

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA SOLDADURA POR HAZ DE
ELECTRONES DE ACEROS PARA APLICACIONES AUTOMOTRICES**

POR

ADRIANA STHEFANIA RODRIGUEZ LIÑAN

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

DICIEMBRE, 2016

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA SOLDADURA POR HAZ DE
ELECTRONES DE ACEROS PARA APLICACIONES AUTOMOTRICES**

POR

ADRIANA STHEFANIA RODRIGUEZ LIÑAN

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

DICIEMBRE, 2016

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "**Estudio experimental de la soldadura por haz de electrones de aceros para aplicaciones automotrices**" realizada por la estudiante Adriana Sthefania Rodriguez Liñan, con matrícula 1425921, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

COMITÉ DE TESIS



Dra. Martha Patricia Guerrero Mata
Asesor



Dr. Sergio Haro Rodríguez
Co-asesor

Dr. Omar García Rincón
Co-asesor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México

Diciembre 2016

Dedicatoria

A mi familia:
A mi hermana Carolina
y a mi padres, Adela y Jesús.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado durante el programa de maestría.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

A Ternium México S. A. de C. V. por la facilitación de materiales para la realización de este proyecto.

A la Dra. Martha Patricia Guerrero Mata por su asesoramiento, soporte y discusión crítica que me permitió un buen aprovechamiento del trabajo realizado, por darme esta oportunidad y confiar en mí.

Al Dr. Sergio Haro Rodríguez por estar al pendiente de todas las dificultades técnicas que se presentaron durante la realización de este trabajo, por su integración y consejos para mejorarlo.

Al Dr. Omar García Rincón por su valiosa participación en la revisión del presente trabajo de investigación, así como también por sus sugerencias para complementar este documento.

Al Prof. Mark Rainforth por permitirme el uso de las instalaciones de la Universidad de Sheffield, lugar donde conocí a James Hunt y Ben Palmer del Mercury Centre que me ayudaron y guiaron en una parte importante de la experimentación de este proyecto.

A la Dra. Adriana Salas por el apoyo de algunas pruebas.

Al Dr. Rafael Mercado por la ayuda que me proporcionó al permitirme el uso de algunos equipos de laboratorio de las instalaciones de FIME.

A Marcel Carpio por todo su tiempo, apoyo y confianza que me motivaron a mejorar día con día.

A Francisco González y Jorge Calderón por el apoyo en algunas cuestiones de la experimentación.

A mis amigos y compañeros del programa de posgrado con los que compartí buenos y malos momentos, los cuales se han vuelto experiencias y lecciones aprendidas, así como retos para el futuro.

Resumen

Adriana Sthefania Rodriguez Liñan

Fecha: **Diciembre 2016**

Candidato para el grado de **Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales**

Título del estudio: **ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA SOLDADURA POR HAZ DE ELECTRONES DE ACEROS PARA APLICACIONES AUTOMOTRICES**

Área de estudio: **Ingeniería mecánica, Ingeniería de materiales**

No. de páginas: ---

Los tailor welded blanks tienen un aumento significativo en la producción de varios componentes de distintos sectores, reflejando la demanda de la industria automotriz por nuevas combinaciones basadas en materiales calificados. Al introducir esta tecnología, es esencial seleccionar los materiales correctamente, así como el proceso de soldadura más adecuado.

Los materiales evaluados en este trabajo es un acero HSLA y un acero 22MnB5. Se analizaron las características metalúrgicas de piezas soldadas por haz de electrones con distintos aportes de calor. Se investigó el efecto de la potencia del haz y la velocidad de barrido sobre la geometría del cordón de soldadura, y los posibles defectos mediante las observaciones de microscopía óptica, perfiles de dureza y la simulación de ensayos de tensión de juntas similares unidas en esas condiciones.

Se realizaron pruebas de formabilidad de las mejores condiciones de soldadura, esto permitió analizar si las propiedades de las juntas son convenientes para el conformado de las piezas soldadas con el objetivo de evaluar la calidad de la pieza final es aplicable para este procedimiento.

Índice

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación	4
1.2 Objetivo	5
1.2.1 Objetivos específicos	5
1.3 Hipótesis.....	5
Capítulo 2 MARCO TEÓRICO	6
2.1 Introducción.....	6
2.1.1 Introducción a la soldadura por fusión	7
2.1.2 Soldadura por fusión.....	9
2.1.3 Densidad de energía de la fuente de calor	9
2.1.4 Procesos de soldadura por fusión	11
2.1.5 Tipos de juntas	11
2.2 Fundamentos de soldadura por haz de electrones	13
2.3 Historia del proceso EBW.....	13
2.4 Características del proceso	15
2.5 Bases del proceso	17
2.5.1 Electrón.....	17
2.5.2 Haz de electrones	18
2.6 Penetración del haz de electrones durante la soldadura.....	20
2.7 Equipo de soldadura por haz de electrones	21
2.8 Parámetros de soldadura	23
2.9 Soldabilidad de los materiales por el proceso de haz de electrones	25
2.10 Ventajas	26
2.11 Estándares de calificación de procedimientos de soldadura	27
Capítulo 3 DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	30
3.1 Introducción.....	30
3.2 Generalidades	31
3.1 Caracterización de los aceros	31

3.1.2 Preparación del material	32
3.1.3 Análisis químico por espectrometría de emisión óptica	32
3.1.4 Cálculo del carbono equivalente	33
3.1.5 Análisis metalográfico	33
3.1.5.1 Microscopía óptica	34
3.1.5.2 Microscopía electrónica de barrido.....	34
3.1.7 Ensayo de dureza Vickers	34
3.1.8 Ensayo de tensión	35
3.2 Pruebas de soldadura	35
3.2.1 Preparación de cupones	35
3.2.1 Equipo utilizado	36
3.2.2 Ajuste de los parámetros de soldadura.....	36
3.2.3 Proceso de soldadura	38
3.4 Caracterización de los cordones de soldadura.....	39
3.4.1 Inspección visual	39
3.4.2 Micro y macrografías	39
3.4.3 Perfil de microdureza Vickers	40
3.4.4 Ensayo de tensión	40
Capítulo 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
4.1 Introducción.....	42
4.2 Caracterización de los aceros	42
4.2.1 Análisis químico por espectrometría de emisión óptica	42
4.2.2 Cálculo del carbono equivalente	43
4.2.3 Análisis metalográfico	44
4.2.3.1 Microscopía óptica	44
4.2.3.2 Microscopía electrónica de barrido.....	44
4.2.4 Cuantificación del volumen de fases.....	47
4.2.5 Ensayo de dureza Vickers	49
4.2.6 Ensayo de tensión	50
4.3 Ajuste de parámetros de soldadura.....	51
4.4 Proceso	53

4.5 Caracterización de los cordones de soldadura.....	54
4.5.1 Inspección visual	55
4.5.2 Estructuras macro y micrográficas.....	58
4.5.2.1 Estructura macrográfica	58
Capítulo 5 CONCLUSIONES	53
LISTA DE REFERENCIAS	55
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO.....	60
Lista de tablas.....	viii
Lista de figuras.....	ix
Lista de abreviaciones	xii

Lista de tablas

Tabla 2.1 – Inicios del desarrollo de la soldadura por haz de electrones [15]... 15	
Tabla 2.2 – Estándares de calificación del proceso de soldadura por haz de electrones. 28	
Tabla 3.1 – Identificación de muestras con los parámetros generales evaluados. 37	
Tabla 3.2 – Parámetros utilizados para el estudio. 37	
Tabla 4.1 – Composición química de los aceros utilizados (% en peso). 43	
Tabla 4.2 – Criterios para la evaluación del carbono equivalente (%). 43	
Tabla 4.3 – Cuantificación del volumen de fases..... 49	
Tabla 4.4 – Dureza Vickers (HV). 49	
Tabla 4.5 – Propiedades mecánicas..... 50	
Tabla 4.6 – Dimensiones de las características y defectos de los cordones del acero HSLA..... 49	
Tabla 4.7 – Dimensiones de las características y defectos de los cordones del acero 22MnB5..... 50	
Tabla 4.8 – Evaluación de imperfecciones de acuerdo a BS EN ISO 13919-1:1997..... 52	

Lista de figuras

Figura 2.1 - Presentación esquemática de los procesos más comunes de soldadura [5].	8
Figura 2.2 - Variación del aporte de calor aplicado a la pieza de trabajo con la densidad de potencia de la fuente de calor.	10
Figura 2.3 - Comparación entre los procesos de soldadura: (a) distorsión angular, (b) costo capital del equipo.	10
Figura 2.4 - Cinco diseños básicos de juntas de soldadura.	11
Figura 2.5 - Variaciones típicas de las juntas de soldadura.	12
Figura 2.6 – Como resultado de la fuerza de Coulomb F , el electrón en el E campo eléctrico experimenta una aceleración en la dirección del ánodo [21]. .	19
Figura 2.7 – Los fuerza de Lorentz F actúa sobre el electrón en un campo magnético B y es perpendicular a la dirección de movimiento v y a las líneas de campo [21].	19
Figura 2.8 – Efecto de penetración profunda: La fusión y la vaporización permiten que el haz de electrones penetre el material profundamente. El baño de soldadura (weld pool) penetra en la pieza de trabajo. Derecha: Micrografía de una soldadura de penetración completa en acero S355 de espesor 50 mm [21].	21
Figura 2.9 – Columna de alto voltaje para altas potencias de haz (izquierda), la columna de bajo voltaje para potencias medias de haz (centro), diagrama de una columna de haz (derecha) [21].	22
Figura 2.10 – Esquema de la interacción entre el haz de electrones y la superficie del material soldado [15].	23
Figura 2.11 – Combinaciones de soldaduras aptas para los diferentes materiales [22]. Idoneidad de la soldadura: ----- buena, - - - - - limitada ...	26
Figura 3.1 – Diagrama de flujo general para las pruebas de soldabilidad.	31
Figura 3.2 – Láminas de los materiales recibidos (dimensiones en milímetros).	32

Figura 3.3 – Cupones de soldadura utilizados para los dos aceros (dimensiones en milímetros).	35
Figura 3.4 – Cámara por haz de electrones ProBeam K40, ubicada en el Mercury Centre de la Universidad de Sheffield.....	36
Figura 3.5 – Colocación de un par de cupones (a) sujetos por dos abrazaderas en G (b) en una plataforma controlada por CNC que se introduce en la cámara de vacío.	38
Figura 3.6 – Representación del perfil de dureza en la sección transversal.	40
Figura 3.7 – Representación general de la ubicación de los cortes para muestras y probetas de tensión en juntas de soldadura. Más detalles en el anexo A.....	41
Figura 4.1 – Microestructura del metal base, 1000X, Picral 2%. HSLA: a) longitudinal, b) transversal y 22MnB5: c) longitudinal, d) transversal.	44
Figura 4.2 – Microestructura del acero HSLA (a) y del acero 22MnB5 (b).....	45
Figura 4.3 – Morfología y composición de los precipitados presentes en el acero HSLA.	45
Figura 4.4 – Morfología y composición de los precipitados presentes en el acero 22MnB5.	46
Figura 4.5 – Análisis de los precipitados en el acero 22MnB5.....	47
Figura 4.6 – Análisis de la cuantificación del volumen de fases en el acero HSLA.	48
Figura 4.7 – Análisis de la cuantificación del volumen de fases en el acero 22MnB5.	48
Figura 4.8 – Curvas Esfuerzo – Deformación: a) acero HSLA y b) acero 22MnB5.	50
Figura 4.9 – Par de cupones soldados con parámetros más elevados (a) y acercamiento a la zona de una combinación excedente (b).	51
Figura 4.10 – Cupones con las 12 combinaciones de los cordones de soldadura en el acero HSLA: a) cara y b) raíz.....	53
Figura 4.11 – Cupones con las 12 combinaciones de los cordones de soldadura en el acero 22MnB5: a) cara y b) raíz.	54

Figura 4.12 – Cordones de soldadura del acero HSLA.....	56
Figura 4.13 – Imperfección en el transcurso del cordón de soldadura en la condición 1 del HSLA.....	56
Figura 4.14 – Cordones de soldadura del acero 22MnB5.....	57
Figura 4.15 – Chisporroteo en la raíz de la condición 12 del acero 22MnB5....	57
Figura 4.16 - Macrografías de la sección transversal de los cordones de soldadura del acero HSLA.	46
Figura 4.17 – Macrografías de la sección transversal de los cordones de soldadura del acero 22MnB5.	47
Figura 4.18 – Características y defectos más comunes analizados en este trabajo.....	48
Figura 4.19 – Representación gráfica de las dimensiones de las características y defectos de los cordones del acero HSLA.	49
Figura 4.20 – Representación gráfica de las dimensiones de las características y defectos de los cordones del acero 22MnB5.	50

Lista de abreviaciones

AWS – Sociedad Americana de Soldadura

BIW – Body in White

BM – Metal Base

EBW – Soldadura por Haz de Electrones

HSLA - High Strength Low Alloy

LBW – Soldadura por Rayo Láser

MO – Microscopio Óptico

SEM – Microscopio Electrónico de Barrido

TWB – Tailor Welded Blank

TWI – El Instituto de la Soldadura

UHSS – Ultra High Strength Steel

ZAC – Zona Afectada por el Calor

ZF – Zona de Fusión

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

La industria automotriz está en constante desarrollo de nuevos y mejores procesos que garanticen calidad, mayores propiedades y menor peso de las piezas producidas para vehículos.

Un ejemplo de ello es el estampado en caliente, también llamado endurecimiento en prensa, un proceso de conformado de hojas metálicas mediante el cual se forma a la pieza en caliente e inmediatamente se aplica el tratamiento térmico de temple para incrementar su resistencia y minimizar operaciones en su producción.

El número de piezas de acero producidas por estampación en caliente se ha visto incrementado notablemente durante los últimos años, considerando que es un proceso fácilmente reproducible en producciones de gran tirada. Los aceros empleados en este proceso se están utilizando en diversas piezas de la industria automotriz, tales como vigas para choques, parabrisas vertical, refuerzos de puerta y el pilar B (B-pillar en inglés). Este último, es uno de los componentes con mayores requisitos de resistencia mecánica localizados en el frontal del vehículo. Esta distribución hace que la transmisión de esfuerzos en caso de impacto distribuya las tensiones generadas a lo largo de los elementos con mayor resistencia.

Actualmente, el pilar B se está produciendo mediante dos procesos diferentes: el control de proceso térmico (de un acero de alta resistencia) y otro

que usa soldadura (puede ser de resistencia de puntos, láser, soldadura por haz de electrones o soldadura de arco con protección gaseosa) donde se unen dos aceros que conforman la pieza (uno de alta resistencia y un acero microaleado), garantizando la resistencia y calidad requerida. Los componentes fabricados de esta manera, tienen la capacidad de optimizar la función estructural asegurando un proceso de absorción más progresivo y efectivo. Después de la soldadura, la pieza es estampada en caliente y templada. Estos procedimientos permiten obtener los llamados tailored welded blanks, los cuales son componentes de una sola pieza con un diseño complejo que combina varios espesores, recubrimientos y distinto grado de resistencia.

Las piezas fabricadas mediante conformado en caliente son las que mayor carga soportan en caso de colisión, para ello se requieren aleaciones que presenten gran deformabilidad en caliente y sean tratables térmicamente, que permitirán producir microestructuras de alta resistencia y tenacidad (martensita y bainita), como el acero microaleado al boro de alta resistencia 22MnB5.

En la búsqueda de un mejor desempeño de los materiales utilizados en la industria automotriz, se ha visto en la necesidad de utilizar aceros con muy bajo contenido de carbono (menos del 0.3%) como son los aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA). Los HSLA ofrecen una excelente ductilidad y reducción en peso. Estos aceros se conocen también como aceros microaleados, los cuales son diseñados para proveer mejores propiedades mecánicas con el uso de pequeñas cantidades de elementos aleantes como son el titanio, boro, vanadio, manganeso, entre otros.

Para unir estos aceros, el proceso de soldadura por haz de electrones destaca en la industria moderna. Siendo una técnica relativamente reciente, la soldadura por haz de electrones ha ganado popularidad por sus diversas ventajas como son una mayor eficiencia y resistencia lo que permite obtener una mejor calidad de los cordones de soldadura, cumpliendo con las especificaciones requeridas por estándares automotrices.

La soldadura por haz de electrones es rápida, precisa, fiable y capaz de unir una amplia variedad de metales con diferentes características geométricas y espesores. Algunas de las ventajas de la soldadura por haz de electrones en comparación con las tecnologías convencionales de soldadura radican en una baja distorsión, una menor zona afectada por el calor y un limitado flujo de calor.

La calidad de una unión soldada está directamente influenciada por los ajustes de los parámetros de entrada del proceso, los principales son: la potencia del haz, la velocidad de desplazamiento, la posición focal y el tiempo de exposición del haz. Estas variables de proceso afectan notablemente el perfil del cordón de la soldadura desarrollado durante el proceso de unión.

1.1 Motivación

Una empresa líder del giro metal-mecánica desarrolla, entre otros productos, aceros para la industria automotriz. Entre estos aceros automotrices se encuentran los aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA) a partir de los cuales se están desarrollando nuevos aceros de gran capacidad de formabilidad, tratables térmicamente para usarlos en el proceso de estampado en caliente, tales como los aceros 22MnB5 que cuentan con espesores muy delgados.

A su vez, el desarrollo de nuevas aleaciones para estampado en caliente, también requiere que tengan buena soldabilidad, particularmente usando la soldadura por haz de electrones, proceso limpio y adecuado para la soldadura de aceros de cualquier calibre, para posteriormente someterlos al estampado en caliente que permite obtener las formas deseadas para distintas aplicaciones en numerosos sectores.

Ante este interés por parte de la empresa se ha planteado este trabajo de investigación, cuyo objetivo general es el conocer la soldabilidad del acero 22MnB5 y el HSLA, que incluirá analizar la geometría de la soldadura, la microestructura y los esfuerzos en función de las variables operativas empleadas en el proceso.

1.2 Objetivo

Determinar la soldabilidad de un acero HSLA y un acero 22MnB5 mediante el proceso de haz de electrones.

1.2.1 Objetivos específicos

Para alcanzar este objetivo se plantean los siguientes puntos específicos:

- Realizar la caracterización de los materiales para determinar su microestructura, microdureza, y propiedades mecánicas antes de la soldadura.
- Analizar el efecto de las variables del proceso en las dimensiones del cordón, así como en la microestructura y propiedades mecánicas de las uniones soldadas.

1.3 Hipótesis

La potencia y la velocidad de soldadura son parámetros que intervienen en la soldabilidad de los materiales por el proceso de haz de electrones. Se esperan obtener resultados distintos variando estos parámetros en las pruebas de laboratorio. Podría mejorarse la calidad de la soldadura aumentando la velocidad sin necesidad de elevar en rangos muy altos el aporte de energía.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción

Los aceros se clasifican habitualmente en función de su uso y contenido de carbono. Los aceros al carbono (0 – 0.30 %wt) son los más importantes para la integridad estructural de un automóvil ya que componen el Body in White (BIW). Sin embargo, existe otros como los aceros como los HSLA y UHSS que son empleados en para la fabricación de juntas en procesos de soldadura láser o haz de electrones y se emplean en piezas que están compuestas de diferentes grados de acero para su formación por parte de los constructores y proveedores. Estas piezas garantizan el uso del material adecuado en el lugar adecuado del componente y minimizan el número de operaciones de unión subsiguientes.

La industria del acero está invirtiendo notablemente en investigación y desarrollo de aceros avanzados y ultra-resistentes (AHSS y UHSS) para que los fabricantes puedan hacer más con menos material.

La soldadura de aceros UHSS y aluminio es muy difícil, pero los constructores disponen hoy en día de multitud de métodos de unión. La soldadura láser y la soldadura por haz de electrones ofrecen oportunidades para unir paneles entre sí. El desafío es cada vez mayor a medida que los materiales sean más finos y las formas de las láminas metálicas sean cada vez más complejas.

2.1.1 Introducción a la soldadura por fusión

A lo largo de la historia, las técnicas para unir materiales han ido mejorando de acuerdo al entorno y al modo de vida del ser humano. Los materiales, las herramientas y la maquinaria se encuentran en constante cambio conforme a los requerimientos que imponen las nuevas aplicaciones y tecnologías.

Finalizando la Primera Guerra Mundial, inició un auge en nuevos métodos de soldadura, los cuales se irían desarrollando y variando para permitir unir una gran variedad de materiales, llevándola a ser un proceso generalmente fiable y resistente utilizado en muchos sectores para aplicaciones específicas.

La Sociedad Americana de Soldadura (AWS) define una soldadura como “una coalescencia localizada (la fusión o unión de la estructura de grano de los materiales que se están soldando) de metales o no metales producida mediante el calentamiento de los materiales a las temperaturas de soldaduras requeridas, con o sin aplicación de presión sola y con o sin el uso de material de aportación”. Soldadura se define como “un proceso de unión que produce la coalescencia de materiales calentándolos a la temperatura de soldadura, con o sin la aplicación de presión sola y con o sin el uso de metal de aportación [1].” Otra definición más sencilla del proceso es la de El Instituto de la Soldadura (TWI), donde el escudo de armas cuenta con una frase corta y significativa en latín que dice “e duobus unum” que significa de dos hacer uno, indicando que dos elementos se unen para formar una sola entidad [2]. Por otro lado, la norma ISO 857 promueve la idea de continuidad entre las partes de un ensamble [3]. Cualquiera de las tres definiciones insinúa la esencia de una soldadura, donde lo más importante es unir y soportar todas las solicitantes de una aplicación específica, ya sea transmitir esfuerzos entre elementos, recuperar dimensiones, recubrir con materiales resistentes a la corrosión y al desgaste, incrementar tamaños de estructuras, reducir el peso y los costos, o/e incrementar la vida útil del producto [4].

Debido a los diferentes sectores que requieren uniones soldadas, tales como el naval, militar, tuberías y recipientes a presión, la construcción de

estructuras sismo-resistentes como edificios de acero y puentes vehiculares, la industria automotriz, entre otros, existen distintos procesos de soldadura que varían en el modo en que se aplica el calor o la energía para la unión. En la figura 2.1 se presenta un resumen de estos procesos:

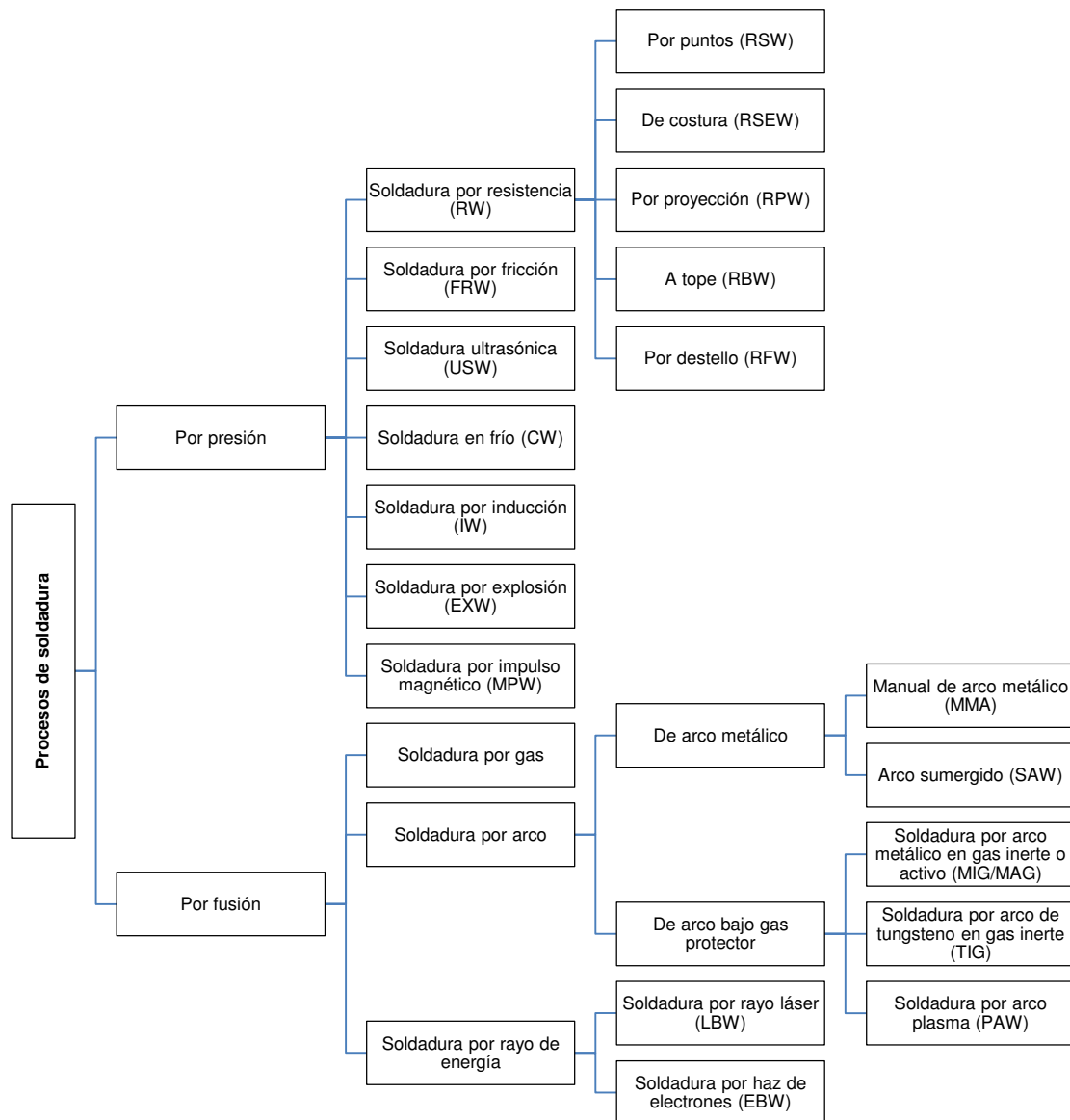


Figura 2.1 - Presentación esquemática de los procesos más comunes de soldadura [5].

Entre los procedimientos de soldadura empleados con más frecuencia en la industria automotriz se encuentran la soldadura por resistencia utilizando presión y la soldadura por fusión [6].

2.1.2 Soldadura por fusión

La soldadura por fusión une dos materiales al formar una masa fundida empleando calor sin presión [6]. Se pueden utilizar metales de aporte, los cuales son agregados a la zona de soldadura durante la operación. Las soldaduras por fusión que se realizan sin agregar metales de aporte se denominan soldaduras autógenas [7].

2.1.3 Densidad de energía de la fuente de calor

Las fuentes de calor para los procesos de soldadura por fusión como son por gas, arco y haz de alta energía, son una llama de gas, un arco eléctrico y un haz de alta energía, respectivamente. La densidad de potencia aumenta desde una llama de gas a un arco eléctrico y un haz de alta energía. Como se muestra en la figura 2.2, si la densidad de potencia de la fuente de calor se incrementa, el aporte de calor necesario para la pieza de trabajo es menor. La porción del material de la pieza expuesta a una llama de gas que se calienta tan lentamente que, antes de que ocurra cualquier fusión, una gran cantidad de calor se propaga en la mayor parte de la pieza de trabajo. Un calentamiento excesivo puede causar daños en la pieza de trabajo, incluyendo el debilitamiento y la distorsión. Por el contrario, el mismo material expuesto a un haz de electrones o láser muy bien enfocado puede fundir o incluso vaporizar hasta formar un profundo keyhole (ojo de cerradura) de forma instantánea, y antes de que la gran cantidad de calor sea conducida lejos en la mayor parte de la pieza de trabajo, la soldadura está completa.

Por lo tanto, las ventajas de aumentar la densidad de potencia de la fuente de calor son una penetración de soldadura más profunda, velocidades de soldadura más altas, y una mejor calidad de soldadura con menos daño a la pieza de trabajo, como se indica en la figura 2.2. La figura 2.3a muestra que la distorsión angular es mucho menor en el proceso de EBW que en GTAW. Desafortunadamente, como se muestra en la figura 2.3b, el costo de los equipos de LBW y EBW es muy elevado, sin embargo, son máquinas altamente

automatizables, lo que permite obtener muy buenas soldaduras a un alto ritmo de producción [8].

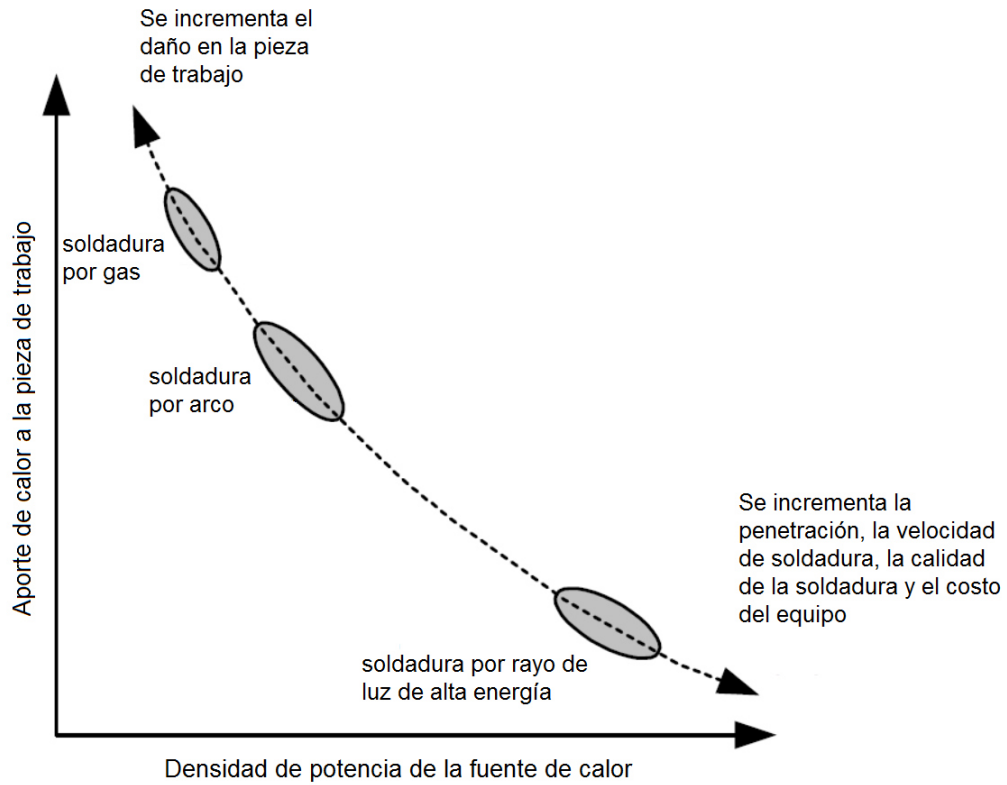


Figura 2.2 - Variación del aporte de calor aplicado a la pieza de trabajo con la densidad de potencia de la fuente de calor.

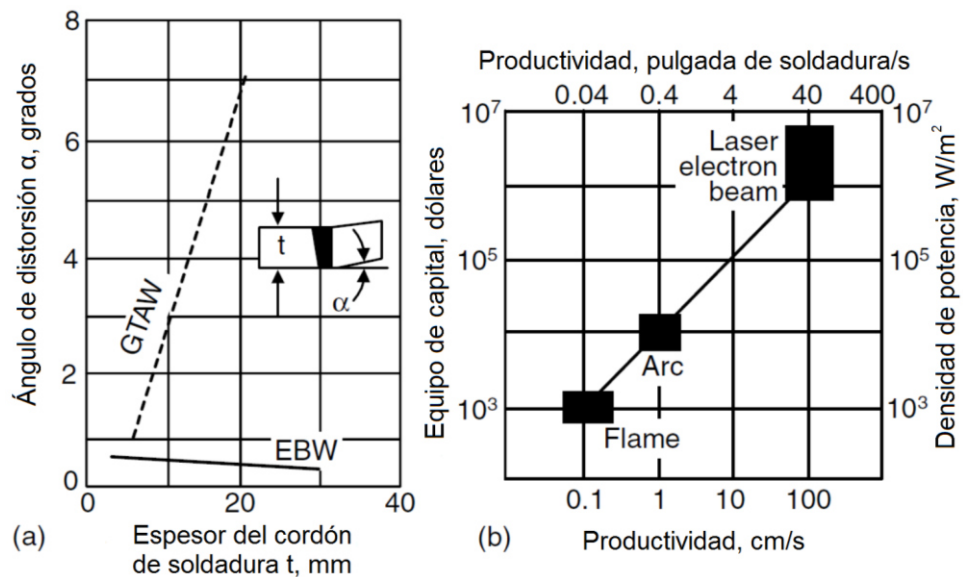


Figura 2.3 - Comparación entre los procesos de soldadura: (a) distorsión angular, (b) costo capital del equipo.

2.1.4 Procesos de soldadura por fusión

La mayoría de los procesos de soldadura por fusión son capaces de soldar el acero al carbono, acero de baja aleación, acero inoxidable, hierro fundido, aleaciones base níquel y aleaciones de aluminio. Por ejemplo, el proceso de GMAW puede ser utilizado para soldar casi todo tipo de materiales con cualquier espesor, mientras que GTAW es para piezas con espesores más delgados. Por otro lado, tenemos la soldadura por arco (SMAW, SAW, FCAW y ESW), que utiliza un fundente y no es aplicable para las aleaciones de aluminio.

2.1.5 Tipos de juntas

Existen diferentes tipos de juntas con las que se pueden trabajar en los procesos por fusión. La figura 2.4 muestra cinco de las más comunes configuraciones en los procesos por fusión: a tope, junta de solape, junta en T, junta de orilla, y junta en esquina.

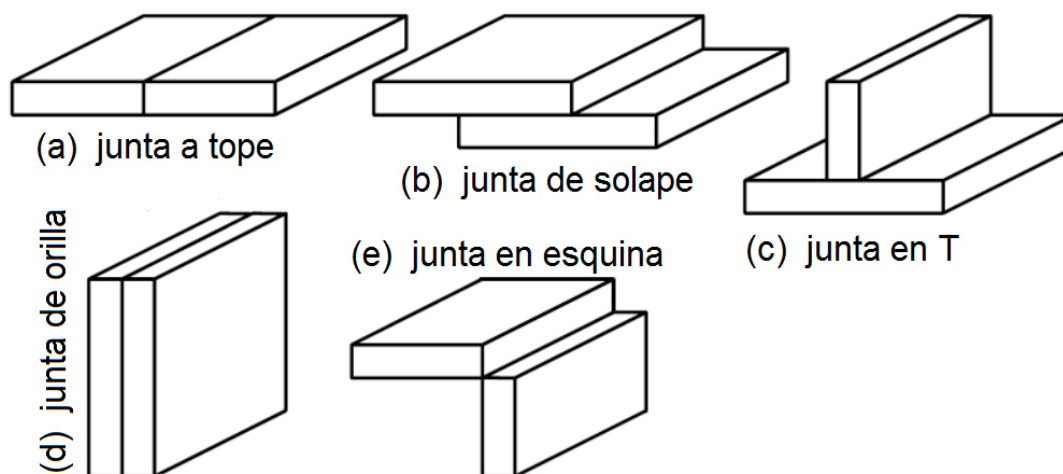


Figura 2.4 - Cinco diseños básicos de juntas de soldadura.

. La figura 2.5 muestra la sección transversal de las mismas. La superficie expuesta de una soldadura por el lado en que ocurre el proceso de soldar es llamada cara, las dos intersecciones donde la cara de soldadura y el metal base se unen son llamados bordes de la soldadura, y la porción de

soldadura que sobresale de la pieza de trabajo es llamada refuerzo de la soldadura [8].

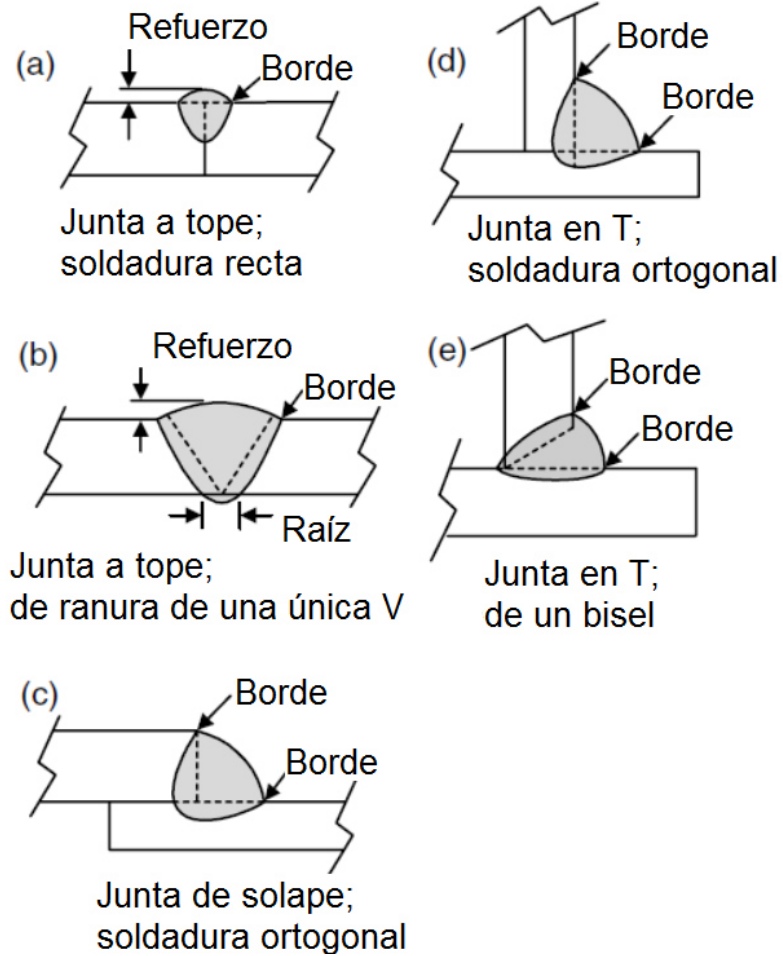


Figura 2.5 - Variaciones típicas de las juntas de soldadura.

2.2 Fundamentos de soldadura por haz de electrones

La soldadura por haz de electrones (EBW por su acrónimo en inglés, electron beam welding), es un proceso por fusión que utiliza la energía que aporta un haz de electrones para fundir el material a unir. La principal característica de este proceso es el estrecho y profundo cordón de soldadura que ofrece. Uno de los limitantes es la necesidad de una cámara de vacío para contener el cañón de haz de electrones y la pieza de trabajo [5].

El principio de la tecnología se basa en un haz de electrones los cuales son acelerados por un voltaje muy alto y por lo cual se utiliza como una herramienta para el tratamiento de materiales tales como la soldadura [9]. Hoy en día, el proceso de electrones está firmemente establecido en muchos campos de la industria; especialmente como tecnología de unión ya que ha sido generalmente aceptado por su fiabilidad y eficiencia, siendo la industria aeroespacial y de energía nuclear las primeras en utilizar esta tecnología.

2.3 Historia del proceso EBW

Han pasado más de cien años desde los primeros experimentos de la tecnología de haz de electrones, desde que J. W. Hittorf estudió los rayos que se emiten cuando existe una diferencia de potencial elevada (un alto voltaje) entre dos electrodos (contactos metálicos) en 1869 [10]. Su maestro, J. Plücker, analizó la conductividad de los gases, cuando a presión constante no presentan esta característica; este estudio se llevó a cabo con gases a muy baja presión en el interior de un tubo de vidrio al vacío con dos placas metálicas en la parte interior de los extremos, observando que todo el tubo se iluminaba al aplicar electricidad a las placas, mientras que, cuando se había conseguido suficiente vacío en el tubo, la luz desaparecía quedando tan sólo un resplandor verdoso en el vidrio cercano a la zona de la placa conectada al ánodo [11]. Hittford investigó la luz que aparecía en el tubo y la identificó como rayos que se emitían del cátodo, los cuales se movían en línea recta a través del espacio libre de campos; es decir, los rayos catódicos, un nombre que introdujo por primera vez el físico alemán Goldstein en 1876 [12].

En 1897, casi treinta años después del análisis de Hittord, el físico británico J. J. Thomson investigó que los rayos catódicos son chorros de partículas cargadas negativamente, las cuales provenían del interior de los átomos que formaban el electrodo cargado negativamente, denominado cátodo. Él encontró que las partículas cargadas eran las mismas, independientemente del metal que usaba para el cátodo, concluyendo que ellas eran partes constitutivas de todos los átomos, denominadas electrones [10].

Posteriormente, Marcello von Pirani fue el primero en hacer pruebas de fusión con metales construyendo un horno de haz de electrones para unir tántalo en polvo a un bloque de tantalio, el cual fue patentada en el año de 1906 con el título de “Producción de piezas homogéneas de piezas de tantalio por medio de un haz de electrones” [13, 14].

En las siguientes décadas muchos científicos se involucraron en la tecnología de haces de electrones, donde cada uno fue contribuyendo en distintos aspectos de esta tecnología. Especialmente en el año de 1948, el físico alemán Karl Heinz Steigerwald, quien en ese momento estaba involucrado en el desarrollo de fuentes de haces más potentes que las que utilizan los microscopios electrónicos, esos haces de electrones podrían ser empleados como herramientas térmicas, en particular para el taladrado de piedras preciosas que llevan los relojes, y para fundir y soldar metales en vacío. El resultado de las primeras pruebas fue prometedor y dio lugar a un acuerdo con una firma americana. El avance industrial de la soldadura se produjo en 1958, cuando se soldaron 5 mm de espesor de una junta a tope de una aleación de circonio (Zircaloy), siendo posible conforme al aumento gradual de la corriente del haz lo que penetró por completo la unión de las placas. De inmediato, atrajo el interés de todo el mundo, pero fue en EUA donde su verdadero significado técnico fue percibido con mayor rapidez [14]. Además, desde aquella época, se fue presentado un importante desarrollo de esta tecnología en países como Rusia, Ucrania, Alemania, Francia, Japón, Reino Unido y Polonia. En la tabla 2.1 se muestra otros acontecimientos relevantes que han contribuido en el avance de esta tecnología.

Tabla 2.1 – Inicios del desarrollo de la soldadura por haz de electrones [15].

Año	Evento
1879	Sir W. Crookes: fusiona un ánodo de platino en rayos catódicos.
1897	J. J. Thompson: muestra que los rayos catódicos eran haces de electrones.
1907	M. Pirani: patenta la fusión de haz de electrones.
1938	M. Ardenne: usa los haces de electrones como herramienta de trabajo.
1951	Patente Británica 727.460: Soldadura por puntos de alambre fino por haz de electrones; K. H. Steigerwald construye máquinas de soldadura por haz de electrones, principalmente para la perforación.
1954	J. A. Stohr: comienza a trabajar en la soldadura por haz de electrones.
1956	Heraeus: produce un cañón de electrones sin vacío.
1957	J. A. Stohr: presentación de J. A. Stohr de los resultados de la práctica de soldadura por haz de electrones de zirconio la "Conferencia de elementos combustibles" en París.
1958	W.L. Wyman reporta trabajo en EE.U; equipos Zeiss suministrados a Bettis; N. A. Olshansky reporta trabajo en la URSS; primer equipo comercial disponible en el Reino Unido.
1959	Primer informe de soldaduras con muy alta profundidad a anchura utilizando un equipo Steigerwald; primer reporte de obras en Japón con la máquina JEOL.
1968	Primera máquina de soldadura por haz de electrones en Polonia.

Actualmente, el desarrollo del proceso de haz de electrones se concentra principalmente en la soldadura. El diseño de los cañones se ha perfeccionado de tal manera que se puede combinar control numérico por computadora para la deflexión del haz y el movimiento mecánico de las piezas de trabajo [13].

2.4 Características del proceso

El principio de esta tecnología se basa en un haz de electrones que es acelerado con un alto voltaje y puede ser utilizado como una herramienta para el tratamiento de materiales. Por su fiabilidad y eficiencia, su uso en soldadura y modificación de superficies es el más común y se encuentra ampliamente desarrollado tanto en términos de investigación y aplicaciones industriales [15, 16]. Es un proceso muy versátil que acepta unir diferentes grados de acero, así

como materiales no soldables por otros métodos de soldadura como son los metales refractarios (tungsteno, molibdeno, niobio) y metales activos químicamente (titanio, circonio, berilio). Es capaz de unir metales disímiles. Este proceso también es aplicable en juntas black and white [17]. Sin embargo, el proceso puede ser complicado cuando se tienen metales totalmente diferentes, ya que influye su composición química, conductividad térmica, propiedades de solidificación, coeficiente de expansión térmica, entre otras características. En cuanto a los espesores de los materiales que se pueden unir abarcan rangos de láminas muy delgadas de 0.01 mm hasta muy gruesas de más de 250 mm en acero y más de 500 mm en aluminio. La relación entre la profundidad y la anchura de una soldadura se extiende hasta de 50:1. En algunos casos la soldadura por haz de electrones se lleva a cabo en un vacío cámara (con alto o bajo vacío) y en otros, el haz de electrones puede ser aplicado en condiciones atmosféricas normales [9, 15].

En comparación con otros métodos de unión, la soldadura por haz de electrones se caracteriza por [14, 15]:

- Una muy alta densidad de potencia de aproximadamente 10^7 W cm⁻² en el foco del haz;
- La transferencia de energía se produce por conducción de calor a través de la superficie de la propia pieza de trabajo;
- No es necesaria ninguna preparación de borde, independientemente del grosor de la pieza de trabajo, tampoco se requiere metal de aporte;
- Con altas velocidades de soldadura resultan estrechos cordones y reducidas zonas afectadas por el calor, así como poca distorsión de la pieza de trabajo;
- La distancia de trabajo variable permite trabajar con piezas de diferentes formas;
- Tiempos cortos de evacuación se pueden lograr mediante la adaptación de la cámara a la cantidad y el tamaño de las piezas de trabajo;
- Es posible el monitoreo computarizado y el control eléctrico y mecánico de los parámetros de soldadura;

- Los parámetros de soldadura, y por lo tanto la calidad de las soldaduras producidas, son altamente reproducibles y consistentes;
- Cuando la soldadura se lleva a cabo en bajo vacío, los consumibles (gases, flujos) son necesarios para proteger el baño de fusión de la oxidación;
- Con voltajes de aceleración superiores a 60 kV se blindan con plomo las paredes de la máquina de soldadura con el fin de evitar la emisión de rayos X;
- Las potencias del haz mucho menores a 1 kW hasta 300 kW pueden soldar espesores de al menos 0.5 mm hasta 300 mm;
- Las máquinas están disponibles para soldar componentes variables de única vez, así como para el uso de operaciones de producción en masas como la industria automotriz;
- Se pueden realizar costuras simples de forma longitudinal, así como de componentes en tres dimensiones que requieren el uso de parámetros de soldadura programables y la manipulación de la pieza de trabajo;
- Lo aceros estructurales, aceros aleados, metales no ferrosos e incluso metales especiales sensibles al gas se pueden soldar con éxito mediante este proceso.

2.5 Bases del proceso

Para llevar a cabo el proceso de soldadura por haz de electrones, es necesario considerar algunos conceptos involucrados durante su desarrollo.

2.5.1 Electrón

Los átomos no son indivisibles, cada uno está compuesto de partículas subatómicas como son los electrones, protones y neutrones.

El electrón, abreviado e^- , fue descubierto en 1879 por el químico y físico inglés William Crookes. Durante las tres décadas posteriores, el trabajo del físico inglés J. J. Thomson y del físico estadounidense Robert A. Millikan estableció la masa y carga real del electrón [18]. Los electrones son partículas

elementales contenidos en cada átomo y llevan carga negativa. Son responsables de las propiedades mecánicas y químicas de los átomos, también actúan como portadores de energía de corriente eléctrica. La carga relativa es -1, y la masa de un solo electrón es de 9.109×10^{-28} g [5.486×10^{-4} (0.0005486) uma]. De manera que, para fines prácticos, se considera insignificante la masa del electrón [18].

El movimiento de las cargas, positivas y negativas, genera en todo el espacio un campo eléctrico y otro magnético variables que son los que constituyen la radiación [19]. El campo magnético está asociado a los fenómenos electrodinámicos, y aparece siempre que existen corrientes eléctricas. Las cargas eléctricas móviles ejercen fuerzas magnéticas entre sí, además de las fuerzas puramente eléctricas o electrostáticas, definidas por la ley de Coulomb.

Puesto que los electrones están en movimiento alrededor del núcleo atómico, y cada electrón parece, además, estar en rotación constante alrededor de su propio eje, cada átomo presenta efectos magnéticos [20].

2.5.2 Haz de electrones

La herramienta de “haz de electrones” es un estrecho haz de electrones altamente acelerados. Para obtener electrones libres para un haz, primero tienen que ser liberados de los átomos. Esto se consigue mediante el calentamiento de un electrodo emisor.

Debido a su carga, los electrones pueden ser influenciados de dos maneras: en los campos eléctricos en los que son acelerados hacia el ánodo (electrodo positivo), actuando sobre ellos la llamada fuerza de Coulomb (figura 2.6). En las máquinas de haz de electrones también los electrones son acelerados por esta fuerza. En el proceso los electrones absorben energía que resulta en un incremento de velocidad. La cantidad de energía absorbida por un electrón durante este proceso está determinada principalmente por la diferencia de voltaje a través del cual pasa el electrón.

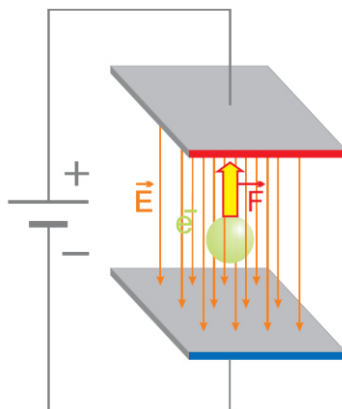


Figura 2.6 – Como resultado de la fuerza de Coulomb \vec{F} , el electrón en el \vec{E} campo eléctrico experimenta una aceleración en la dirección del ánodo [21].

La segunda manera de actuar sobre los electrones es con campos magnéticos (figura 2.7): la llamada fuerza de Lorentz afecta la dirección del movimiento de los electrones. Son desviados perpendicularmente a su trayectoria y a las líneas de campo, sin cambiar su velocidad. En una máquina de soldadura, los campos magnéticos son utilizados en varios lugares. Se utilizan en la formación y desviación del haz y para la creación de lentes magnéticos. Los campos magnéticos parásitos del material que está siendo soldado tienen un efecto no deseado sobre el haz. Estos campos interferentes, por lo tanto, tienen que mantenerse lo más bajo posible.

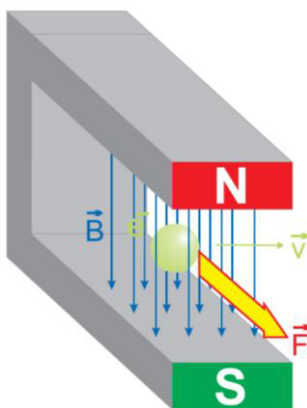


Figura 2.7 – La fuerza de Lorentz \vec{F} actúa sobre el electrón en un campo magnético \vec{B} y es perpendicular a la dirección de movimiento \vec{v} y a las líneas de campo [21].

Los campos eléctricos dentro de los átomos, también tienen una influencia en los electrones. Cuando los electrones se encuentran con átomos

(por ejemplo, una pieza de trabajo, o de aire) están dispersos (desviados) y renuncian a una parte de su energía para estos átomos, aumentando su temperatura. Un haz de electrones en gas, por ejemplo, en una atmósfera con un vacío pobre, el haz se vuelve más amplio como resultado de dispersión múltiple, dependiendo de la densidad. Por esta razón, es preferible trabajar con un vacío en una máquina de electrones [21].

2.6 Penetración del haz de electrones durante la soldadura

El efecto deseado del haz de electrones en la pieza de trabajo es que al calentar el material impacte en un área que sea lo más estrecha posible. Debe fundirse y en parte vaporizarse para crear una soldadura o para hacer agujeros. Si un haz de electrones impacta en un metal, los electrones penetran en él. La profundidad de penetración depende de la energía de los electrones (tensión de aceleración) y la densidad del metal.

Normalmente, la profundidad de penetración es menor que 0.1 milímetros, y la mayoría de los electrones son capturados en el metal. Unos pocos electrones se dispersan de nuevo por los átomos y pueden dejar el metal de nuevo. La cantidad de estos electrones retrodispersados depende de la profundidad de penetración y, por lo tanto, del material de la pieza de trabajo. Una fracción de la energía de los electrones se libera como los rayos X. Esta radiación no es intencional, pero no se puede evitar. En consecuencia, el equipo debe ser protegido para evitar riesgos de salud. Tradicionalmente, el blindaje se incorpora en la cámara de vacío.

Aunque los electrones penetran menos de 0.1 milímetro en diferentes metales, es posible obtener profundidades de varios centímetros. El responsable de esto es el llamado efecto de profundidad de penetración, véase la figura 2.8. El haz de electrones calienta tanto el metal que el metal se funde e incluso se vaporiza en el centro. Un agujero capilar (ojo de cerradura o keyhole) en el metal fundido es creado por la presión de vapor permitiendo penetrar más el haz de electrones en la pieza de trabajo. Este efecto hace posible el uso de haz de electrones para crear soldaduras profundas y estrechas [21].

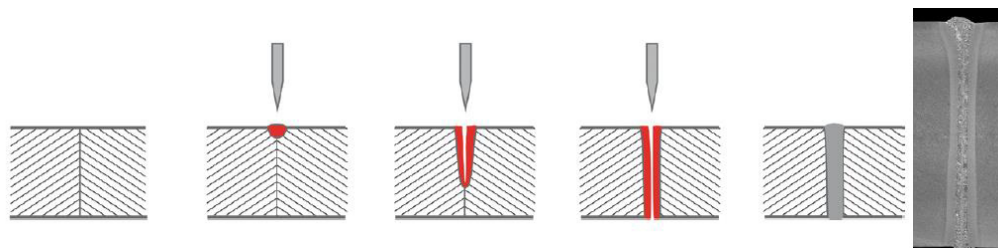


Figura 2.8 – Efecto de penetración profunda: La fusión y la vaporización permiten que el haz de electrones penetre el material profundamente. El baño de soldadura (weld pool) penetra en la pieza de trabajo. Derecha: Micrografía de una soldadura de penetración completa en acero S355 de espesor 50 mm [21].

2.7 Equipo de soldadura por haz de electrones

Dependiendo de la configuración, una columna de haz de electrones puede constar de varios componentes. Cada una cuenta con un cañón de electrones que puede alcanzar hasta 100 kW, con un cátodo de tungsteno que es acelerado en un rango de 10 a 200 kV a velocidades arriba de 100 km/s, un cilindro Wehnelt y el ánodo, una lente de enfoque y un deflector. Los electrones emitidos por el cátodo son agrupados en un haz donde son acelerados y enfocados a campos electrostáticos. El haz emerge a través de diafragma del ánodo y se extiende en forma cónica hasta que entra en el campo magnético de la lente de enfoque. Después del enfoque realizado por el sistema de la lente, los electrones fluyen a través del sistema de bobinas de deflexión con el que los electrones son desviados electromagnéticamente en una forma cuasi-libre de inercia y por lo tanto pueden ser guiados a la pieza de trabajo (figura 2.9).

Se cuenta con la opción de incorporar un deflector de centrado para ajustar que el haz pase a través del centro de la lente y así minimizar errores. Un astigmador permite optimizar la forma del haz (redondez). Para ciertos procesos, es útil emplear una lente adicional junto con una abertura.

Existen otras posibles variaciones en la geometría del cañón de electrones, el tamaño del cátodo o la distancia entre el cañón de electrones y la lente, la distancia del objeto. La relación entre la distancia del objeto y la distancia de la imagen, o la distancia de trabajo, determina la escala de la imagen y por lo tanto el diámetro del punto del haz. La óptica magnética y el

control electrónico también puede ser adaptado a las necesidades, proporcionando una relación óptima entre velocidad, precisión y costo.

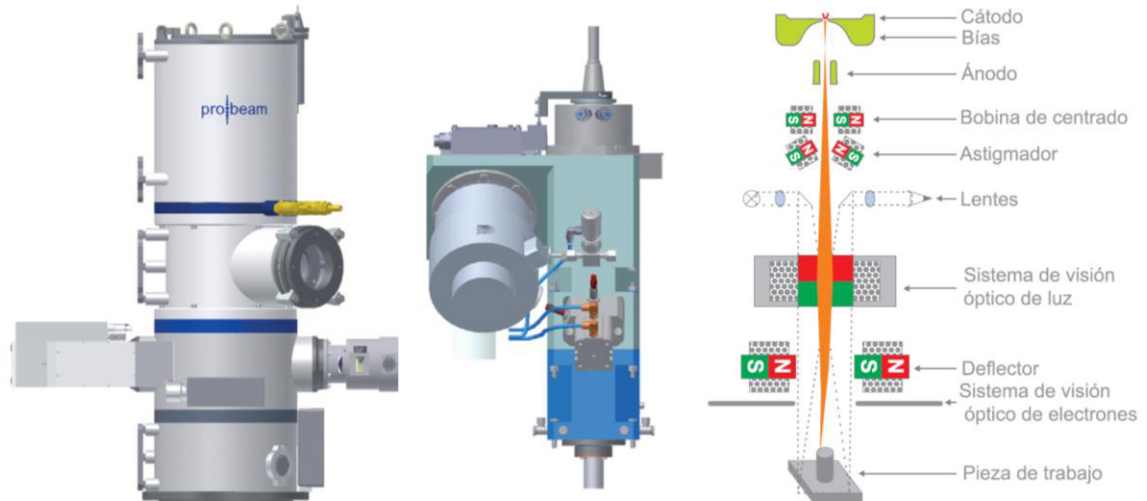


Figura 2.9 – Columna de alto voltaje para altas potencias de haz (izquierda), la columna de bajo voltaje para potencias medias de haz (centro), diagrama de una columna de haz (derecha) [21].

La mayoría de las columnas de haces de electrones están equipadas con sistemas de diagnóstico para la observación del proceso de soldadura. En la mayoría de los casos esto es un sistema luz-óptico con una cámara CCD (dispositivo de carga acoplada) o telescopio. La interacción del haz de electrones con la superficie del material se muestra en la figura 2.10. El haz de electrones incide sobre la superficie de la pieza, interactúa con los electrones del material y hace que las emisiones de:

- electrones retrodispersados (reflejados),
- electrones secundarios,
- electrones Auger,
- rayos X,
- fluorescencia de rayos,
- radiación térmica.

Cada tipo radiación se emite desde diferentes profundidades del material variando su volumen, con el aumento de la energía del haz de electrones primario (es decir, el incremento del voltaje de aceleración) aumenta la

profundidad y el volumen de la zona de transmisión. Al mismo tiempo, el voltaje aumenta el diámetro de la zona siendo mayor que el diámetro del haz.

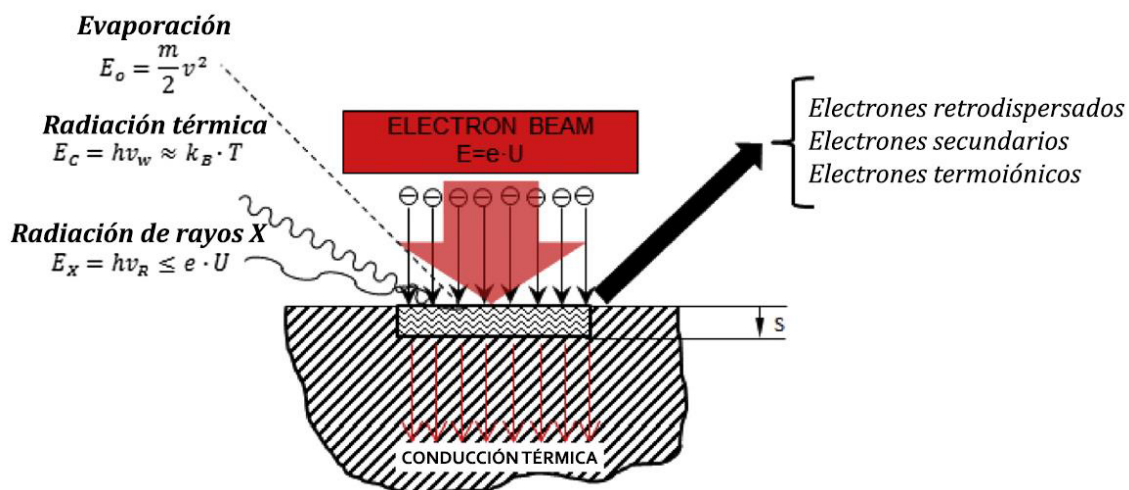


Figura 2.10 – Esquema de la interacción entre el haz de electrones y la superficie del material soldado [15].

Asimismo, la profundidad de la penetración de los electrones se ve afectada por el número atómico (Z) del material de los componentes soldados, la densidad del material bombardeado (ρ), el espesor de material y el ángulo de incidencia (φ) [15, 22].

2.8 Parámetros de soldadura

Los parámetros básicos de la soldadura por haz electrones incluyen el voltaje de aceleración, la corriente de soldadura, la velocidad de soldadura, el diámetro del haz que impacta en la superficie de la pieza de trabajo, la distancia focal de las lentes electromagnéticas, la corriente de las lentes electromagnéticas y el nivel de vacío en el cámara de trabajo.

El voltaje de aceleración (kV) del haz de electrones, dependiendo del dispositivo, es de entre 10 y 200 kV. Cuanto mayor sea el voltaje de aceleración, mayor es la potencia del haz (para una corriente de haz constante) y mayor será la profundidad de penetración. Con eso también es posible observar la mejora de la forma del cordón de soldadura – las soldaduras se

hacen más estrechas y los límites más profundos, y los límites de fusión se vuelven más paralelos, lo que reduce tensiones de soldadura.

Un voltaje de aceleración muy elevado puede causar socavados, irregularidades en la cara de la soldadura o un exceso de penetración en los cordones.

La energía del electrón se puede expresar como:

$$E = U \cdot I \quad \text{Ecuación 2.1}$$

donde U es el voltaje de aceleración e I es la corriente del haz de electrones.

Un voltaje de aceleración superior permite manejar mayores distancias de trabajo y, por lo tanto, realizar un proceso más flexible y la posibilidad de soldar componentes con formas más complicadas.

La corriente del haz de electrones (mA) afecta el cambio de densidad de potencia, y como resultado de eso, influye en la profundidad de penetración del material soldado. Un incremento en la corriente de haz de electrones se acompaña de una mayor profundidad de penetración. Para bajos valores de corriente del haz, aproximadamente 1-10 mA, los resultados son prácticamente los mismos que los obtenidos usando un proceso convencional de soldadura por arco.

Una velocidad de soldadura (m/min) ajustada correctamente a la potencia del haz de electrones es decisiva para la energía lineal del proceso, por lo que afecta el proceso de aporte de calor e influye en la geometría de la soldadura, es decir, en la profundidad de penetración y el ancho de la cara de la soldadura. Un aumento en la velocidad de la soldadura es acompañado por una disminución en la profundidad de la penetración y en el ancho del cordón.

El diámetro de un haz enfocado sobre la superficie de la pieza de trabajo (mm) es decisivo para la densidad de potencia del haz y, por lo tanto, influye en la profundidad de penetración y la forma de la soldadura. Puede ser ajustado por la corriente del cátodo de control y la corriente de la bobina magnética enfocada con un rango de entre 0.01-10 mm.

La distancia focal del haz de electrones (mm) es decisivo para la profundidad de penetración en un material a soldar, así como para la forma y

calidad de la soldadura. Modificando la posición del enfoque del haz en relación con la superficie de la pieza de trabajo, sin cambiar los otros parámetros de soldadura, altera el diámetro del haz en la superficie de la pieza y, como consecuencia, cambia la densidad de potencia del haz.

La corriente de las lentes de enfoque (mA) es decisiva para el diámetro y la localización del foco del haz, la distancia de trabajo constante y la potencia del haz.

El vacío en la cámara de trabajo (mbar o Tr) es decisivo para la calidad de la junta soldada. Un alto vacío asegura la más alta calidad en las juntas debido a la adecuada evaporación del metal de soldadura. La soldadura realizada en vacío está acompañada por la evaporación de los componentes de aleación de elevada presión de vapor, que puede reducir el contenido de los constituyentes en la soldadura. Una disminución en la presión de la cámara de trabajo reduce el diámetro del haz y disminuye la densidad de potencia [22].

2.9 Soldabilidad de los materiales por el proceso de haz de electrones

Dependiendo de la geometría del haz de electrones y del modo de operación del cañón de electrones (estacionario o haz oscilante), el aporte de calor a un material que se está soldando cambia dentro de un amplio intervalo. Como resultado, es posible soldar elementos de diversos metales y aleaciones, teniendo diferentes espesores y formas.

La flexibilidad de la soldadura por haz de electrones permite unir materiales soldables y poco soldables, así como de materiales totalmente insoldables por medio de métodos convencionales.

Los pequeños esfuerzos y tensiones de soldadura causadas por la tecnología de haz de electrones la hacen útil para aleaciones que son susceptibles al agrietamiento como el AlCu. Debido a la alta dureza en la ZAC, es necesario aplicar un tratamiento térmico cuando se tienen que soldar aceros con un alto contenido de carbono [21, 22].

En la figura 2.11 se muestran las combinaciones de diferentes materiales que se pueden soldar con otros mediante el proceso de haz de electrones.

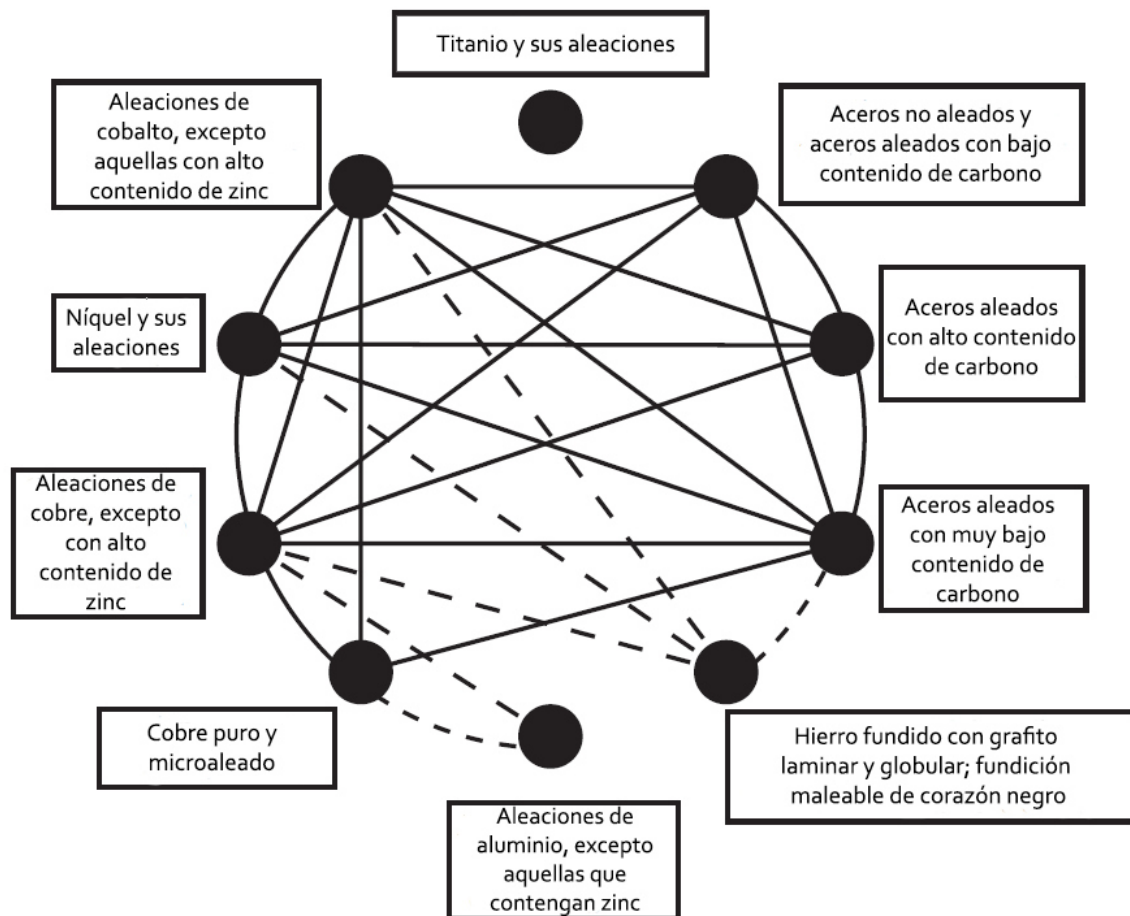


Figura 2.11 – Combinaciones de soldaduras aptas para los diferentes materiales [22].
Idoneidad de la soldadura: ----- buena, - - - - - limitada

2.10 Ventajas

La soldadura por haz de electrones se utiliza en producción en masa y en la fabricación de elementos individuales. El proceso se lleva a cabo en cámaras de vacío que garantizan la estabilidad de los parámetros, la capacidad de repetición y la programación. Los dispositivos actuales alcanzan un voltaje de hasta 150 kV, valor que permite soldar juntas de aceros de hasta más de 100 mm (esto comparado con el máximo espesor de elementos soldados con tecnología láser, el cual asciende solamente a 20 mm). Por otra parte, en métodos convencionales se requieren más de un cordón de soldadura (multipasada) para asegurar la junta, en el proceso de haz de electrones no es necesario, logrando un proceso más eficaz y de calidad.

En la soldadura por haz de electrones una junta se hace con una sola pasada, sin metal de aporte, sin biselado y con el tiempo de soldadura de 1 metro en 8 min [22, 21].

El uso de un haz de electrones en los procesos de soldadura permite [22]:

- Soldadura de metales que tienen varias propiedades físicoquímicas;
- Realización de soldaduras en zonas de difícil acceso en la pieza de trabajo
- La obtención de soldaduras estrechas debido a la alta densidad de potencia y la alta velocidad de soldadura (ancho de soldadura/relación de profundidad 01:10-01:50) con una limitada ZAC y la mínima (prácticamente despreciable) deformación en la pieza de trabajo;
- El uso de juntas a tope con la preparación cuadrada, sin biselar los bordes y sin la necesidad de utilizar metal de aporte.

La soldadura por haz de electrones permite manejar resultados económicos significativos y un rápido retorno de la inversión como consecuencia de la coordinación adecuada [22]:

- Aumento de la velocidad, la eficiencia y la posibilidad de automatización del proceso;
- Eliminación de consumibles de soldadura (metales de aporte, flujos y gases);
- Mejora de la calidad del producto;
- Eliminación de distorsiones de soldadura;
- Posibilidad de soldar elementos después del mecanizado o tratamiento térmico.

2.11 Estándares de calificación de procedimientos de soldadura

Los procesos en los que no se está bajo el control manual de la soldadura, tales como la soldadura por haz de electrones y soldadura láser, se establecen requisitos para los parámetros de las máquinas, operadores, así

como para la calificación del proceso. Las normas actuales cubren una amplia variedad de temas como se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 – Estándares de calificación del proceso de soldadura por haz de electrones.

Estándar de referencia	Título	Ámbito de regulación
ISO 14744	Welding. Acceptance inspection of electron beam welding machines	Especifica los requisitos para la inspección de la aceptación de las máquinas de soldadura por haz de electrones
EN 1011-7	Welding. Recommendations for welding of metallic materials – Part 7: Electron beam welding	Detalles sobre los requisitos de calidad, instalaciones de producción de soldadura, así como la soldabilidad de algunos materiales
EN ISO 3834	Quality requirements for fusion welding of metallic materials	Define los requisitos de calidad integrales para la soldadura por fusión de materiales metálicos tanto en los talleres y en las obras de instalación en campo.
ISO 13919	Welding. Electron and laser-beam welded joints. Guidance on quality levels for imperfections	Da orientación sobre los niveles de calidad de las imperfecciones en el haz de electrones y soldados por láser articulaciones en acero. Tres niveles se dan, que se refieren a la calidad de la producción.
ISO 15609-3	Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Welding procedure specification. Part 3: Electron beam welding	Guía sobre los niveles de calidad de las imperfecciones en las juntas de acero por haz de electrones y rayo láser. Tres niveles se dan, que se refieren a la calidad de la producción.
EN ISO 15607	Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. General rules	Especifica los requerimientos del contenido de las especificaciones del procedimiento de soldadura por haz de electrones.
ISO 15611	Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Qualification based on previous welding experience	Define las normas generales para la especificación y calificación de los procedimientos de soldadura para materiales metálicos.
ISO 15612	Specification and qualification of welding	Da la información necesaria para explicar los requisitos

	procedures for metallic materials. Qualification by adoption of a standard welding procedure	contemplados en la norma ISO 15607 relativa a la calificación de procedimientos de soldadura basado en una previa experiencia en soldadura.
ISO 15613	Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Qualification based on pre-production welding test	Señala cómo una especificación del procedimiento de soldadura preliminar es calificada basándose en pruebas de soldadura de pre-producción.
ISO 15614-11	Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Welding procedure test. Part 11: Electron and laser beam welding	Define las condiciones para la ejecución de las pruebas de calificación del procedimiento de soldadura y los límites de validez de un procedimiento de calificación de soldadura para todas las operaciones de prácticas de soldaduras.
ISO 14732	Welding personnel. Qualification testing of welding operators and weld setters for mechanized and automatic welding of metallic materials	Especifica los requisitos para la calificación de los operadores de soldadura y también para los definidores de soldadura mecanizada y automática.
AWS C7.1/MC7.1	An American National Standard. Recommended practice for electron beam welding and allied processes	Proporciona definiciones de proceso y los requisitos, las prácticas de seguridad y criterios de inspección para la soldadura de haz de electrones. También cubre las aplicaciones comunes de haz de electrones soldadura. Incluye numerosas curvas de potencia para diversas aleaciones.
DVS	Technical Codes of electron beam welding	Documentos cubren las recomendaciones para la limpieza de la zona, prueba de unir procedimientos para la seguridad y la cuña espécimen de calidad para la verificación de soldaduras de haz electrónico, así como los principios fundamentales para el diseño de componentes y la utilización de la soldadura por haz de electrones sin vacío.

Capítulo 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

Para el cumplimiento de los objetivos se desarrolló un plan de trabajo dentro de las normas internacionales indicadas. Los materiales sujetos a estudio corresponden a láminas de aceros destinados a aplicaciones automotrices como son el HSLA y el 22MnB5 con espesores delgados ideales para piezas estructurales.

Primero se realizó la caracterización del metal base, paso esencial para determinar el rango de los parámetros de soldadura. Después se seleccionaron los parámetros que se irían ajustando durante el proceso, partiendo de las características del material y de la literatura reportada, como son el aporte de energía y la velocidad de desplazamiento.

Una vez seleccionado el rango de parámetros, se hicieron pruebas con pasadas simples de soldadura (bead on plate) sobre la superficie de los cupones. Los parámetros de las soldaduras de pasada simple, se fueron ajustando hasta obtener los más óptimos y proseguir con la caracterización de los cordones para observar dimensiones, microestructura y microdureza.

Por último, se procedió a realizar juntas de soldadura de condiciones seleccionadas que incluirían pruebas no destructivas, ensayos de tensión, macrografía y dureza que posteriormente son comparadas con resultados de bead on plate.

3.2 Generalidades

Una vez planteado el estudio, se organizaron los experimentos como se muestra en la figura 3.1. Para analizar el efecto de los parámetros de la soldadura por haz de electrones se realizan pruebas de soldabilidad en ambos aceros que inician con la caracterización de los aceros, la preparación del material, las pruebas de soldadura y el análisis de resultados.

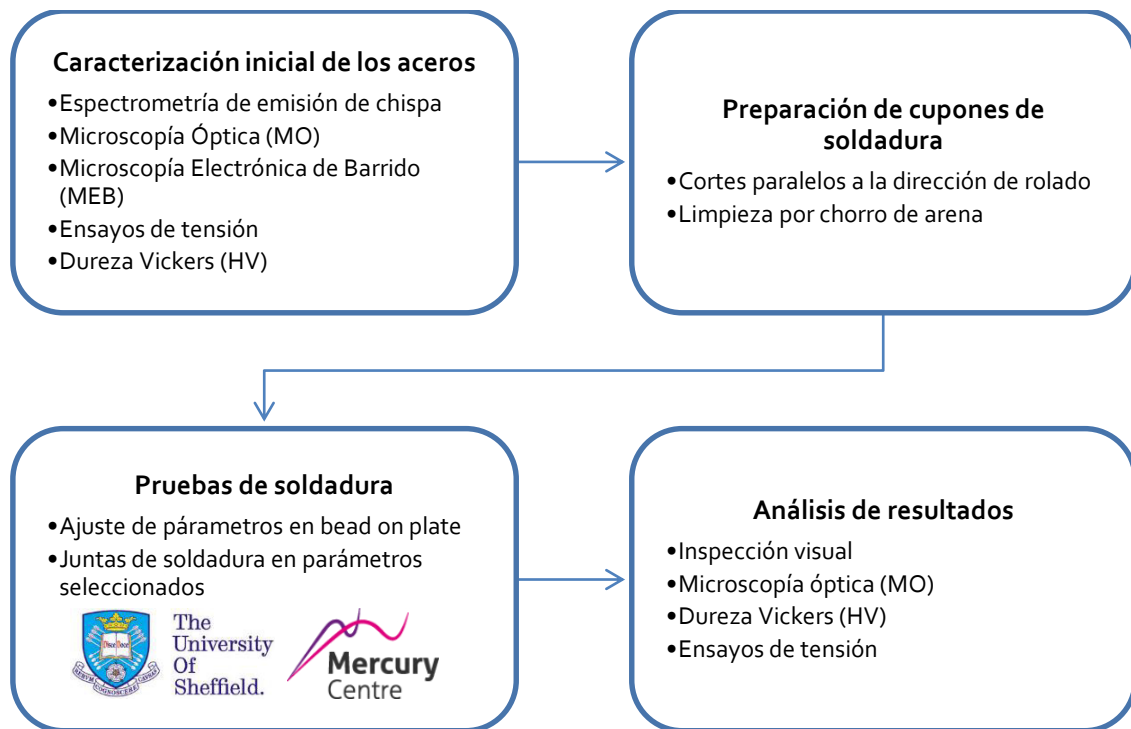


Figura 3.1 – Diagrama de flujo general para las pruebas de soldabilidad.

3.1 Caracterización de los aceros

La caracterización inicial de los aceros se llevó a cabo mediante el uso de diversas técnicas con el objetivo de profundizar en el conocimiento de la microestructura y en el comportamiento mecánico de los dos materiales.

Los materiales de partida son un acero HSLA y un 22MnB5 proporcionados por Ternium México S.A. de C.V., los cuales se encuentran disponibles en chapa laminada en frío con 1.37 y 1.10 mm de espesor. De ellas se obtuvieron muestras donde se realizó análisis químico y metalográfico del metal base, ensayos de tensión y microdureza Vickers.

3.1.2 Preparación del material

Para la caracterización de los aceros recibidos se hicieron cortes en las láminas de acuerdo a los requerimientos de la figura 3.3. Se descartan 35 mm de los bordes del perímetro, obteniendo muestras de 20x20 mm para análisis químico, así como probetas de 10x10 mm en dirección longitudinal y transversal para análisis metalográfico.

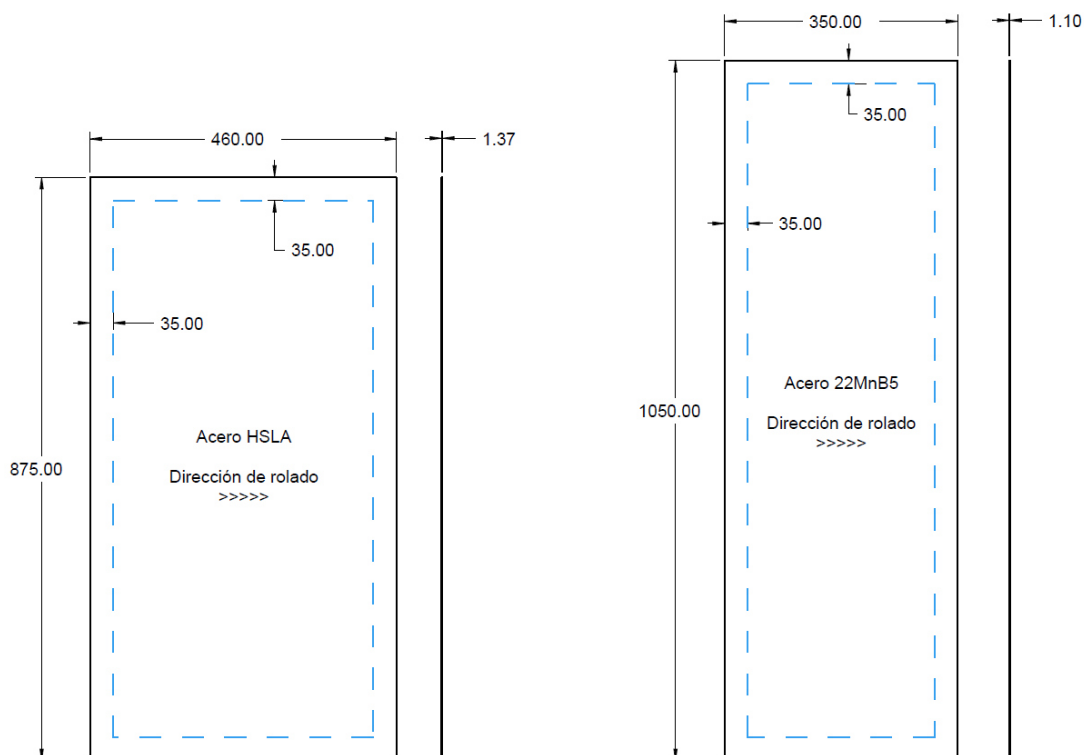


Figura 3.2 – Láminas de los materiales recibidos (dimensiones en milímetros).

3.1.3 Análisis químico por espectrometría de emisión óptica

Esta técnica permite determinar los elementos presentes, así como el porcentaje de cada uno de ellos desde una muestra obtenida de cada acero. El método consiste en detectar las longitudes de onda característica de cada elemento cuando sus electrones son excitados mediante una chispa [23]. En este caso se realizó un análisis químico de acuerdo a las normas ASTM EA415-14 [24] y ASTM 1019-11 [25], utilizando un espectrómetro de emisión óptica de la marca Spectro®.

3.1.4 Cálculo del carbono equivalente

Un parámetro útil para evaluar la soldabilidad de los aceros es el carbono equivalente. Este consiste en una ecuación que relaciona la composición química del material. Existen distintas ecuaciones para calcularlo, algunas se mencionan a continuación.

El Instituto Internacional de la Soldadura (IWW) presenta una ecuación que puede utilizarse para aceros con altos contenidos de carbono, se considera soldable si el carbono equivalente es inferior a 0.4%. [26]:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu + Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

La ecuación propuesta por Ito y Bessyo evalúa de manera más adecuada los aceros con bajo contenido de carbono o microaleados, presentándose problemas con valores mayores a 0.26% [27, 28]:

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Para aceros con un contenido de carbono de entre 0.02 y 0.26%, se puede calcular con la fórmula de Yurioka [29]:

$$CE_Y = C + f(C) \left[\frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{(Cr + Mo + Nb + V)}{5} \right] \quad \text{Ecuación 3.3}$$

$$\text{donde: } f(C) = 0.75 + 0.25 \tan^{-1}\{20(C - 0.12)\}$$

3.1.5 Análisis metalográfico

El análisis del metal base se realizó con el fin de conocer la microestructura de cada acero previo a las pruebas de soldabilidad. Las muestras seccionadas fueron montadas en baquelita y pulidas con diferentes grados de lijas de carburo de silicio, después se utilizó una suspensión de diamante de 3 μm para un mejor resultado en acabado especular. Como reactivo de ataque se empleó Picral al 2% (ácido pícrico concentrado en alcohol etílico), el cual oscurece más rápidamente la perlita y pone de manifiesto los bordes de ferrita.

3.1.5.1 Microscopía óptica

Las muestras preparadas metalográficamente, tanto en dirección longitudinal como transversal, fueron llevadas a un microscopio óptico marca Olympus® modelo SC30, logrando micrografías con distintas magnificaciones.

3.1.5.2 Microscopía electrónica de barrido

Con el fin de obtener micrografías de las muestras preparadas con una mayor amplificación y contraste topográfico, se llevaron a un microscopio electrónico de barrido Jeol®, modelo JSM-6510LV.

Además, se realizaron análisis químicos puntuales por espectroscopía de dispersión de energía (EDS), obteniéndose una composición química elemental de las fases y de los precipitados presentes en el metal base.

3.1.6 Cuantificación de volumen de fases

Una vez identificados cada una de las fases y constituyentes que contienen los aceros, se procede a estimar las fracciones de volumen de los mismos. Se utilizó el conteo manual de puntos, de acuerdo a la norma ASTM E562 [30], ya que es una de las más sencillas y útiles mediciones de la distribución de volumen de las partículas.

Con el mismo objetivo, se empleó el software de análisis de imágenes conocido como MagniSci. Con este programa se contrastan las fases presentes para posteriormente determinar el área que comprende cada una de éstas.

3.1.7 Ensayo de dureza Vickers

Se determinó la dureza Vickers (HV) del metal base de acuerdo a la norma ASTM E384-11e1 [31], con un microdurómetro marca Shimadzu® modelo HMV-2T, el cual utiliza como indentador una pirámide de diamante. Las indentaciones se realizaron aplicando una carga de 9.807 N durante 15 segundos para después calcular un promedio que representa la dureza del material, con el fin de comparar la dureza antes y después de la soldadura.

3.1.8 Ensayo de tensión

El ensayo de tensión para cada acero se realizó con un grupo de probetas en la dirección de rolado, a una velocidad del cabezal de 10 mm/min de acuerdo al estándar ASTM E8/E8M-15a [32]. Se utilizó una máquina de ensayos universal de la marca Shimadzu® de la serie AG-X, la cual cuenta con capacidad de 30 toneladas y procesa los resultados con el software Trapezium.

Con este ensayo se obtienen los valores de resistencia de cedencia, esfuerzo último de tensión, % de elongación, así como el exponente de endurecimiento por deformación (valor n) de los materiales recibidos.

3.2 Pruebas de soldadura

En esta sección se detalla el procedimiento de la aplicación de los cordones de soldadura mediante el proceso de haz de electrones que permitirán detectar discontinuidades, defectos o imperfecciones con los parámetros elegidos, lo que puede marcar diferencia entre uniones seguras, y aquellas potencialmente riesgosas o susceptibles a daños posteriores.

3.2.1 Preparación de cupones

Para realizar las pruebas de soldadura se diseñaron cupones de acuerdo al equipo a utilizar. La figura 3.4 muestra las dimensiones de los mismos, indicando la orientación de los cortes en las láminas recibidas, así como la dirección de soldadura.

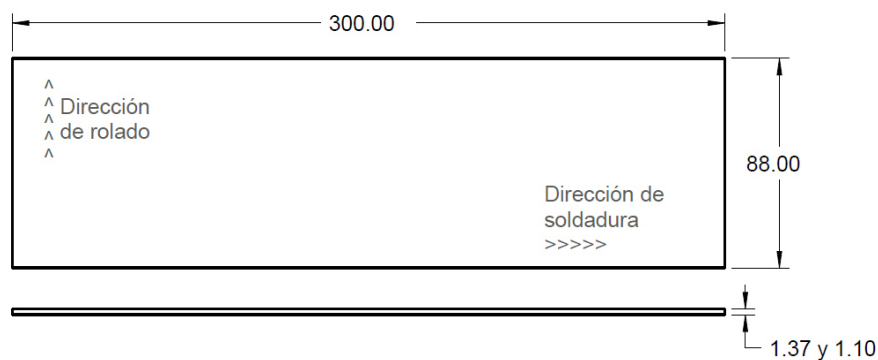


Figura 3.3 – Cupones de soldadura utilizados para los dos aceros (dimensiones en milímetros).

3.2.1 Equipo utilizado

La soldadura se llevó a cabo en un sistema de bloqueo de carga, ProBeam® modelo K40 (figura 3.5), el cual se encuentra instalado en el Mercury Centre de la Universidad de Sheffield.



Figura 3.4 – Cámara por haz de electrones ProBeam K40, ubicada en el Mercury Centre de la Universidad de Sheffield.

Este equipo, desarrollado por la compañía alemana pro-beam AG & Co. KGaA, cubre un área de 48 m². Consiste en una cámara de vacío con un volumen de 4 m³ donde se incluye una plataforma controlada por control numérico por computadora (CNC) que permite trabajar con piezas de hasta 1500 kg, alcanzando un vacío máximo de 7×10^{-4} mbar en 12 minutos. Este modelo puede operar en la modalidad de soldadura, soldadura fuerte y en aplicaciones superficiales, incluyendo la tecnología de haces múltiples, enfoques múltiples y multiprocesos [33].

3.2.2 Ajuste de los parámetros de soldadura

El haz se enfocó sobre la superficie de los cupones, bajo diferentes configuraciones operativas, con la finalidad de estudiar la influencia del aporte térmico en un rango de 0.025 a 1.150 kJ/mm y de la velocidad de soldadura a 10, 15 y 20 mm/s. De lo anterior, se obtuvieron 12 combinaciones distintas las cuales se muestran en la tabla 3.1 con la identificación numérica ascendente de cada condición considerada para este trabajo.

Tabla 3.1 – Identificación de muestras con los parámetros generales evaluados.

		Velocidad de soldadura (mm/s)		
		S ₁ = 10	S ₂ = 15	S ₃ = 20
Aporte de calor (kJ/mm)	Q ₁ = 0.025	1	2	3
	Q ₂ = 0.050	4	5	6
	Q ₃ = 0.100	7	8	9
	Q ₄ = 0.150	10	11	12

En este caso, el equipo se operó con un voltaje constante de 60 kV y una corriente de haz de entre 5 y 65 mA. La corriente necesaria para trabajar con estos valores de aporte térmico y velocidad fue calculada despejando la ecuación 3.4 [34]:

$$Q \left[\frac{kJ}{mm} \right] = \eta \frac{V[V] \times I[A]}{S \left[\frac{mm}{s} \right] \times 1000} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Donde V es el voltaje, I es la corriente, s es la velocidad de soldadura y η es la eficiencia térmica del proceso, donde se estima que es aproximadamente 80% para EBW.

A continuación, se muestran los parámetros utilizados para evaluar ambos aceros (tabla 3.2), el espesor influye en los resultados obtenidos.

Tabla 3.2 – Parámetros utilizados para el estudio.

Nº de muestra	Aporte de calor [kJ/mm]	Corriente [mA]	Velocidad de soldadura [mm/s]
1	0.025	5.208	10
2		7.813	15
3		10.417	20
4	0.050	10.417	10
5		15.625	15
6		20.833	20
7	0.100	20.833	10
8		31.250	15
9		41.667	20
10	0.150	31.250	10
11		46.875	15
12		62.500	20

Los parámetros se eligieron con el propósito de poder comparar condiciones extremas de aporte térmico con velocidades de avance distintas. Esta programación de soldadura es una guía y depende del equipo y el material a evaluar.

3.2.3 Proceso de soldadura

Una vez calculados estos parámetros se procedió a colocar los cupones dentro de la máquina, con sus respectivas sujeciones, no sin antes verificar las condiciones de las muestras. La superficie expuesta al haz en los cupones debe estar libre de óxido, corrosión, pintura y/o contaminantes que afecten la calidad de la soldadura, por lo que fue necesario una limpieza superficial. Se utilizó un gabinete chorreador de arena de la marca Guyson® para después aplicar isopropanol y secar, esta técnica permite darle un acabado adecuado a la superficie eliminando contaminantes indeseados sin dañar la composición del metal.

Posteriormente, se colocó un par de cupones (figura 3.6) en una plataforma controlada por CNC que se introduce al interior de la cámara de vacío de la máquina.

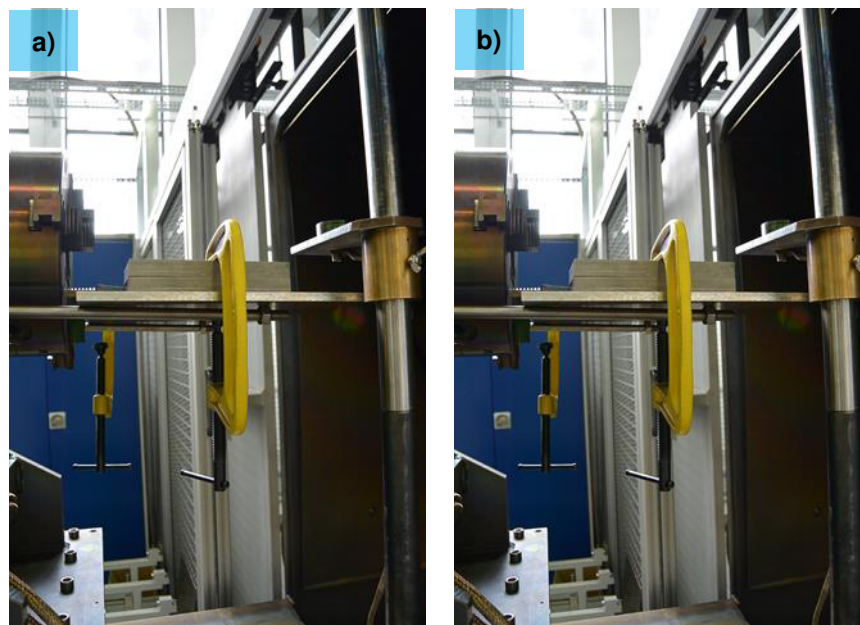


Figura 3.5 – Colocación de un par de cupones (a) sujetos por dos abrazaderas en G (b) en una plataforma controlada por CNC que se introduce en la cámara de vacío.

Lo anterior toma aproximadamente 8 minutos para obtener un vacío parcial e iniciar con la programación para el depósito de los cordones. La aplicación de los cordones es rápida, sin embargo, es necesario esperar otros 8 minutos para evacuar el sistema hasta que el vacío se reduzca a su valor de reposo. Una vez evacuado el sistema, se abren las puertas de seguridad para deslizar la plataforma hacia el exterior.

3.4 Caracterización de los cordones de soldadura

Una vez finalizada la aplicación de los cordones de soldadura, se procedió a evaluar las diferentes condiciones de prueba con diferentes técnicas de caracterización, lo cual permitirá determinar los parámetros más adecuados para cada material, así como observar posibles defectos en las trayectorias.

3.4.1 Inspección visual

Para analizar el efecto de los parámetros de soldadura en cada acero, se realizó una inspección visual examinando el aspecto general y observando la presencia de defectos macroscópicos superficiales. Con la ayuda de un microscopio digital portátil, Dino-Lite®, se verificó cada zona de las trayectorias de los cordones soldados y se señaló alguna imperfección con el software DinoCapture 2.0.

3.4.2 Micro y macrografías

Se obtuvieron muestras para caracterización macro y microestructural. Estas muestras se consiguieron de cortes transversales de los cordones de soldadura para su examinación metalográfica, como se indica en la figura 3.7 en el detalle A, revelándose su microestructura con el reactivo Picral.

Para las macrografías se utilizó un microscopio invertido de alta gama Zeiss® Axio Observer Z1, completamente motorizado, que permitiera un mapeo en el área de la muestra. Con las imágenes obtenidas fue posible determinar las dimensiones de los distintos cordones, así como de la zona afectada por el

calor (ZAC), haciendo uso del software para procesamiento de imágenes ImageJ™. Mientras que para observar su microestructura en la zona de fusión y en la zona afectada por el calor, así como del metal base posterior a la soldadura, se hizo uso nuevamente del microscopio Olympus® presentado en la sección 3.1.5.

3.4.3 Perfil de microdureza Vickers

Se realizaron perfiles de microdureza Vickers con el microdurómetro Shimadzu® modelo HMV-2T. Cada perfil consistió en 15 indentaciones (figura 3.7) desde el centro de la zona de fusión hasta el metal base no afectado, cada indentación se distanció por al menos tres veces la longitud de la anterior para evitar la interferencia de los campos de deformación de la indentación adyacente. Se aplicó una carga de 9.807 N (HV1) durante 15 segundos.

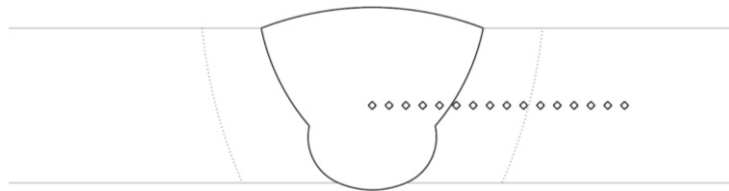


Figura 3.6 – Representación del perfil de dureza en la sección transversal.

La ZAC se definió visualmente desde el software ImageJ y considerando los valores de dureza hasta donde se presenta el material base no afectado.

3.4.4 Ensayo de tensión

El ensayo de tensión para cada acero se realizó con un grupo 3 probetas por junta de manera transversal a los cordones de soldadura como se muestra en la imagen 3.7. Se seleccionó una velocidad del cabezal de 10 mm/min de acuerdo al estándar ASTM E8/E8M-15a [32], utilizando una máquina de ensayos universal de la marca Shimadzu® de la serie AG-X, la cual procesa los resultados con el software Trapezium. Con este ensayo se obtienen los valores

de resistencia de cedencia, esfuerzo último de tensión, % de elongación, así como el exponente de endurecimiento por deformación (valor n) de los aceros.

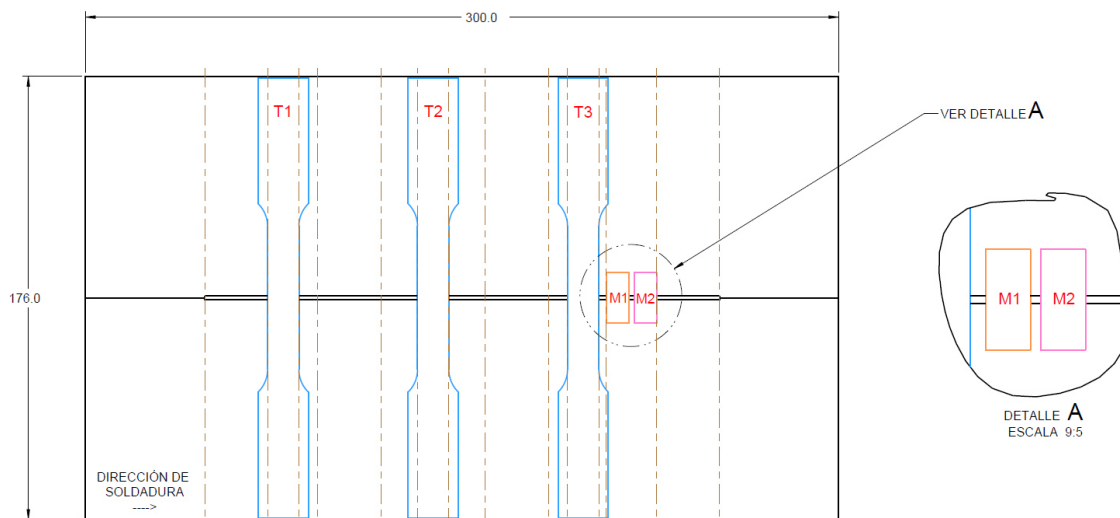


Figura 3.7 – Representación general de la ubicación de los cortes para muestras y probetas de tensión en juntas de soldadura. Más detalles en el anexo A.

Capítulo 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Introducción

En este capítulo se presenta el análisis de resultados de los experimentos presentados en el capítulo 3. Se muestran las características de cada material y la influencia de estas en las pruebas de soldadura. Se analiza el efecto de los parámetros propuestos para las dimensiones del cordón y la macro y microestructura. Posteriormente, se analizan los resultados del modelo numérico realizado con las condiciones más importantes de cada acero.

4.2 Caracterización de los aceros

Distintas técnicas de caracterización permitieron evaluar los resultados obtenidos. Considerando las condiciones del procesamiento de los materiales y sus características de soldabilidad, se revisó el efecto de las variables operativas del proceso de soldadura en las propiedades y dimensiones de los cordones aplicados.

4.2.1 Análisis químico por espectrometría de emisión óptica

El análisis de composición química por espectrometría de chispa de cada acero reveló los elementos y porcentajes que se reportan en la Tabla 4.1. De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, se observa que el acero

HSLA cuenta con microalentes tales como el niobio, que incrementa el esfuerzo de cedencia por una combinación de endurecimiento por precipitación y refinamiento de grano, y el titanio, que limita el crecimiento de grano austenítico al formar nitruros de titanio. Por otro lado, el 22MnB5 se presenta como un acero microaleado al boro combinado con manganeso, así como también otros elementos como el silicio y el titanio que tiene una función clave en el comportamiento del material al proteger al boro de la formación de nitruros.

Tabla 4.1 – Composición química de los aceros utilizados (% en peso).

Acero	C	Mn	Si	Cr	Nb	Al	Mo	Ti	B
HSLA	0.071	0.613	0.022	0.011	0.028	0.049	0.014	0.016	----
22MnB5	0.257	1.242	0.212	0.019	0.002	0.031	0.021	0.033	0.003

4.2.2 Cálculo del carbono equivalente

Se realizó el cálculo del carbono equivalente con las tres expresiones presentadas anteriormente observando una diferencia considerable entre cada una, tal como se muestra en la tabla 4.2. Para el acero HSLA la ecuación de Ito y Bessyo es la más apropiada, en ésta se obtuvo un valor menor a 0.26%, lo que permite descartar posibles problemas de soldabilidad.

En el caso del acero 22MnB5 se considera la ecuación del IWW y Yurioka, la primera está destinada para aceros con contenido de carbono superior a 0.18 y la segunda involucra todos los elementos aleantes representando mejor su composición química. Para ambos casos, se obtuvo un contenido de carbono equivalente (%) superior a 0.4, este valor estaría indicando que los elementos de aleación presentes en el acero podrían afectar las transformaciones características favoreciendo la formación de microestructuras susceptibles a la fisuración por hidrógeno.

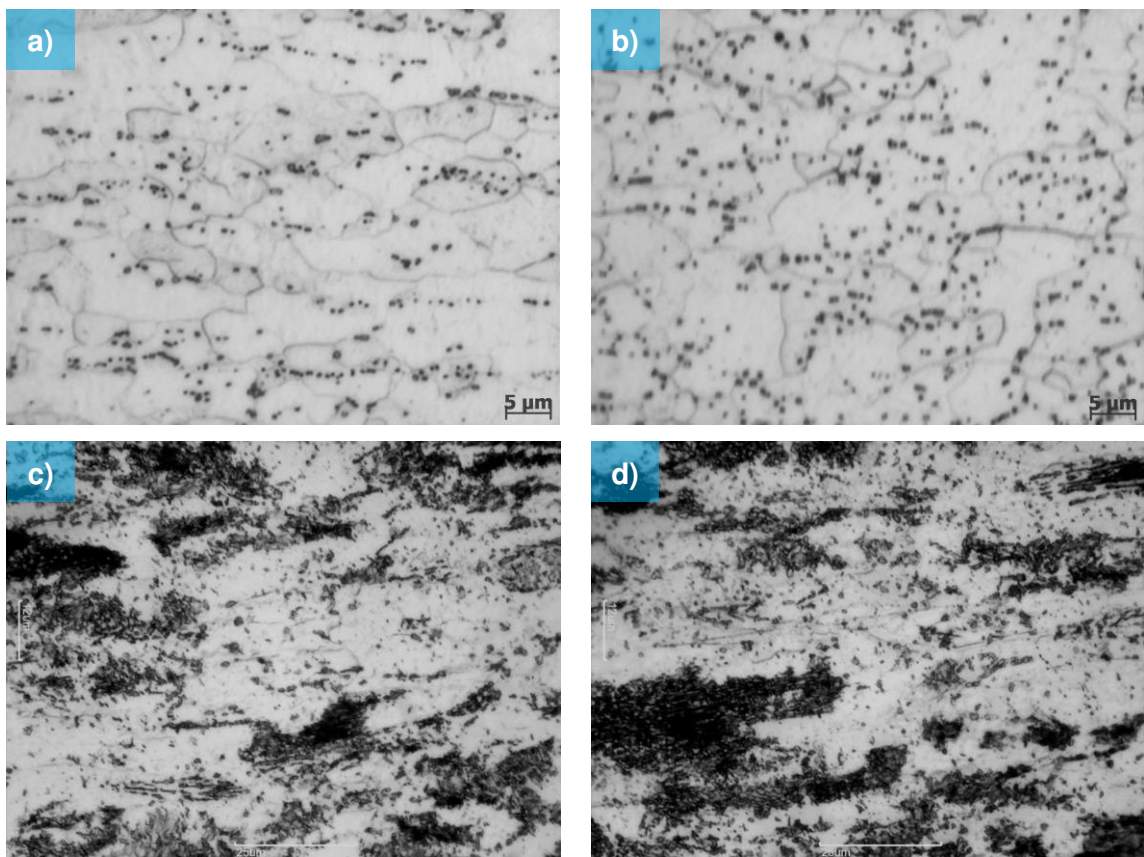
Tabla 4.2 – Criterios para la evaluación del carbono equivalente (%).

Criterio	HSLA	22MnB5
Yurioka	0.136	0.481
Ito y Bessyo	0.106	0.345
IWW	0.181	0.472

4.2.3 Análisis metalográfico

4.2.3.1 Microscopía óptica

Para el análisis metalográfico de las láminas recibidas, se procedió a analizar muestras de cortes transversales y longitudinales. Las micrografías del HSLA (figura 6.1, incisos a y b) muestran una microestructura de ferrita equiaxial con una dispersión ultra fina de carburos aleantes. En el acero 22MnB5 (figura 4.1, inciso c y d) se puede distinguir una microestructura compuesta por bandas de ferrita (en claro) y de perlita (en oscuro).



*Figura 4.1 – Microestructura del metal base, 1000X, Picral 2%.
HSLA: a) longitudinal, b) transversal y 22MnB5: c) longitudinal, d) transversal.*

4.2.3.2 Microscopía electrónica de barrido

Para una mejor definición de las fases presentes se utilizó microscopía electrónica de barrido (MEB), donde se observa la morfología (figura 4.2) con una mejor definición y mayor aumento en dirección longitudinal.

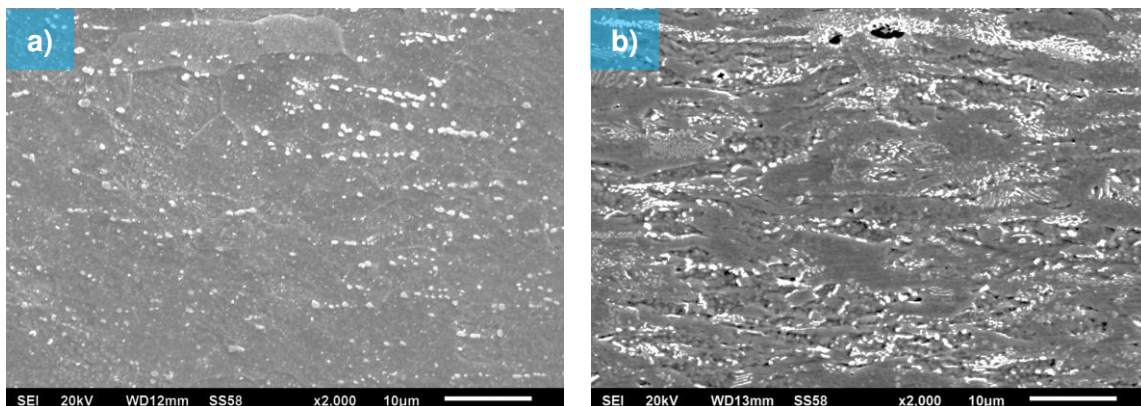


Figura 4.2 – Microestructura del acero HSLA (a) y del acero 22MnB5 (b).

En los análisis de espectroscopía por dispersión de energía (EDS) se evidenció la presencia de partículas muy finas en la matriz ferrítica del acero HSLA. Estas partículas son redondeadas y se presentan de forma aislada o formando especies de colonias, se ubican dentro de los granos de ferrita o en los límites de grano. Para ilustrar esta observación, en la figura 4.3 se muestra una zona analizada en el metal base.

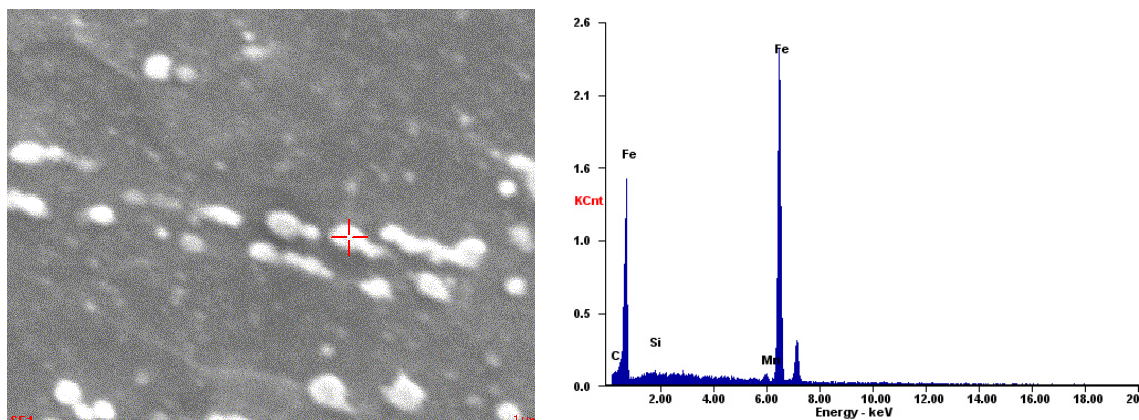


Figura 4.3 – Morfología y composición de los precipitados presentes en el acero HSLA.

La solubilidad del carbono en la ferrita es limitada, a lo más acepta 0.05%, por lo que tenderá a expulsarlo formando carburo de hierro (Fe_3C) o cementita [35, 36]. La distribución de estas partículas en la ferrita se debe a la deformación en frío que dispersa colonias de cementita globulizada [37, 38]. Además, a este aumento, se observan unos finos precipitados dentro del grano ferrítico. Para su resolución completa, serían necesarios más aumentos e, incluso, observarlos por microscopía electrónica de transmisión (TEM). Sin

embargo, en vista de la composición del acero, se trata de carbonitruros de los elementos microaleantes, tales como el niobio, aluminio, titanio y vanadio, cuyo objetivo es reforzar el material por precipitación y restringir la movilidad de los bordes de grano, dificultando su migración durante su proceso de crecimiento y manteniendo, así, un tamaño de grano muy fino [39, 40].

Por otro lado, en la figura 4.4 se observa que el acero 22MnB5 cuenta con una matriz ferrítica, razón por la que se presenta un elevado pico de hierro. El carburo de hierro aparece en forma de laminillas, conocidas también como cementita, las cuales se alternan con las laminillas oscuras de ferrita. A los granos formados de laminillas blancas y oscuras se les conoce como la fase perlita, aunque en realidad no es una fase sino dos: ferrita y cementita [35].

También se aprecia un contenido de manganeso, elemento que, junto al carbono, cromo y molibdeno, y a la microestructura propia del acero de partida, propicia que, al ser llevado a cabo el proceso de soldadura, la estructura obtenida sea martensita, responsable directa de los altos grados de dureza que puede presentar este acero [41].

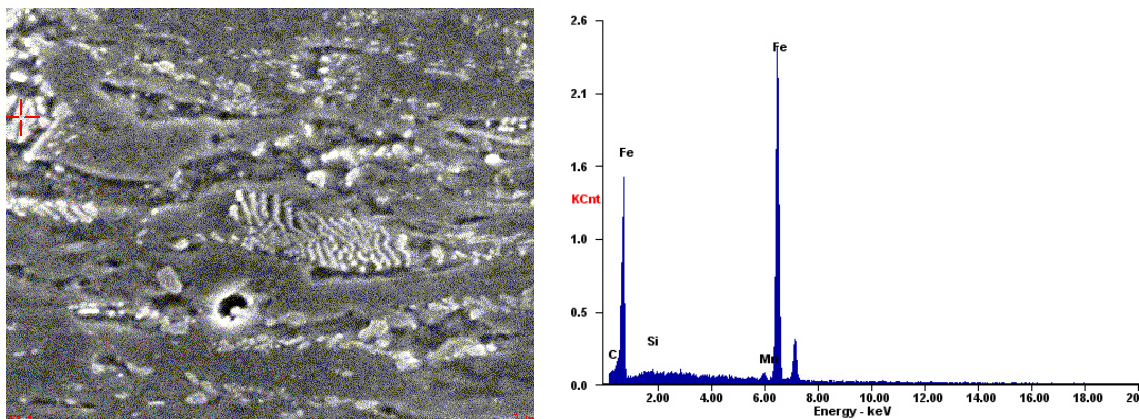


Figura 4.4 – Morfología y composición de los precipitados presentes en el acero 22MnB5.

Adicionalmente, en la figura 4.5 se presentan los espectros de diversas partículas encontradas, incluyendo las del titanio, elemento que forma nitruros para proteger al boro de la formación de óxidos y nitruros que afectan la templabilidad del acero [42, 43, 44]. Además de los precipitados mencionados, se han encontrado otros elementos como el silicio, níquel, cromo y cobre, que forman parte del acero aleado.

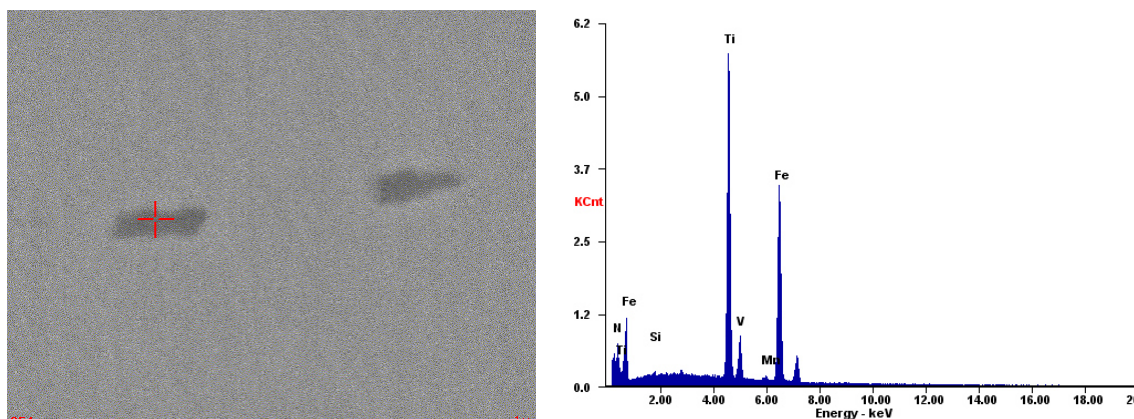


Figura 4.5 – Análisis de los precipitados en el acero 22MnB5.

4.2.4 Cuantificación del volumen de fases

Como se muestra en la tabla 4.1, la principal diferencia en los dos tipos de acero es el contenido de carbono. Cuando el contenido de carbono es bajo, abundan los granos de ferrita como en el acero HSLA. A medida que el contenido de carbono aumenta, la población de cementita sube, incrementando la presencia de perlita como en el acero 22MnB5 [35].

La medición de la fracción de volumen se examinó en una muestra del metal base de ambos aceros. Se eligió un aumento de 500X, el cual es lo suficientemente alto para permitir una distinción significativa entre las fases. Puesto que el área cubierta por cada micrografía es $120 \times 90 \mu\text{m}$ a 500X para el HSLA y de $224 \times 168 \mu\text{m}$ a 500X para el 22MnB5, se utilizaron 10 micrografías para cubrir una zona más amplia. Tal y como se describe en la sección 3.1.6, se extendió un modelo de rejilla cuadrado con 100 intersecciones y posteriormente las imágenes se procesaron en el software Magni-Sci para la verificación del ensayo, en el cual se manejó una coloración bicolor para la distinción de las fases. La figura 4.6 corresponde a una imagen analizada de la muestra del acero HSLA y la figura 4.7 se concentra en un área examinada del acero 22MnB5. Para el acero HSLA se midió la fracción de volumen que ocupan los carburos presentes en la matriz de ferrita. Mientras que para el acero 22MnB5 se midió la fracción en volumen de perlita para así estimar el contenido de ferrita, ambos casos se registran en la tabla 4.3.

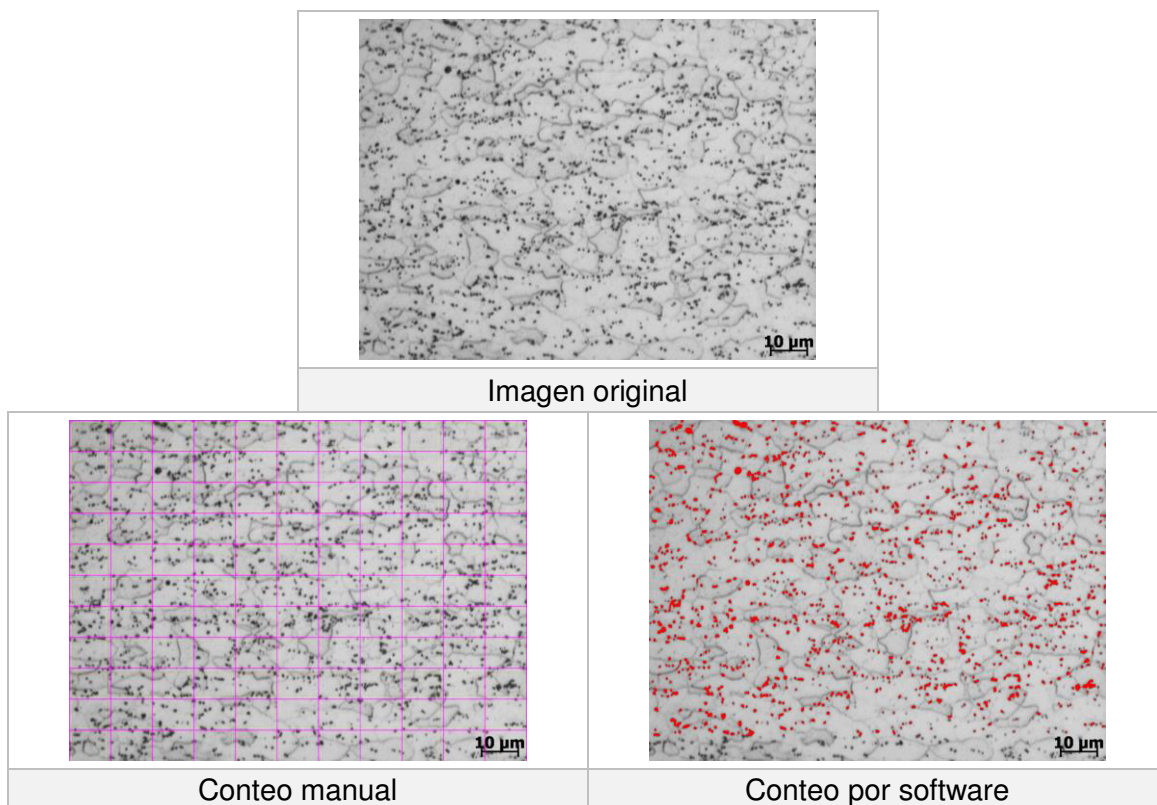


Figura 4.6 – Análisis de la cuantificación del volumen de fases en el acero HSLA.

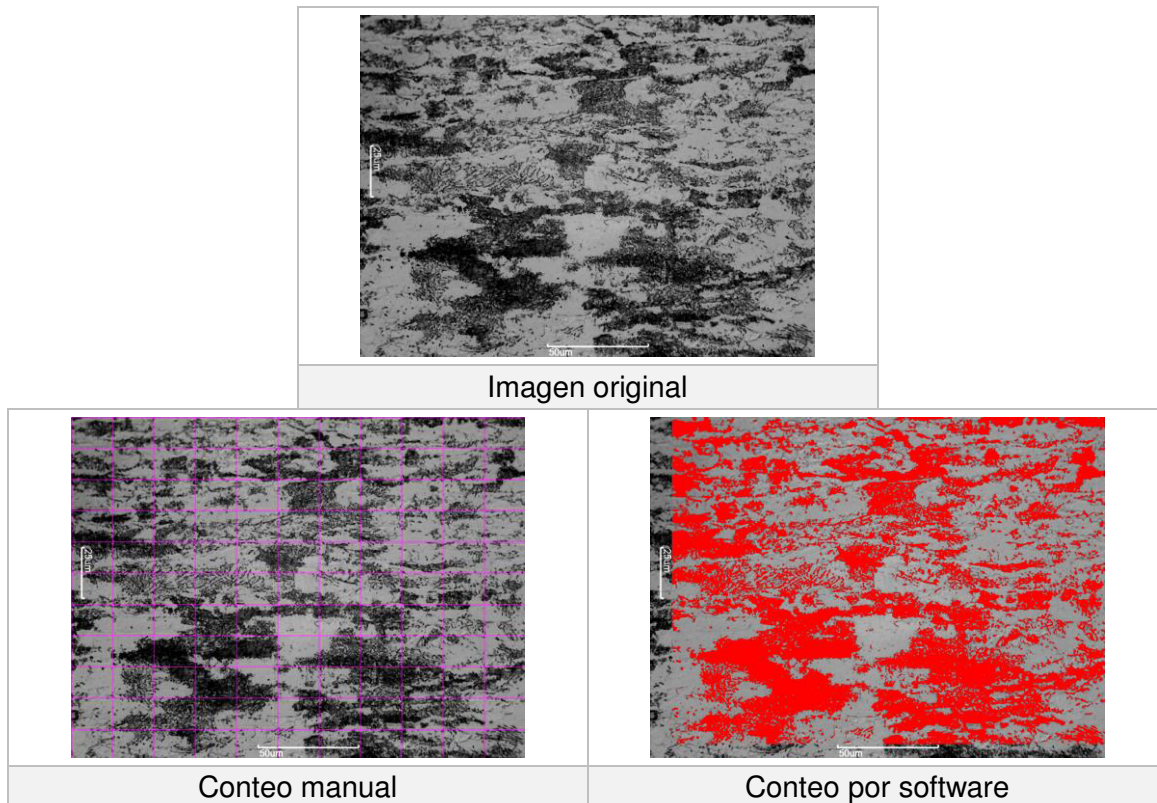


Figura 4.7 – Análisis de la cuantificación del volumen de fases en el acero 22MnB5.

Tabla 4.3 – Cuantificación del volumen de fases.

HSLA				22MnB5			
Conteo manual		Software		Conteo manual		Software	
%Carburos	σ	%Carburos	σ	%Perlita	σ	%Perlita	σ
4.50	1.87	4.82	1.52	40.38	2.56	40.54	2.24

En la tabla 4.3 se muestra el promedio de cada técnica utilizada. El conteo manual basado en la norma ASTM E562 fue muy aproximado a la cuantificación de fases realizada con el software de procesamiento de imágenes. Para los dos aceros hubo una desviación estándar mínima, tanto para el conteo manual y de software, y una diferencia menor entre las dos. En el HSLA los carburos presentes ocupan aproximadamente 5% de la matriz ferrítica, y en el acero 22MnB5 se cuantificó el contenido en 40% perlita y el resto representa la ferrita.

4.2.5 Ensayo de dureza Vickers

En la tabla 4.4 se presentan los resultados de dureza Vickers del metal base, de los cuales se obtuvo la media con las lecturas registradas, así como la desviación estándar, ésta última para expresar el índice numérico de la dispersión del conjunto de datos.

Tabla 4.4 – Dureza Vickers (HV).

Material	Dirección	Dureza promedio (HV)	Desviación estándar
HSLA	Longitudinal	164	2.99
	Transversal	159	4.89
22MnB5	Longitudinal	309	3.97
	Transversal	308	4.92

Los anterior muestra que los aceros presentan un comportamiento homogéneo de dureza Vickers en ambas direcciones. El acero HSLA una menor dureza, por lo que es un material blando. Y el acero 22MnB5 cuenta con una dureza mayor, debido a su contenido de carbono.

4.2.6 Ensayo de tensión

El acero no es completamente isotrópico, y la ductilidad es sensible a la dirección de laminación. Cuando se trabaja en paralelo a la dirección de laminado se obtienen valores más altos de elongación, si se realiza un estiramiento perpendicular a la dirección de laminación, la ductilidad se reduce [45]. Los cupones de ensayo pueden ser preparados en forma perpendicular o paralela a la dirección de laminación. Sin embargo, en dirección perpendicular, cuando la muestra soldada se estire o doble, la ductilidad transversal afectará la prueba. Por lo que es más habitual utilizar la orientación de la trayectoria de la soldadura de modo que quede perpendicular a la dirección de laminación [46].

La tabla 4.5 presenta los valores de las propiedades mecánicas a partir de los ensayos de tensión de probetas extraídas en la dirección de laminación que permiten evaluar las propiedades iniciales de los dos aceros.

Tabla 4.5 – Propiedades mecánicas.

Muestra	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	EL (%)	AR (%)	n
HSLA	374.40	513.21	18.83	12.51	0.0017
22MnB5	907.84	1028.12	3.55	3.24	0.1460

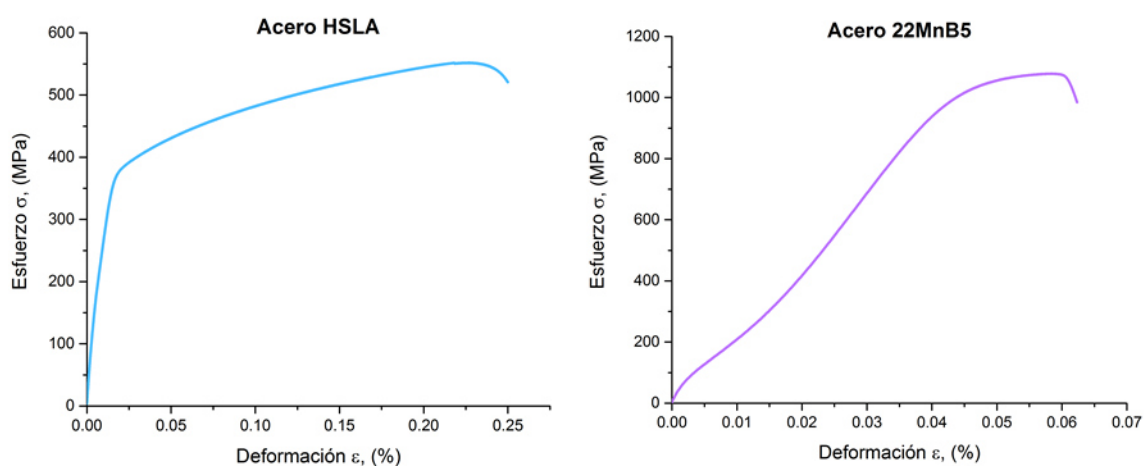


Figura 4.8 – Curvas Esfuerzo – Deformación: a) acero HSLA y b) acero 22MnB5.

Cada ensayo se repitió 3 veces en la dirección paralela al laminado, por lo tanto, se seleccionaron las curvas medias de esfuerzo-deformación obtenidas

a una velocidad de 10 mm/min, en ellas se presenta una cedencia continua para ambos casos como se muestra en la figura 4.8. Además, el acero 22MnB5 presentó un promedio elevado en el punto de cedencia y en el esfuerzo último, mientras que el acero HSLA tiene una resistencia a la tracción significativamente más baja y alargamiento mayor que el 22MnB5.

4.3 Ajuste de parámetros de soldadura

Los cupones de prueba fueron soldados de acuerdo con las especificaciones del equipo. Para la programación de la trayectoria de los cordones de soldadura de los dos aceros, se mantuvo constante el voltaje, variando el aporte de calor y las velocidades de barrido.

La figura 4.9 muestra las secuencias de soldadura sobre un par de cupones que se utilizaron en el procedimiento de ajuste del aporte de calor y de las velocidades, con rangos más elevados que los que finalmente se utilizaron.

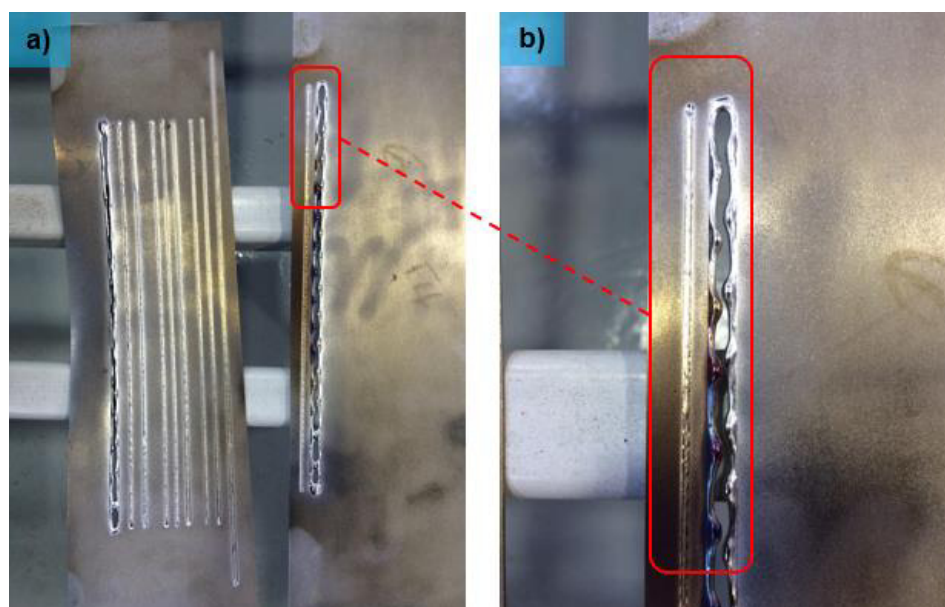


Figura 4.9 – Par de cupones soldados con parámetros más elevados (a) y acercamiento a la zona de una combinación excedente (b).

Los parámetros considerados en un inicio abarcaban un aporte térmico de 0.5 a 2 kJ/mm combinados con velocidades de 15 a 45 mm/s, lo que llevaba a obtener corrientes desde 15.63 hasta 187.50 mA en un voltaje constante de 60 kV. Con esto, las piezas se calentaron exageradamente y la penetración

resultó excesiva, llegando a producir una perforación por quemadura y una mayor distorsión.

Después de los resultados obtenidos inicialmente, se eligió un rango menor tanto para velocidades como para aportes térmicos, conservando el valor del voltaje constante y modificando el valor de la corriente calculada (ver tabla 3.2). Con los ajustes realizados, se desea obtener un menor daño metalúrgico y una menor distorsión de las piezas soldadas.

4.4 Proceso

La aplicación de la soldadura se llevó a cabo en cuatro pares de cupones donde se aplicaron los distintos cordones de soldadura (bead on plate). Se organizaron en grupos de 3, de acuerdo a cada aporte térmico con su respectiva velocidad (ver tabla 3.1). En la figura 4.10 se pueden observar las distintas trayectorias que se obtuvieron en el acero HSLA y en la figura 4.11 en el acero 22MnB5.

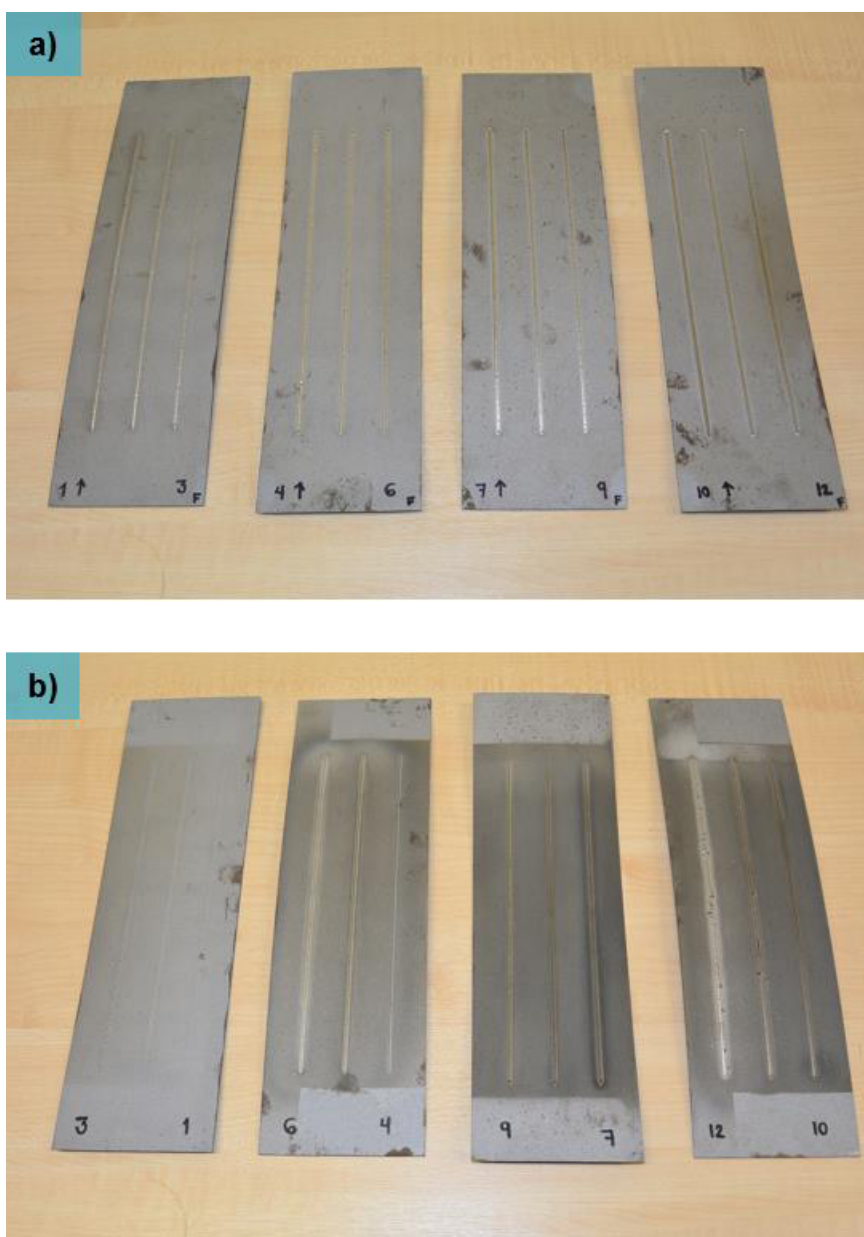


Figura 4.10 – Cupones con las 12 combinaciones de los cordones de soldadura en el acero HSLA:
a) cara y b) raíz.

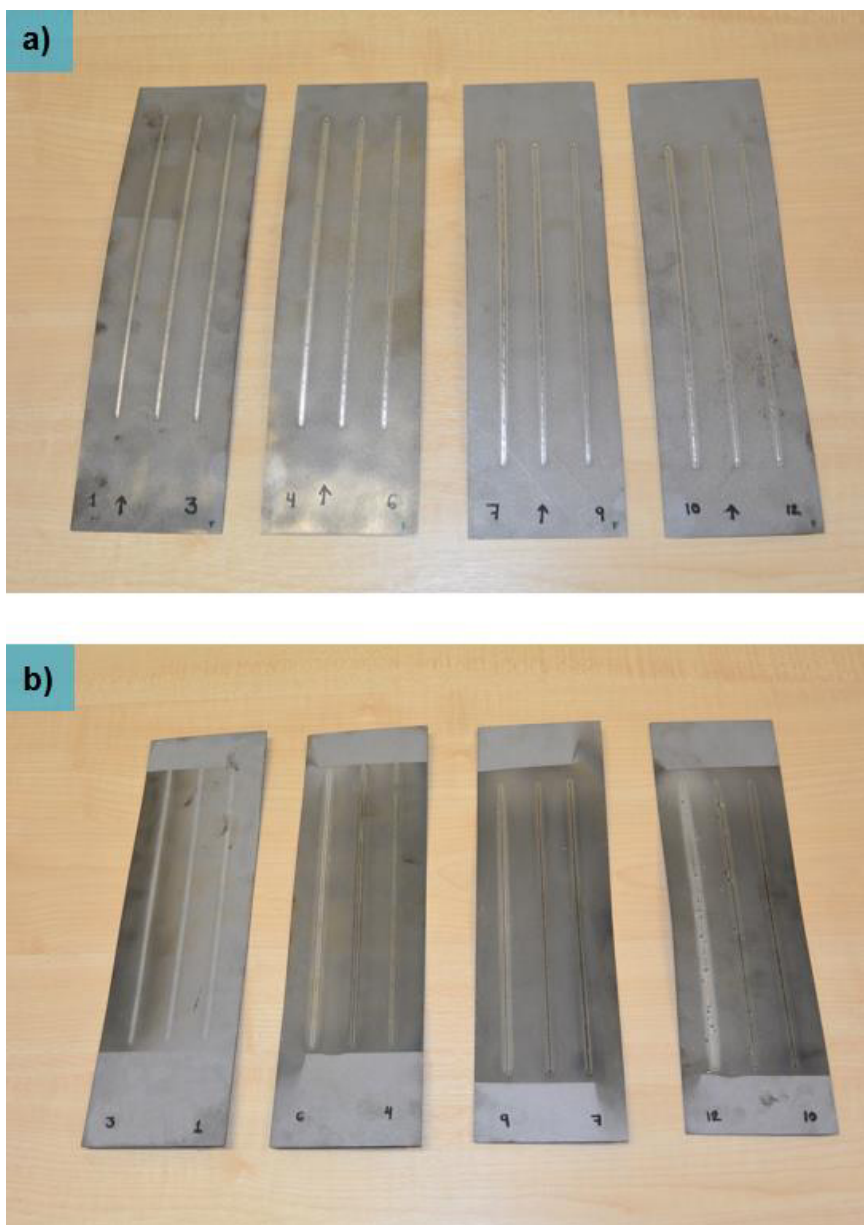


Figura 4.11 – Cupones con las 12 combinaciones de los cordones de soldadura en el acero 22MnB5:
a) cara y b) raíz.

En ambos casos, los cupones presentaron una distorsión mínima tomando en cuenta que se aplicaron 3 distintas condiciones en cada uno.

4.5 Caracterización de los cordones de soldadura

En esta sección se muestran los resultados de la caracterización de las pasadas simples de soldadura para cada acero.

4.5.1 Inspección visual

Por lo general, la aplicación de la soldadura por haz de electrones se aplica para partes delicadas, por lo que se espera suficiente penetración y además un acabado superficial aceptable.

Un estudio de los conjuntos de muestras de las figuras 4.12 y 4.14 mostraron que la combinación de aporte de calor y velocidad del haz tiene un papel crucial no sólo en la penetración de soldadura, sino también en la calidad de su superficie. Sin embargo, altos valores de aporte de calor combinado con altas velocidades pueden iniciar una pulverización catódica y la pérdida de material fundido que da como resultado una mala calidad superficial. Las muestras de las primeras seis combinaciones del acero HSLA (figura 4.12a – 4.12f) presentan un acabado superficial aceptable, por otro lado, las últimas seis combinaciones (figura 4.12g – 4.12l) presentan superficies ásperas a lo largo de las trayectorias. En algunos casos se presentaron pequeñas oquedades (figura 4.13) ocasionadas por una velocidad de barrido lenta que impedía la formación adecuada de las aguas. En la figura 4.12i se muestra un mal peinado de las aguas que no afectaría la resistencia del cordón. Por otro lado, la raíz de las primeras dos condiciones (4.12a y 4.12b) no alcanzó una penetración profunda; sin embargo, la raíz de las placas de soldadura 4.12k y 4.12l mostró signos de pulverización de material. En el caso del acero 22MnB5, se encontró un comportamiento similar al del acero HSLA, en lo que respecta a las primeras seis condiciones (4.14a – 4.14f). Estas condiciones cuentan con un acabado superficial en cara aceptable, aunque la condición 1 (figura 4.14a) no alcanzó una penetración completa, lo que puede ocasionar una concentración de esfuerzos que puede resultar en fallas sin deformación apreciable. En la figura 4.14, inciso g, h, i, j y l se aprecia la formación de un valle en cada una de las trayectorias, el cual se produjo cuando el baño de fusión se formó por una velocidad baja y alto aporte. En este acero también se ha presentado chisporroteo de las dos condiciones más altas (figura 4.15), confirmando que en los ajustes correspondientes para experimentos de aportes térmicos mayores a 0.150 kJ/mm con velocidad 15 y 20 mm/s tendrían un efecto negativo.

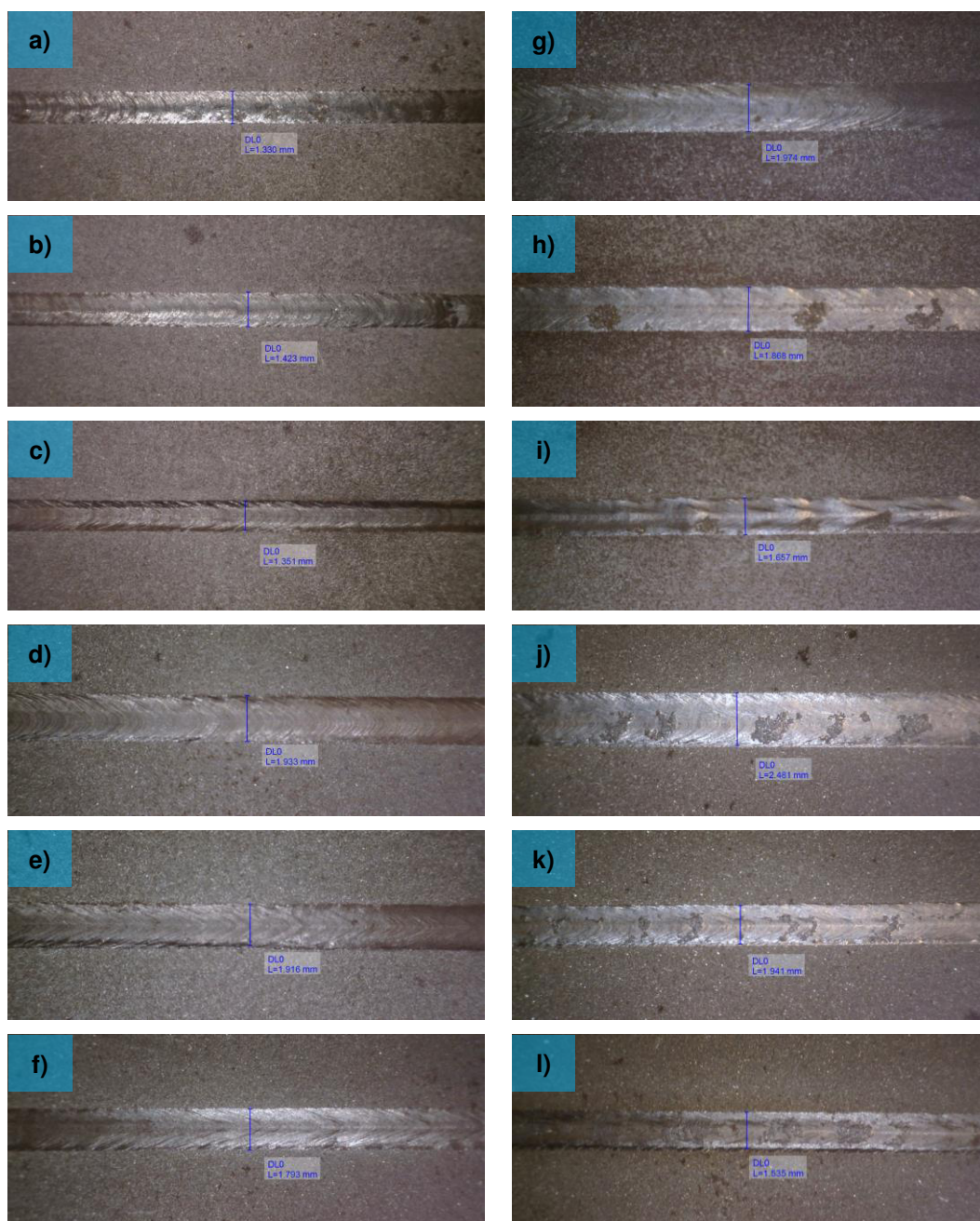


Figura 4.12 – Cordones de soldadura del acero HSLA.



Figura 4.13 – Imperfección en el transcurso del cordón de soldadura en la condición 1 del HSLA.

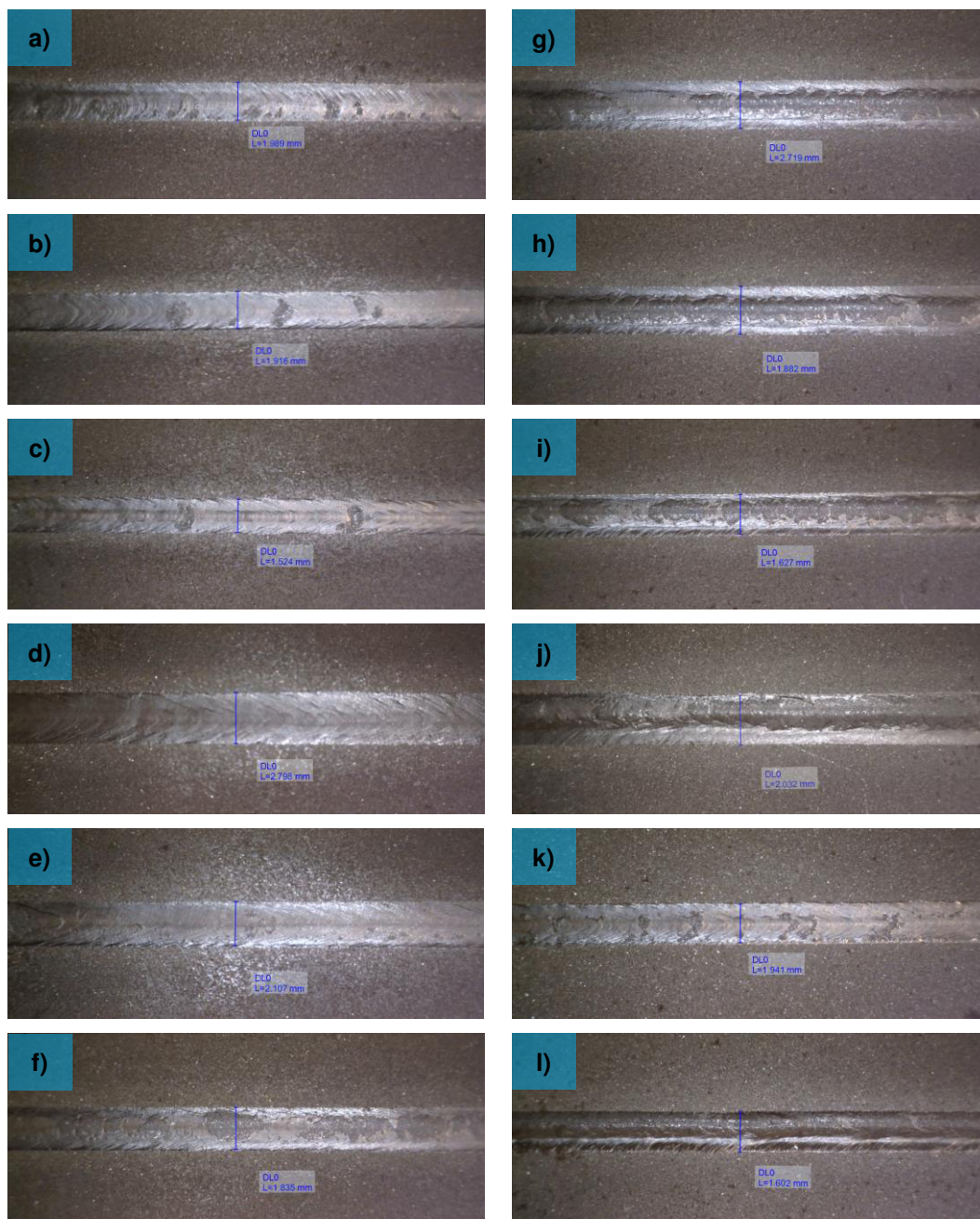


Figura 4.14 – Cordones de soldadura del acero 22MnB5.



Figura 4.15 – Chisporroteo en la raíz de la condición 12 del acero 22MnB5.

El examen visual de las soldaduras ha permitido detectar imperfecciones que pueden ser observadas a simple vista o con la ayuda de ciertos instrumentos, pero solo se trata de indicaciones externas.

Aunque el aspecto exterior de la soldadura sea aceptable, ésta puede encerrar defectos como fisuras, porosidades, inclusiones de escoria o excesivos aumentos en el tamaño de grano. Estos defectos no son objeto de inspección a simple vista y deben ser detectados mediante otras técnicas, ya sean tanto destructivas como no destructivas [47].

4.5.2 Estructuras macro y micrográficas

Esta sección cubre la caracterización estructural macro y micrográfica que permita evaluar la calidad del proceso soldadura, así como la morfología de posibles grietas, fracturas y/o corrosión.

4.5.2.1 Estructura macrográfica

El análisis realizado corresponde a una muestra extraída de la sección transversal de los cordones de soldadura, a 10 cm del inicio de la trayectoria, ya que es la zona más estable del recorrido. Cada muestra obtenida fue preparada metalográficamente y observada a 10X en un microscopio óptico motorizado capaz de capturar una mayor área por un barrido automático. La inspección es sencilla y fácil de interpretar, con ella se pudo comprobar de forma rápida si el procedimiento de soldeo dio lugar a defectos internos no admisibles. Entre las imperfecciones más relevantes se encuentran: penetración excesiva, socavado, refuerzo y concavidad. Conociendo el aspecto que presentan los defectos macrográficos más importantes, es posible relacionarlos con las causas que los producen, pudiendo actuar previamente sobre dichas causas y evitando que vuelvan a aparecer. En el conjunto de imágenes de la figura 4.16 y 4.17 se presentan los cordones de soldadura obtenidos por el proceso de haz de electrones para el acero HSLA y 22MnB5, respectivamente. Los parámetros evaluados se presentaron anteriormente en la tabla 3.1.

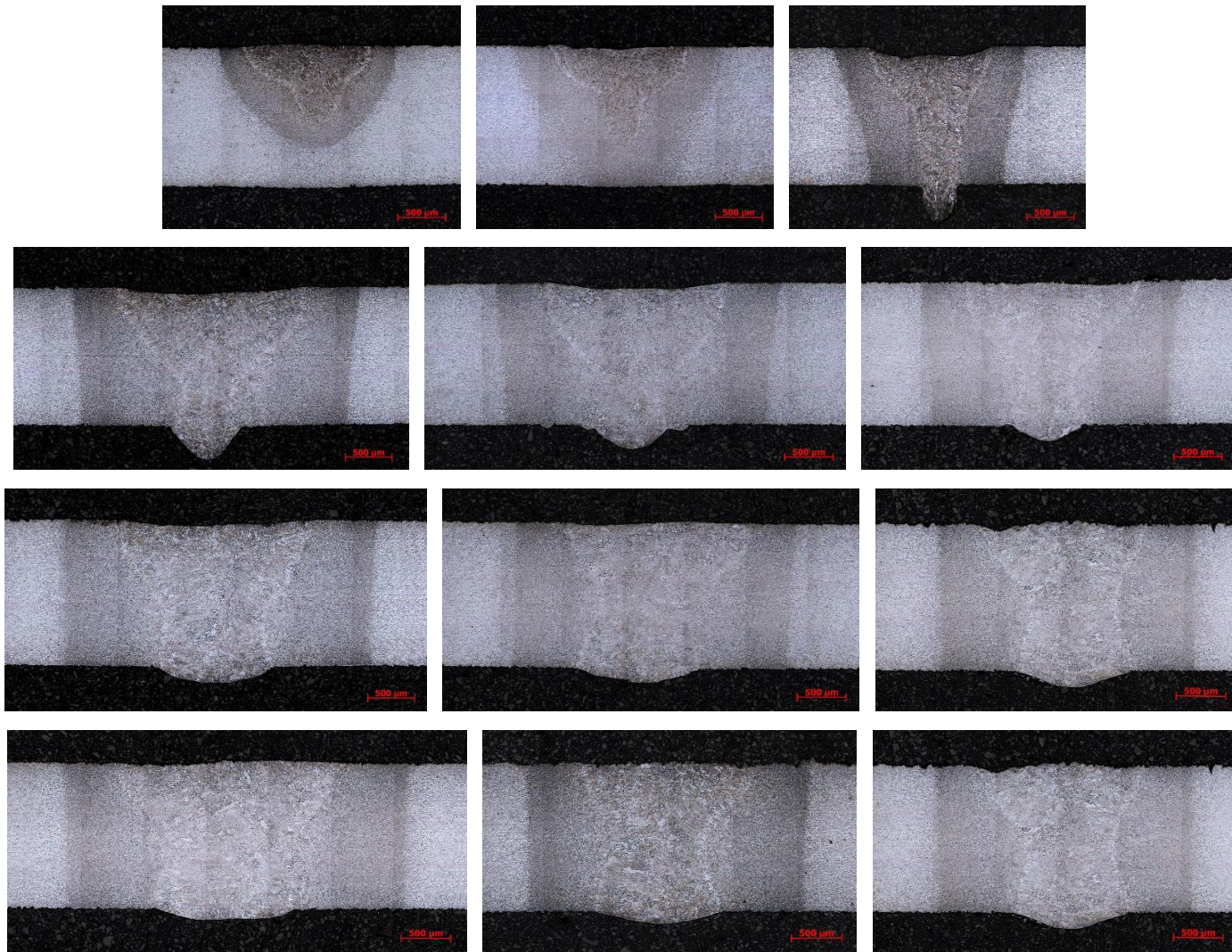


Figura 4.16 - Macrográficas de la sección transversal de los cordones de soldadura del acero HSLA.

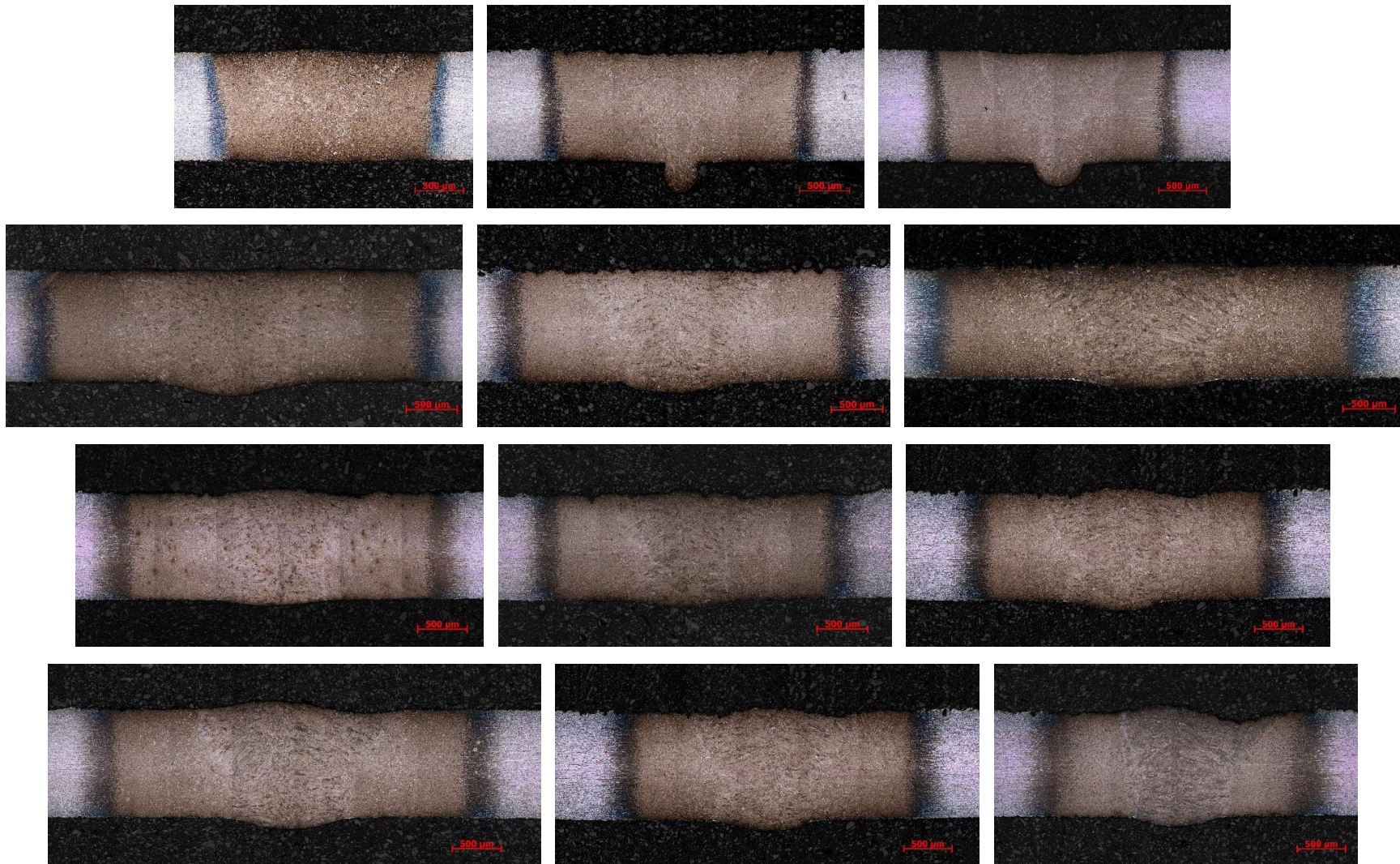


Figura 4.17 – Macrográficas de la sección transversal de los cordones de soldadura del acero 22MnB5.

En la figura 4.18 se observan dos tipos de cordones obtenidos donde se señalan algunas de las características y defectos más comunes que están sujetos a evaluación en este trabajo.

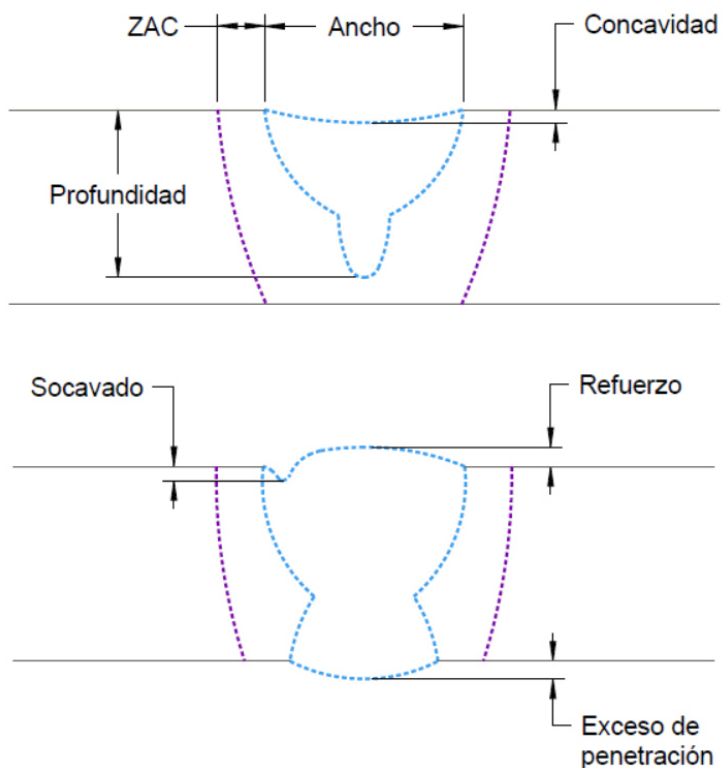


Figura 4.18 – Características y defectos más comunes analizados en este trabajo.

En las figuras 4.16 y 4.17 se presentan los resultados de las mediciones de anchos, ZAC, penetraciones, socavados, refuerzos, excesos de penetración y concavidades para cada una de las soldaduras de estudio de los dos materiales. Las condiciones de soldadura analizadas se dividen en cuatro grupos, de acuerdo al aporte térmico, en donde se manejan tres velocidades como se muestra en la tabla 3.1. En las tabulaciones de las características y defectos se indica en color verde las primeras tres condiciones que corresponden al aporte térmico Q_1 , en naranja las del aporte Q_2 , en celeste las del aporte Q_3 y en morado las condiciones del aporte Q_4 . Después, se presentan los resultados graficados para visualizar mejor el comportamiento de las variables del proceso.

Tabla 4.6 – Dimensiones de las características y defectos de los cordones del acero HSLA.

HSLA							
Condición	Ancho	ZAC	Penetración	Socavado	Refuerzo	Exceso de penetración	Concavidad
1	1321.8	255.3	823.6	---	---	---	---
2	1420.2	311.2	1093.1	---	---	---	38.1
3	1344.0	303.2	completa	---	---	400.7	72.8
4	1928.2	577.1	completa	---	---	367.2	58.5
5	1909.6	510.6	completa	---	---	319.1	39.9
6	1787.3	393.6	completa	---	---	172.9	---
7	1962.8	710.1	completa	---	---	172.9	32.0
8	1859.0	408.2	completa	---	---	174.2	---
9	1648.9	328.0	completa	113.0	---	181.0	---
10	2468.2	526.6	completa	---	---	134.3	---
11	1925.5	553.2	completa	---	---	130.3	---
12	1518.0	475.2	completa	61.2	---	191.3	---

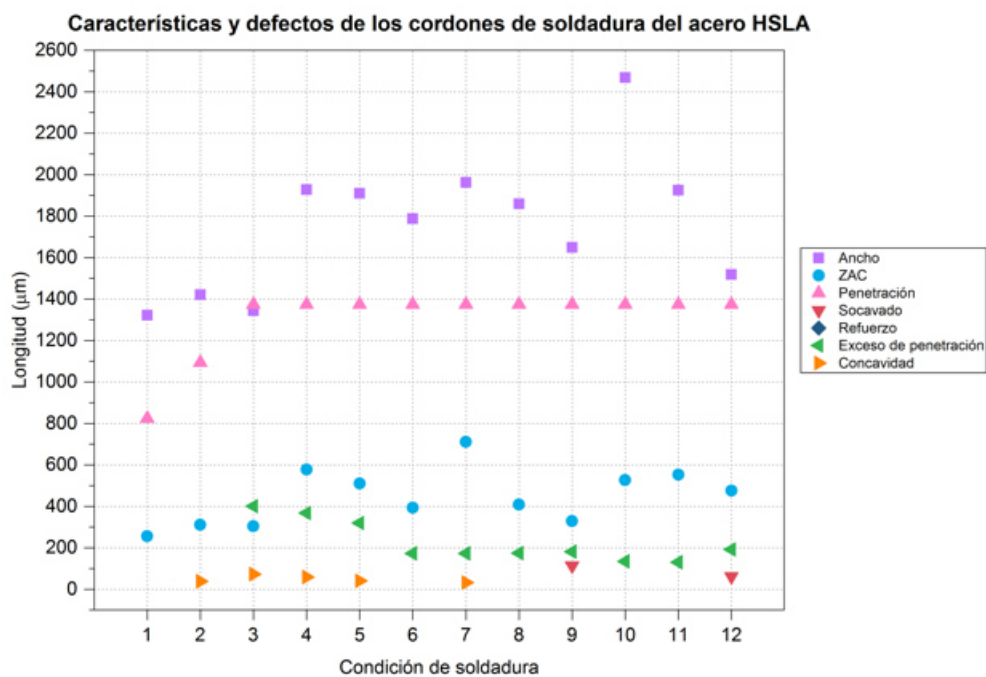


Figura 4.19 – Representación gráfica de las dimensiones de las características y defectos de los cordones del acero HSLA.

Tabla 4.7 – Dimensiones de las características y defectos de los cordones del acero 22MnB5.

22MnB5							
Condición	Ancho	ZAC	Penetración	Socavado	Refuerzo	Exceso de penetración	Concavidad
1	1916.6	269.2	1064.0	---	---	---	---
2	1895.9	443.3	completa	---	---	319.8	---
3	1486.3	522.6	completa	---	---	250.7	17.3
4	2638.8	681.2	completa	---	---	100.5	---
5	2067.9	572.3	completa	---	---	91.7	---
6	1817.6	675.0	completa	---	---	90.0	---
7	2631.4	850.1	completa	---	---	56.4	---
8	1761.6	825.2	completa	---	---	42.3	---
9	1586.9	635.1	completa	30.5	36.3	33.5	---
10	1993.9	915.3	completa	38.8	45.0	75.4	---
11	1696.0	717.0	completa	50.0	45.8	67.1	---
12	1550.3	428.6	completa	123.0	54.7	75.4	---

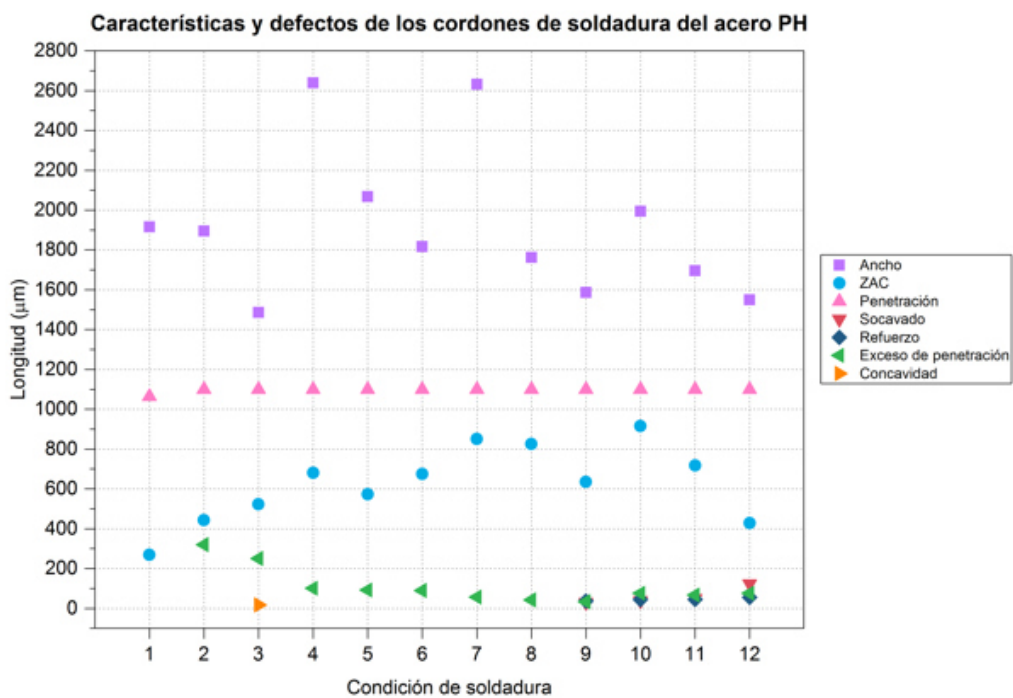


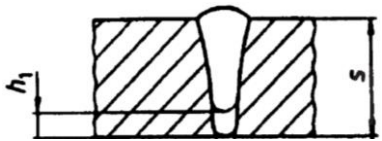
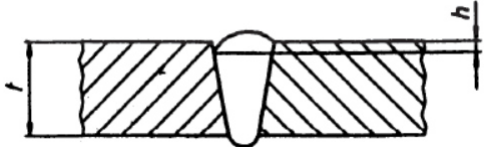
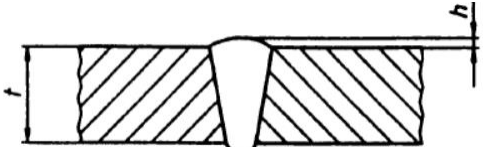
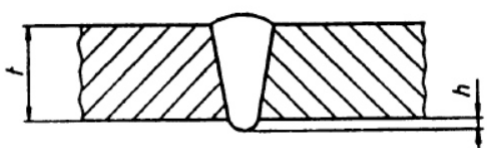
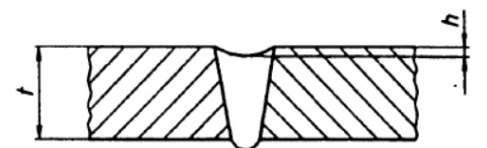
Figura 4.20 – Representación gráfica de las dimensiones de las características y defectos de los cordones del acero 22MnB5.

Estos elementos son comúnmente variables esenciales en los procedimientos de soldadura, así como en la soldadura de producción, y puede requerir que sean medidos para comprobar si cumplen con las especificaciones de planos u otros documentos estandarizados.

El control de la unión permite detectar, y evitar en muchos casos, los defectos de soldeo más graves y frecuentes. En muchos trabajos de soldadura de alta densidad de energía, la profundidad de penetración es el parámetro más importante para garantizar la calidad. Una penetración incompleta puede inducir, por ejemplo, la ruptura temprana de una rueda dentada o de cualquier otra pieza de una cadena cinemática [48]. Por lo anterior, es importante el control activo de la calidad y la supervisión de la soldadura que permitirán conseguir productos que cumplan los exigentes niveles de calidad en cualquier sector.

La norma británica BS EN ISO 13919-1:1997 es una guía para evaluar los niveles de imperfecciones en soldaduras realizadas por haz de electrones en aceros, se enfoca en el análisis de la geometría de las secciones transversales de juntas soldadas por haz de electrones. Aunque se soldaron cordones de soldadura (bead on plate), se evaluarán conforme a la norma, ya que son un indicador del comportamiento en juntas soldadas. La tabla 4.8 muestra los parámetros considerados, se pueden observar tres niveles de calidad: moderado D, intermedio C y riguroso B, los cuales se implementan para asegurar que los productos cumplen ciertos niveles exigidos con un buen grado de seguridad. Se toma el nivel riguroso B para evaluar los resultados del presente trabajo.

Tabla 4.8 – Evaluación de imperfecciones de acuerdo a BS EN ISO 13919-1:1997.

Imperfección	Representación	Límite de imperfección para niveles de calidad		
		Moderado D	Intermedio C	Riguroso B
Penetración incompleta		$h_1 \leq 0.15 s$ o 1 mm, cualquiera que sea menor	No permitido	No permitido
Socavado		$h \leq 0.15 t$ o 1 mm, cualquiera que sea menor	$h \leq 0.1 t$ o 1 mm, cualquiera que sea menor	$h \leq 0.05 t$ o 0.5 mm, cualquiera que sea menor
Refuerzo		$h \leq 0.2 \text{ mm} + 0.3 t$ o 5 mm, cualquiera que sea menor	$h \leq 0.2 \text{ mm} + 0.2 t$ o 5 mm, cualquiera que sea menor	$h \leq 0.2 \text{ mm} + 0.15 t$ o 5 mm, cualquiera que sea menor
Exceso de penetración		$h \leq 0.2 \text{ mm} + 0.3 t$ o 5 mm, cualquiera que sea menor	$h \leq 0.2 \text{ mm} + 0.2 t$ o 5 mm, cualquiera que sea menor	$h \leq 0.2 \text{ mm} + 0.15 t$ o 5 mm, cualquiera que sea menor
Concavidad		$h \leq 0.3 t$ o 1 mm, cualquiera que sea menor	$h \leq 0.2 t$ o 0.5 mm, cualquiera que sea menor	$h \leq 0.1 t$ o 1 mm, cualquiera que sea menor

Capítulo 5

CONCLUSIONES

Los experimentos de soldadura realizados en el presente estudio demuestran que el espesor de las láminas es uno de los factores que determinan los parámetros de soldadura, mientras que la composición química del acero define la calidad del cordón de soldadura. La geometría de la soldadura, la microdureza y la tracción se examinaron para determinar el rendimiento mecánico. De este estudio se hicieron las siguientes conclusiones:

1. A través de reducciones en la potencia del haz y el aumento en la velocidad de soldadura, la concavidad de soldadura del acero HSLA y del acero 22MnB5 podría disminuir.
2. Un mayor contenido de carbono conduce a una mayor dureza en la zona de fusión; el valor de 0.13% (HSLA) y 0.4% (22MnB5) de carbono equivalente en el criterio de Yurioka (la tabla 4.2) es un buen indicador de que el material no es susceptible al agrietamiento en frío en la zona afectada por el calor, de acuerdo con la comparación metalográfica realizada. También se observó una dureza pico más alta que los valores predichos, debido a la alta velocidad de enfriamiento.
3. La disminución del aporte de calor redujo la severidad del reblandecimiento en la zona afectada por el calor, ya que EBW es capaz de soldar con la menor cantidad de aporte de calor en comparación con otros procesos.

4. Aparte del aporte de calor, se observó que la química de los aceros tenía fuertes efectos sobre el ablandamiento de ZAC con mayores adiciones de aleantes reduciendo significativamente el ablandamiento; donde el HSLA muestra 60 HV mientras que 22MnB5 sólo 20 HV.
5. Las propiedades mecánicas de los puntos de soldadura dependen de la zona de fusión. El acero 22MnB5 al presentar una mezcla de bainita y martensita en la zona de fusión alcanza una mayor dureza y soportan una mayor carga en comparación con el acero HSLA que presenta una microestructura de ferrita acicular en la zona de fusión.
6. La zona blanda de las doce condiciones del acero 22MnB5 exhibió una mezcla de martensita templada además de nueva martensita formada por transformación de austenita acompañada de una ligera reducción de la dureza del metal base en la zona blanda.
7. El HSLA mostró pocos cambios en la resistencia a la tracción en comparación con el metal base, ya que no hubo ablandamiento de la zona afectada por el calor; se atribuyó una reducción en el alargamiento a la menor ductilidad de la zona de fusión endurecida.

Lista de referencias

- [1] L. Jeffus, Soldadura: principios y aplicaciones, Madrid: Paraninfo, 2009.
- [2] R. W. Messler, Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry and Metallurgy, John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [3] International Organization for Standardization, *ISO 857-2:2005 Welding and allied processes -- Vocabulary -- Part 2: Soldering and brazing processes and related terms*, Geneva, 2012.
- [4] J. E. Giraldo Barrada, «Reflexión sobre el logos, arte y ciencia de la soldadura basado en la experiencia en investigación del grupo de soldadura de la U. N.,» *Dyna*, nº 171, pp. 248-255, 2012.
- [5] K. Weman, *Welding processes handbook*, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [6] K. Reif y K.-H. Dietsche, *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2010.
- [7] S. Kalpakjian y S. R. Schmid, *Manufacturing engineering and technology*, New Jersey: Prentice Hall, 2009.
- [8] S. Kou, *Welding Metallurgy*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [9] N. Ahmed y U. Dilthey, *New Developments in Advanced Welding*, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2005.
- [10] P. Atkins, L. Jones y L. Laverman, *Chemical Principles: The Quest for*

Insight, Nueva York: W.H. Freeman, 2012.

- [11] «Rayos catódicos: Determinación de la carga y masa del electrón,» Antigua Física Cuántica, 20 Agosto 2014. [En línea]. Available: http://wdb.ugr.es/~bosca/Old_Fisica-Cuantica/?p=284. [Último acceso: 18 Enero 2016].
- [12] H. Kragh, *Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century*, Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [13] K. H. Steigerwald, G. Sayegh, D. Powers, R. Bakish y O. K. Nazarenko, *An international history of electron beam welding*, Múnich: pro-beam AG & Co. KGaA, 2007.
- [14] H. Schultz, *Electron Beam Welding*, Cambridge: Abington Publishing, 2005.
- [15] M. Węglowski, S. Błacha y A. Phillips, «Electron beam welding — Techniques and trends — Review,» *Vacuum*, vol. 130, pp. 72-92, 2016.
- [16] U. Dilthey, «Electron beam welding,» de *New Developments in Advanced Welding*, Cambridge, Woodhead Publishing Limited, 2005, pp. 198-228.
- [17] D. F. Von Dobeneck, *Electron Beam Welding — Examples of 30 Years Job-Shop*, Múnich: pro-beam AG & Co.KGaA, 2005.
- [18] W. G. Daub y W. S. Seese, *Química*, Pearson Educación, 1996.
- [19] C. Sánchez del Río, *Física cuántica*, Madrid: Ediciones Pirámide, 2016.
- [20] R. Esparza Olcina, «El campo magnético,» de *Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos*, Barcelona, Marcombo, 1992, pp. 375-388.
- [21] V. Adam, U. Clauß, D. F. Von Dobeneck, T. Krüssel y T. Löwer, *Electron Beam Welding — The fundamentals of a fascinating*, Múnich: pro-beam AG & Co. KGaA, 2011.
- [22] M. S. Węglowski, J. Dworak y S. Błacha, «Electron Beam Welding — Characteristics,» *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa (BIS)*, vol. 3, pp. 5-14, 2014.
- [23] G. I. Barrera Suárez, *Evaluación de la corrosión por ácidos nafténicos de*

recubrimientos de níquel-alúmina-molibdeno expuestos a altas temperaturas mediante técnica gravimétrica, Bucaramanga, 2010.

- [24] ASTM International, *ASTM E415-14, Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry*, West Conshohocken, Pennsylvania, 2014.
- [25] ASTM International, *ASTM E1019-11, Standard Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Various Combustion and Fusion Techniques*, West Conshohocken, Pennsylvania, 2011.
- [26] H. Zhang y J. Senkara, *Resistance Welding: Fundamentals and Applications*, Boca Ratón: CRC Press, 2011.
- [27] N. Bailey, F. R. Coe, T. G. Gooch, P. H. M. Hart y N. Jenkins, *Welding Steels Without Hydrogen Cracking*, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 1993.
- [28] «MEsteel.com - Linking steel buyers and sellers in the Middle East.» [En línea]. Available: <http://www.mesteel.com/>. [Último acceso: 29 Febrero 2016].
- [29] A. Santillan Esquivel, S. S. Nayak, M. S. Xia y Y. Zhou, «Microstructure, hardness and tensile properties of fusion zone in laser welding of advanced high strength steels,» *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 51, nº 3, pp. 328-335, 2012.
- [30] ASTM International, *ASTM E562-11 — Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count*, West Conshohocken, Pennsylvania, 2011.
- [31] ASTM International, *ASTM E384-11e1, Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials*, West Conshohocken, Pennsylvania, 2011.
- [32] ASTM International, *ASTM E8 / E8M-15a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, West Conshohocken, Pennsylvania,

2015.

- [33] pro-beam systems GmbH, *Universal Chamber EB Machine type K40*, Chemnitz, 2009.
- [34] A. Tiziani, P. Ferro, R. Cervo y M. Durante, «Effects of different welding technologies on metallurgical and mechanical properties of DP600 steel welded joints,» *La Metallurgia Italiana*, nº 1, pp. 27-34, 2011.
- [35] L. Martínez Gómez, *Acero*, Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica, 2009.
- [36] P. N. Rao, *Manufacturing Technology Vol-i 3e*, Nueva Delhi: Tata McGraw-Hill Education, 2012.
- [37] H. Lorusso, A. Burgueño y H. G. Svoboda, «Propiedades mecánicas y caracterización microestructural de diferentes aceros Dual-Phase,» *Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales - CONAMET/SAM*, vol. 8, pp. 282-285, 2008.
- [38] A. J. Criado Martín, L. García, M. Cartón, A. Criado Portal, C. Dietz y J. A. Martínez, «Morfología de la cementita en aceros arqueológicos que han sufrido incendio,» *Revista de Metalurgia*, vol. 49, nº 4, pp. 257-265, 2013.
- [39] B. González Palma, J. C. Suárez Bermejo, F. J. Vicario y A. Muñoz, «Procesos metalúrgicos de aceros microaleados de alta resistencia 450 EMZ tipo II en la zona afectada térmicamente debido al efecto multipasada en soldaduras por arco sumergido,» *Revista de Metalurgia*, vol. 42, nº 4, pp. 256-269, 2006.
- [40] C. Fang, *Annealing and precipitation behavior during batch annealing of HSLA steels*, University of Pittsburgh, 2011.
- [41] J. Bian y H. Mohrbacher, «Novel alloying design for press hardening steels with better crash performance,» *International Symposium: New Development in AHSS*, pp. 251-263, 2013.
- [42] P. Hu, N. Ma, L.-z. Liu y Y.-g. Zhu, *Theories, Methods and Numerical Technology of Sheet Metal Cold and Hot Forming: Analysis, Simulation and*

- Engineering Applications, Londres: Springer-Verlag London, 2013.
- [43] D. N. Hanlon y S. M. C. Van Bohemen, «Steel for Hot Forming». Estados Unidos de América Patente 20150079420, 19 Marzo 2015.
- [44] H. Mohrbacher, «Martensitic automotive steel sheet - Fundamentals and metallurgical: Optimization Strategies,» *Advanced Materials Research*, vol. 1063, pp. 130-142, 2014.
- [45] Y. Weng, Ultra-Fine Grained Steels, Beijing: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [46] O. Blodgett, «Welding design and fabrication,» 21 Marzo 2006. [En línea]. Available: <http://weldingdesign.com/archive/understanding-bend-tests>. [Último acceso: 18 Abril 2016].
- [47] J. W. Giachino y W. Weeks, *Welding Skills and Practices*, Chicago: American Technical Soc., 1976.
- [48] Berthold Kessler, Precitec KG (Alemania), «Interempresas,» 05 Diciembre 2007. [En línea]. Available: <http://www.interempresas.net/Medicion/Articulos/19456-Control-de-calidad-en-linea-en-la-soldadura-laser-de-alta-potencia.html>. [Último acceso: 07 Marzo 2016].

Resumen autobiográfico

Candidata al Grado de Maestra en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con
especialidad en Materiales

Tesis: Estudio experimental de la soldadura por haz de electrones para aceros
con aplicaciones automotrices

La Ing. Adriana Sthefania Rodriguez Liñan cursó sus estudios de licenciatura en la Facultad de Ingeniería Mecánica y eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León y obtuvo el grado de Ingeniera en Mecatrónica en el 2013. Ese mismo año inicia la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales y en agosto de 2014 comienza a trabajar en el área de investigación en procesos avanzados de soldadura por fusión.