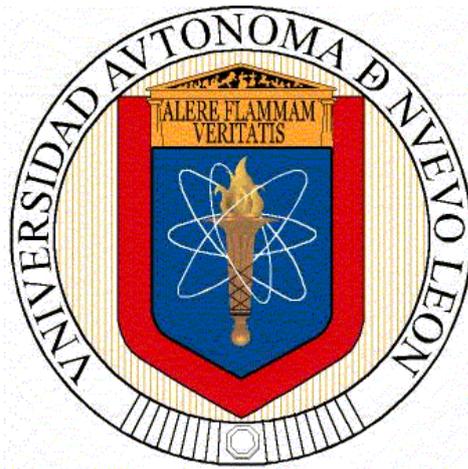


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS Y MODELACIÓN
MATEMÁTICA DEL PROCESO DE SOLDADURA POR
LÁSER DE DISCO DE DIODOS YB:YAG, APLICADO
EN ACEROS AVANZADOS AHSS**

POR

Francisco Cepeda Rodríguez

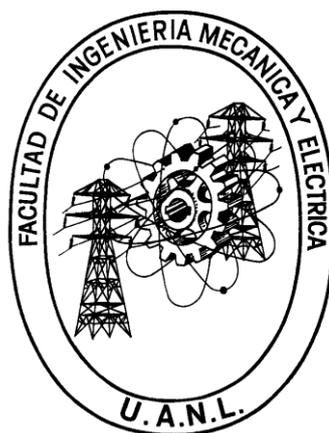
TESIS

En opción para obtener el Grado de Doctorado en
Ingeniería de Materiales

CIUDAD UNIVERSITARIA

Enero, 2015

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



**OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS Y MODELACIÓN
MATEMÁTICA DEL PROCESO DE SOLDADURA POR
LÁSER DE DISCO DE DIODOS YB:YAG, APLICADO
EN ACEROS AVANZADOS AHSS**

POR

Francisco Cepeda Rodríguez

TESIS

En opción para obtener el Grado de Doctorado en
Ingeniería de Materiales

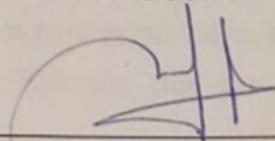
CIUDAD UNIVERSITARIA

Enero, 2015

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

Los miembros del comité tutorial recomendamos que la tesis "Optimización de parámetros y modelación matemática del proceso de soldadura por láser de disco de diodos Yb:YAG, aplicado en aceros avanzados AHSS" realizada por el M.C. Francisco Cepeda Rodríguez con número de matrícula 1541909 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Doctor en Ingeniería de Materiales.

El Comité de Tesis

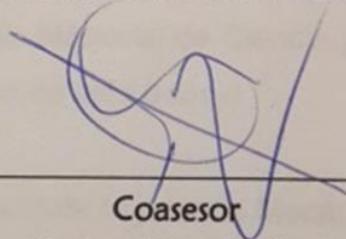


Asesor

Dr. Marco Antonio Loudovic Hernández Rodríguez

Coasesor

Dr. Arturo Juárez Hernández

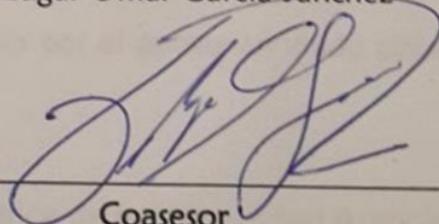


Coasesor

Dr. Juan Carlos Ortiz Cuellar

Coasesor

Dr. Edgar Omar García Sánchez



Coasesor

Dr. Felipe de Jesús García Vázquez

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez

San Nicolás de los Garza, N. L., Enero de 2015

DEDICATORIA

A MI HIJOS FRANCISCO Y CELIA

A MI ESPOSA CELIA

A MIS PADRES FRANCISCO Y YOLANDA

A MIS HERMANOS JOSE EDUARDO, JULIA Y YOLANDA

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor académico, el Dr. Marco Antonio Loudovic Hernández Rodríguez, por su paciencia, amistad y orientación invaluable a través del desarrollo de esta tesis.

A mi padre, el Dr. Francisco Cepeda Tijerina, por el gran apoyo moral y científico brindado durante este proyecto de tesis.

A mi familia, principalmente a mi esposa Celia, a mis hijos Francisco y Celia. Así mismo a mi madre Yolanda por su gran apoyo, motivación y consideración.

A los miembros del comité revisor de este trabajo, el Dr. Juan Carlos Ortiz Cuellar, el Dr. Arturo Juárez Hernández, el Dr. Edgar Omar García Sánchez y el Dr. Felipe de Jesús García Vázquez, por tomarse el tiempo para hacer aportaciones y revisar este proyecto de Tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León por brindarme la oportunidad de realizar los estudios de doctorado.

A la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V.

A la empresas Magna Mecanismos S.A. de C.V. y MAGNA CIMS S.A. de C.V. por el apoyo durante el proceso experimental.

A la Universidad de Texas A&M en College Station, principalmente al Dr. Jyhwen Wang y su equipo de estudiantes de posgrado, por el soporte teórico y práctico para esta tesis doctoral.

A los profesores del DIMAT: Dr. Rafael Colas Ortiz, Dr. Alberto Pérez Unzueta, y la Dra. Martha Guerrero, por sus enseñanzas y consejos durante mi estancia en el doctorado.

A mis compañeros de la Dirección de Tránsito de Tecnología de COMIMSA; al Dr. Alejandro Garza, al M.C. Daniel Aguilar Cortez, al M.C. Fernando Macías López, y a los Ingenieros Pablo Rodarte y Eduardo Valdez, por sus conocimientos, experiencias y apoyo para la realización de este trabajo.

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
RESUMEN.....	XI
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
2.1. Análisis de la problemática.....	4
2.2. Justificación.....	7
2.3. Objetivo.....	11
2.4. Hipótesis.....	13
2.5. Metodología.....	14
CAPITULO 2. ANTECEDENTES.....	15
2.1. Historia de la tecnología láser.....	16
2.2. Principios de funcionamiento.....	20
2.3. Tipos de láser.....	24
2.4. Efecto de las variables del proceso.....	39
2.5. Estado del arte en modelación del proceso de soldadura láser	58
CAPITULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	62
3.1. Planteamiento de un modelo matemático.....	62
3.2. Caso de estudio uno.....	71
3.2.1. <u>Materiales y métodos</u>	72
3.2.2. <u>Desarrollo experimental</u>	78
3.3. Caso de estudio dos.....	81
3.3.1. <u>Materiales y métodos</u>	82

3.3.2. <u>Desarrollo experimental</u>	89
CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	94
4.1. Resultados y discusión: Caso de estudio uno.....	95
4.1.1. <u>Características físicas de las muestras de Soldadura</u>	95
4.1.2. <u>Optimización de Parámetros</u>	105
4.1.3. <u>Validación del modelo matemático</u>	115
4.2. Resultados y discusión: Caso de estudio dos.....	121
4.2.1 <u>Características físicas de las muestras de Soldadura</u>	121
4.2.2 <u>Optimización de Parámetros</u>	132
4.2.3 <u>Validación del modelo matemático</u>	140
CAPITULO 5. CONCLUSIONES	143
BIBLIOGRAFÍA	145
LISTA DE FIGURAS.....	154
LISTA DE TABLAS.....	161
ANEXOS	
A1 Clasificación de procesos de soldadura por AWS	
A2 Caso de estudio uno: Programa de soldadura láser	
A3 Caso de estudio dos: Programa de soldadura láser	
A4 Caso de estudio dos: Programa del robot para la subrutina para la fuente de soldadura láser	
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO	

RESUMEN

La aplicación del uso de la tecnología láser para la unión de materiales se ha incrementado sustancialmente en la industria metal-mecánica, esto se atribuye principalmente a las diferentes ventajas que tiene este proceso sobre los procesos de soldadura convencionales, como son la reducción en el costo de procesamiento, aumento de la productividad, incremento de la calidad del producto, la reducción de las zonas afectadas por el calor, la reducción de la distorsión en la piezas soldadas y además la versatilidad que representa la soldadura láser por ser un proceso sin contacto. No obstante el uso del láser para la unión de materiales en México se considera todavía una tecnología emergente, son muy pocas las industrias que han migrado de los procesos de soldadura convencionales al proceso de unión de materiales por rayo láser. Una de las industrias que ha empezado a utilizar el proceso de soldadura por láser en México, es la automotriz, en la cual constantemente se está buscando evitar un rezago tecnológico en los procesos de conformado y soldadura de piezas metálicas. Sin embargo en la actualidad, en la industria automotriz mexicana existe una gran dependencia de expertos de otros países para la supervisión, atención y el control de los procesos avanzados, como lo es el de la soldadura láser.

En este trabajo, para lograr una mayor comprensión del proceso y del efecto de sus variables, se propuso aplicar una metodología de optimización en dos casos de estudio, en los cuales se utilizó una configuración de unión de soldadura a traslape con el modo de soldadura de ojo de cerradura o penetración completa, que es más bien conocida como "Keyhole welding":

1. En el primero de ellos se desarrolló un análisis al proceso de soldadura utilizando un láser continuo de 6600 watts y un cabezal de tres dimensiones con un sistema de óptica de enfoque programable montado a un eje de coordenadas de control en dos dimensiones. La aplicación de la soldadura se realizó en un acero AHSS DP 600 DL.

2. En el segundo caso de estudio se utilizó un láser de 8000 watts, un robot de ocho ejes y un cabezal de dos dimensiones con un sistema de óptica de enfoque programable montado en el robot. La aplicación de la soldadura se realizó en un acero AHSS DP 980.

Los parámetros estudiados para el primer caso de estudio fueron, la potencia de soldadura y la distancia focal del rayo, y para el segundo caso la potencia y la velocidad de soldadura.

Un total de 14 muestras fueron desarrolladas y analizadas en el primer caso de estudio, y en los resultados se encontró que tanto la potencia como la distancia focal tienen un gran efecto en el grado de densidad de potencia y por consecuencia en la penetración de la unión de soldadura, sin embargo también se encontró que en el ancho de la zona de fusión es la distancia focal la que tiene mayor repercusión. Así mismo con la optimización de ambos parámetros utilizando una potencia de 6600 watts, una distancia focal de 6.3 milímetros y por lo tanto una densidad de potencia de 22,200 watts, se logró obtener una muestra de soldadura que cumple con las características y requerimientos que demandan los criterios de aceptación de uniones de soldadura por rayo láser para la industria automotriz.

En el caso de estudio dos se encontró que la penetración y el ancho de la zona de fusión están en función de la velocidad y la potencia, ya que estos parámetros repercuten en forma directa con el calor entrada de la soldadura y el tiempo que va estar expuesta la zona de soldadura a el rayo láser. En este caso de estudio se logró una optimización de los parámetros utilizando una potencia de 7957.74 watts y una velocidad de soldadura de 58.61 mm/seg, que dieron como resultado un calor de entrada de 141.75 J/mm. Para la optimización se buscó obtener una muestra de soldadura que cumpliera con los criterios de aceptación de uniones de soldadura por rayo láser para la industria automotriz, y a su vez tuviera el máximo de velocidad, esto con la finalidad de optimizar y disminuir el tiempo de ciclo de soldadura. Además se encontró que la muestra óptima tenía un comportamiento en el perfil de microdureza con mayor grado de uniformidad que el mostrado por soldaduras convencionales en este tipo de materiales.

Es importante destacar que para ambos casos de estudio se desarrollaron modelos estadísticos de optimización con índices acertados de predicción para la penetración de soldadura y el ancho de la zona de fusión de la soldadura en la zona de traslape.

Así mismo mediante un análisis bibliográfico se planteó un modelo matemático para la predicción de las características físicas de la unión de soldadura, con el cual se lograron predicciones acertadas para las características físicas de una unión de soldadura por láser.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Con el surgimiento de la globalización, la competencia industrial ha crecido considerablemente, ahora todas las empresas manufactureras no sólo tienen que disminuir el tiempo de desarrollo del producto y los costos de fabricación, sino también aplicar y desarrollar nuevas tecnologías para sus procesos.

Una de las industrias de mayor importancia en el mundo es la automotriz, en general, se calcula que el valor de la producción de esta industria equivale a una sexta economía mundial [1]. En el año 2012 la producción de automotores a nivel mundial superó los 84 millones de vehículos incluyendo furgonetas, camiones y autobuses. En forma directa, el sector ocupó a alrededor de 9 millones de trabajadores y generó 50 millones de puestos de trabajo incluyendo los indirectos [1].

En México una de las industrias más importantes y con mayor grado de globalización es la automotriz [2], actualmente son diez los países que sobresalen en la producción de automóviles: Japón, Estados Unidos, China, Alemania, Corea, Francia, España, Brasil, Canadá y México. En ese momento, el más fuerte es Japón, con una producción de 12 millones de automóviles al año, en tanto que México, con una producción de 2 millones se ubica en el número diez de los países productores [3]. Así mismo en México la manufactura de componentes automotrices ha crecido como ninguna otra rama industrial en

los últimos años y ha generado relaciones dinámicas con países productores que le disputan a Estados Unidos la primacía en el liderazgo mundial o la conquista de los nuevos mercados de consumo de estos productos [2].

La reestructuración de la industria automotriz en México, es vista como el mayor caso de éxito en la industria manufacturera a nivel mundial; a mediados de los años setenta la industria automotriz en México se caracterizaba por maquinaria obsoleta y además era incapaz de competir en el mercado internacional, sin embargo hoy por hoy las empresas transnacionales automotrices en México cumplen con los más altos estándares de calidad y eficiencia utilizados para esta industria.

Aunado a esto, actualmente es una ventaja que las empresas automovilísticas de clase mundial opten por establecerse en países en desarrollo, como lo son China, Brasil y México [4, 5]. En estos países existe un bajo costo de mano de obra, en comparación con los países de primer mundo, sin embargo los sistemas de calidad para la manufactura que se aplican en la industria automotriz, exigen un grado alto de especialización en sus procesos.

Uno de las herramientas que ha logrado una extensa aceptación en la industria automotriz es el láser, en la actualidad, es muy común que en esta industria, se utilice algún tipo de procesamiento por láser en sus procesos de producción, como lo es el corte, la soldadura, el marcado, el endurecimiento, o algún tratamiento de superficie [6-10]. En esta industria el uso del láser se ha generalizado, por lo que los diseñadores necesitan familiarizarse no sólo con las propiedades, ventajas y aplicabilidad del proceso, sino también con la forma de diseñar componentes y ensamblajes que puedan ser procesados por láser con éxito.

El proceso de soldadura por láser ha sustituido en gran medida a los procesos convencionales de soldadura, como lo son los procesos de soldadura arco y por resistencia [11-14]. No obstante en México la unión de materiales mediante soldadura por rayo láser se podría considerar como una tecnología

emergente, debido a que son pocas las empresas que están incursionando en este proceso, la mayoría aun utiliza procesos convencionales, a pesar de las desventajas que van aunadas a utilizar este de tipo de procesos de soldadura.

En si el proceso de soldadura láser contiene un sin número de ventajas [15-17]. Algunas de estas ventajas son:

- Es un proceso sin contacto con las piezas que se desean soldar, por lo tanto no se requieren electrodos, y las uniones quedan libres de contaminación por el contacto con los electrodos. Así mismo no hay desgaste en herramientas por contacto.
- El proceso de soldadura láser ofrece más precisión y menor distorsión que los procesos convencionales.
- Alta velocidad de procesamiento.
- Por la alta densidad de potencia concentrada, las zonas afectadas por el calor en los materiales son mínimas.
- El proceso de soldadura láser es fácil de automatizar, por lo que se pueden lograr altas velocidad de procesamiento y disminuir los tiempos ciclo de manufactura.
- A pesar de que la inversión en el equipo láser es alta, esta se puede recuperar a corto plazo, ya que el gasto de consumo de energía es menor al de otros procesos, como son el de soldadura por arco y de proyección o de soldadura por resistencia.

Sin embargo es un proceso que requiere un control exhaustivo en sus variables. Son muchos los parámetros que deben ser controlados para la obtención de una unión de soldadura que tenga las propiedades físicas y mecánicas adecuadas para su aplicación [18-20]. En recientes estudios se ha

encontrado que con la implementación de herramientas estadísticas y matemáticas, acompañadas de un apropiado desarrollo experimental, se puede llegar a entender el efecto que tienen los parámetros y variables del proceso, en el comportamiento de las propiedades térmicas, mecánicas y microestructurales de la unión de soldadura láser [21-24]. Además se sabe que existe una correlación significativa entre las propiedades mecánicas de un material y las propiedades microestructurales.

1.1. Análisis de la problemática

En la actualidad, es común que los fabricantes de automóviles utilicen algún tipo de aplicación láser en sus líneas de producción, estos procesos abarcan el corte, la soldadura, el marcado, el endurecimiento, o algún tratamiento de superficie.

Sin embargo en México la tecnología de láser aplicada a los materiales se puede considerar como emergente, ya que en este momento tiene pocas aplicaciones industriales, hay un déficit de especialistas en este proceso y son muy pocos los trabajos e investigaciones en este tema. Debido al déficit de especialistas láser, actualmente hay una gran dependencia por expertos de otros países para el análisis, control y diseño del producto para esta tecnología.

Así mismo globalmente existe una fuerte demanda, por parte de la comunidad científica y tecnológica, de conocimientos e innovación de los procesos físicos característicos de la interacción láser-materia en las aplicaciones industriales de los láseres de alta potencia, particularmente en el proceso de soldadura de materiales avanzados aplicado en la industria automotriz [25]. El motivo de esta demanda reside en la interpretación particular

de los diferentes efectos producidos por la interacción de los parámetros implicados y la optimización de este proceso.

En la década anterior más de 200 equipos de soldadura y corte por láser fueron instalados anualmente en aplicaciones industriales, cada uno con un costo mayor a 500 mil dólares [26], hoy en día el número estimado de equipos instalados por año podría haberse triplicado.

En años anteriores, en las uniones de soldadura por láser a traslape, se buscaba que durante el proceso de unión de materiales se lograra una penetración completa de soldadura en los componentes unidos, esto obligaba al ingeniero de soldadura láser a utilizar la velocidad de soldadura correspondiente para lograr dicha característica. Sin embargo hoy en día la creciente competencia en la industria automotriz ha forzado a las empresas a disminuir los tiempos ciclo de manufactura y a optimizar la inversión en los equipos de producción de los componentes; si esta necesidad la traducimos a una aplicación de soldadura láser, en el proceso se deberán optimizar las características físicas de la zona de soldadura (Ancho y penetración de soldadura (ver Figura 1.1)), para así lograr soldar a mayores velocidades.

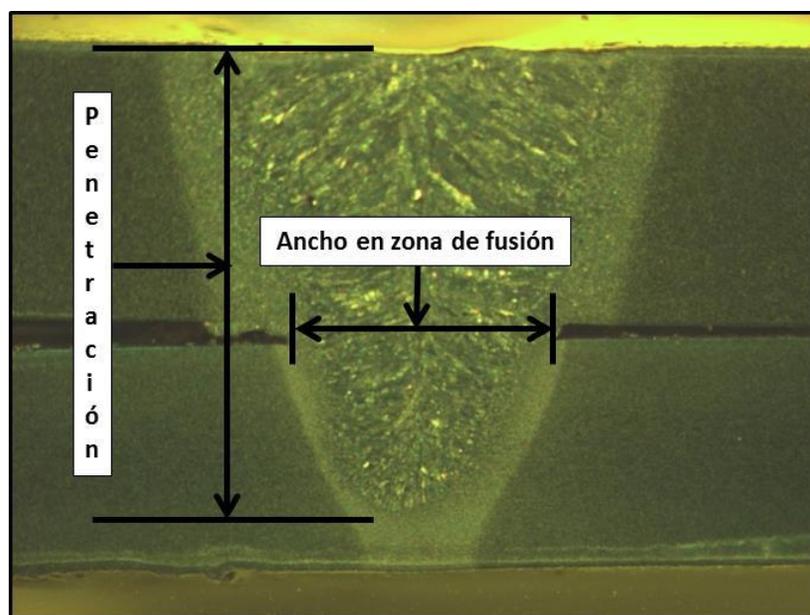


Figura 1.1. Características físicas de la zona de soldadura en uniones a traslape

En la figura anterior se muestran las características físicas en una unión de soldadura láser a traslape, se observa la penetración de soldadura y el ancho en la zona de fusión; como se puede observar el ancho se mide en la zona de fusión y no en la superficie, debido a que la integridad estructural de la unión está en función del ancho de soldadura en la zona de fusión que es donde se unen ambos componentes.

En un proceso de soldadura láser son muchas las variables y los parámetros que afectan el resultado mecánico, térmico y microestructural de la unión de soldadura. La complejidad de este proceso ha causado que en la actualidad los científicos y tecnólogos que están involucrados con este proceso, recurran a diferentes herramientas, como lo son las estadísticas, la de simulación por elementos finitos y la de modelación matemática, esto principalmente enfocado para el análisis y entendimiento de la influencia de los parámetros y variables que posee esta tecnología

Para estudiar y optimizar un proceso tan complejo, como lo es el procesamiento de materiales con láser, se requiere un amplio conocimiento de los parámetros y las variables que influyen en las características y calidad de la unión de soldadura. Se ha encontrado en la literatura que se puede facilitar el estudio del proceso utilizando herramientas estadísticas y matemáticas acompañadas de un análisis experimental [21-24].

Por lo tanto en este trabajo se planea desarrollar una metodología que empleara un modelo de optimización estadístico y un modelo matemático para la predicción y análisis de las características de la zona de fusión de la soldadura, buscando utilizar el máximo de velocidad de soldadura y potencia del equipo, y así mismo logrando el ancho y la penetración de soldadura requerida para cumplir con el estándar de criterios de aceptación aplicados a uniones de soldadura láser.

Conjuntamente en este trabajo se pretende definir, para los dos casos de estudio presentados, los parámetros óptimos de soldadura mediante el uso de

herramientas o sistemas de predicción basados en estadística y en modelación matemática, en ambientes de soldadura con estricto control de variables para aplicaciones industriales.

Los dos casos de estudio de soldadura láser continúa analizados en este trabajo son:

1. Soldadura laser por Keyhole en uniones a traslape utilizando un equipo de soldadura con una fuente láser de 6.6Kw con un cabezal de tres dimensiones con óptica de enfoque programable (PFO “Programable Focusing Optics”) montado en sistema de coordenadas con control numérico CNC.
2. Soldadura laser por Keyhole en uniones a traslape utilizando un equipo de soldadura con una fuente láser de 8Kw y un PFO de dos dimensiones montado en un robot.

1.2. Justificación

La aplicación del proceso de soldadura láser en la industria automotriz se ha intensificado en los últimos años, una de las causas es que son muchas las industrias armadoras de automóviles que están buscando que sus proveedores de componentes automotrices migren sus aplicaciones de procesos convencionales de soldadura a procesos avanzados (ver Figura 1.2).

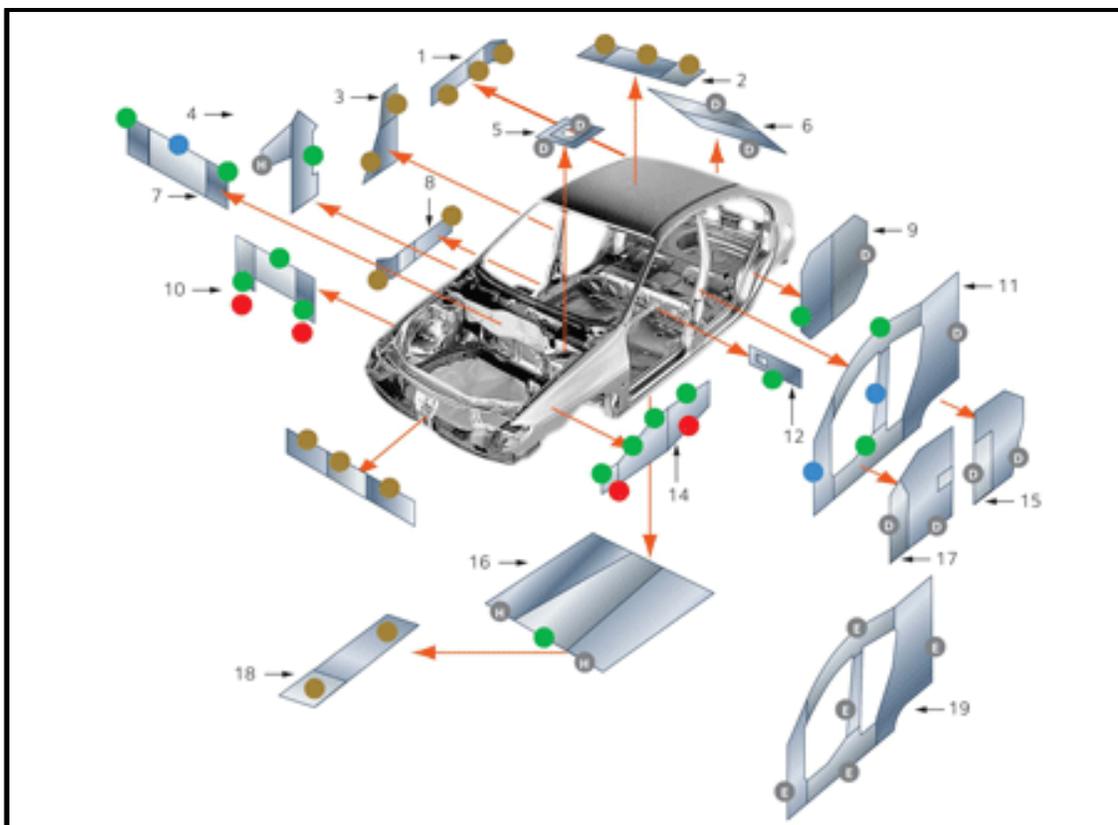


Figura 1.2. Aplicaciones de soldadura láser en el automóvil [27]

La migración de los proceso de soldadura convencional al proceso de soldadura por rayo láser se ha dado principalmente al creciente uso de materiales de alta resistencia, como lo son los aceros avanzados, que al ser unidos por procesos convencionales de soldadura son disímiles y además existe una complejidad alta para soldarlos [28]. A diferencia de los procesos convencionales, con el proceso de soldadura láser pueden unirse aceros avanzados de alta resistencia (AHSS), sin comprometer o degradar la resistencia mecánica en la soldadura o en la zona afectad por el calor.

La ventaja de utilizar aceros AHSS es que tienen mayor resistencia mecánica, lo que permiten al diseñador disminuir el calibre de los materiales utilizados en la fabricación de los componentes y así disminuir el peso del automóvil.

Así mismo el proceso de soldadura láser es muy atractivo ya que dentro de sus características esta la alta eficiencia y repetitividad que tiene, además que debido a la alta densidad de potencia que se puede lograr en este proceso, es posible lograr mayor penetración de soldadura a altas velocidades a comparación con los procesos de arco (15-17).

En México existe una necesidad de expertos e investigaciones en este proceso, ya que las tendencias indican que cada vez será más común el uso de esta tecnología en los procesos de manufactura de piezas automotrices [26], y México es uno de los mayores fabricantes de piezas automotrices en el mundo [29].

Una de las principales pretensiones en las empresas automotrices es la disminución de los tiempos ciclo de fabricación de sus productos, en el proceso de soldadura láser esto se puede lograr con la optimización de la penetración de soldadura utilizando el máximo de velocidad de barrido del rayo láser. Cabe mencionar que para definir la penetración de soldadura óptima es necesario realizar un estudio con las pruebas mecánicas correspondientes al estándar automotriz que se aplica para los componentes soldados, utilizando como variable las penetraciones de soldadura.

Igualmente en algunas aplicaciones de soldadura en esta industria, es necesario restringir la penetración de soldadura en los componentes unidos, ya que la perforación de la soldadura podría perjudicar el funcionamiento del componente o mecanismo del automóvil.

Lo que se menciona anteriormente se ilustra en la siguiente figura, en este caso se muestra una aplicación de soldadura láser en mecanismos de asientos automotrices.

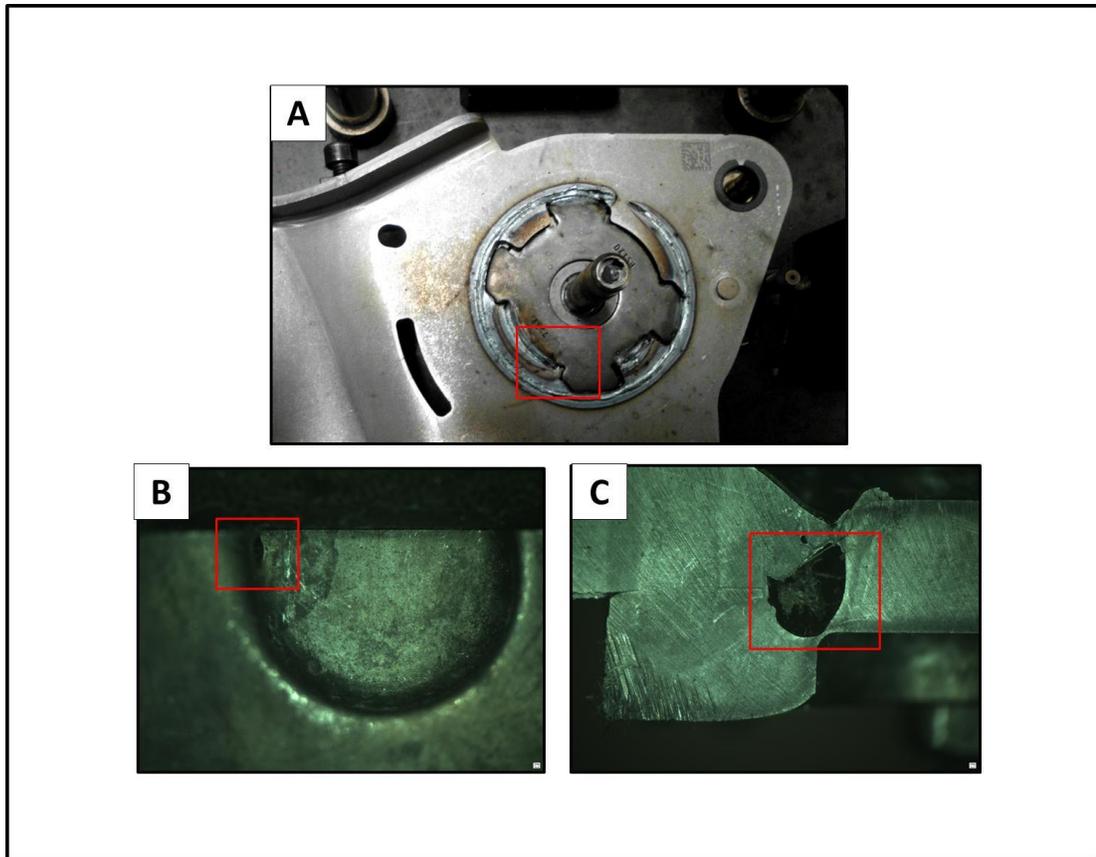


Figura 1.3. Defecto de exceso de penetración en soldadura. A) Aspecto del mecanismo del asiento automotriz, B) Defecto en el interior del disco del mecanismo, y C) corte trasversal en la soldadura

En la figura anterior se observa una soldadura laser de un mecanismo utilizado en los asientos de los automóviles. En este proceso se une un bracket y un disco con soldadura a traslape y a tope (Figura 1.3A). En la soldadura tope se puede observar que la penetración perforo el interior del disco (Figura 1.3B), además se observa en el corte trasversal de la soldadura (Figura 1.3C) que el perforamiento del disco causo la entrada de gases al interior de la soldadura provocado porosidad interna y disminuyendo la zona de fusión y por ende la resistencia de la unión. Así mismo el exceso de penetración o perforamiento en esta aplicación provoca daños internos en el disco por distorsiones y salpicaduras de material fundido en los componentes internos, esto disminuye considerablemente las posibilidades de producir un mecanismo funcional, ya

que en muchos casos se da atoramiento o deslizamiento del disco durante las pruebas para la liberación del componente.

Además estudiar este proceso utilizando solamente un desarrollo experimental en campo es muy complicado, las mediciones in situ cerca de la zona de soldadura o zona de interacción entre el láser y el material son casi imposibles de realizar debido a la naturaleza de la soldadura por láser. Por consiguiente, el modelado constituye la única manera eficaz de obtener la información necesaria para predecir morfologías y características físicas en una técnica de procesamiento de materiales con láser.

En este trabajo se pretende desarrollar una metodología de optimización que emplee herramientas estadísticas y matemáticas para la predicción y el control de la penetración y el ancho de uniones de soldadura por láser. Para lograr esto se planteara un diseño experimental para dos casos de estudio, y en el análisis de resultados se buscara formular un modelo estadístico para la optimización de la penetración y ancho en la zona de fusión de la soldadura. Además con un estudio bibliográfico de la interacción laser-materia, durante el proceso de soldadura láser, se propondrá un modelo matemático que tendrá el mismo propósito, que es la optimización del proceso.

1.3. Objetivos

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de una metodología que se valga de herramientas matemáticas y estadísticas para la optimización de un proceso de soldadura láser en aplicaciones de unión de materiales avanzados AHSS utilizados en componentes de la industria automotriz. Así mismo se pretende que la metodología sea capaz de desarrollar herramientas que sean aptas para encontrar los parámetros óptimos en aplicaciones industriales, utilizando diferentes configuraciones en la integración de los equipos, y buscando la

optimización de distintos parámetros según sea conveniente para cada aplicación.

Para alcanzar este objetivo se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Elaborar un estudio del estado del arte en el proceso de soldadura láser aplicado en la industria automotriz.
- Proponer una metodología de optimización para los parámetros del proceso de soldadura láser.
- Analizar el efecto de las variables del proceso en las características físicas de la unión de soldadura.
- Encontrar los elementos para la propuesta de un modelo matemático para la predicción de las características fundamentales de la unión de soldadura.
- Integrar una celda de soldadura láser robotizada para el estudio de uniones de soldadura láser a traslape en modo de soldadura Keyhole.
- Desarrollar un ambiente de estricto control de variables externas para el desarrollo de pruebas experimentales por soldadura láser en modo de soldadura por Keyhole.
- Desarrollar el planteamiento experimental para dos casos de estudio por soldadura láser en modo por Keyhole en materiales utilizados en componentes automotrices.
- Desarrollar y validar un modelo matemático y uno estadístico, que sean capaces de realizar predicciones de las características físicas de uniones de soldadura láser aplicadas en componentes automotrices.

- Obtener los parámetros óptimos con los que se obtengan uniones de soldadura que cumplan con los criterios de aceptación de la especificación de soldadura láser para la unión de componentes automotrices.
- Realizar un análisis para la evacuación de la soldabilidad de aceros AHSS mediante el proceso de soldadura láser.

1.4. Hipótesis

En este trabajo se proponen las siguientes hipótesis:

1. Con el uso de una metodología que contemple el desarrollo de una modelación matemática y una estadística, acompañada de un apropiado desarrollo experimental, es posible optimizar un proceso de unión por soldadura láser para aplicaciones en aceros AHSS en aplicaciones de ensamble de componentes automotrices.
2. Con un estudio bibliográfico, y partiendo de la ecuación general de calor, es posible desarrollar un modelo matemático que pueda ser aplicado a el proceso de soldadura láser de aceros AHSS, que sea capaz de realizar predicciones acertadas de las características físicas de la unión de soldadura.
3. El proceso de soldadura láser ofrece un mayor el grado de soldabilidad en la unión de aceros AHSS de doble fase, ya que la degeneración de las propiedades mecánicas y la pérdida del arreglo microestructural de las fases en la zona de soldadura y la zona afectada térmicamente es menor que con procesos convencionales de soldadura.

1.5. Propuesta metodológica

Para el desarrollo de este trabajo se propone la aplicación de la siguiente metodología:

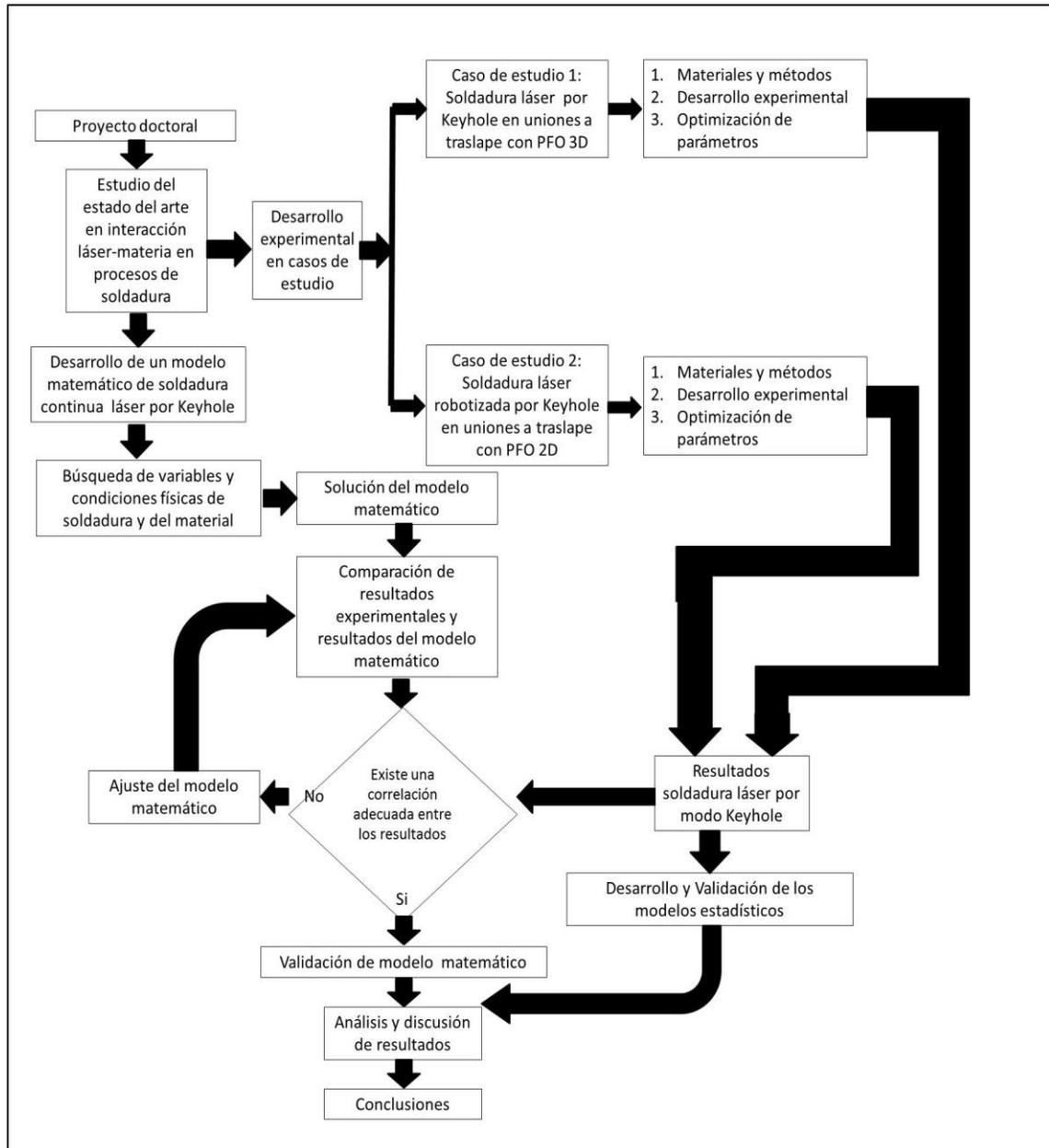


Figura 1.4. Metodología propuesta para este trabajo de investigación

Capítulo 2

ANTECEDENTES

En este capítulo se presenta un estudio del estado del arte de forma detallada, de la interacción del láser y la materia. Este capítulo empieza con una breve exposición de la historia del láser, para posteriormente explicar el funcionamiento de las tecnologías en equipos láser que son usados en la actualidad para el procesamiento de materiales en la industria. Posteriormente se muestra un análisis de las investigaciones y trabajos científicos que en años recientes se están elaborando por empresas, centros de investigación y expertos en el tema. En seguida a esto se realiza un análisis del efecto que tienen los parámetros y las variables del proceso en la microestructura, calidad y en el desempeño mecánico de la unión de soldadura láser, y finalmente se presenta el estado del arte actual de la modelación matemática y numérica de este proceso.

2.1. Historia de la tecnología láser

El comienzo en el desarrollo de la tecnología láser comenzó hace más de 40 años, y ha sido usado en aplicaciones prácticas por más de 25 años.

Es importante comenzar con los conceptos básicos de esta tecnología, como lo es la definición, el término “LÁSER” es un acrónimo de: Amplificación de Luz Mediante la Emisión Estimulada de Radiación (Light Amplificación by the Stimulated Emission of Radiation), la historia del láser se remonta al año de 1916, cuando Albert Einstein estudió y predijo el fenómeno de emisión estimulada en los átomos, según el cual un átomo que recibe luz de la misma longitud de onda de la que puede emitir, es estimulado a emitirla en ese instante [16].

Para comenzar con el estudio del láser es importante comprender que en este proceso se tiene la interacción entre un fotón y un átomo que inicialmente se encuentra en un estado excitado. Como resultado de esta interacción el átomo pasa a su estado base, emitiendo en el proceso un fotón que tiene las mismas características de dirección y de fase que el fotón inicial, cuando esto ocurre decimos que la radiación electromagnética resultante es coherente. La coherencia se define como la propiedad

Es importante destacar que en este proceso está ocurriendo realmente una amplificación de fotones, pues inicialmente tenemos un solo fotón y después del proceso de emisión estimulada tenemos dos fotones. La primera propuesta conocida para la amplificación de la emisión estimulada apareció en una solicitud de patente soviética en el año 1951, presentada por V.A. Fabrikant y dos de sus alumnos. Sin embargo, dicha patente no se publicó hasta 1959 y por consiguiente no afectó a los demás investigadores. En 1953, Joseph Weber, de la Universidad de Maryland, propuso también la amplificación de la emisión estimulada, al año siguiente los rusos Basov y Prokhorov (Figura 2.1), escribieron un artículo explorando a fondo este concepto, lo cual les valió para compartir el Premio Nobel en Física por su trabajo en la electrónica cuántica durante la amplificación de la emisión estimulada [30].



Figura 2.1. Basov y Prokhorov, experimentando con el primer láser [30]

La palabra láser se ha empezado a relacionar con precisión, calidad y velocidad. En estos días existe diferentes aplicaciones para el láser como son en las impresoras de escritorio, que transforman un imagen digital en una impresión permanente de alta calidad, el disco versátil digital (DVD), que brinda una imagen de alta definición y sonido multi-canal, los cuales es posible reproducirlos en casa, el escáner láser utilizado en las cajas de los supermercados, que traslada un código de barras a una unidad que aparece en la cuenta del consumidor y a su vez desaparece del inventario de la tienda, además el láser puede ser utilizado para aclarar la piel, en depilaciones, operaciones de la vista; la lista de aplicaciones del láser sigue creciendo día con día [16, 31].

Es importante mencionar que el primer prototipo de láser fue construido en mayo de 1960 en un laboratorio de investigación en California, además se sabe que muchos de los láseres que existen hoy día fueron inventados a mediados de la década de los sesentas, pero estos se mantuvieron escondidos en laboratorios de investigación y establecimientos militares, no fue hasta finales de esa década que las compañías empezaron con la manufactura de láseres para usos comerciales.

En los años 70, entusiastas (particularmente en la industria automotriz) empezaron a descubrir el potencial que tiene el láser para el procesado de materiales. A partir de este momento las aplicaciones industriales comenzaron a surgir, pero estas se mantuvieron ocultas para el público en general; simplemente solo era una máquina que realizaba una acción de manufactura por lo que esta iba a ser difícilmente dada a conocer al público no relacionado con el ambiente industrial. A principios de la década de los ochentas con la introducción del disco compacto, fue cuando la palabra láser entro en el uso general del vocabulario, con este invento el impacto en la sociedad fue inmediato, fabricantes de láseres, de herramientas y empresas de integración interpretaron la nueva familiaridad con el láser como una oportunidad para lanzar al mercado sistemas flexibles de láser para la industria manufacturera. La venta de productos fabricados con láser floreció a finales de la década de los ochentas tomando satisfactoriamente como imagen la tecnología láser en las campañas de publicidad de los productos. Una nueva tecnología se había desarrollado – Procesamiento láser en la ingeniería de los materiales.

En la actualidad las máquinas con herramientas tradicionales están limitadas a ser destinadas para un propósito en particular: en estos días una gran cantidad de aplicaciones del láser se han desarrollado, en los cuales es obvio que el láser industrial es diferente a las herramientas tradicionales ya que es una herramienta con mucha flexibilidad. El láser se puede enfocar en una pequeño spot lo cual producirá una fuente intensa de energía que es ideal para penetrar los materiales, o bien se puede distribuir en un patrón de calentamiento difuso para el tratamiento de superficies, además de lo antes mencionado el rayo láser puede ser manipulado con componentes ópticos para desarrollar una variedad de operaciones simultáneamente, o ser conmutado entre varias localizaciones para un proceso secuencial [16].

El impacto del procesamiento de materiales en la vida moderna envuelve una amplia gama de láseres, utilizados para ingeniería en los materiales y mecanismos que interfieren en el proceso. Con la tecnología láser se tienen

oportunidades de innovación en el procesado de materiales, entendiendo como innovar como la aplicación de algo nuevo a partir de una idea o proceso que existe y en casos satisfactorios aplicaciones nuevas en nuevos procesos.

Existe una gran cantidad de aplicaciones del láser que día a día se han ido incrementando, esto principalmente se debe a los grandes beneficios y ventajas que presentan las propiedades únicas de la luz producida por los diferentes tipos de láser [17].

Ahora los láseres se consideran son una parte integral tecnológica en una gran variedad de compañías manufactureras, como podemos observar en la siguiente figura, las ventas de equipos láseres industriales se han sextuplicado del año 1994 al año 2003 [32].

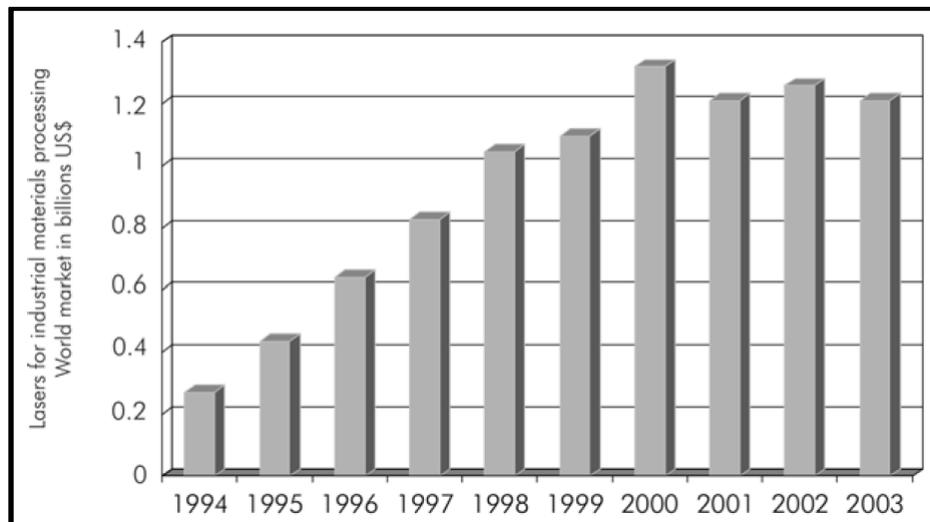


Figura 2.2. Ventas anuales de equipos láser en billones de dólares [32]

A continuación se describe y se explica el funcionamiento de los láseres más utilizados actualmente, enfocándose principalmente en aplicaciones de la industria automotriz.

2.2. Principios de funcionamiento

Un láser es un dispositivo que produce un haz de luz coherente, colimada y concentrada, esto se logra utilizando un mecanismo de bombeo que estimula transiciones electrónicas a niveles de energía más altos en el medio activo (Figura 2.3), cuando los electrones al regresar a su estado base emiten fotones (emisión estimulada), los cuales pasan por un sistema óptico que está compuesto por un resonador, que contiene dos espejos que reflejan y amplifican la luz. Esta luz es guiada por lentes ópticas, los cuales direccionan el láser a un colimador que es el que alinea los fotones, para que después un lente de enfoque concentre esta luz en un área muy pequeña [16,17, 19].

Las transiciones electrónicas y los tipos de emisión se pueden observar en la siguiente figura.

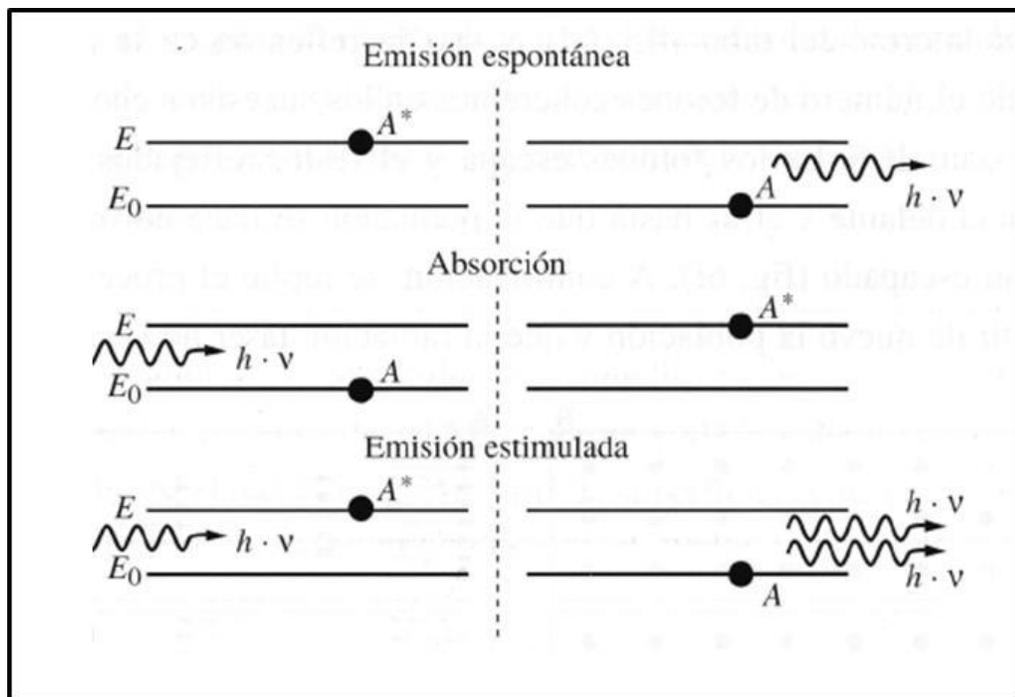


Figura 2.3. Principio de emisión de fotones en el equipo láser [35]

Los equipos de láser realizan una conversión de energía, en la cual se transforma energía de una fuente primaria o mecanismo de bombeo (eléctrica, química, térmica, óptica o nuclear) en un haz de radiación fotonica con una longitud de onda específica (ultravioleta, visible o infrarroja), la longitud de onda en un láser está en función del material utilizado en el medio activo y el mecanismo de bombeo [17].

Los láseres están constituidos principalmente por:

El medio activo

Una de las características importantes es que el medio activo puede encontrarse en cualquier estado de la materia: sólido, líquido, gas o plasma. El medio activo está constituido por un conjunto de moléculas, iones o átomos que pueden excitarse de manera que se crea una situación de inversión de población (ver figura 2.4), que se da cuando hay más átomos (o moléculas) en estados superiores de energía que en estados inferiores, gracias a esto puede obtenerse radiación electromagnética y generarse la luz láser mediante emisión estimulada.

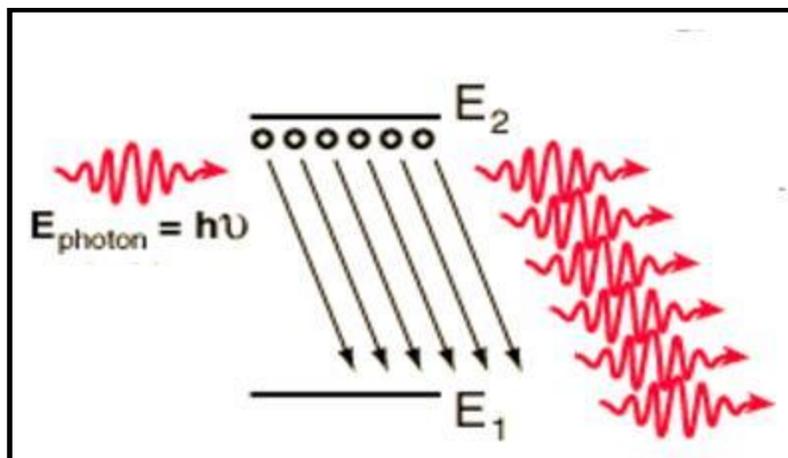


Figura 2.4. Inversión de población en el medio activo [36]

Las características que debe tener la luz láser emitida por el medio activo son la coherencia, que es la propiedad de las ondas electromagnéticas que están en fase tanto en el tiempo como en el espacio, además la luz debe de ser monocromática, es decir debe tener una longitud de onda específica [16], la luz de un láser es la fuente más monocromática conocida por el hombre.

Existen 2 tipos de emisión de fotones:

1. Emisión espontánea

Emisión aleatoria de un fotón por decaimiento de un estado excitado a un nivel de energía más baja, esto genera una radiación monocromática incoherente, la cual es determinada por el tiempo de vida del estado excitado.

2. Emisión estimulada

Radiación coherente estimulada por la absorción de un fotón de un átomo (o molécula) en estado excitado (ver Figura 2.3).

A continuación se describe el funcionamiento de los componentes principales que forman parte de un equipo láser

Mecanismo de bombeo

El mecanismo de bombeo o excitación tiene la función de suministrar constantemente energía (térmica, eléctrica u óptica) en el medio activo del láser. Se utiliza para producir un estado de inversión de población (ver figura 2.4).

Resonador

El resonado está compuesto por los lentes ópticos (o reflectores) que están en los extremos de la cavidad donde se genera láser, que incluyendo el tubo o

barra láser. Los espejos reflejan la luz de un extremo a otro en la cavidad y así se produce la amplificación. Generalmente la radiación está confinada en una cavidad resonante o resonador, formada por dos lentes o espejos: uno total ($r=100\%$, donde r es la reflectividad) y otro parcialmente reflectante (r entre 95% y 99%). El lente parcialmente reflectante solo permite el paso de los fotones coherentes y con la misma dirección. La siguiente figura muestra el mecanismo de bombeo y el resonador en un láser.

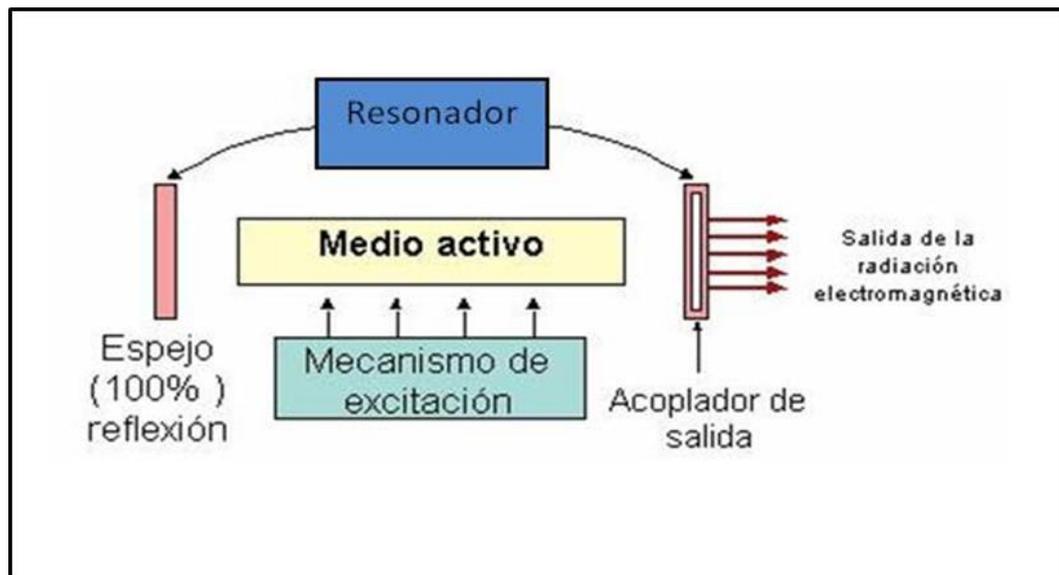


Figura 2.5. Lentes reflectores de un resonador

Colimador

El colimador es el que se encarga de homogeneizar las trayectorias de los rayos fotonicos que son emitidos por el resonador, estos rayos fotonicos salen en una dirección específica mas no homogénea, y el lente colimador se encarga de homogenizar y alinear los fotones hacia el lente de enfoque. En el caso de la soldadura por rayo láser, el rayo láser se dirige mediante elementos ópticos planos, como espejos, y luego se enfoca a un punto pequeño en la pieza de trabajo, esto se logra con el colimador [37].

2.3. Tipos de láser

Han sido muchas las clasificaciones que se les han dado a los tipos de láser, en seguida continuación se citan las formas de clasificar los láseres más usados hoy en día:

Se pueden clasificar los diferentes tipos de láser que por

- Su medio de activación (Gas, líquido y sólido)
- La longitud de onda en que trabajan
- Por la potencia y la energía
- Por el modo de operación (continuo y pulsado)
- Modo interacción del rayo y el material

En la industrial es común que los proveedores de los láseres los clasifiquen por la aplicación que pueden desarrollar, sin embargo generalmente esta clasificación está en función de la potencia, del modo de operación, y del medio de activación del rayo láser.

Además en la clasificación de la Sociedad Americana de Soldadura (AWS por sus siglas en Ingles) la soldadura por haz de láser (LBW) se encuentra dentro de la clasificación de “otros procesos de soldadura, o procesos no convencionales” (ver anexo 1) y define a la soldadura láser como un proceso donde la energía del láser se utiliza para fundir materiales y fusionarlos. Durante la soldadura por fusión, los ciclos térmicos producidos por el movimiento de la fuente de calor causan cambios de estado, transformaciones de fases, esfuerzos térmicos transitorios y movimientos de metal [33].

Actualmente los tres principales proveedores de láseres para la industria automotriz son [34]:

- Rofin (láseres de gas CO₂)
- Trumpf (laser con disco de diodos, de estado sólido Nd:YAG)
- IPG (láser de Fibra óptica Yb:YAG)

Así mismo en la bibliografía se encontró una clasificación de los materiales en función de la densidad de potencia requerida para fundirlos y vaporizarlos utilizando el láser [15,44]. En la siguiente tabla se muestra esta clasificación.

Tabla 2.1. Clasificación de los materiales [15, 44]

Clase	Ejemplos	Densidad de potencia (watts/mm ²)	
		Vaporizar	Fundir
		I	Buenos conductores térmicos: Al, Au, Cu,... Metales refractarios: Mo, Ta, Va, W,...
II	Metales ferrosos: C/S, S/S,... Aleaciones base níquel: Hastaloy, inconel, kovar,... Aleaciones base titanio La mayoría de los óxidos de los metales	>77500	~3100
III	Materiales orgánicos Materiales plásticos: PVC, G-10, acrílicos,... Algunos metales: Cd, S, Sn, Se, Zn, Pb,...	> 775	~7.75

En la tabla anterior se observa claramente que se requiere más densidad de potencia del rayo láser para fundir y evaporar materiales altamente reflectivos y con una conductividad térmica alta, como lo son el aluminio el cobre. Así mismo se observa que los aceros avanzados utilizados en la industria automotriz se encuentran en la clase 2.

A continuación se describen las características más importantes de los láseres que se utilizan comúnmente en la industria para procesos de soldadura. Primero se explica el funcionamiento tomando en cuenta el medio de activación, y después el modo de operación del láser.

Modo de activación del láser

Laser de estado sólido

El medio activo de los láseres de estado sólido Nd:YAG y Yb:YAG es un material sólido de Itrio, Aluminio y granate (YAG) dopado con Neodimio (Nd^{3+}) o Iterbio. El material sólido es un cristal con una estructura de granate, la fórmula química es $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$. Los iones de Neodimio e iterbio toman el espacio de los iones del itrio en la red del granate, ya que estos tienen el mismo tamaño. Los iones de Neodimio e itrio tienen una concentración de alrededor de 1% en el granate, el cual consta de 10^{20} iones por cm^3 . La concentración óptima para el láser continuo es de 0.8% y para láser pulsado es de 1.2% [37]. La principal ventaja del YAG comparado con otros materiales utilizados en los cristales es la buena estabilidad térmica que presenta.

El láser YAG puede ser pulsado o continuo, en este proceso los electrones del elemento dopante son llevados a una energía superior al estar expuestos a

la lámpara de alta intensidad (ver Figura 2.6), el láser surge cuando los electrones excitados regresan a su estado normal de energía.

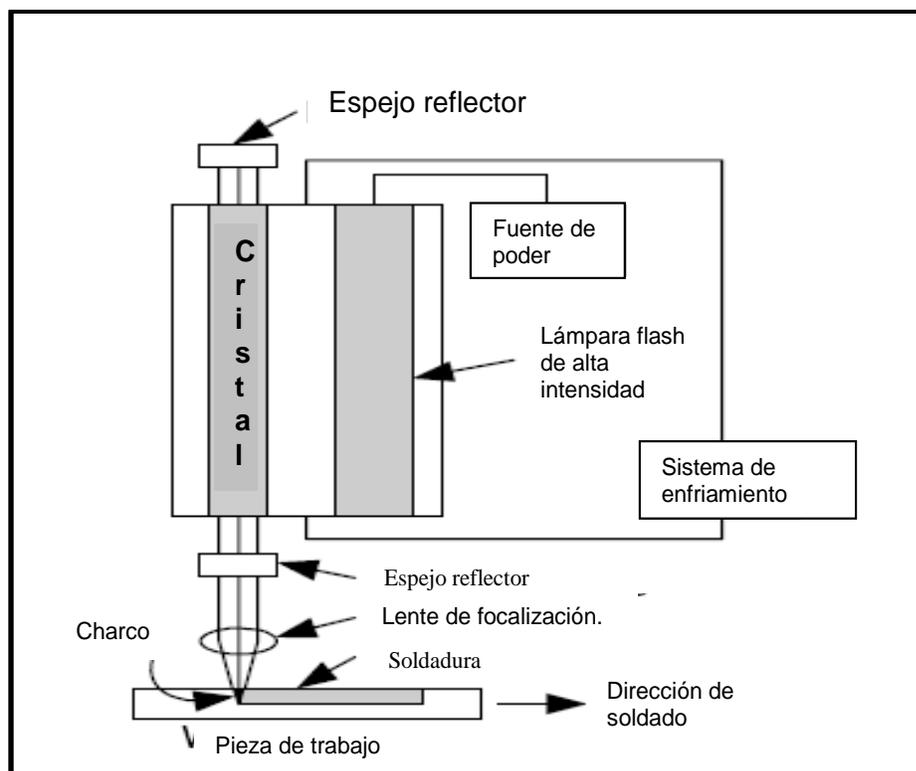


Figura 2.6. Esquema de un láser de estado sólido

En la Figura 2.7 se puede observar como la energía que los electrones absorben de la lámpara eleva sus niveles de energía, y a su vez esta energía se transforma en fotones cuando los electrones regresan a sus orbitas normales. La lámpara de alta intensidad es el medio que provee energía para el cristal que contiene el elemento dopante y así se generen los fotones que darán origen al láser. Por lo general las lámparas de Kriptón son las que se utilizan para el equipo ya que existe menos desperdicio de energía (mayor eficiencia) que utilizando una de Xenón ya que en esta hay muchas pérdidas por la producción de luz blanca [36,37]. Sin embargo en la actualidad es posible utilizar un láser de diodo en el mecanismo de bombeo para incrementar la

eficiencia de conversión de energía entre la fuente primaria y la salida del láser [38]

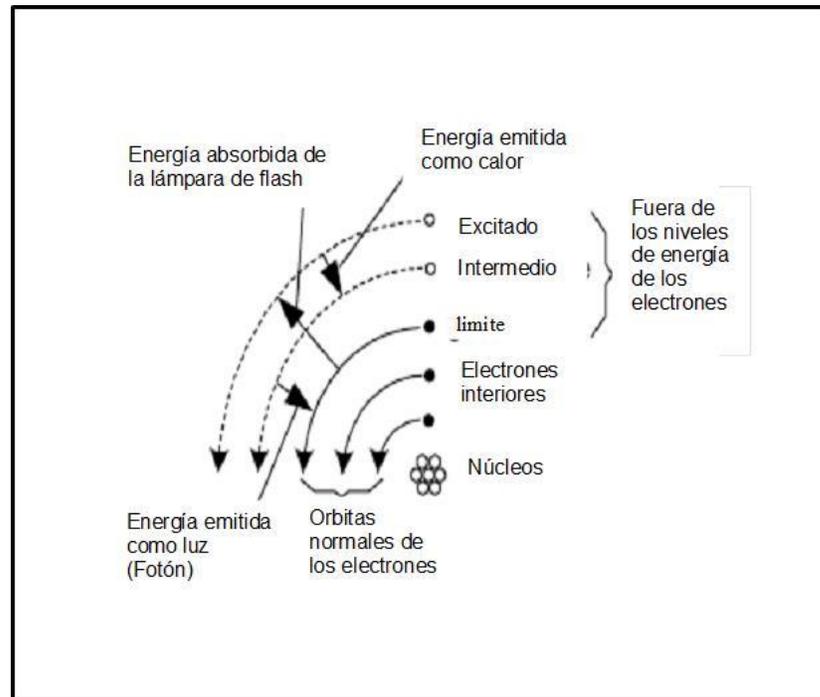


Figura 2.7. Esquema de la emisión estimulada en láser [36]

Láser de gas CO₂

El medio activo de este láser es el gas dióxido de carbono (CO₂). Existen tres diferentes formas de excitación del gas contenido en el medio activo, que son las siguientes [15]:

1. Modo electrónico
2. Modo vibracional
3. Modo rotacional

El láser con mayor aplicación industrial es el que trabaja con excitación del medio activo en el modo electrónico.

Las características principales de los láseres CO₂ son [15]:

- A. Eficiencia = entre el 8% y el 12%.
- B. Salida de potencia de los láseres CO₂ = de 10 a 20000 watts en continuo.
- C. Presión de operación de la cavidad del láser = 1/10 atmosferas.
- D. Temperatura de la cavidad del láser = 140°C.

Principios de funcionamiento

En un láser de CO₂, una mezcla de gases de CO₂, N₂ y He es continuamente excitada constantemente por un mecanismo de bombeo externo. Para la forma de excitación de modo electrónico que es la que más se utiliza actualmente, el gas de dióxido de carbono contenido en el medio activo es excitado por una corriente eléctrica suministrada por electrodos conectados a una fuente de alimentación. La potencia nominal promedio que pueden alcanzar los láseres de CO₂ es de 20kw. La siguiente figura (Figura 2.8) muestra el proceso de soldadura láser CO₂ [15,39].

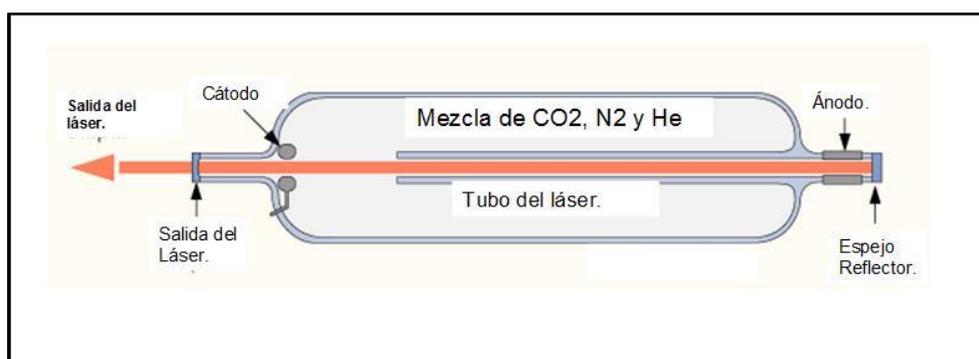


Figura 2.8. Esquema del principio de funcionamiento de láser CO₂

El choque de los electrones en el gas, excita a las moléculas de Nitrógeno que son homonucleares y no pueden perder su energía por emisión de fotones, en cambio las moléculas de dióxido de carbono al colisionar con las de Nitrógeno estas si pueden emitir fotones.

Modo de operación del láser

Soldadura láser continua

En los procesos de láser continuos la penetración está en función de la velocidad transversal de barrido del láser y de la potencia [15]. Una de las principales características del láser continuo es que existen dos modos de soldadura del material, el de conducción y el de Keyhole. Cuando la densidad de potencia es mayor a 10000 Watts/mm^2 en los aceros utilizados industrialmente, como lo son los aceros avanzados en la industria automotriz, comienza el proceso de evaporación del material, y se forma una cavidad en forma de ojo de cerradura, constituida por gases resultantes del proceso de evaporización del material, en esta instancia es cuando se está pasando del modo de conducción al modo por Keyhole [40-43].

Soldadura por Keyhole

En el modo de fusión de Keyhole la densidad de potencia enfocada en el material, es suficiente para iniciar la vaporización. Una estrecha y profunda cavidad de vapor, conocida como Keyhole, por la forma de ojo de cerradura que tiene, es formada gracias a la múltiple reflexión interna del rayo láser. El Keyhole está rodeado de material en estado líquido [43]. Una de las principales

características de este modo de soldadura es que se pueden obtener relaciones penetración:ancho de 10:1 [15].

En los en la soldadura con láser continuo, además de la potencia y velocidad de barrido, un factor muy importante para la obtención de una buena calidad, depende del grado de absorción del láser que se logre. En el modo de Keyhole el grado de absorción depende de que la forma de la cavidad sea adecuada, ya que en ella es donde se dará el proceso de multi-reflexión del rayo láser. Dentro de la cavidad, el material vaporizado es eyectado perpendicularmente a las paredes irradiadas por el rayo láser, (principalmente en la pared de la cavidad opuesta a la dirección de barrido) parte del vapor se condensa en la pared trasera del capilar, y otra parte del vapor sale por alguna apertura de la cavidad en la parte superior, o en algunos casos donde la penetración de soldadura es igual al calibre del material (como el de la Figura 2.9), el vapor suele salir por un orificio creado en la parte inferior de las aplicación. En la siguiente figura (Figura 2.33) se observa el principio del Keyhole.

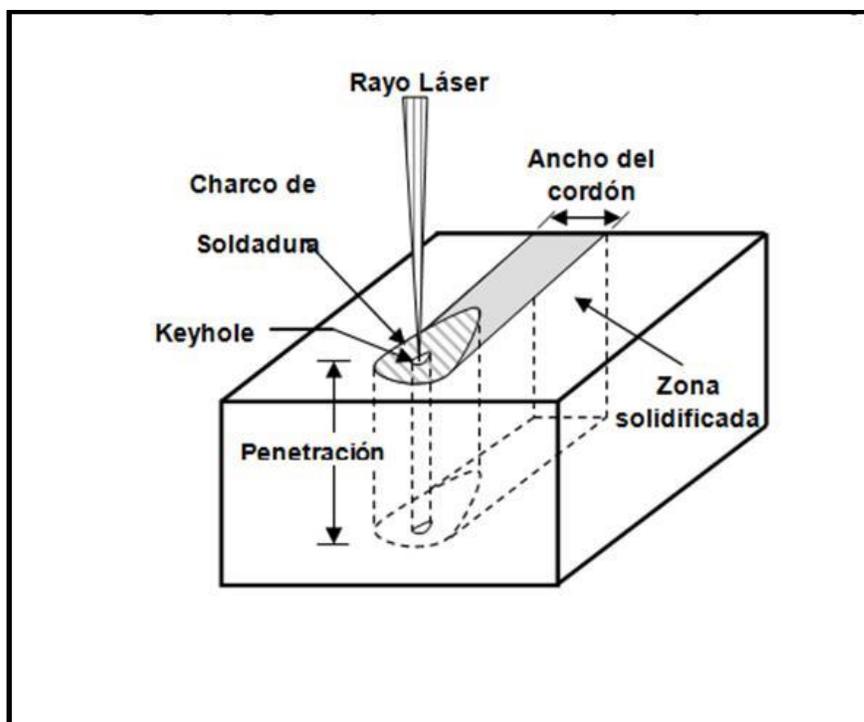


Figura 2.9. Principio de la soldadura por Keyhole

La Figura 2.10 muestra tres configuraciones de potencia (1.5 KW/mm^2 , 3Kw/mm^2 y 5Kw/mm^2) para a una velocidad de barrido de 1.8m/min en una barra de acero de 2mm de espesor.

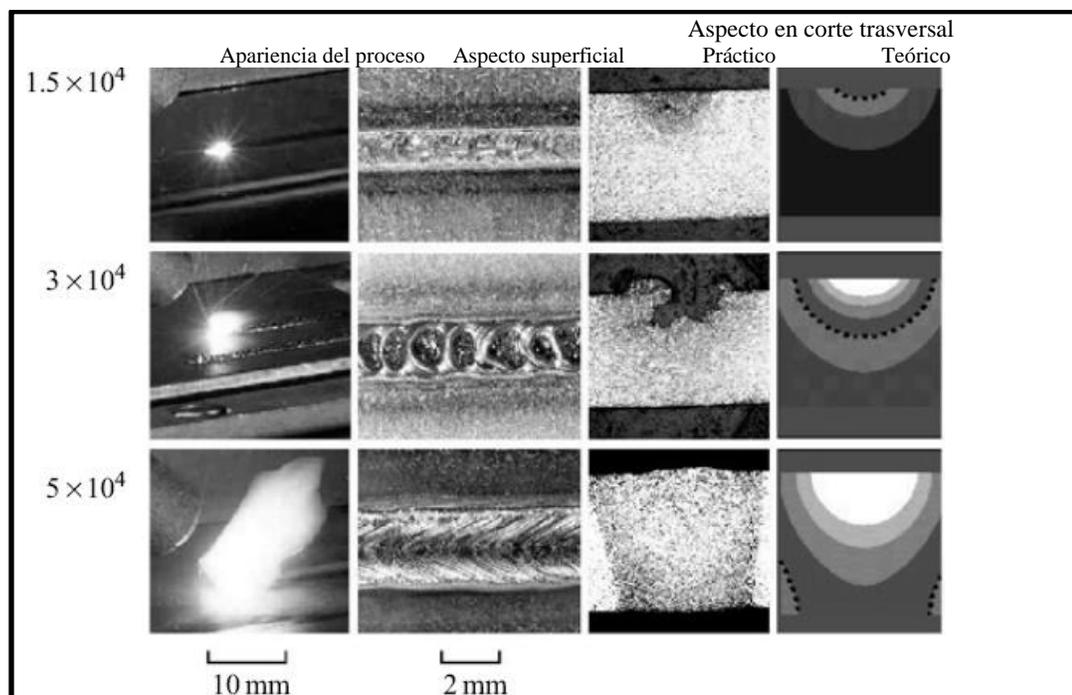


Figura 2.10. Soldaduras láser utilizando 3 potencias distintas [40]

En la figura anterior se observa que en la primer experimento se logró muy poca área fundida por la incidencia del rayo láser, debido a que la densidad de potencia es característica de la soldadura láser por conducción, en la segunda se puede observar la formación de un cráter, a consecuencia de que no se alcanzó en su totalidad la formación de la cavidad Keyhole (hubo inestabilidad en la cavidad), lo que provocó la insuficiencia material vaporizado, y por lo tanto se obtuvo como resultado una pérdida de absorción del láser y una pérdida de material en forma de vapor, por último en el experimento 3 se logró muy buena calidad y una gran zona fundida, esto fue favorecido por la presencia y estabilidad de la cavidad del Keyhole.

Para lograr la estabilidad en la cavidad del Keyhole, la presión de retroceso, la cual es generada por el flujo de vapor resultante de la evaporación de la

superficie, y la fuerza termo-capilar, que se genera gracias a la existencia de un enorme gradiente de temperatura entre el líquido / vapor (L / V), deben proveer la fuerza motriz para la eyección del líquido en la cavidad del Keyhole.

Este modo de soldadura está limitado a un rango de densidad de potencia de 10^3 y 10^5 Watts/mm² (a más de 10^5 es difícil mantenerlo estable [16]) [41-42], además en la literatura se habla de que para los aceros avanzados, es aproximadamente de 10^4 [15, 16].

Además en este modo de soldadura se debe tenerse especial control en las siguientes variables [15]:

1. Se debe de generar una rampa de incremento gradual de la densidad de potencia al final y al principio de la formación de la cavidad Keyhole, de lo contrario es probable que se el defecto de socavado en esas zonas de la soldadura.
2. Debe a ver una relación adecuada de velocidad y densidad de potencia.
3. Debe haber simetría en la distribución de la potencia a lo largo del láser , que es conocida como el perfil espacial del láser.
4. El suministro de gas de protección debe ser optimizado.

Como se mencionó con anterioridad, en la soldadura por Keyhole se pueden obtener relaciones de ancho: penetración de 1:10, por lo que esta es empleada en componentes donde se requiere soldar componentes con calibres mayores, los cuales no se podrían soldar con el modo de conducción.

A continuación se muestra una figura (Figura 2.11) en la cual se observan las características principales que se obtienen en un corte transversal utilizando

el modo Keyhole. Este experimento fue realizado con tecnología de láser remoto, que consta de un láser continuo Nd:YAG amplificado con una fibra y conectado a un cabezal, el cual está montado en robot.

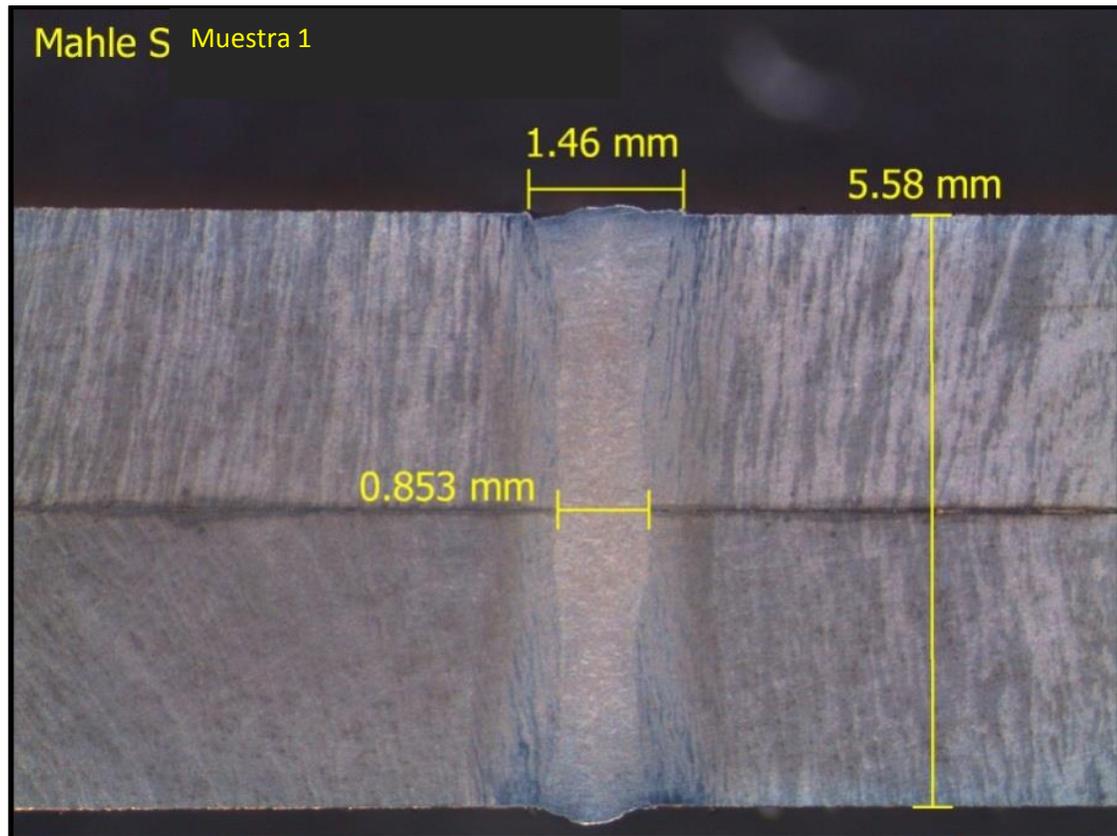


Figura 2.11. Corte transversal en una soldadura realizada por Keyhole

En la figura anterior se observa el corte transversal de una unión tipo traslape. En la unión la relación del ancho y la penetración es vasta, esto se debe principalmente a la multireflexión del láser originada en la cavidad del Keyhole. El proceso de Keyhole es más utilizado en la industria debido a que la eficiencia es mayor que en el de conducción, ya que la absorción del láser es mucho mayor en la cavidad del Keyhole.

Soldadura por conducción

El modo de soldadura láser por conducción es utilizado para aplicaciones donde no se requiere mucha penetración, en este proceso el fenómeno de absorción del láser solamente se presenta en modo por conducción térmica. A continuación se muestra una figura (Figura 2.12) de las características principales que se obtienen en un corte transversal en el modo de conducción, esta aplicación se obtuvo durante la unión de aleaciones base cobalto biocompatibles en configuración de soldadura a tope, fue realizada con un rayo láser de estado sólido Nd:YAG.

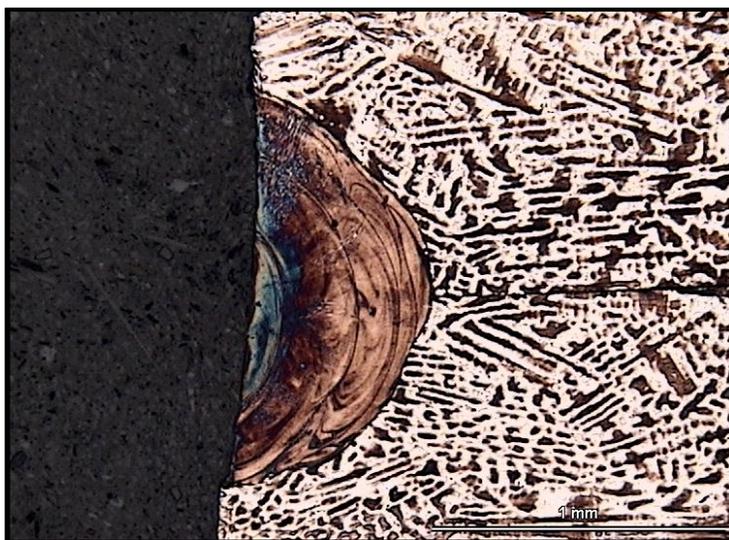


Figura 2.12. Soldadura láser en como conducción a tope

En la figura anterior se observa el corte transversal de una unión tipo tope. En la unión de soldadura se ve que la relación penetración:ancho es mucho menor que la presentada en soldadura por Keyhole (Figura 2.11)

Cuando se usa este modo de fusión en la soldadura de materiales con láser continuo usualmente la relación penetración:ancho es de 1:1.5. En los materiales clase II (ver tabla 2.1), como son los aceros avanzados, el rango

preferencial de relación penetración:ancho es 0.6:1 a 1.5:1. Para los metales la mayor penetración que se puede obtener es 0.633 cm [15].

En el modo de conducción la densidad de potencia es de un orden menor a 10^3 watts/mm², esta potencia es utilizada para fundir materiales sin la presencia significativa de evaporación. Existen 2 formas de procesamiento con el modo de conducción que son el calentamiento directo y transmisión de energía. Durante la forma de calentamiento directo, el flujo de calor es gobernado por el fenómeno clásico de conducción térmica [16, 17]. El modo de transmisión de energía es utilizado en la unión de polímeros, en el cual se transmite radiación infrarroja de láseres de Nd:YAG y láseres de diodo, al material y esta es absorbida por nuevos métodos de interfaces de absorción [17]. Para la selección de los parámetros de proceso de soldadura por láser por conducción y por Keyhole, es de suma importancia considerar las propiedades del material a soldar, la Tabla 2.1 es de gran ayuda para la selección de los parámetros en un estudio de investigación en soldadura por láser.

El modo de fusión por conducción es principalmente utilizado cuando se requiere precisión en la aplicación con poca entrada de energía en el material.

Soldadura láser pulsada

En el procesamiento de materiales con láser pulsado, la penetración está en función solamente de la energía por pulso. Éste es el parámetro clave que controla la penetración durante el tratamiento del material [15-17].

Si la densidad de potencia “I” se mantiene constante, la penetración no está en función de la frecuencia del pulso y de la velocidad de barrido, esto es más fácil de comprender con las siguientes ecuaciones.

La densidad de potencia está dada por:

$$I = \frac{E}{t * A} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde I es la densidad de potencia (watts/mm²), E es la energía por pulso, t es la duración del pulso y A es el área transversal del rayo enfocado en la pieza o área de focalización. La energía por pulso E (watts.seg o Joules) está dada por la siguiente ecuación:

$$E = P_{(peak)} * t \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde $P_{(peak)}$ es la potencia pico del láser y t es la duración de pulso. Por lo que si se sustituye la ecuación 2.2 en la 2.1, se observa que la densidad de potencia solo depende de la potencia pico por pulso que entrega el equipo láser.

En el láser pulsado el modo de fusión se lleva a cabo por conducción, el modo de penetración completa es imposible ya que no hay suficiente tiempo para la formación del Keyhole y además el ciclo de trabajo por pulso no permite que se sostenga la cavidad formada en es modo de soldadura [15]. En el modo de fusión por conducción con láser pulsado la relación penetración:ancho es usualmente en rango de 0.6:1 a 1:1 [17].

El perfil del espacio más adecuado para el tratamiento de materiales por láser pulsado es el de "top hat" (en forma de sombrero plano), en el cual la potencia está distribuida de manera uniforme. Cuando se emplea la geometría del perfil del espacio de "top hat" la zona fundida en un corte transversal tiene la forma de "U" (Figura 2.13), en cambio cuando se usa la geometría Gaussiana la forma es de "V" en el corte en la sección transversal.

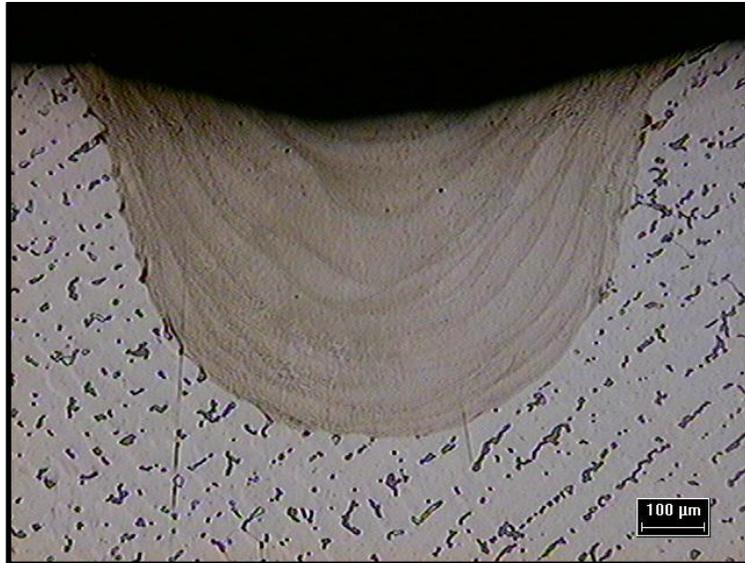


Figura 2.13. Sección en corte transversal en soldadura pulsada con perfil del espacio “top hat” a 50 magnificaciones

Las limitaciones de este proceso se alcanzan cuando la energía del pulso provoca que el calor no pueda ser conducido totalmente al material, esto se debe a que existe un rango finito de conductividad térmica en el material. En este punto la temperatura del material llega a niveles de vaporización y es común que comiencen a presentarse salpicaduras en el material durante la soldadura. La siguiente figura (Figura 2.14) ilustra este fenómeno.

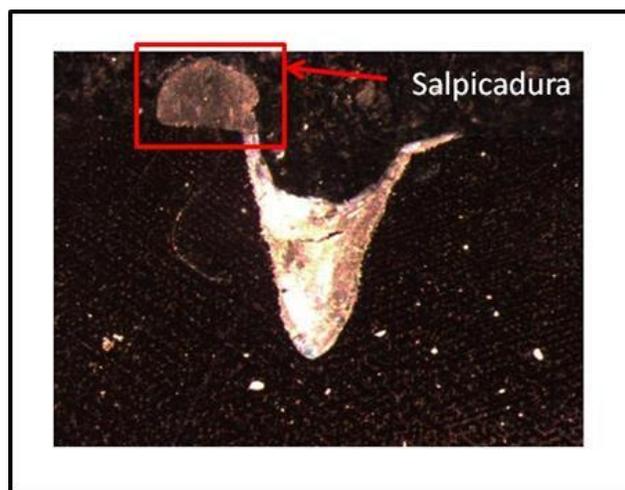


Figura 2.14. Espectrometría óptica de una soldadura láser con salpicaduras

Es por eso que la penetración y el grado de absorción de energía en tratamientos de materiales con láser pulsado por conducción están limitados, como se ilustra en la siguiente tabla (Tabla 2.2):

Tabla 2.2. Máxima penetración y energía de pulso [15]

Clase	Máxima penetración (mm)	Energía por pulso (joule)
1	15.24	70
2	22.86	50

Cuando el láser pulsado se compara con el láser continuo, en de soldadura, el calor de entrada es mucho mayor por unidad de área o de longitud, ya que en el pulsado por cada pulso se está fundiendo y solidificando el material en la zona de soldadura [15].

El tiempo de enfriamiento del material para los materiales clase II (Aceros avanzados) es aproximadamente el doble de la duración por pulso.

2.4. Efecto de las variables del proceso

Recientemente se han realizado numerosos estudios encaminados a la medición, supervisión y optimización de los parámetros del proceso y la calidad del proceso de soldadura de materiales con láser. Como resultado, se han desarrollado sistemas de monitoreo del estado, supervisión del proceso y control en línea de la calidad, incluyendo técnicas adaptativas y de optimización, introducción de sensores de medición y estudios exhaustivos de la influencia de las variables medibles o controlables del proceso.

Dentro de los parámetros medibles o controlables más importantes del procesamiento de materiales con láser continuo se encuentran las siguientes.

- Calor de entrada (relación potencia y velocidad de barrido)
- Densidad de potencia (involucra el diámetro del punto focal y la potencia)
- Tipo y flujo de gas de protección
- Perfil del espacio del láser

A continuación se dará una explicación más detallada de cada uno de los parámetros en soldadura láser continua.

Calor de entrada (energía en la aplicación)

El calor de entrada es una medida relativa de la energía trasferida por unidad de longitud en el procesamiento de materiales con láser, y está dada por la siguiente ecuación:

$$HI = \frac{P}{V} * n \quad \text{Ec. 2.3}$$

donde HI es el calor de entrada (en Watts.seg/mm o Joule.mm⁻¹), P es la potencia, V es la velocidad de barrido del láser y n la eficiencia de absorción [45].

En el proceso de soldadura con láser, el calor de entrada tiene un efecto en diferentes aspectos de la calidad de la unión soldada, como son en el micro y macroestructural, propiedades mecánicas y en las fases que se presentan en la

zona de fusión. Numerosos estudios se han realizado para analizar los efectos que tiene el calor de entrada, Y.J. Quan y colaboradores [46], estudiaron los efectos del calor de entrada en una aleación de Magnesio AZ31, realizaron 9 pruebas aumentando el calor de entrada con el incremento de la potencia y con la disminución de la velocidad. En la macroestructura obtuvieron los siguientes resultados (Figura 2.15).

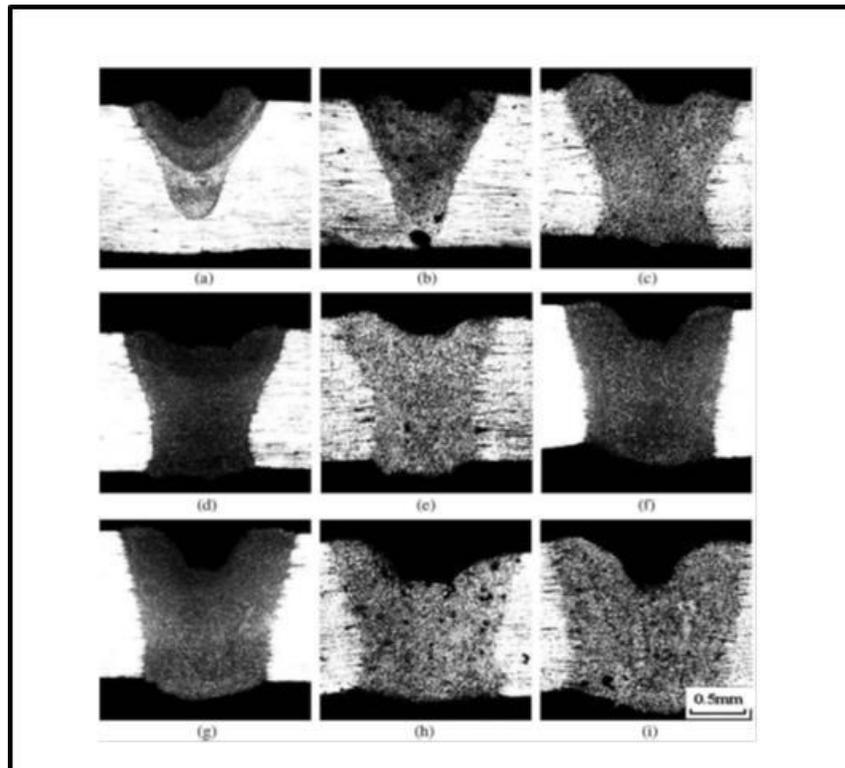


Figura 2.15. Efecto del calor de entrada en la macroestructura a) 19.2 J/mm, b) 21.6 J/mm, c) 24 J/mm, d) 24 J/mm, e) 27 J/mm, f) 30 J/mm, g) 32 J/mm, h) 36 J/mm y i) 40 J/mm [46]

En este caso de estudio los autores variaron la velocidad y la potencia de soldadura, para generar distintos calores de entrada en las uniones, y así elegir los parámetros para obtener un área y geometría óptima para que la unión tuviera propiedades mecánicas que cumplieran con los requerimientos en la aplicación de esta.

Cuando el calor de entrada no es suficiente, poca penetración es alcanzada y por ende el ancho de la zona fusión es reducido (Figura 2.15 a, b y c), la zona soldadura por láser se empieza a apreciar más sana en las Figuras 2.15 c - e cuando el calor de entrada es mayor, además es importante percibir que a una entrada de calor muy alto aparecen algunos de los defectos típicos en la soldadura, como son el refuerzo negativo (algunos autores lo llaman socavamiento) en el centro de la parte superior de la soldadura, esto se debe a la vaporización de material de la aleación (Figura 2.15 f - i). Adicionalmente se puede observar porosidad en la zona de fusión especialmente cuando el calor de entrada es muy alto (Figura 2.15 h - i) esto indica que la porosidad es causada por la evaporación de algunos de los compuestos químicos del material.

Otra de las causas por las cuales es común encontrar porosidad en los materiales soldados por láser, es cuando el tratamiento por láser se hace excesivamente rápido, es decir la velocidad de barrido es muy alta, esto se debe a que el tiempo de solidificación es muy corto y esto impide que escape el gas de alguno de los compuestos que llego a estado gaseoso, este fenómeno es más común en la soldadura por láser continuo de por Keyhole, debido a que en ellos siempre existe una interacción de materiales en estado gaseoso.

Como se observó anteriormente la penetración está influenciada por el calor de entrada, la siguiente grafica (Figura 2.16) muestra las diferentes penetraciones obtenidas variando la velocidad y potencia de un equipo de láser de fibra continuo. Con el análisis de la siguiente figura se concluye que no solamente se debe controlar la densidad de potencia en la unión de soldadura láser, sino que también es importante el calor de entrada, ya que este se requiere para fundir el material necesario para obtener las características que cumplan con las expectativas y aplicaciones del componente que se está soldando.

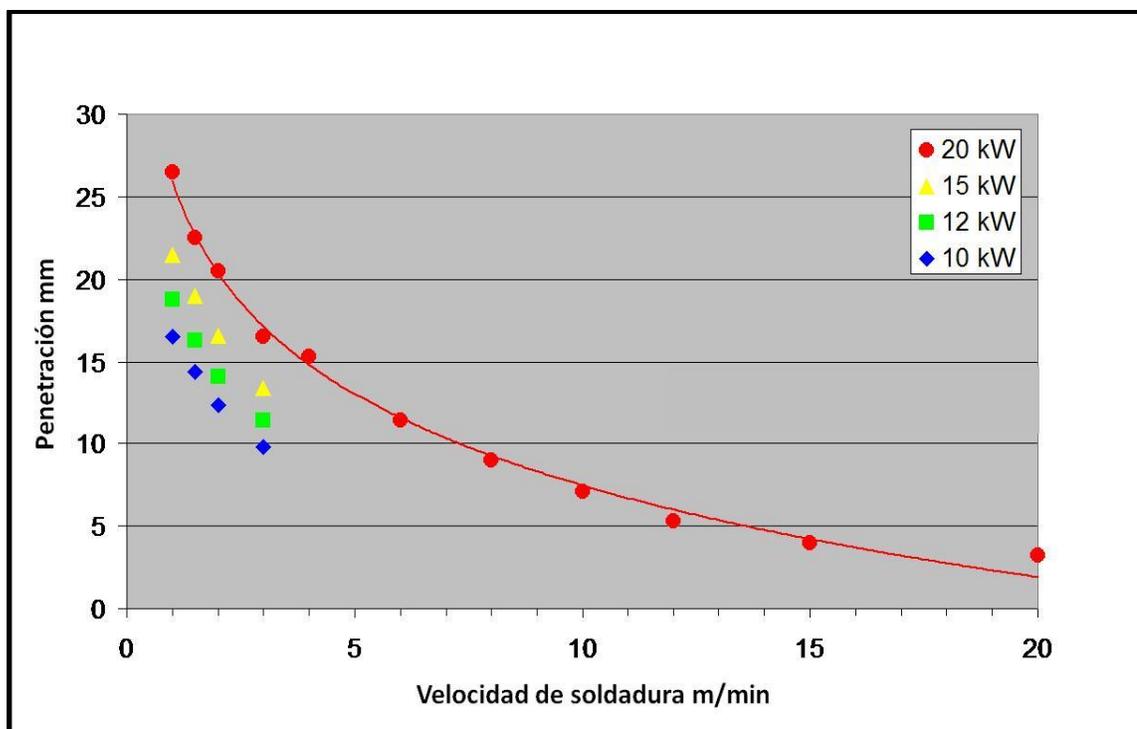


Figura 2.16. Efecto de la potencia y velocidad de barrido del láser en la penetración de soldadura [47]

Como se mencionó anteriormente el calor de entrada influye en el tiempo de solidificación, y este es muy importante en la morfología de la microestructura. Una solidificación muy rápida disminuirá los tiempos para microsegregación, y la distribución de los precipitados [45, 46], escape de materiales evaporados y muchos otros efectos en el proceso de solidificación. A continuación se muestra una figura del efecto del calor de entrada en la distribución de precipitados (Figura 2.17).

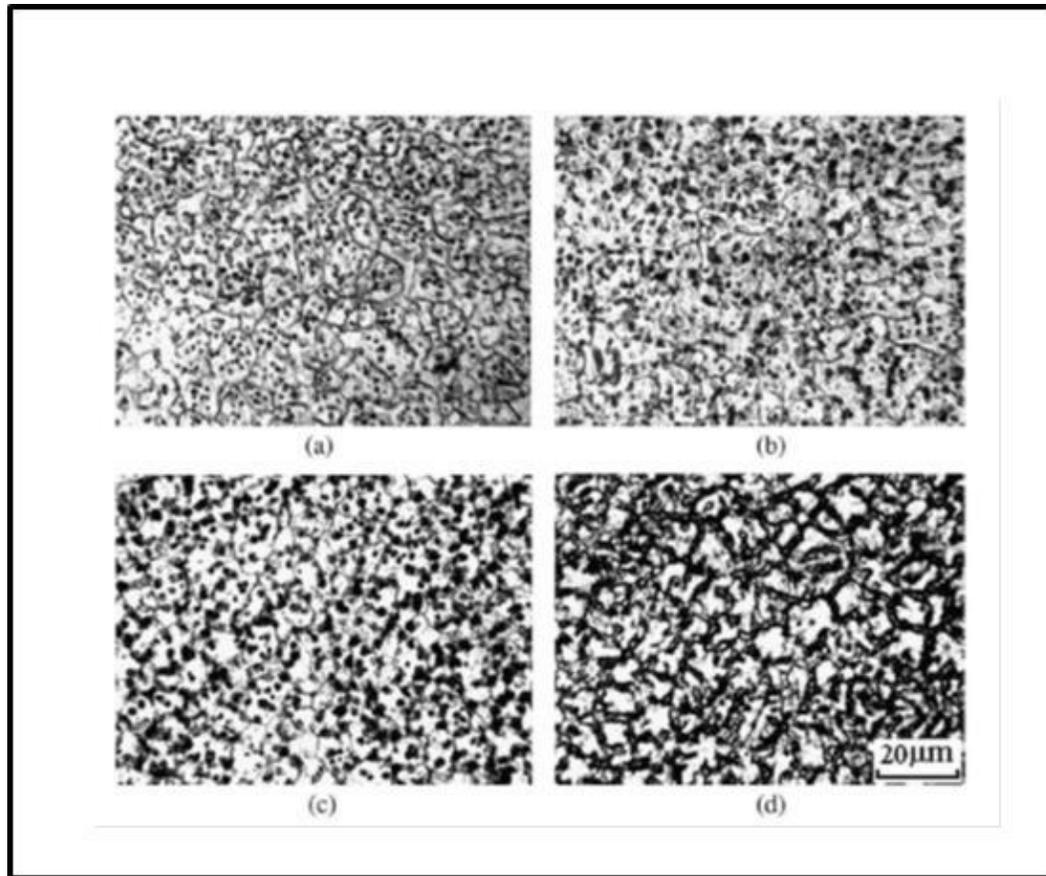


Figura 2.17. Efecto del calor de entrada en la distribución de precipitados a) 19.2J, b) 24J, c) 32J y d) 40J [46]

Cuando el calor de entrada es alto, los precipitados estarán contenidos en placas, en cambio si el calor de entrada es bajo los precipitados estarán en forma de partículas, esto se debe a que cuando el calor de entrada es bajo, el tiempo de enfriamiento es menor, esto provoca que los átomos no puedan regresar a tiempo a las fronteras de grano y queden esparcidos como partículas intragranulares.

Densidad de potencia

La densidad de potencia es la potencia suministrada al material por unidad de área. La densidad de potencia es el parámetro significativo para manipular el modo con el cual se soldara el material con el láser. Como se mencionó anteriormente el modo de soldadura puede ser por Keyhole y por conducción.

En los la soldadura por láser una de las definiciones más importantes que se necesitan para el procesamiento, es escoger el modo de soldadura (conducción o Keyhole), para posteriormente escoger la densidad de potencia adecuada (tabla 2.1). En el modo de conducción la relación penetración/ancho es menor 1/1 y una indeseable distorsión se puede presentar debido a la transición de sólido a líquido, además en este modo es mayor la diversidad de geometrías de la zona fundida que se pueden obtener. Con el modo de soldadura por Keyhole se obtienen geometrías con relación penetración/ancho de hasta 10/1, por lo que con este modo es posible lograr mayor eficiencia de absorción del láser en la pieza de trabajo, y por consecuencia más penetración y velocidad de procesamiento.

La densidad de potencia en la soldadura de materiales por láser continuo está dada por la siguiente ecuación.

$$I = \frac{P}{A} \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde I es la densidad de potencia (watts/mm²), P es la potencia y A es el área transversal del rayo láser enfocado en el material.

El incremento en el diámetro del spot del rayo láser incrementa el área de incidencia del rayo, y a su vez disminuye la densidad de potencia.

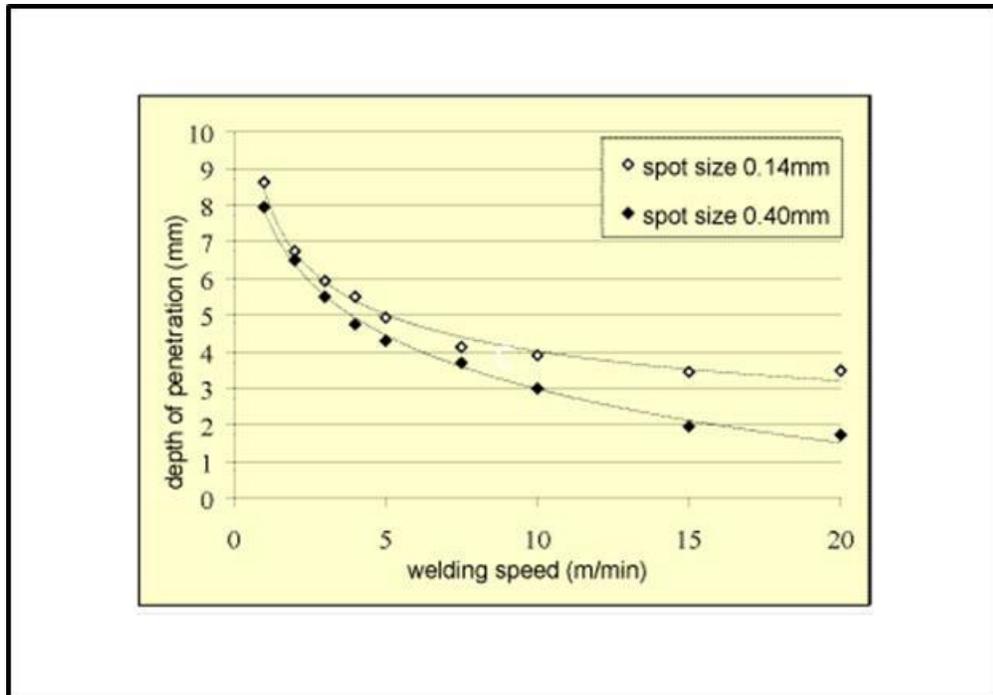


Figura 2.17. Influencia del diámetro del spot del láser en la penetración de soldadura [49]

Claramente en la figura anterior se puede observar que el incremento del diámetro del spot del láser disminuye considerablemente la penetración de soldadura. Un parámetro importante en el láser es la distancia focal, que es la distancia entre el lente que irradia el láser (lente de enfoque en el colimador) y la pieza de trabajo. Existe una distancia entre el lente y la pieza de trabajo, a potencia constante, donde se alcanza el punto focal más pequeño y la potencia por unidad de área (densidad de potencia) es la mayor que se puede lograr, a esta distancia se dice que el láser está totalmente enfocado ($z = 0$ donde z es la distancia de desenfoco). A distancias menores a la distancia de enfoque ($z = -x$), la densidad de potencia es menor debido a que el área del punto focal es mayor. El mismo comportamiento sucede a distancias mayores a la distancia de focalización ($Z = +x$), la densidad de potencia es menor. En el siguiente esquema (Figura 2.18) se muestra este comportamiento detalladamente.

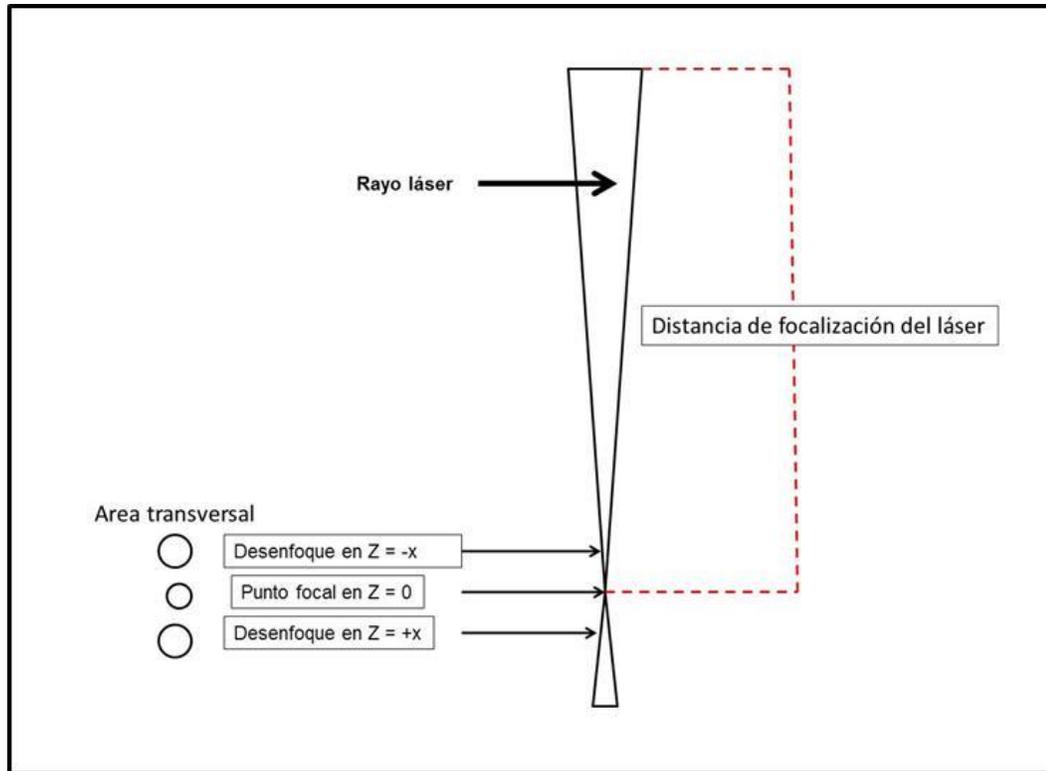


Figura 2.18. Distancia focal en el proceso de soldadura con láser

En el esquema anterior se observa lo que se explicó anteriormente, además se ve notoriamente que el área en el punto de enfoque es mayor, para distancias menores y mayores ($Z = +/- x$) a la distancia de focalización ($Z = 0$).

La densidad de potencia es inversamente proporcional al área de enfoque (Ec. 2.4), y el área de enfoque puede aumentar si la distancia entre la pieza de trabajo y el lente de enfoque en el colimador es mayor o menor a la distancia de focalización ($Z = 0$) [31,35, 37], por lo que con un cambio en la distancia focal, y por ende en el área de focalización, la densidad de potencia del láser provocará cambios significativos en la geometría de la unión, refiriéndose a la penetración, ancho y relación penetración:ancho. En la Figura 2.19 se observa los efectos antes mencionados, se puede observar que con la variación de la distancia focal en una soldadura con láser continuo Yb:YAG. El equipo láser de esta aplicación fue un cabezal de tres dimensiones, conectado a una fibra proveniente de un láser Yb:YAG, montada en un robot (soldadura láser remota).

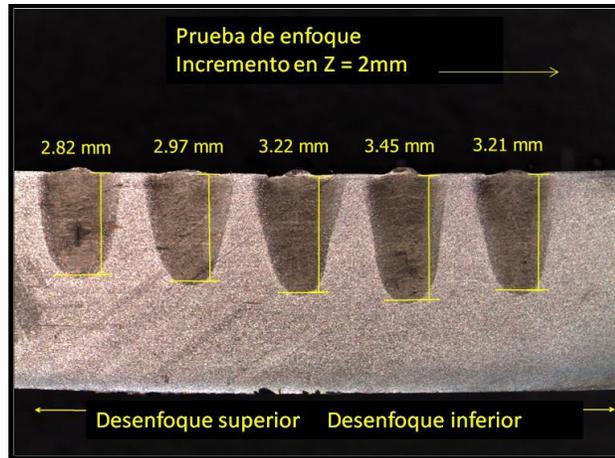


Figura 2.19. Influencia de la distancia focal en el proceso de soldadura con láser

En la figura anterior visiblemente se observan los efectos de cambio en la geometría, penetración, ancho y relación penetración:ancho, en cada una de las soldaduras, estos cambios fueron ocasionados por el cambio de 2mm en la distancia focal entre la pieza de trabajo y el lente de enfoque del colimador, se podría deducir que la distancia de focalización del láser es la correspondiente a la soldadura donde se alcanzaron 3.45 mm de penetración física en la pieza, ya que en ella se logró la mayor penetración.

La siguiente figura muestra la influencia de la potencia en la penetración de soldadura a diferentes velocidades de soldadura.

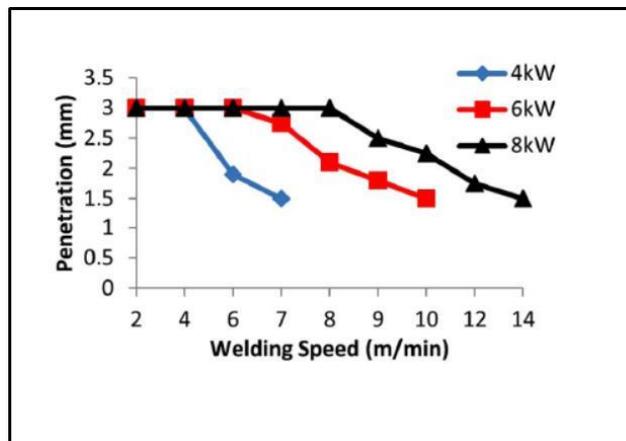


Figura 2.19. Efecto de la potencia del láser a diferentes velocidades [48]

Así mismo, como se observa en la figura anterior en el proceso la soldadura láser continua, la penetración está en función de la densidad de potencia del láser y de la velocidad de barrido durante la soldadura.

El área del spot del rayo está dada por la siguiente ecuación.

$$A = \frac{\pi}{4} * d_0^2 \quad \text{Ec. 2.5}$$

donde A es el área transversal del rayo láser (mm²) y d₀ es el diámetro focal del rayo láser.

Una vez que se sabe la clase del material que se va a soldar con láser (ver Tabla 2.1) es importante realizar los cálculos utilizando las Ec. 2.4 y 2.5 para encontrar la densidad de potencia adecuada para la aplicación que se requiere implementar (ya sea un proceso de refusión, soldadura o corte por láser).

Efecto del tipo y caudal de gas de protección

El objetivo principal del gas de protección es disminuir el plasma causado por la ionización del gas que rodea a la zona soldada y de la ionización de los vapores que provienen del metal base, así mismo el gas protector disminuye la oxidación superficial en la soldadura [15,17, 50].

El gas de protección tiene gran influencia en la obtención de las características en la unión de soldadura de materiales con láser, puede influir en una la penetración de soldadura [50].

Efecto del plasma

La formación del plasma provoca efectos no deseados en el haz de láser. El plasma absorbe energía del haz y además causa desenfoque del rayo durante el proceso de soldadura. En el esquema siguiente (Figura 2.20) se muestra los beneficios que tiene el uso del gas protector para desviar la columna de plasma durante la soldadura [51].

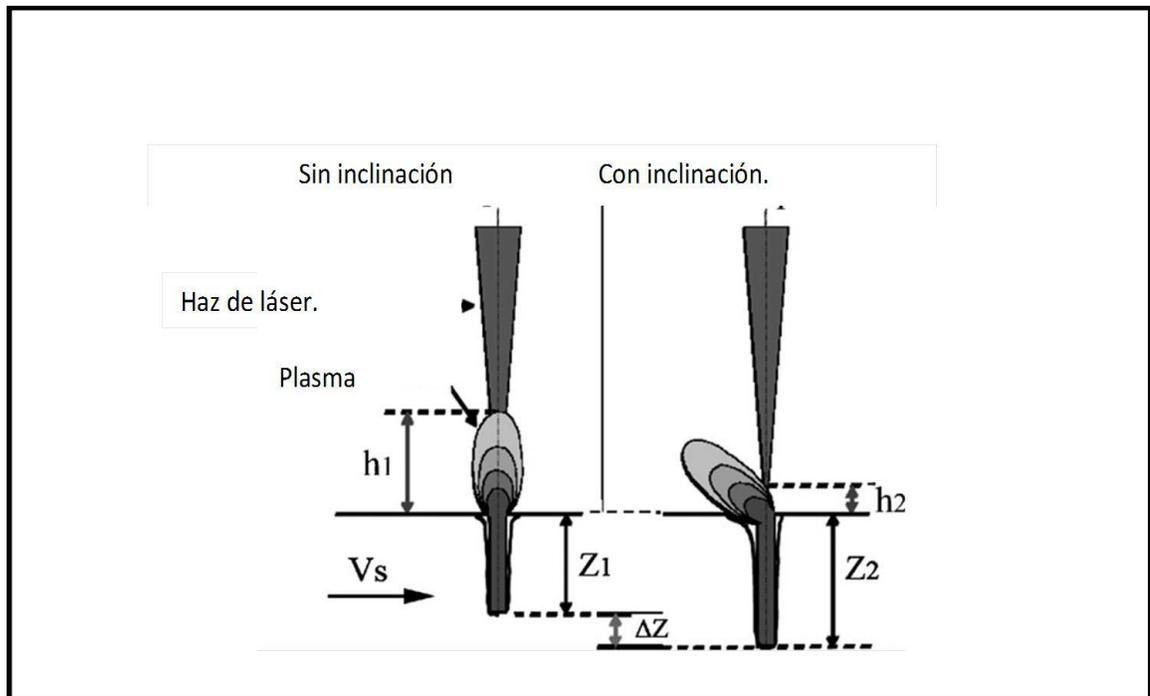


Figura 2.20. Influencia de la desviación del plasma en la penetración de soldadura [51]

Muchos de los metales son muy reactivos a altas temperaturas, ya sea con el Oxígeno, Nitrógeno o Hidrógeno, la reactividad de los metales y la formación de la columna de plasma se pueden controlar con la aplicación de diferentes estrategias de aplicación de los gases de protección.

De acuerdo al propósito de protección que tienen estos gases, estos deben de cumplir con las siguientes características:

1. Potencial de ionización

Gases con gran potencial de ionización ayudan a reducir la cantidad de plasma durante el tratamiento con láser.

2. Composición

El gas debe de ser inerte con respecto a altas temperaturas y a los componentes del material base.

3. Caudal

La energía cinética del flujo del gas debe ser alta, lo suficiente para desviar la columna del plasma fuera del camino del haz.

4. Distribución

El área alrededor de la zona tratada debe estar uniformemente protegida del atmosfera y medio ambiente. [52]

Variables en la aplicación y elección del gas protector:

- Angulo de la boquilla.
- Caudal.
- Tipo y densidad del gas.

G. Tani y colaboradores [52], estudiaron el efecto del ángulo de boquilla, caudal y tipo de gas de protección en una aleación no ferrosa soldada por láser CO₂ en modo de soldadura Keyhole. El estudio se enfocó en la cantidad de área que se podía proteger con distintos: gases, ángulos y caudales de gas

protector. La siguiente figura (Figura 2.21) ilustra el efecto que tiene el caudal del gas de protección, utilizando Helio suministrado por una boquilla a 45°.

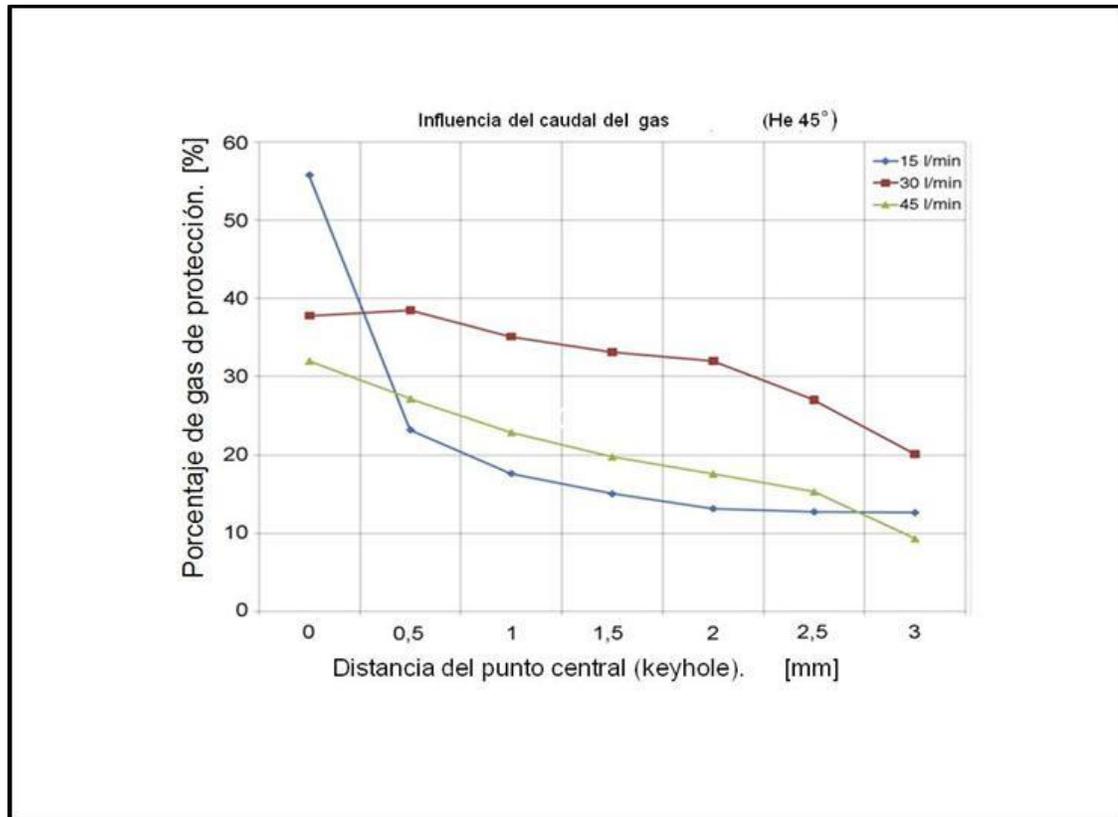


Figura 2.21. Influencia del caudal del gas protector [52]

En las siguientes simulaciones (Figura 2.22 y 2.23) se muestra la distribución del gas de protección a dos diferentes ángulos de boquilla, 0 y 60 grados. El color rojo indica la mayor concentración de gas protector [52].

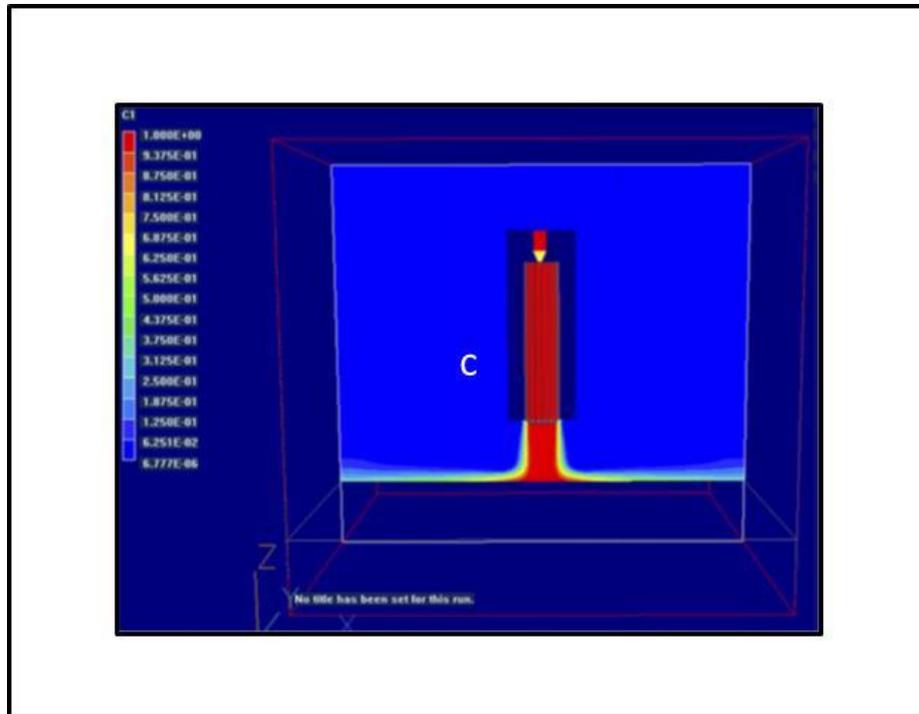


Figura 2.22. Ángulo de boquilla a 0 grados [52]

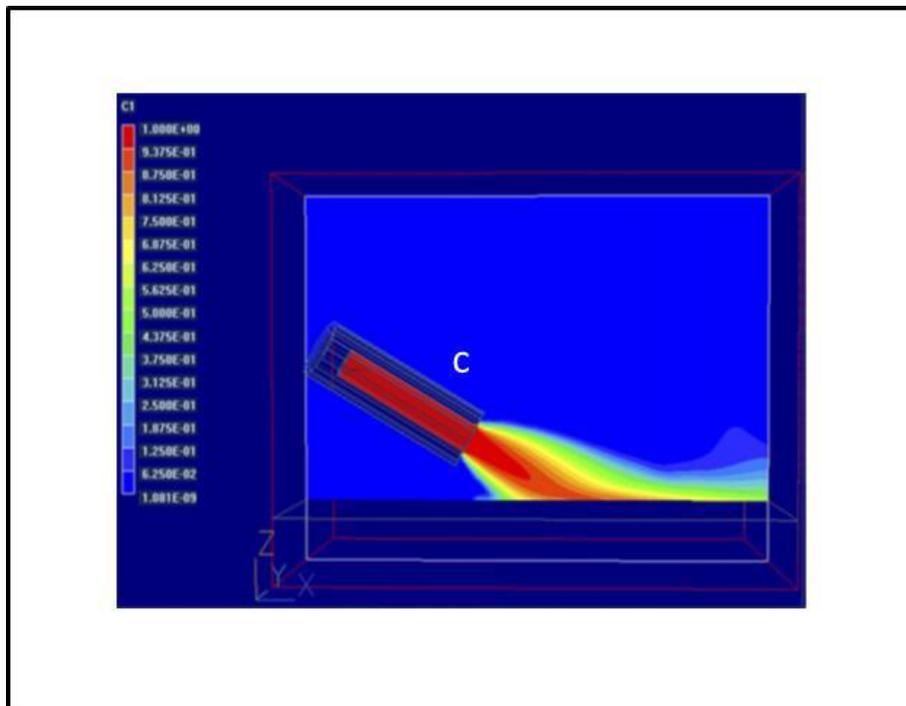


Figura 2.23. Ángulo de boquilla 60 grados [52]

En las figuras anteriores se observa que la distribución del gas protector abarca mayor superficie a un ángulo de boquilla de 60 grados (Figura 2.23) con una buena concentración de gas, en cambio en la Figura 2.22 en la cual la boquilla se encuentra a un ángulo paralelo al Keyhole (0 grados), la distribución del gas es muy deficiente y solo se logra una alta eficiencia de protección en lugares adyacentes al punto central. Así mismo no es recomendable que el gas protector se dirija directamente a la cavidad del Keyhole, ya que el caudal puede causar turbulencias e inestabilidad en la cavidad, esto provocara defectos en la unión de soldadura [53].

En la mayoría de los casos es preferible lograr una protección estable cubriendo una mayor superficie ya que así se logrará proteger más tiempo el charco de soldadura mientras este se está solidificando. Por tal motivo en la mayoría de los equipos de soldadura por rayo láser los ángulos de la boquilla son semejantes al de la Figura 2.23.

Por último G. Tani y colaboradores [52], analizaron el efecto del uso de diferentes gases para la protección de la zona de soldadura por el láser, utilizando Argón, helio y Nitrógeno, los cuales tienen diferentes densidades (Figura 2.24).

En este caso se puede observar que existe una gran diferencia entre cada uno de los distintos porcentajes protección de los gases en las zona de soldadura, esto se debe a que la densidad del Helio es menor a la del aire, lo cual provoca que este tenga una pobre e inestable eficiencia de protección en el charco de soldadura, con el gas de protección Argón los resultados son mejores ya que el Argón es más denso que el aire, y por lo tanto dura más tiempo protegiendo la zona de soldadura [52].

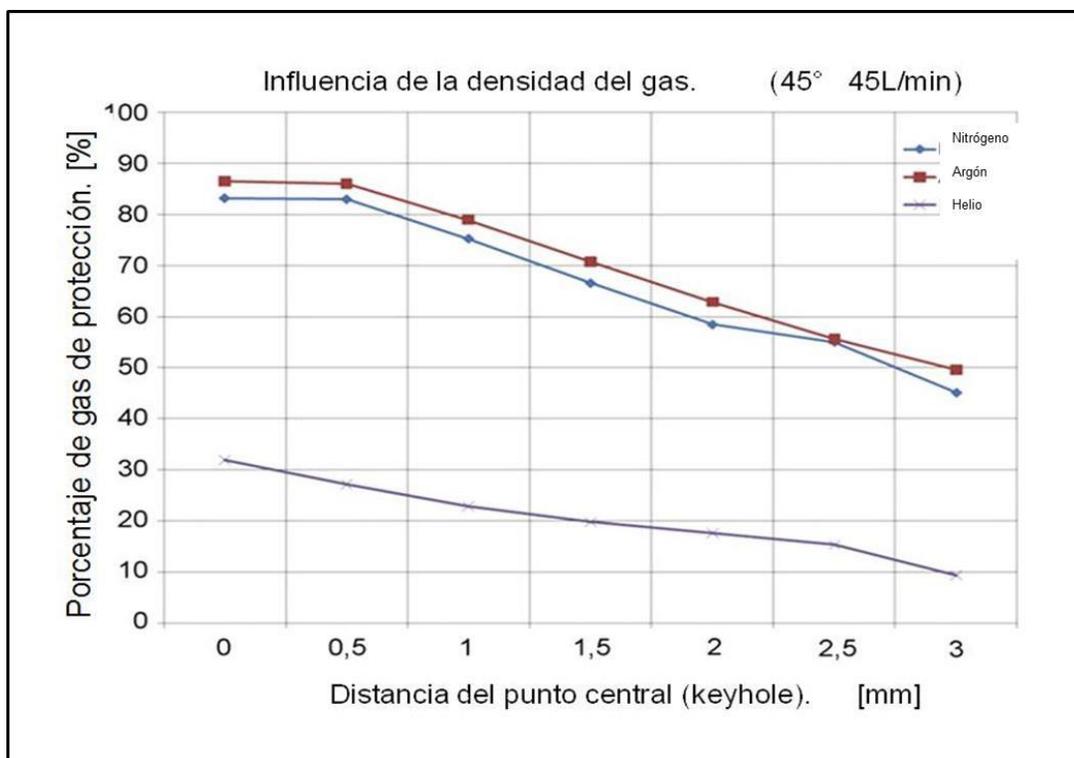


Figura 2.24. Influencia de la densidad del gas de protección [52]

Como se puede apreciar en la gráfica anterior, la densidad del gas tiene un papel importante en la eficiencia de la protección del charco de soldadura, con gases más densos como el Argón y el Nitrógeno se logra mayor área de protección de la zona tratada, y el porcentaje de gas protector a distintas distancias con respecto al punto central (Keyhole) es mayor. Es importante mencionar que el ángulo de boquilla fue de 45 grados y el caudal del gas fue de 45L/min.

Perfil del espacio del láser

El perfil del espacio tiene un efecto en el diámetro del rayo láser enfocado en el material en los láseres continuos y pulsados. La coherencia del rayo a su vez es la variable más importante en el grado de enfoque del láser. El perfil del

espacio se refiere a la distribución de la potencia en el área transversal del rayo láser. Los procesos de fusión con láser (como lo es la soldadura, refundido superficial, brazing láser, etc.) requieren mucha exactitud en la cantidad de potencia que se requiere en la superficie del material, una densidad de potencia incorrecta da como resultado una falla total del proceso [15].

En proceso de soldadura láser continuo se sabe que existen dos modos de fusión de los materiales, para los cuales es preferible utilizar diferentes geometrías en el perfil del espacio, a continuación se manifiesta cuáles son las geometrías deseadas del perfil del espacio para cada modo de fusión.

Soldadura por conducción

El perfil del espacio deseado es aquel que tiene uniformidad en la potencia. El grado de uniformidad del perfil del espacio se ha debatido a través de los años en congresos y en reuniones de comités. La experiencia ha indicado que un perfil del espacio 95% uniforme es bueno para el modo de fusión por conducción [15].

Soldadura por Keyhole

Los perfiles del espacio deseados para el proceso de soldadura láser continuo por Keyhole son Gaussianos. En soldadura por Keyhole es preferible usar un perfil ya que para la formación de la cavidad se requiere una gran concentración de potencia en un área muy pequeña para la evaporación del material en la superficie.

La siguiente figura muestra la impresión del perfil espacial de un láser utilizado para soldadura. En esta figura se observa la impresión de un perfil gaussiano en 3D (Figura 2.25A) y en 2D (Figura 2.25B).

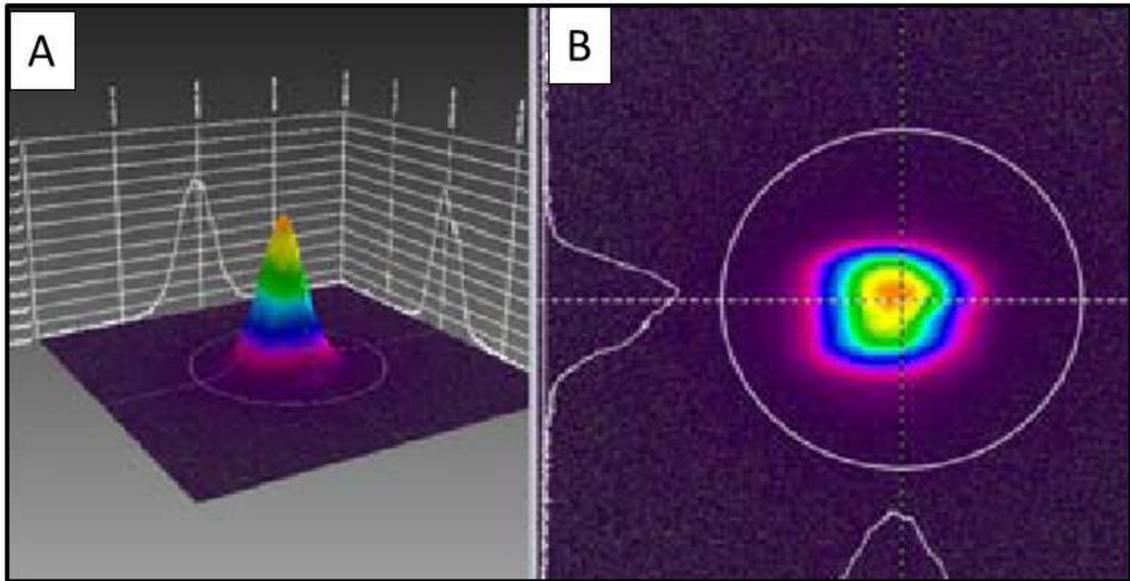


Figura 2.25. Perfil del espacio Gaussiano A) Impresión del perfil en 3D y B) Impresión del perfil en 2D [54]

En la figura anterior se pueden observar un perfil del espacio donde la distribución de la potencia es en forma gaussiana.

Se debe tomar en cuenta que la simetría axial y radial del perfil en el espacio del rayo láser sea la adecuada, esto para mantener la estabilidad de la cavidad del Keyhole. Los analizadores electrónicos son un medio confiable para medir las simetrías axiales y radiales de los perfiles del espacio, si en la simetría existe una correlación de 0.9 se dice que el perfil del espacio es de buena calidad [15].

Un medidor eléctrico del perfil del espacio “beam profiler” mide la distribución de la energía o la potencia a través del rayo láser con una exactitud de 1% a 5%, este medidor por lo general tiene un interface a un monitor en el cual se puede observar la simetría del rayo, el punto central y el de potencia pico del láser [15, 54].

2.5. Estado del arte en modelación del proceso de soldadura láser

En esta sección se presenta el desarrollo del modelo matemático para la predicción de las características físicas de la unión de soldadura láser continuo por Keyhole, además se realiza un estudio del estado del arte sobre métodos de modelación para el análisis de uniones de soldadura por láser.

En comparación con los estudios experimentales, un estudio de modelación puede dar información detallada sobre las características de la geometría en la zona soldadura por láser y su relación con los parámetros del proceso (velocidad de soldadura, densidad de potencia, espesor de la pieza de trabajo, etc.). La modelación y la simulación se pueden utilizar para reducir los costos de la elaboración de una experimentación en campo. Una simulación de un proceso de soldadura por láser permite la estimación de la geometría de la zona de soldadura, la temperatura transitoria, las tensiones residuales y la distorsión. Sin embargo, esta simulación no es una tarea fácil, ya que implica la interacción de los fenómenos térmicos, mecánicos y metalúrgicos. Por otro lado es importante comprender el comportamiento térmico de la soldadura ya que este es trascendental para el análisis de su estructura, las propiedades mecánicas, la microestructura y el control de calidad de la soldadura [55-56].

A continuación se presenta un estudio del estado del arte referente a los trabajos realizados en la modelación matemática y la simulación del proceso de soldadura por láser en modo por Keyhole.

El principio del proceso de soldadura por láser se basa principalmente en la interacción de la luz y la materia, esta luz puede interactuar con la materia en estado sólido, líquido, gaseoso y en plasma. Por lo tanto, el comportamiento físico de este proceso tiene una gama amplia que va desde transferencia de calor, fundición de materia, flujo del fluido, vaporización, formación de plasma y la interacción del rayo láser-plasma. Por esta razón, el análisis del proceso demanda y requiere un enfoque multidisciplinario. El fenómeno del Keyhole,

ocurre a intensidades altas de potencia en el láser, y es ampliamente utilizado en la soldadura, debido a las ventajas que presenta, como lo es la capacidad de mejorar la eficiencia de absorción del láser.

El proceso de soldadura laser es considerado como un proceso de manufactura moderno. Es posible encontrar en la literatura diversos estudios sobre el efecto de los parámetros en el proceso [57-60] así mismo se pueden encontrar trabajos de investigación en el uso de soldadura láser para la unión de materiales avanzados [61-63]. No obstante debido a la complejidad de este proceso, es muy difícil la obtención de ecuaciones fundamentales para la predicción de las propiedades mecánicas, físicas y metalúrgicas de la unión de soldadura. La gran parte de los trabajos encontrados en la bibliografía utilizan el método de elementos finitos para aproximar la optimización del proceso, es poco común encontrar modelación matemática de este proceso debido a la complejidad que conlleva el desarrollo de ecuaciones que describan este proceso. Así mismo es importante mencionar que el proceso de soldadura láser por modo Keyhole es el más utilizado en la industria.

En este proceso se pueden estudiar diferentes aspectos, como lo son:

- El estudio de la interacción de la interacción del láser con la materia para predecir la absorción del láser en el material.
- El desarrollo de análisis térmicos del proceso, para posteriormente correlacionar los resultados con el comportamiento metalúrgico o mecánico de la unión de soldadura.
- Aplicación de simulaciones de aproximación numérica para el estudio del flujo de fluidos, esfuerzos residuales y distorsiones térmicas, y el modelo de Monte Carlo para la predicción del crecimiento granular en la zona afectada térmicamente.

- El método de level set, para el estudio de la el comportamiento de la superficie libre en el Keyhole de la masa en estado líquido a o gaseoso durante la soldadura.

Investigadores como Dowden y colaboradores [59], obtuvieron soluciones aproximadas para el comportamiento del Keyhole a velocidades bajas, Kroos y colaboradores [60] estudiaron la estabilidad del Keyhole, prescribiendo una geometría cilíndrica y concéntrica en la pieza de trabajo. Ellos solo consideraron la energía y el balance de presiones sin considerar el flujo de fluidos. Kaplan [61] propuso un modelo del Keyhole en soldadura de penetración calculando un balance de energía punto a punto, sin embargo en el estudio solo se consideró la transferencia de energía por conducción, sin tomar en cuenta la convección y el flujo de los fluidos. Dowden y Kaptia [62] sugirieron un modelo analítico simple basado en la inestabilidad inherente de la capacidad en la variación de la absorción del láser en la pieza de trabajo. Así mismo Lankalapalli y colaboradores [63], estimaron la penetración de soldadura basándose en un modelo bidimensional de transferencia de calor asumiendo una geometría cónica en el Keyhole. Matsunawa y Semak [64] simularon el comportamiento del Keyhole en el frente de la interface liquido/gas, ellos asumieron que solo la parte frontal del Keyhole estaba expuesta a la potencia de alta intensidad del rayo láser. Solana y Okana [65] desarrollaron un modelo en tres dimensiones para la predicción de la geometría del Keyhole, considerando la transferencia de calor, los efectos de pérdidas por evaporización y ablación, pero omitiendo el flujo de fluidos. Además Sudnik y colaboradores [66] en uno de sus trabajos encontraron una correlación lineal entre la penetración y la longitud del charco de soldadura a distintas densidades de potencia. En su modelo ellos usaron un método en el que se asumen y simplifican patrones de trayectorias entre las secciones planas de la zona de soldadura y se determinan de forma analítica las velocidades en base a consideraciones de continuidad. Fabbro and Chouf

[67] modelaron el Keyhole durante un proceso de soldadura láser, el modelo que desarrollaron estuvo basado en la velocidad de perforación del láser en la pieza que combinado con la velocidad de soldadura causaba una inclinación de la interface liquido/gas, frontal del Keyhole. Así mismo ellos analizaron de forma separada la interface frontal y trasera del Keyhole.

Sin embargo en todos los trabajos anteriores la validación de los modelos se realiza en laboratorios con un estricto control en las variables que interactúan con el proceso, y en su gran mayoría estos modelos fallan para proveer estimaciones precisas del proceso debido a que los modelos están simplificados y en ellos se asumen y se descartan variables que tienen un gran efecto en las características del Keyhole. El modelo propuesto en este trabajo será capaz de estimar la geometría (ancho y penetración) del Keyhole en aplicaciones industriales. El planteamiento del modelo matemático se presenta en el capítulo siguiente.

Capítulo 3

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3. 1. Planteamiento del modelo matemático

Para el desarrollo de la modelación matemática del proceso de soldadura láser por Keyhole, en este trabajo se parte de la ecuación de balance de calor, como se muestra a continuación.

En base a la ecuación de balance de calor tenemos dos flujos diferentes de energía, uno de tipo difusivo basado en los gradientes de temperatura y que está indicado en la ley de Fourier [68]:

$$\mathbf{q} = -K\nabla T \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde el gradiente de temperatura se puede expresar como:

$$\mathbf{q} = -K \left(\mathbf{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad \text{Ec. 3.2}$$

Al efectuar el balance el flujo de calor difusivo lo obtenemos mediante el operador divergencia aplicado al vector flujo, esto es:

$$\text{Entrada de calor} - \text{salida de calor} = -\nabla \cdot (-k\nabla T) \quad \text{Ec. 3.3}$$

Con lo que obtenemos:

$$\text{Entrada de calor} - \text{salida de calor} = K\nabla^2 T \quad \text{Ec. 3.4}$$

El otro tipo flujo de calor es convectivo debido a la velocidad con la que es transportado el calor, en este caso la velocidad de rayo durante la soldadura, la suma de estas dos flujos de energía debe ser igual al término de acumulación definido por la derivada con respecto al tiempo del calor almacenado en cualquier punto del dominio considerado. Si consideramos que no hay término de producción de calor en la zona adyacente a la cavidad del Keyhole y que tenemos estado estacionario, nuestro modelo lo podemos expresar como:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{v}{\kappa} \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{Ec. 3.5}$$

Donde los primeros dos términos representan las entradas y salidas del flujo difusivo de calor (flujo por conducción) considerando en este caso un transporte bidimensional, el tercer término nos indica el flujo convectivo de calor determinado por la velocidad de avance del rayo láser durante el proceso de

soldadura, este término queda afectado por el parámetro de κ (Kaplla) el cual es igual a la densidad por la capacidad calórica entre la conductividad:

$$\kappa = \frac{k}{\rho c} \quad \text{Ec. 3.6}$$

Para resolver la ecuación diferencial necesitamos definir dos condiciones de frontera, una de ellas definida en la periferia del rayo láser ($r = a$) y la condición en puntos alejados de la aplicación del rayo láser, estas condiciones son:

$$T = T_v \text{ en } x^2 + y^2 = a^2 \quad \text{Ec. 3.7}$$

y

$$T(x, y) = T_0 \text{ en } x, y \rightarrow \pm \infty \quad \text{Ec. 3.8}$$

Donde T_v es la temperatura de vaporización, que para casos prácticos en el Keyhole se considera mayor a la vaporización del material, ya que durante el proceso de soldadura la temperatura alcanza a ionizar los materiales que son sometidos al proceso de soldadura, esto genera el efecto plasma durante el proceso de la unión de los materiales [17].

La solución para esta ecuación con las condiciones de frontera dadas es [69]:

$$\frac{T_v - T}{T_v - T_0} = 1 - \exp(-Per^* \cos \theta) x \sum_0^\infty \epsilon_n \frac{I_n(Per)}{K_n(Per)} K_n(Per^*) \cos(n\theta) \quad \text{Ec. 3.9}$$

Donde Pe es el número de Peclet y es igual a $Pe = \frac{va}{2\kappa}$. y $r^* = \frac{r}{a}$. Cuando n es igual a 0, $\varepsilon_n = 1$ y para valores mayores o iguales a 1, $\varepsilon_n = 2$. I_n y K_n son funciones modificadas de Bessel de primero y segundo tipo.

Por medio de la ley de Fourier, con respecto al radio, se tiene

$$\mathbf{q} = -K \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad \mathbf{Ec. 3.10}$$

Y partiendo de la ecuación [66] podemos encontrar la potencia absorbida por unidad de profundidad (penetración de soldadura) alrededor del Keyhole formado, de esta manera tenemos:

$$P_z = \int_0^{2\pi} -k \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=a} a d\theta \quad \mathbf{Ec. 3.11}$$

Efectuando la correspondiente integración numérica y evaluación de la derivada obtenemos la potencia consumida en la cavidad del Keyhole, la cual esta expresada en:

$$P_2 = k (T_v - T_0) (2.1995 + 6.962Pe - 0.4994 Pe^2 + 0.0461Pe^3) \quad \mathbf{Ec. 3.12}$$

En la modelación matemática de este proceso es necesario calcular la densidad de potencia en los diferentes puntos de la superficie. Para las aplicaciones de soldadura láser continuo, por modo Keyhole, es común que esta densidad tenga una distribución gaussiana alrededor del círculo donde incide el rayo láser. Esta densidad de potencia la podemos expresar en la siguiente forma:

$$I(x, y) = \eta I_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_f^2}\right) \quad \text{Ec. 3.13}$$

Donde r_f es el radio del láser, $I_0 = P/\pi r_f^2$ y el coeficiente de absorción η está dado por:

$$\eta = 0.365 \left(\frac{R}{\lambda}\right)^{\frac{1}{2}} - 0.0667 \left(\frac{R}{\lambda}\right) + 0.006 \left(\frac{R}{\lambda}\right)^{\frac{3}{2}} \quad \text{Ec. 3.14}$$

Donde λ es la longitud de onda del rayo láser y R es la resistividad eléctrica del material.

El radio del láser en las diferentes profundidades de la soldadura del material se puede determinar mediante una relación lineal dada por:

$$r_k = r_{k0} \left(1 - \frac{z}{d}\right) \quad \text{Ec. 3.15}$$

Donde r_{k0} es el radio del Keyhole en la superficie y d es la penetración. Mediante esta última relación podemos encontrar la potencia suministrada en las diferentes profundidades en que incide el rayo láser dentro del material. El número de Peclet sigue una relación semejante a la del radio que podemos determinar mediante la ecuación

$$Pe(z) = Pe(0) \left(1 - \frac{z}{d}\right) \quad \text{Ec. 3.16}$$

Mediante esta ecuación podemos encontrar finalmente la potencia disipada en función de la profundidad Z , está la obtenemos al sustituir esta última ecuación en la fórmula de potencia:

$$P_z = k(T_v - T_0) (2.1995 + 6.962Pe(z) - 0.4994 Pe(z)^2 + 0.0461Pe(z)^3) \quad \text{Ec. 3.17}$$

Para determinar el ancho a una profundidad de penetración dada, se puede utilizar la fórmula que define al número de Peclet:

$$W_t = 2 \frac{2KPe(z)}{v} \quad \text{Ec. 3.18}$$

Podemos calcular mediante esta fórmula el ancho Keyhole en diferentes profundidades. Tomando una profundidad z podemos encontrar r_z y con esto obtener la tangente del ángulo, como se indica en la siguiente figura

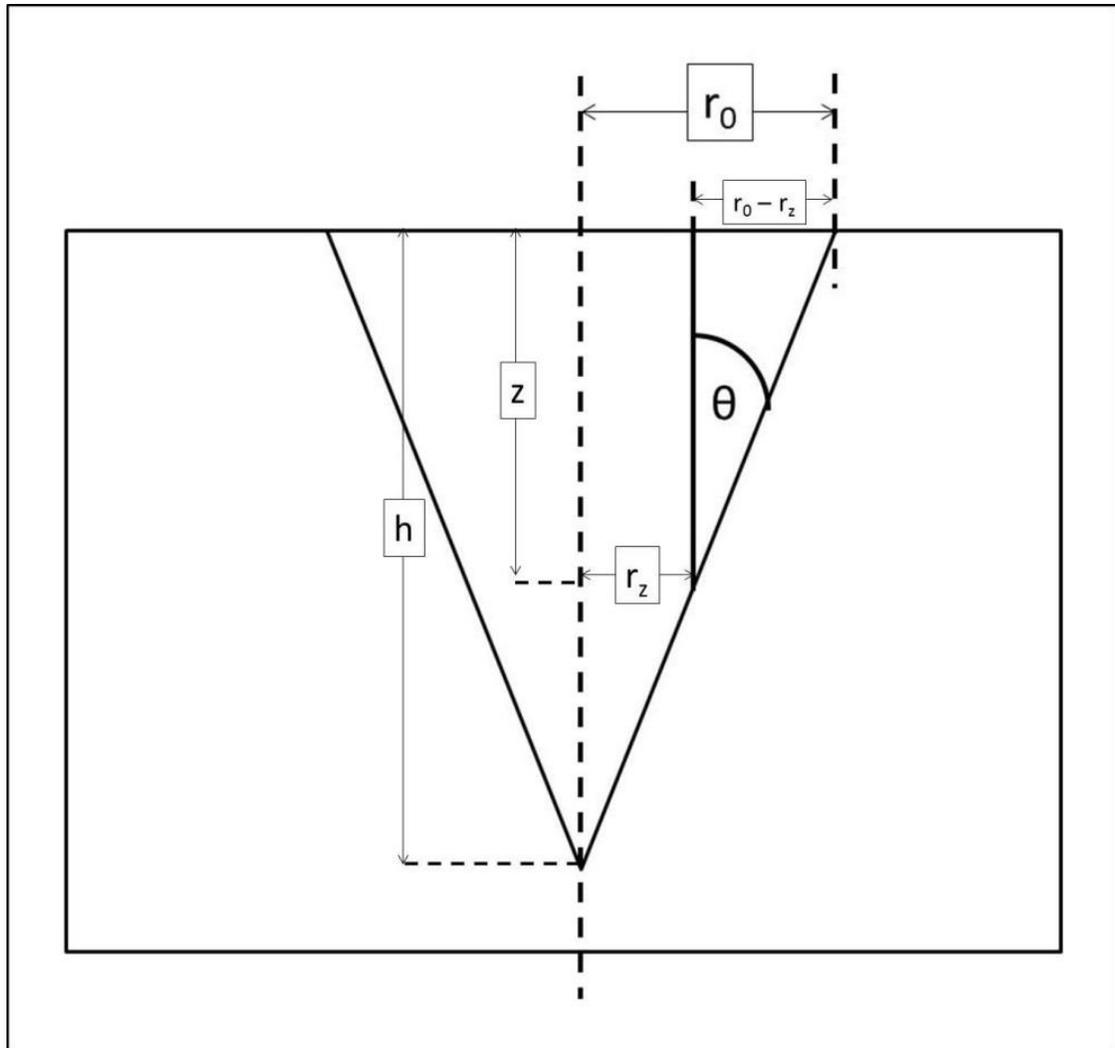


Figura 3.1. Esquema de parámetros del modelo matemático

La fórmula con la cual podemos obtener la tangente es:

$$\tan \theta = \frac{r_0 - r_z}{z} \quad \text{Ec. 3.19}$$

De la misma forma, por ser triángulos semejantes tenemos:

$$\tan \theta = \frac{r_0}{h} \quad \text{Ec. 3.20}$$

Donde

$$r_z = \frac{W_z}{2} \quad \text{Ec. 3.21}$$

y h es la profundidad del Keyhole la cual podemos obtener por medio de:

$$h = \frac{r_0}{\tan \theta} \quad \text{Ec. 3.22}$$

Alcance del modelo matemático en este trabajo

En el modelo matemático propuesto se considera que la geometría del Keyhole es cónica, debido a que en la soldadura de piezas con espesores mayores a 3 milímetros unidos con un cabezal de Óptica de Enfoque Programable “PFO”, como el utilizado en este trabajo, el láser presenta diferentes diámetros de spot a lo largo de la unión de soldadura, similar a un cono. Esto se puede observar en la siguiente figura.

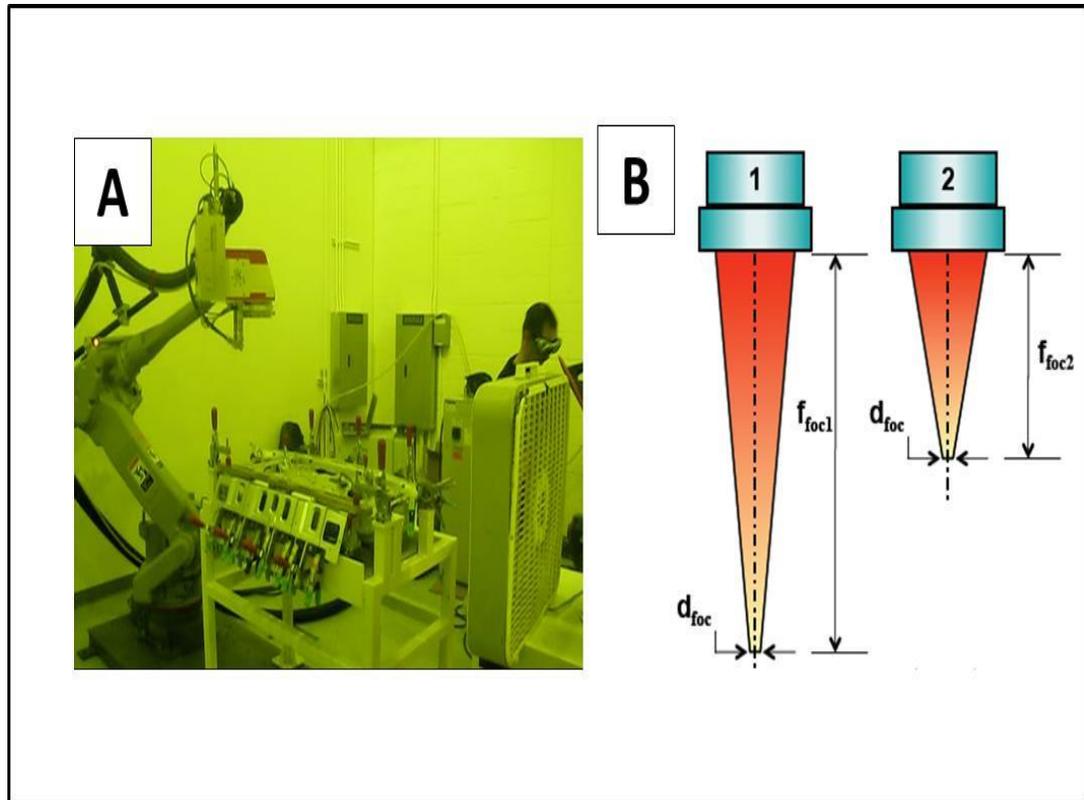


Figura 3.2. Aplicación utilizada en este trabajo. A) Cabezal con óptica de enfoque programable “PFO” y B) Aspecto del perfil del rayo láser

Finalmente en esta modelación se parte con la condición de que las densidades de potencia son mayores de 10^4 Watts/mm² (para materiales Clase 2, ver tabla 2.1), que son las que ocasionan el modo de soldadura por Keyhole. En el Keyhole calor generado en el material no puede ser evacuado por conducción solamente, por lo que parte de la energía crea un balance hidrostático entre la presión dentro de la cavidad del Keyhole y la presión que ejerce el líquido en la zona de fusión. En esta simulación la zona capilar del Keyhole que estuvo fue considerada con forma cónica, y los fenómenos considerados de transferencia de calor considerados, fueron la conducción y la convección (ver ecuación 3.5). Esto se puede observar con mayor claridad en la siguiente figura.

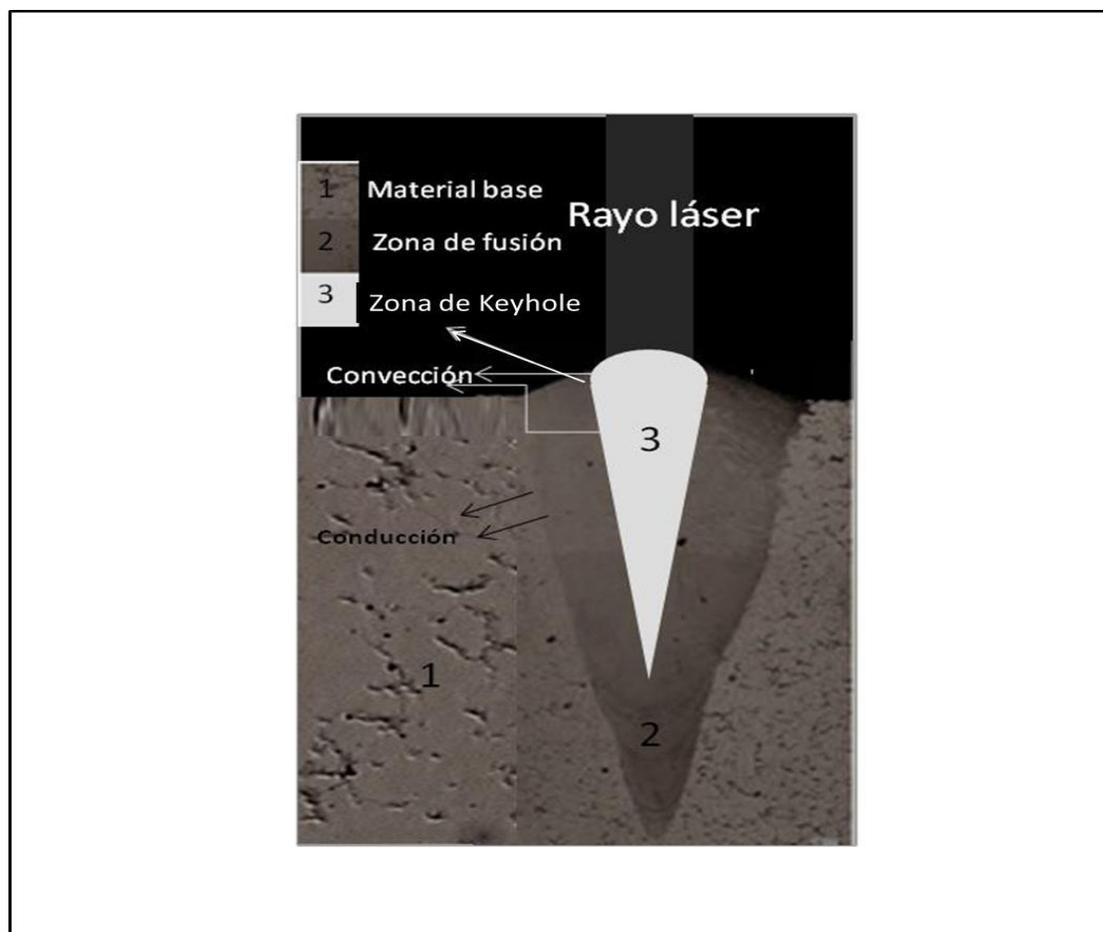


Figura 3.3. Fenómenos de transferencia de calor

3. 2. Caso de estudio uno

En el caso de estudio uno se realiza un análisis en el proceso de soldadura por láser continua utilizando un sistema de coordenadas CNC y un cabezal con óptica de enfoque programable de 3 dimensiones. Durante la experimentación se estudia la influencia de la potencia y la distancia focal en las características físicas de la unión de soldadura (penetración u ancho de zona de fusión de soldadura). Además se utiliza como método de optimización una superficie de respuesta.

A continuación se presentan los materiales y métodos utilizados para el proceso experimental de los dos casos de estudio propuestos en este trabajo.

3.2.1. Materiales y métodos

En esta sección se presentan los materiales, métodos y el desarrollo experimental utilizados en el caso de estudio uno, para el cual se realizaron las soldaduras a traslape en un material DP 600 DL con un láser continuo de 6600 watts y un cabezal de tres dimensiones con un sistema de óptica de enfoque programable montado a un eje de coordenadas de control en dos dimensiones.

Actualmente con la tecnología de los cabezales de soldadura láser con escáner, es posible lograr una alta productividad de piezas que contienen una gran cantidad de soldaduras [70].

El cabezal de soldadura utilizado (ver figura 3.4) para esta experimentación fue uno con óptica de enfoque programable con las siguientes características:

La tabla siguiente muestra las características del cabezal con óptica programable utilizado:

Tabla 3.1. Características del cabezal PFO 3D

Proveedor	TRUMPF	Espacio de trabajo	390x250
Modelo	f450 1370688	Distancia focal	666.4 mm \pm 2,5

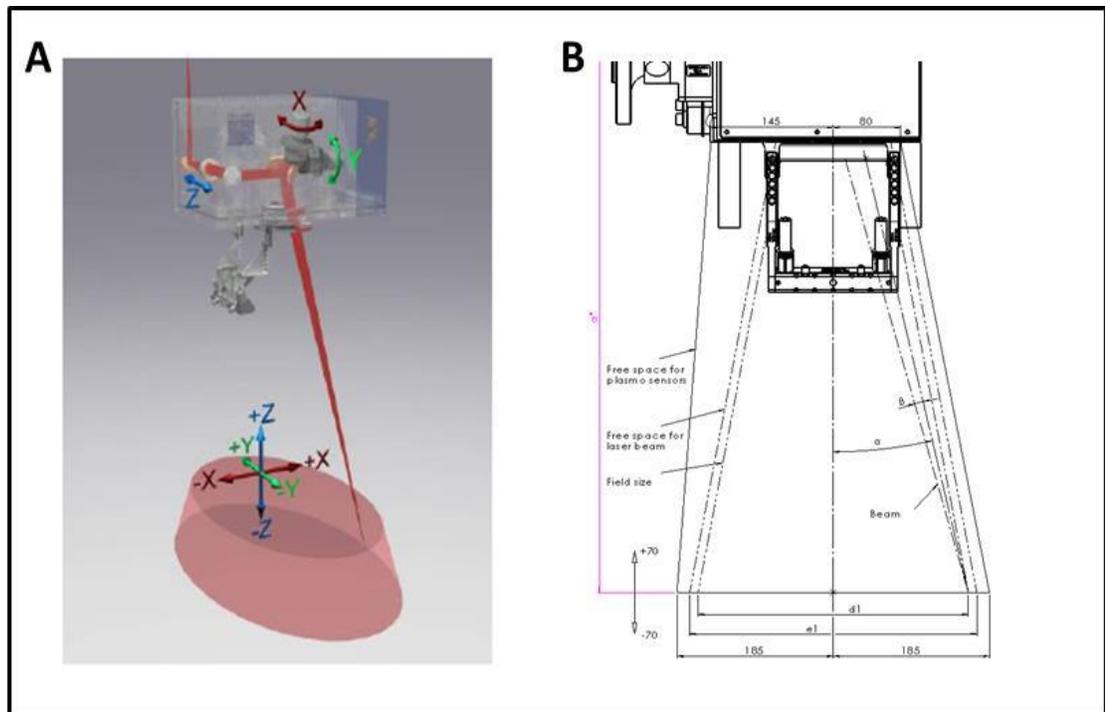


Figura 3.4. Cabezal de Óptica de Enfoque Programable PFO. A) Esquema de coordenadas [70], y B) Esquema dimensional de características del PFO [71]

Un parámetro muy importante es la distancia de trabajo del cabezal, ya que a una mayor distancia es posible lograr un espacio de trabajo mayor [80], y a su vez la óptica de protección estará más alejada del chisporroteo de la soldadura y sufrirá menos degradación, lo que conllevará menores pérdidas de potencia por el lente de protección.

Utilizar un PFO 3D conlleva muchas ventajas [70]. La siguiente figura muestra la comparación en los tiempos ciclos utilizando un cabezal de soldadura láser convencional y un PFO de 3 dimensiones.

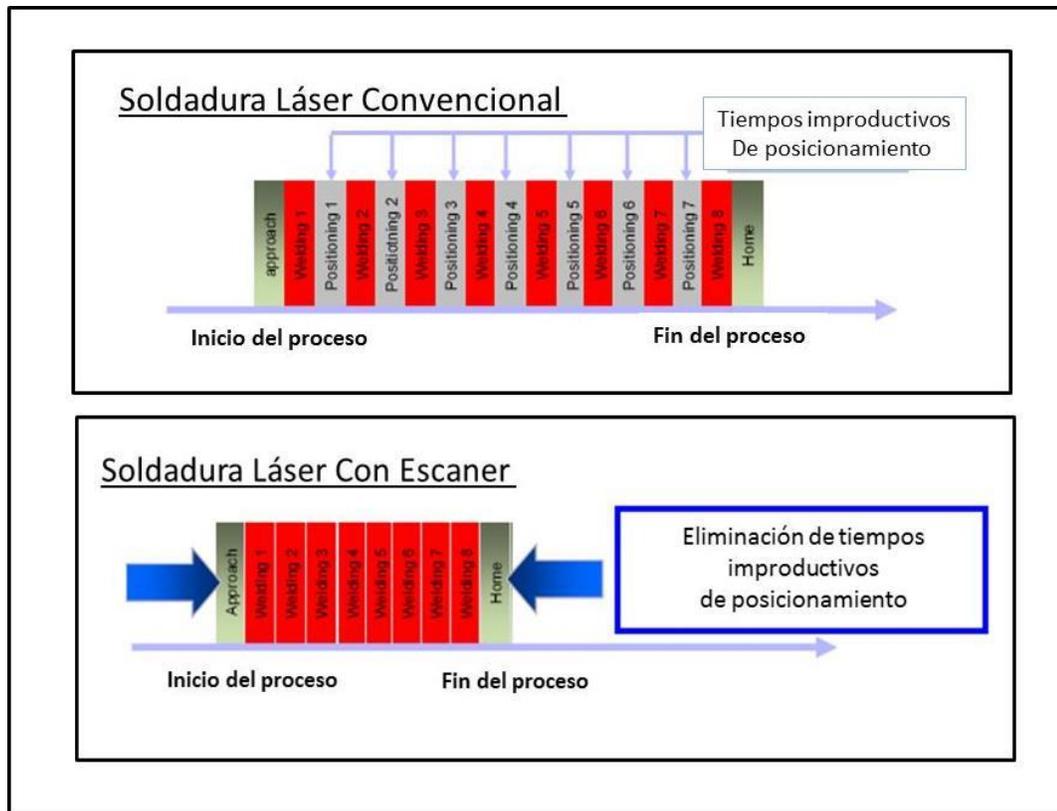


Figura 3.5. Ciclo de trabajo de soldadura: laser convencional, y laser con un PFO [70]

En la figura anterior se puede observar que el ciclo de trabajo utilizando este tipo de cabezal disminuye notablemente en más de un 100%, ya que no se requiere posicionar un robot o un sistema numérico de coordenadas, para lograr realizar formas geométricas y cordones de soldadura en áreas con restricción en el acceso.

El equipo utilizado para la generación del rayo láser en esta experimentación fue un láser modelo Trudisk 6602 manufacturado por TRUMPF, en el cual el medio activo es un cristal de Nd:YAG (cristal de Aluminio e Ytrio dopado con Neodimio) y el mecanismo de bombeo es un arreglo de fuentes de diodos láser de alta eficiencia. La siguiente figura muestra el equipo y sus características.



Figura 3.6. Equipo de soldadura láser TrudisK 6602 marca TRUMPF

Para la caracterización de la microestructura de las muestras, se utilizó un microscopio óptico modelo Olympus BX60M Olympus modelo SZX10 (Figura 4), acoplado a un software analizador de imágenes “Image Pro Plus”, a través de una cámara de video digital, este equipo se utilizó para realizar las mediciones de las características físicas macroestructurales en la soldadura. Antes del desarrollo del análisis experimental las muestras fueron preparadas a un acabado espejo siguiendo la estándar ASTM E3-11 [78].



Figura 3.7. Análisis por microscopía. Estereoscopio Olympus SZX10

La composición química de los aceros utilizados para la soldadura fue obtenida mediante el método por detección infrarroja. La composición química se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3.2. Composición química de las placas para soldadura en % de masa

	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr+Mo	Nb+Ti	V	B
Placas de soldadura	0.12	0.35	1.8	0.02	0.005	0.04	0.68	0.007	0.04	0.0004
Estandar DIN 10338	≤0.17	≤0.80	≤2.20	≤0.08	≤0.015	≤2.0	≤1.00	≤0.015	≤0.17	≤0.17

En la tabla anterior se observa que la composición química de las placas utilizadas para la soldadura por láser está dentro de la especificada por el estándar DIN 10338 [72] para un acero de doble fase DP 600 DL; donde el número 600 expresa la resistencia última a la tensión y el DL indica que la relación: resistencia última a la tensión/resistencia a la cedencia, es menor a 0.70.

En la experimentación se utilizaron 2 placas DP 600 DL en una configuración de soldadura a traslape. Los calibres de las placas utilizadas fueron: La placa superior: 2.5 mm, y la placa inferior: 3 mm. En la siguiente figura se muestra el esquema en la sección transversal del proceso de soldadura.

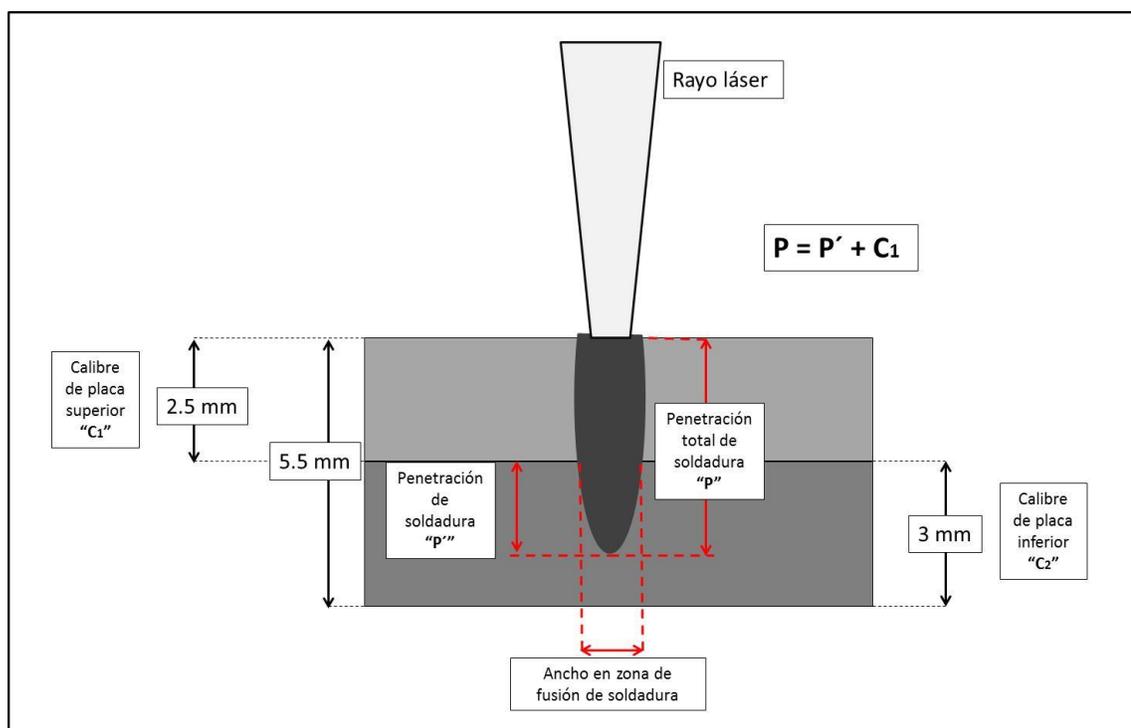


Figura 3.8. Esquema en las pruebas de soldadura a traslape

En la figura anterior se puede observar la configuración a traslape utilizada durante la experimentación. Además en la figura se observan las principales características de control para garantizar la integridad mecánica en la soldadura, que son la penetración y el ancho en la zona de fusión en la unión de soldadura. Así mismo es importante mencionar que los esfuerzos resultantes que se generaran en la pieza soldada, durante su aplicación, incurrieran en la zona de fusión de la soldadura, que depende de la penetración física en la placa inferior y el ancho de la zona de fusión de soldadura, por lo que la penetración total no es una característica fundamental para la integridad de la soldadura, es más importante la penetración física en la placa inferior P' .

Los principales parámetros de soldadura que influyen en las características antes mencionadas, son la potencia, la velocidad y la distancia focal del láser.

Además otra característica importante en la resistencia de una unión de soldadura es que exista al menos la misma resistencia mecánica en el material base, la zona de soldadura y la zona afectada térmicamente. Para valorar esta característica, en este trabajo se evaluó la microestructura en las tres zonas, una vez que se obtuvieron los parámetros óptimos de potencia y distancia focal.

A continuación se presenta el planteamiento experimental que comprende el estudio de estos parámetros.

3.2.2. Desarrollo experimental

En este caso de estudio se analizó el efecto que tiene la velocidad y la distancia focal en la penetración y el ancho de soldadura láser en la unión a traslape de placas de acero DP 600 DL, a una velocidad de soldadura constante. La siguiente tabla muestra los niveles de los parámetros estudiados.

Tabla 3.3. Niveles en el diseño experimental para el caso de estudio uno

	Nivel bajo	Nivel alto
Potencia	6000 Watts	6500 Watts
Distancia Focal	5 mm	10 mm

Se utilizó un diseño experimental de superficie de respuesta del tipo central compuesto, con dos bloques, 6 puntos axiales, y con un total de 14 muestras. Este tipo de diseño fue propuesto con la finalidad de optimizar los parámetros o

factores de potencia y distancia focal para lograr la penetración y ancho requeridos en la soldadura. La descripción del diseño se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.4. Descripción del diseño propuesto

Factores: 2	Réplicas: 1
Corridas base: 14	Total de corridas: 14
Bloques base: 2	Total de bloques: 2

Así mismo la tabla resultante del diseño experimental fue la siguiente:

Tabla 3.5. Diseño experimental del caso de estudio uno

# muestra	Bloque	Potencia (W)	Distacia Focal (mm)
1	1	6000.00	5.00
2	1	6500.00	5.00
3	1	6000.00	10.00
4	1	6500.00	10.00
5	1	6250.00	7.50
6	1	6250.00	7.50
7	1	6250.00	7.50
8	2	5896.45	7.50
9	2	6603.55	7.50
10	2	6250.00	3.96
11	2	6250.00	11.04
12	2	6250.00	7.50
13	2	6250.00	7.50
14	2	6250.00	7.50

Para realizar esta experimentación se consideró como variable constante la velocidad de soldadura. La velocidad de soldadura utilizada para todas las muestras fue de **48 mm/seg**

Así mismo la geometría de soldadura utilizada en las muestras, fue de semi-círculos, como se muestra en la Figura 3.9, esta geometría es usada con la finalidad de aumentar la longitud del cordón de soldadura e incrementar la resistencia mecánica del ensamble, y además lograr tener más control en la apertura y cierre de la cavidad del Keyhole [73].



Figura 3.9. Geometría utilizada en la soldadura a traslape

Así mismo, para el análisis y las mediciones de la soldadura, en todas las muestras los cortes en la sección transversal fueron realizados en la misma posición (ver Figura 3.9), siempre descartando el inicio y el final de la soldadura, que son las zonas de control para la reflexión del láser que se presenta durante la apertura y cierre del Keyhole [73]. En estas zonas se realiza una modulación de la potencia con la finalidad de disminuir el chisporroteo al inicio de la

soldadura y la concavidad ocasionada por el cierre de la cavidad del Keyhole, al final de la soldadura.

En la siguiente sección se presentan los materiales, métodos y desarrollo experimental del caso de estudio número dos.

3. 3. Caso de estudio dos

En este caso de estudio se realiza un análisis en el proceso de soldadura por láser continua utilizando un sistema con un robot de alta precisión marca ABB y un cabezal con óptica de enfoque programable de dos dimensiones marca TRUMPF. En la Figura 3.10, se observa la integración realizada para la aplicación de soldadura.

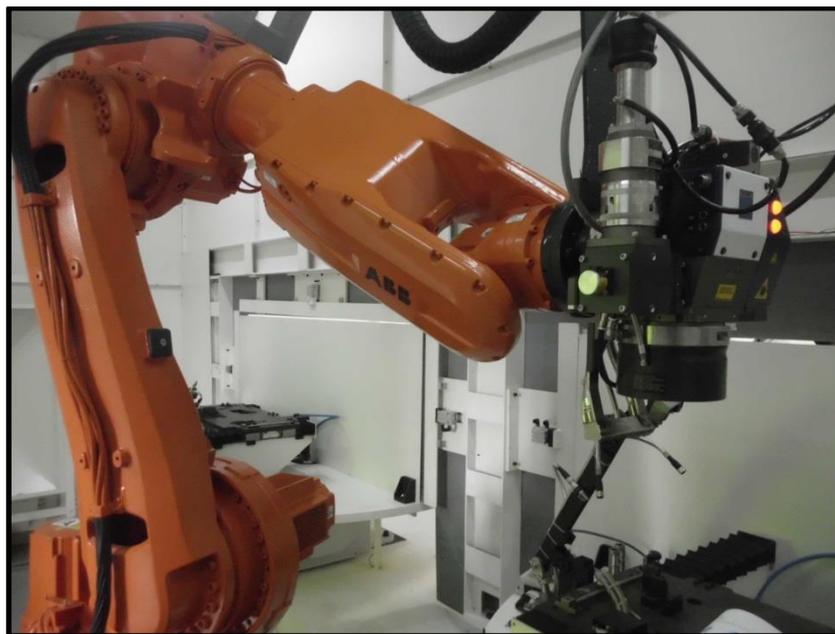


Figura 3.10. Integración de los equipos para la soldadura del caso de estudio 2

Para la experimentación se planeó analizar la influencia que tienen la velocidad de barrido del láser y la potencia, en las características físicas de la unión de soldadura (penetración y ancho de soldadura). Además se utilizó como método de optimización de los parámetros una superficie de respuesta. Finalmente en este capítulo se valida el modelo estadístico y el modelo matemático que se planteó con anterioridad.

3.3.1. Materiales y métodos

La soldadura láser remota consiste en utilizar un cabezal PFO y un robot de alta precisión, para realizar uniones de soldadura por láser. Este proceso ofrece un sinnúmero de ventajas para niveles altos producción de piezas automotrices que requieran alta calidad e integridad mecánica en la unión soldadura [75]. Además de tener un ciclo de trabajo menor, el proceso de soldadura láser remota utilizando un PFO tiene mayor precisión y flexibilidad que otros procesos de soldadura, como se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 3.6. Comparación de los procesos de soldadura láser [70]

	Soldadura laser convencional	Soldadura laser remota con PFO	Soldadura laser remota
Ciclo de trabajo	1	3	2
Precisión	3	3	2
Accesibilidad	1	3	3
Flexibilidad	2	3	3
Dificultad en la programación	2	1	2
Inversión económica	3	2	3
Mantenimiento	3	2	3

1 = Pobre, 2 = Medio, 3 = Bueno

Así mismo la siguiente figura muestra las diferencias en la aplicación de los procesos de soldadura láser que se compararon en la Tabla 5.2.

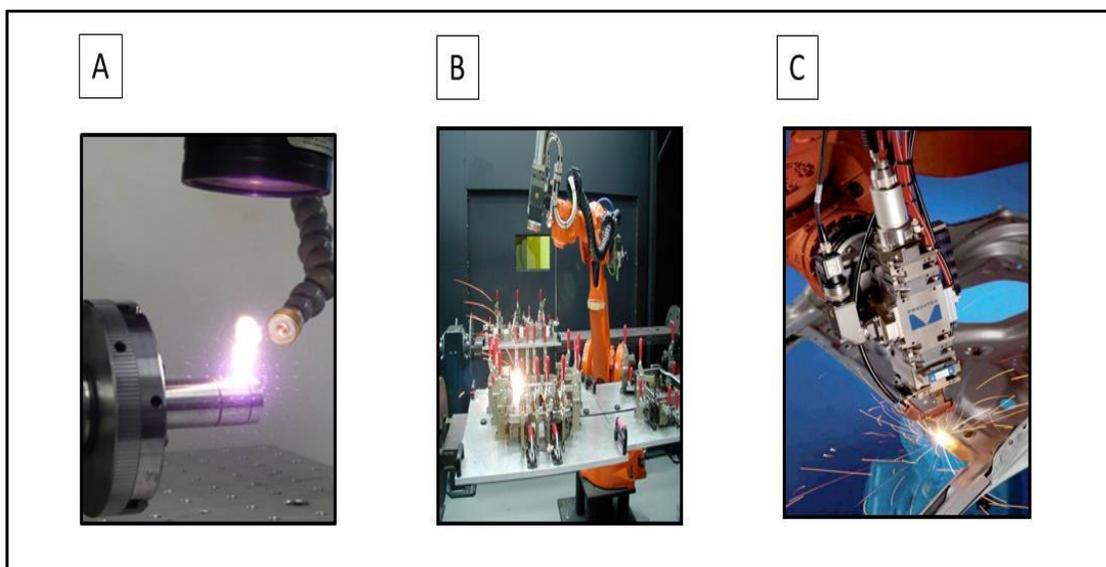


Figura 3.11. Diferencias en la aplicación de los procesos de soldadura láser A) Soldadura convencional por láser, B) Soldadura láser remota con cabezal PFO y C) Soldadura láser convencional con robot [70]

Para la experimentación se utilizó la configuración que se presenta en la Figura 3.11B. Además el tipo de unión fue a traslape, que es el mismo utilizado en el caso de estudio número 1.

Para la soldadura láser de los componentes, se utilizó un láser de disco de diodos, con una potencia de 8 Kilowatts marca TRUMPF, modelo TruDisk 8002, además se empleó un cabezal de soldadura PFO de dos dimensiones marca TRUMPF, modelo PFO33, montado en robot de alta precisión de seis ejes marca ABB modelo IRB 2400/16 con un controlador IRC5. En las siguientes figuras se describen las características de los equipos antes mencionados.

Las características del láser TruDisk 8002 se muestran en la Figura 3.12.

	TruDisk 8002
Longitud de onda	1030 nm
Potencia del láser	8000 W
Potencia del láser (con rearme)	
Calidad del haz	8 mm•mrad
Diámetro mínimo del cable de luz láser	200 µm
Constancia de potencia referida a la potencia del láser	± 1 %
Margen de temperatura del agua de refrigeración	5 °C - 20 °C
Dimensiones	
▪ Anchura	1990 mm
▪ Altura	1550 mm
▪ Profundidad	1200 mm

Figura 3.12. Características del equipo láser TRUMPF de 8 KW

El Robot utilizado y el cabezal PFO de soldadura láser de dos dimensiones se muestran en la figura siguiente.

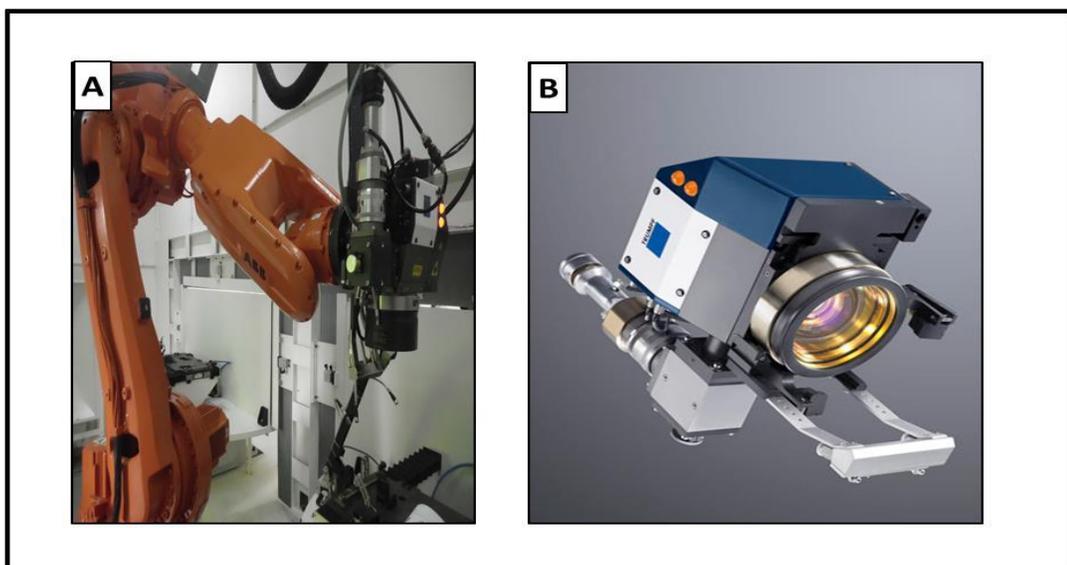


Figura 3.13. A) Robot ABB IRB 2400/16 y B) Cabezal de soldadura PFO33

El PFO está disponible para su uso en máquinas TRUMPF de soldadura continua y pulsada de láseres de estado sólido. Solo pueden ser acopladas fibras TRUMPF, tiene un colimador integrado y los movimientos son programados a través una interfaz de software nombrada “Trucontrol 1000”, con la cual se controlan de forma automática los movimientos de los lentes reflectores internos y así se pueden lograr soldaduras con gran precisión a altas velocidades [79].

Para la caracterización de la microestructura de las muestras, se utilizó un microscopio óptico modelo Olympus BX60M, acoplado a un software analizador de imágenes “Image Pro Plus”, a través de una cámara de video digital (Figura 3.14A). Además se utilizó un estereoscopio Olympus modelo SZX10 (Figura 3.14B), este equipo se utilizó para realizar las mediciones de las características físicas macroestructurales en la soldadura. Antes del desarrollo del análisis experimental las muestras fueron preparadas a un acabado espejo siguiendo la estándar ASTM E3-11 [78].

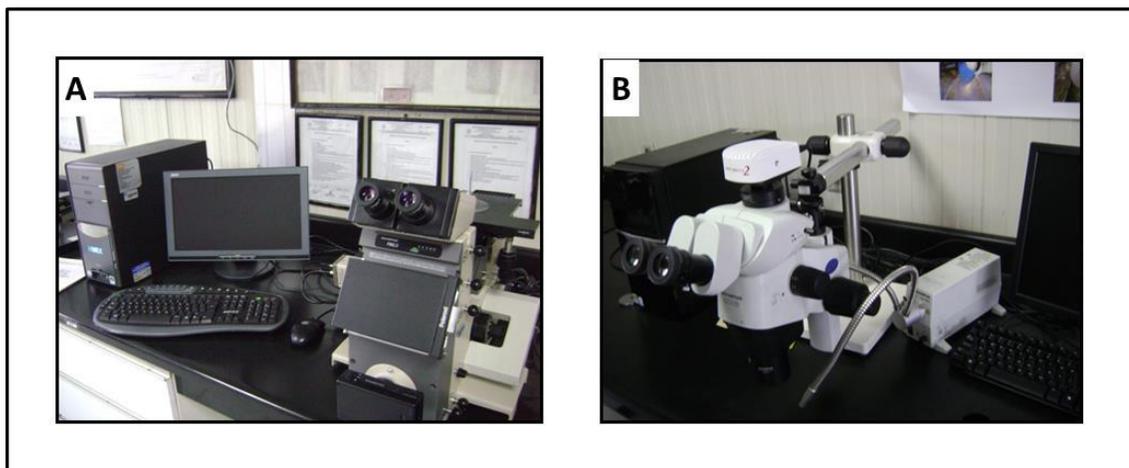


Figura 3.14. Análisis por microscopía, A) Microscopio óptico Olympus BX60M, y B) Estereoscopio Olympus SZX10

La composición química de los materiales utilizados para la soldadura se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3.7. Composición química de las placas para soldadura, medida en % de masa

	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr+Mo	V	B
Placas de soldadura	0.19	0.95	2.7	0.06	0.01	1.15	1.38	0.14	0.004
Estandar VDA 239-100:2011	≤0.20	≤1.00	≤2.90	≤0.08	≤0.015	≤0.015-2.00	≤1.40	≤0.20	≤0.005

La composición química corresponde a un acero DP1000 CR de acuerdo a la estándar Alemana VDA 239-100:2011 [76]. Así mismo para la validación del material, se realizaron pruebas de tensión siguiendo la norma ASTM E8 / E8M – 13a [77]. Un total de tres probetas fueron evaluadas a tensión. La Tabla 3.8 presenta los resultados. En esta tabla se hizo una comparación entre el requerimiento de la norma y el promedio de las tres probetas.

Tabla 3.8. Prueba de esfuerzo a la tensión en las placas para soldadura [76]

	Dirección de la prueba	Limite de cedencia (MPa)	Resistencia a la tensión (MPa)	Elongación (%)
Material de las placas de soldadura	L	687	1005	12.4
Estándar VDA 239-100:2011	L	590-740	980-1130	10 min

Como se observa en la tabla anterior, las propiedades de las placas, obtenidas en la prueba de tensión, corresponden a un material DP 1000 CR.

Una vez que se validaron los materiales utilizados para la experimentación, se seleccionó la geometría de soldadura. En la Figura 3.15 se observa la geometría utilizada para esta experimentación.



Figura 3.15. Geometría de soldadura seleccionada en caso de estudio 2

En la figura anterior se observa que la geometría utilizada fue lineal con una configuración a traslape. Los cortes para el análisis macroestructural de las muestras fueron realizados en el centro de la unión, descartando al menos 5 mm al inicio y 5 milímetros al final del cordón de soldadura para realizar el corte en la soldadura efectiva. El diagrama de la Figura 3.16 esquematiza la zona de soldadura efectiva.

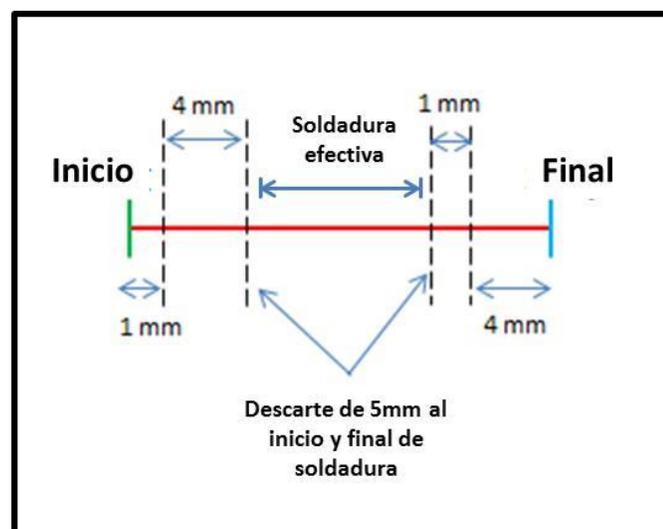


Figura 3.16. Esquematación de la zona de soldadura efectiva en una unión de soldadura por láser

De la figura 3.16, se puede deducir que al menos una soldadura por láser debe tener 10mm de descarte más la porción de soldadura efectiva requerida para soportar las cargas para la que fue diseñada, para el caso de esta experimentación la longitud de la soldadura utilizada fue de 22 mm, ya considerando la zona de descarte y la soldadura efectiva.

Además otra característica importante en la resistencia de una unión de soldadura es que exista al menos la misma resistencia mecánica en el material base, la zona de soldadura y la zona afectada térmicamente. Para valorar esta característica, en este trabajo se evaluó la microdureza en las tres zonas, utilizando un microdurómetro FUTURE-TECH FM7 (Figura 3.17), este ensayo fue realizado en las muestras, una vez que se obtuvieron los parámetros óptimos de potencia y velocidad de soldadura.



Figura 3.17. Microdurómetro FUTURE-TECH FM7

Así mismo, cabe mencionar que los ensayos de dureza en las muestras se hicieron siguiendo la norma ASTM E384-10 [74], la cual describe las

consideraciones y métodos que se deben de seguir en un ensayo de microdureza.

En la siguiente sección se describe el desarrollo experimental utilizado en este caso de estudio.

3.3.2. Desarrollo experimental

En este caso de estudio mediante un diseño de experimentos del tipo superficie de respuesta, se analizó el efecto que tiene la potencia y la velocidad de soldadura en la penetración y el ancho de soldadura láser en la unión a traslape de placas de acero DP 1000 CR, a una distancia focal constante. La siguiente tabla muestra los niveles de los parámetros estudiados.

Tabla 3.9. Niveles de potencia y velocidad de soldadura en el DOE

	Nivel bajo	Nivel alto
Potencia	7500 Watts	8000 Watts
Velocidad	55 mm	60 mm

La tabla que se derivó del diseño experimental con los niveles planteados fue la siguiente:

Tabla 5.5. Diseño experimental del caso de estudio dos

# muestra	Bloque	Potencia	Velocidad
1	1	7500	55
2	1	8000	55
3	1	7500	60
4	1	8000	60
5	1	7750	57.5
6	1	7750	57.5
7	1	7750	57.5
8	2	7396.44661	57.5
9	2	8103.55339	57.5
10	2	7750	53.96446609
11	2	7750	61.03553391
12	2	7750	57.5
13	2	7750	57.5
14	2	7750	57.5

Así mismo para garantizar que la distancia focal fuera constante durante la experimentación se tomaron mediciones durante la soldadura de las muestras. El fabricante del cabezal en las especificaciones ópticas señala que la distancia de focalización entre la aplicación y lente de protección es de 450 mm [79], a esta distancia el láser está en su punto de focalización, en el cual se tiene la mayor densidad de potencia. La siguiente figura muestra un esquema para la medición de la distancia focal en el PFO 33.

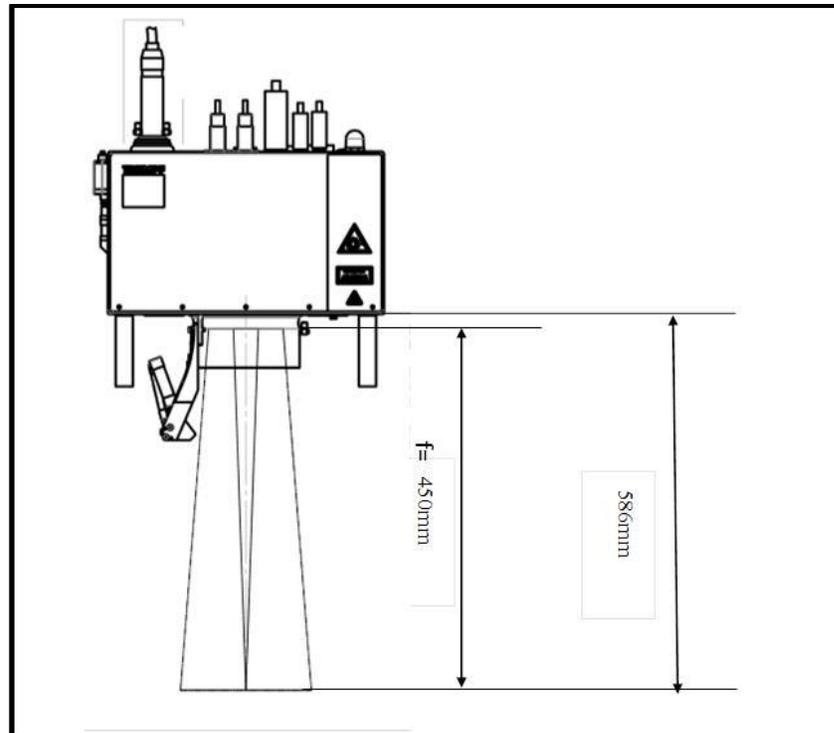


Figura 3.18. Esquema para la medición de la distancia focal [79]

Esta distancia se midió y validó antes de realizar las muestras de soldadura a una distancia focal constante, se utilizó un desenfoque positivo de 6.3, ya que durante la optimización del caso de estudio uno se encontró que con esta distancia focal se puede garantizar un ancho de la zona de fusión cercano a 1.15 mm, lo cual representa más de un 35% de factor de seguridad sobre el requerimiento de la especificación de soldadura láser aplicada en este trabajo.

La medición de la distancia focal de +6.3 milímetros que se realizó antes de la soldadura de las muestras, se puede observar con mayor claridad en la figura 3.19.



Figura 3.19. Medición y validación de la distancia focal

Así mismo se hizo una revisión de la inclinación del cabezal PFO, utilizando un nivel, para asegurar que la incidencia del láser fuera a una inclinación y una distancia focal constante a lo largo de la soldadura de cada una de las muestras (ver Figura 3.20).



Figura 3.20. Medición de la inclinación en la incidencia del láser y la alineación del cabezal PFO

Además para garantizar que no hubiera pérdidas de potencia en la óptica del láser y en la del cabezal, se realizó una impresión del perfil espacial de la distribución del láser en un papel fotográfico especial proveído por TRUMPF. Para realizar esta impresión se disparó el láser en un pulso de 10 milisegundos con una potencia de 3000 watts.



Figura 3.21. Impresión del perfil espacial de la distribución de la potencia del láser

En la Figura 3.21 se observa una distribución homogénea de la potencia a lo largo del área en la que fue enfocado el láser. Así mismo en la distribución se observa un alto grado de circularidad, lo cual también indica que el proceso de alineación del sistema fue el correcto.

En el siguiente capítulo se presentan y discuten los resultados experimentales y la optimización de los parámetros mediante la modelación estadística y el modelo matemático.

Capítulo 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados y discusión: Caso de estudio 1

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en las muestras de soldadura en el caso de estudio 1; primeramente se analiza el efecto que tienen los factores propuestos, en las variables de penetración y en el ancho de fusión de la zona de soldadura, posteriormente se realiza una optimización de los parámetros mediante un modelo estadístico, para después realizar una validación mediante la soldadura de una muestra optima, la cual es sometida a una caracterización microestructural enfocada a evaluar la presencia de fases susceptibles a el debilitamiento de la unión de soldadura. Finalmente en esta sección se presenta la validación del modelo matemático propuesto en el capítulo anterior.

4.1.1. Características físicas de las muestras de soldadura

Penetración de soldadura

La siguiente tabla muestra los resultados de penetración y ancho de la zona de soldadura de cada una de las muestras.

Tabla 4.1. Resultados experimentales del caso de estudio uno

# muestra	Potencia (W)	Distancia Focal (mm)	Penetración (mm)	Ancho (mm)
1	6000.00	5.00	1.12	1.09
2	6500.00	5.00	1.6	1.01
3	6000.00	10.00	0.54	1.52
4	6500.00	10.00	1.26	1.48
5	6250.00	7.50	1.22	1.24
6	6250.00	7.50	1.15	1.26
7	6250.00	7.50	1.21	1.26
8	5896.45	7.50	0.6	1.26
9	6603.55	7.50	1.8	1.23
10	6250.00	3.96	1.52	0.89
11	6250.00	11.04	0.91	1.58
12	6250.00	7.50	1.2	1.23
13	6250.00	7.50	1.24	1.21
14	6250.00	7.50	1.2	1.23

Al observar la Tabla 4.1., es difícil encontrar una correlación de los factores en la variable de respuesta, sin embargo en la siguiente figura se muestra la gráfica de contornos de la penetración en contra de la potencia y la distancia focal (Figura 4.1) de los resultados obtenidos en la experimentación mostrados en la Tabla 4.1. En esta gráfica se puede observar con mayor claridad la

influencia de estos parámetros en la variable de respuesta de penetración de soldadura.

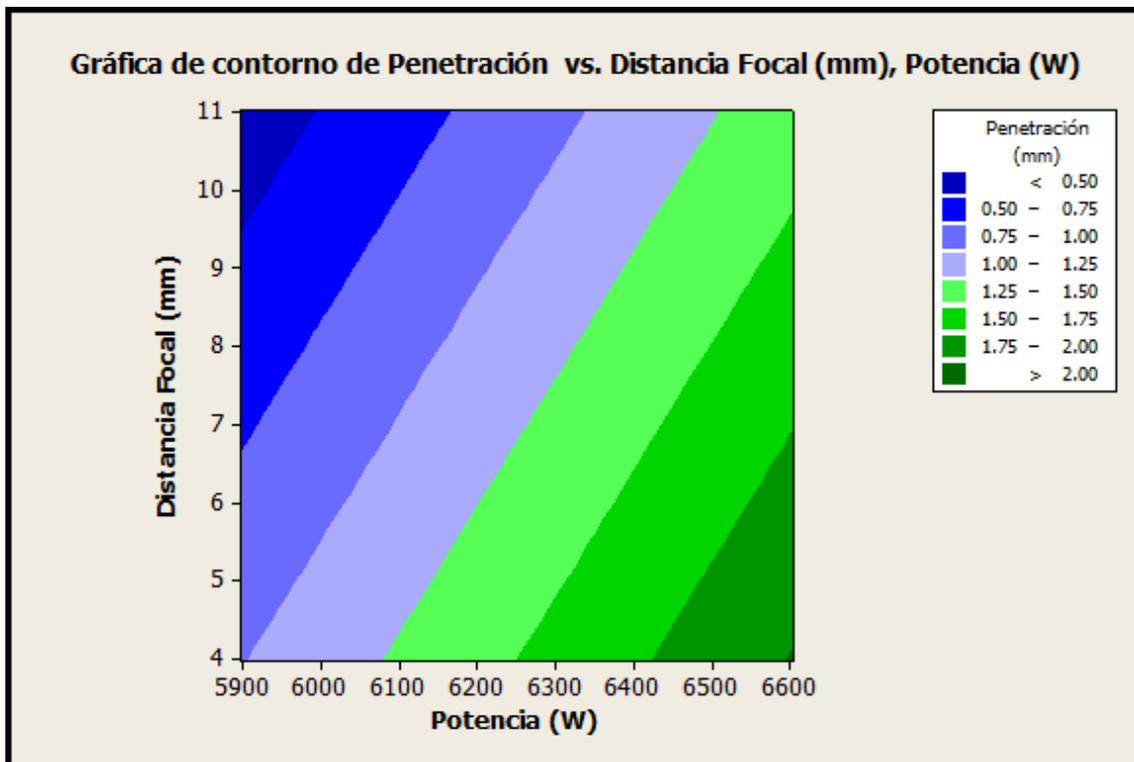


Figura 4.1. Grafica de contornos de la penetración de la soldadura contra la distancia focal y la potencia

Como se puede observar en la figura anterior, los dos factores tienen una influencia notable en la penetración física de la soldadura, ya que el incremento o disminución de alguno de ellos causa una variación directa en el rango de penetración que se puede lograr en la pieza. La potencia tiene un efecto que es directamente proporcional a la penetración, sin embargo la distancia focal tiene un efecto contrario, que es inversamente proporcional a la penetración de soldadura. En la bibliografía existen casos de estudios con la misma tendencia e influencia de estos parámetros, en aceros inoxidables AISI 304, con la diferencia de que la soldadura se realizó con un láser de fibra de 10 kilowatts con BPP (Beam Parameter Product) o calidad del rayo 4.5 mm* $mrad$, con

diferentes distancias focales [82]. El láser utilizado en esta experimentación tiene una calidad de rayo muy similar, de $8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (ver Figura 3.6).

En la figura siguiente se observan los cortes transversales en las uniones de soldadura por láser a traslape de esta experimentación:

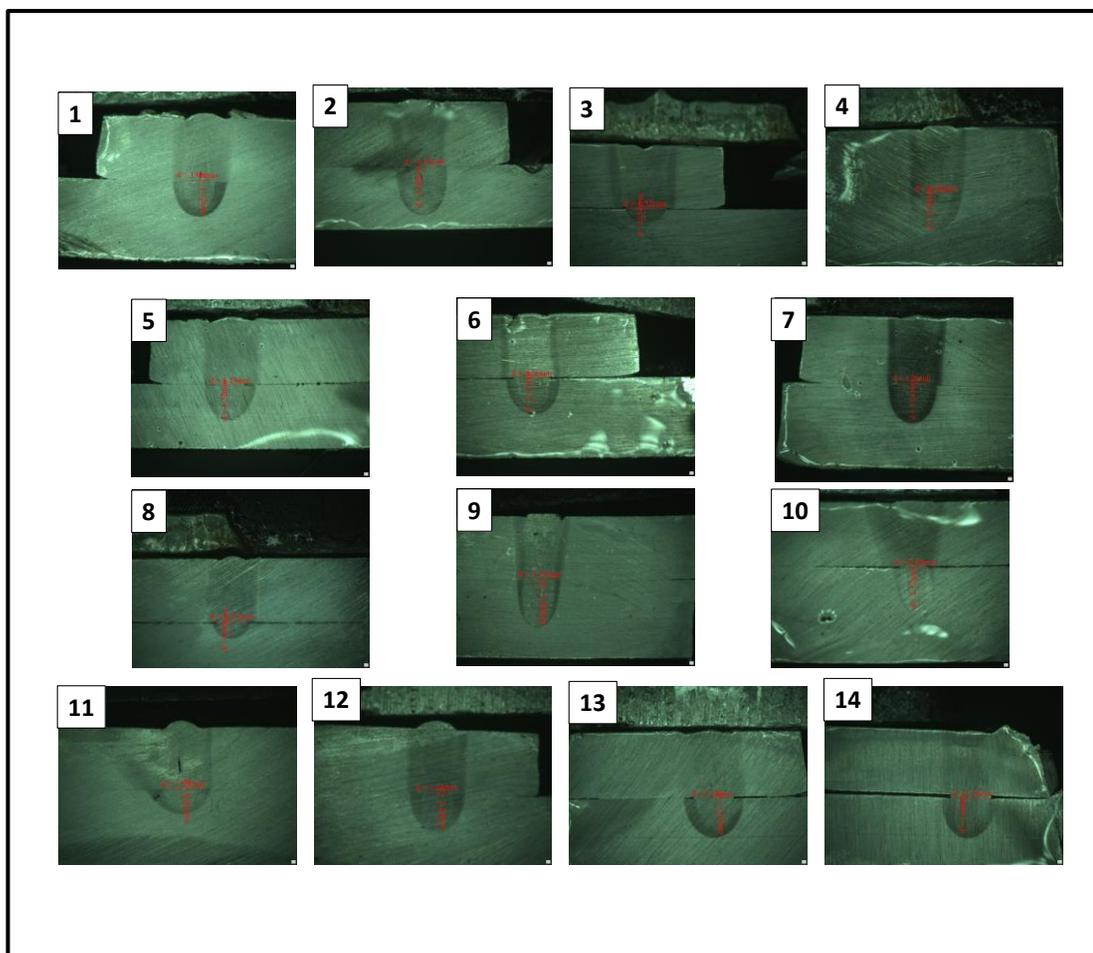


Figura 4.2. Macrografía del corte transversal de las muestras de soldadura láser a diez magnificaciones (10X)

Claramente en la figura 4.8 se observa que cada una de las muestras difiere en ancho y penetración física en la unión de soldadura. Un parámetro que correlaciona los factores o parámetros analizados en este caso de estudio, en

un proceso de soldadura por láser, es la densidad de potencia, la cual está dada por la siguiente ecuación:

$$I = \frac{P}{A} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde I es la densidad de potencia (watts/mm²), P es la potencia (watts) y A es el área transversal del rayo láser enfocado en el material (mm²).

Partiendo de la ecuación 4.1, y para realizar un análisis con menor complejidad en las muestras, estas se ordenaron en función de la densidad de potencia, como lo muestra la siguiente gráfica:

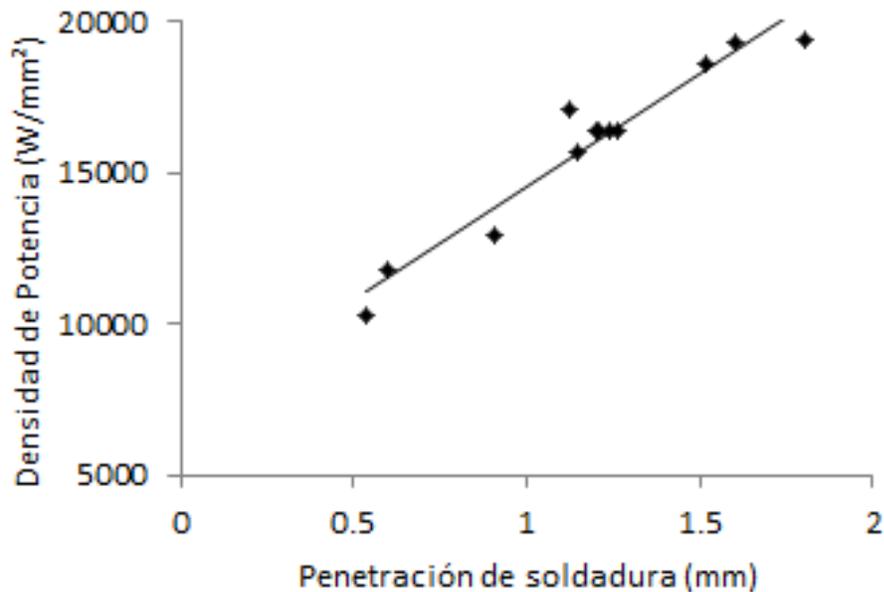


Figura 4.3. Grafica del comportamiento de la penetración de soldadura en función de la densidad de potencia

En la Figura 4.9 se puede observar que la penetración de soldadura para los parámetros utilizados en esta experimentación, tiene una tendencia lineal con respecto a la densidad de potencia. Por definición, la densidad de potencia es la potencia del láser concentrada en la superficie de las piezas de soldadura por unidad de área [15-17, 31,32], es por eso que en la figura anterior la penetración es mayor cuando la concentración de densidad de potencia se incrementa, ya sea con una disminución en la distancia focal, la cual provoca un decremento en el diámetro focal del spot del láser, o con un incremento en la potencia suministrada por la fuente láser.

Además para realizar un estudio con mayor claridad del comportamiento de la penetración y el ancho de la zona de fusión de las probetas de soldadura, a continuación se realizara un análisis de las muestras más significativas obtenidas durante el desarrollo experimental de soldadura. Las muestras fueron separadas en las figuras 4.4, 4.8 y 4.9, y ordenadas ascendentemente por la densidad de potencia a la que fueron soldadas, esto con la finalidad de facilitar su análisis.

En la Figura 4.4 se muestra el primer grupo de muestras de soldadura, las cuales fueron soldadas con menor densidad de potencia que el resto de las muestras.

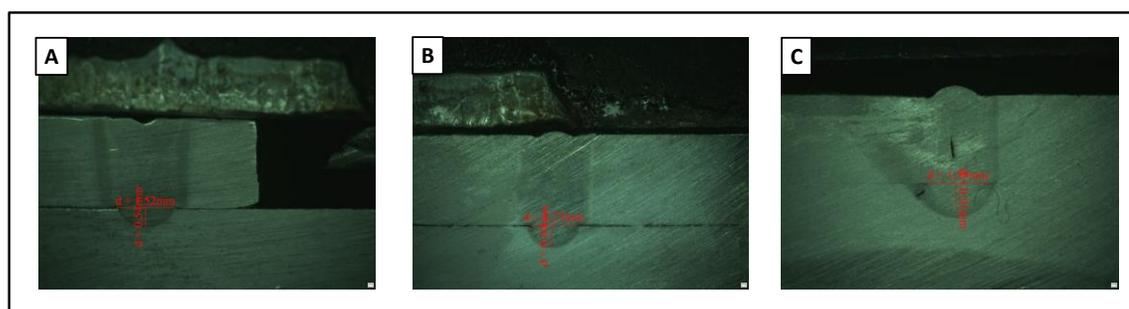


Figura 4.4. Muestras de soldadura (10x). A) Muestra 3, Densidad de potencia: 10,332 W/mm², B) Muestra 8, Densidad de potencia: 11,777 W/mm², y C) Muestra 11, Densidad de potencia: 12961 W/mm²

En la Figura 4.4, las muestras presentan un nivel de penetración de soldadura bajo, causado por una baja intensidad en la densidad de potencia. La muestra 3 y 8 que se ilustran en la macrografías de Figuras 4.4 A y B, son en las que se obtuvo la menor penetración de soldadura en el diseño de experimentos, con 0.54 y 0.60 mm respectivamente. Con este perfil de penetración tan bajo, la integridad mecánica de la soldadura esta un tanto comprometida, ya que cualquier variación mínima del proceso; ya sea por perdida de potencia por una degradación o desgaste en la óptica de protección (Figura 4.5) o bien por una pérdida por un acabado superficial en los materiales que cause mayor reflectividad, puede ocasionar inclusive que no se logre penetración física en el material inferior de la unión de soldadura o que la unión de soldadura presente un desprendimiento a valores inferiores de esfuerzo y carga para las que fue diseñada debido a la insuficiente coalescencia y baja zona de fusión entre ambas placas soldadas a traslape.

En la figura siguiente se observa la degradación y la contaminación de un lente protector de un PFO después de realizar la producción piezas automotrices. En este lente protector se observan pequeños daños ocasionados por chisporroteo de soldadura, y opacidad generada por los humos de soldadura.

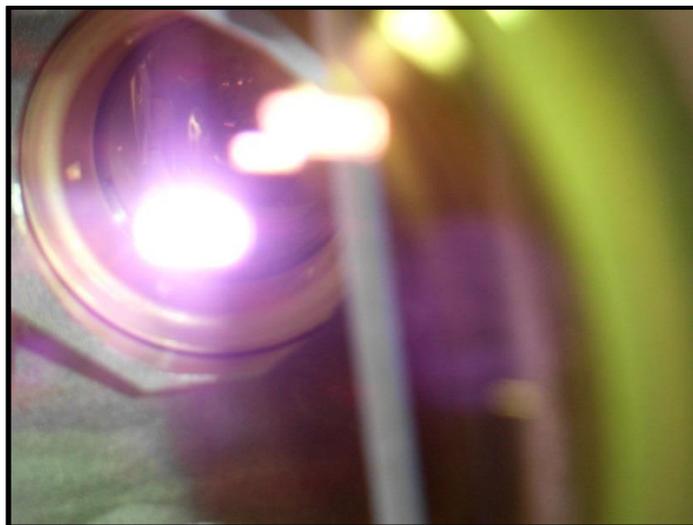


Figura 4.5. Degradación y desgaste en la óptica de protección en un proceso de soldadura láser de producción de gran volumen de piezas automotrices

En la Figura 4.4 C, la soldadura de la muestra 11, tiene un mayor grado de penetración, sin embargo la muestra presenta agrietamiento en la zona de fusión del material superior. El agrietamiento es un defecto que no está permitido en los criterios de aceptación de los estándares de soldadura láser que tienen los líderes productores de la industria automotriz [84, 85], ya que este defecto disminuye en gran medida la resistencia mecánica de la soldadura [16, 86, 87]. El decremento de la resistencia mecánica de la unión de soldadura es principalmente causado a que es en las grietas es donde existe una mayor susceptibilidad para la concentración de esfuerzos, que generalmente provocan que este defecto se acrecenté y por consecuencia que la unión de soldadura falle. Una de las principales causas potenciales de que la muestra de la micrografía 4.4 C presentara agrietamiento, es la tensión superficial durante la solidificación de la soldadura. En el proceso de soldadura láser existen recomendaciones o criterios empíricos que hablan de los límites de la relación que debe tener la penetración y el ancho de la zona de fusión. Para la soldadura láser por Keyhole es recomendado que la penetración al menos sea 2 veces mayor que el ancho [15]. En el caso de la muestra 11 el ancho de la zona de fusión es de 1.54mm y la penetración total es de: 0.94 mm más 2.5 mm del espesor de la placa superior, lo que equivale a 3.44mm, por lo tanto la relación Penetración/Ancho es de 2.23, la cual está muy cercana al mínimo que se encuentra recomendado por la literatura para trabajar con una tensión superficial adecuada y con menos susceptibilidad de agrietamiento durante el proceso de soldadura [15-17].

Ancho de la zona de fusión de soldadura

En el análisis estadístico de los resultados experimentales se encontró que el parámetro que tiene mayor efecto en el ancho de la zona de fusión es la distancia focal, en cambio la potencia no tuvo un efecto considerable en el ancho zona de fusión. El ancho de la zona de fusión se comportó directamente proporcional a la distancia focal, ósea que cuanto la distancia focal estuvo más

alejada del punto de focalización del láser, el ancho de la zona de fusión fue mayor. Este comportamiento se puede observar con mayor claridad en la siguiente figura.

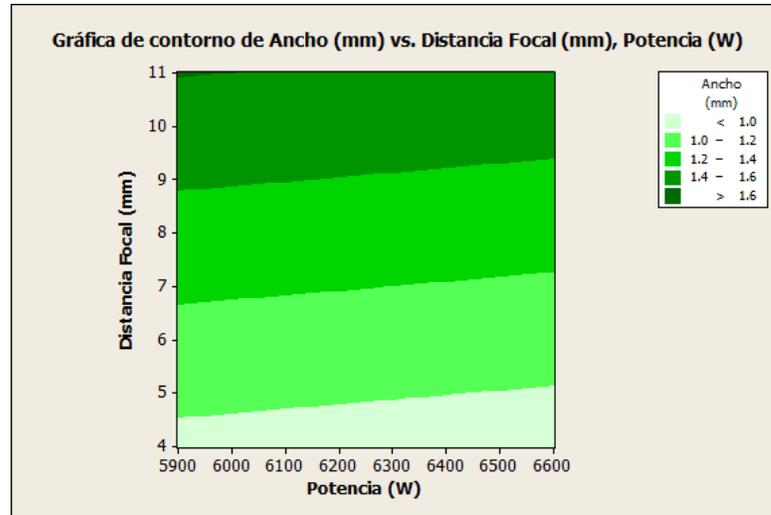


Figura 4.6. Grafica de contornos del ancho de la zona de fusión de la soldadura contra la distancia focal y la potencia

Así mismo en la literatura se encontró que se han realizado estudios del comportamiento del ancho del spot del láser, en función de la distancia focal, en los cuales se obtiene el mismo comportamiento del obtenido en este estudio (Figura 4.7)

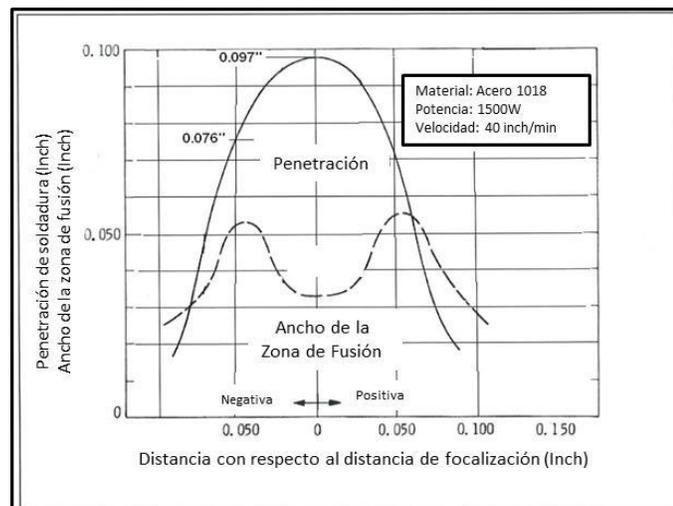


Figura 4.7. Efecto de la distancia focal en el ancho de la zona de fusión en el proceso de soldadura láser [15]

En la Figura 4.7 se puede observar que el mínimo ancho de la zona de fusión y la máxima penetración de soldadura se obtienen cuando el láser está totalmente enfocado, ósea en la zona de focalización, que es donde se aplica la mayor densidad de potencia.

Al analizar el caso de estudio encontrado en la literatura y los resultados estadísticos de las Figuras 4.1 y 4.6, se puede decir que no solo es posible controlar la penetración con la densidad de potencia, sino también una variación de la distancia focal repercutirá en el ancho de la zona de fusión y a su vez en la relación penetración/ancho, la cual es importante controlar para evitar los defectos que presentó la muestra 11 de la figura 4.4 C.

En la Figura 4.8 se muestra el segundo grupo de muestras de soldadura, las cuales fueron soldadas con mayor grado de densidad de potencia que las analizadas anteriormente.

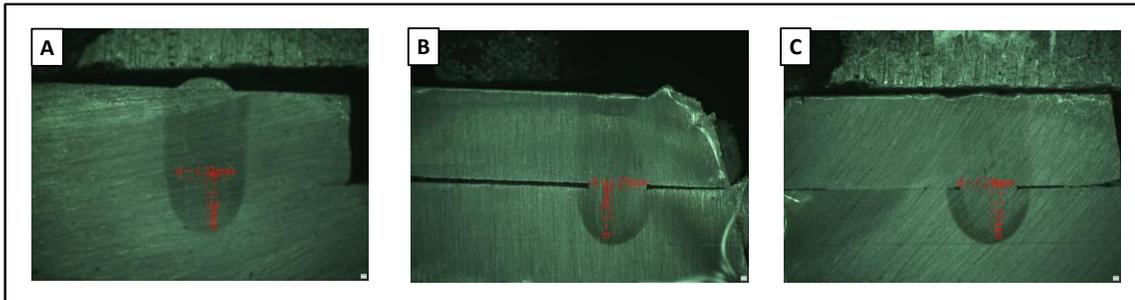


Figura 4.8. Muestras de soldadura con una densidad de potencia de 16437 W/mm^2 A) Muestra 12, B) Muestra 14 y C) Muestra 5

Todas las muestras de la Figura 4.8 fueron soldadas con la misma densidad de potencia, ya que corresponden a las réplicas para el análisis de respetabilidad del comportamiento del diseño experimental. Así mismo en estas muestras se puede observar que el aspecto de la zona de fusión de soldadura tiene gran semejanza, y además la soldadura presento casi las mismas características de penetración, ancho y por consecuencia relación penetración/ancho. El promedio de la relación de penetración/ancho para estas muestras fue de 2.98, la cual está por encima del mínimo recomendado para

soldadura por Keyhole [15-17]. Además en la Figura 4.8 se observa que las muestras están libres de defectos de soldadura, como lo es la porosidad y el agrietamiento.

En la Figura 4.9 se presentan las muestras que se soldaron con mayor densidad de potencia en el diseño experimental de este caso de estudio.

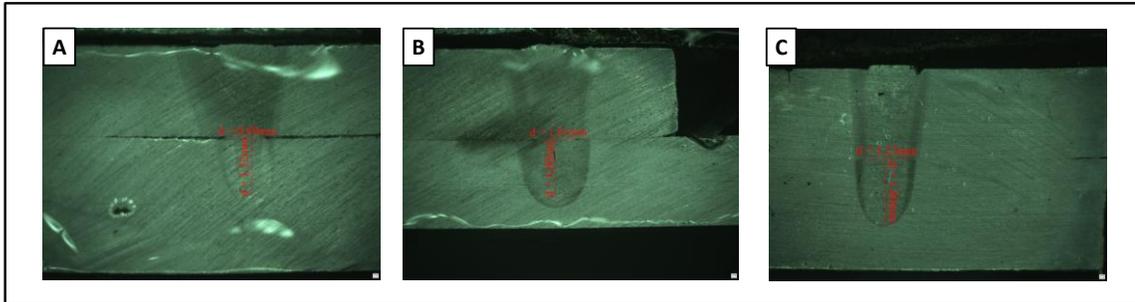


Figura 4.9. Muestras de soldadura (10X). A) Muestra 10, Densidad de potencia: 18595 W/mm² B) Muestra 2, Densidad de potencia: 19353 W/mm² y C) Muestra 9, Densidad de potencia: 19367 W/mm²

Las tres muestras de la Figura 4.9 son las que tuvieron mayor penetración y mayor relación penetración:ancho, la muestra en la que se logró mayor relación penetración:ancho fue la muestra 10 de la micrografía 4.9 A, con 4.5, ya que en ella se utilizó un punto axial el cual fue el nivel menor de la distancia focal del diseño experimental, lo cual ocasiono que el ancho de la zona de fusión fuera de 0.89 mm, el cual fue el valor mínimo que se obtuvo en el diseño experimental desarrollado en este caso de estudio. Así mismo en las micrografías del corte transversal de estas muestras no se encontraron defectos de soldadura, y fue en la muestra 9 de la micrografía 4.9 C donde se utilizó el máximo de densidad de potencia y así se logró el mayor grado de penetración de soldadura, con 1.8 mm.

La importancia de las variables del grado de penetración y ancho en la zona de fusión de la soldadura láser, y los criterios de aceptación de estas variables en el procesamiento de soldadura para este tipo de aplicación, se explicara con

mayor detalle en la siguiente sección, la cual está enfocada a la optimización de parámetros de análisis en esta experimentación.

4.1.2. Optimización de Parámetros

Para la optimización de los parámetros en este estudio se buscó que con los factores de potencia y distancia focal se lograra una penetración y ancho de la zona fusión de soldadura adecuada para garantizar que las muestras estuvieran dentro de la especificación requerida para muestras soldadas por láser en el ensamble de componentes automotrices. Además se buscó que los factores antes mencionados proporcionaran un factor de seguridad en las características y requerimientos de los criterios de evaluación para absorber las posibles variaciones del proceso en una aplicación industrial con alto nivel de producción, sin salirse de la especificación de soldadura láser que se muestra en la Figura 4.10. A continuación se muestra la especificación requerida para uniones de soldadura a traslape:

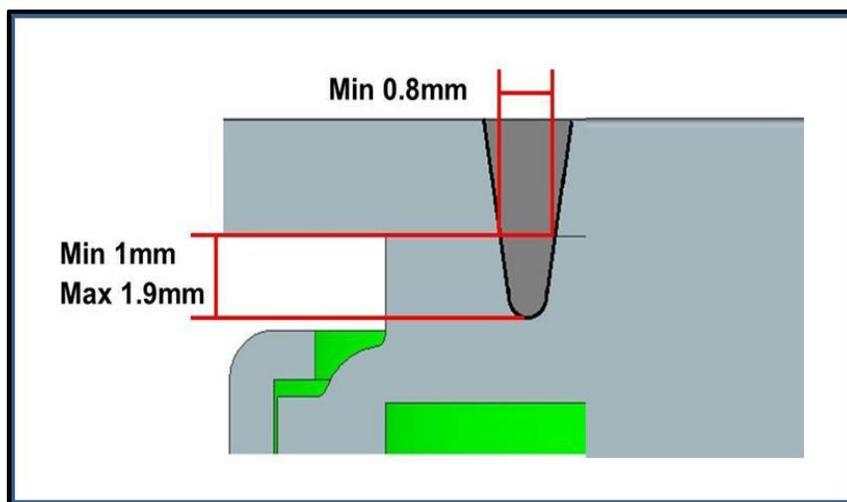


Figura 4.10. Criterios de evaluación de la especificación de soldadura laser D3CK-RR2-PD-ADJ-DS-022 [83]

Como se observa en la figura anterior el mínimo de penetración de soldadura es de al menos un milímetro y el ancho en la zona de fusión debe ser como mínimo de 0.8 milímetros. Sin embargo en la optimización se buscó obtener el máximo de penetración, claro sin sobrepasar los 1.9 mm que especifica el estándar, y además se pretendió lograr que el ancho de la zona de fusión tuviera un factor de seguridad de al menos 35 %, ósea que tuviera al menos 1.08 mm, esto principalmente con el objetivo de acrecentar y asegurar la resistencia mecánica de la soldadura, ya que es el ancho de la zona de fusión el que le da resistencia a la unión de ambas placas a traslape. Además la aplicación de estos parámetros de soldadura posteriormente se realizara en soldaduras de seguridad de componentes automotrices.

La siguiente figura (Figura 4.11) muestra la gráfica de superficie de respuesta del comportamiento de la penetración en función de la distancia focal y la potencia.

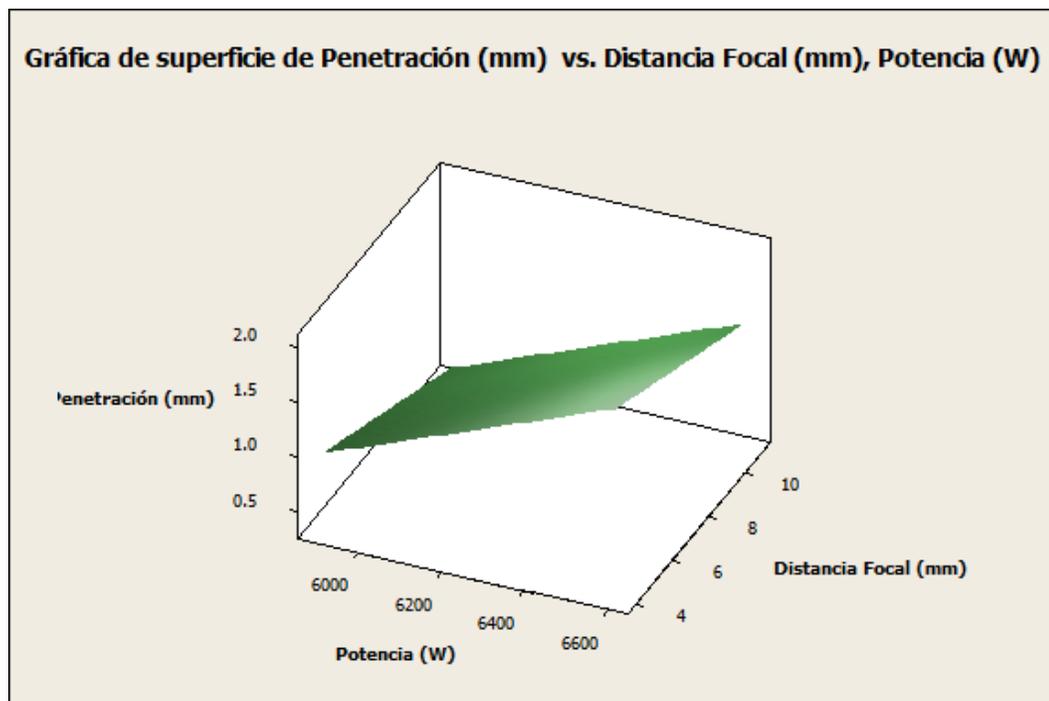


Figura 4.11. Grafica de superficie de respuesta de la penetración de soldadura

El modelo estadístico para la gráfica anterior fue el siguiente:

$$\mathbf{Penetracion} = -7.20123 + 0.00144853 \mathbf{P} - 0.0891335 \mathbf{DF} \quad \text{Ec. 4.2}$$

En la ecuación 4.2, la P representa la potencia del láser y la DF es la distancia focal.

Este modelo tiene una desviación estándar de los datos adaptados al modelo lineal de $S = 0.075357$, lo que indica que los datos se adaptan relativamente con muy poco error a un modelo lineal, además en el análisis de los datos se obtuvo una $R\text{-Sq} = 96.25\%$, la R cuadrada es alta lo que indica que el modelo se adapta bien a los resultados de penetración de soldadura, además la R cuadrada ajustada fue de $R\text{-Sq (ajustada)} = 95.12\%$ y la R^2 de predicción de 90.52% , lo cual también describe que el modelo representa muy bien la variabilidad de los datos obtenidos de la respuesta de penetración en la unión de soldadura.

Para la optimización se buscó que la penetración de soldadura estuviera cercana a 1.8 milímetros, con el máximo de potencia para aprovechar el máximo de potencia del sistema láser. Para una penetración de soldadura de 1.8 milímetros con el máximo de potencia se encontró que la distancia focal debería ser de 6.27 mm.

En la gráfica de la Figura 4.12 se grafica de superficie de respuesta del ancho de la zona de fusión de soldadura

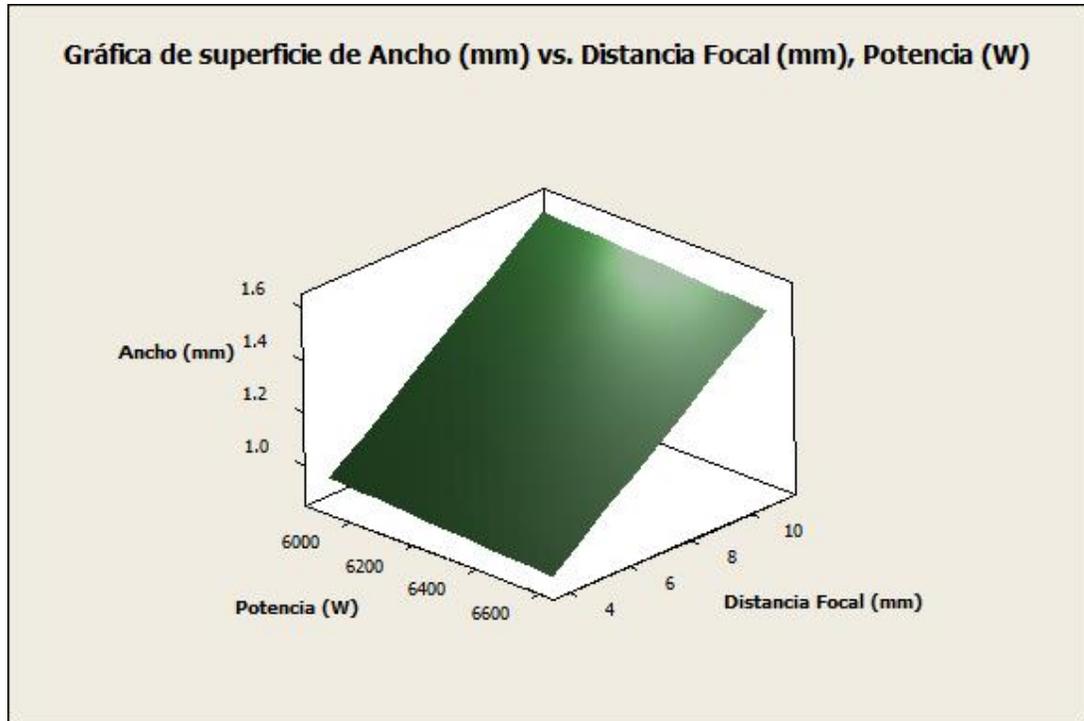


Figura 4.12. Grafica de superficie de respuesta del ancho de la zona de fusión de soldadura

En la gráfica anterior se puede observar que en la variable de respuesta de ancho de la zona de fusión la potencia no tiene gran significancia, sin embargo la variación de la distancia focal tiene un efecto muy significativo en esta variable.

El modelo estadístico para la gráfica anterior fue el siguiente:

$$\text{Ancho de la zona de fusion} = 1.053 - 8.121 \cdot 10^{-5} P + 0.0997 DF \quad \text{Ec. 4.3}$$

El modelo estadístico para el ancho de la zona de fusión tiene una desviación estándar de los datos adaptados al modelo lineal de $S = 0.0194547$, lo cual revela que los datos se adaptan con un error mínimo a un modelo de predicción lineal, además en el análisis de los datos se obtuvo una la

R-Sq = 99.16%. Como se mencionó en el modelo anterior, cuando la R cuadrada es alta lo que indica que el modelo se adapta bien a los resultados de penetración de soldadura, además la R cuadrada ajustada fue de R-Sq (ajustada) = 98.91% y la R2 de predicción de 98.10%, lo cual también describe que el modelo representa muy bien la variabilidad de los datos obtenidos de la respuesta de ancho de la zona de fusión a traslape de la unión de soldadura.

Partiendo de los resultados obtenidos en el modelo de penetración, se utilizó el parámetro más cercano de la distancia focal requerida para lograr 1.8 mm de penetración, que fue de 6.3mm, debido a que el ajuste mínimo en el equipo es de ± 0.1 mm.

Para validar los modelos de predicción estadística se soldó una muestra con los parámetros propuestos para optimizar las variables de respuesta de penetración y ancho de la zona de fusión. Los parámetros y las respuestas esperadas por los modelos estadísticos fueron las siguientes:

Tabla 4.2. Parámetros óptimos y respuesta esperada

Parámetros		Respuesta	
Potencia	6600 W	Penetración	1.8 mm
Distancia Focal	6.3 mm	Ancho de la zona de fusión	1.14 mm

La siguiente figura muestra la macrografía en un corte transversal de la muestra de soldadura utilizando los parámetros óptimos.

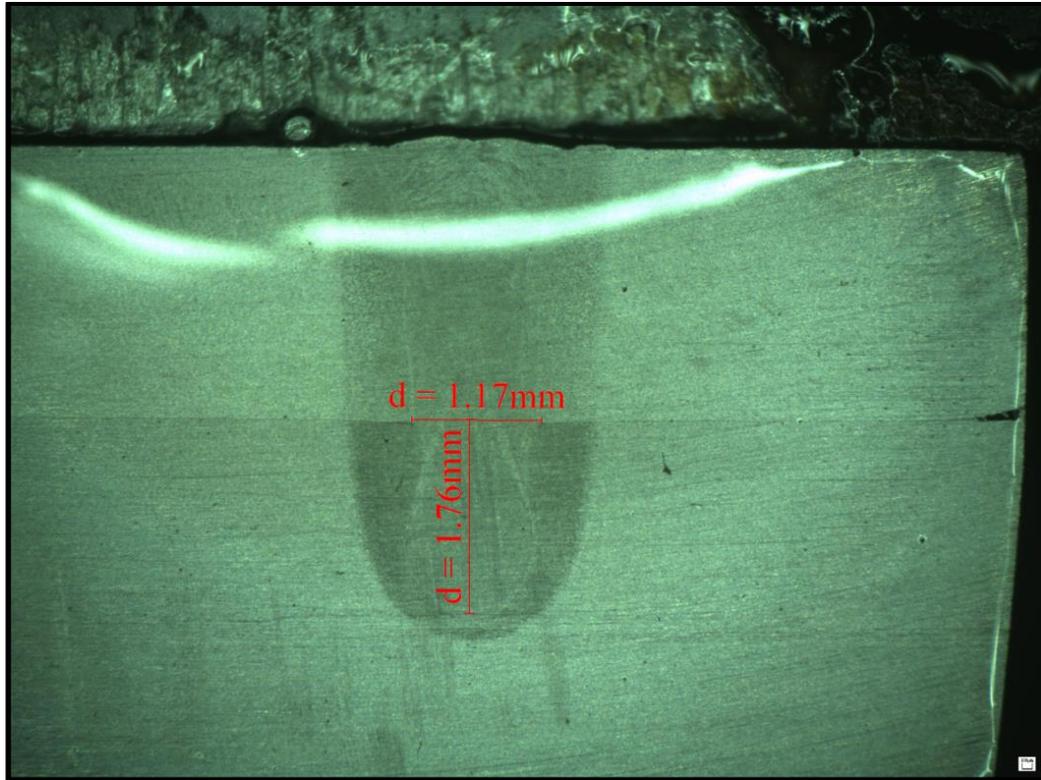


Figura 4.13. Macrografía de un corte transversal de la unión de soldadura utilizando los parámetros óptimos

En la figura anterior se observa que la soldadura está libre de defectos y además los valores en las mediciones realizadas en el ancho y la penetración de soldadura están dentro de la especificación de soldadura láser (ver figura 4.10). Además al comparar los resultados de penetración obtenidos con los resultados de las respuestas esperadas o predichas por el modelo se encontró un error del 2.3% para la penetración y del 2.6% para el ancho de la zona de fusión, lo cual indica que el modelo estadístico como herramienta de predicción es bastante acertado, y se puede utilizar para la predicción en la aplicación desarrollada con los parámetros analizados en este caso de estudio.

Así mismo en este caso de estudio se realizó un análisis microestructural en la muestra soldada con los parámetros óptimos, con el objetivo de buscar microestructuras susceptibles a fallar por fragilidad o lo contrario que tengan

exceso de fases blandas como la ferrita y fallen por tener baja resistencia a la tensión y alta ductilidad.

La zona más susceptible a presentar heterogeneidad en las propiedades mecánicas y características microestructurales en una soldadura es la zona afectada por el calor, por lo que primeramente se midió la zona afectada por el calor, como se muestra en la siguiente figura.

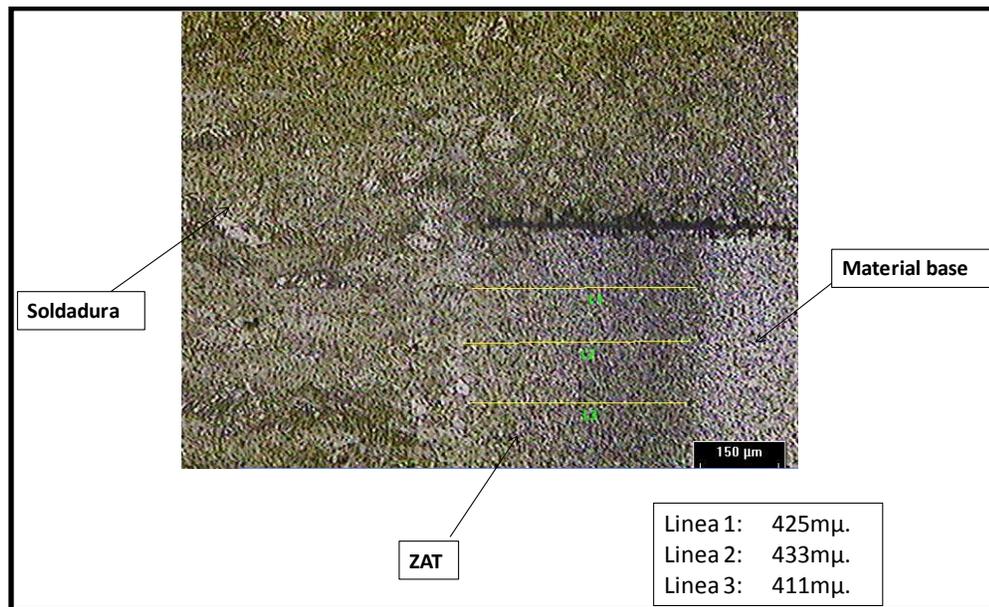


Figura 4.14. Micrografía de la medición de la ZAC de la unión de soldadura utilizando los parámetros óptimos (100x)

Se encontró que la zona afectada por el calor (ZAC) fue relativamente estrecha, pues midió aproximadamente 420 micrómetros, que es muy cercana a la obtenida en resultados obtenidos en otros procesos experimentales desarrollados por otros autores para la soldadura láser por Keyhole de aceros de dos fases DP [88]. Sin embargo en soldaduras láser por modo de conducción de este tipo de aceros se ha encontrado que la zona afectada por el calor es de alrededor de 4 milímetros [92], esto principalmente es atribuido a la baja velocidad de soldadura por falta de absorción del láser que se debe a la baja eficiencia del proceso por la ausencia del Keyhole.

La siguiente figura muestra el análisis metalográfico del metal base, zona afectada por el calor, interface de ZAC con la zona soldadura y la zona de fusión de la soldadura.

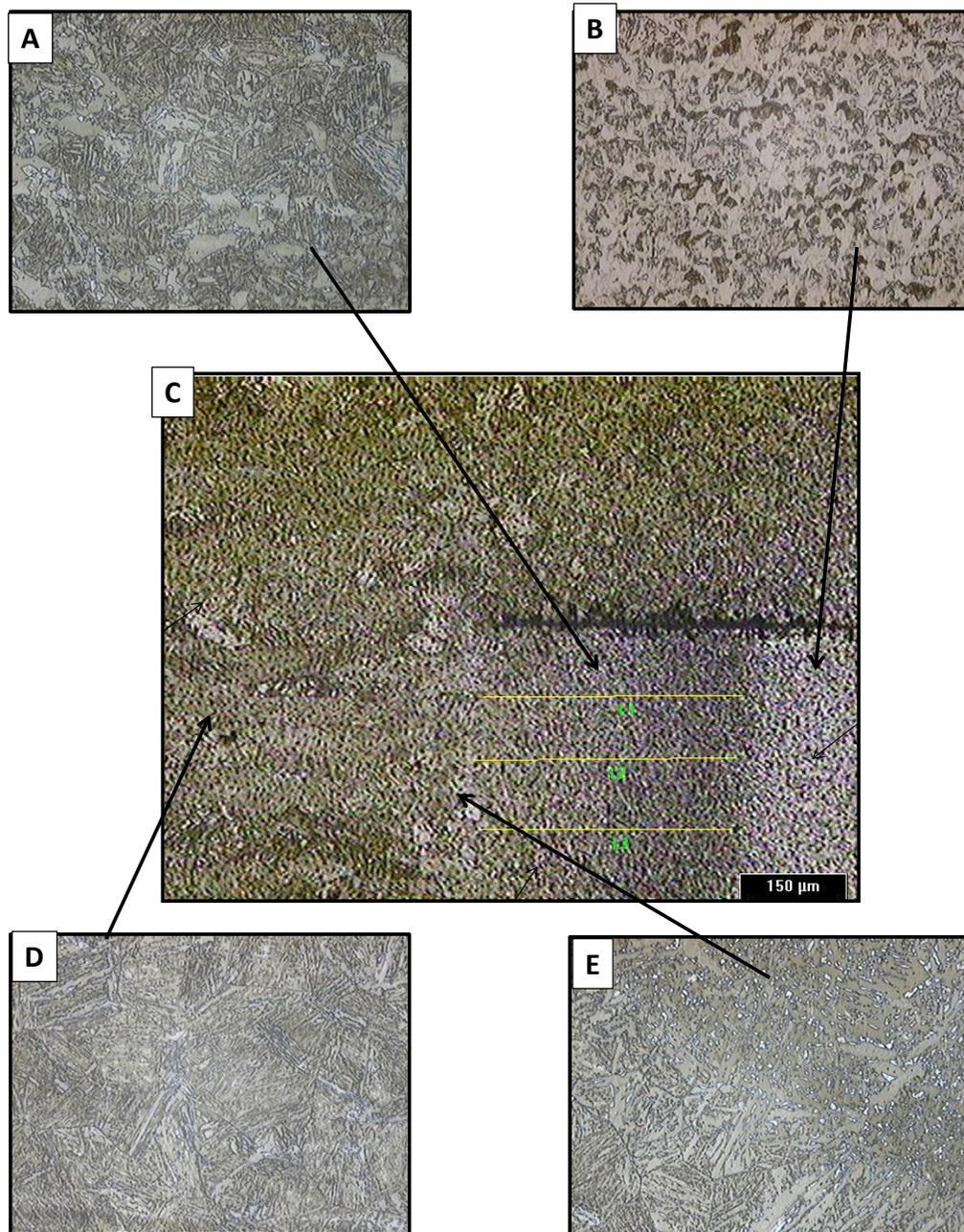


Figura 4.15. Análisis microestructural. A) Microestructura en la ZAC (500x), B) Microestructura en el metal base (500x), C) Unión de soldadura con parámetros óptimos (100x), D) Microestructura en zona de soldadura (100x) y E) Microestructura en interface de ZAC y la soldadura (500x)

En la Figura 4.15 B se puede observar que la microestructura del metal base está constituida principalmente por una matriz Ferrítica con un estructura granular fina donde están embebidas trazas o islas de fase martensítica. En la Figura 4.15 A que corresponde a la macrografía de la zona afectada por el calor, se puede la matriz Ferrítica, sin embargo se puede observar una descomposición de las islas de martensita y la presencia de martensita revenida y algunas zonas de Bainita. La causa principal del deterioro en el arreglo de fases es la temperatura que alcanza la ZAC durante la solidificación de la soldadura, ocasionada por la conducción del calor lo cual ocasiona un revenido parcial en las zonas de martensita. En la bibliografía se ha encontrado resultados experimentales con soldadura láser de aceros DP con microestructuras en la ZAC similares, y además se ha reportado que el revenido en la martensita y la pérdida en el arreglo de las fases en la ZAC ocasionan una caída en la dureza o un ablandamiento en esta zona, lo cual baja la integridad mecánica de la soldadura [93-95]. Para tener un mayor entendimiento de este fenómeno, en la optimización de la siguiente sección se muestra un estudio y un análisis del perfil de microdureza en una soldadura láser. En la Figura 4.15 D se observa la microestructura en la zona de fusión de la soldadura, en esta se puede observar una estructura totalmente martensítica. La presencia de una matriz totalmente martensítica está asociada a la gran densidad de potencia y velocidad de enfriamiento en un proceso soldadura láser por Keyhole. En la Figura 4.15 E se observa la matriz totalmente martensítica de la zona de soldadura y la microestructura con matriz Ferrítica con trazas de martensítica revenida de la ZAC.

Otros trabajos encontrados en la literatura de soldadura de aceros avanzados de dos fases soldados por procesos convencionales como GMAW (Gas Metal Arc Welding por sus siglas en inglés) [96,97], reportan zonas afectadas por el calor de 5 milímetros, utilizando bajo calor de entrada en proceso de soldadura por arco pulsado y hasta 9 milímetros con proceso GMAW continuo.

W.J. So y colaboradores [97], realizaron experimentos en soldadura en un acero DP 780 utilizando un proceso pulsado de corriente alterna en un equipo especial de soldadura GMAW, ellos buscaban estudiar la soldabilidad de este acero y la capacidad que tiene el proceso de realizar soldaduras con diferentes tamaños de GAP en la interface de soldadura. Los autores encontraron que al optimizar los parámetros es posible obtener soldaduras aceptables con un decremento del 20% en la resistencia a tensión de la unión, sin embargo a pesar de que en la experimentación se utilizó un proceso especial con la finalidad de disminuir el calor de entrada en las pruebas de soldadura, las muestras de soldadura que los autores presentan como aceptables, fallaron en pruebas de tensión en la zona afectada por el calor, con un 80% de la resistencia a la tensión del metal base, debido al debilitamiento de esta zona por el cambio de morfología y arreglo de fases de la ZAC.

Trevor J. Burns [97], realizó estudios de soldabilidad de aceros de doble fase unidos con el proceso GMAW. En su trabajo el encontró que la pérdida de dureza en la zona afectada por el calor fue de más de 10 Vickers para un acero DP600 y de 140 Vickers para un acero DP 480, además encontró que en el proceso GMAW se perdía gran parte del % de fase martensítica en la ZAC, lo cual debilitaba en gran medida las propiedades mecánicas de la unión de soldadura. La siguiente figura muestra algunos de los resultados más relevantes de su trabajo y de un estudio realizado por Xia y colaboradores [], que estudia el tiempo de exposición del acero DP al proceso de soldadura láser, en función de la pérdida de; martensita en la zona afectada por el calor y por consecuencia la microdureza de la ZAC.

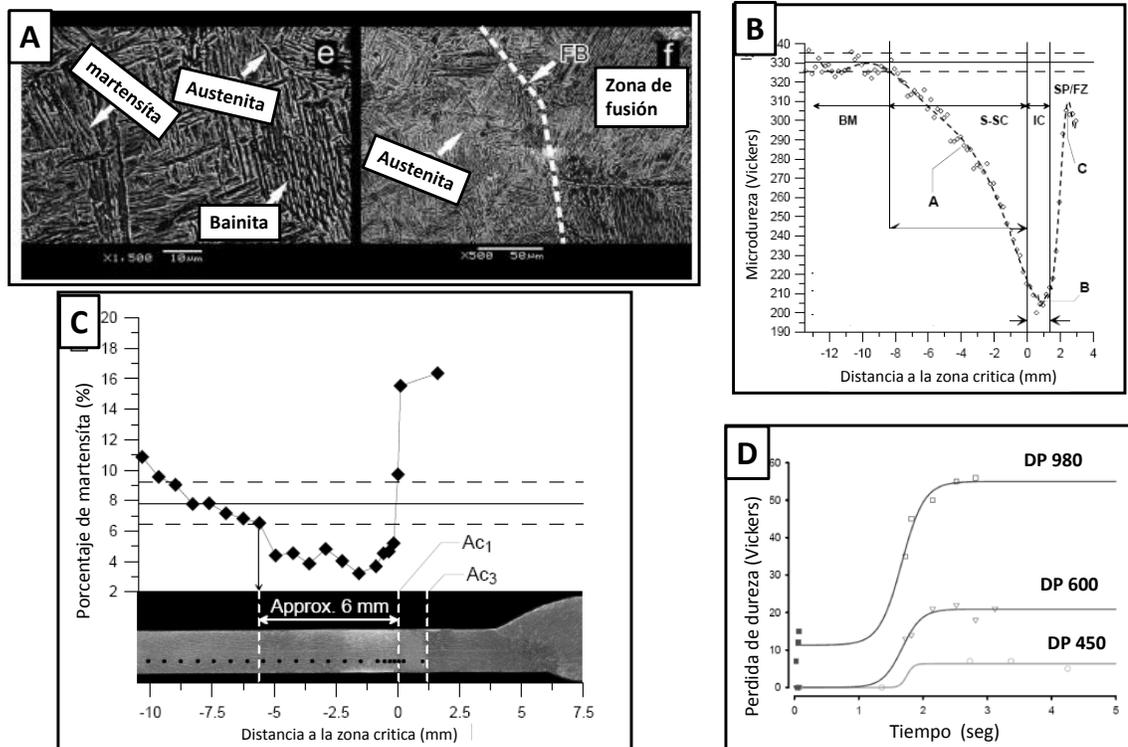


Figura 4.16. Propiedades mecánicas y microestructurales de aceros DP. A) Microestructura de ZAC de un proceso convencional GMAW, B) Perdida de Microdureza en acero DP 980 soldado por GMAW, C) Perdida de microdureza en acero DP 600 soldado por GMAW, y D) Perdida de microdureza en soldadura láser de acero DP [98]

En la Figura 4.16 A se puede observar que gran parte de la fase martensítica que contenía el metal base en la microestructura, al ser soldado se ha perdido y se ha transformado en austenita retenida en la ZAC durante el enfriamiento. La ausencia de martensita en la ZAC deteriora las propiedades mecánicas de la unión de soldadura en gran medida, esto se puede observar en las figuras 4.16B y C. En la figura 4.16C, que presenta la gráfica de perfil de microdureza de una soldadura GMAW en un acero DP600, se puede observar que la zona de debilitamiento en la ZAC abarca aproximadamente 6mm, donde el porcentaje de martensita es tres veces menor que el del metal base. Así mismo en la Figura 4.16B se observa que en la zona de debilitamiento existe una caída de hasta 140 Vickers en la microdureza de esta zona, lo cual no es recomendable ya que lo que se busca en una soldadura es que exista el mayor

grado de homogeneidad en las propiedades mecánicas y si es posible en la microestructura. En cambio en la Figura 4.16D se observa la caída que sufre la ZAC en un proceso de soldadura láser, en función del tiempo que está expuesta al barrido del láser durante el proceso de soldadura. Claramente se puede ver en las gráficas de esta figura que la caída en la microdureza para los aceros DP es mucho más baja, inclusive para los aceros DP de grado 450 y 600 la caída puede ser nula si el tiempo de exposición al barrido del láser es menor a un segundo y medio, esto se debe principalmente a que en la zona afectada por el calor no existe disminución del porcentaje de la fase martensítica en la ZAC para estos grados de acero DP, solamente un revenido de esta fase, como se puede observar en la figuras 4.15A y E. Además en la Figura 4.16D se observa que para el grado DP 980, existe una pérdida en la microdureza de hasta 60 Vickers (menor a los 140 Vickers logrados con un proceso de soldadura convencional), la cual depende del tiempo de exposición que es inversamente proporcional a la velocidad de soldadura, es por eso que en el caso de estudio dos (los resultados se presenta más adelante en este trabajo), se busca optimizar la velocidad al máximo, para lograr el mínimo de pérdida de microdureza en la ZAC, claro sin comprometer las características físicas de la unión para cumplir con los criterios del estándar de evaluación de soldadura láser.

En la siguiente sección se realiza la validación del modelo matemático propuesto en el capítulo anterior para el caso de estudio uno.

4.1.3. Validación del modelo matemático

Para validar el modelo matemático propuesto en la sección 3.1, se utilizaron las ecuaciones 3.16, 3.17 y 3.18, que fueron obtenidas en el desarrollo del

modelo. Los parámetros para la validación de las variables físicas de predicción del modelo se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.4. Resultados experimentales del caso de estudio uno [43, 99-100]

Muestra	Pe	v (m/seg)	a (m)	k (μm)	K (m ² /seg)	Tv (C°)	T0 (C°)
1	0.491	0.048	0.000436	1.03	2.13×10^{-5}	2740	25
2	0.455	0.048	0.000404	1.03	2.13×10^{-5}	2740	25
3	0.685	0.048	0.000608	1.03	2.13×10^{-5}	2740	25
4	0.667	0.048	0.000592	1.03	2.13×10^{-5}	2740	25
5	0.559	0.048	0.000496	1.03	2.13×10^{-5}	2740	25
8	0.568	0.048	0.000504	1.03	2.13×10^{-5}	2740	25
9	0.554	0.048	0.000492	1.03	2.13×10^{-5}	2740	25
10	0.401	0.048	0.000356	1.03	2.13×10^{-5}	2740	25
11	0.712	0.048	0.000632	1.03	2.13×10^{-5}	2740	25

Para el cálculo de la potencia para una penetración dada, que en este caso es la obtenida experimentalmente para cada una de las muestras, se utilizó la ecuación 3.17, sustituyendo el número de Peclet para la penetración lograda experimentalmente. La Figura 4.17 muestra una comparación entre las potencias utilizadas en la experimentación y las potencias predichas por el modelo matemático.

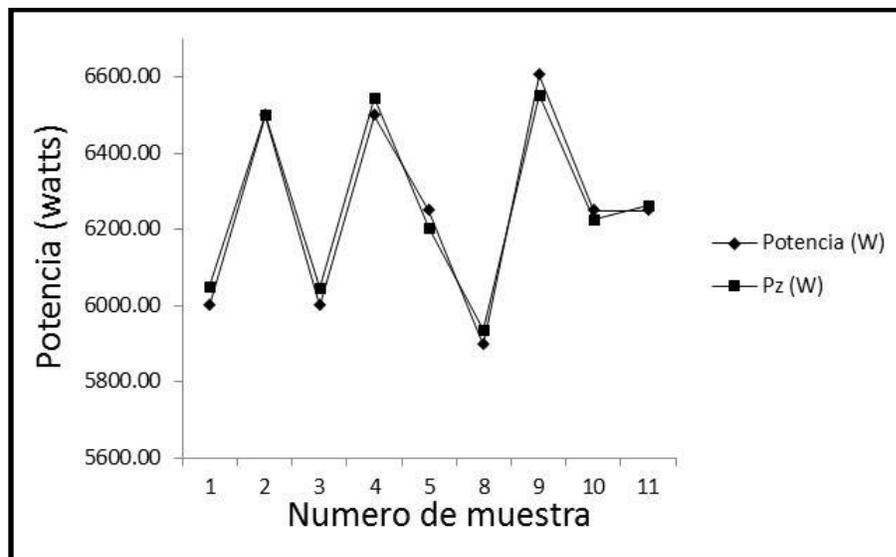


Figura 4.17. Potencia usada en la experimentación vs potencia predicha por el modelo matemático en el caso de estudio dos

La gráfica de la Figura 4.17, presenta solamente nueve de las catorce muestras desarrolladas durante la experimentación del caso de estudio uno, ya que solamente son graficadas las muestras en las que hubo cambio en alguno de los parámetros de potencia y distancia focal, y para las réplicas se seleccionó la más significativa, ya que en el análisis de respetabilidad en la discusión de la Figura 4.8 se encontró que no existía variación significativa entre las réplicas del diseño experimental.

Así mismo en la gráfica anterior se puede observar que la diferencia, entre las potencias utilizadas en la experimentación y las potencias predichas por el modelo para una penetración dada, es mínima, ya que para todos los experimentos la diferencia entre ambas fue menor a 50 watts. Esta diferencia pudo ser causada por la pequeña variación en las mediciones experimentales del radio del Keyhole, que es medido mediante microscopía óptica, y es utilizado para calcular el número de Peclet, y las variaciones que pudieron existir en la medición física de la penetración experimental de soldadura. Sin embargo 50 watts representan menos del 1 % de la potencia del equipo láser, esta variación en el proceso no es muy significativa para el los resultados en las variables de penetración ancho de la zona de fusión, es de mayor significancia una pérdida de potencia por suciedad o degradación en la óptica [15, 16], como se observa en la Figura 4.5.

De los resultados de predicción de la Figura 4.17, se puede concluir que para este caso de estudio, es posible utilizar el modelo propuesto en este trabajo para la predicción de la penetración en función de la potencia.

La siguiente figura muestra la comparación del ancho de la zona de fusión obtenido experimentalmente y la predicción del ancho de la cavidad del Keyhole en la zona de fusión.

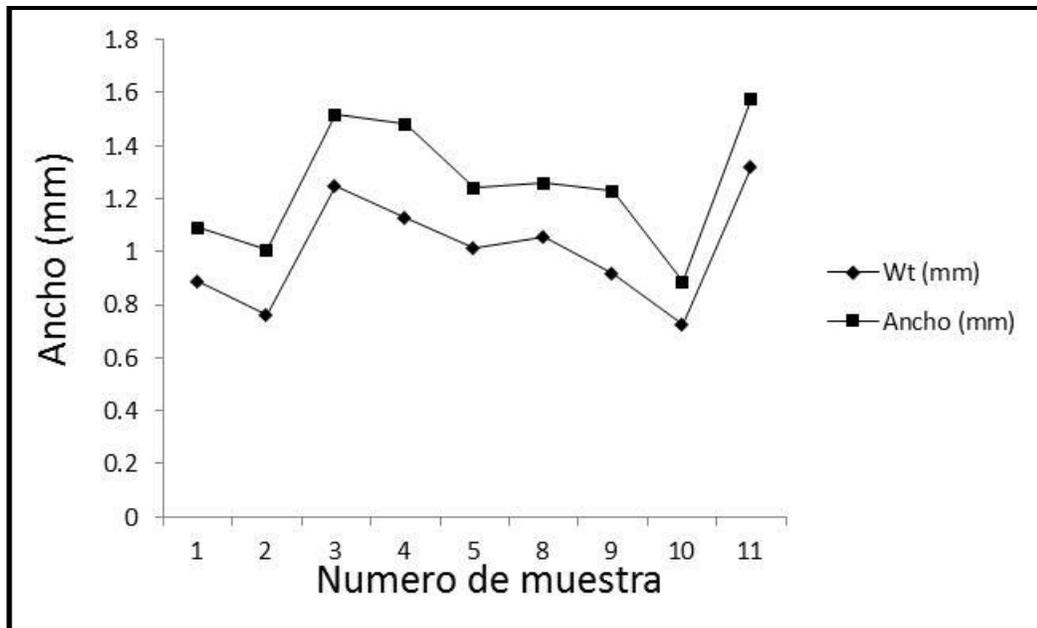


Figura 4.18. Ancho de zona de fusión de soldadura del caso de estudio uno: ancho experimental vs ancho predicho en el Keyhole por el modelo matemático

En la Figura 4.18 se puede observar que existe una clara diferencia entre el ancho de la zona de fusión de soldadura y el ancho de la cavidad del Keyhole, esto se debe a que alrededor de la cavidad, la cual está compuesta por la plasma y vapor del material, existe una zona de material en estado líquido, el cual se mantiene y a su vez está en función de la cantidad de conducción y convección de calor que sale de la cavidad. En la bibliografía no existen datos precisos de la diferencia entre el ancho del Keyhole y la zona de fusión, sin embargo algunos autores, para efectos prácticos consideran que la zona de fusión es aproximadamente 25% más grande que el ancho de la cavidad del Keyhole [15, 43].

La influencia de los parámetros del caso de estudio uno, en la diferencia entre ambas dimensiones es un aporte importante en este trabajo, ya que con estos los datos obtenidos con este modelo será posible utilizar valores con mayor precisión y no aproximaciones. El porcentaje en las diferencia entre ambas dimensiones para cada una de las muestras se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 4. Porcentaje de diferencia entre ancho de soldadura en zona de fusión y ancho de la cavidad del Keyhole para el caso de estudio uno

# muestra	% de diferencia
1	18.8080
2	24.4038
3	17.9737
4	24.0219
5	18.4194
8	16.1536
9	25.4347
10	18.8509
11	16.5123

En la Tabla 4.4 se puede observar que para las muestras que se soldaron con potencias mayores, como son las muestras 2, 4 y 9 (Ver tabla 4.1) la cavidad del Keyhole tuvo un índice de diferencia porcentual mayor, ya que a mayor potencia el calor de entrada es mayor, y por consecuencia el calor que conduce la cavidad hacia el material líquido que la rodea es mayor y por lo tanto la zona de soldadura crece. A potencias de menor grado la conducción de calor es menor y la diferencia porcentual decrece a valores menores que las aproximaciones sugeridas en la bibliografía. En el caso de estudio dos influirá la velocidad de soldadura, por lo que se espera que el comportamiento tenga otra tendencia que la obtenida en este caso de estudio.

En la siguiente sección se presentan los resultados experimentales y el procedimiento de optimización utilizando la misma metodología y modelo matemático, usados en este caso de estudio.

4.2. Resultados y discusión: Caso de estudio dos

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en las muestras de soldadura en el caso de estudio dos. Se realiza un análisis del efecto que tiene la potencia y la velocidad de soldadura en las variables de respuesta de penetración y en el ancho de fusión de la zona de soldadura, posteriormente se realiza una optimización de los parámetros mediante un modelo estadístico, para después realizar una validación mediante la soldadura de una muestra óptima. En esta optimización se busca optimizar la velocidad al máximo, para lograr el mínimo de pérdida de microdureza en la ZAC, claro sin comprometer las características físicas de la unión, y así cumplir con los criterios del estándar de evaluación de soldadura láser. Para la caracterización de la dureza, se desarrolló un barrido de indentaciones en la muestra óptima para obtener el perfil de microdureza a lo largo de la soldadura, zona afectada por el calor y metal base. Finalmente, como en el caso de estudio uno, se presenta la validación del modelo matemático propuesto en el capítulo anterior, con la diferencia de que para este caso de estudio una de las variables en el modelo es la velocidad de soldadura.

4.2.1. Características físicas de las muestras de soldadura

En la siguiente tabla se muestran los resultados experimentales de ancho y penetración de la zona de fusión, para cada una de los parámetros de potencia y velocidad de soldadura utilizados durante la experimentación del caso de estudio número dos.

Tabla 4.5. Resultados experimentales del caso de estudio dos

# muestra	Potencia (W)	Velocidad (mm*seg)	Ancho (mm)	Penetración (mm)
1	7500	55	1.24	1.05
2	8000	55	1.21	1.91
3	7500	60	1.05	0.94
4	8000	60	1.04	1.72
5	7750	57.5	1.12	1.45
6	7750	57.5	1.17	1.51
7	7750	57.5	1.16	1.46
8	7396.45	57.5	1.26	0.35
9	8103.55	57.5	1.16	1.92
10	7750	53.96	1.35	1.7
11	7750	61.04	0.96	1.23
12	7750	57.5	1.16	1.41
13	7750	57.5	1.18	1.5
14	7750	57.5	1.09	1.49

En la tabla 4.4 se puede observar que ambos parámetros tienen efecto en las variables de respuesta de análisis en este caso de estudio, sin embargo es muy difícil encontrar una tendencia. La siguiente figura muestra las mediciones realizadas en los cortes transversales de las muestras de soldadura.

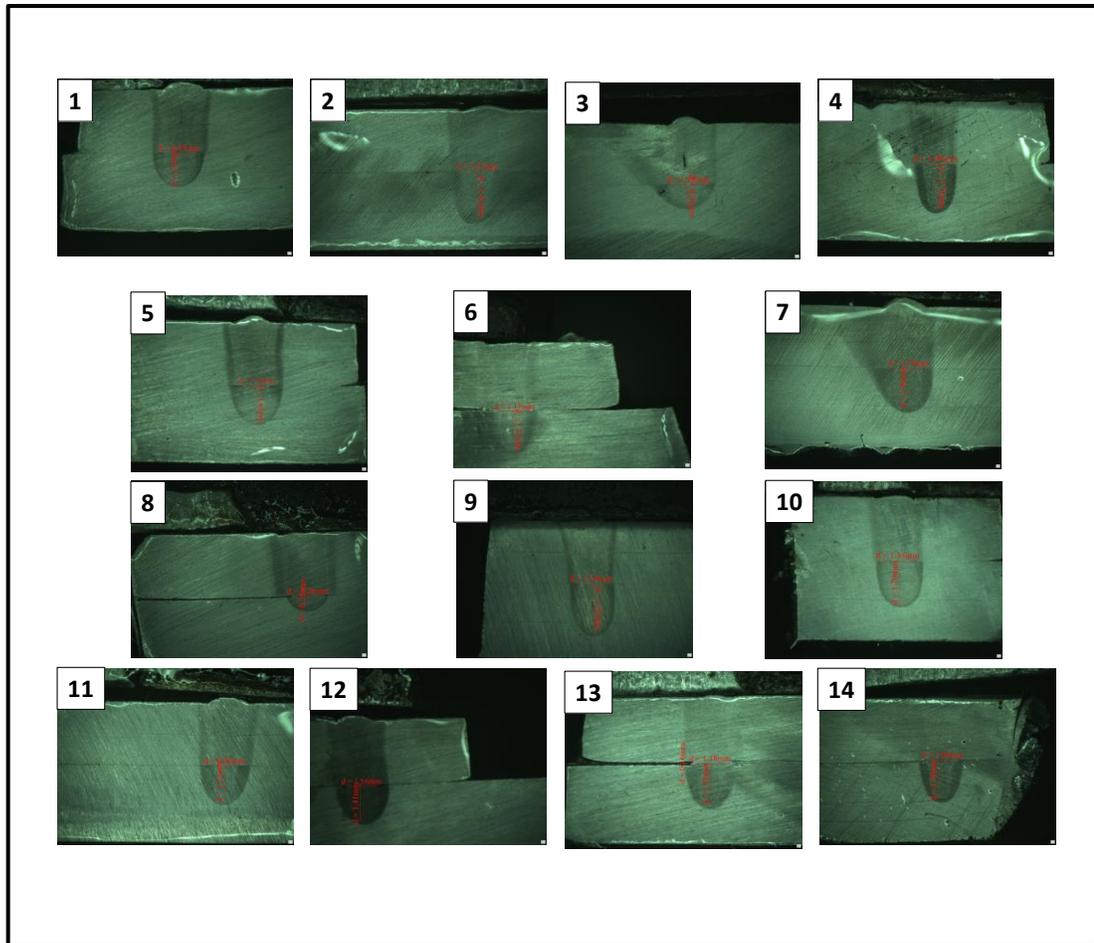


Figura 4.19. Corte transversal de las muestras de soldadura láser

En la figura 4.19 se observa que cada una de las muestras difiere en ancho y penetración física en la unión de soldadura, sin embargo al igual que en la Tabla 4.4 es difícil encontrar una tendencia, por lo que primeramente se llevó a cabo un análisis de la penetración de soldadura.

Penetración de soldadura

La Figura 4.20 presenta una gráfica del comportamiento de la penetración en función de los parámetros de velocidad y potencia de soldadura.

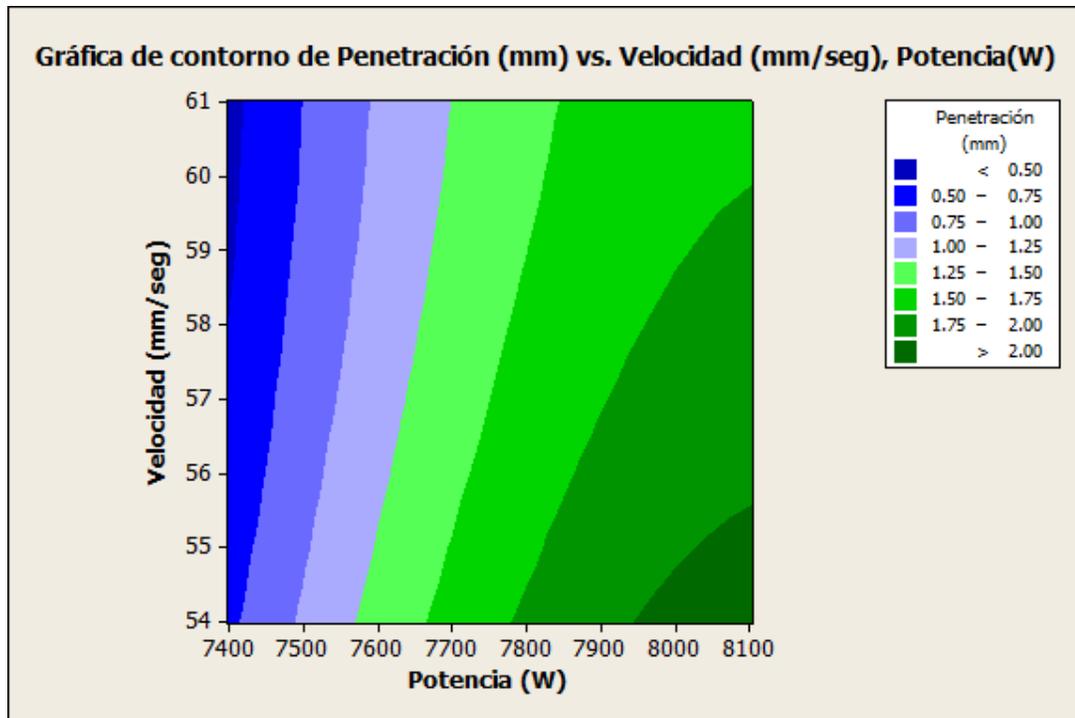


Figura 4.20. Grafica de contorno de la penetración contra la velocidad de soldadura y la potencia

En la figura 4.20 se observa que la variable de respuesta de penetración de soldadura es directamente proporcional a la potencia, al igual que en el caso de estudio número uno. Además en la figura se observa que la penetración es inversamente proporcional a la velocidad de soldadura, y por consecuencia la mayor penetración de soldadura se obtiene a las velocidades más bajas del diseño experimental, además se observa que a las potencias mayores utilizadas durante la experimentación se tiene mayor influencia de la velocidad de soldadura en la penetración, por lo que la pendiente de las zonas de la penetración en función de la velocidad y potencia es más pronunciada. La misma tendencia se ha observado en graficas de penetración en función de la velocidad y potencia de soldadura en la bibliografía [38, 89, 90]

Estas graficas de la penetración en función de la potencia y la velocidad de soldadura, son las que los fabricantes de los equipos de soldadura láser ofrecen a los usuarios y clientes potenciales en aplicaciones en diferentes materiales.

Estas graficas sirven para hacer una estimación de la potencia requerida para soldar a la velocidad que exige el tiempo ciclo de soldadura de sus componentes. La siguiente figura muestra una de estas graficas del proveedor IPG [89].

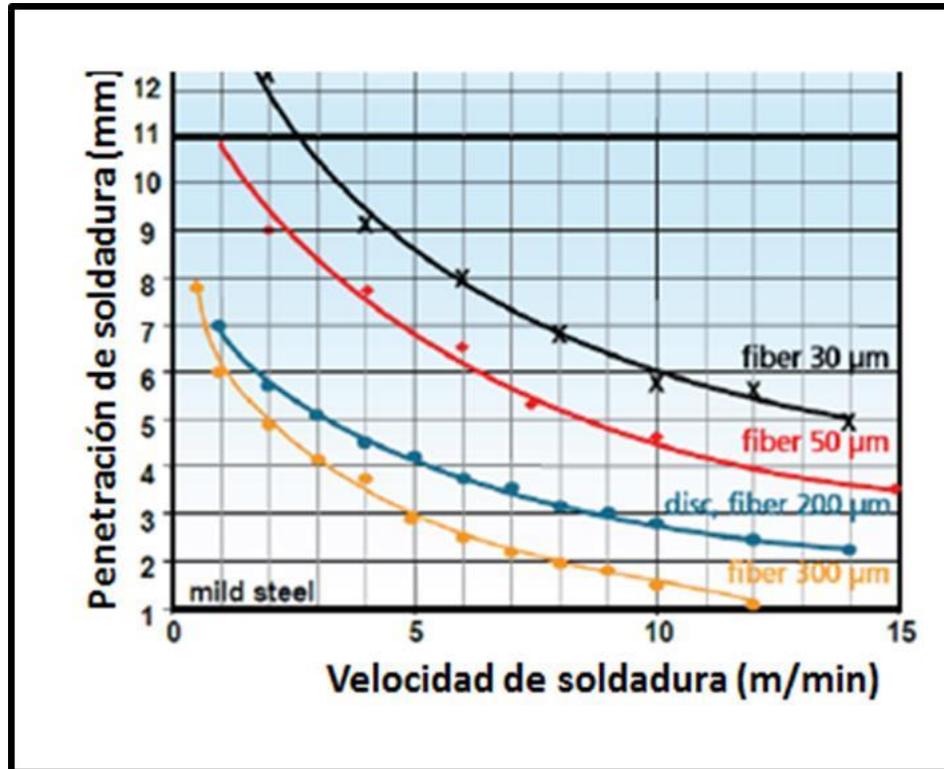


Figura 4.21. Grafica de la penetración de soldadura en función de la velocidad a cuatro densidades de potencia diferentes

La Figura 4.21 presenta los resultados experimentales obtenidos por el fabricante de equipos láser IPG para la penetración de soldadura en función de la velocidad de soldadura a cuatro diferentes densidades de potencias en un acero al carbono. En este estudio experimental la densidad de potencia se modula con el diámetro del spot del láser que es directamente proporcional al diámetro de la fibra del equipo IPG e inversamente proporcional a la densidad de potencia [89], (ver ecuación 4.1).

Además en la gráfica de la figura 4.21 se puede observar el mismo comportamiento en la penetración de soldadura que se obtuvo en la experimentación de este caso de estudio, así mismo se observa que a bajas velocidades y cuando la densidad de potencia es la mayor (con la fibra de 30 μ m, que es la fibra con menor diámetro, por lo tanto mayor concentración de energía y mayor densidad de potencia), la pendiente de la velocidad en contra de la penetración es mayor, que es la misma tendencia que se encontró en el caso de estudio analizado en este capítulo (ver Figura 4.20).

La Figura 4.22 muestra el arreglo de las muestras de soldadura en función de la energía o calor de entrada. Claramente se ve una tendencia directamente proporcional y con un índice de linealidad alto, sobre todo a calores de entrada altos, que es donde se concentró la mayoría de las muestras en esta experimentación.

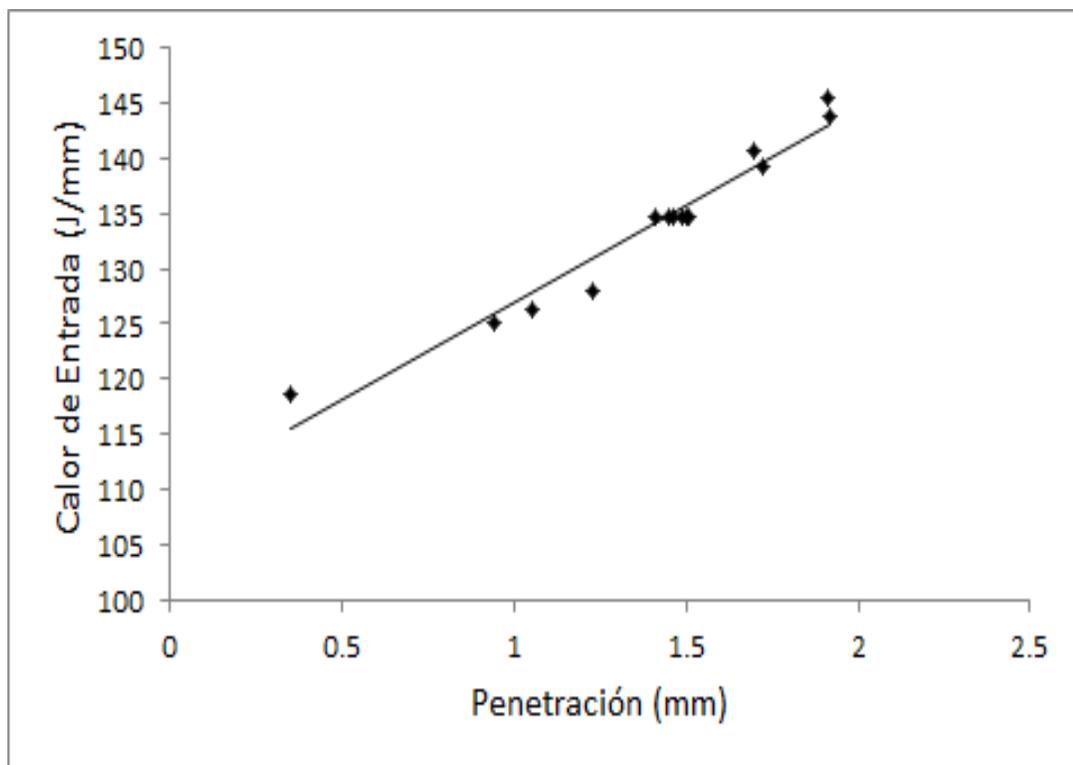


Figura 4.22. Gráfica del comportamiento de la penetración de soldadura en función del calor de entrada expresado en Joule/milímetro

Donde el calor de entrada está dado por la siguiente ecuación

$$C.E. = \frac{P}{V} * \eta \quad \text{Ec. 4.4}$$

Donde el C.E. es el calor de entrada (J/mm), la P es la potencia de soldadura (W), la V es la velocidad de soldadura y la η es la eficiencia de absorción del láser en los materiales sometidos al proceso de soldadura [15, 45].

Para efectos prácticos, en la bibliografía generalmente la η , para un proceso de soldadura por láser en modo de Keyhole en el cual interactúa la materia en estado líquido y en gas [45], se considera 1, por lo que la absorción del láser es del 100%. La Figura 4.23 muestra el grado de absorción en función del estado en el que se encuentra el material de soldadura.

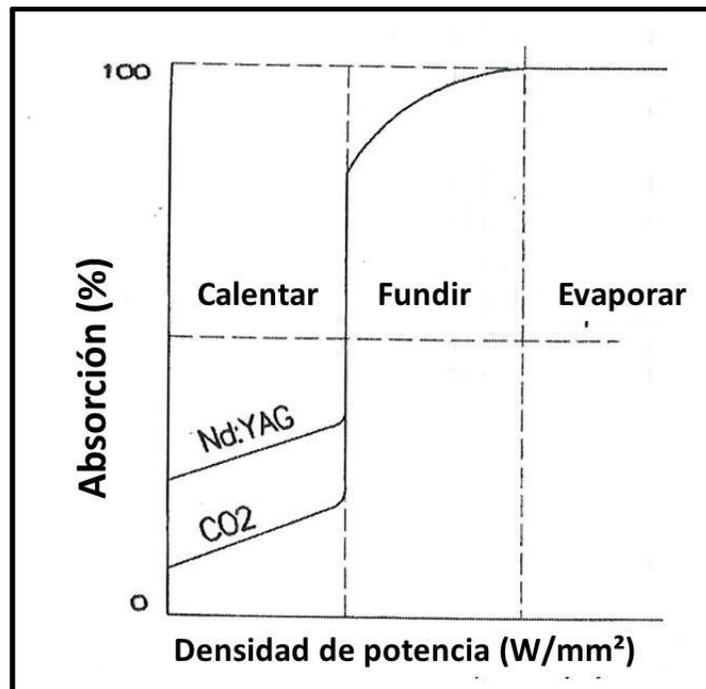


Figura 4.23. Grafica de absorción del láser en función del estado de la materia y la densidad de potencia [15]

En la Figura 4.23 se puede observar que en la transición de la materia de líquido a gas, la absorción del láser alcanzada es de hasta el 100% [15].

A continuación se analiza la influencia de los parámetros de estudio en el ancho de la zona de fusión de soldadura.

Ancho de la zona de fusión en la soldadura

La Figura 4.24 muestra la gráfica de contornos del ancho de la zona de fusión en contra de los parámetros analizados en este caso de estudio.

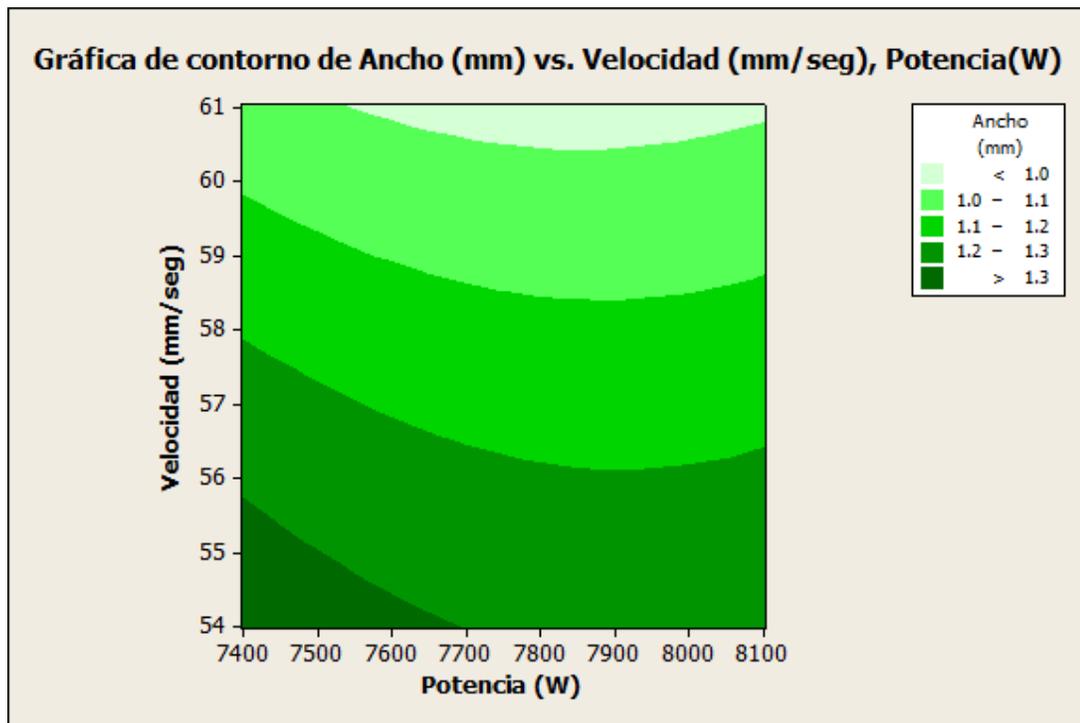


Figura 4.24. Grafica de contornos del ancho de la zona de fusión de la soldadura contra la velocidad y la potencia

En la gráfica anterior se observa que el parámetro que mayor influencia tienen en la variable de respuesta es la velocidad de soldadura, y por consecuencia la pendiente de la influencia de ambos parámetros es reducida,

sobre todo cuando se realizan soldaduras con el máximo de potencia a velocidades altas de soldadura, que es el objetivo para una aplicación en un proceso industrial, ya que así se utiliza al máximo el equipo y además se utiliza el tiempo ciclo de soldadura con el tiempo más bajo posible, sin comprometer la integridad mecánica y el resultado en la evaluación de la soldadura aplicando los criterios de aceptación correspondientes al estándar del proceso de soldadura utilizado.

A continuación se realiza un análisis individual de las muestras más significativas obtenidas en el diseño experimental. La siguiente figura muestra las tres muestras que se soldaron con el menor calor de entrada en el diseño experimental de este caso de estudio.

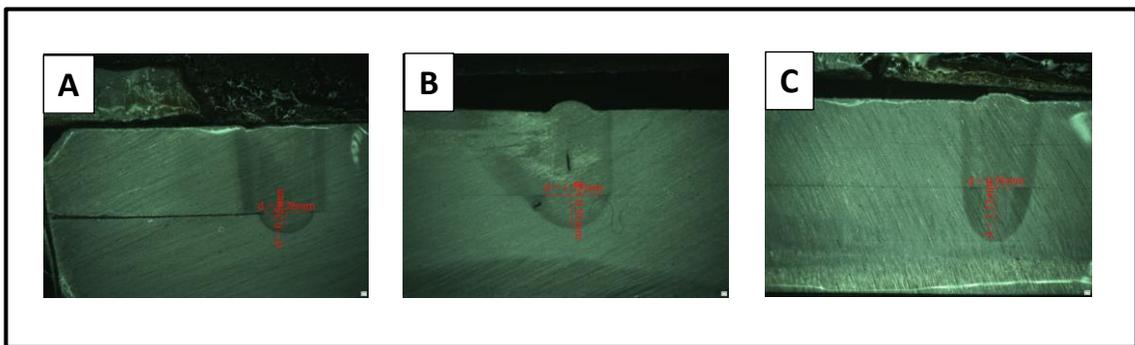


Figura 4.25. Muestras de soldadura con bajo calor de entrada (10X). A) Muestra 8, C.E. = 118.66 J/mm, B) Muestra 3, C.E.= 125 J/mm y C) Muestra 11, C.E. = 127.97 J/mm

En la Figura 4.25 las muestras presentan un nivel de penetración de soldadura bajo, causado por una baja intensidad en la energía o calor de entrada suministrado durante la aplicación de soldadura. La muestra 8 que se ilustra en la macrografía de Figuras 4.25A es en la que se obtuvo la menor penetración de soldadura en el diseño de experimentos, con 0.35 mm, que está muy por debajo del requerimiento de la estándar de evaluación de soldadura láser [83]. Además como se mencionó en el caso de estudio anterior, con este

perfil de penetración tan bajo, la integridad mecánica de la soldadura está comprometida, ya que cualquier variación mínima en el proceso; ya sea por pérdida de potencia por una degradación o desgaste en la óptica de protección (Figura 4.5) puede ocasionar un desprendimiento a valores inferiores de esfuerzo y carga. En esta muestra la principal causa de la baja penetración de soldadura es la potencia a la que fue soldada, que fue de 7396 watts. En las muestras 3 y 11, se obtuvo mayor penetración, sin embargo el resultado fue muy cercano al límite inferior del requerimiento del estándar, lo cual no es muy recomendable para aplicaciones de producción masiva donde otras variables pueden causar fluctuaciones y pérdidas de potencia. En la muestra 3 de la Figura 4.25B fue soldada con mayor potencia pero no fue la suficiente para lograr al menos un milímetro de penetración que es lo que requiere el estándar, y además presento agrietamiento por tensión superficial por la pobre relación penetración:ancho. En la muestra 11 de la Figura 4.25C si se logró una penetración mayor a 1 milímetro, sin embargo el ancho de la zona de fusión fue de 0.96 mm, debido a la velocidad de soldadura de 61.4 mm/seg, que fue la mayor en este diseño experimental.

Las siguientes muestras de la Figura 4.26 fueron soldadas con el mismo calor de entrada. Estas muestras son las réplicas del diseño experimental, que son principalmente utilizadas para medir el índice de respetabilidad de los resultados en las variables de respuesta.

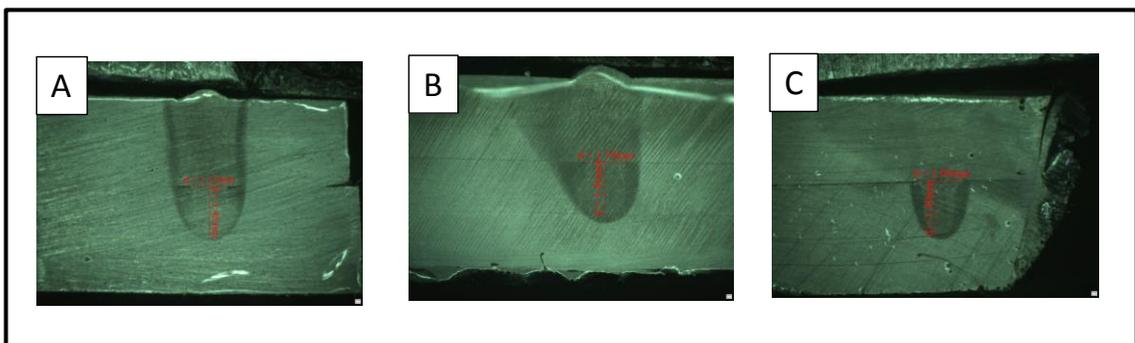


Figura 4.26. Muestras de soldadura con un calor de entrada de 134.78 J/mm (10X). A) Muestra 5, B) Muestra 7 y C) Muestra 14

En las muestras de la Figura 4.26 se puede observar que existe poca variación en la penetración (la variación fue menor del 3%) y el ancho de fusión de soldadura (la variación fue aproximada al 6%) cuando se utilizan los mismos parámetros de soldadura, por lo que el equipo láser si tienen alta respetabilidad para la soldadura en esta configuración de soldadura.

En la Figura 4.27 se presentan las soldaduras realizadas con el mayor calor de entrada en el diseño de experimentos.

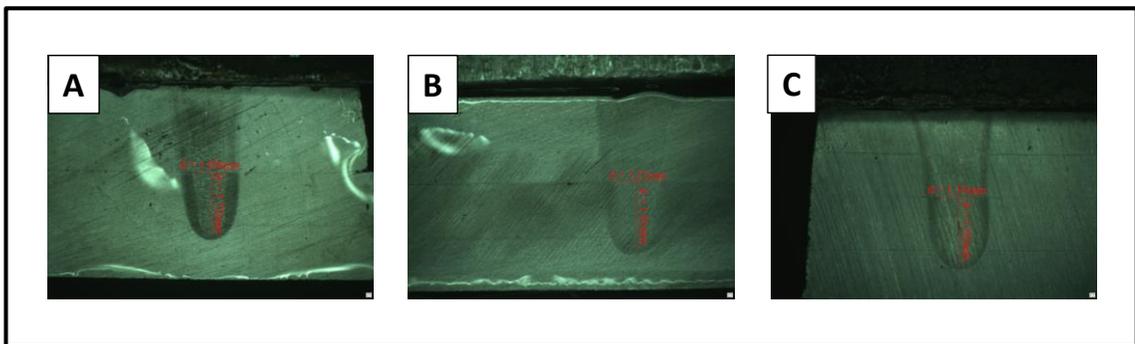


Figura 4.27. Muestras de soldadura con alto calor de entrada (10X). A) Muestra 4, C.E. = 139.33 J/mm, B) Muestra 2, C.E.= 145.45 J/mm y C) Muestra 9, C.E. = 143.93 J/mm

Las muestras 4, 2 y 9 de las Figuras 4.27A, B y C son las que presentaron mayor índice de penetración y el más alta relación penetración:ancho en la experimentación de este caso de estudio, inclusive las muestras 2 y la 9 están fuera de los criterios de aceptación para soldadura láser para este tipo de configuraciones de soldadura (ver Figura 4.10) para penetración de soldadura. De los resultados obtenidos en las micrografías analizadas en las figuras 4.25 a 4.27 se pudo afirmar que existe una correlación directa entre las variables de respuesta y los parámetros utilizados en la experimentación, sin embargo para lograr obtener un perfil que este dentro de los criterios de aceptación y a su vez que sea capaz de absorber las variantes en un proceso de producción a gran escala, es una buena opción la optimización de estos parámetros. En la siguiente sección se realiza una optimización de los parámetros para obtener una

respuesta en las variables de penetración y ancho de la zona de fusión adecuada.

4.2.2. Optimización de Parámetros

Para la optimización de los parámetros en este estudio se buscó las mismas condiciones en las variables de respuesta de penetración y ancho de la zona de fusión de soldadura. Sin embargo para este caso de estudio además se buscó obtener el máximo de velocidad de soldadura posible para lograr una penetración de 1.75 mm y ancho en la zona de fusión de 1.08mm, para así garantizar que la muestra optima estuviera dentro de la especificación requerida para muestras soldadas por láser en el ensamble de componentes automotrices y además se con estos valores en la variable de respuesta se proporcionara un factor de seguridad en las características y requerimientos de los criterios de evaluación para absorber las posibles variaciones del proceso en una aplicación industrial con alto nivel de producción, sin salirse de la especificación de soldadura láser que fue mostrada en la Figura 4.10.

La siguiente figura muestra el grafico de superficie de respuesta de la penetración en contra de los parámetros de potencia y velocidad de soldadura.

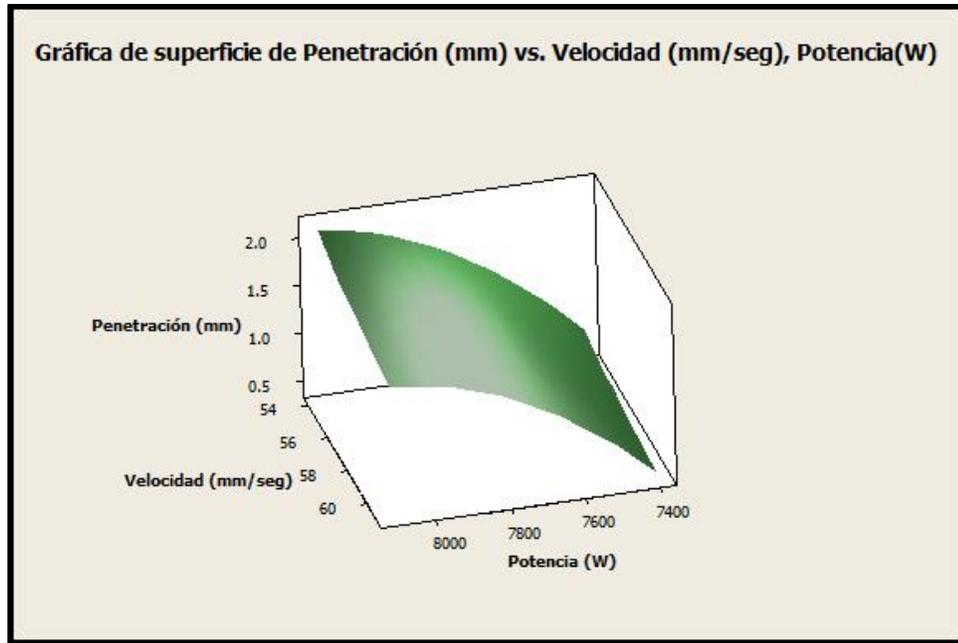


Figura 4.28. Gráfica de superficie de respuesta de la penetración de soldadura en el caso de estudio dos

En la gráfica de la figura 4.28 se observa con claridad que ambos factores tienen un efecto en la variable de respuesta de penetración, como se observó y se discutió anteriormente en la Figura 4.20. Además en esta figura se observa que el factor de velocidad tiene mayor efecto en la variable de respuesta a las potencias más elevadas que se utilizaron en esta experimentación.

El modelo de predicción que describe la gráfica de la figura 4.28 es el siguiente:

$$\mathbf{Penetracion} = -10.7824 + 0.00193016 \mathbf{P} - 0.048234 \mathbf{DF} \quad \text{Ec. 4.5}$$

La desviación estándar de los datos adaptados al modelo lineal fue de $S = 0.152242$ y una R-Sq de 89.58% lo que indica que los datos se adaptan con un error reducido a un modelo lineal, pero con mayor error que el obtenido en el

modelo del caso de estudio uno, ya que como se puede observar en la gráfica de la figura 4.20 y 4.22 la influencia de la combinación de ambos factores no se comporta totalmente lineal en la variable de respuesta de penetración de soldadura, sobre todo a un calor de entrada o potencia de baja magnitud

Para la optimización de este proceso primeramente se buscó encontrar la velocidad requerida para obtener un ancho de la zona de fusión de al menos 1.08 milímetros y así tener un factor de seguridad con respecto al estándar y criterios de evaluación de soldadura láser. Se partió por la obtención de la velocidad ya que a potencias y velocidades altas, que es como se desea trabajar para utilizar al máximo el equipo, es poca la variación que provoca la potencia en la variable de respuesta. Esto se puede observar con mayor claridad en la Figura 4.24.

La siguiente figura muestra el grafico de superficie de respuesta del ancho de la zona de fusión en contra de los parámetros de potencia y velocidad de soldadura.

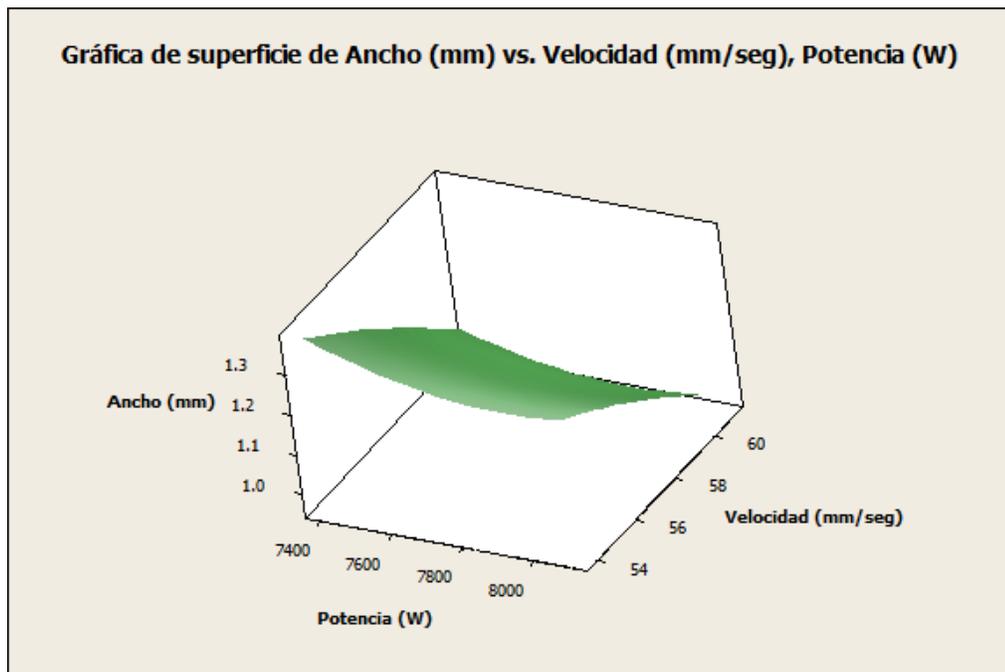


Figura 4.29. Grafica de superficie de respuesta del ancho de la zona de fusión de soldadura en el caso de estudio dos

Así mismo el modelo que describe la gráfica de la figura 4.29 es el siguiente:

$$\mathbf{Ancho\ de\ la\ zona\ de\ fusion = 4.477 - 9.07^{-5}P + -0.0455 DF} \quad \text{Ec. 4.6}$$

La desviación estándar de los datos adaptados al modelo lineal fue de $S = 0.0422836$ y una R-Sq de 81.83% lo que indica que los datos se adaptan con un error menor al 20% a un modelo lineal. Este modelo fue el que presento mayor error de adaptación a un modelo lineal, ya que el comportamiento de la variable de respuesta tiene cierta variación al comparar su comportamiento en niveles altos y bajos de los factores de potencia y velocidad.

Para validar los modelos de predicción estadística se soldó una muestra con los parámetros propuestos para optimizar las variables de respuesta de penetración y ancho de la zona de fusión. Los parámetros y las respuestas esperadas por los modelos estadísticos fueron las siguientes:

Tabla 4.6. Parámetros óptimos y respuesta esperada

Parámetros		Respuesta	
Potencia	7957.74 W	Penetración	1.75 mm
Velocidad de soldadura	6.3 mm	Ancho de la zona de fusión	1.08 mm

A diferencia del caso de estudio del capítulo 4 donde se buscaba en la optimización lograr 1.8 milímetros, en este caso de estudio se buscó 1.75, ya que se encontró que la variable de respuesta de penetración tiene más desviación estándar y variabilidad que en el caso de estudio anterior y por consecuencia la respuesta en la predicción se podía pasar de 1.9 milímetros y salirse de la especificación.

La siguiente figura muestra la macrografía en un corte transversal de la muestra de soldadura utilizando los parámetros óptimos.

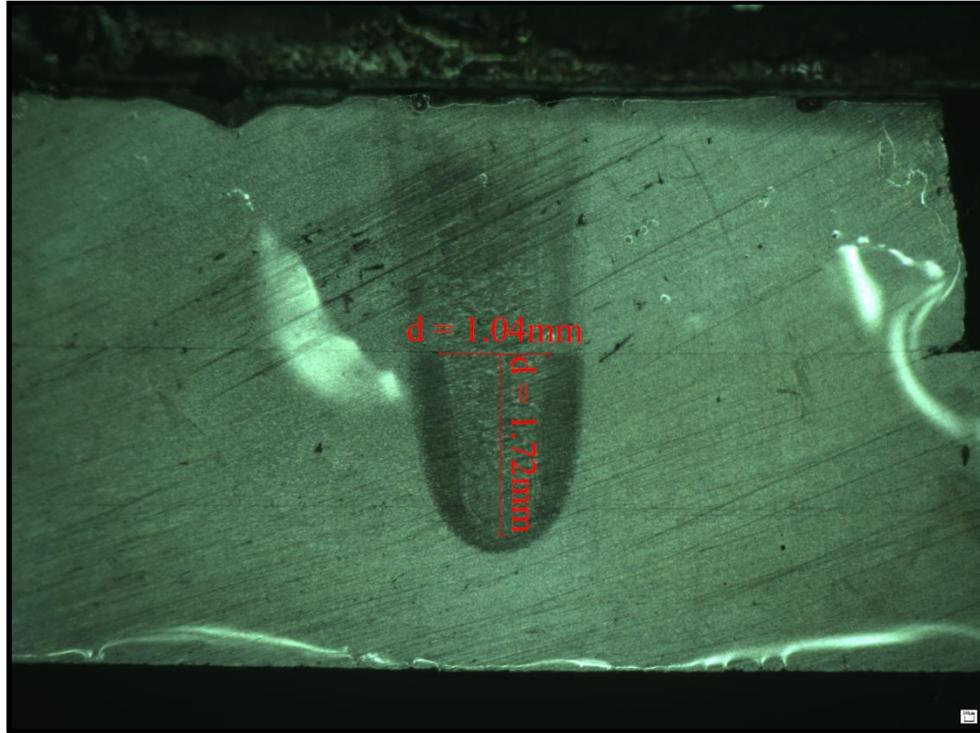


Figura 4.30. Macrografía de un corte transversal de la unión de soldadura utilizando los parámetros óptimos

En la figura anterior se observa que la soldadura está libre de defectos y además los valores en las mediciones realizadas en el ancho y la penetración de soldadura están dentro de la especificación de soldadura láser (ver figura 4.10). Además al comprar los resultados de penetración obtenidos con los resultados de las respuestas esperadas o predichas por el modelo se encontró un error del 1.2% para la penetración y del 3.8% para el ancho de la zona de fusión, lo cual indica que el modelo estadístico como herramienta de predicción es bastante acertado, en valores altos en los factores de potencia y velocidad de soldadura, y por lo tanto se puede utilizar para la predicción en la aplicación desarrollada con los parámetros analizados en este caso de estudio.

Así mismo con el propósito de evaluar que no hubiera una caída en las propiedades mecánicas de la zona afectada por el calor o en la soldadura, se realizó un perfil de la microdureza en la muestra óptima, en el cual se consideraron mediciones en el metal base, zona afectada por el calor y zona de soldadura. La siguiente figura muestra las indentaciones y la gráfica del perfil de microdureza de la muestra soldada con parámetros óptimos.

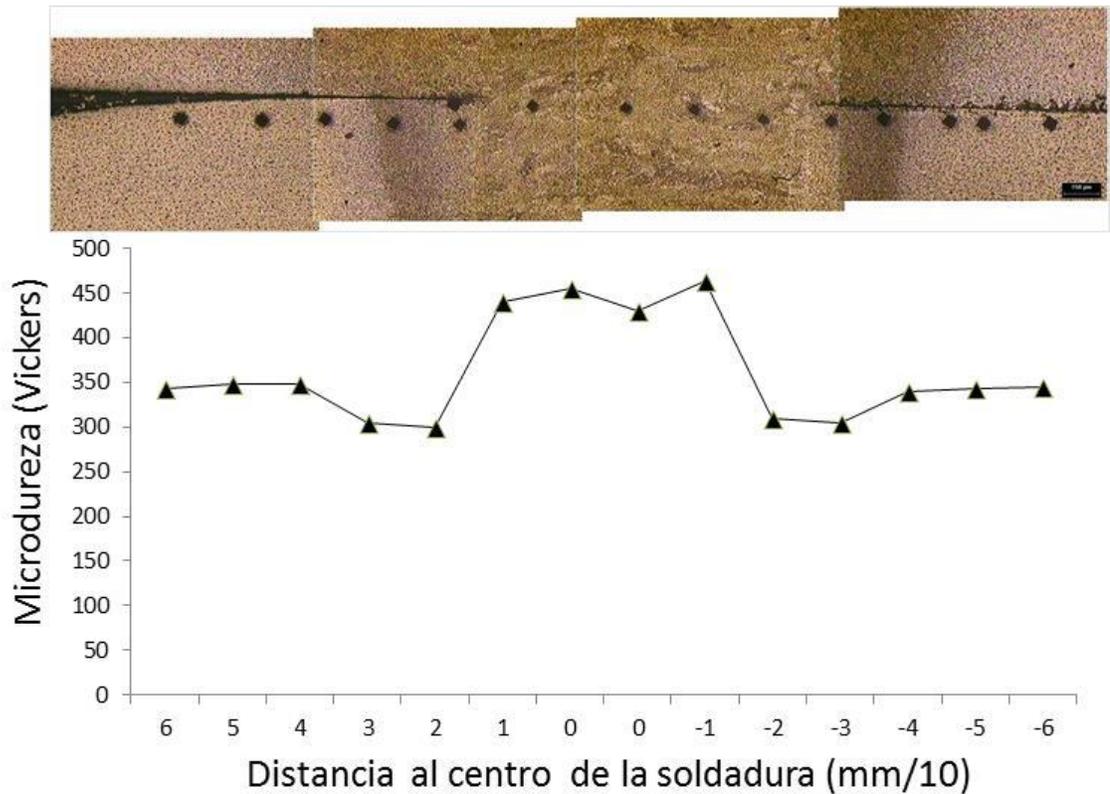


Figura 4.31. Microdureza Vickers en perfil de soldadura de caso de estudio en la muestra de soldadura láser con parámetros óptimos acero DP 980-S

En la figura 4.31 se observa que en el metal base se obtuvo una medición de microdureza característica de los aceros DP 980, que es aproximadamente de 340 HV [88, 91-95]. Sin embargo en la ZAC se encontró una caída en la dureza de alrededor de 40 Vickers, principalmente ocasionada por la pérdida en el

arreglo de las fases en la microestructura y el revenimiento de la fase martensítica en la matriz Ferrítica (ver Figura 4.15), lo cual fue encontrado en el caso de estudio anterior. Sin embargo una caída mayor a 50 Vickers se reportó en otros casos de estudio encontrados en la bibliografía [88,92], donde la soldadura láser se realizó con una velocidad de soldadura menor, debido al uso de un equipo con menor potencia, y por lo tanto el tiempo de afectación en el material, principalmente en la ZAC, se incrementó. Así mismo en la zona de soldadura la microdureza encontrada fue de hasta 460 Vickers, lo que representa un incremento de hasta 120 Vickers con respecto al material base, esto se debe principalmente a la gran densidad de potencia y velocidad de enfriamiento en un proceso soldadura láser por Keyhole, que ocasiona la formación de fases duras como la martensita.

Para hacer una comparación del resultado encontrado en el perfil de microdureza en este caso de estudio y otros desarrollos experimentales, en la figura siguiente se presenta un resultado de microdureza encontrado la bibliografía para la soldadura láser del mismo material utilizado en este caso de estudio.

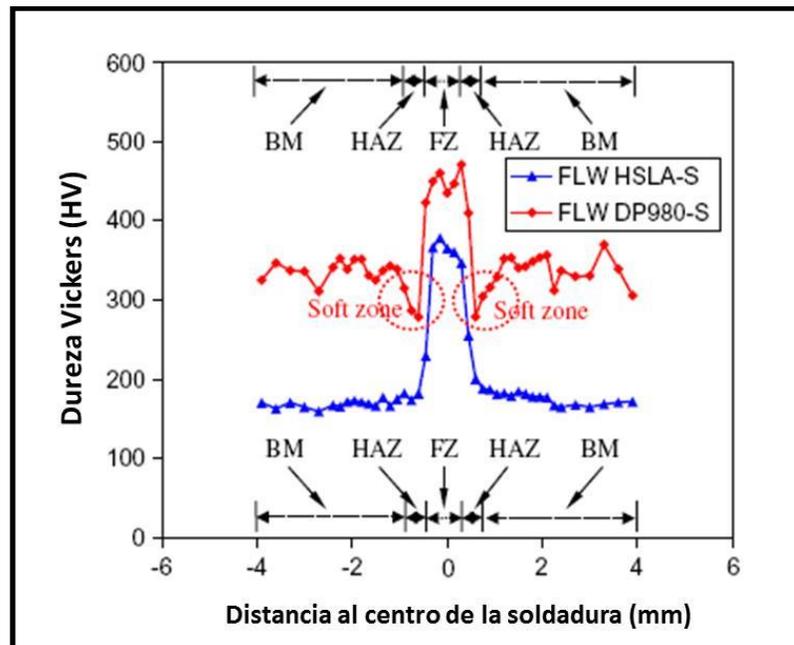


Figura 4.32. Microdureza Vickers en perfil de soldadura de caso de estudio encontrado en la bibliografía [88], en un acero DP 980-S

W. Xu y colaboradores soldaron con un láser IPG de 10Kw dos placas de material DP 980-S en configuración de soldadura a tope (perfil de microdureza en color rojo de la Figura 4.32). En su trabajo ellos encontraron un comportamiento muy similar al obtenido en esta experimentación, con una microdureza igual en el material base, un decremento en la zona afectada por el calor y un una dureza de 450 Vickers en la zona de soldadura.

Así mismo se encontró en un reporte de análisis de susceptibilidad de la soldadura de aceros avanzados para la industria automotriz [91], resultados de perfiles de microdureza de soldadura de aceros DP 980-GA utilizando otros procesos. Los perfiles de este reporte son los siguientes.

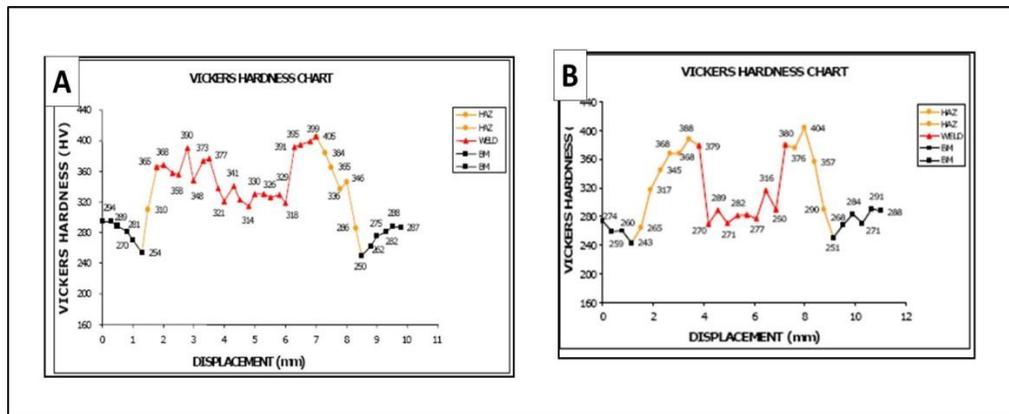


Figura 4.33. Perfil de microdureza de soldadura un acero DP 980-GA A) Perfil de soldadura hibrida (arco GMAW - láser) y B) Soldadura por arco GMAW [91]

En la figura 4.33 se observa claramente que el deterioro en las propiedades mecánicas de microdureza es mucho mayor con proceso de soldadura convencional que con uno avanzado, como lo es el de soldadura láser. Por lo tanto el proceso de soldadura láser es un proceso adecuado para la soldadura de los aceros AHSS, ya que la integridad mecánica de la soldadura es mejor que con los procesos convencionales, además se puede soldar a mayor velocidad y la precisión y repetitividad de este proceso hace muy fácil su optimización.

4.2.3. Validación del modelo matemático

Para validar el modelo matemático propuesto en la primera sección del capítulo 3, al igual que en el caso de estudio uno, y además para seguir evaluando el comportamiento del funcionamiento de la metodología de optimización propuesta en este trabajo, se utilizaron las mismas ecuaciones, que son la 3.16, 3.17 y 3.18. Los parámetros que se utilizaron en este caso de estudio, para la validar de las variables físicas de predicción del modelo matemático, se muestran en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 Parámetros para validación del modelo en caso de estudio dos [43, 99-100]

Muestra	Pe	v (m/seg)	a (m)	k (μm)	K (m^2/seg)	Tv (C°)	T0 (C°)
1	0.640	0.055	0.000496	1.03	2.13×10^{-5}	2740	25
2	0.625	0.055	0.000484	1.03	2.13×10^{-5}	2740	25
3	0.592	0.06	0.00042	1.03	2.13×10^{-5}	2740	25
4	0.572	0.05861	0.000416	1.03	2.13×10^{-5}	2740	25
5	0.605	0.0575	0.000448	1.03	2.13×10^{-5}	2740	25
8	0.680	0.0575	0.000504	1.03	2.13×10^{-5}	2740	25
9	0.626	0.0575	0.000464	1.03	2.13×10^{-5}	2740	25
10	0.684	0.053964	0.00054	1.03	2.13×10^{-5}	2740	25
11	0.550	0.061036	0.000384	1.03	2.13×10^{-5}	2740	25

Para el cálculo de la potencia Pz, que es la potencia para una penetración de soldadura dada, que en este caso es la obtenida experimentalmente para cada una de las muestras, se utilizó la ecuación 3.17, sustituyendo el número de Peclet para la penetración lograda experimentalmente y los parámetros de validación de la Tabla 4.7.

La Figura 4.34 muestra una comparación entre las potencias utilizadas en la experimentación y las potencias predichas por el modelo matemático.

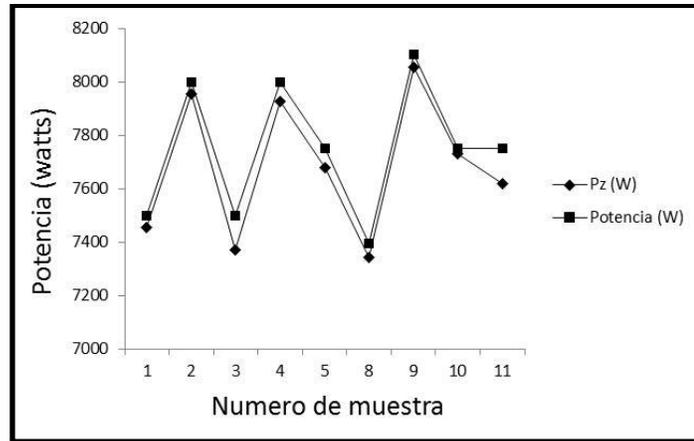


Figura 4.34. Potencia usada en la experimentación vs potencia predicha por el modelo matemático en el caso de estudio dos

En la figura anterior, a diferencia del caso de estudio uno, donde se evaluó la influencia de la distancia focal, se puede observar que la diferencia entre las potencias utilizadas en la experimentación y las potencias predichas por el modelo para una penetración dada, tienen un cierto grado de error para las muestras 3 con 128 watts y 11 las once con error de 131 watts, que fueron las que se efectuaron a mayor velocidad de soldadura. Este comportamiento podría deberse al cambio de morfología que ocurre en la cavidad del Keyhole cuando se realizan uniones de soldadura a alta velocidad, ya que el tiempo de permanecía de la energía y la densidad de potencia del láser en la zona de soldadura es menor, lo cual tiende a causar una disminución el tamaño del Keyhole. Es por eso que el modelo predice menor potencia para lograr las penetraciones obtenidas experimentalmente, ya que es difícil incluir el efecto que tiene la velocidad en la morfología y disminución en la dimensión de la cavidad del Keyhole en un modelo de análisis matemático. Sin embargo una variación de 131 watts, que es menor al 2% de la potencia total del equipo láser utilizado en este caso de estudio, y que es el máximo error de predicción para el modelo en este caso de estudio, se puede compensar con facilidad ya que no representa una gran diferencia para un cambio significativo en la característica física de penetración de soldadura. Esto se puede observar con mayor claridad en las gráficas de contorno de la penetración en función de la potencia y la velocidad de soldadura de la Figura 4.20.

Por lo tanto de los Figura 4.34, se puede concluir que para este caso de estudio, el modelo matemático se puede utilizar como un herramienta de predicción de la potencia para obtener una predicción muy aproximada de la penetración cuando se desea utilizar el máximo de velocidad de soldadura.

La siguiente figura y la Tabla 4.8, muestran la comparación del ancho de la zona de fusión obtenido experimentalmente y la predicción del ancho de la cavidad del Keyhole.

Tabla 4.8. Porcentaje de diferencia entre ancho de soldadura en zona de fusión y ancho del Keyhole para el caso de estudio dos

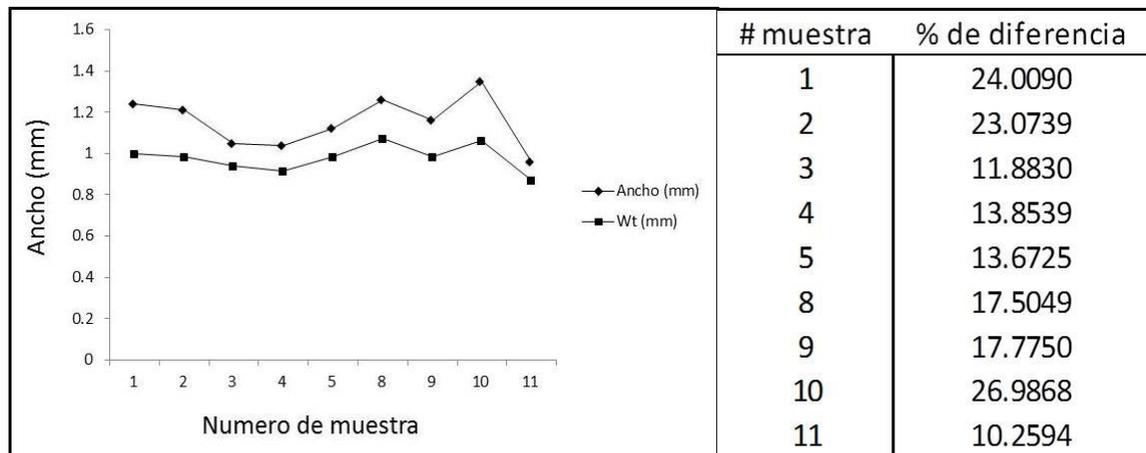


Figura 4.35. Penetración de soldadura del caso de estudio dos: penetración experimental vs penetración predicha en el Keyhole por el modelo matemático

En la figura 4.35 y en la tabla 4.8 se observa una tendencia de un bajo porcentaje de diferencia para las muestras 3,4,5 y 11, que son las que se soldaron a mayor velocidad, por lo que la conducción de calor hacia la zona de soldadura fue la menor, para las muestras 1,2 y 10, que son las que se soldaron a mayor velocidad la diferencia aproximada es del 25%, debido al alto tiempo de permanencia de la cavidad del Keyhole que ocasiona incremento en el grado de conducción de calor y consecuentemente mayor zona de fusión de soldadura. Las diferencias entre la zona de fusión de soldadora con respecto al tamaño del Keyhole son un aporte muy significativo, ya que no existen datos precisos en la bibliografía sobre esta tipo de aproximaciones.

Capítulo 7

CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas procedidas del análisis de la aplicación de la metodología propuesta en este trabajo, para los dos casos de estudio desarrollados en esta investigación.

- Con la aplicación de la metodología propuesta en este trabajo, en la cual se contempló la aplicación de un modelo matemático y el desarrollo de un modelo de optimización estadístico, en conjunto con un apropiado desarrollo experimental, fue posible optimizar un proceso de unión por soldadura láser para aplicaciones en aceros AHSS de dos fases de los grados 600 y 980, para dos casos de estudio, en los cuales se estudió la influencia de dos configuraciones de parámetros de soldadura diferentes.
- En los dos casos de estudio se encontró que el proceso de soldadura láser es capaz de obtener soldaduras libres de defectos en uniones a traslape utilizando aceros de doble fase, y además con la optimización estadística de los parámetros es posible obtener uniones de soldadura que cumplen con los criterios de evaluación de los estándares de soldadura láser aplicados en la industria automotriz.

- Se comprobó mediante análisis en caracterizaciones microestructurales y perfiles de microdureza, que el proceso de soldadura por láser ofrece un mayor grado de soldabilidad en la unión de aceros AHSS de doble fase, ya que la degeneración de las propiedades mecánicas y la pérdida del arreglo microestructural de las fases en la zona de soldadura y la zona afectada térmicamente es menor que en soldaduras realizadas por procesos convencionales de soldadura.
- Mediante un análisis bibliográfico se desarrolló un modelo matemático que resulto versátil para ser aplicado en dos casos de estudio, donde se estudió la influencia de dos configuraciones de parámetros para la soldadura láser de aceros AHSS de doble fase de los grados DP600 y DP 980. El modelo fue capaz de realizar predicciones acertadas de las características físicas de la unión de soldadura.
- Los parámetros óptimos, para la obtención de las variables de respuesta de penetración y ancho de la zona de fusión óptimas para el caso de estudio uno fueron de 6600 watts de potencia, con una distancia focal de 6.3 milímetros y una densidad de potencia de 22,200 watts, y para el caso de estudio dos una potencia de 7957.74 watts y una velocidad de soldadura de 58.61 mm/seg, que dieron como resultado un calor de entrada de 141.75 J/mm. Con estos parámetros se lograron obtener muestras de soldadura que cumple con las características y requerimientos que demandan los criterios de aceptación de uniones de soldadura por rayo láser para la industria automotriz y además con un factor de seguridad adecuado para producción en masa de soldadura láser de componentes automotrices.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (2013). “*World vehicle production reached 84.1 million in 2012*”, www.oica.net, oica. Consultado el 10 de junio de 2013
- [2]. Basurto Álvarez, Rodolfo (2013). “*Estructura y recomposición de la industria automotriz mundial. Oportunidades y perspectivas para México*”, Journal of Economic Literature, vol. 10 núm. 30, pp. 75-92.
- [3]. Maldonado, Serafín (2009). “*La rama automovilística y los corredores comerciales del tlcan*”, Revista Comercio Exterior, Vol. 59, núm. 5, pp. 65-86.
- [4]. International Monetary Fund (2011), “*2010 GDP data: World Economic outlook Database*”, September 2011.
- [5]. E. Wilson, Christopher (2011). “*Working Together: Economic Ties between the United States and Mexico*” Mexico Institute: Woodrow Wilson International Center for Scholars, ISBN: 1-933549-74-2 pp. 11
- [6]. B.S. Yilbas, S.S. Akhtar, E. Bayraktar, Z. Gasem (2012). “*Laser Cutting of Thin Aluminum and Silicon alloy: Influence of Laser Power on Kerf width*” Advanced Materials Research Vol. 445 pp 442-447.
- [7]. Johan Meijer (2004). “*Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities*” J. of Materials Processing Technology.149, pp. 2-17.
- [8]. X. Chen, X. Liu (1999). “*Short pulsed laser machining: how short is short enough?*” J. Laser Appl. 11 (6) pp. 268–272.
- [9]. M. Seifert, K. Anhalt, C. Baltruschat, S. Bonss, and B. Brenner (2014). “*Precise temperature calibration for laser heat treatment*”, J. Sens. Sens. Syst., 3, pp. 47–54.
- [10]. L. Quintino, P. Vilaca, R. Rodrigues, and I. Bordalo (2001). “*Laser Beam Welding of Automobile Hinges*”, Welding Research Supplement, 261-s, pp. 261-267.
- [11]. G. Govender, L. Ivanchev, D. Hope, H. Burger and G. Kunene (2007). “*Comparative study on laser welding and TIG welding of semi-solid high pressure die cast A356 aluminum alloy*”, Metal and metal processes General science, engineering & technology.
- [12]. A. Ribolla, G.L. Damoulis, G.F. Batalha (2005). “*The use of Nd:YAG laser weld for large scale volume assembly of automotive body in white*” Journal of Materials Processing Technology 164–165, pp.1120–1127.
- [13]. E. Schubert, M. Klassen, C. Walz, G. Sepold (2001). “*Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in*

- automobile and aerospace industry*", J. Mater. Process. Technol. 115, pp. 2–8.
- [14]. P. Hoffman, M. Geiger (1995), "*Recent developments in laser system technology for welding application*, in: *Manufacturing Technology*", CIRP Annals 44/1/1995, Hallwag Ltd., Berne, Switzerland, pp.151–15.
- [15]. Simon L. Engel. (2009). "*Laser Welding: Equipment and Process Validation*", Manual del Curso, University of Wisconsin-Madison en Las Vegas NV. Folio: K977.
- [16]. John C. Ion. (2005). "*Laser processing of engineering materials. Principles, procedure and industrial application*". Elsevier Butterworth – Heinemann.
- [17]. John F Ready. (2001). "*LIA Handbook of Laser Materials Processing. Orlando*", FL: Laser Institute of America, Magnolia Publishing.
- [18]. Q. Huang, J. Hagstroem, H. Skoog and G. Kullberg (1991). "*Effect of laser parameter variation on sheet metal welding*", Inter. J. for the joining of Materials, Vol. 3, No. 3, Sep. 1991, pp. 79-88.
- [19]. P. W. Fuerschbach (1996), "*Measurement and Prediction of Energy Transfer Efficiency in Laser Welding*", Welding Journal, Vol. 75, pp. 24 – 34.
- [20]. K. Y. Benyounis, A. G. Olabi and M. S. J. Hashmi (2005). "*Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bead profile*", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 164-165, pp 978-985.
- [21]. Praga Alejo Rolando J., Torres Treviño Luis M., González González David S., Acevedo Dávila Jorge, Cepeda Rodríguez Francisco (2012). "*Analysis and evaluation in a welding process applying a Redesigned Radial Basis Function*", Expert Systems with Applications Vol. 39 (10), pp. 9669-9675.
- [22]. Hsuan-Liang Lin & Chang-Pin Chou (2008). "*Modeling and optimization of Nd:YAG laser micro-weld process using Taguchi Method and a neural network*", Int J Adv Manuf Technol, vol. 37 pp.513–522.
- [23]. I. Tomashchuk, J.-M. Jouvard, P. Sallamand (2007). "*Numerical modeling of copper-steel laser joining*", Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Users Conference, Grenoble.
- [24]. M. Ilie, E. Cicala, D. Grevey, S. Mattei, V. Stoica. "*Diode Laser Welding of ABS: Experiments and Process Modelling*", PACS: 42.68.Mj; 44.05.e; 78.66.Qn
- [25]. Centre for Advanced Materials Joining (2013). "*Showcase of laser welding of AHSS research*", Artículo en internet: <http://uwaterloo.ca/centre-advanced-materials-joining/showcase-laser-welding-ahss-research>. Consultado el 20 de junio del 2013.

- [26]. American Welding Society: AWS. “*Vision for Welding Industry*” AWS report, 550 N.W. LeJeune Rd. Miami, FL 33126.
- [27]. ArcelorMittal (2014). “*Multi-thickness laser welded blanks: Tailored Blanks*” Automotive Worldwide; Extract from the product catalogue - European edition.
- [28]. Xiaocong He (2012). “*Finite Element Analysis of Fatigue Behaviour of Laser Welded Joints*”, International Conference on Solid State and Materials, Lecture Notes in Information Technology, Vol.22.
- [29]. PRO MEXICO (2013). “*México: La industria automotriz*”, www.promexico.gob.mx, Consultado el 20 de Noviembre del 2013.
- [30]. Alan R. Walker (2012). “*Invent or Discover the art of useful science*”, alanwalker books, Edinburgh, ISBN: 0-9545173-1-8.
- [31]. V.Aboites. (1991). “*Láseres una introducción*”, Centro de investigaciones en óptica A. C. México.
- [32]. ROFIN – Dr. Peter Wirth (2004). “*Introduction to Industrial laser materials processing*”, Hamburg October 2004.
- [33]. AWS: American welding society. (2005). “*Safety in welding, cutting and allied process*”, annex D, ANSI Z49.1.
- [34]. TechNavio (2013). “*Global Industrial Laser Market 2012-2016*”, ISBN: 1877108, pp. 1-67.
- [35]. Dr. E. Gómez González (2006). “*Fuentes de luz y emisión láser*”. Dpto. de física aplicada (Universidad de Sevilla).
- [36]. Cepeda Rodríguez, Francisco (2009). “*Análisis y optimización de parámetros empleados en la unión y tratamientos superficiales mediante láser CO₂ y Nd-YAG en la aleación de cobalto ASTM F-75*”, Tesis de maestría, COMIMSA.
- [37]. Gómez González E. (2006). “*Fuentes de luz y emisión láser*”, Dpto. de física aplicada (Universidad de Sevilla).
- [38]. Jari Hovikorpi, Apricon Oy (2007). “*Disk Lasers at TRUMPF*”, Lasertekniikan Workshop, 9.5.2007 ELME-Studio Nivala.
- [39]. Lawrence Green, “*New low-cost CO₂ beam profiler eliminates need for acrylic mode*”, Ophir-Spiricon Inc., Logan, UT, 84321, USA.
- [40]. Petring, R. Polzin, M. Becker. (2007). “*Join technologies; applications*”, Chapter 7.

- [41]. H. Al-Kazzaz, M. Medraj, X. Caob, M. Jahazi. (2008). "*Nd:YAG laser welding of aerospace grade ZE41A magnesium alloy: Modeling and experimental investigations*". *Materials Chemistry and Physics* 109:61-76.
- [42]. C. Dawes, C. Eng. (1992). *Laser Welding*, McGraw-Hill, Inc., USA.
- [43]. Komeil Kazemi, John A. Goldak. (2009). "*Numerical simulation of laser full penetration welding*", *Journal of Computational Materials Science* 44:841-849.
- [44]. Engel, Simon L. (1987). "*Classification of materials*", SME Paper No. MR87-238.
- [45]. Sindo Kou. (2003). "*Welding metallurgy*", Second edition.
- [46]. Y.J. Quan, Z.H. Chen, X.S. Gong, Z.H. Yu. (2008). "*Effects of heat input on microstructure and tensile properties of laser welded magnesium alloy AZ31*", *Materials characterization* 59, pp.1491-1497.
- [47]. Fotografía provista por: IPG Láser Company. (2007). Press Release.
- [48]. Paul Kah, Jinhong Lu, Jukka Martikainen, Raimo Suoranta (2013). "*Remote Laser Welding with High Power Fiber Lasers, Engineering*", Vol. 5, pp- 700-706, Published Online: <http://www.scirp.org/journal/eng>.
- [49]. Geert Verhaeghe and Paul Hilton (2005). "*The effect of spot size and laser beam quality on welding performance when using high-power continuous wave solid-state lasers*" ICALEO 2005, 24th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, Miami, Florida, USA. Paper #511.
- [50]. A. Ancona, T. Sibillano, L. Tricarico, R. Spina, P.M. Lugarà, G. Basile, S. Scchiavone (2006). "*An analysis of the shielding gas flow from a coaxial conical nozzle during high power CO₂ laser welding*", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 39, pp. 574-563.
- [51]. D. Grevey, P. Sallamand, E. Cicala, S. Ignat. (2005). "*Gas protection optimization during Nd:YAG laser welding*", *Optics & Laser Technology*, Vol. 37 (8), pp. 647–651.

- [52]. G. Tani, A. Ascari, G. Campana, A. Fortunato. (2007). “*A study on shielding gas contamination in laser welding of non-ferrous alloys*”, Applied surface science, Vol. 254, pp. 904-907.
- [53]. Alireza Javidi Shirvan, Isabelle Choquet, Håkan Nilsson (2012). “*Numerical modelling of shielding gas flow and heat transfer in laser welding process*”, Proceedings of the 5th International Swedish Production Symposium, SPS12.
- [54]. Bakshi. (2008). “*Electronic Measurement Systems*”, US: Technical Publications. pp. 4-14.
- [55]. Komeil Kazemi, John A. Goldak. (2009). “*Numerical simulation of laser full penetration welding*”, journal of Computational Materials Science Vol. 44, pp. 841-849.
- [56]. M. R. Frewin and D. A. Scott. (1999). “*Finite Element Model of Pulsed Laser Welding*”, journal of welding research supplement, Vol. 9, pp. 15-22.
- [57]. K. Y. Benyounis, A. G. Olabi, and M. S. J. Hashmi (2005). “*Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bead profile*”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 164–165, pp. 978–985
- [58]. Pavel Shcheglov (2012). “*Study of Vapour-Plasma Plume during High Power Fiber Laser Beam Influence on Metals*”, BAM-Dissertationsreihe • Band 88.
- [59]. J. Downen, M. Davis, P. Kapadia (1983). “*Some aspects of the fluid dynamics of laser welding*”, J. Fluid Mech., Vol. 126, pp. 123-146.
- [60]. J. Cross, U. Gratzke, G. Simon (1993). “*Towards a self-consistent model of the Keyhole in penetration laser beam welding*”, J. Phis. D: Appl. Phis., Vol. 26, pp. 474-480.
- [61]. A. Kaplan (1994). “*A model of deep penetration laser welding based on calculation of Keyhole profile*”, J. Phis. D: Appl. Phis., Vol. 27, pp. 1805-1814.
- [62]. J. Downen, P. Kapadia (1995). “*A mathematical investigation of the penetration depth in keyhole welding with continues CO₂ laser*” J. Phis. D: Appl. Phis., Vol. 28, pp. 2252-2261.

- [63]. K. N. Lankalapalli, J. F. Tu, M. Gardner (1996). “*A model for estimating penetration depth of laser welding process*” J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 29, pp. 1831-1841.
- [64]. A. Matsunawa, V. Semak (1997). “*The simulation of front keyhole wall dynamics during laser welding*” J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 30, pp. 798-809.
- [65]. P. Solana, J. Ocana (1997). “*A mathematical model for penetration laser welding as a free-boundary problem*” J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 30, pp. 1300-1313.
- [66]. W. Sudnik, D. Radaj, W. Erofeew (2000). “*Numerical simulation of weld pool geometry in laser beam welding*” J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 33, pp. 662-671.
- [67]. R. Fabbro, K Chouf (2000). “*Keyhole modeling during laser welding*” J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 87(9), pp. 4075-4083.
- [68]. R. Byron Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot (2006). “*Bird, Fenómenos de transporte*”, Segunda edición, México: Limusa Wiley, ISBN: 968-1 8-6365-8.
- [69]. Carslaw, H. S., Jaeger, J. C. (1959). “*Conduction of Heat in Solids*”, Clarendon Press, Oxford.
- [70]. .TRUMPF: David Havrilla (2010). “*Laser Based Manufacturing in the Automotive Industry*” TRUMPF, Inc. Laser Technology Center Plymouth, MI.
- [71]. TRUMPF (2006). “*General hints for: programmable focusing optics PFO 3D*”, 12-12-40-A1-AY, pp. 1–11.
- [72]. DIN: Deutsches Institut für Normung (2013). “*DIN EN 10338: Hot rolled and cold rolled non-coated flat products of multiphase steels for cold forming*” DIN-adopted European Standard, pp. 1-16.
- [73]. William L. Stellwag Jr. (2012). “*M.S. Thesis: Fiber laser welding of 304 stainless steel and the effects of various parameters on materials coupling and back- reflection*” Graduate Program in Welding Engineering, The Ohio State University.

- [74]. ASTM International standards. (2014). “*ASTM E18-14, Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*” Developed by Subcommittee: E28.06, Book of Standards Volume: 03.01.
- [75]. Eric Stiles IPG Photonics (2010). “*Fiber Lasers: The Flexible Tool for High Power Laser Welding*” AWS New Welding Technologies Conference.
- [76]. VDA: Verband der Automobilindustrie e.V. (2011) “*VDA 239-100:2011 Sheet Steel For Cold Forming*”, German Automotive Standard.
- [77]. ASTM International standards. (2013). “*ASTM , Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*”, Developed by Subcommittee: E28.04, Book of Standards Volume: 03.01, DOI: 10.1520/E0008_E0008M.
- [78]. ASTM International standards. (2011). “*ASTM E3-11, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*”, Developed by Subcommittee: E04.01, Book of Standards Volume: 03.01, DOI: 10.1520/E0003-11.
- [79]. TRUMPF: Laser Technology Center (2012). “*PFO 20/33: Programmable Focusing Optic*”, Laser Technology/Electronics, 47711 Clipper St. · Plymouth Township, MI 48170, 3.2014.
- [80]. TRUMP Laser-und Systemtechnik GmbH: Johann-Maus (2012). “*Programmable Focusing Optic PFO 3D: Dynamic Scanner Welding in a Large Work Area*”, Laser Technology/Electronics, TLD271.
- [81]. American welding society. (2005). “*Safety in welding, cutting and allied process*”, annex D, ANSI Z49.1.
- [82]. Khalid M. Hafez and Seiji Katayama (2008). “*Fiber laser welding of AISI 304 stainless steel plates*”, Central Metallurgical R&D Inst. (CMRDI), EGYPT
- [83]. Magna Seating Manufacturing and Product Engineering Team (2012). “*D3CK-RR2-PD-ADJ-DS-022: I-Disc 4 Laser welding spec for KL weld patterns*”, COSMA international, Rev D.
- [84]. Daimler Chrysler Corporation (2002). “*PS-9059: High energy beam welding - automotive components*”, Process Standard, Category Code: D-1.
- [85]. General Motors (1991). “*GM4490M: Automotive laser lap welding specification*”, General Motors Engineering Standards, Material and process – Metals.

- [86]. K. Nishimoto & H. Mori (2004), *“Hot cracking susceptibility in laser weld metal of high nitrogen stainless steels”*, Science and Technology of Advanced Materials Vol. 5, pp. 231–240.
- [87]. Moriaki Ono, Akihide Yoshitake & Masanori Homura (2002), *“Laser Weldability of High Strength Steel Sheets in Fabrication of Tailor Welded Blanks”*, p.18, NKK Technical Review, No. 86.
- [88]. W. Xu, D. Westerbaan, S.S. Nayak, D.L. Chen, F. Goodwin and Y. Zhou (2013). *“Tensile and fatigue properties of fiber laser welded high strength low alloy and DP980 dual-phase steel joints”* Materials and Design, Vol. 43, pp. 373–383.
- [89]. Eric Stiles: IPG Photonics (2010). *“Fiber Lasers: The Flexible Tool for High Power Laser Welding”*. AWS New Welding Technologies Conference.
- [90]. David Havrilla: TRUMPF (2012). *“Design for Laser Welding”* TRUMPF - 2012 Automotive Symposium.
- [91]. Auto/Steel Partnership Joining Project. *“Advanced high strength steel (ahss) weld performance study for autobody structural components”* A/SP Joining Technologies Committee Report
- [92]. Xia M, Sreenivasan N, Lawson S, Zhou Y, Tian Z (2007). *“A comparative study of formability of diode laser welds in DP980 and HSLA steels”*, J Eng. Mater Technol T; Vol.129: pp.446–452.
- [93]. Farabi N, Chen DL, Zhou Y (2012). *“Tensile properties and work hardening behavior of laser welded dual-phase steel joints”*. J Mater Eng Perform; Vol. 21(2): pp. 222–230.
- [94]. Xia M, Biro E, Tian ZL, Zhou Y (2008). *“Effects of heat input and martensite on HAZ softening in laser welding of dual phase steels”*. ISIJ Int ;Vol. 48(6): pp. 809–814.
- [95]. Biro E, McDermid JR, Embury JD, Zhou Y (2010). *“Softening kinetics in the subcritical heat-affected zone of dual-phase steel welds”*. Metall Mater Trans A; Vol. 41(9): pp.2348–56.

- [96]. Trevor J. Burns (2009). "*Weldability of a Dual-Phase Sheet Steel by the Gas Metal Arc Welding Process*" A thesis presented to the University of Waterloo, Ontario/Canada.
- [97]. W.J. So, M.J. Kang, D.C. Kim (2010). "*Weldability of pulse GMAW joints of 780 MPa dual-phase steel*", Archives of Materials Science and Engineering, Vol. 41(1), pp. 53-60.
- [98]. Xia, M., Biro, E., Tian, Z., & Zhou, Y. (2008). "*Effects of Heat Input and Martensite on HAZ Softening in Laser Welding of Dual-phase Steels*". ISIJ International , Vol. 48, No. 6, pp. 809-814.
- [99]. H.S. Carslaw, J.C. Jaeger (1962). "*Conduction of Heat in Solids*", second ed., Clarendon, Oxford.
- [100]. J.M. Dowden (2001), "*An Introduction to the Theory of Laser Material Processing*", Chapman & Hall, London.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1. Características de la zona de soldadura en uniones a traslape

Figura 1.2. Aplicaciones de soldadura láser en el automóvil

Figura 1.3. Defecto de exceso de penetración en soldadura. A) Aspecto del mecanismo del asiento automotriz, B) Defecto en el interior del disco del mecanismo, y C) corte transversal en la soldadura

Figura 1.4. Metodología propuesta para este trabajo de investigación

Capítulo 2

Figura 2.1. Basov y Prokhorov, experimentando con el primer láser

Figura 2.2. Ventas anuales de equipos láser en billones de dólares

Figura 2.3. Principio de emisión de fotones en el equipo láser

Figura 2.4. Inversión de población en el medio activo

Figura 2.5. Lentes reflectores de un resonador

Figura 2.6. Esquema de un láser de estado sólido

Figura 2.7. Esquema de la emisión estimulada en láser

Figura 2.8. Esquema del principio de funcionamiento de láser CO₂

Figura 2.9. Principio de la soldadura por Keyhole

Figura 2.10. Soldaduras láser utilizando 3 potencias distintas

Figura 2.11. Corte transversal en una soldadura realizada por Keyhole

Figura 2.13. Sección en corte transversal en soldadura pulsada con perfil del espacio “top hat” a 50 magnificaciones

Figura 2.14. Espectrometría óptica de una soldadura láser con salpicaduras

Figura 2.15. Efecto del calor de entrada en la macroestructura a) 19.2 J/mm, b) 21.6 J/mm, c) 24 J/mm, d) 24 J/mm, e) 27 J/mm, f) 30 J/mm, g) 32 J/mm, h) 36 J/mm y i) 40 J/mm

Figura 2.17. Efecto del calor de entrada en la distribución de precipitados a) 19.2J, b) 24J, c) 32J y d) 40J

Figura 2.18. Efecto de la potencia del láser a diferentes velocidades

Figura 2.17. Influencia del diámetro del spot del láser en la penetración de soldadura

Figura 2.18. Distancia focal en el proceso de soldadura con láser

Figura 2.19. Influencia de la distancia focal en el proceso de soldadura con láser

Figura 2.20. Influencia de la desviación del plasma en la penetración de soldadura

Figura 2.21. Influencia del caudal del gas protector

Figura 2.22. Ángulo de boquilla a 0 grados

Figura 2.23. Ángulo de boquilla 60 grados

Figura 2.24. Influencia de la densidad del gas de protección

Capítulo 3

Figura 3.1. Esquema de parámetros del modelo matemático

Figura 3.2. Aplicación utilizada en este trabajo. A) Cabezal con óptica de enfoque programable “PFO” y B) Aspecto del perfil del rayo láser

Figura 3.3. . Fenómenos de transferencia de calor

Figura 3.4. Cabezal de Óptica de Enfoque Programable PFO. A) Esquema de coordenadas, y B) Esquema dimensional de características del PFO

Figura 3.5. Ciclo de trabajo de soldadura: laser convencional, y laser con un PFO

Figura 3.6. Equipo de soldadura láser Trudisk 6602 marca TRUMPF

Figura 3.7. Análisis por microscopia. Estereoscopio Olympus SZX10

Figura 3.8. Esquema en las pruebas de soldadura a traslape

Figura 3.9. Geometría utilizada en la soldadura a traslape

Figura 3.10. Integración de los equipos para la soldadura del caso de estudio 2

Figura 3.11. Diferencias en la aplicación de los procesos de soldadura láser A) Soldadura convencional por láser, B) Soldadura láser remota con cabezal PFO y C) Soldadura láser convencional con robot

Figura 3.12. Características del equipo láser TRUMPF de 8 KW

Figura 3.13. A) Robot ABB IRB 2400/16 y B) Cabezal de soldadura PFO33

Figura 3.14. Análisis por microscopia, A) Microscopio óptico Olympus BX60M, y B) Estereoscopio Olympus SZX10

Figura 3.15. Geometría de soldadura seleccionada en caso de estudio 2

Figura 3.16. Esquemización de la zona de soldadura efectiva en una unión de soldadura por láser

Figura 3.17. Microdurómetro FUTURE-TECH FM7

Figura 3.18. Esquema para la medición de la distancia focal

Figura 3.19. Medición y validación de la distancia focal

Figura 3.20. Medición de la inclinación en la incidencia del láser y la alineación del cabezal PFO

Figura 3.21. Impresión del perfil espacial de la distribución de la potencia del láser

Capítulo 4

Figura 4.1. Grafica de contorno de la penetración contra la distancia focal y la potencia

Figura 4.2. Macrografía del corte transversal de las muestras de soldadura láser a diez magnificaciones (10X)

Figura 4.3. Grafica del comportamiento de la penetración de soldadura en función de la densidad de potencia

Figura 4.4. Muestras de soldadura (10x) A) Muestra 3, Densidad de potencia: $10,332 \text{ W/mm}^2$, B) Muestra 8, Densidad de potencia: $11,777 \text{ W/mm}^2$, y C) Muestra 11, Densidad de potencia: 12961 W/mm^2

Figura 4.5. Degradación y desgaste en la óptica de protección en un proceso de soldadura láser de producción de gran volumen de piezas automotrices

Figura 4.6. Grafica de contornos del ancho de la zona de fusión de la soldadura contra la distancia focal y la potencia

Figura 4.7. Efecto de la distancia focal en el ancho de la zona de fusión en el proceso de soldadura láser

Figura 4.8. Muestras de soldadura con una densidad de potencia de $16,437 \text{ W/mm}^2$ (10X). A) Muestra 12, B) Muestra 14 y C) Muestra 5

Figura 4.9. Muestras de soldadura (10X). A) Muestra, Densidad de potencia: 18595 W/mm² B) Muestra 8, Densidad de potencia: 19353 W/mm² y C) Muestra 11, Densidad de potencia: 19367 W/mm²

Figura 4.10. Criterios de evaluación de la especificación de soldadura laser D3CK-RR2-PD-ADJ-DS-022

Figura 4.11. Grafica de superficie de respuesta de la penetración de soldadura

Figura 4.12. Grafica de superficie de respuesta del ancho de la zona de fusión de soldadura

Figura 4.13. Macrografía de un corte transversal de la unión de soldadura utilizando los parámetros óptimos

Figura 4.14. Micrografía de la medición de la ZAC de la unión de soldadura utilizando los parámetros óptimos (100x)

Figura 4.15. Análisis microestructural. A) Microestructura en la ZAC (500x), B) Microestructura en el metal base (500x), C) Unión de soldadura con parámetros óptimos (100x), D) Microestructura en zona de soldadura (500x) y E) Microestructura en interface de ZAC y la soldadura (100x)

Figura 4.16. Propiedades mecánicas y microestructurales de aceros DP. A) Microestructura de ZAC de un proceso convencional GMAW, B) Perdida de Microdureza en acero DP 980 soldado por GMAW, C) Perdida de microdureza en acero DP 600 soldado por GMAW, y D) Perdida de microdureza en soldadura láser de acero DP

Figura 4.17. Potencia usada en la experimentación vs potencia predicha por el modelo matemático en el caso de estudio uno

Figura 4.18. Ancho de zona de fusión de soldadura del caso de estudio uno: ancho experimental vs ancho predicho en el Keyhole por el modelo matemático

Figura 4.19. Corte transversal de las muestras de soldadura láser

Figura 4.20. Grafica de contorno de la penetración contra la velocidad de soldadura y la potencia

Figura 4.21. Grafica de la penetración de soldadura en función de la velocidad a cuatro densidades de potencia diferentes

Figura 4.22. Grafica del comportamiento de la penetración de soldadura en función del calor de entrada expresado en Joule sobre milímetro

Figura 4.23. Grafica de absorción del láser en función del estado de la materia y la densidad de potencia

Figura 4.24. Grafica de contornos del ancho de la zona de fusión de la soldadura contra la velocidad y la potencia

Figura 4.25. Muestras de soldadura con bajo calor de entrada (10X). A) Muestra 8, C.E. = 118.66 J/mm, B) Muestra 3, C.E.= 125 J/mm y C) Muestra 1, C.E. = 128 J/mm

Figura 4.26. Muestras de soldadura con un calor de entrada de 134.78 J/mm (10X). A) Muestra 5 , B) Muestra 7 y C) Muestra 14

Figura 4.27. Muestras de soldadura con alto calor de entrada (10X). A) Muestra 4, C.E. = 139.33 J/mm, B) Muestra 2, C.E.= 145.45 J/mm y C) Muestra 9, C.E. = 143.93 J/mm

Figura 4.28. Grafica de superficie de respuesta de la penetración de soldadura en el caso de estudio dos

Figura 4.29. Grafica de superficie de respuesta del ancho de la zona de fusión de soldadura en el caso de estudio dos

Figura 4.30. Macrografía en un corte transversal de la unión de soldadura utilizando los parámetros óptimos

Figura 4.31. Microdureza Vickers en perfil de soldadura de caso de estudio en la muestra de soldadura láser con parámetros óptimos acero DP 980-S

Figura 4.32. Microdureza Vickers en perfil de soldadura de caso de estudio encontrado en la bibliografía, en un acero DP 980-S

Figura 4.33. Perfil de microdureza de soldadura un acero DP 980-GA A) Perfil de soldadura híbrida (arco GMAW - láser) y B) Soldadura por arco GMAW

Figura 4.34. Potencia usada en la experimentación vs potencia predicha por el modelo matemático en el caso de estudio dos

Figura 4.35. Ancho de zona de fusión de soldadura del caso de estudio dos: ancho experimental vs ancho predicho en el Keyhole por el modelo matemático

Anexos

A5 Figura A.1. Clasificación de los procesos de soldadura por la AWS

LISTA DE TABLAS

Capítulo 2

Tabla 2.1. Clasificación de los materiales

Tabla 2.2. Máxima penetración y energía de pulso

Capítulo 3

Tabla 3.1. Características del cabezal PFO 3D

Tabla 3.2. Composición química de las placas para soldadura en % de masa

Tabla 3.3. Niveles en el diseño experimental para el caso de estudio uno

Tabla 3.4. Descripción del diseño propuesto

Tabla 3.5. Diseño experimental del caso de estudio uno

Tabla 3.6. Comparación de los procesos de soldadura láser

Tabla 3.7. Composición química de las placas para soldadura, medida en % de masa

Tabla 3.8. Prueba de esfuerzo a la tensión en las placas para soldadura

Tabla 3.9. Niveles de potencia y velocidad de soldadura en el DOE

Tabla 3.10. Diseño experimental del caso de estudio dos

Capítulo 4

Tabla 4.1. Resultados experimentales del caso de estudio uno

Tabla 4.2. Parámetros óptimos y respuesta esperada

Tabla 4.3. Parámetros para validación del modelo en caso de estudio uno

Tabla 4.4. Porcentaje de diferencia entre ancho de soldadura en zona de fusión y ancho de la cavidad del Keyhole para el caso de estudio uno

Tabla 4.5. Resultados experimentales del caso de estudio dos

Tabla 4.6. Parámetros óptimos y respuesta esperada en caso de estudio dos

Tabla 4.7. Parámetros para validación del modelo en caso de estudio dos

Tabla 4.8. Porcentaje de diferencia entre ancho de soldadura en zona de fusión y ancho de la cavidad del Keyhole para el caso de estudio dos

ANEXOS

A1 Clasificación de procesos de soldadura por AWS [81]

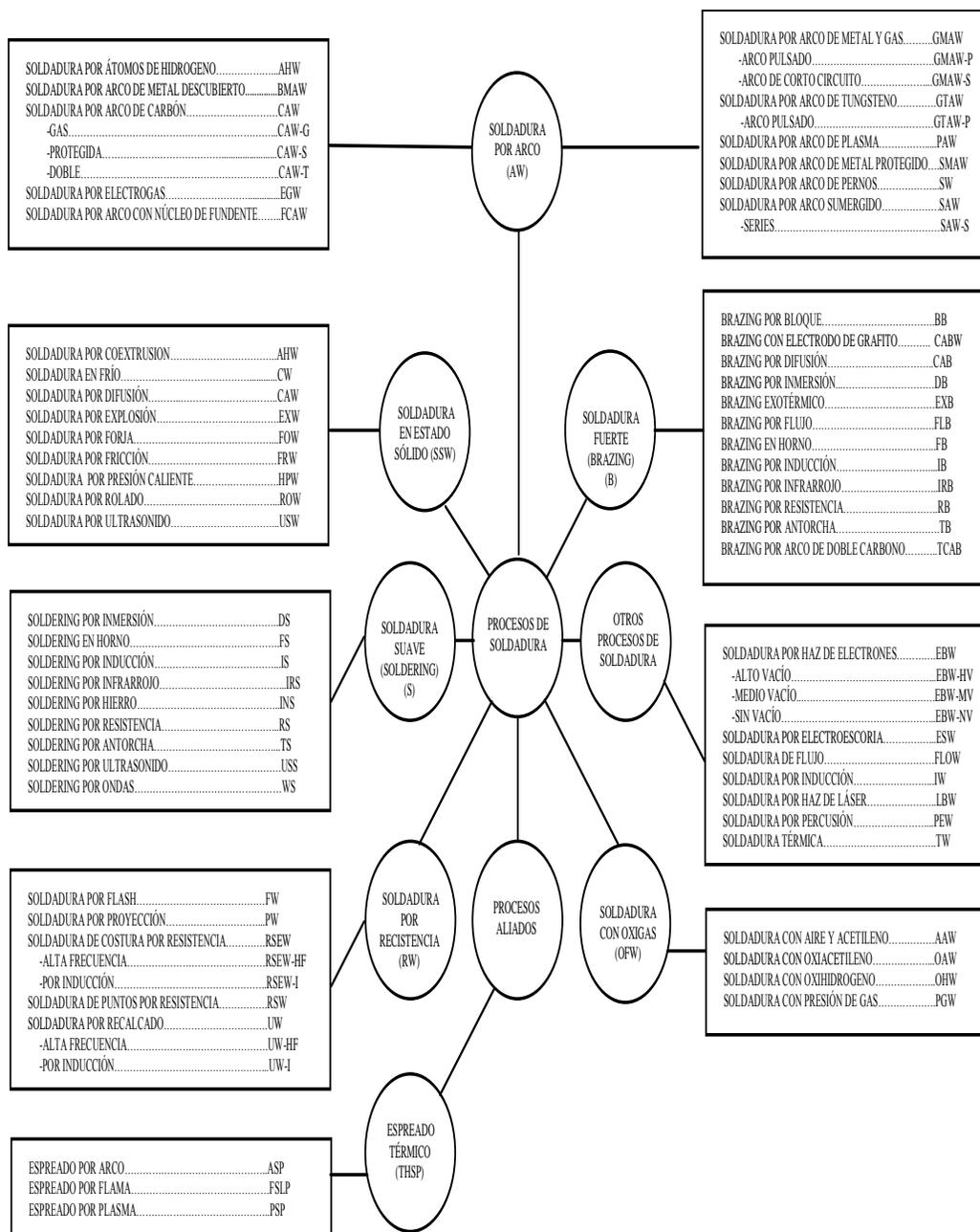


Figura A.1. Clasificación de los procesos de soldadura

A2 Caso de estudio uno: Programa de soldadura láser

```

<?xml version="1.0"?>
<PfoCwPrg Version="3.0">
<Number>3</Number><Name>KLBRKTB
</Name><NoOfPoints>0</NoOfPoints>
<Transformation><ScaleX>1</ScaleX><ScaleY>1</ScaleY>
<TransX>0</TransX><TransY>0</TransY>
<Rotation>0</Rotation></Transformation>
<Optic unit="mm">450</Optic><Jumpspeed>4500</Jumpspeed>
<PFODelay>2</PFODelay>
<V_Offset>0</V_Offset><D3_active>0</D3_active>
<shadowwelding>0</shadowwelding>
<Date><year>2013</year><month>12</month><day>19</day><hour>
8</hour><min>44</min><sec>51</sec></Date>
<g><circle dir="0" reruns="1"
Ramp2Active="1" RampLen2="5"
Ramp1Active="1" RampLen1="5"
PEndVector="45" PEnd="45" PStart="10" v="48" deFocus="5" Z="0"
firstpoint="1" ptDistance="1" viewascount="0" count="166"
phiOverlap="3" phi2="180" phi1="0" r="26.5" minz="0" miny="0"
minx="0" majz="0" majy="0" majx="0" cz="0" cy="0.25" cx="0"/>
</g>
</PfoCwPrg>

```

A3 Caso de estudio dos: Programa de soldadura láser

```
<?xml version="1.0"?>
```

```
<PfoCwPrg Version="3.0"><Number>5</Number>
<Name>Weld Line BRKT</Name>
<NoOfPoints>0</NoOfPoints><Transformation><ScaleX>1</ScaleX>
<ScaleY>1</ScaleY><TransX>0</TransX><TransY>0</TransY>
<Rotation>0</Rotation></Transformation><Optic
unit="mm">450</Optic><Jumpspeed>4500</Jumpspeed>
<PFODelay>2</PFODelay><V_Offset>0</V_Offset><D3_active>0</
D3_active>
<shadowwelding>0</shadowwelding>
<Date><year>2013</year><month>2</month><day>5</day><hour>
13</hour><min>9</min><sec>46</sec></Date><g>
<Line dir="0" reruns="1"
Ramp2Active="5" RampLen2="5"
Ramp1Active="5" RampLen1="5"
PEndVector="100" PEnd="100" PStart="10"
v="60" deFocus="5" Z="0"
firstpoint="1" ptDistance="1" viewascount="0" count="148"
minx="0" majz="0" majy="0" majx="0" cz="0" cy="0.3" cx="0.25"/>
</g>
</PfoCwPrg>
```

A4 Caso de estudio tres: Programa de subrutina para la fuente de soldadura láser

PROGRAMA LASER ON:

LASER_ON LINE 0 \T1\ ABORTED\\\\G1\\\\JOINT\\\\3\%

LASER_ON\\ 0

37/37

\\\\1: !*****

2: !COMIMSA

3: !CELDA LASER

4: !Macro Interfase para

5: !LASER ON

6: !*****

7:

8:

9:

10: IF (F[1:LASER ENABLE]=OFF),

: JMP LBL[99]

11:

12: GO[10:Program Number]=AR[1]

13:

14: WAIT DI[143:CHILER READY]=ON

15: WAIT DI[141:CHILLER WARNING]=OFF

16: WAIT DI[142:CHILLER ERROR]=OFF

17: WAIT DI[132:LASER ERROR]=OFF

18:

19:

20: DO[129:LASER REQUEST]=ON

5: CALL LASER_ON1(1)
6:L P[3] 100cm/min FINE
7: CALL LASER_OFF1
8:
9:
10:J P[5] 100% FINE
11: CALL LASER_ON1(2)
12:L P[6] 100cm/min FINE
13: CALL LASER_OFF1
14:
15:J P[7] 100% FINE
16: CALL LASER_ON1(1)
17:L P[8] 200cm/min FINE
18: CALL LASER_OFF1
19:
20:
21:J P[9] 100% FINE
22: CALL LASER_ON1(2)
23:L P[10] 200cm/min FINE
24: CALL LASER_OFF1
25:
26:
27:J P[12] 100% FINE
28: CALL LASER_ON1(3)
29:L P[11] 150cm/min FINE
30: CALL LASER_OFF1
31:
32:

33:J P[13] 100% FINE

34: CALL LASER_ON1(4)

35:L P[14] 150cm/min FINE

36: CALL LASER_OFF1

37:

38:

39:J P[15] 100% FINE

40: CALL LASER_ON1(5)

41:L P[16] 79cm/min FINE

42: CALL LASER_OFF1

43:

44:

[End]

[INST]

[EDCMD]>

RESUMEN AUTOBIOGRAFICO

Francisco Cepeda Rodríguez

Tesis

OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS Y MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL PROCESO DE SOLDADURA POR LÁSER DE DISCO DE DIODOS YB:YAG, APLICADO EN ACEROS AVANZADOS AHSS

Francisco Cepeda Rodríguez nació en la ciudad de Saltillo en el estado de Coahuila, el 29 de Junio de 1984. Es hijo del Dr. Francisco Cepeda Tijerina y la Profa. Yolanda Rodríguez de Cepeda. Obtuvo el título de Ingeniero Electrónico con especialidad en sistemas digitales en el Instituto Tecnológico de Saltillo, habiendo terminado sus estudios profesionales en 2005. Estudió una especialidad y una Maestría en la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, obteniendo el título de Especialista y Maestro en tecnologías de la soldadura industrial en el año 2008 y 2009 respectivamente, posteriormente ingreso al programa doctoral en ingeniería de materiales en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Del año 2008 al 2013 se desempeñó como investigador en el área de procesos de soldadura láser y procesos no convencionales en la gerencia de desarrollo tecnológico de la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, donde participó activamente en proyectos de investigación e innovación tecnológica. Actualmente labora como Ingeniero de soldadura por láser en la empresa Magna Seating, en la ciudad de Saltillo en Coahuila, donde está participando en la implementación y el control de sistemas de soldadura láser remoto en Magna Saltillo y en otras sedes de Magna alrededor del mundo. Estos sistemas de soldadura por láser están siendo implementados para el ensamble de mecanismos para la manufactura de automóviles.