.1 Configuración de la junta; 1 - Gap, a - ancho (10 mm), b - largo (30 mm), t - espesor (16 mm). (20)	38
Figura 4.2 Placas unidas mediante HLAW parte 1 de 2	38
Figura 4.3 Placas unidas mediante HLAW parte 2 de 2	39
Figura 4.4 Materiales utilizados en la inspección por PT.	42
Figura 4.5 Esquema para el barrido por el método de UT con el equipo marca Krautkramer modelo USN 58L.	43

Figura 4.6 Interfaz para el usuario en la pantalla del equipo usado en la inspección. a) A-Scan, b) RayTracing, c) S-Scan.....	44
Figura 4.7 Imagen 3D para la visualización de la configuración de leyes focales generada; A – Vista de planta, B – Vista frontal.	46
Figura 4.8 Calibración del equipo Prisma Sonatest previo a la inspección..	46
Figura 4.9 Visualización durante el barrido. S-Scan; Arriba izq. Vista 3D; Arriba der. A-Scan; abajo	47
Figura 5.1 PT Placa 3	55
Figura 5.2 PT - Placa 4.....	56
Figura 5.3 Medición de discontinuidad PO1 en placa 4.....	58
Figura 5.4 Identificación, medición y ubicación mediante sección transversal. Probeta 11A_T21	67
Figura 5.5 Zonas de soldadura; MB – Metal base, ZAC – Zona afectada por el calor y ZF – Zona de fusión	68
Figura 5.6 Micrografía del Metal Base; donde F - Ferrita, P – Perlita, A - Austenita.....	71
Figura 5.7 Imagen obtenida mediante MEB del MB; F – Ferrita, A – Austenita, P - Perlita.	72
Figura 5.8 Regiones en la ZAC; RPG - Refinamiento Parcial del Grano, RG - Refinamiento del Grano, CG - Crecimiento del Grano.....	73
Figura 5.9 Diagrama de fase para acero 1018, donde; A - Metal Base, B - Refinamiento parcial del grano, C - Refinamiento del grano, D - Crecimiento del grano. Modificado de (27).	74
Figura 5.10 Micrografía de la Zona Afectada por el Calor; donde F - Ferrita, B – Bainita, M - Martensíta, FW - Ferrita Widmanstatten.	75
Figura 5.11 Imagen obtenida mediante MEB de la ZAC; FW – Ferrita Widmanstatten, AR – Austenita Retenida, B - Bainita, M - Martensíta.	75
Figura 5.12 Micrografía de la Zona de Fusión; donde F - Ferrita, M - Martensíta, FW - Ferrita Widmanstatten.	76
Figura 5.13 Imagen obtenida mediante MEB de la ZF; F – Ferrita, FW – Ferrita Widmanstatten, M - Martensíta.....	77

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Luis Armando Aguilar Pérez

Candidato para obtener el grado de *Maestro en Tecnología de la Soldadura Industrial*

Realizó sus estudios de nivel licenciatura en el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Morelia, obteniendo el título de Ingeniero en Materiales en agosto de 2015. En ese mismo año inicia estudios de posgrado en el programa de Maestría en Tecnología de la Soldadura Industrial de la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA) con un proyecto de título: “Estudio De Las Discontinuidades Generadas En La Aplicación De Soldadura Híbrida Láser-Gmaw En Componentes Automotrices”, becado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), terminando actividades curriculares el mes de agosto de 2017, dichos estudios de maestría incluyeron una estancia industrial en el Centro de Desarrollo Tecnológico y Humano (CDTH), y el Laboratorio de Materiales de la empresa Sistemas Automotrices de México S.A. de C.V. (SISAMEX).

Ha participado en 1 congreso nacional y en la publicación de 1 artículo indizado. También ha realizado actividades como inspector de calidad en soldaduras con los métodos de: Inspección Visual, Líquidos Penetrantes, Ultrasonido y Ultrasonido con Arreglo de Fases.