

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**METALURGIA DE LA SOLDADURA APLICADA EN ACEROS API 5L X70  
CON EL PROCESO DE SOLDADURA LÁSER HÍBRIDO GMAW-LBW**

**POR**

**RAÚL JUAN FERNÁNDEZ TAVITAS**

**TESIS**

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

**SALTILLO COAHUILA A 17 DE NOVIEMBRE DEL 2014**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**METALURGIA DE LA SOLDADURA APLICADA EN ACEROS API 5L X70  
CON EL PROCESO DE SOLDADURA LÁSER HÍBRIDO GMAW-LBW**

**POR**

**RAÚL JUAN FERNÁNDEZ TAVITAS**

**TESIS**

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

**SALTILLO COAHUILA A 17 DE NOVIEMBRE DEL 2014**

# ÍNDICE

<b>SINTESIS .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>2</b>
<b>INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Objetivos.....</b>	<b>3</b>
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
<b>1.3 Justificación .....</b>	<b>4</b>
<b>1.4 Planteamiento del problema .....</b>	<b>4</b>
<b>1.5 Definición de hipótesis.....</b>	<b>5</b>
<b>1.6 Alcance .....</b>	<b>5</b>
<b>1.7 Aportación científica y tecnológica.....</b>	<b>5</b>
<b>1.8 Resultados esperados.....</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>7</b>
<b>ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 Soldadura híbrida .....</b>	<b>7</b>
2.1.1 Ventajas y limitaciones .....	8
2.1.2 Áreas de aplicación .....	9
2.1.3 Mecanismo del proceso de soldadura .....	10
2.1.4 Parámetros en la soldadura HLAW .....	10
2.1.5 Configuración de soldadura.....	11
2.1.6 Factores importantes dentro del proceso de soldadura.....	12

2.1.7 Aplicaciones .....	15
2.1.8 Equipo empleado para la soldadura HLAW .....	15
<b>2.2 Aceros alta resistencia baja aleación .....</b>	<b>18</b>
2.2.1 Composición química .....	18
2.2.2 Propiedades mecánicas .....	19
2.2.3 Clasificación de los aceros HSLA .....	19
<b>2.3 Aceros API .....</b>	<b>20</b>
2.3.1 Soldabilidad de los aceros API .....	22
2.3.2 Propiedades mecánicas .....	25
2.3.3 Producción de tuberías .....	27
<b>2.4 Soldadura GMAW .....</b>	<b>29</b>
2.4.1 Proceso de soldadura .....	29
2.4.2 Mecanismos de transferencia .....	30
2.4.3 Variables del proceso .....	32
2.4.4 Ventajas y limitaciones .....	36
2.4.5 Calidad de la soldadura .....	37
<b>2.5 Soldadura LBW .....</b>	<b>38</b>
2.5.1 Proceso soldadura LBW .....	38
2.5.2 Soldadura por agujero guía o “keyhole” .....	39
2.5.3 Tipos de láseres .....	39
2.5.4 Propiedades soldadura LBW .....	41
2.5.5 Ventajas y limitaciones .....	43
2.5.6 Aplicaciones .....	43
<b>2.6 Soldadura por Arco Sumergido .....</b>	<b>44</b>
2.6.1 Proceso de soldadura .....	45

2.6.2 Tipos de aplicación .....	46
2.6.3 Equipo y material de soldadura .....	47
2.6.4 Parámetros del proceso SAW.....	49
2.6.5 Ventajas y limitaciones del proceso.....	50
2.6.6 Proceso SAW para tuberías API.....	51
<b>2.7 Soldadura por Resistencia.....</b>	<b>52</b>
2.7.1 Principios de funcionamiento.....	53
2.7.2 Generación de calor .....	54
2.7.3 Resistencias dentro del proceso.....	54
2.7.4 Efecto de la corriente de soldadura .....	55
2.7.5 Efecto del tiempo en la soldadura.....	56
2.7.6 Efecto de la presión de soldadura .....	56
2.7.7 Variantes que influyen en el proceso de soldadura ERW .....	56
2.7.8 Ciclo de soldadura .....	57
2.7.9 Equipo de soldadura.....	57
2.7.10 Soldadura de costura.....	58
2.7.11 Soldadura por resistencia para tuberías API .....	59
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>62</b>
<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>62</b>
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>65</b>
<b>DESARROLLO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>65</b>
<b>CAPITULO 5.....</b>	<b>71</b>
<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>71</b>
5.1 Uniones con procesos de soldadura ERW/SAW .....	72
5.1.1 Estereoscopía.....	72

5.1.2 Microscopía .....	73
<b>5.2 Uniones con proceso de soldadura GMAW .....</b>	<b>78</b>
5.2.1 Microscopía .....	80
<b>5.3. Uniones con proceso HLAW .....</b>	<b>85</b>
5.3.1 Estereoscopía .....	85
5.3.2 Microscopía .....	87
<b>5.4 Propiedades mecánicas .....</b>	<b>95</b>
5.4.1 Ensayo de dureza .....	95
5.4.2 Tensión.....	97
5.4.3 Ensayo de dobléz .....	99
5.4.4 Ensayo de impacto Charpy.....	100
5.4.5 Ensayo Nick – Break .....	100
<b>CAPITULO 6.....</b>	<b>102</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>102</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>105</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>109</b>
<b>Lista de ecuaciones.....</b>	<b>109</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>110</b>

# SÍNTESIS

Con la finalidad de comprobar que el proceso de soldadura híbrida (HLAW) es factible para su uso en la manufactura de tuberías para conducción de hidrocarburos, se llevó a cabo una comparación con los procesos de soldadura actualmente empleados como son el proceso combinado ERW/SAW (soldadura por resistencia combinada con soldadura por arco sumergido) y el proceso GMAW (soldadura por arco metálico protegido). La comparación se realizó por medio de un análisis microestructural para observar las fases presentes en las zonas de soldadura que comprenden el metal base, la zona afectada por el calor y la zona de fusión, fases que influyen en las propiedades mecánicas de las uniones. También se compararon por medio de ensayos mecánicos como son tensión y microdureza. Para asegurar que las uniones fueran adecuadas para su uso en tuberías de conducción de hidrocarburos, se calificaron bajo los códigos API 1104 (especificación para tuberías en uso) con ensayos de tensión, doblado lateral y Nick – Break y bajo el código API 5L (especificación para manufactura de tuberías) con ensayos de microdureza y de impacto tipo Charpy.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

### 1.1 Antecedentes

El proceso de soldadura híbrido láser con arco eléctrico (HLAW por sus siglas en inglés) es un método de soldar que combina los métodos de soldadura por rayo láser y por método de soldadura por arco de metal protegido (GMAW por sus siglas en inglés) en el mismo charco de soldadura.

Se consiguen uniones que tienen las ventajas de ambos procesos, como lo es la velocidad de avance del láser y las excelentes uniones de GMAW. Además sus aplicaciones pueden ser mecánicas o automáticas logrando uniones de buena penetración, buenas propiedades mecánicas, cordones delgados y con una reducida zona afectada por el calor, además se obtienen las uniones en tiempos reducidos.

Ha sido empleado por más de 20 años, aunque en sus inicios era de alto costo y con limitaciones; sin embargo con el paso de los años y el desarrollo de

nuevos equipos de rayo láser, el costo del equipo se ha ido reduciendo y por consiguiente, incrementando sus áreas de aplicación.

Una de las áreas en donde se aplica el proceso híbrido, es para la producción de tuberías empleadas en la conducción de petróleo, gases e hidrocarburos en donde se utilizan aceros de alta resistencia baja aleación (HSLA por sus siglas en inglés) que son aceros con bajos contenidos de carbono y elementos aleantes que se caracterizan por sus buenas propiedades de tenacidad y resistencia a la tensión. Otros métodos empleados para la fabricación de tuberías son los procesos tales como soldadura por arco sumergido (SAW, por sus siglas en inglés) o soldadura por resistencia (ERW por sus siglas en inglés) que permiten la producción de cordones que cumplan con los requerimientos para su uso en tuberías.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Llevar a cabo un análisis microestructural y de propiedades mecánicas de los aceros API 5L X70 unidos por los procesos de soldadura GMAW, HLAW y SAW/ERW.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Llevar a cabo recopilación de información acerca de los aceros API 5L y procesos de soldadura LBW, GMAW, HLAW, ERW y SAW.
- Elaborar uniones de placas de acero API 5L X70 por medio de los procesos de soldadura GMAW y HLAW.
- Realizar ensayos bajo la norma API 1104 de tensión, ensayo de doblado en raíz y microdureza.
- Llevar a cabo un análisis microestructural y de propiedades mecánicas de las placas unidas por los procesos GMAW y HLAW.

- Realizar un análisis microestructural y de propiedades mecánicas de probetas realizadas por la empresa TUBACERO con el proceso combinado ERW/SAW.
- Comparar los resultados obtenidos por los procesos GMAW y HLAW con los del proceso SAW/ERW.

### **1.3 Justificación**

Para la unión de tuberías es altamente empleado el proceso de soldadura GMAW ya que aporta una alta productividad, propiedades mecánicas y limpieza al charco. De igual manera se utiliza la fabricación de tuberías por medio del procedimiento UOE (doblado “U”, soldado “O”, estirado “E”) que las une longitudinalmente por el proceso SAW/ERW (Submerged Arc Welding / Electrical Resistance Welding, por sus siglas en inglés).

La aplicación de la soldadura HLAW puede otorgar mejores características y mayores velocidades a las uniones de tuberías que las de soldadura GMAW, añadiendo también una reducción en los costos de producción y una mejor apariencia en las uniones.

### **1.4 Planteamiento del problema**

Para la unión de tuberías, uno de los procesos que se emplea es la soldadura GMAW ya que otorga buenas propiedades mecánicas además de que es un proceso limpio que no genera escoria. Otro proceso que se emplea es el combinado SAW/ERW que permite una alta tasa de productividad y buena calidad en las uniones.

La fabricación de tubería empleada para la conducción de hidrocarburos requiere de un estricto control de calidad, ya que una deficiencia en el cordón

de soldadura puede tener grandes consecuencias. Un proceso que en la actualidad está incursionando en varios campos es el de soldadura híbrida HLAW, el cual otorga las ventajas de cada uno de los procesos que lo constituyen. Sin embargo es necesario analizar el efecto a nivel microestructural y de propiedades mecánicas para que cumpla con las especificaciones necesarias para la conducción de hidrocarburos.

### **1.5 Definición de hipótesis**

Con el proceso de soldadura HLAW se consiguen uniones de tuberías con mejores propiedades mecánicas y cordones de soldadura que con los procesos convencionales (SAW/ERW y GMAW), además aporta un aumento de velocidad de producción, ahorro de costos, mayor penetración, cordones delgados y reducidas zonas afectadas por el calor.

### **1.6 Alcance**

El alcance de este estudio es analizar a nivel microestructural y de propiedades mecánicas uniones realizadas mediante el proceso de soldadura HLAW y compararlo con los procesos de soldadura GMAW y SAW/ERW, para aceros API 5L X70.

### **1.7 Aportación científica y tecnológica**

La aportación principal de este trabajo es el otorgar información importante acerca del proceso HLAW aplicado en la fabricación de tuberías para conducción, estudiando sus efectos y mejoras en propiedades mecánicas y de producción.

## 1.8 Resultados esperados

Los resultados esperados durante el desarrollo de esta tesis son:

- Cordones con buena apariencia y penetración.
- Que la presencia de zonas afectadas por el calor sea en espesores pequeños y no exista distorsión en las placas.
- Las propiedades mecánicas de las uniones cumplan con las especificaciones de la norma API 1104.
- Uniones mejores que las usadas en la actualidad para tuberías de hidrocarburos.

# CAPÍTULO II

## ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Soldadura híbrida

En la actualidad la industria requiere de procesos con mayor rendimiento, eficacia y mejor calidad. Para las áreas de soldadura, las nuevas tecnologías se caracterizan por tener una mayor velocidad y penetración. Entre estas se encuentra la soldadura HLAW, que es un proceso que combina la soldadura láser y la soldadura con arco eléctrico.

Esto se logra al juntar el rayo láser y el arco eléctrico para añadir más calor al charco de soldadura. 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. Entre las características principales que se obtienen de cada uno de los procesos están:

- El proceso con arco es más económico, con buena penetración y el uso de metal de aporte permite agregar elementos de aleación que se pierden por efectos de la soldadura.

- El rayo láser se caracteriza por la profundidad de penetración, altas velocidades de proceso y menor energía aportada con cordones muy finos.

La combinación de procesos da como resultado un proceso de soldadura que tiene las siguientes características:

- Estabilización entre los dos procesos, lo que permite una soldadura casi libre de proyecciones.
- Mayor velocidad y profundidad de penetración.
- El baño de fusión es más pequeño, se necesita de menor calor de aporte y su zona es más reducida. (1) (2)

### 2.1.1 Ventajas y limitaciones

La soldadura HLAW posee ventajas y limitaciones en el proceso; entre las cuales se encuentran:

- Permite mayor penetración y altas velocidades de producción.
- Puede ser usada en casi todas las posiciones para soldar.
- Mayor concentración de calor que produce menor distorsión.
- Produce pequeños cordones de soldadura junto con pequeñas zonas afectadas por el calor.
- Es un método que reduce el consumo de material de aporte, también se reduce el número de cordones producidos para un conjunto de múltiples pasadas.
- Permite agregar elementos de aleación y relleno de juntas que no es posible agregar con el rayo láser autógeno.
- Mejor tolerancias a cavidades que el rayo láser.
- Con el láser del HLAW permite un consistente charco a altas velocidades sin formar cordones cóncavos.
- El proceso se puede emplear para gran variedad de metales y aleaciones.

- Como es un proceso automático, se pueden obtener soldaduras precisas.

Aunque el proceso otorgue muchas ventajas, también presenta varias limitaciones, algunos ejemplos de estas son:

- Se necesita de alta precisión de alineamiento y sujeción.
- Solo se utiliza en aplicaciones mecánicas o automáticas debido al equipo que requiere.
- Debido al pequeño diámetro del láser, las uniones con cavidades mayores a  $\frac{1}{2}$  cm son difíciles de soldar.
- Debido al calor de aporte y rápido enfriamiento, las propiedades mecánicas de la soldadura se pueden presentar débiles.
- El capital invertido en la compra del equipo es alto ya que es de 10 a 50 veces más caro a comparación que el costo de procesos convencionales de soldadura como el SAW, GMAW o ERW.
- Se necesita mayor seguridad para poder proteger a los operadores del rayo láser. (1) (3)

### 2.1.2 Áreas de aplicación

Las aplicaciones que se pueden hacer con el proceso de soldadura HLAW han ido incrementando, debido a que puede unir diferentes tipos de aleaciones y a su alta productividad.

Generalmente se utiliza en zonas como la industria petrolera para tuberías de gas o aceite, en la construcción para vigas de acero, en la industria automotriz para vehículos pesados, de igual forma en equipo de minería y de construcción. (4) (5)

### 2.1.3 Mecanismo del proceso de soldadura

Para llevarse a cabo el procedimiento se puede realizar de 2 formas. En la primera, el rayo láser se usa para calentar el metal y ayudar al proceso GMAW a soldar sin necesidad de añadir velocidad o penetración.

En la segunda, se emite el rayo láser con mayor potencia para que caliente el metal y llegue a evaporarlo, dando una buena penetración y velocidad; es entonces cuando entra el proceso GMAW rellenando el hueco dejado por el láser con material de aporte y completando el cordón de soldadura (1) (Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

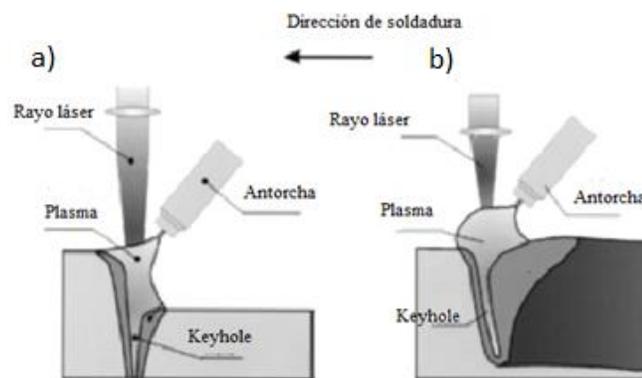


Fig. 2. 1 Mecanismos de soldadura con proceso HLAW, a) primer mecanismo soldadura HLAW y b) segundo mecanismo soldadura HLAW (1)

### 2.1.4 Parámetros en la soldadura HLAW

Dentro de los parámetros a tomar en cuenta al momento de aplicar la soldadura se encuentran:

- Poder, diámetro y orientación del láser
- Corriente del arco, voltaje y polaridad
- Velocidad de alimentación
- Diámetro del electrodo y composición

- Extensión del electrodo
- Composición química del gas protector
- Metal base
- Diseño de uniones
- Ángulo de antorcha GMAW
- Flujo de gas protector

### 2.1.5 Configuración de soldadura

Para realizar una soldadura por HLAW, se debe elegir entre dos configuraciones dependiendo del proceso que más influya en la unión. Durante la primera configuración, se aumenta el uso de la soldadura GMAW sin incrementar la velocidad ni penetración del cordón. El láser estabiliza térmicamente el material y posteriormente interviene la soldadura GMAW para realizar la unión. Previene la formación de cordones grandes de soldadura a altas velocidades de proceso y mejora la unión del metal de aporte al metal base.

Esta configuración provee beneficios en la calidad de las uniones, sin embargo tiene la desventaja de que la compra del rayo láser tiene un costo elevado y el uso de esta configuración no aprovecha el poder del mismo.

Durante la segunda configuración se incrementa la potencia del rayo láser permitiendo que a su paso por el metal, se genere un hueco conocido como "keyhole". Debido a la alta penetración y velocidad que alcanza el láser, su formación es rápida. Terminando de generar el keyhole, interviene la soldadura GMAW rellenando la junta con metal de aporte.

Durante la exposición al láser, el metal alcanza el punto de ebullición donde el gas del metal generado sale de la abertura y ayuda a aumentar la energía del láser. También se genera plasma, que es perjudicial ya que disipa y absorbe

energía del rayo que es dirigido al charco de soldadura; por lo que se remueve de la zona de soldadura con el uso de un gas protector. Este gas además de remover el plasma, sirve también como anticorrosivo y protector de gases contaminantes. (1) (2)

### 2.1.6 Factores importantes dentro del proceso de soldadura

Existen varios factores a tener en cuenta durante el proceso de soldadura.

- **Velocidad de avance**

A mayor velocidad de avance, menor será la penetración del metal. Para aumentarla se tienen dos opciones, la primera es tener menor velocidad de avance y la segunda es aumentar el poder del láser, aunque esto implique también aumentar el arco, el metal de aporte y su velocidad de aportación. (6)

- **Orientación del proceso**

Puede ser orientado en dos direcciones, ya sea por parte del arco o por parte del rayo láser, además dependiendo de la parte que interviene primero es hacia donde está orientada la soldadura.

La diferencia radica en el ángulo de la antorcha de la soldadura GMAW ya que si se coloca al principio se dice que tiene un ángulo de empuje, y si se coloca por detrás tiene un ángulo de arrastre. Otra diferencia se encuentra dentro del cordón de soldadura, si el rayo láser se encuentra enfrente, el cordón es ancho, plano y tiene largos ángulos de convergencia. En cambio si la antorcha del GMAW se encuentra enfrente, el cordón es delgado y convexo, por lo que no es regular. Sin embargo el ángulo puede ser modificado hasta el punto en que no perjudique al cordón ni al rayo láser.

- **Separación entre antorchas**

Otro factor que influye en el proceso es la separación que debe de existir entre las dos antorchas en el cabezal. Esto influye en la forma de solidificar, afecta la penetración de soldadura, se producen salpicaduras y grietas en el cordón

La separación que existe entre las antorchas va desde 0.4 a 0.6 mm, dependiendo del poder del láser, del metal base, la orientación del proceso y de la velocidad de avance. (5)

- **Poder del láser**

El poder del láser a utilizar depende de la absorción sobre un espacio del rayo láser y el diámetro de este último. Si la unión es ancha, se necesita más poder con menor penetración; en el caso contrario, si la unión es delgada, se necesita menor energía pero con una mayor penetración.

- **Gas de protección**

El principal objetivo del gas de protección es el de proteger la soldadura de inclusiones de escorias y se selecciona según sea el metal a soldar. Otros usos para el gas es evitar la oxidación en el cordón, suprimir la interferencia del plasma y proteger el cordón mientras está solidificando.

Generalmente se usan gases como helio, argón, dióxido de carbono, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno, debido a que su energía de ionización influye en la formación del arco, distribución de energía, forma, densidad y estabilidad del láser.

Dentro de los gases inertes que se emplean se encuentran el helio y el argón que tienen alta energía de ionización, conductividad térmica y efecto de supresión. El argón tiende a estabilizar la ignición del arco y ayuda a la transferencia del metal de aporte sin producir salpicaduras. Suelen usarse

mezclas de estos dos gases debido a los altos costos del helio obteniendo buenos resultados.

El dióxido de carbono y oxígeno son gases activos y se utilizan en el proceso de soldadura como gases secundarios ya que ayudan a mejorar las propiedades del cordón de soldadura, sin embargo aplicado de manera excesiva tiende a oxidarlo. (4) (7)

En el 2007 Giovanni Tanni (8) y colaboradores realizaron una investigación de la influencia de los gases de protección en las uniones hechas con el proceso HLAW. El experimento lo realizaron con un láser de CO<sub>2</sub> y una fuente GMAW con diferentes mezclas de gases de protección (Tabla 2.1)

Tabla 2. 1 Composición gases de protección (8)

Mezclas	Composición
1	30% He - 67% Ar - 3% O <sub>2</sub>
2	40% He - 57% Ar - 3% O <sub>2</sub>
3	60% He - 37% Ar - 3% O <sub>2</sub>

Determinaron que se necesita cierto porcentaje de He para disipar el plasma generado durante la formación del keyhole y que debe ser mayor a 30% de He en la mezcla de gas. También observaron que tanto un alto contenido de He y alto flujo de gas, desestabiliza el proceso, generando mala penetración y cordones delgados. Debido a esto, Giovanni y colaboradores determinaron que una mezcla de gases con 30 – 40% de He y un flujo de gas de 10 – 30 (l/min) son parámetros óptimos para su uso en la soldadura híbrida.

- **Arco de GMAW, corriente, voltaje y polaridad**

Estos cuatro factores dependen del electrodo y del gas de protección usado dentro de la antorcha GMAW, influyendo directamente en la transferencia del

material de aporte la cual puede ser globular, en spray o por corto circuito. Si el voltaje es alto, los cordones son anchos y en el caso que sea corto, los cordones son delgados y se reduce el consumo de microalambre. En cuanto a la polaridad, su manejo se emplea para estabilizar la entrada de calor entre la pieza y el cabezal de la soldadura. (4) (7)

### 2.1.7 Aplicaciones

Este proceso de soldadura es tan eficaz que tiene la capacidad para soldar una gran variedad de materiales y formas como ranuras, faldas, huecos etc. Se utiliza en la industria automotriz para la fabricación de chasis, carrocerías de trenes para la industria ferrocarrilera, en partes de hornos de fundición y en paneles para la industria naval. Debido a la gran capacidad y eficacia del proceso, es factible usarlo inclusive con grandes espesores utilizando uno o pocos cordones para lograr unir los metales, no hay la necesidad de aplicar muchos cordones ya que solo afectaría las propiedades del primer cordón. (1) (9)

El cabezal de la soldadura HLAW es grande, por lo que no llega a ciertas áreas en donde la forma geométrica es compleja como tuberías muy pequeñas, esquinas, huecos pequeños etc.

### 2.1.8 Equipo empleado para la soldadura HLAW

Para este proceso son indispensables cuatro partes del equipo como lo son: el cabezal, rayo láser, antorcha GMAW y el sistema automático.

El rayo empleado es de onda continua y su selección se basa conforme a varios factores tales como el poder, duración, penetración que se quiera obtener, absorción que tenga el metal, velocidad de avance y forma de la unión.

Se utilizan rayos láser de CO<sub>2</sub>, aunque éste solo se use para soldaduras lineales. Los rayos láser Nd-YAG pueden ser manipulados para ser movidos en diferentes direcciones debido a su corta longitud de onda, aunque esto perjudique en el poder del rayo y en la calidad de la soldadura.

Para la soldadura GMAW se necesitan de antorchas con mayor velocidad; esto es debido a que la formación del keyhole es muy rápido y por ende, el relleno de la junta con material de aporte se debe realizar a la misma velocidad.

Además el arco metálico necesita generar suficiente calor para poder fundir el material de aporte y que la antorcha resista el calor generado por el arco eléctrico y el láser.

En lo que respecta al cabezal de la soldadura híbrida, éste necesita estar limpio para evitar que interfiera o perjudique al momento de formarse el rayo láser y produzca una soldadura de mala calidad. El sistema automático es muy importante ya que controla el movimiento del cabezal y ayuda a la soldadura a darse en una o varias partes. Los defectos más comunes por un mal sistema de automatización son:

- Porosidad que se genera al formarse el vapor del metal.
- Grietas o un mal relleno de alguna cavidad.
- Cordones abultados que se producen al no haber suficiente fusión o penetración. (5) (10)

### 2.1.9 Soldabilidad de tuberías con el proceso HLAW

La unión de tuberías con el proceso HLAW se ha investigado recientemente por las características y propiedades antes mencionadas y que puede brindar a la unión.

En el año 2009 M. Fersini y colaboradores (4) investigaron la unión de tuberías por medio del proceso HLAW en aceros API X100 de 16 mm de espesor. Usaron fuentes de láser Nd: YAG y Yb: SiO<sub>2</sub>. Los parámetros que utilizaron se encuentran en la tabla 2.2.

Tabla 2. 2 Parámetros soldadura con Nd:YAG y Yb:SiO<sub>2</sub> (4)

	Nd:YAG	Yb:SiO <sub>2</sub>
Potencia láser (kW)	4.4	10
Diámetro fibra óptica (mm)	0.6	n.d
Distancia focal (mm)	120 mm	n.d
Gas	Ar - 18% CO <sub>2</sub>	Ar - 10% CO <sub>2</sub>
Material aporte	ER - 100S	ER - 100S
Flujo de gas (l/min)	25 l/min	25 l/min
Amperaje (A)	370 A	n.d
Voltaje (V)	31 V	n.d
Velocidad soldadura (pulg/seg)	0.82	0.65
Velocidad de alimentación (pulg/seg)	7.87	n.d
Diámetro hilo	1.6 mm	n.d

Descubrieron que el proceso se puede hacer de una pasada en tanto que el material base tenga una preparación de bisel, además de que el proceso Nd: YAG obtiene mejores uniones basadas en su morfología y microestructura. La dureza del material no se incrementa en la unión y las propiedades de tensión son muy similares a la del metal base. (4)

En el 2006 Retzel y colaboradores (11) realizaron un estudio de las uniones de tubería en aceros al carbono A36, analizando las propiedades resultantes y el costo estimado de las mismas.

Concluyeron que a mayor separación entre fuentes de poder en el cabezal, disminuirá su velocidad, calidad y penetración; ya que no interactúan las dos fuentes en el charco de soldadura.

En cuanto al estudio de costos se compararon contra las soldaduras convencionales en unión de tuberías (GMAW, FCAW) en cuestiones de horas hombre, de producción anual, material de aporte y consumibles. Los resultados se encuentran en la tabla 2.3 y demuestran que con el proceso híbrido se logran ahorros de 286,000 dólares al año en horas hombre, un ahorro de 218,000 dólares en material de aporte y un 10% de otros materiales consumibles, sin mencionar una reducción en la emisión de humos dañinos para el personal.(10)

Tabla 2. 3 Comparación entre procesos de soldadura (11)

	HLAW	Procesos convencionales
Horas hombre por año	600 hrs	8500 hrs
Consumo material aporte por año	7000 lbs	46000 lbs

## 2.2 Aceros alta resistencia baja aleación

Los aceros HSLA (High Strenght Low Alloy) son aceros de bajo carbono, que se componen de varios elementos aleantes en cantidades menores al 1% y formadores de carburos, nitruros y carbonitruros.

La formación de precipitados y bajos contenidos de elementos aleantes promueve la refinación de grano que brinda propiedades al acero como alta resistencia a la fluencia, baja temperatura de transición, elevada tenacidad, buena soldabilidad y resistencia a la fatiga a bajas temperaturas. (12) (13)

### 2.2.1 Composición química

La composición química de los aceros HSLA permite obtener propiedades de resistencia, tenacidad, ductilidad y soldabilidad. Todas las características se determinan por los elementos aleantes cuya principal función es endurecer la

matriz ferrítica por medio de la refinación de grano, por precipitación y por solución sólida.

Estos se seleccionan para influir en la temperatura de transformación de la austenita a la ferrita, para producir aceros de grano muy fino lo que a su vez determina sus propiedades mecánicas.

Se componen de diferentes elementos aleantes como son carbono, manganeso, silicio, cromo, níquel, cobre, molibdeno, vanadio, aluminio, titanio, niobio etc. Su clasificación se divide en:

- 1- Elementos microaleantes como V, Ti, Mo, B y Al.
- 2- Elementos sustitucionales como Si, Mn, Cu, Mo, Ni y Cr. (14)

## 2.2.2 Propiedades mecánicas

- **Límite elástico y resistencia al impacto**

Estos materiales tienen un límite elástico que suele ser mayor a 600 MPa, además de una reducción de espesor de hasta un 12.5%. Para la resistencia al impacto alcanzan valores de hasta  $400\text{J/cm}^3$ . (15)

- **Resistencia a la tensión y elongación**

Los aceros HSLA cuentan con una excelente resistencia a la tensión y elongación, con valores mayores a 500 MPa para la resistencia a la tensión y hasta un 40% de elongación. (16)

## 2.2.3 Clasificación de los aceros HSLA

Estos aceros se clasifican de acuerdo al contenido de elementos aleantes y de la microestructura que presenten (12):

- **Aceros Perlita-Ferrita:**

Con porcentajes bajos de elementos de aleación formadores de carburos o nitruros como son el vanadio, titanio o niobio, provocadores de endurecimiento por precipitación, refinamiento de grano y control de la temperatura de transformación.

- **Aceros perlíticos laminados:**

Contienen pequeñas adiciones de elementos aleantes que mejoran la resistencia, tenacidad, formabilidad y soldabilidad; todo en una matriz perlítica.

- **Aceros ferríticos aciculares**

Aceros con bajos contenidos de carbono que tienen muy buenas propiedades de esfuerzo a la cedencia, soldabilidad, formabilidad y buena tenacidad.

- **Aceros Dual-Phase**

Presentan una fase martensítica dentro de una matriz de ferrita, la cual provee una buena combinación de ductilidad y alta resistencia a la tensión.

- **Aceros resistentes al agrietamiento**

Con bajos contenidos de azufre y carbono con inclusiones y segregaciones de manganeso y cobre; éste último con contenidos mayores al 0.2%. (10)

## **2.3 Aceros API**

Los aceros API (American Petroleum Institute) son una aleación usada en la industria petrolera, especialmente en la fabricación de tubos de conducción de hidrocarburos. Dentro de sus características principales se pueden destacar las excelentes propiedades mecánicas y de soldabilidad que generalmente se encuentran a temperaturas bajas.

Se componen de una estructura ferrita acicular – bainita – martensita, son usados en las tuberías por su alta resistencia, que es posible aumentarla con refinamiento de grano, precipitaciones de niobio y vanadio, o por la presencia de dos fases. Se usan a presiones de 100 atmósferas y además tienen muy bajos contenidos de carbono.

Son aceros ferríticos con molibdeno, conocidos por ser resistentes y una estructura bainítica de 50% o más. Se buscan aceros que contengan manganeso, níquel, molibdeno, cobre y boro que contengan ferrita como fase principal y como secundaria una compuesta de bainita con martensita.

Hay diferentes efectos dependiendo del contenido de elementos, por ejemplo si se incrementa el contenido de manganeso se eleva la resistencia a la tensión, refina los granos de ferrita y de bainita, aparte de que al momento de formarse la segunda fase se da el incremento de resistencia a la tensión y al impacto.

Al agregar níquel se incrementa el porcentaje de la fase bainítica, aparte de refinar los granos de ferrita-bainita. Para esto, los agregados de carbono, niobio y vanadio deben ser muy pequeños. Estos agregados producen una dispersión muy fina de carburos de aleación. Los carburos y agregados reducen el efecto de disminución de tenacidad y aumenta la resistencia del material hasta un 50% al refinar el tamaño de grano. (14)

Para obtener las propiedades de los aceros el procesamiento debe ser controlado, para esto se usan las técnicas de rolado controlado y enfriamiento acelerado.

La laminación controlada consiste en efectuar simultáneamente las operaciones, de modo que el producto saliente de conformado se den y a los

niveles deseados de resistencia y tenacidad. El calor necesario es el mismo que en la laminación tradicional y se elimina el tratamiento térmico subsiguiente.

Para lograr esto, primero se utiliza un sistema de fabricación, en donde primero se elige y mantiene una composición química del metal; seguido se traza un plan de tiempo-temperatura-deformación, a fin de obtener el objetivo buscado. Entre los objetivos se encuentra la producción de un grano fino, controlar la naturaleza, tamaño y distribución de las fases, reacciones que producen el endurecimiento, precipitación y solubilización para alcanzar niveles aceptables de ductilidad. Para todo esto se debe controlar la estructura de partida, deformación y temperatura durante el proceso así como enfriamientos de las condiciones de trabajo. (13) (17)

El enfriamiento acelerado es un proceso excelente ya que permite la producción de tuberías sin un tratamiento posterior de austemperizado; permitiendo de esta manera, modificar la composición y estructura. La desventaja al realizar un enfriamiento acelerado es que tiene mayores costos y complicaciones metalúrgicas, además el control de sistemas y homogeneidad cambian con la velocidad requerida de enfriamiento. (12)

### 2.3.1 Soldabilidad de los aceros API

Como se mencionó anteriormente, los aceros API son aceros que contienen microaleantes como molibdeno, manganeso, niobio etc. La composición química que presentan brinda ciertas características para que la zona afectada por el calor (ZAC) no presente fragilidad sino más bien altas resistencias, además, de que no se presente un crecimiento laminar. Las soldaduras de estos aceros pueden alcanzar resistencias mayores a 500 MPa con cordones de soldadura que sean resistentes a la fractura a bajas temperaturas y una alta resistencia a fragilización por hidrógeno.

- **Metal base**

En la parte del metal base se pueden presentar diferentes defectos que se deben corregir o evitar tales como fisuras retardadas, que son las que presentan condiciones de fragilidad por hidrógeno. Se forman por factores como:

- Presencia de cargas.
- Temperaturas extremas que van desde -100°C hasta 200°C.
- Que se presente una fuente de hidrógeno durante la soldadura.
- Tener una microestructura susceptible.

Debido a las altas velocidades de enfriamiento se puede llegar a formar una fase martensítica y darse fragilidad por hidrógeno.

La ecuación 1 se utiliza en base a la composición química del acero, para saber el grado de soldabilidad del material.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Ecuación 1. Ecuación para obtención de carbono equivalente **(1)**

- **Zona afectada por el calor (ZAC)**

• **Resistencia en la zona afectada por el calor**

Para comprobar la tenacidad en la zona afectada por el calor se utilizan ensayos tipo Charpy. Esta zona es producto por un enfriamiento y calentamiento acelerado. Su resistencia es menor a la del metal base, que tiene una estructura compuesta de ferrita y bainita de grano fino. La tenacidad de la ZAC se ve afectada por el calor producido, ya que si al haber exposición a éstese produce un crecimiento de grano y además puede llegar a producir bainita superior. (18)

Mientras más elementos aleantes tenga el acero, mayor es la temperatura de transición para fases ferríticas y martensíticas. Se agrega titanio para controlar el crecimiento del grano a altas temperaturas, ya que forma nitruros de titanio que impiden el crecimiento de grano y mejora la resistencia al impacto.

La tenacidad también puede verse afectada durante su procesamiento en el laminado controlado ya que bajas temperaturas de recalentado durante el rolado mejoran la tenacidad de la ZAC.

Para determinar estas resistencias existen nuevas tecnologías desarrolladas para explicar mejor este efecto, teniendo mejores resultados que puede determinar cuándo sucederá la fractura, a qué cargas, rapidez de carga, temperatura y máximo tamaño de defecto (19).

- **Apertura de desplazamiento de rotura**

Se define como la separación de la punta de la fractura durante la carga. La apertura máxima aparecerá antes de que la fractura cause una falla. Para observar este defecto se realizan pruebas que son cargadas antes de la rotura y ensayadas a diferentes temperaturas. En caso de las soldaduras, se corroe la ZAC y de ese punto se hace la muestra. La presión interna crea tensiones circunferenciales que incrementan con los esfuerzos producidos durante la soldadura y con esfuerzos al estar en el campo. Estos esfuerzos pueden ser iguales en magnitud al límite elástico. Bajo estas condiciones, la tubería absorbe todo el impacto. (20)

- **Zona de soldadura**

En las tuberías con aceros API, el producto final queda compuesto de 2/3 de metal base y 1/3 de metal de aporte, así que la composición química del metal base es importante para asegurar las propiedades mecánicas del tubo.

Se quiere lograr una estructura ferrítica fina acicular para una mayor tenacidad, aunque también una estructura combinada de ferrita y bainita superior para lograr una combinación de propiedades de dureza y tenacidad. Hay que cuidar el contenido de niobio ya que puede llegar a formar precipitados que incrementen la dureza en el cordón de soldadura.

Se prefiere que haya mayores contenidos de molibdeno ya que promueve una mejor tenacidad; o el vanadio y el titanio ya que promueven la formación de ferrita acicular y bainita.

### 2.3.2 Propiedades mecánicas

- **Esfuerzo ultimo a la tensión**

Para obtener el esfuerzo último a la tensión se realiza un ensayo llamado hidrostático de campo, el cual no permite que se formen fracturas innecesarias o falla durante el tubo de acero en campo. Este ensayo requiere del uso del tubo al 125% de su capacidad por un tiempo de 8 horas para ser aceptado.

Es necesario que se hagan pruebas al tubo a estas condiciones ya que debido al terreno, a las grandes longitudes y altas presiones de hidrocarburos, el tubo se encuentra sometido a muchas condiciones que pueden hacerlo fallar.

El ensayo hidrostático de campo también tiene el propósito de revelar defectos importantes que no se han identificado en la soldadura, ya sea alguna fractura o falla, porosidad etc. Además de que brinda datos de resistencia a la tensión y límite elástico. (19)

- **Dureza y tenacidad**

En tuberías es frecuente usar perfiles de dureza para evaluar esta propiedad en la soldadura con el fin de evitar fragilidad por hidrógeno, ya que mientras más dureza, más susceptibilidad.

La dureza por precipitación se puede presentar en la ZAC ya que al momento de soldar se recurre a la aplicación de múltiples cordones de soldadura. Elementos como niobio y vanadio son disueltos a la máxima temperatura alcanzada por la soldadura y forman precipitados durante el calentamiento al reforzar el cordón. (17)

También deben tener una excelente tenacidad debido al uso que se le da en ambientes difíciles. Conociendo los ambientes a los que se trabaja, también es importante conocer en qué momento se dan las fallas, cómo reacciona el tubo ante una situación así y qué hacer para prevenir casos de este tipo. Es por eso que se hacen pruebas para medir estos parámetros y con ello se obtienen datos como:

- Falla por fragilidad
- Iniciación de fractura
- Control de propagación de grietas

- **Falla por fragilidad**

Se mide de acuerdo a un ensayo de impacto por caída (DWTT por sus siglas en inglés) que se aplica para poder predecir en qué momento puede ocurrir la falla por fragilidad. El ensayo se usa en un rango de temperaturas que va desde - 20°C hasta 60°C.

- **Inicio de la fractura**

Para un tubo con dimensiones, presiones y propiedades dadas, una falla crítica de cierto tamaño, puede llegar a existir por la pared en donde el defecto y falla comienzan a extenderse. Se hacen estudios que también predicen el tamaño de la falla, relativo a la tenacidad según ensayos Charpy para específicas condiciones de cargas. La fractura en sí depende solo de cómo se haga el flujo de cargas.

Para evitar que se presente una falla se realizan pruebas para medir tenacidad al 80% de capacidad máxima para observar la presencia de fracturas en el material. (20)

- **Control de propagación de las grietas**

Para tener un control en la propagación de grietas se utiliza el ensayo Charpy. Con este ensayo se observa la propagación de grietas evitando así la propagación de la misma. (20)

### 2.3.3 Producción de tuberías

El diseño y construcción de tuberías se basa en 3 parámetros importantes como lo son la fuerza, dureza y soldabilidad, agregando factores que se pueden dar en especificaciones y que brindan al tubo características de:

- Resistencia para operar a altas presiones mientras se encuentre en condiciones seguras y estables.
- Dureza suficiente como para asegurar que la fractura inicial, propagación y falla final ocurran a magnitudes ya predichas y aceptables a fin de poder evitarlas.
- Que no ocurran fracturas por fragilización por hidrógeno con métodos rápidos de soldadura, aparte de que sean química y dimensionalmente compatibles para evitar las mismas.
- Que las características de la tubería se encuentren dentro de las especificaciones API 5L. (13) (15)

Para la unión de tuberías con aceros API se utiliza el proceso UOE (doblado "U", soldado "O" y estirado "E"). El proceso parte con la placa que empieza con un doblado en U para dar forma de tubo, después se unen los extremos por medio de soldadura en forma externa e interna y al final se estira el tubo. Este proceso aplica mucho calor con temperaturas mayores a 500° C al momento de la unión por lo que produce un ablandamiento en la zona de soldadura para

aceros de alta resistencia, sin embargo este efecto es deseable para aceros API ya que permite conservar sus propiedades en la unión. También se pueden agregar elementos aleantes como Ni, Mo, N, V que evitan un debilitamiento excesivo en el cordón de soldadura.

Los investigadores Grünewald y colaboradores (21) realizaron en el 2010 una investigación de la unión de aceros API con el proceso HLAW. Para el experimento usaron aceros API X70 y X65 con espesores de 10 mm y unidos con un equipo híbrido CO<sub>2</sub> - GMAW a una potencia de láser de 8 Kw. Al realizar el análisis de las placas unidas de X65 observaron que mientras se aplique mayor velocidad de soldadura el cordón se hace más delgado y no presenta penetración completa. Los valores de dureza en las uniones se encontraban dentro de las especificaciones (200 – 245 HV) para las uniones de los aceros API, al igual que su resistencia a la tensión y límite elástico.

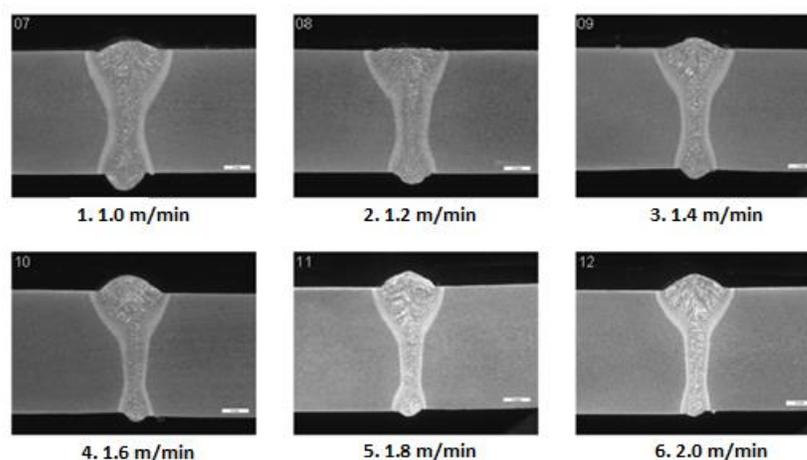


Fig. 2. 2 Penetración a diferentes velocidades de soldadura.

Las uniones con el acero API X70 mostraron de igual manera dureza, resistencia a la tensión y límite elástico dentro de las especificaciones requeridas. Para finalizar ellos determinaron que para espesores mayores a 10 mm es necesario hacer la unión en varias pasadas o preparar mecánicamente el metal antes de ser soldado, mientras que para espesores menores a 10 mm

y con una potencia de 8 Kw las uniones pueden ser de una pasada y sin preparación mecánica.

## **2.4 Soldadura GMAW**

La soldadura por arco metálico es un proceso que emplea un arco para producir la unión entre el electrodo consumible y el metal base. El proceso se realiza con un gas protector que se suministra externamente y sin aplicar presión.

Todos los metales de importancia comercial, como el acero al carbono, acero de baja aleación y alta resistencia mecánica, acero inoxidable, aluminio, cobre, titanio y aleaciones de níquel se pueden soldar en cualquier posición escogiendo el gas protector, electrodo y variables de soldadura apropiadas. (22)

### **2.4.1 Proceso de soldadura**

El proceso consiste en un arco que debido a la polaridad invertida del proceso, funde el metal de aporte continuo, el cual es depositado sobre el metal base a través del arco. El gas de protección fluye por el arco, evitando que se introduzcan contaminantes y que se formen escorias perjudiciales para la soldadura (Ver fig. 2.3).

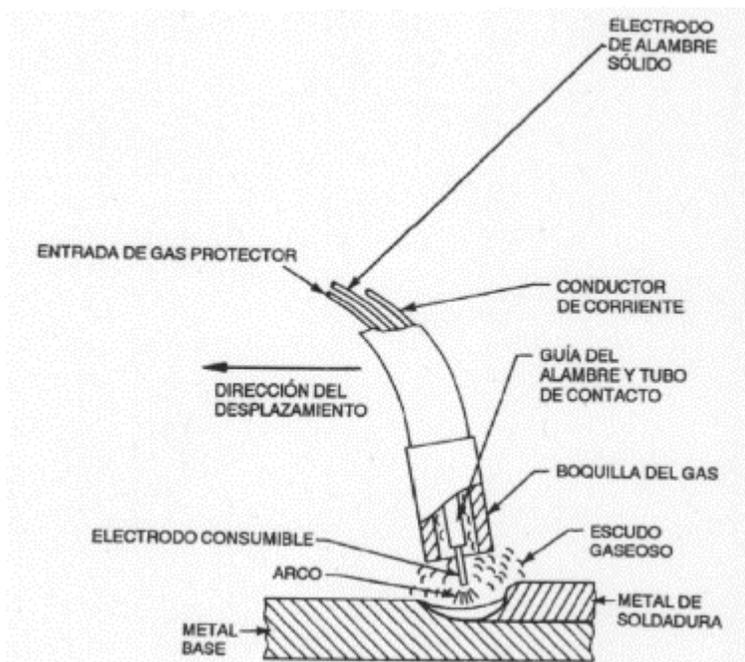


Fig. 2. 3 Representación esquemática del proceso GMAW (23)

#### 2.4.2 Mecanismos de transferencia

Durante el proceso de soldadura GMAW existen tres formas de transferencia del metal de aporte hacia el metal base logrando así la unión de los metales (23).

- **Transferencia por cortocircuito**

Este es el proceso que abarca la más baja corriente de soldadura y diámetros de electrodos. La transferencia se produce cuando un charco de soldadura pequeño es transferido a la unión al tocar el electrodo con el metal base. Cuando el alambre toca el metal base, la corriente aumenta, se inicia el arco y la punta se funde.

La rapidez con la que aumenta la corriente debe ser suficiente para minimizar salpicaduras causadas por la separación violenta de la gota de metal del electrodo hacia el metal base. Aquí el gas protector tiene una influencia

importante ya que puede afectar el tamaño de gota y la duración del corto circuito.

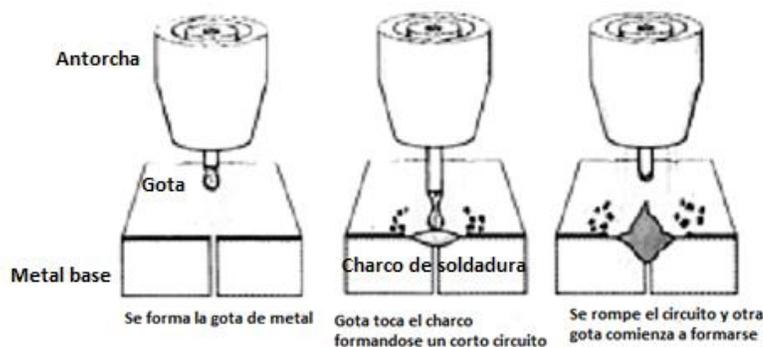


Fig. 2. 4 Esquema de transferencia por cortocircuito

- **Transferencia globular**

Se lleva a cabo cuando la corriente es relativamente baja, independiente del gas protector. Es una forma similar al cortocircuito, la diferencia radica en que el tamaño de gota es mayor a la del diámetro del electrodo, además la gravedad actúa como forma de transferencia, no se pega el electrodo al metal base.

Debido a que la gravedad actúa sobre esta forma de transferencia, este proceso solo es útil en posición plana aunque se pueden aumentar las corrientes y darse en forma axial, pero es necesaria protección de gas inerte.

- **Transferencia por spray**

Para esta forma de transferencia se necesita de una corriente continua con un electrodo positivo y un nivel de corriente por encima del valor crítico, conocido como corriente de transición. Produce un flujo altamente direccional de gotas aceleradas por la fuerza del arco que alcanzan velocidades que vencen los efectos de la gravedad. Como se producen gotas muy pequeñas no hay cortocircuito y las salpicaduras son insignificantes.

Se usa un gas de protección de argón o mezclas de gases con altos contenidos de argón ya que permite una transferencia de rocío axial muy estable y libre de salpicaduras.

Sirve para soldar una gran variedad de aleaciones, sin embargo es difícil aplicar a láminas de poco espesor por las corrientes tan altas que emplea para producir el arco de rocío, ya que puede producir quemaduras y distorsión.

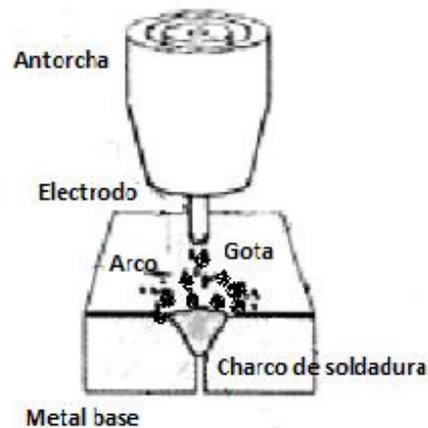


Fig. 2. 5 Esquema transferencia por espray

### 2.4.3 Variables del proceso

Durante el proceso de soldadura GMAW se deben considerar diferentes variables como (23) (22)

- Corriente de soldadura
- Polaridad
- Voltaje del arco
- Velocidad de soldadura
- Extensión del electrodo
- Orientación del electrodo
- Posición de la unión que se va a soldar
- Diámetro del electrodo
- Composición y tasa de flujo del gas protector

- **Corriente de soldadura**

Esta variable cambia con la velocidad de alimentación del electrodo y la rapidez de fusión del metal base. Por lo tanto a mayor velocidad de alimentación menor corriente de soldadura.

- **Polaridad**

Este término describe la conexión entre la pistola de soldadura y las terminales de una fuente de potencia de corriente continua. Si el cable de potencia de la pistola se conecta a la terminal positiva, la polaridad se designa como corriente continua con el electrodo positivo y se le da el nombre de polaridad inversa. Esta es la forma en que se usa la soldadura GMAW ya que produce un arco estable, transferencia de metal uniforme, pocas salpicaduras, buenas características del cordón de soldadura y máxima penetración.

- **Voltaje del arco**

El voltaje depende de la longitud del arco así como la composición y dimensión del arco, gas protector, longitud del electrodo, entre otras. Permite expresar la longitud física del arco en términos eléctricos.

Cualquier reducción de voltaje produce un cordón más plano e incrementa el ancho de la zona de fusión. En cambio un exceso de voltaje causa porosidad, salpicaduras y socavamiento.

- **Velocidad del arco**

Es la tasa de movimiento lineal del arco a lo largo de la unión que se va a soldar. Si todas las demás variables son constantes, se da una máxima penetración a una velocidad intermedia. Si se reduce la velocidad, se incrementa la de posición del metal de aporte y a muy bajas velocidades se reduce la penetración. Si se aumenta la velocidad, se aumenta la temperatura y

por ende el aporte térmico al metal base, lo cual puede ocasionar un socavamiento en éste.

- **Extensión del arco**

Es la distancia entre el extremo del tubo de contacto y la punta del electrodo. Un aumento en la extensión del electrodo produce un aumento en su resistencia eléctrica. El calentamiento por resistencia, a su vez, hace que se eleve la temperatura del electrodo lo que aumenta ligeramente la tasa de fusión del mismo. A mayor resistencia eléctrica hace que aumente la caída de voltaje entre el tubo de contacto y la pieza de trabajo, cosa que es detectada por la fuente de potencia, la cual compensa este aumento reduciendo la corriente.

Esto reduce la tasa de fusión del electrodo y permite que se acorte la longitud física del arco. En consecuencia, el metal de aporte se depositará en un cordón de soldadura angosto.

- **Orientación del electrodo**

La orientación del electrodo con respecto a la unión por soldar afecta la forma y la penetración de la franja de soldadura, este efecto sobre la franja es mayor que el del voltaje del arco o el de la velocidad de recorrido. La orientación del electrodo se describe de dos maneras:

- Relación entre el eje del electrodo y la dirección del desplazamiento.
- Ángulo entre el eje del electrodo y la superficie adyacente.

Cuando el electrodo apunta en dirección opuesta a la dirección de desplazamiento, la técnica se denomina soldadura reversible con ángulo de arrastre y cuando el electrodo apunta en la dirección del desplazamiento, la técnica es soldadura con ángulo de ataque. Cuando el electrodo se saca de la perpendicular dándole un ángulo de ataque y todas las demás condiciones se mantienen sin alteración, la penetración disminuye y el cordón de soldadura se hace más ancho y plano.

- **Posiciones en la unión para soldar**

La soldadura vertical descendente afecta la superficie y penetración de la misma. El charco de soldadura tiende a fluir hacia el electrodo y precalienta el metal base, sobre todo en la superficie. Esto produce una zona de fusión irregular llamada depósito secundario. Al aumentar el ángulo de inclinación, la superficie media de la soldadura adquiere una depresión, la penetración disminuye y el ancho del cordón aumenta.

La soldadura vertical ascendente afecta el perfil de la zona de fusión de la superficie de la soldadura. La fuerza de gravedad hace que el charco fluya hacia atrás y se retrase respecto al electrodo. Los bordes de la soldadura pierden metal ya que fluye hacia el centro.

Al aumentar el ángulo de inclinación aumenta también el refuerzo, la penetración y el ancho del cordón de soldadura disminuye. Los efectos son exactamente opuestos a los de la soldadura cuesta abajo. Si se emplean corrientes de soldadura elevadas, se reducirá el ángulo máximo que puede usarse.

- **Tamaño del electrodo**

El tamaño del electrodo influye en la configuración del cordón de soldadura. Un electrodo de mayor tamaño requiere una corriente más alta que un electrodo pequeño con las mismas características de transferencia de metal. Las corrientes altas, a su vez, producen mayor fusión del electrodo y depósitos de soldadura más grandes y fluidos. Otra consecuencia de las corrientes altas es el aumento en la tasa de deposición y en la penetración. No obstante, la soldadura en posición vertical por lo regular se efectúa con electrodos de menor diámetro y con corrientes más bajas.

- **Gas de protección**

El gas sirve para la protección contra escorias durante el arco y fusión del metal. Este puede ser de muchas variedades y se usan para estabilizar el arco, como también proteger el charco de la oxidación de la atmósfera y demás contaminantes. Se selecciona dependiendo del metal a soldar, el modo de transferencia, la calidad de la soldadura y de su costo. El argón es el gas más comúnmente usado, en parte porque se puede usar en mezclas de gases, porque ofrece un ambiente inerte para prevenir la oxidación del metal mientras solidifica y se enfría. Su baja ionización ayuda a asegurar un fácil flujo de electrones y provee un arco estable y buena penetración.

#### 2.4.4 Ventajas y limitaciones

El proceso GMAW ofrece muchas ventajas entre las cuales destacan (22)  
(23)

- Es la soldadura más limpia en la industria ya que no produce escoria, sólo un polvo de óxido que es muy fácil de retirar después del trabajo. La presentación es excelente y genera menos salpicaduras que otros sistemas.
- Alta velocidad de soldadura, ya que la alimentación se realiza mediante un alambre continuo y no es necesario interrumpir el proceso para cambiar el electrodo, lo que mejora la productividad.
- Produce soldadura con bordes más cerrados y con acceso a puntos difíciles en diferentes posiciones. También permite reducir el espesor del cordón en relación con otros procedimientos de soldadura, lo que representa un ahorro en material de aporte y tiempo de proceso.
- Es especial para la producción en serie ya que por su eficiencia reduce en gran medida el costo total de la operación de soldadura, el desperdicio de material y simplifica las operaciones de limpieza.
- Obtención de uniones menos sensibles a la corrosión, debido a que al gas protector impide el contacto entre la atmósfera y el charco.

- Se puede trabajar en todas las posiciones, independiente de la forma en que se realice el proceso.
- Capacidad de ser utilizado para soldar la mayor parte de los metales industriales como aluminio, magnesio, aceros al carbono, aceros inoxidable, cobre, níquel, titanio y otros.

También presenta algunas limitaciones para sus usos tales como (23):

- El arco de soldadura debe protegerse de corrientes que puedan alejar o soplar el gas protector. Esto puede limitar la aplicación a exteriores.
- Altos niveles de radiación y la intensidad del arco pueden producir un charco de soldadura y una zona afectada por el calor grande, afectando sus propiedades mecánicas.
- Costo elevado en las fuentes de poder
- Las distancias entre el equipo de soldar y el lugar de trabajo son limitadas
- Dificultad para aplicaciones en donde la soldadura tiene un difícil acceso.

#### 2.4.5 Calidad de la soldadura

Se debe controlar la calidad y propiedades de las uniones por soldadura GMAW siguiendo procedimientos de inspección de ciertos fenómenos que pueden ocurrir en las uniones como (15):

- **Pérdida de ductilidad por hidrógeno**

Se presenta el agrietamiento inducido por fuente de hidrógeno, aunque no es muy probable que suceda debido a que el proceso GMAW no usa fundentes o recubrimientos, no obstante se debe tener en cuenta varias fuentes de hidrógeno como por ejemplo el gas de protección para asegurarse que tenga un nivel de humedad suficientemente bajo; el aceite, la grasa y demás compuestos que se encuentran en el electrodo o el metal base pueden convertirse en fuentes potenciales de absorción de hidrógeno en el metal de soldadura; o

también se pueden introducir contaminantes durante la manipulación en las instalaciones.

- **Contaminación con oxígeno y nitrógeno**

El oxígeno y nitrógeno pueden representar problemas más graves que el hidrógeno, ya que si el gas protector no es totalmente inerte o no protege debidamente, estos elementos se puede absorber con facilidad de la atmosfera. Tanto los óxidos como los nitruros pueden reducir la tenacidad del cordón de soldadura.

- **Fusión incompleta**

El menor aporte de calor característico de la modalidad de GMAW en cortocircuito da como resultado una buena penetración en el metal base. Esto es deseable en materiales de espesor delgado, pero si la técnica de soldadura no es la apropiada el resultado puede ser una fusión incompleta, sobre todo en la raíz o a lo largo de las caras del cordón. De igual forma se pueden presentar defectos como socavados, poros, penetración incompleta, grietas.

## **2.5 Soldadura LBW**

### **2.5.1 Proceso soldadura LBW**

Es un proceso de unión por fusión que produce la coalescencia de material gracias al calor generado por un haz de luz coherente monocromática que incide sobre la unión a soldar. El rayo se dirige a través de elementos ópticos planos, como espejos y lo enfoca en un punto pequeño de la pieza de trabajo siendo así un proceso libre de contacto. En general se emplean gases de protección para evitar la oxidación del charco o inclusiones de escoria al mismo (24).

### 2.5.2 Soldadura por agujero guía o “keyhole”

Cuando se alcanza una densidad de potencia alta, la soldadura con una penetración profunda se logra mediante la formación de un agujero guía. Para esto se necesita de un nivel de densidad de potencia tan intenso que el área sobre la que incide el rayo se funde y vaporiza. Cuando el material en el punto de interacción se funde y vaporiza, la presión del vapor crea una cavidad profunda llamada “keyhole”. Este agujero consiste en una columna de vapor rodeada por un cilindro delgado de metal fundido. Cuando el rayo atraviesa la pieza de trabajo, la presión del vapor del metal generado mantiene el keyhole y el metal fundido que lo rodea fluye en dirección opuesta a la de soldadura, solidificándose rápidamente y formando una zona angosta de fusión que es la unión soldada.

El intenso calor generado por el rayo láser funde la pieza de trabajo y una parte del metal líquido se vaporiza. Una parte del gas generado se ioniza convirtiéndose en plasma y su formación es perjudicial ya que absorbe y atenúa el láser, por esto se hace necesario controlarlo o suprimirlo, ya que de lo contrario el rendimiento de soldadura disminuye y la profundidad de penetración se reduce. La eliminación del plasma se realiza con un chorro de gas que no permita que perjudique la zona de soldadura (21) (25).

### 2.5.3 Tipos de láseres

Existen diferentes tipos de láseres, dependiendo de su intensidad (24).

Los láseres de estado sólido emplean una impureza como medio activo. Un ejemplo es el ion neodimio que se utiliza como impureza en una varilla de vidrio o bien de un cristal YAG. Su longitud de onda se determina por un cilindro con

extremos pulidos que sirven de superficie reflejante y se excita por una lámpara de criptón o xenón muy intensa.

Las características del láser Nd:YAG dependen del método de excitación ya que puede ser continuo o de pulsos repetitivos. Debido a las bandas de frecuencia angosta que exhiben los rayos láser de Nd: YAG facilita su operación de onda continua a temperatura ambiente. El vidrio tiene también características deseables como material de soldadura LBW.

Los láseres de gas como los rayos láser de CO<sub>2</sub> son los más eficientes del que se dispone actualmente para el proceso LBW de alta potencia. Este tipo de láser emplea una mezcla de gases constituida principalmente por nitrógeno y helio como medio, que contiene un pequeño porcentaje de dióxido de carbono y usan una descarga eléctrica para excitar el medio y la molécula de CO<sub>2</sub>. El calor del gas resultante se controla haciendo fluir continuamente la mezcla de gases a través del área de la cavidad óptica, por lo cual el láser de CO<sub>2</sub> se caracteriza de acuerdo al sistema de flujo, ya sea axial lento, axial rápido o transversal.

El sistema de flujo axial lento es el más simple ya que el gas fluye en la misma dirección que el eje óptico del resonador láser y el campo eléctrico de excitación. Para el de flujo axial rápido sus componentes están dispersos de manera similar a los del láser de flujo axial lento, con la excepción de que este sistema emplea un ventilador o turbo bomba para circular el gas del láser a alta velocidad por la región de descarga y los intercambiadores de calor correspondientes. Los rayos transversales operan circulando gas continuamente en dirección perpendicular al eje de la cavidad resonante por medio de un ventilador de alta potencia al tiempo que se mantiene una descarga eléctrica perpendicular tanto a la dirección de flujo de gas como al eje óptico del rayo láser (24).

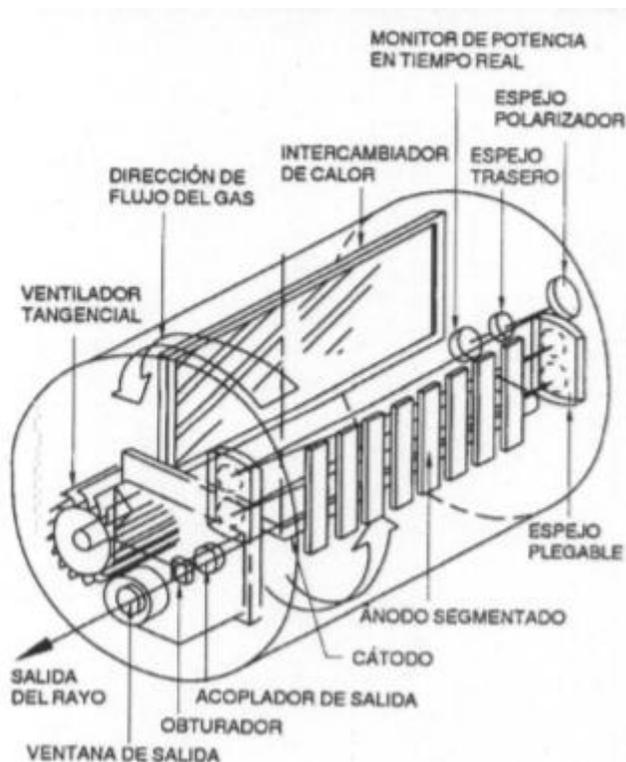


Fig. 2. 6 Diagrama de un láser de flujo transversal

#### 2.5.4 Propiedades soldadura LBW

- **Óptica para la transmisión y enfoque del rayo**

El láser debe enfocarse a un punto de diámetro pequeño a fin de producir la elevada densidad de potencia requerida para soldar. El tamaño de punto puede variar dependiendo del diseño del óptico y de la distancia focal. Así la densidad de potencia variará en forma inversamente proporcional a la distancia focal y la profundidad variará directamente con la distancia focal (24).

- **Sistema de enfoque**

Los sistemas de estado sólido por lo regular utilizan óptica de transmisión para enfocar el láser sobre la pieza de trabajo, en tanto que los de mayor potencia utilizan una óptica reflejante. Los espejos suelen ser de metal y se

enfrian con agua para soportar las elevadas temperaturas. Pueden ser de forma desnuda o recubierta con algún metal que incremente su eficiencia (24).

- **Calidad del rayo**

Es una medida de la intocabilidad del láser, la cual es función del modo transversal del haz y del grado de alteraciones producido por la óptica. La energía radiante que va de un extremo de la cavidad resonante del láser hasta el otro forma un campo electromagnético intenso, que perjudica la calidad del rayo. Las irregularidades en el medio láser pueden estar más en común con el flujo transversal que con las de flujo axial, lo que afecta la calidad del rayo. Otro factor que influye es la temperatura ya que afecta la calidad del rayo y el cordón de soldadura (25).

- **Polarización del rayo**

Se ha demostrado que la velocidad de avance del rayo depende de la alineación del plano de polarización del láser a la dirección del movimiento de este mismo. Se obtiene mayor velocidad con geometrías angostas cuando el plano de polarización coincide con la dirección de soldadura; en cambio sí es en dirección perpendicular, la velocidad de avance será más lenta. Debido a esto se utiliza la polarización circunferencial para producir resultados consistentes sin importar la dirección de soldadura (24).

- **Conmutación del rayo**

Es la capacidad de transmitir el láser a través de la atmósfera, a distancias de hasta varios metros, lo que permite utilizar una sola fuente de láser para operar varias estaciones de trabajo. Es de gran utilidad ya que a ayuda a incrementar su aprovechamiento (24).

### 2.5.5 Ventajas y limitaciones

El proceso de soldadura láser posee varias ventajas entre las que se encuentran: (24):

- Brinda el aporte térmico mínimo requerido para fundir el metal base, con esto se reducen los efectos negativos en la zona afectada por el calor y produce menos distorsión por el calor generado.
- Reducción en el tiempo de soldadura.
- No se requieren de electrodos, así el cordón queda libre de contaminación, marcas o daños por ser un proceso sin contacto.
- Se puede utilizar para un área pequeña, lo que permite unir componentes de menor tamaño.
- Es posible unir una gran diversidad de metales y aleaciones.
- Permite realizar soldaduras repetitivas en gran cantidad y en tiempos cortos.

Dentro de las limitaciones se encuentran:

- Las uniones se deben realizar con mucha exactitud y alineamiento con respecto al cabezal de soldadura.
- Los espesores que se pueden unir están limitados, no mayores a 19 mm.
- Algunos metales contienen alta reflectividad o conductividad térmica por lo que afecta su soldabilidad.
- Por su alta tasa de enfriamiento es de esperar un cierto grado de porosidad y dureza en el cordón de soldadura.

### 2.5.6 Aplicaciones

La soldadura con rayo láser se está usando en una amplia variedad de aplicaciones, como en la producción de transmisiones automotrices y unidades de embrague de acondicionadores de aire. También en la producción de

relevadores y sus recipientes, así como para sellar dispositivos electrónicos y estuches de marcapasos cardíacos. Otras aplicaciones son la soldadura continua de tubos de aluminio para ventanas térmicas y puertas de refrigeradores (26).

Entre las aplicaciones de la soldadura con láser que más éxito han tenido están la soldadura de componentes de transmisiones como engranes y cajas de embrague, para la industria automotriz. Las uniones de LBW de tales ensambles ofrece muchas ventajas, por ejemplo el bajo aporte de calor del láser no afecta las zonas pre-endurecidas adyacentes a la soldadura. Además el bajo aporte térmico produce un mínimo de distorsión lo que hace posible soldar estampados de precisión con las dimensiones finales. La facilidad de automatización y la capacidad para soldar a alta velocidad, hace al proceso con láser ideal para aplicaciones de producción de la industria automotriz.

Debido a su rápido enfriamiento puede causar fases quebradizas o agrietamiento en caliente. En la mayor parte de los casos estos problemas pueden resolverse con precalentamiento o bien empleando láseres con diferente longitud de onda para reducir las tasas de enfriamiento, otra opción es cambiar a un material más apropiado (27).

## **2.6 Soldadura por Arco Sumergido**

El proceso de soldadura por arco sumergido (SAW) produce la coalescencia de los materiales por medio del calentamiento entre el electrodo de metal desnudo y el de trabajo. En el momento de la soldadura, el arco y metal de aporte se encuentra dentro de un fundente que se deposita sobre el área de trabajo. No se aplica presión y el metal de aporte viene del electrodo o de varillas exteriores y de gránulos metálicos (28).

Este proceso es conocido para hacer uniones de tope entre placas y construcción plana, ondulada, mamparas, vigas de doble T, etc. El proceso depende completamente del fundente para estabilizar el arco, así como sus propiedades mecánicas y la calidad de la soldadura (29).



Fig. 2. 7 Proceso de soldadura SAW para componentes marítimos **(20)**

### 2.6.1 Proceso de soldadura

Se inserta el electrodo en un montículo de fundente que cubre el metal a soldar. Se inicia el arco y se alimenta con un alambre a velocidad controlada que se desplaza a velocidad constante.

Al iniciar el arco, se consumen el electrodo y fundente los cuales se distribuyen continuamente sobre la unión protegiendo la atmósfera. El gas producido durante la soldadura queda atrapado en el fundente que protege por completo el metal fundido. El fundente protege y disuelve las impurezas del metal base, que flotan en el charco y agrega por el fundente elementos de aleación como vanadio, cesio, cobalto, molibdeno, aluminio, zirconio, cromo, níquel, manganeso, tungsteno etc. Se enfría primero el fundente y el charco después. Se elimina la escoria al querer realizar otro cordón de soldadura. (22)

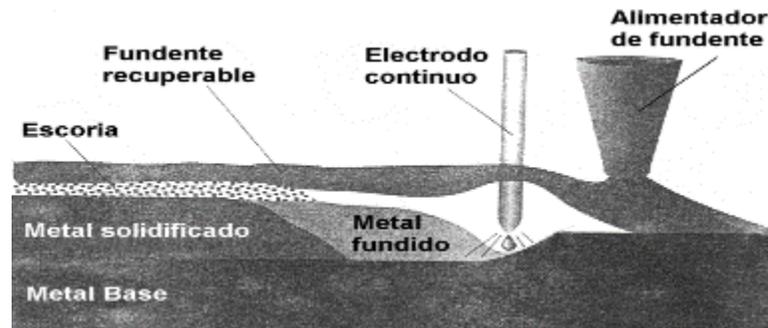


Fig. 2. 8 Esquema del proceso SAW (28)

Para realizar una unión con este proceso es necesario tomar en cuenta ciertos factores como son:

- Composición química y propiedades mecánicas en depósito final.
- Espesor del metal base que se va a soldar.
- Accesibilidad en la unión.
- Posición a soldar.
- Frecuencia o cantidad de soldaduras.

### 2.6.2 Tipos de aplicación

Existen diferentes tipos de aplicación para realizar este proceso de soldadura como son:

- La aplicación semiautomática en donde el electrodo y fundente aplican al mismo tiempo, el metal de aporte se hace por medio de varillas y el fundente se aplica por tolva de gravedad a presión.
- La aplicación automática se realiza con un equipo de soldadura sin que un operador haga manualmente el procedimiento y que solo ajuste parámetros y pasos.

### 2.6.3 Equipo y material de soldadura

El equipo y material utilizado en este proceso permite una gran variedad y selección de combinaciones entre sus componentes como son electrodos, tipos de corrientes, fundentes etc. Esta variedad de selecciones permite producir desde cordones anchos sin mucha penetración hasta cordones delgados con buena penetración (22) (28).

- **Fuentes de Potencia**

Se requiere de fuentes de potencia que suministren un amperaje alto, con ciclos de trabajo al cien por ciento. Además, ayudan en la formación de un arco estable y una alimentación continua. Existen tres tipos de fuentes de potencia que son, corriente continua, corriente alterna y combinada.

- **Controles**

Los sistemas de control regulan la velocidad de alimentación y el voltaje del arco. Los más frecuentes llevan un sistema de retroalimentación conectada a la potencia y al motor manteniendo el voltaje y la velocidad de alimentación constantes. Actualmente existen controles digitales que ajustan la velocidad de alimentación, fuente de potencia, que inicia y detiene el proceso, regulan el modo de desplazamiento y el llenado de cordones.

- **Cabezales y sopletes de soldadura.**

Comprende la unidad de motor alimentador y rodillos impulsores del alambre, la unidad de soplete y punta de contacto, además de accesorios para posicionar el cabezal.

- **Accesorios.**

Se incluye el equipo de desplazamiento, las unidades de recuperación de fuente y los equipos de fijación.

Los recuperadores se utilizan para optimizar el uso del fundente y aprovecharlo a su máxima capacidad, además de las siguientes características:

- Retirar el fundente no fusionado y la escoria ya fusionada detrás de la soldadura.
- Separar con mallas la escoria fusionada y otros materiales.
- Eliminar polvos o partículas magnéticas.
- Calentar el fundente para mantenerlo seco.

- **Electrodos**

Los electrodos para arco sumergido producen depósitos de soldadura que coinciden con los metales base. Estos electrodos se suministran como alambre sólido desnudo y como electrodo compuesto con núcleo metálico.

Los electrodos de acero suelen estar recubiertos de cobre, excepto los destinados a materiales resistentes a la corrosión. Este recubrimiento prolonga la vida en almacenamiento, reduce el desgaste por rozamiento con el tubo de contacto y mejora la conductividad eléctrica.

- **Fundentes.**

Los fundentes protegen el charco de soldadura de la atmosfera al cubrir el metal con escoria fundida. Además, limpian el charco, modifican la composición química del metal de soldadura e influye en la forma y propiedades mecánicas que adquirirá el cordón. Dependiendo del método de fabricación que tengan se dividen en:

- Fundente fusionado
- Fundente aglomerado
- Fundente mezclado mecánicamente

## 2.6.4 Parámetros del proceso SAW

Durante el proceso de soldadura se tienen que tener en cuenta ciertos parámetros para realizar el proceso (22) (28).

- **Corriente de soldadura**

La corriente de soldadura varía con la velocidad de alimentación del electrodo o con la rapidez de fusión siguiendo una relación no lineal. Al variar la velocidad de alimentación, el amperaje de la soldadura varía de manera similar si se emplea una fuente de potencia de voltaje constante. Se puede decir que a mayor velocidad de alimentación, menor corriente de soldadura.

- **Polaridad**

Este término describe la conexión entre la pistola de soldadura y las terminales de una fuente de potencia de corriente continua. Si el cable de potencia se conecta a la terminal positiva, la polaridad se designa como corriente continua con el electrodo al positivo y se le da el nombre de polaridad inversa.

Esta es la forma que se usa para la soldadura SAW ya que produce un arco estable y transferencia de metal uniforme, pocas salpicaduras, buenas características del cordón de soldadura y máxima penetración.

- **Voltaje del arco**

El voltaje del arco depende de la longitud de este mismo, así como de muchas otras variables tales como composición y dimensión de éste, gas protector, técnica de soldadura y longitud del electrodo. Permite expresar la longitud física del arco en términos eléctricos. Los niveles establecidos varían dependiendo del material, el gas protector y la modalidad de transferencia.

- **Velocidad del arco**

Es la tasa de movimiento lineal del arco a lo largo de la unión que se va a soldar. Si todas las otras variables son constantes se da una máxima penetración a una velocidad intermedia. Si se reduce la velocidad se incrementa la deposición del metal de aporte y a muy bajas velocidades se reduce la penetración. Si se aumenta la temperatura se aporta más calor a la superficie, por lo que pueden producirse socavamientos.

- **Extensión del arco**

Es la distancia entre el extremo del tubo de contacto y la punta del electrodo.

- **Orientación del electrodo**

Se refiere a la posición de la unión a soldar. La mayoría de las soldaduras se llevan a cabo en posición plana y horizontal. Para realizar una soldadura en forma vertical descendente, debido a lo complicado de la posición se reduce la velocidad de soldadura y la penetración, aunque es preferible realizarla en posición plana para no aplicar un refuerzo excesivo a la unión.

- **Tamaño del electrodo**

El tamaño del electrodo afecta la forma del cordón de soldadura y la profundidad de penetración a corrientes determinadas. Un electrodo de diámetro grande es mejor que uno pequeño, ya que cubre las aberturas de raíz anchas.

### 2.6.5 Ventajas y limitaciones del proceso

El proceso por arco sumergido presenta ciertas ventajas que lo distinguen de los otros procesos por arco como son (30):

- Puede utilizarse en zonas expuestas a viento.

- La penetración que se obtiene es superior a la que proporcionan otros procesos, por lo que no suelen requerirse tamaños de cordones tan altos.
- El aspecto de las soldaduras es suave, limpio y si se ha realizado correctamente, la escoria se elimina sola, por lo que se puede pintar o dar el tratamiento superficial que se requiera directamente tras soldar.
- El arco eléctrico no resulta visible, además los humos son muy inferiores a los que se producen con otros procesos de soldadura, por lo que se requiere mucho menos material de protección del operario.
- Obtención de altas tasas de deposición.
- Suele usarse en procesos automáticos, por lo que es menos dependiente de los errores humanos.

El proceso presenta también ciertas limitantes tales como:

- Es necesario un dispositivo para el almacenamiento, alimentación y recogida del fundente.
- Muchas uniones requieren el uso de anillos de respaldo.
- El fundente está sujeto a contaminaciones, que suelen producir discontinuidades en la soldadura.
- Excepto en aplicaciones especiales, la soldadura queda limitada a las posiciones plana y horizontal para evitar derrames de fundente.
- Al utilizarse normalmente en instalaciones automáticas, se requiere una inversión en equipos que debe tenerse en cuenta.

### 2.6.6 Proceso SAW para tuberías API

El proceso se ha utilizado en la unión de aceros de alta resistencia para la fabricación de tuberías, ya que brinda a la unión propiedades de formabilidad y tenacidad a la fractura, además que no se produzca una reducción de resistencia en la zona afectada que perjudique la unión. (13) (16)

Aparte de estas características, el usar este proceso permite mantener una pequeña fracción de inclusiones metálicas y no metálicas en forma globular y de tamaño pequeño.

Aún que el proceso genera una gran cantidad de calor de entrada, esto no afecta de gran manera la microestructura del material y por ende no afecta las propiedades mecánicas del mismo. Generalmente se utiliza la soldadura SAW en un proceso UOE (doblado en “u”, soldado en “o” y estirado “e”) ilustrado en la fig. 2.5.

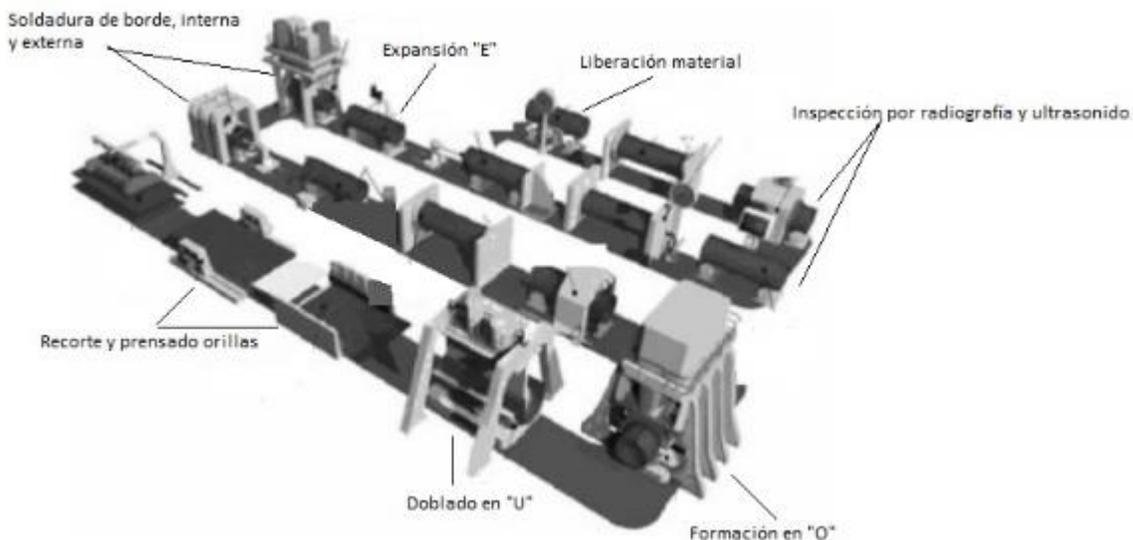


Fig. 2. 9 Proceso de formación “UOE” (30)

## 2.7 Soldadura por Resistencia

El proceso de soldadura por resistencia (ERW) utiliza el calor generado por la resistencia que ofrecen los metales al paso de la corriente eléctrica para la coalescencia de éstos en las superficies de empalme. En todo momento se aplica presión para asegurar la unión.

La soldadura de resistencia por costura es una variación del proceso, en donde se obtienen uniones traslapadas para una junta continua a prueba de fugas. En general son uno o dos electrodos con ruedas que giran conforme avanza el material entre ellos. (31)



Fig. 2. 10 Proceso de soldadura por resistencia en costura para tuberías **(31)**

### 2.7.1 Principios de funcionamiento

El proceso se basa en la aplicación coordinada de corriente eléctrica y presión mecánica con las magnitudes y duraciones adecuadas, en donde la corriente pasa a través de los electrodos atravesando el metal.

Las operaciones deben generar suficiente calor para llevar una parte del material al estado líquido, seguido se deja enfriar a cierta presión hasta que se mantengan unidas las piezas.

La corriente no debe excederse para evitar la expulsión del material, al igual que el tiempo, para evitar que se peguen los electrodos a las piezas de trabajo. (32)

### 2.7.2 Generación de calor

En un conductor eléctrico el calor generado depende de tres factores importantes que son:

- Amperaje
- Resistencia del conductor
- Duración de corriente

Del calor generado, una parte es para efectuar la soldadura y la otra parte se distribuye al metal circundante. Una combinación no adecuada produce una distribución indeseable del calor en la zona de soldadura, dando como resultado una fusión excesiva y rápido deterioro de los electrodos.

La corriente será la misma en todo el circuito, independiente de la resistencia instantánea en cualquier punto, pero el calor generado en un punto dado del circuito es directamente proporcional a la resistencia de este punto. (32)

### 2.7.3 Resistencias dentro del proceso

Existen 7 resistencias conectadas en serie que determinan la distribución de temperaturas como se puede apreciar en la fig. 2.7.

- 1 y 7 resistencia eléctrica del electrodo
- 2 y 6 resistencia entre electrodo y material. La magnitud de esta resistencia depende de la condición del metal base y el electrodo, su forma y fuerza. En este punto se genera mucho calor pero la superficie no alcanza el punto de fusión por la condición de electrodos, los cuales son enfriados mediante circulación interna de agua.
- 3 y 5 es la resistencia total del metal base que es directamente proporcional a su resistividad y espesor.

- 4 es la resistencia de las caras internas del metal base en el punto donde se forma la soldadura; es el punto de más resistencia y donde se genera más calor. (32)

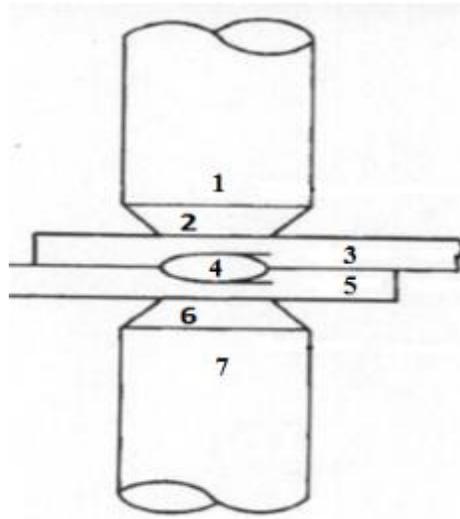


Fig. 2. 11 Distribución de resistencias en el proceso de soldadura ERW (32)

#### 2.7.4 Efecto de la corriente de soldadura

La corriente es una variable importante a controlarse, los factores que causan variaciones son las fluctuaciones en voltaje y las del circuito secundario. Éstas se deben a cambios en las propiedades del material o introducción de metales magnéticos.

También se requiere una densidad mínima durante un tiempo finito para producir la fusión de la cara interna ya que con una densidad excesiva puede ocasionar la expulsión del material, agrietamiento de la soldadura y reducción de las propiedades mecánicas.

### 2.7.5 Efecto del tiempo en la soldadura

Es importante ya que determina la velocidad de soldadura en la que se produzcan uniones sanas y por consiguiente con buenas propiedades. Además de que no se produzca un calentamiento excesivo ni deterioro de los electrodos.

Se requiere cierto tiempo para alcanzar la temperatura de fusión, si se continúa aplicando corriente, se incrementará la temperatura y se producirá una expulsión de metal fundido en la unión y una generación de la zona afectada por el calor más grande. (31)

### 2.7.6 Efecto de la presión de soldadura

La presión se produce por la fuerza que los electrodos ejercen sobre la unión y afecta directamente la resistencia del metal base.

Cuando se realiza el proceso debe aplicarse una presión elevada para que pueda pasar la corriente. Al aumentar la fuerza también aumenta el amperaje, sin embargo, si se aumenta la presión disminuye la resistencia y por ende el calor generado. (31)

### 2.7.7 Variantes que influyen en el proceso de soldadura ERW

- **Influencia de los electrodos**

Conducen la corriente de soldadura del trabajo. Los electrodos deben tener una buena conductividad térmica pero también la resistencia mecánica y durezas adecuadas para resistir la deformación causada por la aplicación repetida de una fuerza elevada de los electrodos. Esta deformación hace que se aplanen las caras y exista mayor área de contacto, reduciendo la densidad de corriente. La calidad de los electrodos reduce conforme se van deformando.

- **Influencia de la condición de superficie**

La condición de las piezas influye en la generación de calor, ya que los óxidos, grasas, pinturas e impurezas afectan la resistencia de contacto. Además ayudan al deterioro de los electrodos.

- **Influencia de la resistencia eléctrica**

La resistencia eléctrica de un metal influye en su calentamiento, ya que en metales de alta conductividad se desarrolla poco calor aún a corrientes elevadas. En cambio con materiales de poca resistencia eléctrica existe una mayor generación de calor. En general se controla por la temperatura de fusión, calor específico, calor de fusión y conductividad térmica. (22)

### 2.7.8 Ciclo de soldadura

- Tiempo de compresión: Es aquel intervalo de tiempo entre el arranque del cronómetro y la primera aplicación de corriente. Asegura que los electrodos hagan contacto con el trabajo y ejerzan presión entre sí antes de aplicar corriente.
- Tiempo de soldadura: En donde se aplica corriente de soldadura al trabajo.
- Tiempo de retención: En donde se mantiene la fuerza aplicada al trabajo después del término del último impulso de corriente, en este tiempo se solidifica la unión.
- Tiempo inactivo: Donde los electrodos se despegan del trabajo y se desplazan hasta el siguiente punto de soldadura. (33)

### 2.7.9 Equipo de soldadura

El equipo comprende tres elementos básicos como son el circuito eléctrico, el equipo de control y el sistema mecánico.

- **Circuito eléctrico**

Consta de un transformador de soldadura y un circuito secundario. Este último incluye los electrodos conductores que se emplean tanto en corriente directa y alterna.

- **Electrodos**

Son una parte importante de este proceso ya que cumple con funciones de conducir la corriente y fijar la densidad de la misma a la soldadura, transmite la fuerza de unión, disipa parte del calor de la zona de soldadura, mantiene la alineación y posición de las piezas de trabajo, etc.

- **Equipos de control**

Los equipos de control son responsables de realizar operaciones como iniciar e interrumpir el suministro de corriente a la soldadura. También controla la magnitud de corriente que acciona y libera los mecanismos de presión de los electrodos y se pueden dividir según su funcionalidad en contactores de soldadura, control de geometría y reguladores de corriente. (32)

### 2.7.10 Soldadura de costura

Se usa para materiales que se traslapan y constituyen soldaduras continuas formadas por puntos que se funden una con otra, por unión de puntos o forjado de la unión al calentarse.

Se usan para producir uniones continuas herméticas para gases o líquidos en ensamblados de lámina, para unión de tuberías. En la mayoría se usan 2 electrodos o uno con un mandril que aplique presión y corriente.

Una ventaja es la capacidad de producir una soldadura continua a prueba de fugas, sin embargo, como desventaja se tiene que ésta debe de ser continua o seguir un trayecto curvilíneo, ya que si existe un cambio abrupto, la soldadura no será a prueba de fugas. Otra desventaja que tienen es que se obtienen propiedades mecánicas inferiores a las de topes soldadas. (22)

### 2.7.11 Soldadura por resistencia para tuberías API

El uso de soldadura por resistencia en la unión de tubería ha contribuido en el incremento de los beneficios económicos como el bajo costo de transportación de gas, reducción en el mantenimiento de la tubería, el transporte a sitios específicos y reducción en el proceso de soldadura.

El proceso permite el control en la morfología de la microestructura y de imperfecciones como óxidos. También ofrece un ahorro de costos para tuberías usadas en conducción de gases y petróleo que se usan en condiciones extremas.

Generalmente la tubería se produce a partir de una plancha de rolado en caliente en donde la placa pasa a una máquina que le da forma de tubería y se unen sus extremos a tope por medio del proceso ERW, el exceso se elimina por medio de un desbaste, seguido de un tratamiento térmico para mejorar sus propiedades mecánicas y manejar su microestructura.

Al producir tuberías se utiliza el método de manufactura UOE, que contiene el proceso ERW; debido a esto se producen tuberías de espesores delgados con superficie tersa. Además se puede obtener una alta producción con gran variedad y reducción de costos. Las inclusiones de óxidos se controlan con las velocidades de soldadura y calor empleado, esto para evitar además que exista un exceso de esfuerzos residuales en la unión. (33) (31)

En el 2013 el equipo de INOUE Tomokino desarrolló un proceso de soldadura ERW para unión de tuberías utilizadas a bajas temperaturas. La soldadura está integrada al proceso de manufactura UOE. La unión se logra pasando una corriente de alta frecuencia por las orillas de la placa hasta unir las y producir la coalescencia en el interior y exterior del tubo. Posteriormente se realiza un tratamiento térmico para obtener una microestructura adecuada para el uso de las tuberías. La fig. 2.12 muestra el diagrama de la unión del tubo aplicando corriente de alta frecuencia.

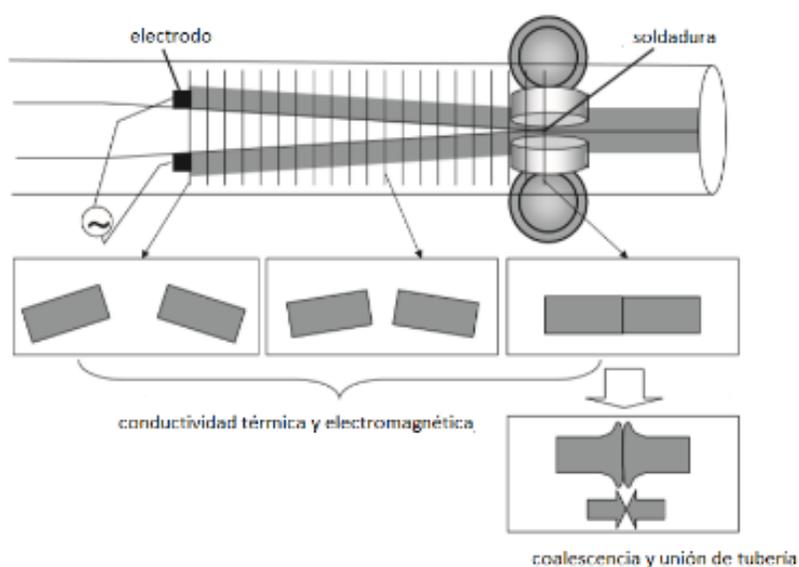


Fig. 2. 12 Diagrama unión tubería por medio de soldadura ERW (31)

La distribución de calor en la zona de soldadura resulta en una mínima afectación térmica a la unión, lo que permite que no se formen microestructuras que afecten las propiedades de ésta. En la figura 2.13 se observa la distribución de calor conforme a la distancia en el punto de soldadura con vista superior. Conforme avanza la placa y se aplica corriente se acumula calor que permite la unión en forma de tubo.

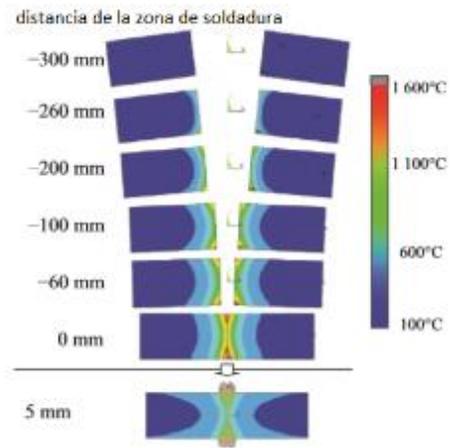


Fig. 2. 13 Distribución del calor en la unión con proceso "UOE" (31)

# CAPÍTULO 3

## METODOLOGÍA

La metodología propuesta para la realización de la investigación se detalla en pasos que se muestran a continuación:

- **Primer paso**

Obtención de información y análisis del estado del arte acerca de los procesos de soldadura HLAW, GMAW, LBW, SAW y ERW de los aceros HSLA y su aplicación en tuberías de conducción de hidrocarburos, además del proceso utilizado para la manufactura de tuberías “UOE”.

- **Segundo paso**

Obtención del material de acero API X70 otorgado por la empresa TUBACERO. Además se recibió una probeta del mismo material pero unido mediante los procesos de soldadura SAW/ERW, que es el proceso de soldadura empleado en dicha empresa. Una vez teniendo el material se realizó un análisis químico para corroborar la composición del acero.

Por medio de microscopía óptica se observaron en la probeta unida con proceso SAW/ERW las fases presentes y tamaño de grano. Además se le realizaron ensayos de tensión y microdureza.

- **Tercer paso**

Se unieron las placas mediante el proceso soldadura GMAW. Las placas fueron preparadas mecánicamente mediante un bisel, después se soldaron y se les realizó un análisis microestructural en la unión. Al finalizar se llevaron a cabo ensayos de tensión y microdureza.

- **Cuarto paso**

Se realizó la experimentación y obtención de los parámetros óptimos para la soldadura con el proceso HLAW, cuidando parámetros importantes como son la potencia del láser, distancia focal, velocidad de soldadura y velocidad de alimentación. Cuando se obtuvieron los parámetros, se realizaron las uniones de las placas con el proceso HLAW. Posteriormente su análisis microestructural y de propiedades mecánicas.

- **Quinto paso**

Se calificó la unión de las placas con el proceso HLAW bajo el código API 1104 para tensión, Nick – Break y doblez lateral; además ensayos de microdureza y de impacto tipo charpy bajo el código API 5L.

- **Sexto paso**

Finalmente se realizó una comparación de propiedades mecánicas del proceso híbrido HLAW contra los procesos GMAW y SAW/ERW para determinar si podría ser empleado en planta.

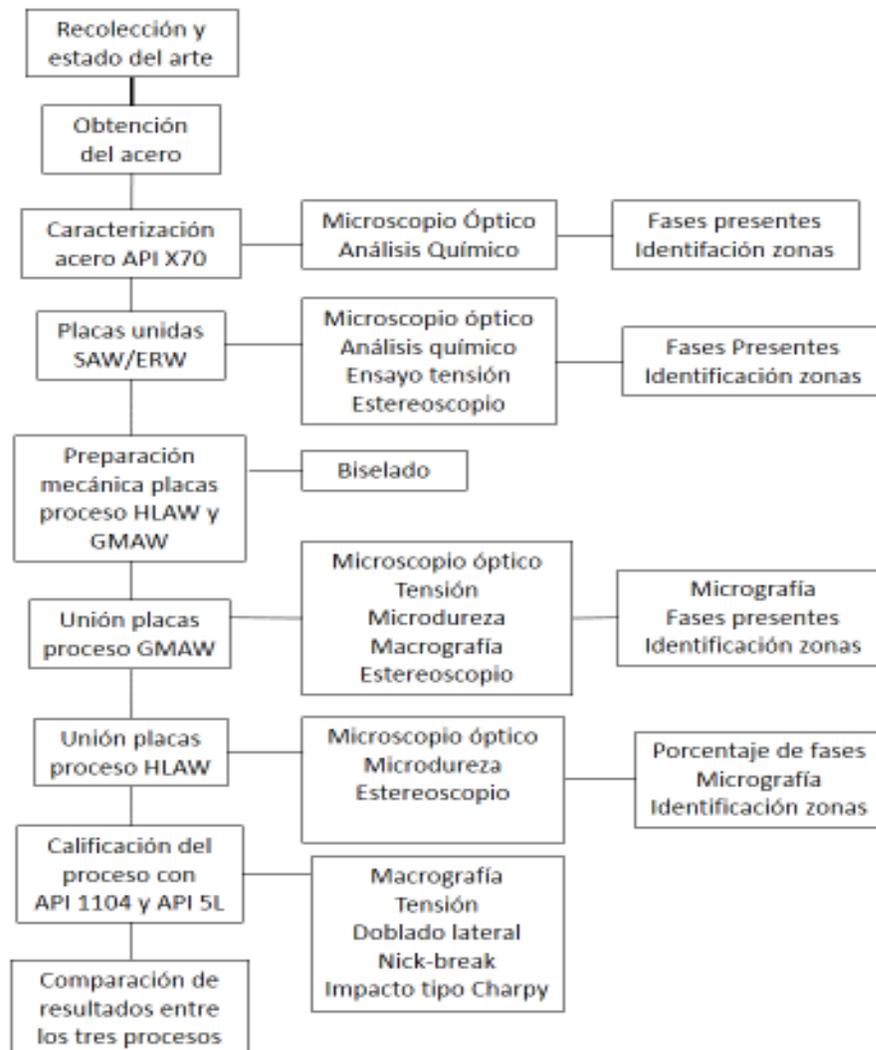


Fig. 3. 1 Diagrama de metodología.

## CAPÍTULO 4

### DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se partió de un carrete de tubo de acero API 5L X70 de 91 cm (36") y 1.27 cm ( $\frac{1}{2}$ ") de espesor unido mediante el proceso de soldadura ERW reforzado con SAW. Se cortó una placa con costura en medio y con dimensiones de 25.4 cm (10") x 25.4 cm (10") x 1.27 cm ( $\frac{1}{2}$ ") para ser evaluada. Adicionalmente, del mismo carrete se cortaron diez placas del metal base sin costura, dos de ellas con dimensiones de 38 cm (15") x 12.7 cm (5") x 1.27cm ( $\frac{1}{2}$ ") con preparación de bisel a 45° y 6 cm de talón para formar cupones para soldadura GMAW; otras cuatro con dimensiones de 20 cm ( $7 \frac{7}{8}$ ") x 10 cm ( $3 \frac{15}{16}$ ") x 1.27 cm ( $\frac{1}{2}$ ") con preparación de bisel de 20° y un talón de 2 cm ( $\frac{16}{16}$ "), y finalmente otras cuatro con las mismas dimensiones pero sin preparación mecánica para formar cupones para el proceso de soldadura HLAW.

La unión de las probetas unidas con los procesos ERW y SAW se realizó de la siguiente manera, primero se unen las dos partes del tubo con el proceso de soldadura ERW seguido de un cordón con el proceso de soldadura SAW por la

parte interior; al final se hace otro cordón en la parte exterior del tubo con el proceso SAW. Se utilizó un material de aporte EA4 con un fundente F8A4 para la soldadura SAW. La tabla 4.1 muestra los parámetros utilizados en las placas unidas con ERW y SAW.

Tabla 4. 1 Parámetros soldadura SAW/ERW

Parámetro	ERW	SAW I	SAW II
Voltaje (V)	32	35	35
Amperaje (A)	24	800 – 1150	900 - 1200
Velocidad de soldadura (pulg/seg)	1.6	5.4	5.4

Para la unión de placas con el proceso GMAW se utilizaron cuatro cordones de soldadura, la tabla 4.2 muestra los parámetros utilizados para la unión de placas con este proceso. Hay que agregar que el metal de aporte es ER70S-6 de 0.08cms (0.035”) de diámetro.

Tabla 4. 2 Parámetros soldadura GMAW

	Cordón 1	Cordón 2	Cordón 3	Cordón 4
Voltaje (V)	27	27	27	27
Amperaje (A)	17.5 - 19.4	17.5 - 19.4	17.5 - 19.4	17.5 - 19.4
Velocidad de soldadura (pulg/seg)	0.267	0.187	0.308	0.317
Gas de protección	Ar - 10% He			
Velocidad de alimentación (pulg/seg)	157	157	157	157
Stick-Out (pulg)	0.39	0.39	0.39	0.39
Flujo de gas (l/min)	14.2	14.2	14.2	14.2

Para unir las placas con preparación de bisel y con el proceso de soldadura HLAW se utilizaron dos cordones. Los parámetros empleados se encuentran en la tabla 4.3

Tabla 4. 3 Parámetros soldadura HLAW placas preparadas mecánicamente

	Cordón 1	Cordón 2
Potencia láser (kW)	3.8	2
Velocidad de soldadura (pulg/seg)	0.78	0.47
Velocidad de alimentación (pulg/seg)	512	570
Distancia focal (mm)	246	246
Separación entre cabezales (mm)	3	3
Corrección del arco	0	0
Inclinación del láser	15°	15°
Voltaje (V)	29.6	30
Amperaje (A)	393	403
Gas de protección	Ar-15% CO <sub>2</sub>	Ar-15% CO <sub>2</sub>
Flujo de gas (l/min)	8	8
Hilo	ER70S-6	ER70S-6
Stick-Out (pulg)	0.035	0.035

A las placas sin preparación mecánica unidas por el proceso HLAW, se les aplicó un cordón en la cara superior y otro en la cara inferior. Para la unión de las placas se utilizaron, en una alambre sólido (cara superior e inferior) y en la otra alambre flux-core (cara superior e inferior). Los parámetros que se utilizaron para las uniones con alambre sólido ER70S – 6 y con alambre flux – core E71T1 se encuentran en la tabla 4.4 y 4.5 respectivamente.

Tabla 4. 4 Parámetros soldadura HLAW con material aporte ER70S – 6

	Cordón 1	Cordón 2
Potencia láser (kW)	3.8	3.8
Velocidad de soldadura (pulg/seg)	0.19	0.19
Velocidad de alimentación (pulg/seg)	196	118
Distancia focal (mm)	250	250
Separación entre cabezales (mm)	3	3
Corrección del arco	0	0
Inclinación del láser	15°	15°
Voltaje (V)	21.3	22.8
Amperaje (A)	155	145
Gas de protección	Ar-15% CO <sub>2</sub>	Ar-15% CO <sub>2</sub>
Flujo de gas (l/min)	8	8

Tabla 4. 5 Parámetros soldadura HLAW con material aporte flux core E71T1

	Cordón 1	Cordón 2
Potencia láser (kW)	3.8	3.8
Velocidad de soldadura (pulg/seg)	0.19	0.19
Velocidad de alimentación (pulg/seg)	196	118
Distancia focal (mm)	250	250
Separación entre cabezales (mm)	3	3
Corrección del arco	0	0
Inclinación del láser	15°	15°
Voltaje (V)	21.3	22.8
Amperaje (A)	155	145
Gas de protección	Ar-15% CO <sub>2</sub>	Ar-15% CO <sub>2</sub>
Flujo de gas (l/min)	8	8
Stick-Out (pulg)	0.035	0.035

Para la unión de las placas por el método HLAW se utilizó un equipo perteneciente al Centro Tecnológico AIMEN en España, que consta de un cabezal de soldadura híbrido con su respectivo sistema de movimiento y fuentes de poder. El equipo completo consta de:

- Una fuente láser modelo DY044 de la marca ROFIN, láser de Nd: YAG bombeado por diodos de 4.4 kW de potencia máxima y una calidad de haz de 12 mm x mm radio. El haz láser emitido por la fuente se acopló a una fibra óptica de 400 micras de diámetro y se condujo por ella a una de las celdas de procesamiento, que por motivos de seguridad estanca a la luz del láser empleado.
- La fibra óptica permite guiar la luz del láser hasta el cabezal de soldadura colocado en la muñeca de un robot ABB 6600 175/2.8.
- El cabezal de soldadura híbrida marca FRONIUS, consta en la parte láser de una óptica de colimación y una de focalización. La óptica de colimación de 200 mm y la óptica de focalización de 250 mm que permiten enfocar la potencia del haz láser en un punto de diámetro mínimo 0.4 mm.

- Para la parte del cabezal que es del arco eléctrico, se utilizó una fuente de poder sinérgica MAG FRONIUS TPS 5000, y como gas de protección se empleó una mezcla de argón con 15% CO<sub>2</sub>.

Para la unión de las placas por medio de soldadura GMAW el equipo utilizado pertenece a la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA), que consta de:

- Un robot de soldadura KUKA KR-16-2 con número de serie 865315 de seis ejes con capacidad para soportar pistola, antorcha y accesorios requeridos para los procesos GTAW/GMAW.
- Cabezal de soldadura con fuente de poder Lincoln POWERWAVE 455, con antorcha de soldadura GMAW y un máximo ciclo de trabajo de 450 A / 38V.

Del cupón de soldadura por ERW/SAW se obtuvo una probeta de 6.3 cm (2 ½”), del cupón soldado por GMAW se obtuvo una probeta de 5.8 cm (2”) y del cupón soldado por HLAW una probeta de 6.3 cm (2 ½”). Las tres probetas fueron cortadas transversalmente para su posterior análisis.

Las probetas se prepararon metalográficamente, iniciando con un desbaste con lijas de SiC con un tamaño de partícula que va desde 80 a 1200. Se pulieron en paños con pasta de diamante de 1 μm, se atacaron con reactivo Nital al 2% durante 5 segundos para que revelara su microestructura. Al final de este ataque se utilizó un ataque por tinte llamado Klemm's para diferenciar correctamente las fases presentes en la microestructura de la unión.

Una vez teniendo listas las muestras se analizaron mediante estereoscopio para identificar las 3 zonas: metal base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y zona de fusión (ZF). Además se analizó también mediante microscopía óptica con un equipo Olympus 6X5L para determinar el porcentaje de fases y microestructura.

Después de observar la microestructura de los cupones con los procesos ERW/SAW y GMAW se utilizó un microdurómetro Vickers Arkashi-MKO HO para analizar las zonas de soldadura y un ensayo de tensión en una máquina Tinius Olsen con capacidad de 100 toneladas; ambos bajo las especificaciones de la norma API 1104.

Al cupón de soldadura HLAW se calificó por medio del código API 1104 con ensayos de tensión, doblado lateral y Nick – Break, además de la obtención de microdureza y ensayo de impacto Charpy bajo el código API 5L. Al término de los ensayos se analizaron y compararon los resultados de los tres procesos para determinar si el proceso HLAW cumple con los requerimientos y especificaciones requeridas por el proceso original.

## CAPITULO 5

# DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Al realizar el ensayo de análisis químico por espectrometría de chispa al material base, los resultados demostraron que se trata de un acero X70, el cual es un acero de baja aleación y bajo contenido de carbono con excepción del manganeso que permite mejorar propiedades mecánicas como resistencia al impacto, endurecimiento etc. En lo que se refiere a los materiales de aporte utilizados las composiciones químicas son las dadas por los proveedores. Ambas composiciones se pueden apreciar en la tabla 5.1.

**Tabla 5. 1 Composición química metal base y materiales de aporte % e.p**

	C	Mn	Si	S	P	Al	Nb	Cu	Cr	Ni	Ti	Ca
Metal Base	0.037	1.5	0.21	<0.003	<0.015	0.03	0.09	0.27	0.26	0.16	0.08	0.0025
Acero X70	0.03 - 0.09	1.20 - 1.59	0.2 - 0.32	<0.003	<0.015		0.04 - 0.1		0.31		0.13 - 0.20	
Metal ER70S – 6	0.07	1	0.56	<0.003	<0.015			0.01				
Metal E71T1	0.035	0.82	0.5	<0.003	<0.015							

Se puede apreciar una disminución en el contenido de carbono del material de aporte flux-core que mejora su soldabilidad y homogeniza más la estructura, además, que va más de acuerdo a la composición del metal base que la del material de aporte sólido.

## 5.1 Uniones con procesos de soldadura ERW/SAW

### 5.1.1 Estereoscopía

La figura 5.1 muestra la imagen por estereoscopio de la probeta unida con los procesos ERW/SAW, en donde se pueden ver los cordones de soldadura, los cuales fueron depositados de la forma descrita anteriormente en el capítulo 4.

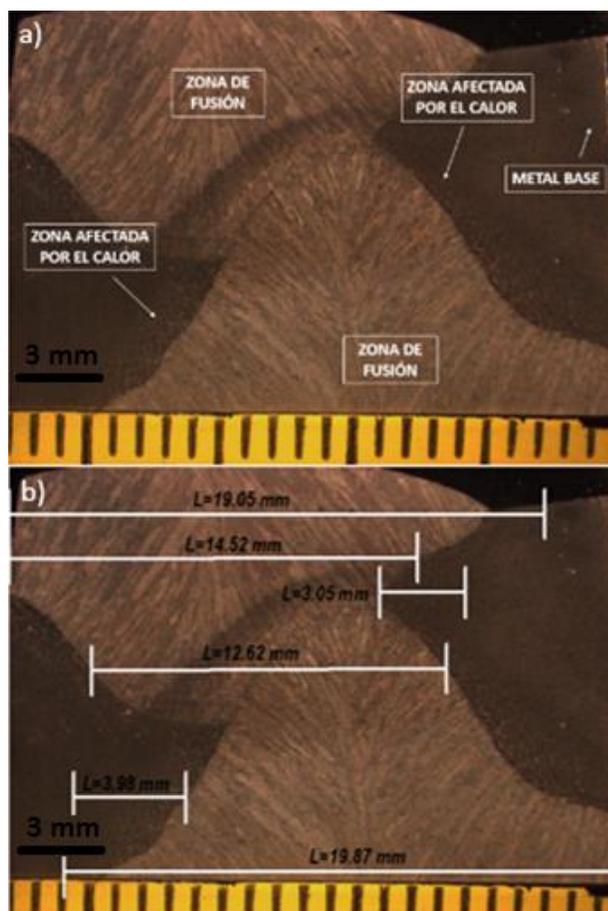


Fig. 5. 1 a) Imagen de los cordones de soldadura mediante los procesos SAW/ERW y b) Mediciones del cordón de soldadura.

La imagen a) muestra las zonas de soldadura obtenidas por el proceso combinado. La zona de fusión se extiende en mayor proporción que las otras con una forma de grano equiaxial. La extensión de la zona afectada por el calor se incrementa hasta en 1 mm debido al número de cordones aplicados en la unión y a un mal alineamiento de los mismos. En la imagen b) se muestran las dimensiones a lo ancho de los cordones de soldadura. El mal alineamiento de los cordones de soldadura produce que el ancho de la unión sea mayor.

### 5.1.2 Microscopía

Se identificaron las tres zonas de soldadura para llevar a cabo el análisis microestructural, de las placas soldadas mediante el proceso ERW/SAW y las cuales se ilustran en la figura 5.2. En esta imagen se observa en el metal base (MB) que el grano es uniforme y homogéneo, con un tamaño de grano ASTM 12 que es característico de los aceros HSLA, además en la zona afectada por el calor (ZAC) se puede observar un crecimiento en el tamaño del grano de ASTM 11, como también la precipitación de fases diferentes a las del metal base, las cuales se describirán más adelante. Finalmente en la zona de fusión, la estructura presenta una morfología acicular debido al crecimiento equiaxial del grano.

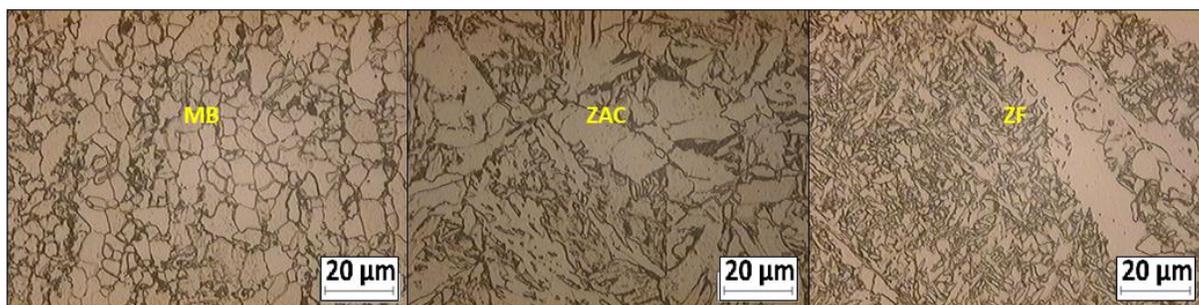


Fig. 5. 2 Zonas de soldadura; MB – Metal base, ZAC – Zona afectada por el calor y ZF – Zona de fusión

- **Metal Base**

Con las imágenes obtenidas por el microscopio óptico se determinaron las fases presentes en el material. De acuerdo a la bibliografía, las fases predominantes en un acero X70 es la de ferrita acicular y poligonal, además debido a que el tubo se le aplica un rolado, se producen bandas de perlita, característica de metales rolados. En las figuras 5.3 y 5.4 se observan dichas fases a 500 X y 1000X respectivamente.

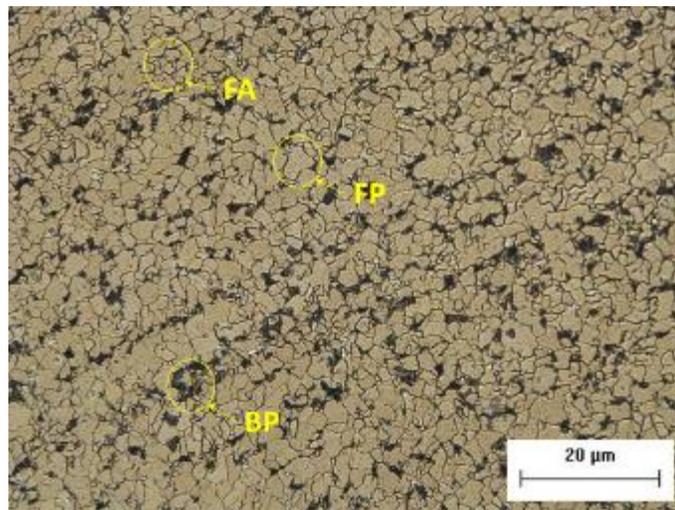


Fig. 5. 3 Micrografía del metal base; FA – ferrita acicular, FP – ferrita poligonal y BP – Bandas de perlita.

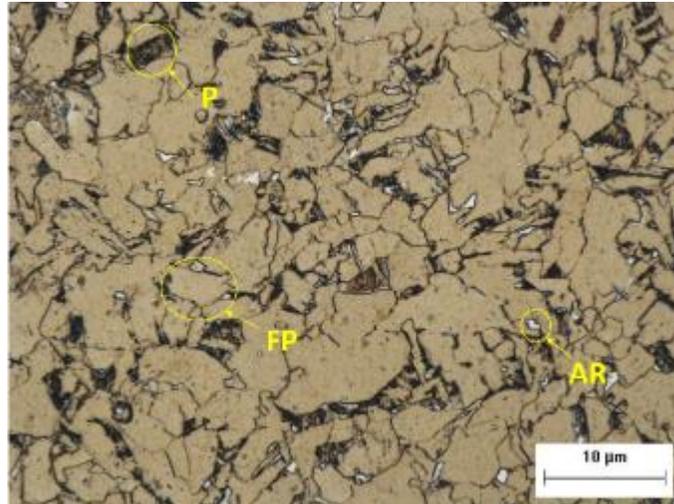


Fig. 5. 4 Micrografía del metal base; FA – ferrita poligonal, P – perlita y AR – austenita retenida.

Las imágenes muestran la formación de ferrita acicular y ferrita poligonal. La naturaleza entrelazada de la ferrita acicular tiende a coexistir con otras estructuras ferríticas como la ferrita poligonal, ferrita Widmastattën. Su arreglo desordenado mejora la tenacidad y resistencia del material. (34)

- **Zona afectada por el calor**

En las figuras 5.5 y 5.6 se muestran las micrografías de la zona afectada por el calor donde se observa un cambio en la morfología del mismo.

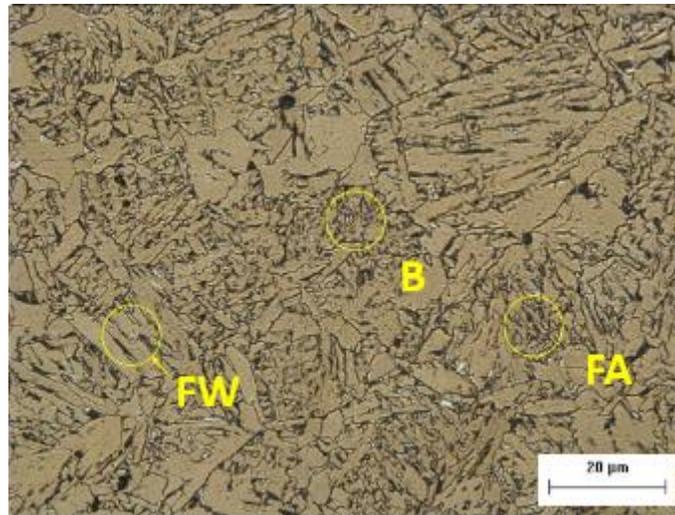


Fig. 5. 5 Micrografía de la zona afectada por el calor; donde FA – ferrita acicular, B – bainita y FW – ferrita Widmastattën

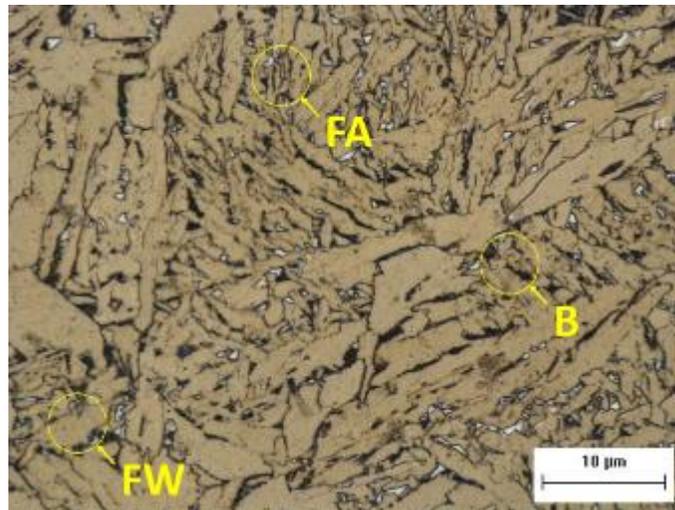


Fig. 5. 6 Micrografía de la zona afectada por el calor; donde FA – ferrita acicular, B – bainita y FW – ferrita Widmastattën

La microestructura presente en la zona afectada por el calor se compone de ferrita acicular y ferrita Widmastattën creciendo de los límites de grano en mayor proporción, además de cierto porcentaje de bainita. La formación de la ferrita acicular y Widmastattën se debe a que al momento de aplicar los cordones consecutivamente, el calor permite la transformación de austenita en

ferrita acicular, además el tiempo transcurrido en el proceso de soldadura permite su crecimiento.

- **Zona de fusión**

En las figuras 5.7 y 5.8 se muestran la microestructura presente en la zona de fusión. Las imágenes muestran la formación de islas de ferrita primaria desde donde crecen ferrita alotriomórfica y ferrita Widmastattën primaria; cerca de estas fases se encuentran granos de ferrita acicular, martensita y algo de ferrita Widmastattën secundaria. La aplicación de diversos cordones de soldadura permiten que el enfriamiento sea lento y actúen como tratamientos térmicos que permiten el crecimiento de diferentes fases.

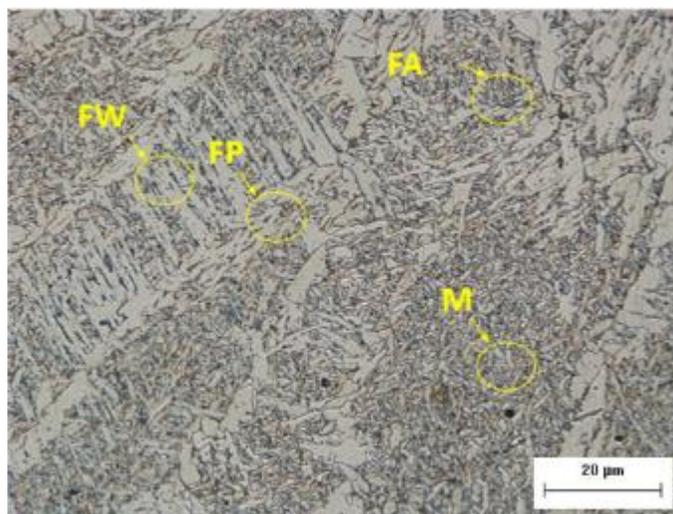


Fig. 5. 7 Micrografía de la zona de fusión; donde FW – Ferrita Widmastattën, FP – Ferrita Primaria, FA – Ferrita Acicular y M – martensita.

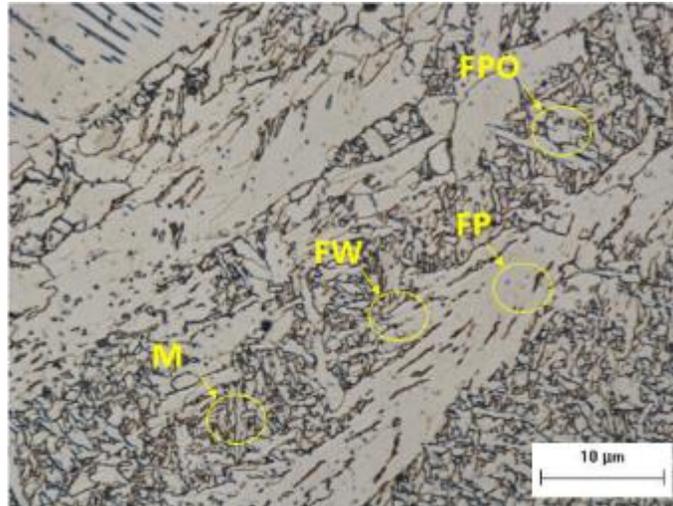


Fig. 5. 8 Micrografía zona de fusión; donde FW – Ferrita Widmastattën, FP – Ferrita Primaria, FPO – Ferrita Poligonal y M – martensita.

## 5.2 Uniones con proceso de soldadura GMAW

Como se mencionó en el capítulo 4, las placas para este proceso fueron de 30 cm (15") x 12.7 cm (5") x 1.27 cm (1/2") y con una preparación de bisel de 45° y 6 cm de talón. Se realizaron cuatro cordones, los cuales se pueden apreciar en la imagen de estereoscopio de la figura 5.9 y en la cual se identifican las zonas presentes.

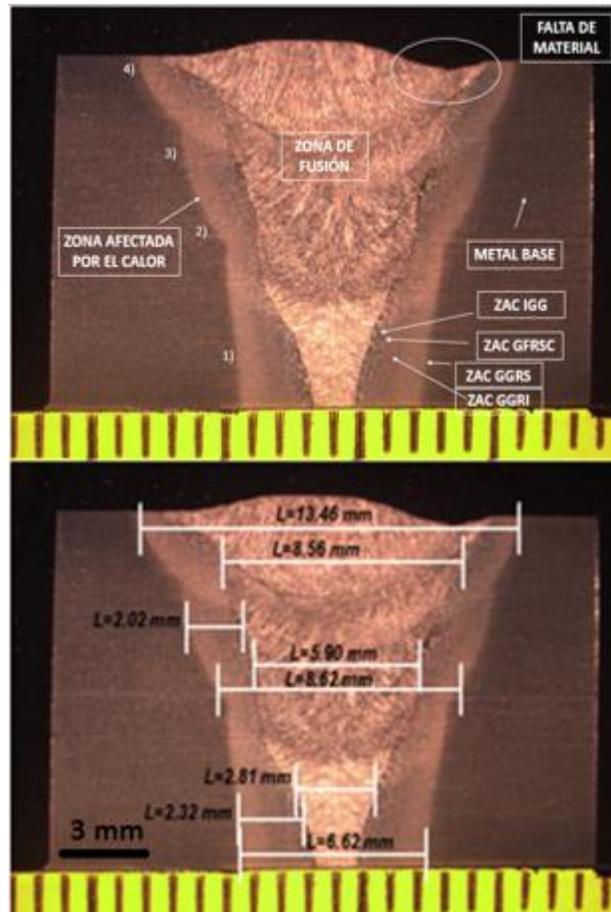


Fig. 5. 9 Imagen de estereoscopio de unión con proceso GMAW: a) Identificación de los cuatro cordones de soldadura, al igual que las zonas importantes; b) dimensiones de los cordones de soldadura.

En la imagen se observa que el último cordón se inclina en mayor proporción hacia la izquierda, ocasionando una falta de material en la cara de soldadura, las dimensiones de los cordones con este proceso son menores en un rango 6 – 7 mm de que con el proceso SAW/ERW, esto se debe a la velocidad de avance, también que los cordones son continuos y siguen una misma dirección, además debido a que el metal de aporte es de menor diámetro y por lo tanto el cordón de soldadura también tiene menor espesor. Debido a que se utilizaron varios cordones de soldadura, la subzona del crecimiento de grano de la zona afectada por el calor se parte en cuatro partes que son:

- Zona inalterada de grano grueso que se recalienta por encima de 1300°C (IGG).
- Zona de grano fino recalentada supercríticamente que se recalienta por encima de la temperatura  $AC_3$  pero por debajo de los 1300° C (GFRSC).
- Zona de grano recalentada intercríticamente que se recalienta entre las temperaturas de  $AC_1$  y  $AC_3$  (GGRI).
- Zona de grano grueso recalentada subcríticamente que se recalienta por encima de la temperatura  $AC_1$  (GGRS).

El crecimiento de grano en estas zonas influye en las propiedades mecánicas de la unión ya que mientras las subzonas de IGG, GFRSC y GGRS mejoran la resistencia a la tensión de la zona afectada por el calor; en la subzona de GGRI se forman áreas locales frágiles, que reducen la resistencia a la tensión y aumentan la dureza de la zona afectada por el calor (22). Cabe mencionar que aunque se da la formación de estas zonas no influyeron en gran manera en las propiedades mecánicas de la unión.

### 5.2.1 Microscopía

Las figura 5.10 muestra las zonas de soldadura de la unión con el proceso GMAW a 500X, en donde el metal base presenta las mismas características que con el proceso SAW/ERW. La microestructura de la zona afectada por el calor tiene una morfología diferente a la del proceso SAW/ERW debido a que se realizan más cordones de soldadura para unir las placas con este proceso, por ende el calor de entrada es mayor y la tasa de enfriamiento al final produce una morfología equiaxial.

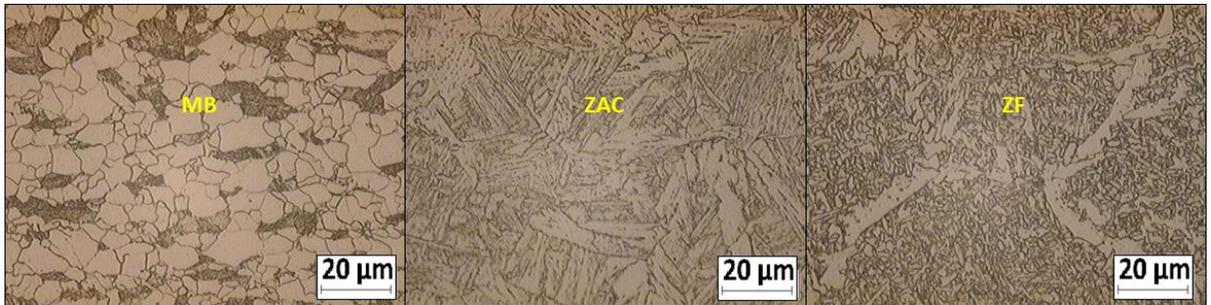


Fig. 5. 10 Micrografía unión GMAW a 500x, donde MB – Metal base, ZAC – Zona afectada por el calor y ZF – Zona de fusión

- **Metal base**

Las figuras 5.11 y 5.12 muestran las micrografías del metal base en donde se puede observar la microestructura del acero que se compone de ferrita acicular y poligonal con bandas de perlita que resultan de la laminación del acero. Además de que también existen agregados de martensita con austenita creciendo en los límites de grano.

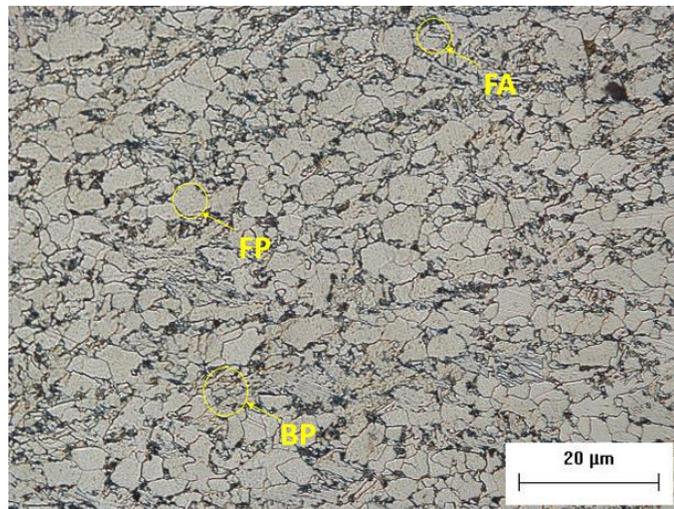


Fig. 5. 11 Micrografía del metal base; en donde FP – ferrita poligonal, P – Bandas de perlita

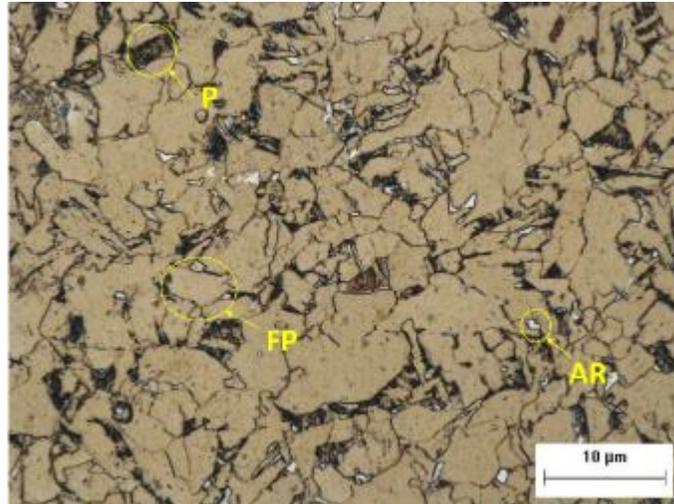


Fig. 5. 12 Micrografía del metal base; P – Perlita, FP – Ferrita Poligonal y AR – austenita retenida

- **Zona afectada por el calor**

Dentro de la zona afectada por el calor se observa una deformación de los granos y el crecimiento de diversas fases; esto se debe a que durante el proceso de soldadura, el tiempo de enfriamiento entre pasadas permite la transformación de austenita en ferrita Widmastattën, bainita y ferrita acicular. Sin embargo, los cordones posteriores de soldadura actúan como ciclos térmicos que modifican la estructura de esta zona, a este proceso se le conoce como multi – zona afectada por el calor. (22) En este caso, los ciclos térmicos siguientes producen una estructura bainítica y martensítica, algo de ferrita acicular también crece pero se presenta más en los límites entre la zona afectada por el calor y el metal base.

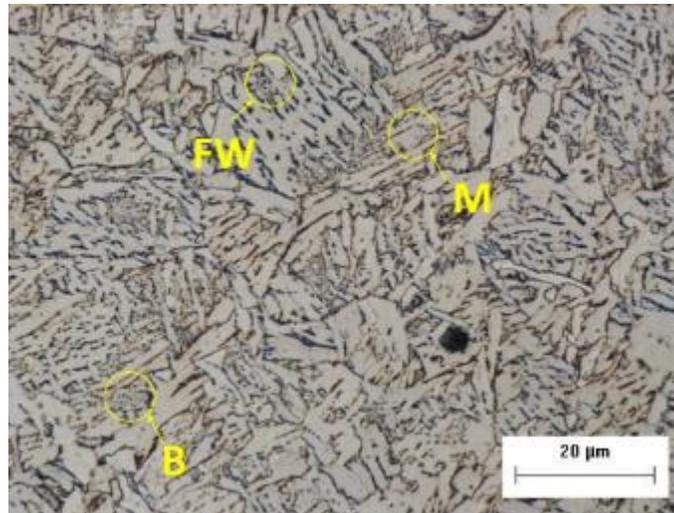


Fig. 5. 13 Micrografía de la zona afectada por el calor a 500x; en donde FW – Ferrita Widmastattën, B – Bainita

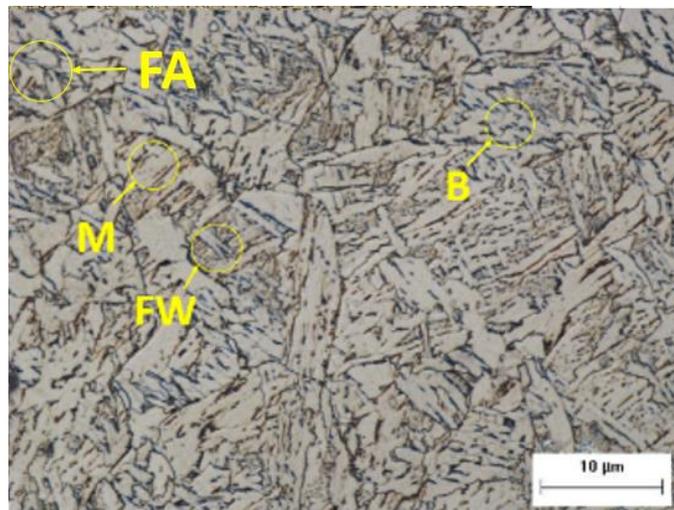


Fig. 5. 14 Micrografía de la zona afectada por el calor; en donde FA – Ferrita acicular, FW – Ferrita Widmastattën

- **Zona de fusión**

Las imágenes realizadas a la zona de fusión (figuras 5.15 y 5.16) revelan la presencia de bandas de ferrita primaria con ferrita Widmastattën creciendo de ellas, también se presentan fases de martensita, ferrita acicular y bainita en granos de menor tamaño.

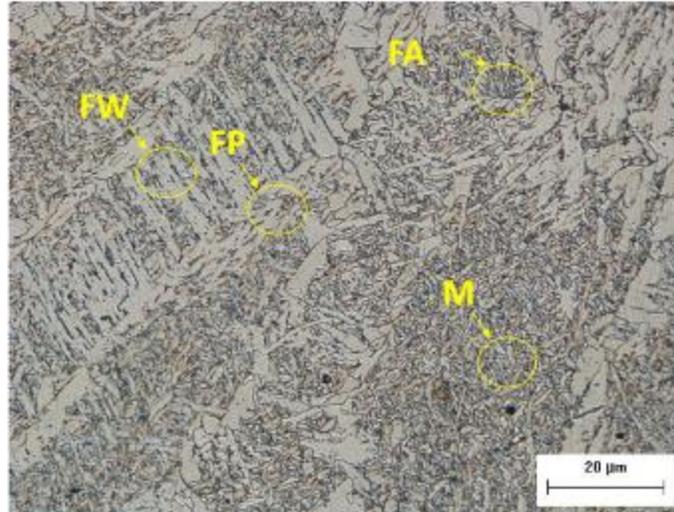


Fig. 5. 15 Micrografía de la zona de fusión; en donde FP – Ferrita Primaria, FW – Ferrita Widmstattën, FA – Ferrita acicular, M – Martensita

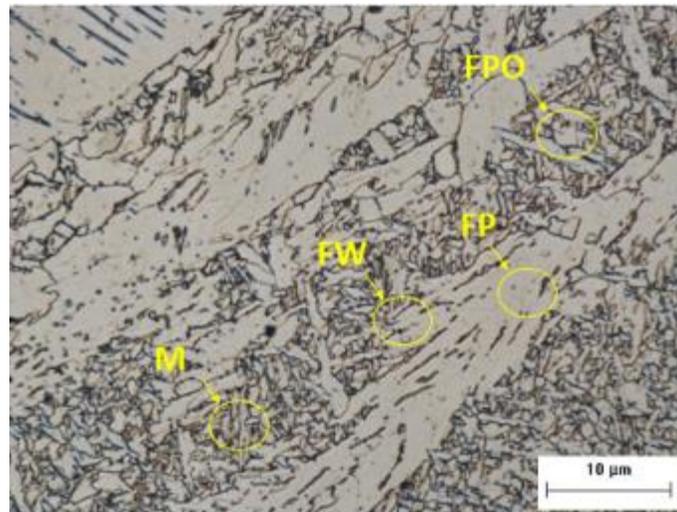


Fig. 5. 16 Micrografía de la zona de fusión; en donde FP – Ferrita Primaria, FW – Ferrita Widmstattën, FPO – Ferrita Poligonal y M – Martensita

### **5.3. Uniones con proceso HLAW**

#### **5.3.1 Estereoscopía**

Para realizar la unión de las placas por medio del proceso HLAW se utilizaron dos tipos de configuración. En el primer caso, fueron placas con preparación mecánica y con una soldadura a tope con dos pasadas, en donde la primera sirvió para una correcta penetración en el acero y la segunda para rellenar la junta tal como se muestra en la figura 5.17a. En dicha imagen también se señalan las zonas de soldadura, al igual que las subzonas de la zona afectada por el calor. De igual manera se midieron los cordones y el espesor de la zona afectada por el calor (figura 5.17b), observando que hubo una disminución de aproximadamente 2 mm en comparación con el proceso SAW/ERW y de 1 mm en comparación al proceso GMAW.

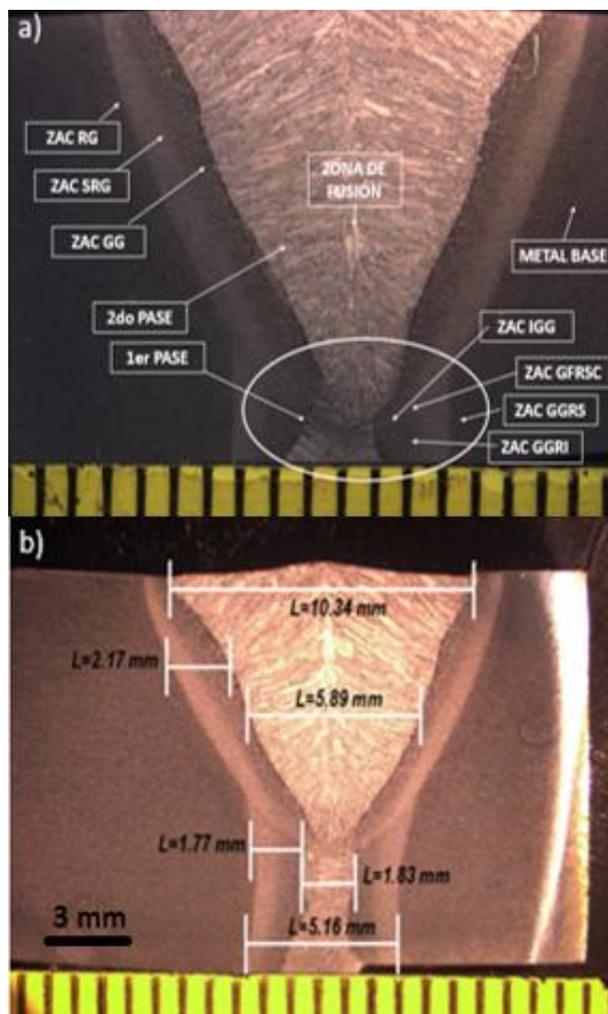


Fig. 5. 17 a) Imagen de estereoscopio de las placas con preparación mecánica unidas mediante el proceso HLAW y b) dimensiones cordón de soldadura.

El segundo caso correspondió a cuatro placas unidas a tope y en donde se realizaron dos pasadas, una en la cara superior seguida de otra en la cara inferior tal como se muestra en la figura 5.18a. Además se observa el perfil de soldadura indicando cada una de las zonas de ésta y las subzonas de la zona afectada por el calor. En general, la zona de soldadura de las uniones con el proceso híbrido es menor 8 mm en comparación con el proceso SAW/ERW y de 2 a 3 mm en comparación con el proceso GMAW (figura 5.20 b). Esta reducción de espesor es benéfica para evitar una mayor afectación al metal base y de esta manera conservar sus propiedades originales.

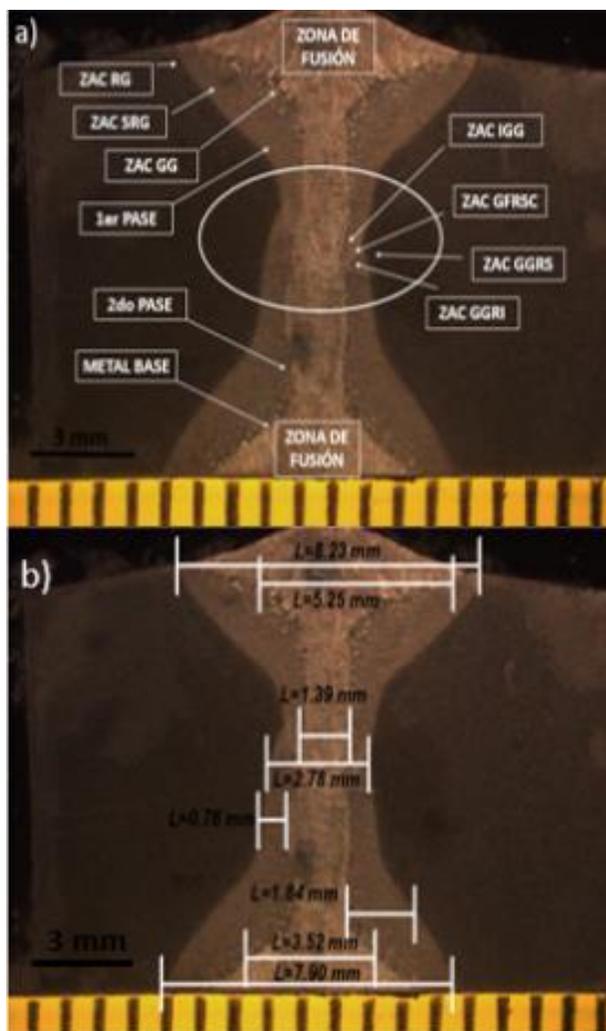


Fig. 5. 18 a) Imagen de estereoscopio de las placas sin preparación mecánica unidas a tope mediante el proceso HLAW y b) dimensiones cordón de soldadura.

### 5.3.2 Microscopía

La figuras 5.19 muestra las zonas de soldadura de la unión con el proceso HLAW. El metal base tiene la misma estructura que en las uniones anteriores, el cambio se da en la zona afectada por el calor donde se puede apreciar una morfología similar a la de las uniones con el proceso GMAW aunque las fases precipitadas pueden variar debido a la alta velocidad de soldadura y enfriamiento que tienen las uniones con el proceso híbrido.



Fig. 5. 19 Micrografía unión HLAW a 500x, donde MB – Metal base, ZAC – Zona afectada por el calor y ZF – Zona de fusión

- **Metal Base**

Como se mencionó anteriormente, el metal base no sufrió modificación alguna en su microestructura ocasionada por el cambio del proceso, la cual consta de ferrita acicular en mayor proporción además de bainita y agregados de martensita con austenita. En la figuras 5.20 y 5.21 se observa que el grano de ferrita acicular es de tamaño ASTM 12, este refinamiento de grano permite un incremento en la resistencia del acero. (35)

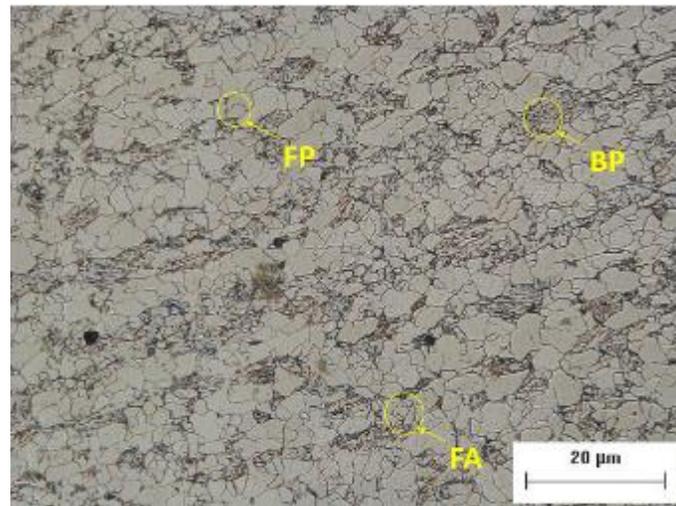


Fig. 5. 20 Micrografía del metal base; en donde FA – ferrita acicular, FP – ferrita poligonal, BP – Bandas de perlita.

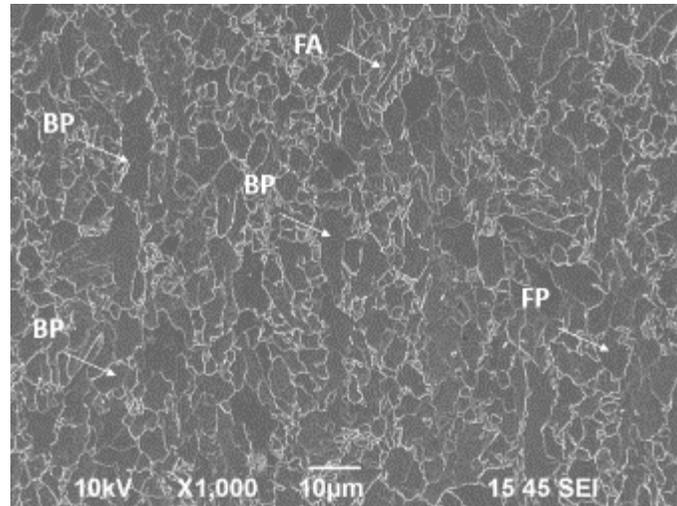


Fig. 5. 21 Imagen tomada en MEB; en donde FA – ferrita acicular, FP – ferrita poligonal y BP – Bandas de perlita.

- **Zona afectada por el calor**

La microestructura de esta zona consiste en un alto volumen de bainita superior e inferior creciendo a partir de los límites de grano y de bloques de martensita, además de esto se presenta también el crecimiento de ferrita acicular (figuras 5.22 – 5.25) (34). Esta estructura puede ser producida por la alta velocidad de soldadura y enfriamiento de la unión que permite que el grano austenítico se transforme en bainita superior e inferior, además un porcentaje de austenita transforme en martensita. Al momento de unir las placas se produce una zona afectada por el calor con multipases, el segundo pase de soldadura actúa como un ciclo térmico, aumentando las propiedades de resistencia y tenacidad del acero, además sirve también para transformar una pequeña parte de austenita retenida en ferrita.

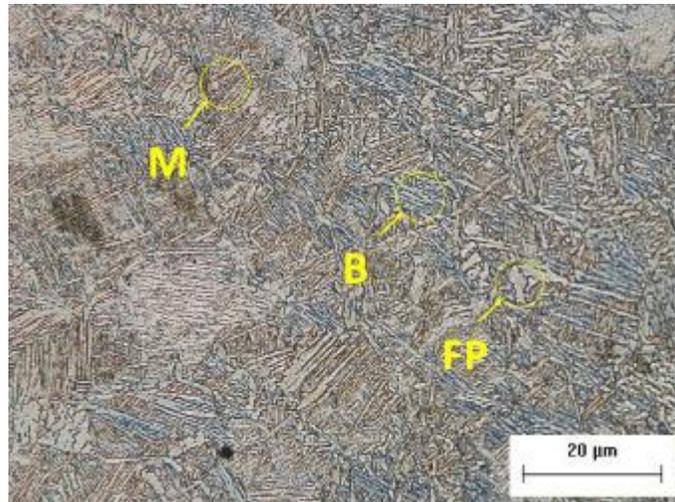


Fig. 5. 22 Micrografía de la zona afectada por el calor de las uniones con el proceso híbrido; en donde FP – Ferrita poligonal, B – Bainita y M – martensita

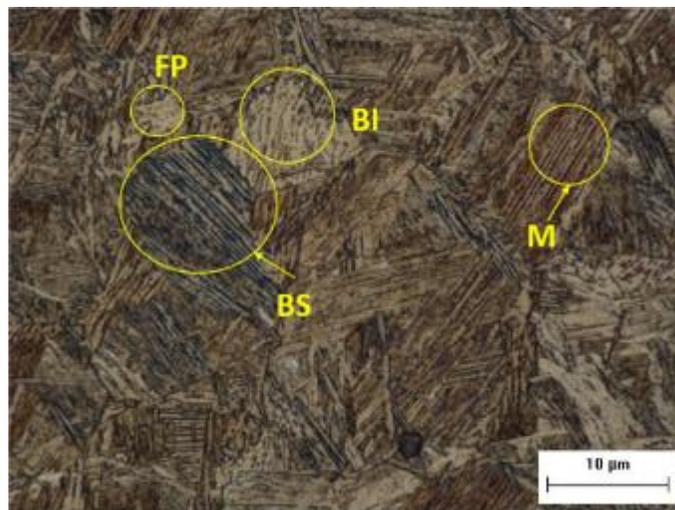


Fig. 5. 23 Micrografía de la zona afectada por el calor de las uniones con el proceso híbrido; en donde FP – Ferrita poligonal, B – Bainita y M – martensita

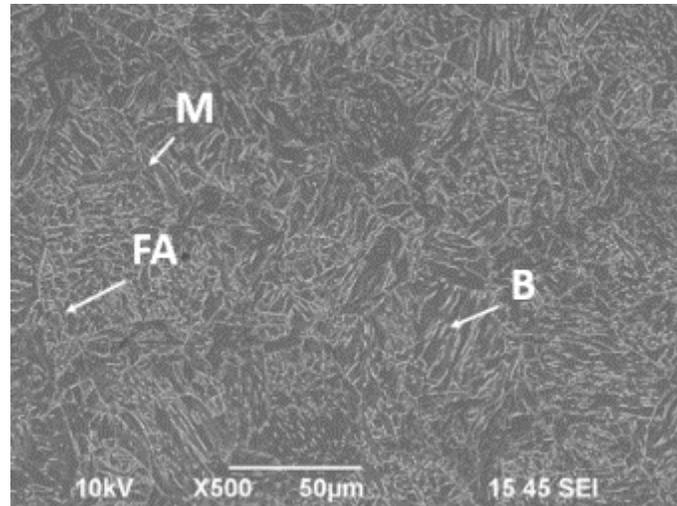


Fig. 5. 24 Imagen tomada en MEB; en donde FA – ferrita acicular, B – Bainita y M – Martensita.

Las imágenes 5.25 y 5.26 muestran la zona afectada por el calor producida por un segundo cordón de soldadura, en donde la disipación de calor modifica la morfología del grano produciendo regiones dentro de la misma, en estas imágenes se observa la región de crecimiento de grano y refinamiento del mismo.

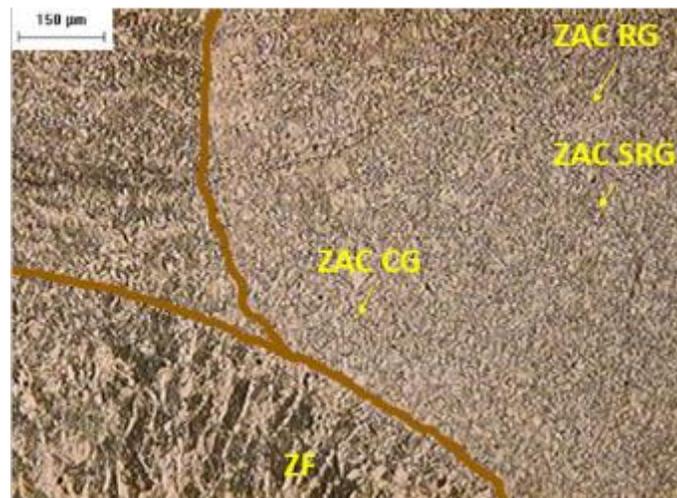


Fig. 5. 25 Zona afectada por el calor en la zona de multipases, ZAC GC – Crecimiento de grano, ZAC SRG – Semi refinamiento de grano, ZAC RG – Refinamiento de grano.

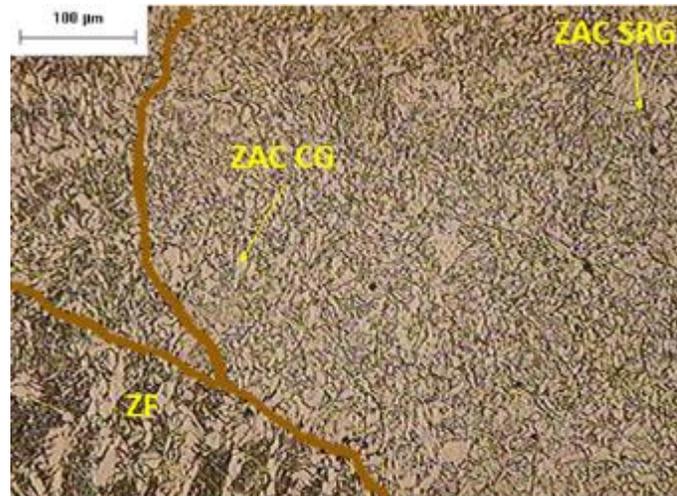


Fig. 5. 26 Zona afectada por el calor en la zona de multipases, ZAC GC – Crecimiento de grano, ZAC SRG – Semi refinamiento de grano, ZAC RG – Refinamiento de grano

- **Zona de fusión**

La microestructura de la zona de fusión se compone de bandas de ferrita con ferrita Widmastattën creciendo a partir de la anterior, sin embargo debido al rápido enfriamiento que produce la soldadura láser, da origen a un crecimiento martensítico en mayor proporción que en los dos procesos anteriores; con el reactivo klemm's aplicado a las muestras ésta fase se pinta de un color café para su fácil reconocimiento. También se pueden observar fases de ferrita poligonal, ferrita acicular y ferrita idiomórfica en menor proporción (figura 5.27 y 5.28). La formación de estas fases se da debido a un enfriamiento acelerado que produce martensita en mayor proporción, además también permite que la austenita no transforme.

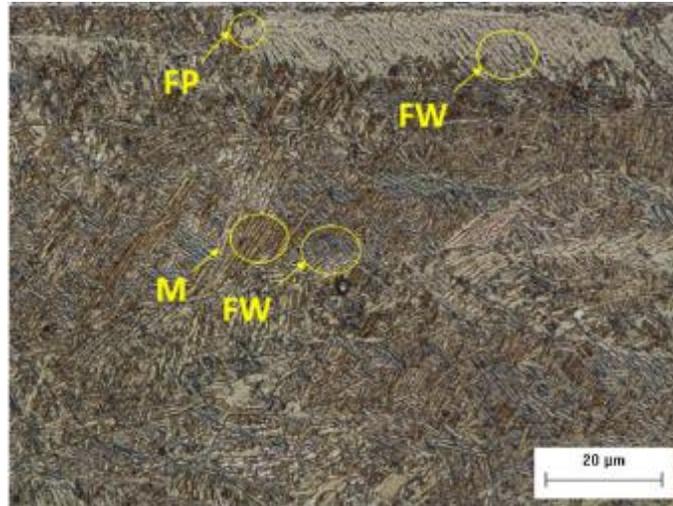


Fig. 5. 27 Micrografía de la zona de fusión; en donde FP – Ferrita Primaria, FW – Ferrita Widmstattën y M – Martensita.

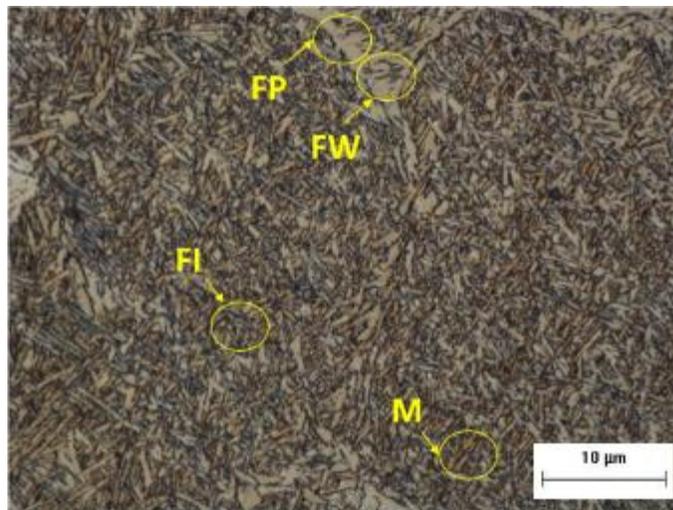


Fig. 5. 28 Micrografía de la zona de fusión; en donde FP – Ferrite Primaria, FW – Ferrita Widmstattën, FI – Ferrita Idiomórfica y M – Martensita

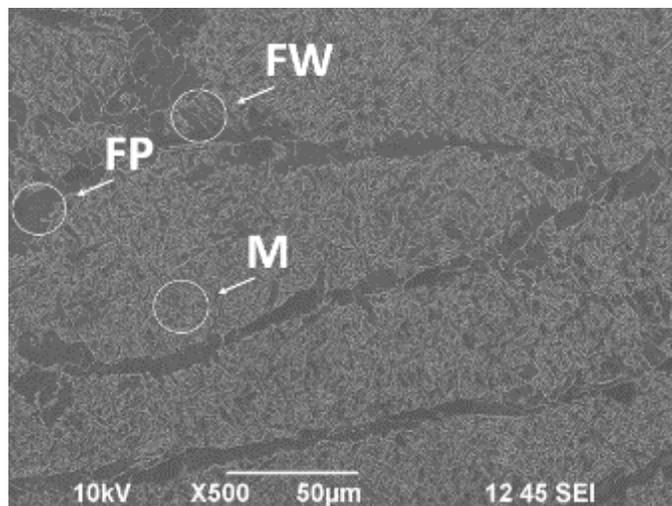


Fig. 5. 29 Imagen de la zona de fusión obtenida en MEB; en donde, FP – Ferrita primaria, FW – Ferrita Widmstätten y M – martensita

## 5.4 Propiedades mecánicas

### 5.4.1 Ensayo de dureza

El análisis de microdureza se llevó a cabo conforme a las especificaciones que marca el código API 5L, en donde menciona que se tiene que realizar un perfil de 33 indentaciones en la zona de soldadura distribuidas de la siguiente manera:

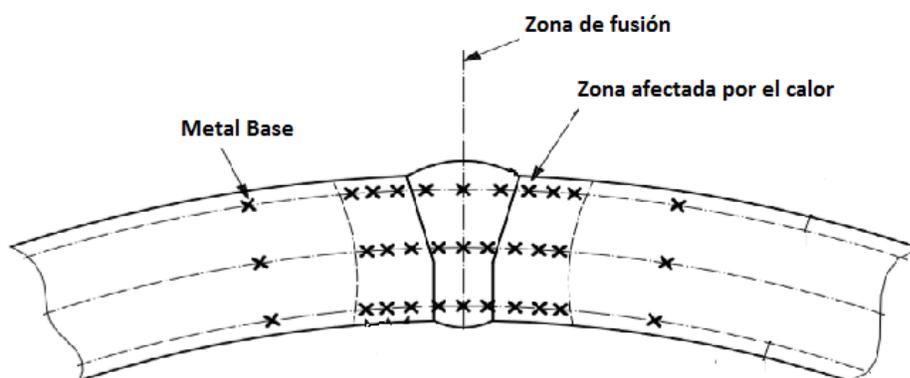


Fig. 5. 30 Perfil para análisis de microdureza de acuerdo al código API 5L.

Al comparar la dureza de los procesos HLAW y SAW/ERW (figura 5.31) se observa que los valores son similares en ambos procesos, a excepción de que en la zona de fusión los valores de dureza se incrementan para las uniones hechas con el proceso híbrido.

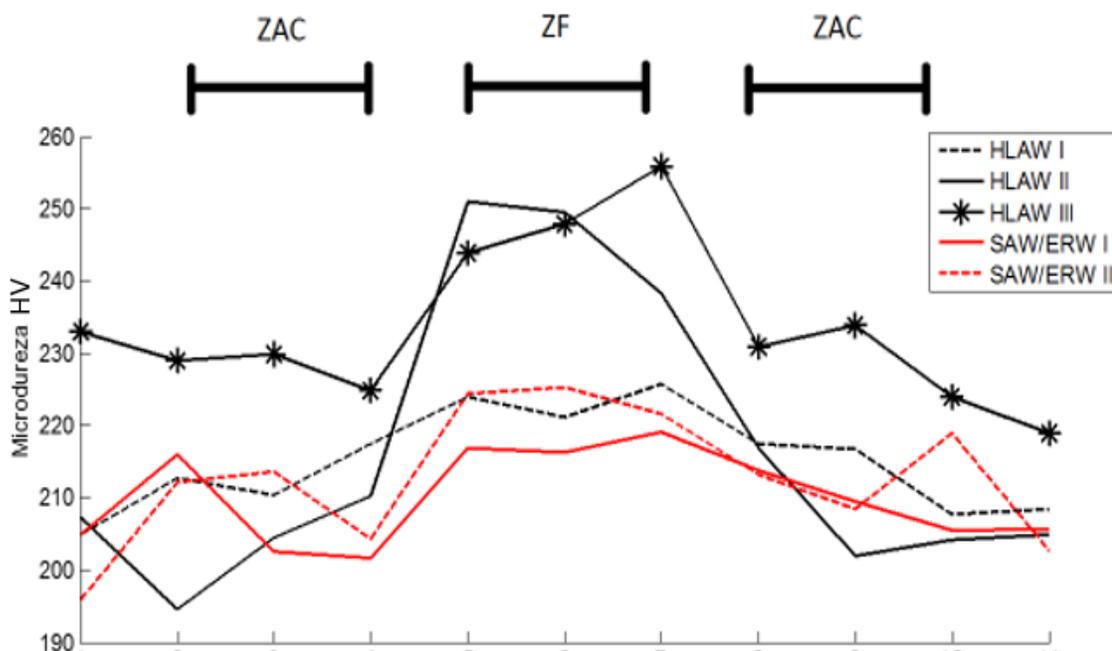


Fig. 5.31 Perfiles de microdureza para uniones HLAW y SAW / ERW

La dureza de las uniones realizadas con el proceso GMAW tiene valores más altos en general oscilando entre 210 y 230 HV, sin embargo en la zona de fusión, la dureza de las uniones con HLAW se eleva hasta alcanzar valores de 250 HV tal como se muestra en la figura 5.32.

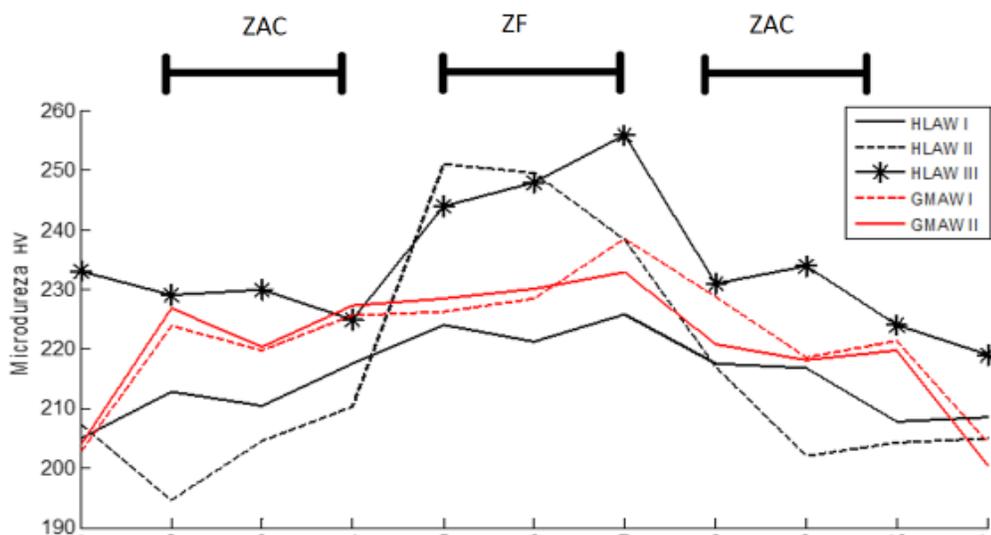


Fig. 5.32 Perfiles de microdureza para uniones HLAW y GMAW.

## 5.4.2 Tensión

Los ensayos de tensión de igual manera se realizaron de acuerdo al código API 1104 que dicta que para calificar, la fractura debe ocurrir lejos de la zona de soldadura (zona de fusión y zona afectada por el calor). En las uniones analizadas en este trabajo, la fractura se presenta en el metal base (figura 5.33), por lo que califican satisfactoriamente. Las figuras 5.34 y 5.35 muestran las gráficas de tensión del proceso HLAW en comparación con el proceso SAW / ERW y GMAW respectivamente. La resistencia a la tensión en ambos casos es mayor para las uniones realizadas con el proceso híbrido con una diferencia de hasta 30 MPa. La tabla 5.2 muestra los resultados de este ensayo.



Fig. 5. 33 Probetas tensionadas donde se puede observar que la fractura se encuentra en el metal base

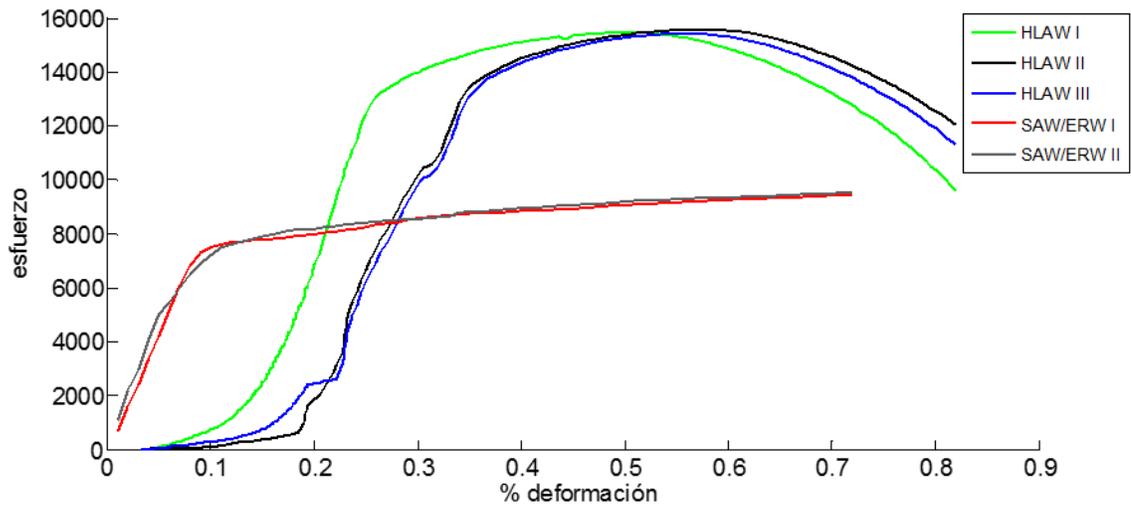


Fig. 5. 34 Grafica de tensión para uniones realizadas con procesos HLAW y SAW / ERW

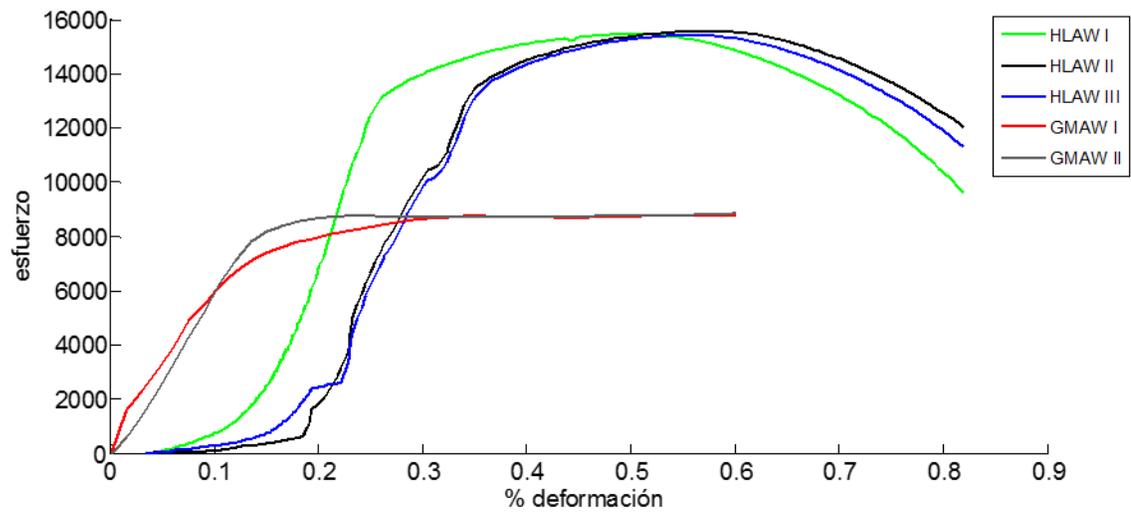


Fig. 5. 35 Grafica de tensión para uniones realizadas con procesos HLAW y GMAW

Tabla 5. 2 Resultados pruebas de tensión uniones de los tres procesos.

N°	Probeta	Resistencia a la tensión	Elongación	Zona de fractura
1	HLAW I	630 MPa	64	Metal Base
2	HLAW II	627 MPa	63	Metal Base
3	HLAW III	624 MPa	73	Metal Base
4	SAW / ERW I	613 MPa	22	Metal Base
5	SAW / ERW II	608 MPa	23	Metal Base
6	GMAW I	562 MPa	11	Metal Base
7	GMAW II	561 MPa	10	Metal Base

### 5.4.3 Ensayo de doblez

Los ensayos de doblez se realizaron a las placas con soldadura HLAW y con las dos configuraciones, todas bajo la norma ASTM E190-92 con un ángulo de doblez de 180°. Los resultados se muestran en la tabla 5.3 donde se puede observar que las uniones realizadas a tope y con material de aporte flux core tienen pequeñas grietas, sin embargo aún con la presencia de éstas, la unión califica debido a que no pasa el límite de tamaño de éstas permitido por el código API 1104 (grietas menores a 3 mm).

Tabla 5. 3 Resultados ensayo de doblado

Probeta	Dimensiones (mm)	Tipo de doblado	Elongación	Imperfecciones
A1	9.9 * 12.7	Lateral	28.5	Sin grietas
A1	9.9 * 12.7	Lateral	33	Sin grietas
B1	10 * 12.2	Lateral	26.5	Grietas en soldadura de 0.6 mm
B1	10 * 12.2	Lateral	28	Grietas en soldadura de 1.4 y 0.7 mm
C1	10.2 * 11.7	Lateral	29	Sin grietas
C1	10.2 * 11.8	Lateral	29	Sin grietas

#### 5.4.4 Ensayo de impacto Charpy

Se realizaron ensayos de impacto a las muestras unidas con el proceso híbrido con los dos tipos de configuración antes mencionados. Los resultados muestran que la resistencia contra el impacto de la unión cumple con lo mínimo requerido por el código API 5L (27 Joules) obteniendo valores mayores a lo especificado, los valores alcanzados fueron de 152 y 136 Joules. De igual manera como se mencionó en los ensayos de tensión, el bajo espesor de la zona de soldadura produce una baja afectación a las propiedades originales del acero, permitiendo así cumplir con la resistencia al impacto para su uso en tuberías.

Tabla 5. 4 Resultados ensayo de impacto Charpy

Muestra	Resultados				
	Joules	Ft-lb	Promedio Joules	Promedio Ft-lb	Temperatura de ensayo
<b>Muestra A</b>	120	89	152	112	0° C
	178	131			
	158	117			
<b>Muestra B</b>	144	106	136	100	0° C
	129	95			
	135	99.5			

#### 5.4.5 Ensayo Nick – Break

Las uniones producidas con la soldadura híbrida también se calificaron por medio de Nick – Break para las dos configuraciones. Los resultados arrojan que la unión con dos pasadas de soldadura en la parte superior (muestra B) presenta porosidades, sin embargo aun con la presencia de éstos, la unión es aprobada ya que las porosidades tienen un tamaño menor a lo máximo permitido de 1.7 mm (ver figura 5.36a). En el caso de la unión con dos pasadas en caras opuestas (unión A), se presentan defectos con los cuales no es posible aprobar (ver figura 5.36b), la descripción del ensayo y defectos se

encuentra en la tabla 5.5. El modo de fractura de las uniones durante el ensayo fue de tipo dúctil en la unión B y de tipo dúctil – frágil en la unión B que se puede deber a la presencia de poros en la unión.

Tabla 5. 5 Resultados ensayo Nick – Break

Muestra	# Probetas	Observaciones
Muestra A	1	Poros agrupados en área expuesta, los más relevantes son: 1. 1.46 mm, 2. 2 mm
Muestra B	1	Poros de 1.016 mm

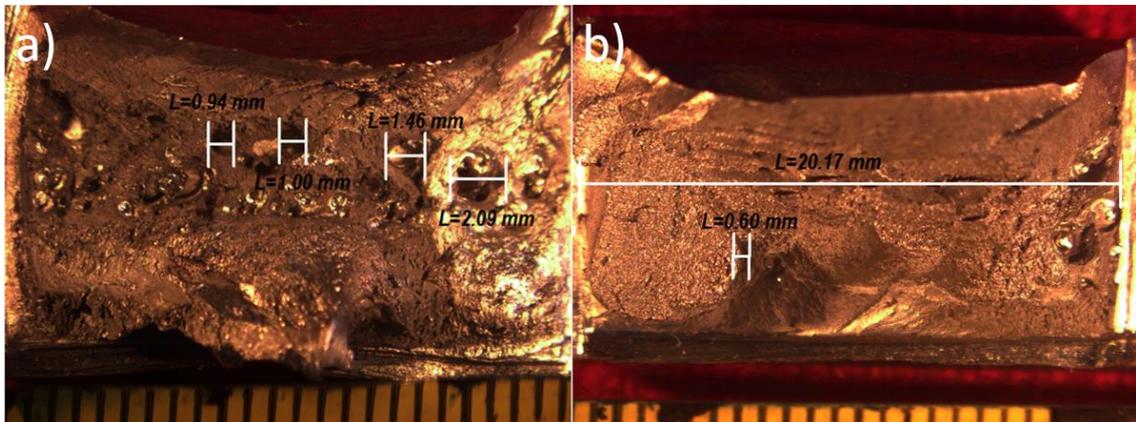


Fig. 5. 36 Probetas fracturadas de ensayo Nick – Break.

## CAPITULO 6

### CONCLUSIONES

En este estudio la microestructura y ensayos mecánicos de tenacidad y microdureza de una unión de acero API 5L X70 realizada con el proceso HLAW fue estudiada y comparada con uniones realizadas mediante los procesos SAW/ERW y GMAW.

- El análisis químico indica que el metal base se trata de un acero API X70 que se caracterizan por su alta resistencia al impacto y tenacidad y el cual es empleado en la industria de la conducción de hidrocarburos.
- Los resultados muestran que el proceso HLAW ofrece ventajas en comparación con los procesos SAW / ERW y GMAW debido a que es capaz de lograr mayor penetración y produce una zona afectada por el calor más pequeña a menores velocidades de soldadura.
- Las imágenes tomadas en el estereoscopio revelan que el espesor de las uniones realizadas con el proceso híbrido es menor en un rango de 8 mm en comparación a las uniones SAW/ERW y 4 mm en comparación a las uniones GMAW. Esta diferencia de espesores permite que las uniones con el proceso HLAW tengan una mínima afectación a las propiedades mecánicas del material, ya que el calor de entrada es menor en comparación con los otros procesos.

- La microestructura de las uniones HLAW en la zona afectada por el calor se compone de bainita con martensita y ferrita poligonal. Esta microestructura es causada por la alta velocidad de soldadura y la velocidad de enfriamiento acelerado. La alta tasa de enfriamiento producida por el proceso HLAW cambia la estructura original de la de acero, sin embargo, debido al proceso de soldadura por láser permite una baja afectación del metal base y por lo tanto puede preservar las propiedades originales del acero, permitiendo que la unión hecha con el proceso híbrido tenga mejores propiedades que la unión hecha con los procesos SAW/ERW y GMAW.
- La dureza tomada para las tres uniones muestra que las realizadas con el proceso GMAW son mayores en el orden de 10 – 15 HV en la zona afectada por el calor, sin embargo en la zona de fusión los valores más altos de dureza pertenecen a las uniones con el proceso híbrido alrededor de 230 – 250 HV, debido a las velocidades de enfriamiento que se dan en la zona con ese proceso. Aun así la dureza de las uniones con el proceso híbrido cumple con el código API 5L aplicado para la manufactura de tuberías.
- A pesar de que la mayoría de los ensayos fueron aceptados de acuerdo a las normas empleadas, es necesario repetir algunos para corroborar la situación de las uniones mediante el proceso HLAW, además incluir análisis tales como evaluación de corrosión, esfuerzos residuales, entre otros.

Tabla 6. 1 Comparación de características y propiedades entre los tres procesos

		HLAW	SAW/ERW	GMAW
	Total	8	22	10
Dimensiones (mm)	ZAC	3	18	2
	ZF	6	5	8
	MB	208.5	202.55	202.5
Dureza (HV)	ZAC	221.3	208	224
	ZF	240	220.3	230.5
Tensión (Mpa)	Total	627	-	-
Charpy (Joules)	Total	145	-	-
Doblez	Total		Aprobado	
Nick - Break	Total		Aprobado	

## Lista de figuras

Fig. 2. 1 Mecanismos de soldadura con proceso HLAW, a) primer mecanismo soldadura HLAW y b) segundo mecanismo soldadura HLAW (1).....	10
Fig. 2. 2 Penetración a diferentes velocidades de soldadura.....	28
Fig. 2. 3 Representación esquemática del proceso GMAW (23) .....	30
Fig. 2. 4 Esquema de transferencia por cortocircuito.....	31
Fig. 2. 5 Esquema transferencia por spray .....	32
Fig. 2. 6 Diagrama de un láser de flujo transversal.....	41
Fig. 2. 7 Proceso de soldadura SAW para componentes marítimos (20) .....	45
Fig. 2. 8 Esquema del proceso SAW (28).....	46
Fig. 2. 9 Proceso de formación “UOE” (30).....	52
Fig. 2. 10 Proceso de soldadura por resistencia en costura para tuberías (31) 53	
Fig. 2. 11 Distribución de resistencias en el proceso de soldadura ERW (32)..	55
Fig. 2. 12 Diagrama unión tubería por medio de soldadura ERW (31) .....	60
Fig. 2. 13 Distribución del calor en la unión con proceso “UOE” (31) .....	61
Fig. 3. 1 Diagrama de metodología.....	64
Fig. 5. 1 a) Imagen de los cordones de soldadura mediante los procesos SAW/ERW y b) Mediciones del cordón de soldadura. ....	72
Fig. 5. 2 Zonas de soldadura; MB – Metal base, ZAC – Zona afectada por el calor y ZF – Zona de fusión .....	73
Fig. 5. 3 Micrografía del metal base; FA – ferrita acicular, FP – ferrita poligonal y BP – Bandas de perlita. ....	74
Fig. 5. 4 Micrografía del metal base; FA – ferrita poligonal, P – perlita y AR – austenita retenida. ....	75
Fig. 5. 5 Micrografía de la zona afectada por el calor; donde FA – ferrita acicular, B – bainita y FW – ferrita Widmastattën .....	76

Fig. 5. 6 Micrografía de la zona afectada por el calor; donde FA – ferrita acicular, B – bainita y FW – ferrita Widmastattën .....	76
Fig. 5. 7 Micrografía de la zona de fusión; donde FW – Ferrita Widmastattën, FP – Ferrita Primaria, FA – Ferrita Acicular y M – martensita. ....	77
Fig. 5. 8 Micrografía zona de fusión; donde FW – Ferrita Widmastattën, FP – Ferrita Primaria, FPO – Ferrita Poligonal y M – martensita. ....	78
Fig. 5. 9 Imagen de estereoscopio de unión con proceso GMAW: a) Identificación de los cuatro cordones de soldadura, al igual que las zonas importantes; b) dimensiones de los cordones de soldadura. ....	79
Fig. 5. 10 Micrografía unión GMAW a 500x, donde MB – Metal base, ZAC – Zona afectada por el calor y ZF – Zona de fusión.....	81
Fig. 5. 11 Micrografía del metal base; en donde FP – ferrita poligonal, P – Bandas de perlita .....	81
Fig. 5. 12 Micrografía del metal base; P – Perlita, FP – Ferrita Poligonal y AR – austenita retenida .....	82
Fig. 5. 13 Micrografía de la zona afectada por el calor a 500x; en donde FW – Ferrita Widmastattën, B – Bainita .....	83
Fig. 5. 14 Micrografía de la zona afectada por el calor; en donde FA – Ferrita acicular, FW – Ferrita Widmastattën.....	83
Fig. 5. 15 Micrografía de la zona de fusión; en donde FP – Ferrita Primaria, FW – Ferrita Widmastattën, FA – Ferrita acicular, M – Martensita .....	84
Fig. 5. 16 Micrografía de la zona de fusión; en donde FP – Ferrita Primaria, FW – Ferrita Widmastattën, FPO – Ferrita Poligonal y M – Martensita .....	84
Fig. 5. 17 a) Imagen de estereoscopio de las placas con preparación mecánica unidas mediante el proceso HLAW y b) dimensiones cordón de soldadura. ....	86
Fig. 5. 18 a) Imagen de estereoscopio de las placas sin preparación mecánica unidas a tope mediante el proceso HLAW y b) dimensiones cordón de soldadura. ....	87
Fig. 5. 19 Micrografía unión HLAW a 500x, donde MB – Metal base, ZAC – Zona afectada por el calor y ZF – Zona de fusión.....	88

Fig. 5. 20 Micrografía del metal base; en donde FA – ferrita acicular, FP – ferrita poligonal, BP – Bandas de perlita.....	88
Fig. 5. 21 Imagen tomada en MEB; en donde FA – ferrita acicular, FP – ferrita poligonal y BP – Bandas de perlita. ....	89
Fig. 5. 22 Micrografía de la zona afectada por el calor de las uniones con el proceso híbrido; en donde FP – Ferrita poligonal, B – Bainita y M – martensita	90
Fig. 5. 23 Micrografía de la zona afectada por el calor de las uniones con el proceso híbrido; en donde FP – Ferrita poligonal, B – Bainita y M – martensita	90
Fig. 5. 24 Imagen tomada en MEB; en donde FA – ferrita acicular, B – Bainita y M – Martensita. ....	91
Fig. 5. 25 Zona afectada por el calor en la zona de multipases, ZAC GC – Crecimiento de grano, ZAC SRG – Semi refinamiento de grano, ZAC RG – Refinamiento de grano.....	91
Fig. 5. 26 Zona afectada por el calor en la zona de multipases, ZAC GC – Crecimiento de grano, ZAC SRG – Semi refinamiento de grano, ZAC RG – Refinamiento de grano.....	92
Fig. 5. 27 Micrografía de la zona de fusión; en donde FP – Ferrita Primaria, FW – Ferrita Widmattén y M – Martensita. ....	93
Fig. 5. 28 Micrografía de la zona de fusión; en donde FP – Ferrita Primaria, FW – Ferrita Widmattén, FI – Ferrita Idiomórfica y M – Martensita .....	93
Fig. 5. 29 Imagen de la zona de fusión obtenida en MEB; en donde, FP – Ferrita primaria, FW – Ferrita Widmattén y M – martensita.....	94
Fig. 5. 30 Perfil para análisis de microdureza de acuerdo al código API 5L. ....	95
Fig. 5. 31 Perfiles de microdureza para uniones HLAW y SAW / ERW .....	96
Fig. 5. 32 Perfiles de microdureza para uniones HLAW y GMAW. ....	96
Fig. 5. 33 Probetas tensionadas donde se puede observar que la fractura se encuentra en el metal base.....	97
Fig. 5. 34 Grafica de tensión para uniones realizadas con procesos HLAW y SAW / ERW .....	98
Fig. 5. 35 Grafica de tensión para uniones realizadas con procesos HLAW y GMAW .....	98

Fig. 5. 36 Probetas fracturadas de ensayo Nick – Break. .... 101

## Lista de tablas

Tabla 2. 1 Composición gases de protección (8) .....	14
Tabla 2. 2 Parámetros soldadura con Nd:YAG y Yb:SiO <sub>2</sub> (4) .....	17
Tabla 2. 3 Comparación entre procesos de soldadura (11) .....	18
Tabla 4. 1 Parámetros soldadura SAW/ERW .....	66
Tabla 4. 2 Parámetros soldadura GMAW .....	66
Tabla 4. 3 Parámetros soldadura HLAW placas preparadas mecánicamente ..	67
Tabla 4. 4 Parámetros soldadura HLAW con material aporte ER70S – 6.....	67
Tabla 4. 5 Parámetros soldadura HLAW con material aporte flux core E71T1 .	68
Tabla 5. 1 Composición química metal base y materiales de aporte % e.p.....	71
Tabla 5. 2 Resultados pruebas de tensión uniones de los tres procesos. ....	99
Tabla 5. 3 Resultados ensayo de doblado.....	99
Tabla 5. 4 Resultados ensayo de impacto Charpy.....	100
Tabla 5. 5 Resultados ensayo Nick – Break .....	101
Tabla 6. 1 Comparación de características y propiedades entre los tres procesos .....	104

## Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Ecuación para obtención de carbono equivalente (1) .....	23
--	----

## Bibliografía

1. Olsen, Fleming. *Hybrid laser-arc welding*. s.l. : Woodhead publishing limited.
2. Claus Bagguer, Flemming O.Olsen. *Review of laser hybrid welding*. s.l. : Journal of Laser Applications, 2005.
3. Denney, Paul. *Lo que debes saber sobre la soldadura hibrida por láser y arco*. s.l. : The welding journal, 2013.
4. M. Fersini, G. Demofonti, S. Sorrentino, E. Mecozzi. *Circumferencial welding of gas pipelines pipes using hybrid technology with fibre delivered laser beam*. s.l. : Welding International, 2009.
5. H. Engström, K. Nilsson, J. Flinkfeldt, T. Nilsson, A. Skirfors, B. Gustavsson. *Laser hybrid welding of high strenght steels*. s.l. : University of Technology Sweden.
6. M. El Rayes, C. Walz, G. Sepold. *Influence of various hybrid welding parameters on bead geometry*. s.l. : American Welding Society, 2004.
7. Giampolo Campana, A. Fortunato, A.Ascari, G. Tani, L. Tonesai. *Hybrid laser MIG welding of aluminum alloys: Influence of gases*. s.l. : Applied Surface Science, 2007.
8. Tanni Giovanni, Campana Giaompaolo, Fortunato Alessandro, Ascari Alessandro. *The influence of shielding gas in Hybrid LASER-MIG welding*. s.l. : Department of Mechanical Construction Engineering.
9. T. Lienert, T. Siewert, S. Babu, and V, Acoff. *Hybrid Laser Arc Welding*. s.l. : ASM Handbook, Volume 6A, Welding Fundamentals and Processes.
10. Antiquera, Dr. Ing. Julio. *Soldadura Latinoamericana*. s.l. : Universidad de Magallanes, Punta Arena, Chile.
11. Edward. Retzel, M. Sullivan, D. Mikesic. *Joining Pipe with the hybrid Laser-GMAW process: Weld Test Results and Cost Analysis*. s.l. : Pennsylvania State University, Applied Research Laboratory, 2006.
12. J.M. Gray, Zhang Shousua , Xie Xishan. *HSLA Steels Metallurgy and Applications*. s.l. : ASM International.

13. A. Yu. Ivanova, R. V. Sulyagina, V. V. Orlovb, A. A. Kruglovab. *High strenght steel development for pipelines: A brazilian perspective*. s.l. : Steel in Translation, 2011.
14. Jr, J.M. Sawhill. *Welding HSLA line pipe steels*. s.l. : Metallovedente Termicheskaya Obrabotka Metallov.
15. A. V. Kushnarev, E. V. Shekhovtsov, E. S. Kapustina, S. A. Remigo, and I. V. Kostenko. *Production of Pipe Steel of Strength Classes X80 and X70*. s.l. : Steel in translation .
16. Padamiec, J. Dziubinski. *Pressure and fusion welding of modern steel tubing*. s.l. : Slask Polytechnic Welding International, 2009.
17. Jang-Yong Yoo, Seong-Soo Ahn, Dong-Han Seo, Woo-Hyun Song, Ki-Bong Kang. *New development of high grade X80 to X120 pipeline steels*. s.l. : Materials and Manufacturing Processes, 2011.
18. A. Yu. Ivanova, R. V. Sulyagina, V. V. Orlovb, A. A. Kruglovab. *Structure properties of weld joints in X80, X90 y K70 pipe steels*. s.l. : Steel in Translation, 2011.
19. Jang-Bog Jua, Jung-Suk Leea, Jae-il Jangb, Woo-sik Kimc, Dongil Kwona. *Determination of welding residual stress distribution in API X65 pipeline steels using anodified magnetic Barkausen noise method* . s.l. : International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2003.
20. A. WARREN, D.H. JACK. *Steels for Pipeline Applications*.
21. S. Grünenwalda, T. Seefelda, F. Vollertsena, M. Kocakb. *Solutions for joining pipe steels using laser-GMA-hybrid welding processes*. s.l. : Physics Procedia, 2010.
22. *ASM Handbook 6. BRAZING, WELDING AND SOLDERING*. s.l. : ASM International, 1995.
23. Society, American Welding. *Welding Handbook Tomo 1 Capitulo 4*. s.l. : American Welding Society.
24. —. *Welding Handbook Tomo 3 Capítulo 22* . s.l. : American Welding Society.

25. Elle Guen, R. Fabbro, M. Carin, F. Coste, P. Le Masson. *Analysis of hybrid Nd:YAG laser MAG arc welding process*. Optics and Laser Technology : s.n., 2011.
26. Fronius, Revista. *Hacia adelante a velocidad de la luz* . s.l. : Revista Fronius.
27. P. Sathiya, Mahendra Kumar Mishra, B. Shanmugarajan. *Effect of shielding gases on microstructure and mechanical properties of super austenitic stainless steel by hybrid welding*. s.l. : Materials and Design, 2011.
28. *Welding Handbook Tomo 1 Capitulo 6*. s.l. : American Welding Society.
29. Shahnwaz Alam, M. Khan. *Prediction of the effect of submerged arc welding process parameters on weld bead width for MS 1018 steels*. s.l. : International Journal of Engineering and Innovative Technology, 2012.
30. Edson Vasques Moreira, H. Simoesa, J. Barbosa, J. Camargob, M. dos Santos. *Digital radiography for the inspeciton of weld seams of pielines: better sensivity*. s.l. : Welding International, 2010.
31. INOUE Tomohiro, S. Masahito, O. Takatoshi, M. Yutaka. *Development of advanced electric resistance welding linepipe with high quality weld seam suitable for extra-low temperature services*. s.l. : JFE TECHNICAL REPORT No. 18, 2013.
32. *Welding Handbook Tomo 2 Capitulo 17*. s.l. : American Welding Society.
33. Williams, J.G. *Advances in steels for high strenght ERW linepipe application in Australia*. s.l. : Australia MATERIALS FORUM, 2007.
34. Chaowen Li, Yong Wang, Tao Han. *Microstructure and toughness of coarse grain heat-affected zone of domestic X70 pipeline steel during in-service welding*. s.l. : Journal of Materials Science, 2011.
35. Babu, Sudaranam Suresh. *The mechanism of acicular ferrite in weld deposits*. s.l. : Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2004.
36. Blackman, D. Yaap y S.A. *Recent development in high productivity Pipeline Welding*. s.l. : Welding Engineering Research Centre.
37. G. Campana, A. Fortunato, A. Ascari, G. Tani y L. Tomesani. *The influence of transfer mode in hybrid laser-mig welding*. s.l. : Journal of Materials Progresing Technology.

38. A. O. Nosochenko, Yu. I. Matrosov, I. V. Ganoshenko, A. V. Nazarov y V. V. Volodarskii. *Properties of pearlite- free pipe of type 0.03C-1.5Mn-0.09Nb in strenght class X60 y X70*. s.l. : Metallurgist.
39. *Journal of Materials Processing Technology*.
40. *International Material Research Congress*.
41. *Journal of Materials Engineering and Performance*. s.l. : ISSN 1059-9495.
42. *Journal of Materials Science and Technology*. s.l. : ISSN 1005-0302.
43. Shuangyu Liu, F. Liu, H. Zhang, Y. Shi. *Analisis of droplet transfer mode and forming process in CO2 laser MAG hybrid welding process*. s.l. : Optics and Laser Technology, 2011.
44. Li Zhiyong, T.S. Srivatsan, L. Yan, Z. Wenzhao. *Coupling of Laser with plasma arc to facilitate hybrid welding of metallic materials: Review*. s.l. : Journal of Materials Engineering and Performance, 2013.
45. Giampolo Campana, A. Fortunato, A. Ascari, G. Tani, L. Tonesai. *Influence of arc transfer mode in hybrid laser-MIG welding*. s.l. : Applied Surface Science, 2007.