

CIATEQ, A. C. Centro de Tecnología Avanzada
Dirección de Posgrado



*Análisis de porosidad en la unión de los materiales SAE
J2340 grado 420XF y 5120H por soldadura láser*

TESIS QUE PRESENTA

Ing. Sandra Araceli Ventura Alviso
Asesora: Dra. Adriana del Carmen Gallegos Melgar

Para obtener el grado de

**Maestra en
Manufactura Avanzada**

San Luis Potosí, San Luis Potosí
diciembre, 2020

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



San Luis Potosí, San Luis Potosí, 19 de octubre de 2020.

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico de Posgrado
CIATEQ, A.C.

La abajo firmante, miembro del Comité Tutorial de la Ing. Sandra Araceli Ventura Alviso, una vez revisado su Proyecto Terminal de tesis/tesina, titulado "ANÁLISIS DE POROSIDAD EN LA UNIÓN DE LOS MATERIALES SAE J2340 GRADO 420XF Y 5120H POR SOLDADURA LÁSER" **autorizo** que el citado trabajo sea presentado por la alumna para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de **Maestra**.

Sin otro particular por el momento, agradezco la atención prestada.

Dra. Adriana Del Carmen Gallegos
Melgar
Asesor Académico

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



San Luis Potosí, S.L.P. 19 de noviembre del 2020.

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero
Directora de Posgrado
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del (la) alumno (a) **ING. SANDRA ARACELI VENTURA ALVISO**, cuyo título es:

"ANÁLISIS DE POROSIDAD EN LA UNIÓN DE LOS MATERIALES SAE J2340 GRADO 420XF Y 5120H POR SOLDADURA LÁSER"

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el (la) alumno(a), y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,

Firma

Dr. Jan Mayen Chaires

"2020, Año Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Zona Industrial del Potosí, en el Eje 126 N°226
CP. 78335. San Luis Potosí, SLP. www.ciateq.mx

DEDICATORIA

Este logro personal se lo dedico principalmente a mi familia, mis padres y mis hermanos, que son mi motor de cada día, ya que ellos son quienes siempre me han apoyado en cada uno de mis logros personales y profesionales a lo largo de mi vida.

Además, a tres personas especiales en mi vida que en este año se me adelantaron, y que cada una de ellas me enseñó que nada es imposible por hacer realidad con perseverancia y constancia.

También lo dedico a mis amigos y a las personas que han creído en mí, en mi capacidad de hacer realidad este objetivo para mi desarrollo profesional, y que muchas de ellas me alentaron y apoyaron en cada paso de esta meta, a pesar de los obstáculos presentados y superados.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia y amigos por apoyo incondicional que me han brindado en cada meta profesional que he decidido emprender y por creer siempre en mí.

A mi empresa por darme la oportunidad de desarrollar el proyecto, teniendo siempre el interés del desarrollo profesional de cada uno de los que la integramos, además de mis compañeros de trabajo que me ayudaron en compartir su conocimiento, experiencia y disposición para el desarrollo de la investigación.

A mi asesora y revisor que siempre tuvieron la disposición de apoyarme en cada etapa de este objetivo, contribuyendo con su conocimiento y experiencia profesional como investigadores, lo cual me ayudo a mejorar el cómo plasmar mis ideas y resultados en esta tesis.

A CIATEQ y CONACYT por el interés de formar profesionales con la capacidad de resolver, mejorar e innovar cualquier proyecto que se presente en el ámbito laboral, al desarrollar cada habilidad en la impartición de cada materia del posgrado.

* * *

RESUMEN

La unión de un plato de material de acero SAE J2340 grado 420XF y de un engrane 5120H a través de la tecnología de soldadura láser, fueron caracterizadas para definir el proceso donde se tiene la causa raíz de porosidad en la unión y poder alcanzar la reducción de porosidad en el proceso. Se analizaron algunos de los parámetros de proceso para estandarizar sus límites de control y cumplir con la especificación de diseño de soldadura. Se observó mediante espectrometría de emisión óptica, que la composición química de ambas piezas cumplía con la composición química esperada. La microestructura cumplió con los porcentajes de bainita y en retención de austenita de acuerdo con los requerimientos del material. Para el estudio de dureza se observó que las piezas cumplían con la especificación de las normas antes y después de ser sometido a los tratamientos de revenido y carburizado. Para la unión de los materiales por soldadura láser, se analizó la condición de penetración de soldadura, identificando porosidad interna y en la superficie. Se observó que las impurezas impregnadas en la superficie del material son consecuencia de la aplicación de un inhibidor de corrosión, el cual se aplica previo a la estación láser. Los residuos de este inhibidor son los causantes de la generación de porosidad, debido a que por su composición química provoca el fenómeno de fragilización por hidrógeno, durante el proceso de soldadura. Finalmente, por medio de la estandarización de parámetros y de limpieza en el proceso de soldadura láser, junto con las mejoras en las herramientas de la estación de limpieza láser se obtuvo la reducción de porosidad en la unión axial de las dos partes.

Palabras clave: Láser, Caracterización mecánica, Estandarizar, Fragilización.

ABSTRACT

The union of a plate made of steel material SAE J2340 grade 420XF and a gear 5120H through laser welding technology, was subjected to a characterization analysis to find the cause of porosity in the union and to be able to achieve its reduction in the process. Some of the process parameters were analyzed to standardize their control limits and verify the weld design specification. It was observed the chemical composition of the materials, by optical emission spectrometry, the composition had the key elements within specification. Regarding microstructure, it complied with the percentages of bainite and retention of austenite according to the requirements of the material. The hardness standards values were met before and after being subjected to the tempering and carburizing treatments. The weld penetration condition was analyzed in the union of the materials, identifying internal and surface porosity. It was observed that the impurities impregnated on the surface of the material were due to a corrosion inhibitor, which is applied prior to the laser station, these impurities were the cause of the generation of porosity through the phenomenon of hydrogen embrittlement. Through the standardization of parameters and cleaning in the laser welding process, together with the improvements in the tools of the laser cleaning station, a reduction in porosity was obtained in the axial union of the two parts.

Keywords: Laser, Characterization, Standardize, Embrittlement.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	v
ABSTRACT.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	xiii
GLOSARIO.....	xiv
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.1.1. Proceso de soldadura láser.....	2
1.1.2. Características y ventajas del proceso de soldadura láser.....	3
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	5
1.4. OBJETIVOS.....	6
1.4.1. Objetivo general.....	6
1.4.2. Objetivos específicos.....	7
1.5. HIPÓTESIS.....	7
2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. BÁSICOS DE LÁSER.....	8
2.2. PROPIEDADES DE LA RADICIÓN LÁSER.....	9
2.3. TIPOS DE LÁSERES INDUSTRIALES.....	11
2.4. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE SOLDADURA LÁSER.....	12
2.4.1. Densidad de potencia.....	13
2.4.2. Calentamiento y enfriamiento del material (disipación de calor).....	16
2.5. GEOMETRÍA DE LA SOLDADURA.....	18
2.6. AGRIETAMIENTO DE METALES.....	21
2.7. CALIDAD Y LIMPIEZA DE LAS SUPERFICIES DE CONTACTO.....	21
2.8. MECANISMOS DE ALEACIÓN DE SUPERFICIE LÁSER (LSA).....	22
2.9. TRASFORMACIONES DE FASE EN SOLDADURA LÁSER.....	23
2.10. EFECTOS DE ESFUERZOS RESIDUALES.....	24
2.11. FORMACIÓN DE POROSIDAD EN LA SOLDADURA LÁSER.....	25

2.12. FUNDAMENTOS DEL DAÑO POR HIDRÓGENO EN ACEROS	27
2.12.1. Daño por hidrógeno	27
2.12.2. Hidrógeno combinado	27
2.12.3. Hidrógeno en solución	28
2.12.4. Interacción del hidrógeno con el acero	29
2.12.5. Fragilización por hidrógeno	31
2.12.6. Teorías de fragilización por hidrógeno	32
2.13. ABSORCIÓN DE LA RADIACIÓN LÁSER.....	32
2.14. MICROINDENTACIÓN.....	37
2.14.1. Selección de un método de prueba de dureza de microindentación	38
2.14.2. Tipos de Microindentador	38
2.15. ESPECTROMETRÍA DE EMISIÓN ÓPTICA POR CHISPA Y ARCO	40
2.16. ESTEREOSCOPÍA	40
2.17. MICROSCOPIA ESTEREOSCÓPICA.....	41
3. PROCEDIMIENTO	43
3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MATERIALES UTILIZADOS	44
3.1.1. Características específicas de acero 5120H (engrane)	44
3.1.2. Características específicas de acero SAE J2340 grado 420XF (plato)	44
3.2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL	44
3.2.1. Caracterización de composición química.....	45
3.2.2. Caracterización de la microestructura	46
3.2.3. Caracterización de propiedades mecánicas	47
3.2.4. Caracterización por penetración de soldadura.....	47
3.3. IDENTIFICACIÓN DE IMPUREZAS	49
3.3.1. Validación de proceso	49
3.4. DISEÑO DE EXPERIMENTOS (DOE).....	51
4. RESULTADOS.....	53
4.1. CARACTERIZACIÓN	53
4.1.1. Caracterización en composición química.....	53
4.1.2. Caracterización en microestructura	55
4.1.3. Caracterización de propiedad mecánica de dureza	57
4.1.4. Caracterización de penetración de soldadura.....	59
4.2. ESTANDARIZACIÓN PARA REDUCIR LAS IMPUREZAS	60

4.2.1. Resultados en validación de proceso	60
4.3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS (DOE)	63
CONCLUSIONES.....	65
RECOMENDACIONES	66
APORTACIÓN DE LA TESIS.....	67
APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS	68
REFERENCIAS.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Unión de soldadura láser entre engrane y plato aceptable y no aceptable	5
Figura 2. Densidad de potencia vs Posición angular Título de la figura (breve)	14
Figura 3. Relación de penetración de soldadura y Energía por pulso	18
Figura 4. Junta de soldadura a tope para soldadura láser: tolerancias sugeridas para desajuste 1 Densidad de potencia vs Posición angular Título de la figura (breve)	19
Figura 5. Junta de soldadura de solape para soldadura láser: tolerancias sugeridas para el espacio	19
Figura 6. Soldadura de filete para soldadura láser. Consulte las tolerancias sugeridas para el espacio (B) y la alineación transversal del rayo láser	20
Figura 7. Soldadura de filete para soldadura láser. Observe la diferencia entre la penetración de soldadura (p) y el ancho de fusión W(f)	20
Figura 8. Esquema de la formación de grandes poros debido al llenado completo del hueco clave durante la soldadura láser	26
Figura 9. Representación esquemática de defectos en metales y sitios de acumulación de átomos de hidrógeno.....	31
Figura 10. Posibles interacciones de la luz láser con el material.....	33
Figura 11. Variación de reflectividad con longitud de onda de algunos materiales metálicos.....	35
Figura 12. Variación de reflectividad con temperatura por 1.06 μm de radiación	36
Figura 13. Efectos de interacción de láser-material	37
Figura 14. Espectrómetro de emisión óptica por arco y chispa	46
Figura 15. Microscopio estereográfico	46
Figura 16. Durómetro superficial y de núcleo.....	47
Figura 17. Estereoscopio para análisis de penetración de soldadura.....	48
Figura 18. Diagrama de Bloques de la metodología empleada en la caracterización	48

Figura 19. Los materiales presentan impurezas de inhibidor para prevenir la corrosión	50
Figura 20. Sistema de extracción con impurezas	50
Figura 21. Disparo de rayo láser en Kapton	52
Figura 22. Referencia de microestructura esperada en blank Acero 5120H	55
Figura 23. Resultado de análisis de microestructura de blank Acero 5120H con resolución a 400X	56
Figura 24. Referencias de especificación de austenita retenida en Acero 5120H	56
Figura 25. Resultado de análisis de austenita retenida en Acero 5120H con resolución a 20X	57
Figura 26. Penetración de soldadura aceptable axial y radial	59
Figura 27. Penetración de soldadura no aceptable	60
Figura 28. Estandarización de puntero láser de limpieza	61
Figura 29. Resultado de penetración de soldadura con parámetros	63
Figura 30. Diámetro focal en una proyección láser	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de materiales	3
Tabla 2. Longitudes de onda típicas de varios tipos de láseres.....	11
Tabla 3. Tipos de Microindentador y sus características.....	39
Tabla 4. Variables de proceso por Ishikawa	43
Tabla 5. Densidad de potencia a través del rayo láser en diferentes ubicaciones	52
Tabla 6. Especificación y resultados promedio de cada elemento en el análisis de Composición Química de Blank Acero 5120H por Espectrometría.....	54
Tabla 7. Especificación y resultados promedio de cada elemento en el análisis de Composición Química de Blank Acero SAE J2340 GRADO 420X por Espectrometría.	54
Tabla 8. Puntos críticos de limpieza en celda de soldadura láser.....	62
Tabla 9. Parámetros óptimos en soldadura láser.....	63
Tabla 10. Resultados de diámetro focal teórico.....	64

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Resultado de Análisis de Composición Química de Blank Acero 5120H por Espectrometría	53
Gráfica 2. a) Resultados de dureza como materia prima y carburizado de 5120H, b) caracterización de la dureza de piezas soldadas, en negro la pieza que resultó con porosidad en la soldadura y en rojo la pieza en la que la soldadura fue exitosa.	58

GLOSARIO

Absorción: fenómeno que ocurre en la interacción con la luz láser y el material.

ASTM: American Society for Testing and Materials, Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.

Caracterización: es una forma de analizar datos y obtener información útil para un fin.

DOE: Design of experiments, Diseño de experimentos.

Dureza: es la resistencia de un material a deformarse.

Fusión: proceso físico de la materia que cambia de estado sólido a líquido por medio de calor.

Ishikawa: método para estudiar las variables en un proceso.

Kapton: cinta adhesiva especial para pruebas de láser.

Lean: proceso de fabricación sin ningún tipo de desperdicio (tiempo, sobreproducción, etc.)

Radiación: es una forma de proyección de energía a altas velocidades.

“scrap”: partes con algún defecto sin modo a recuperarse en un proceso de fabricación.

Solidificación: Es un proceso físico de la materia que pasa de líquido a sólido.

OEM: Original Equipment Manufacturer, Fabricante Original del Equipo.

PPMS: Partes por millón.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

La soldadura mediante tecnología láser es un proceso de unión por fusión, que utiliza la energía aportada por un haz láser para fundir y recristalizar el material o los materiales a unir, para obtener la correspondiente unión. Puede aplicarse de forma satisfactoria para unir diferentes metales, bien a ellos mismos o bien a materiales disimilares. Las aplicaciones más relevantes del láser están orientadas a la soldadura de aceros, aceros inoxidables, aleaciones de titanio, aleaciones de base níquel, cobre, aluminio.[1]

En muchos casos es un proceso que no utiliza material de aporte. Por otra parte, no es una tecnología que sea siempre viable como alternativa a métodos más convencionales, aunque tiene una serie de características que hacen posible fabricar componentes soldados a partir de materiales que por otras técnicas son difíciles de soldar.[1]

La tecnología láser permite conseguir diferentes geometrías y longitudes de cordones de soldadura, tanto en continuo como por puntos, con unas altas calidades de soldadura y con cordones resultantes muy finos. Con respecto a las juntas y cordones de soldadura, éstos pueden presentar distintos formatos (soldadura a tope, a solape, y a transparencia con distintos formatos de junta) y penetraciones en función del tipo y potencia del láser utilizado. Muchos procesos de soldadura láser con aceros no utilizan material de aporte, por lo que el relleno de la junta a soldar se hace a base del material de sus bordes. [1]

La soldadura láser está atrayendo un mayor interés por la soldadura de diversos materiales en las industrias automotriz y aeroespacial. Estas aplicaciones requieren muy alta calidad de las soldaduras para garantizar el rendimiento deseado de los componentes soldados con láser.

Debido a la complejidad de los efectos involucrados en el proceso de soldadura láser, a menudo se asocia con varios defectos geométricos y metalúrgicos.[2]

1.1.1. Proceso de soldadura láser

El principio de la soldadura por láser al igual que cualquier otra tecnología de soldeo, se basa en el fenómeno de fusión localizada del material en la zona de incidencia, en este caso el haz láser, mientras hay un movimiento relativo entre el haz láser y el material. La zona fundida que va siendo abandonada por la irradiación se va solidificando, dando lugar al cordón de soldadura.[1]

La eficiencia de absorción está relacionada con el valor de la densidad de potencia. Cuando el material es vaporizado, efectivamente toda la energía láser es absorbida, mientras cuando el material está en estado fundido, se absorbe menor energía láser.

La eficiencia de absorción, por lo tanto, está relacionada con la temperatura del material y la densidad de potencia del láser en la superficie del material. Se requiere una mayor densidad de potencia para vaporizar el material, mientras que se requiere una menor densidad de potencia para fundirlo.

A medida que el diámetro del rayo láser enfocado disminuye, la densidad de potencia aumenta.

Basado en la densidad de potencia requerida para vaporizar o fundir, los materiales se clasifican dentro de 3 clases. Dentro de cada clase no solamente los valores de densidad de potencia son similares, también los parámetros de proceso láser.[3]

Tabla 1. Clasificación de Materiales[4]

Clases	Ejemplos	Densidad de Potencia w/in ²	
		Vaporizar	Fundir
I	Buenos conductores térmicos: Al, Au, Cu, Pt, Metales refractarios: Mo, Ta, V, W, ...	>5.0E+09	~2.0E+07
II	Aleaciones de metales ferrosos: C/S, S/S, ... Aleaciones de Níquel: Hastalloy, Inconel, Kovar... Aleaciones de Titanio Mayoría de óxidos metálicos - excepto Beo	>5.0E+07	~1.5E+06
III	Materiales orgánicos Materiales plásticos: PVC, G-10, Acrylics Otros metales: Cd, S, Sn, Se, Zn, Pb,...	>5.0E+05	~5.0E+03

Mediante espejos se focaliza en una zona muy reducida del material. Cuando se llega a la temperatura de fusión, se produce la ionización de la mezcla entre el material vaporizado y el gas protector (formación de plasma). La capacidad de absorción energética del plasma es mayor incluso que la del material fundido, por lo que prácticamente toda la energía del láser se transmite directamente y sin pérdidas al material a soldar.[1]

1.1.2. Características y ventajas del proceso de soldadura láser

- Se obtienen altas velocidades de soldadura.
- Se reduce considerablemente la distorsión y deformación en el material.
- Eliminación de los costos de procesos post-soldadura.
- Reducción de poros.
- La soldadura láser es un proceso automatizado.
- Se puede obtener una alta precisión.
- Repetibilidad de los parámetros de soldadura y condiciones del proceso. Alto grado de control.
- El haz láser permite una gran flexibilidad mediante su salida por fibra óptica.

- No hay contacto directo con la zona de soldadura. No hay desgaste de herramienta
- En general no se utiliza material de aporte.
- La soldadura por láser puede aplicarse para unir diferentes materiales (bien a ellos mismos o materiales disimilares).
- Permite fabricar componentes soldados a partir de materiales que por otras técnicas son difíciles de soldar (o incluso en los que no es viable la soldadura).[1]

La complejidad de esta nueva tecnología en la industria automotriz es un reto para la solución de los problemas de proceso que se presentan reflejados en la calidad del producto, es la razón para la selección del fenómeno a estudiar en este trabajo, el principal defecto que causa pérdidas de costo en los procesos que utilizan soldadura láser, el problema de porosidad, entre la unión de dos materiales diferentes, y que a continuación se comenzará a explicar.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La porosidad es el principal problema que se presenta en el proceso de soldadura láser, generando problemas de calidad en la unión de la proyección axial, que une un engrane de material 5120H y un plato SAE J2340 grado 420XF, que posteriormente se detectan en la estación posterior, lo que provoca que la pieza soldada sea rechazada, teniendo como referencia el criterio de aceptación y rechazo según las especificaciones de diseño.

Es necesario encontrar la causa raíz, así como las variables que influyen en el proceso de manufactura para reducir el principal indicador que es el "scrap" (producto no aceptable), lo cual trae como consecuente, no cumplir en tiempo y en forma, con la calidad y producción del producto en la línea.

Mediante la ejecución de principales herramientas de análisis de problemas: caracterización microestructural, mecánica y química así como de DOE, se pretende conocer el estado de las partes para poder correlacionar las posibles causas e

identificar las condiciones del proceso en soldadura láser por medio de varios experimentos obteniendo datos significativos, esto estudiar la variabilidad de dicho proceso, y así poder analizar cada parámetro de proceso o condición que atribuye a la generación de porosidad, esto con la finalidad de tener la causa raíz y estandarizar los parámetros óptimos de proceso para reducir y controlar la porosidad de soldadura.



Figura 1. Unión de soldadura láser entre engrane y plato aceptable y no aceptable.
(Elaboración propia)

1.3. JUSTIFICACIÓN

La reducción de porosidad, principal problema de soldadura en la estación Láser evitaría la generación de "scrap" y tiempos de paro, no productivos, dentro de la línea de subensamble; lo que trae como beneficio cumplir en tiempo y forma con la calidad y producción por hora de la línea, lo cual impacta en los siguientes procesos de ensamble final, y el más importante al cliente.

A continuación, presento los beneficios al resolver este problema de soldadura:

En cuanto a calidad:

- Reducción del indicador "scrap" de 3.5% a 1.0% y por lo tanto al cumplimiento en objetivos de calidad (PPMS, etc.).
- Cumplir con los criterios de aceptación de soldadura de acuerdo con el estándar, solo el 1 % de rechazo.
- Eliminación de tiempos de paro en la estación Láser de un 8% a un 2 % de tiempo de hombre-máquina, para obtener un proceso altamente Lean.

En cuanto a productividad:

- Cumplir con las unidades que se demanda por hora según los requerimientos de nuestro Cliente.
- Ahorro en costo del material para disposición como "scrap".
- Ahorro en mano de obra con horas extraordinarias (personal operativo, de mantenimiento y de calidad).

Al analizarse cada una de las principales variables causantes de los poros de soldadura, se podrán definir nuevos estándares de proceso que ayudarán a reducir este principal problema. Además, se tendrá un mejor conocimiento acerca del proceso de soldadura láser, para futuros proyectos con esta nueva tecnología en plantas de México y del mundo, las cuales no se verán afectados en sus objetivos de productividad y calidad.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Reducir 2.5% del total de rechazo de piezas finales debido a la porosidad entre el engrane de material 5120H y el plato SAE J2340 grado 420X, debido al proceso de soldadura láser.

1.4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las piezas para analizar las condiciones principales que son afectadas en los materiales a unir, y encontrar en que parte del proceso se encuentra la causa raíz del problema.
- Estudiar las variables de proceso que intervienen en el proceso de soldadura láser: eficiencia del sistema en limpieza y densidad de potencia para soldar.
- Estandarizar los parámetros de proceso críticos, determinando sus límites de especificación y monitoreo de control.
- Implementar una mejora en las herramientas/operación para reducción del defecto.

1.5. HIPÓTESIS

La porosidad en el proceso de soldadura láser es consecuencia de la presencia de impurezas externas que se presentan antes y durante el proceso de unión en el área a unir de las partes, siendo factores principales al origen del defecto de soldadura.

2. MARCO TEÓRICO

El láser es un acrónimo de amplificación de luz por emisión estimulada de radiación. El primer láser del mundo fue demostrado por Maiman usando un cristal de rubí. Es esencialmente un haz coherente, convergente y monocromático de radiación electromagnética con longitud de onda que va desde el ultravioleta hasta el infrarrojo. [2]

Los láseres han encontrado aplicaciones en casi todos los campos de la ingeniería, medicina, electrónica, etc., donde una o más propiedades de la radiación láser son importantes.[2]

2.1. BÁSICOS DE LÁSER

Para realizar la aplicabilidad y capacidad de una radiación láser en cualquier aplicación, es necesario comprender el mecanismo de funcionamiento básico y las propiedades de la radiación láser.[1]

Radiación electromagnética: Consisten en ondas de propagación asociadas con el campo eléctrico oscilante (E) y el campo magnético (H). Estos componentes oscilan en ángulos rectos entre sí y también a la dirección de propagación de la onda. Dado que el vector del campo magnético es perpendicular al vector del campo eléctrico, la descripción de la propagación de la onda generalmente considera la oscilación del vector de campo eléctrico solamente.

Inversión de población: Es una condición necesaria para la emisión estimulada. Sin inversión de la población, habrá absorción neta de emisión en lugar de emisión estimulada. Para un material en equilibrio térmico, la distribución de electrones en varios estados de energía viene dada por la ley de distribución de Boltzmann:

$$N_2 = N_1 \exp[-(E_2 - E_1)/kT] \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Donde:

N_2, N_1 = densidades de electrones en los estados 1 y 2.

E_2, E_1 = son las energías 1 y 2.

K = constante de Boltzmann

T = temperatura absoluta

Emisión estimulada: Se produce cuando el fotón entrante de la frecuencia ν , tal que:

$$h\nu = (E_2 - E_1)/h \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

Interactúa con el átomo excitado del medio láser activo con la inversión de población entre los estados 1 y 2 con las energías E_1 y E_2 , respectivamente.

Donde:

ν = fotón entrante con frecuencia

E_2, E_1 = son las energías 1 y 2

Amplificación: Se puede lograr mediante la emisión estimulada de radiación. Se realiza en una cavidad resonante que consta de un conjunto de espejos altamente reflectantes bien alineados en los extremos, perpendiculares al eje de la cavidad.

2.2. PROPIEDADES DE LA RADICIÓN LÁSER

Mano cromaticidad: Es la propiedad más importante del rayo láser y se mide en términos de ancho de línea espectral. La salida del láser consiste en espacios muy próximos, líneas espectrales discretas y estrechas, que satisfacen la condición de resonancia.

Colimación: Está relacionada con la naturaleza direccional de la radiación láser haz. La energía puede ser recolectada eficientemente en un área pequeña sin mucha pérdida en la intensidad del haz. El grado de colimación está directamente relacionada con los ángulos de divergencia del haz.

Coherencia del rayo: Es el grado de orden de las ondas y se especifica en términos de función de coherencia mutua, $\gamma_{12}(\tau)$, que es una medida de la correlación entre la onda de luz en dos puntos P1 y P2 en diferentes tiempos t y $t + \tau$.

Donde:

$\gamma_{12}(\tau)$ = coherencia mutua.

P1 Y P2: punto 1 y 2.

t = tiempos

Hay espacial y temporal, la coherencia espacial correlaciona las fases en diferentes puntos del espacio en un solo momento en el tiempo, mientras que la coherencia temporal correlaciona las fases en un solo punto en el espacio sobre un período de tiempo.

Luminosidad o brillo: Se definen como la cantidad de potencia emitida por unidad de área por unidad de ángulo sólido. Los rayos láser se emiten en ángulos de divergencia muy pequeños en el de 10^6 esteradianos, por lo que se puede enfocar en un área muy pequeña, el brillo del rayo láser es un factor muy importante en el procesamiento de materiales y determina la intensidad (potencia de densidad) o fluencia (densidad de energía) del rayo láser.

Tamaño de punto focal: El radio del punto es la distancia desde el eje del rayo hasta el punto en el que la intensidad cae a $1/e^2$ desde su valor a centro del rayo. El tamaño del punto focal determina la irradiancia, que es de primordial importancia en procesamiento de materiales; por ejemplo, el mecanismo dominante de remoción de material.

Modos transversales: Las secciones transversales de los rayos láser exhiben ciertos perfiles espaciales distintos denominados como los modos transversales y se representan como el modo electromagnético transversal.

Modos temporales: La salida del láser puede ser continua, de amplitud constante, conocida como Modo de onda (CW), o periódico, conocido como modo de haz pulsado. En operación continua del haz, la energía constante del láser se descarga intermitentemente para mucho tiempo. En el modo de operación pulsada, la energía bombeada se almacena hasta que se alcanza el umbral.

Multiplicación de frecuencia: La frecuencia del rayo láser se puede multiplicar usando el multiplicador de frecuencia materiales. Los materiales multiplicadores de frecuencia se caracterizan por la no linealidad del haz.[2]

2.3. TIPOS DE LÁSERES INDUSTRIALES

Los láseres son generalmente clasificados en cuatro tipos principales en función de la naturaleza física: láseres de estado sólido, láseres de gas, láseres semiconductores y colorantes láseres.

Tabla 2. Longitudes de onda típicas de varios tipos de láseres[2]

<i>Tipo de Láser</i>	<i>Longitud de onda (nm)</i>	<i>Tipo de Láser</i>	<i>Longitud de onda (nm)</i>	<i>Tipo de Láser</i>	<i>Longitud de onda (nm)</i>
Láser en estado sólido		Láser en estado de Gas		Láser semiconductor	
Nd: YAG	1,064	HeNe	632.8	InGaAs	980
Rubí	694	Argón	488,514.50	AlGaInP	630-680
Nd: cristal	1,062	Kriptón	520-676	InGaAsP	1,150-1650
Alejandríta	700-820	HeCd	441.5,0325	AlGaAs	780-880
Ti-zafiro	700-1,100	CO2	10,600	Láser en colorante líquido	
Er: YAG	2,940	ArF	191	Rodamin a 6G	570-640
Nd: YLF	1,047	KrF	249	Cumarin a 102	460-515
		XeCl	308	Stilbene	403-428
		XeF	351		
		Vapor de cobre	510.6,578.2		
		Vapor de oro	628		

- **Láser en estado sólido:** El medio activo consiste en un pequeño porcentaje de iones de impureza dopado en un material sólido. El primer láser práctico de estado sólido fue el láser rubí desarrollado por Maiman en 1960. Gran cantidad de láseres como Nd: YAG, Nd: vidrio, alejandrita y Ti. El láser Nd: YAG es el más utilizado en las aplicaciones de mecanizado láser.
- **Láser de gas:** El medio láser activo es el gas.
Los materiales ofrecen ventajas significativas sobre el material sólido y son:
 1. Los gases actúan como medio láser homogéneo.
 2. Los gases se pueden transportar fácilmente para su enfriamiento y reposición.
 3. Los gases son relativamente baratos.
- **Láser semiconductor:** Usan materiales semiconductores como medio activo. Aunque a primera vista parece que los láseres semiconductores son de estado sólido en realidad son significativamente diferentes.
- **Láser de colorante líquido:** Consisten en soluciones líquidas (colorantes orgánicos disueltos en un líquido adecuado). Debido a la naturaleza física (baja densidad, homogeneidad, etc.) son relativamente fáciles de fabricar y se asocian con ventajas tales como la facilidad de enfriamiento y la reposición.

En general, la mayoría de los láseres de gas y algunos de los láseres de estado sólido (Nd: YAG, semiconductor láser) son operados en modo continuo. Láseres de estado sólido como el rubí Nd: vidrio los láseres son operados principalmente en modo pulsado. Uno de los parámetros importantes en la operación del láser pulsado es la tasa de repetición del pulso. [2]

2.4. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE SOLDADURA LÁSER

La tecnología de procesamiento láser puede reducirse a dos características básicas que son exclusivas de la soldadura láser y que se relacionan a la calidad del haz eliminando el 90% de los defectos de soldadura[5]:

2.4.1. Densidad de potencia

Los valores de densidad de potencia necesarios para acoplar el rayo láser en el material son diferentes.

Los beneficios de tener definida la densidad de potencia:

- Definir e identificar diferentes metales, en función de las características de absorción.
- Identificar las características clave de los rayos láser que proyectaran la densidad de potencia.
- Medir las características del rayo láser.
- Desviaciones permitidas en los parámetros de procesamiento.
- Diseñar el programa de soldadura para soldar metales diferentes.
- Conceptualizar, diseñar, construir y usar prácticas de monitoreo de soldaduras en tiempo real del equipo.
- Ayuda a desarrollar estándares que definan los requisitos del material y la variación permitida en los horarios del proceso.

En la soldadura de ojo de cerradura es fundamental controlar la densidad de potencia del rayo láser durante el ciclo de soldadura, para que la calidad de la soldadura cumpla con las especificaciones de ingeniería.[6]

En general, el programa de soldadura debe tener la siguiente secuencia de potencia.

- Al comienzo de la soldadura, la potencia del láser aumenta.
- La potencia se mantiene en un nivel estable durante la soldadura.
- Luego, la potencia se reduce a medida que se completa la soldadura.

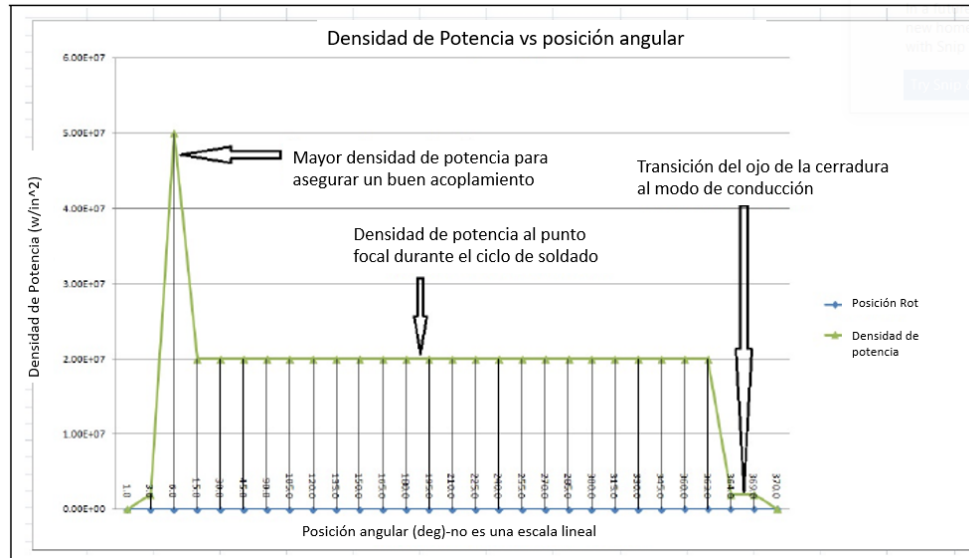


Figura 2. Densidad de potencia vs Posición angular [3]

Durante la aceleración, el metal se derrite y luego se vaporiza para crear el ojo de la cerradura. Durante la fase de fundición, el material absorbe el rayo láser más fácilmente. Esto significa que la rampa debe programarse en dos pasos.

El relleno subterráneo severo creará una tensión superficial excesiva y el material se agrietará durante la fase de solidificación. En algún valor del relleno inferior, la tensión superficial será demasiado grande, la grieta superará la sensibilidad y el metal se romperá.

La eficiencia de absorción está relacionada con el valor de la Densidad de Potencia. Cuando el material es vaporizado, efectivamente toda la energía láser es absorbida, mientras cuando el material está en estado fundido, se absorbe menor energía láser.

La eficiencia de absorción, por lo tanto, está relacionada con la temperatura del material y la densidad de potencia del láser en la superficie del material. Se requiere una mayor densidad de potencia para vaporizar el material, mientras que se requiere una menor densidad de potencia para fundirlo.

A medida que el diámetro del rayo láser enfocado disminuye, la densidad de potencia aumenta.

Basado en la densidad de potencia requerida para vaporizar o fundir, los materiales se clasifican dentro de 3 clases. Dentro de cada clase no solamente los valores de densidad de potencia son similares, también los parámetros de proceso láser.

En la aplicación de láser, la característica temporal del rayo láser es uno de los parámetros críticos. Existen dos características temporales de rayo láser:

- Comportamiento temporal: incluye todos los cambios de rayo láser sobre un periodo de tiempo. Estos cambios pueden ser en potencia láser, perfil especial, punteado, razón de pulsos, etc. Las mediciones y los efectos del comportamiento temporal están sobre la calidad del proceso láser.
- Conformación del pulso o perfilado temporal: se refiere a los cambios de nivel de energía del pulso durante el pulso.

El Perfil Temporal de pulsos produciría una mejora de acoplamiento de energía, eficiencia de uso de la energía en el pulso y mejora en la calidad de soldadura, en la Clase I y Clase II de metales.

Por lo general, la configuración de la forma del pulso se realiza al configurar la altura de la demanda y el ancho de cada sector.

El perfil espacial del rayo láser tiene un efecto directo sobre el diámetro del rayo láser enfocado. Éste se refiere a la distribución de potencia láser transversalmente a través del rayo láser.

El perfil especial del rayo láser está en función de:

- 1.- Promedio de potencia de salida del láser.
- 2.- La proporción de L/D de la cavidad del láser.

Donde:

L= es la distancia óptica entre la cavidad del espejo.

D= diámetro efectivo de la cavidad del láser.

Los cambios típicos en el Perfil espacial y la Divergencia de las características de rayo láser debidas a los cambios de potencia láser y la relación entre L/D son:

- 1.- Cuando el promedio de potencia sube, el número M2 y el rayo divergente incrementa.
- 2.- Cuando la relación L/D incrementa, el M2 y la divergencia disminuye.

El diámetro del spot d_0 del rayo a el punto focal es calculado usando la formula Gaussiana:

$$d_0 = M2 * [4/\pi * \lambda * f/D] \quad \text{(Ecuación 2.2)}$$

Donde:

d_0 = diámetro del rayo @ punto focal (mm)

M2 = múltiplo. 1-50, función del perfil espacial del rayo láser.

λ = Longitud de onda de láser.

f = longitud focal de la lente de enfoque final

D = diámetro del rayo colimado

En el proceso de Fusión Láser, el correcto valor de la densidad de potencia a la superficie del material es crítico, desde la incorrecta densidad de potencia puede resultar excesiva vaporización del material o penetración insuficiente de soldadura. [7]

2.4.2. Calentamiento y enfriamiento del material (disipación de calor)

El tiempo para absorber el rayo láser es muy rápido: está en el rango de microsegundos ($E6$ s). La velocidad de enfriamiento de los metales durante la soldadura es muy rápida, también está en el rango de $E3$ °C/ s a $E6$ °C /s.

Muchas de las aleaciones metálicas disponibles en el mercado desarrollan microgrietas durante el rápido enfriamiento debido a la transformación cristalográfica (por ejemplo, aceros al carbono).

Efectos que impactan a el proceso:

- El efecto de la potencia del láser y otros parámetros del proceso en la zona afectada por el calor (haz).
- El efecto de las herramientas en el disipador de calor.
- El efecto de las variaciones en la geometría de la soldadura en el disipador de calor.
- El efecto del tiempo de aceleración de los pulsos en la soldadura láser.
- El efecto del ciclo de trabajo en la soldadura por láser pulsado sobre la velocidad de enfriamiento del material.
- Calcular la ubicación del haz enfocado dentro del material.
- El efecto de pulsos muy cortos en el marcado y grabado láser.
- El efecto del cambio de enfoque en la velocidad de calentamiento y enfriamiento del material.

El pulsado láser nos permite gestionar la densidad de potencia en la superficie del material durante el tiempo del pulso. Pulsando la potencia del láser permite un mejor control de la temperatura. Las soldaduras láser producidas con energía pulsada son soldaduras de "conducción".[8]

Los parámetros se expresan mediante la fórmula:

$$I = \frac{E}{t} * A \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

I =Densidad de potencia

E =Energía por pulso (Joules)

t =ancho de pulso (segundos)

A =Área del spot del rayo láser enfocado en la superficie del metal $[(\pi) / 4 * (d) ^2]$,

donde d = 80% del ancho de la soldadura para Clase II.

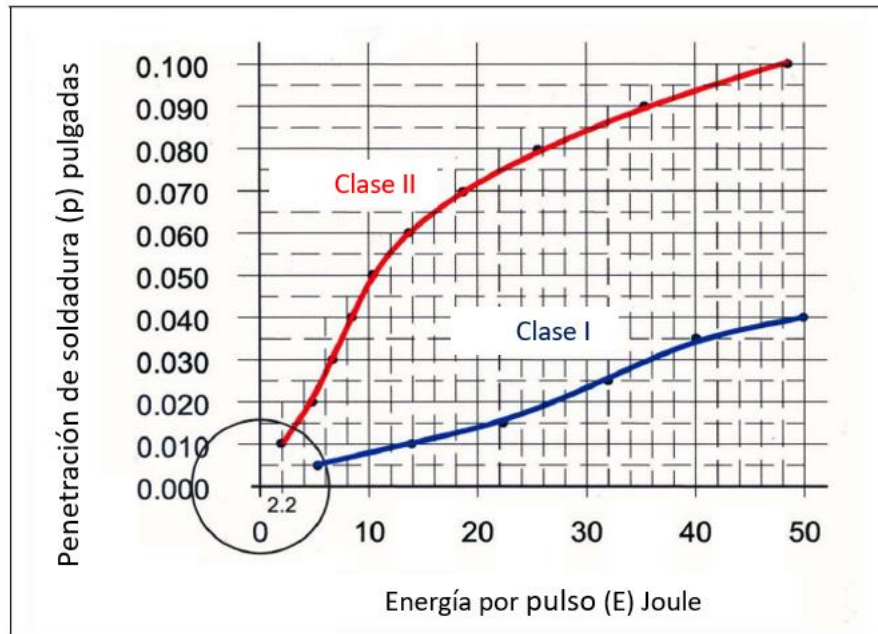


Figura 3. Relación de penetración de soldadura y Energía por pulso[3]

2.5. GEOMETRÍA DE LA SOLDADURA

Cuando la geometría de la soldadura no es correcta, la soldadura puede fallar parcial o completamente, especialmente para soldadura por conducción. El parámetro real que determinará el efecto de la soldadura láser es el ancho de fusión, no la penetración de la soldadura. El ancho o el volumen del metal que fusiona los dos componentes es lo que lleva la carga mecánica en la junta de soldadura.

La regla básica es que, si el rayo láser apunta directamente a la unión de soldadura, entonces el espacio permitido es una función del diámetro del rayo láser, ya que se enfoca en la junta de soldadura. El diámetro del rayo láser enfocado en la superficie del metal se calcula para ser el diámetro adecuado para la densidad de potencia requerida para la operación de soldadura.[9]

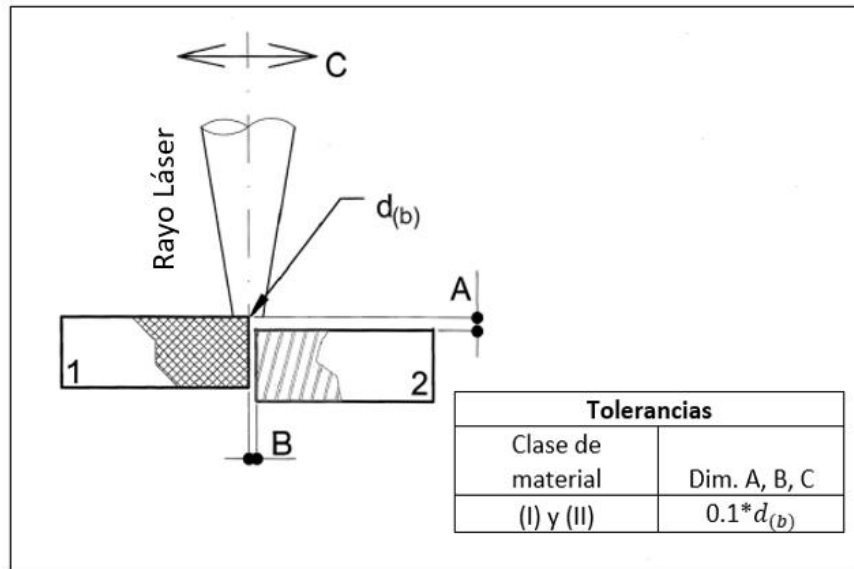


Figura 4. Junta de soldadura a tope para soldadura láser: tolerancias sugeridas para desajuste (A), gap (B) y alineación transversal del rayo láser (C). Los bordes de las partes de acoplamiento deben ser geoméricamente planos y paralelos entre sí. [3]

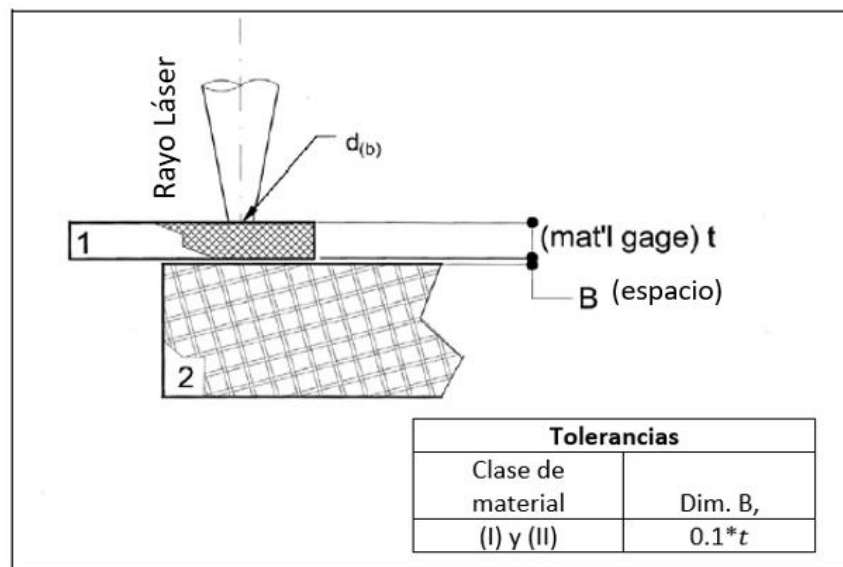


Figura 5. Junta de soldadura de solape para soldadura láser: tolerancias sugeridas para el espacio. El gap(B) no es una función del diámetro del rayo láser. La disposición preferente es que la pieza de calibre más delgada (1) esté encima de la pieza de calibre más pesada (2). Las abrazaderas deben presionar las dos piezas juntas durante la configuración y durante el proceso de soldadura.[3]

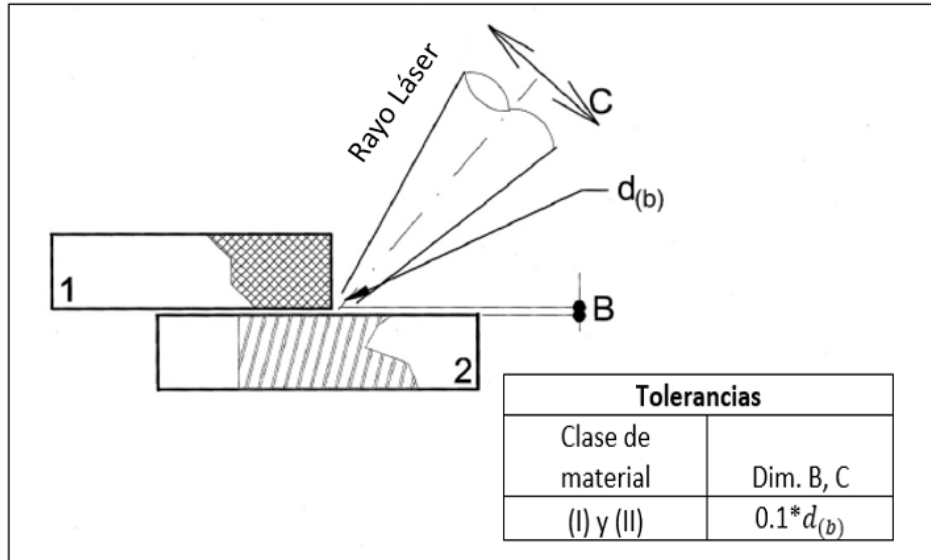


Figura 6. Soldadura de filete para soldadura láser. Consulte las tolerancias sugeridas para el espacio (B) y la alineación transversal del rayo láser (C). Ambos son una función del diámetro del rayo láser.[3]

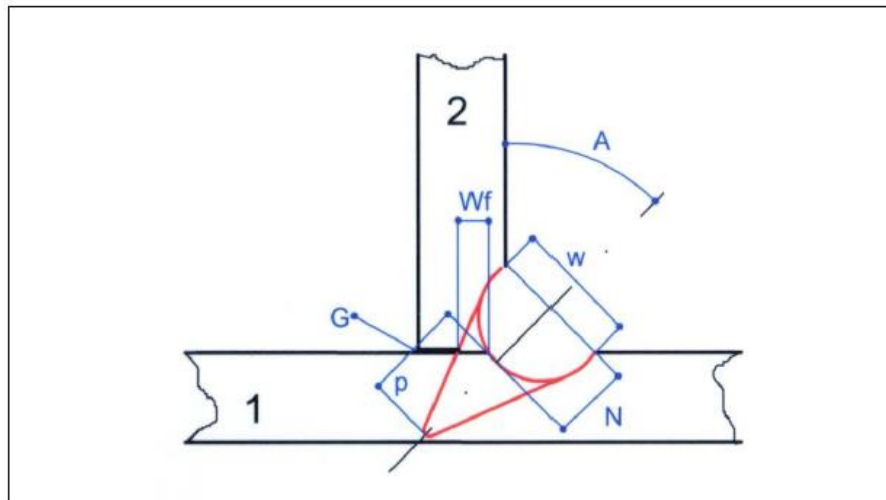


Figura 7. Soldadura de filete para soldadura láser. Observe la diferencia entre la penetración de soldadura (p) y el ancho de fusión W(f). Es la W(f) la que lleva la carga aplicada a la junta de soldadura y, por lo tanto, lo que debe especificarse. El relleno inferior (N) también es crítico y debe especificarse. Si el exceso (N) excede la "sensibilidad a la fisura" del material, la soldadura fallará.[3]

El ángulo de inclinación del rayo láser hacia la superficie del material es crítico. Si el rayo del láser está a 90 grados (perpendicular) a la superficie, la potencia del láser reflejada encuentra su camino hacia la cavidad del láser a través de la óptica de entrega del haz, lo que provoca la potencia del láser inestabilidad y posiblemente daños al láser y la óptica. Por esta razón, el ángulo de inclinación entre el rayo láser y la superficie de los materiales debe ser de 84-86 grados.

2.6. AGRIETAMIENTO DE METALES

Una de las razones de las micro fisuras al final de la soldadura es la tensión superficial excesiva durante el ciclo de solidificación de la soldadura.[10]

as dos causas principales de grietas en los metales soldados con láser son:

- Composición metalúrgica; la aleación del metal para la soldadura láser no es "correcta".
- Tensión superficial excesiva en la soldadura.

Se experimentarán defectos (grietas de soldadura) cuando los componentes clave de la aleación estén presentes en un volumen mayor que el permitido para la velocidad de enfriamiento rápido.

Aceros al carbono: son ejemplos de metales que pasan por cambios cristalográficos cuando se enfrían. En los aceros al carbono, las velocidades de enfriamiento muy altas provocan que la perlita se transforma en una estructura martensítica muy dura y las soldaduras se agrietan durante la solidificación. El componente clave es el carbono.

2.7. CALIDAD Y LIMPIEZA DE LAS SUPERFICIES DE CONTACTO

Para ofrecer soldadura láser de calidad constante, las características geométricas de las superficies deben cumplir con cierta "calidad" geométrica; rectitud y planitud.

La segunda demanda en las superficies de acoplamiento es la limpieza a nivel molecular, debido al bajo volumen del material soldado con láser, incluso una

contaminación menor de las superficies puede tener un efecto grave en la calidad metalúrgica de las soldaduras.

El recubrimiento del material o el manejo y almacenamiento incorrectos de los materiales también pueden contribuir a la contaminación de las superficies.[9]

2.8. MECANISMOS DE ALEACIÓN DE SUPERFICIE LÁSER (LSA)

El mecanismo de aleación de superficie láser (LSA) implica la combinación de modificación controlada tanto de la microestructura como de la composición química que permite adaptar las propiedades de la superficie a los requisitos de la aplicación. El proceso también conduce al desarrollo de fases de equilibrio y a la formación de fases complejas y metaestables debido a su rápido derretimiento y solidificación.

- La modificación de la superficie tiene la ventaja de consumir solo una pequeña cantidad de material en la superficie mientras se usa un sustrato económico para la mayor parte, el suministro de energía se puede controlar bien.
- Es posible un tratamiento muy local.
- El calor total de entrada es bajo, lo que resulta en una distorsión mínima.
- Las velocidades de calentamiento y enfriamiento son altas, lo que resulta en una microestructura fina y fases metaestables.
- El tratamiento es un proceso sin contacto.
- No hay desgaste de herramientas, ni fuerzas mecánicas que actúen sobre la pieza de trabajo.
- La profundidad del proceso está bien definida.
- También permite un gran número de combinaciones de propiedades de superficie y volumen.

La modificación de la superficie con láser es una técnica moderna de superficie que se está volviendo cada vez más popular en aplicaciones de ingeniería.

En comparación con otros métodos de modificación de superficie, posee las siguientes características:

- Posibilidad de formar aleaciones de composiciones sin equilibrio.
- Formación de una microestructura fina.
- Presencia de un enlace metalúrgico entre la capa superficial y el sustrato.
- Una pequeña zona afectada por el calor.
- La combinación de una dilución mínima controlada del sustrato por el material de recubrimiento y, sin embargo, una unión de fusión muy fuerte entre ellos.[11]

2.9. TRASFORMACIONES DE FASE EN SOLDADURA LÁSER

El calentamiento por conducción láser implica un calentamiento en fase sólida para fuentes estacionarias o móviles. Para acomodar la absorción de energía láser irradiada, se debe incorporar una consideración de fuente volumétrica. El calentamiento por láser está involucrado en el procesamiento del gas auxiliar; por lo tanto, el efecto de convección del gas auxiliar se incorpora en el análisis.

En situaciones prácticas de calentamiento por láser, los pulsos láser empleados tienen un ciclo de trabajo único (energía por pulso o contenido de energía de un solo pulso) y frecuencia de ciclo. Se ha demostrado que la tasa de repetición de los pulsos láser mejora la eficiencia del procesamiento láser. Sin embargo, los pulsos láser, en general, tienen tiempos de subida y bajada, lo que hace que la solución analítica sea difícil de lograr, particularmente en situaciones de calentamiento simétrico de eje bidimensional. Por lo tanto, la solución numérica para tal situación de calentamiento se vuelve inevitable. Dado que el proceso de calentamiento es transitorio, las condiciones iniciales y de contorno se vuelven importantes, pareciéndose al proceso físico real. [12]

Debido a la atención que se ha dado a los procesos mediante laser, se trata de modelar los fenómenos físicos que ocurren durante el procesamiento, para predecir las condiciones para su optimización, sin realizar demasiados experimentos. Analizar la física del proceso es complejo, puesto que, es necesario combinar cálculos de transferencia

de calor, cinética de transformación y relaciones cuantitativas entre propiedades y estructuras. [13]

Las transformaciones de fase afectan el campo de temperatura a través del calor latente de transformación y de las propiedades termo físicas dependientes de la microestructura y al campo mecánico debido a las deformaciones por transformación. Tomar en cuenta las transformaciones microestructurales usualmente no es fácil, ya que, es importante tener una comprensión de sus mecanismos. Los trabajos de modelado que se realizan sobre los procesos térmicos tienen un objetivo en común, la optimización del proceso, mejorando las propiedades de las piezas y minimizando los esfuerzos residuales que pueden conducir a la delaminación y al agrietamiento.

La microestructura obtenida en los procesos térmicos depende de las velocidades de solidificación y de enfriamiento del área fundida. En la zona expuesta a una fuente de calor existirá diferencia de velocidades, ya que cada punto tendrá una máxima temperatura. En los procesos que involucran una fuente de láser se ha encontrado que la microestructura muestra una estructura fina, característica de altas velocidades de enfriamiento inherente a tales procesos [14], resultando las áreas superficiales con un incremento de dureza. La dureza cambia dependiendo de la microestructura presente.

2.10. EFECTOS DE ESFUERZOS RESIDUALES

Los efectos de los esfuerzos residuales se estudian ampliamente, pues son perjudiciales de varias formas durante el proceso: afectan el funcionamiento de la pieza procesada en el servicio, ocasionan agrietamientos, influyen en la resistencia a la fatiga y el desgaste. Por ello, se estudian los mecanismos de generación para poder minimizarlos y optimizar los procesos. En tratamientos mediante láser, se ha encontrado que los mecanismos de origen de esfuerzos residuales son la deformación plástica y flujo debido a la expansión y contracción térmica, y el cambio de volumen debido a las transformaciones de fases. [15]

En el procesamiento de materiales con láser pueden producirse esfuerzos residuales, no obstante, el estado de esfuerzos puede variar considerablemente para diferentes materiales. En investigaciones sobre recubrimientos se ha encontrado que, altos esfuerzos residuales a tensión localizados pueden conducir a la generación de grietas disminuyendo la vida a fatiga. Esfuerzos residuales compresivos moderados son benéficos, pero esfuerzos relativamente altos puede conducir también a la distorsión del componente dependiendo de la resistencia a la cedencia del material. [16]

2.11. FORMACIÓN DE POROSIDAD EN LA SOLDADURA LÁSER

La porosidad se define como la discontinuidad en forma de cavidad formada por el atrapamiento de gases durante la solidificación [17]. Muchas veces, esta discontinuidad es considerada poco peligrosa, pero los poros están compuestos por bordes tersos, redondeados o alargados que al solidificar pueden formarse colas agudas, lo que puede dar origen a una grieta.

La porosidad es uno de los principales defectos en el proceso de Soldadura Láser. Las porosidades que aparecen en diversas ubicaciones de la soldadura pueden caracterizarse por distintas morfologías y distribuciones. Por ejemplo, comúnmente se forman grandes huecos en la parte inferior de la soldadura, mientras que pequeños huecos distribuidos se forman hacia la superficie de la soldadura.

La formación de poros a menudo se relaciona con la captura de gas (formado ya sea por desgasificación o por gas circundante) durante la solidificación. El origen de grandes huecos se cree que es la solidificación del material antes del llenado completo del hueco clave.

La formación de porosidad está muy influenciada por los parámetros de proceso láser, como la potencia, las condiciones de enfoque, la velocidad de soldadura, el gas de protección, etc.

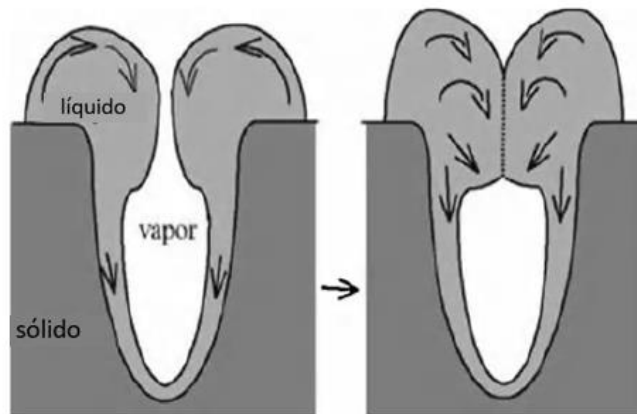


Figura 8. Esquema de la formación de grandes poros debido al llenado completo del hueco clave durante la soldadura láser[2].

La formación de porosidad se puede minimizar optimizando los parámetros de procesos láser de manera que se mejore la estabilidad del hueco clave y se minimice la turbulencia en el flujo del fluido.

En general, el número de poros por unidad de longitud de soldadura puede reducirse aumentando la velocidad de soldadura y mejorando la calidad del rayo láser. Además, se espera que una mayor densidad de potencia estabilice el hueco en soldadura por penetración profunda que resulta en una reducción de la porosidad. [2]

Otros factores pueden ser una mala limpieza en la unión a soldar, la corrosión y agentes externos que se introduzcan durante la soldadura al charco líquido. [18]

El mecanismo de formación de porosidad involucra la descomposición de elementos químicos durante la soldadura, quienes deben su formación a la saturación de solubilidad de estos en el material o por reacción química .[19,20]

Durante el calentamiento de la zona, líquidos como el agua, grasas, lubricantes, entre otros pueden descomponerse al sobrepasar la temperatura de evaporación del fluido, generando gases que de acuerdo con la cinética de evaporación y el tiempo de solidificación podrían quedar atrapados en la soldadura. [21]

La porosidad en la soldadura también puede resultar debido al rechazo de los gases disueltos durante la solidificación, por el atrapamiento de gases debido a la turbulencia de fusión o la contracción de solidificación. [2]

Las causas de la existencia de porosidad son la humedad, la contaminación del área de la soldadura, la combinación inapropiada de elementos químicos en el charco de la soldadura, la corrosión presente en la pieza de trabajo, así como algunas técnicas del mismo proceso. [18,22,23]

2.12. FUNDAMENTOS DEL DAÑO POR HIDRÓGENO EN ACEROS

En metalurgia, los problemas del efecto del hidrógeno sobre las propiedades mecánicas de los aceros implican fenómenos como la fragilización, la fractura retardada o la fatiga estática, la corrosión bajo tensión, el ampollamiento, el descascaramiento o la exfoliación[24,25]. La fragilización se produce por un proceso de adsorción y difusión del hidrógeno cuando este se incorpora a la red cristalina de forma permanente o temporal.[26] En la superficie de los metales o aleaciones metálicas se presentan reacciones químicas que disocian la molécula de hidrógeno y posibilitan su penetración en la estructura del metal. Los átomos de hidrógeno se mueven hacia su interior por difusión en esta sólido.[27]

2.12.1. Daño por hidrógeno

Aunque la degradación producida por el hidrógeno puede aparecer en distintas formas, los casos más importantes se agrupan en dos categorías: hidrógeno combinado e hidrógeno en solución.

2.12.2. Hidrógeno combinado

Se puede citar el ataque por hidrógeno y ampollamiento inducido por hidrógeno. Se presentan características como daño irreversible y ausencia de tensiones.

Ataque por hidrógeno: Se denomina habitualmente ataque por hidrógeno al tipo de daño que se presenta a temperaturas superiores a 200°C bajo presiones y con la presencia de este elemento. Los aceros que revelan este daño sufren una fuerte descarburación con reducción de su tenacidad y resistencia mecánica. El mecanismo de daño consiste en que el hidrógeno presente en el material reacciona con el carbono al descarburizar el material y formar metano (CH_4). Las burbujas de metano se alojan preferencialmente en los límites de grano y ocasionan fisuración intergranular.

Ampollamiento inducido por hidrógeno: Este fenómeno se conoce como Blistering. Esta forma de daño se encuentra muy frecuentemente en aceros de baja resistencia mecánica que trabajan en medios que promueven una fuerte entrada de hidrógeno al material. Las inclusiones alargadas juegan un papel clave en el ampollamiento, en especial los sulfuros de manganeso, cadenas de alúmina y cadenas de óxidos, que generan microcavidades en las interfases inclusión–matriz y facilitan la recombinación de hidrógeno en estos sitios. El mecanismo de daño consiste en que el hidrógeno atómico producido en la superficie del acero penetra en el material y se recombina en los lugares más susceptibles: interfaz matriz – inclusión, matriz – carburos, cavidades y límites de grano y ocasionan en este sitio un aumento de la presión interna una descohesión de los granos y finalmente la aparición y crecimiento de fisuras.

2.12.3. Hidrógeno en solución

La fragilización por hidrógeno es el principal problema que ocasiona el hidrógeno en solución. Este daño se presenta en diversos aceros, tanto de baja como de alta resistencia mecánica. La falla involucra la pérdida de propiedades mecánicas inducida por el hidrógeno que deriva en la iniciación o propagación de fracturas mecánicas. Algunas de sus características principales son:

- La ductilidad del acero disminuye progresivamente con el aumento de este elemento.
- La resistencia a la fractura disminuye con el aumento del contenido de hidrógeno en el acero.
- La presencia de hidrógeno en el acero puede cambiar el tipo de fractura y pasar de una morfología típicamente dúctil a otra esencialmente frágil. Los efectos de

la fragilización ocurren principalmente en el intervalo de temperaturas entre 173°K a 373°K, con un efecto máximo a temperatura ambiente.

- La fragilización por hidrógeno ocurre solamente cuando el material es sometido a esfuerzos de tensión.
- La fragilización por hidrógeno depende del tratamiento termo-mecánico y de la microestructura del acero. Los aceros más susceptibles son aquellos que han sido endurecidos (microestructura martensítica). La deformación en frío también aumenta la sensibilidad a la fragilización por hidrógeno.

2.12.4. Interacción del hidrógeno con el acero

La presencia de hidrógeno en solución sólida en metales y aleaciones está relacionada principalmente con el diámetro pequeño de este elemento y con su capacidad de difundir con cierta facilidad en el estado sólido. No obstante, la presencia del hidrógeno en los aceros no es deseada ya que altera considerablemente las propiedades mecánico-metalúrgicas de estos materiales y puede llevarlos a la fractura. Diversos factores contribuyen para elevar o disminuir la solubilización y/o difusión de hidrógeno en los aceros. Los principales son la temperatura, la composición química, la estructura cristalina y subestructura, el tiempo, el estado de tensión, la presencia de gases y líquidos, el medio ambiente, la concentración del hidrógeno en el acero, la presión, la temperatura, las propiedades físicas y mecánicas del material, las condiciones superficiales, entre otras.

El mecanismo de entrada en el hidrógeno en el acero se da a través de las siguientes etapas:

Disolución

- El Hidrógeno molecular (H_2) se disocia en hidrógeno protónico (H^+) o atómico (H^0), a partir de una atmósfera gaseosa o de productos químicos.
- Es adsorbido en la superficie del metal donde una fugacidad elevada garantiza una diferencia de concentración entre esta superficie libre y el interior del material, al crear condiciones para que ocurra la difusión en estado sólido.
- Finalmente es absorbido por el acero[28].

Difusión

Se transporta rápidamente, a temperaturas próximas al ambiente, hacia el interior del metal y aprovechar su menor tamaño atómico. La fuerza motriz que permite el movimiento del hidrógeno es proporcionada por gradientes térmicos y por gradientes de potencial químico del hidrógeno en el interior del acero que son proporcionales al gradiente de concentración en fase cristalina y a un gradiente de componente hidrostático de un campo de tensiones elásticas que actúan sobre una red.

Solubilidad en la red cristalina

Una vez presente en la estructura del acero el hidrógeno (H) puede estar en cuatro formas distintas (considerando que no se formen hidruros): como átomo neutro (H^0), como catión (H^+), como molécula (H_2) o combinado con los elementos de aleación. El hidrógeno posee un radio de 0.25 a 0.54 Å en unión covalente y un radio iónico de 10^{-4} Å para el catión (H^+), y 1.26 a 1.35 Å para el anión (H^-).[29]

Debido al menor tamaño del hidrógeno comparado con el de los átomos de hierro, tiene una movilidad significativa.

Atrapadores de hidrógeno

El término atrapador o trampa se utiliza para designar la interacción de hidrógeno con los defectos internos de la red cristalina o en la superficie del material. Estos sitios preferenciales de aprisionamiento del hidrógeno son denominados trampas. Son regiones en la red en las que la probabilidad de escape del hidrógeno es menor que para un sitio normal. En la figura 9 se presentan ejemplos de sitios aprisionadores.

Son ejemplos de trampas los defectos cristalinos tales como los límites de grano, las dislocaciones, las interfases entre la matriz e inclusiones y otros sitios donde la energía de interacción con el hidrógeno es mayor que la encontrada entre el hidrógeno y los espacios cristalinos de la red.[30]

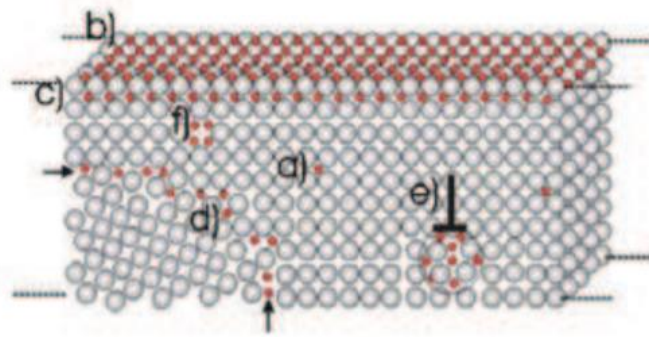


Figura 9. Representación esquemática de defectos en metales y sitios de acumulación de átomos de hidrógeno. a) Solubilidad convencional en la red cristalina. b) Sitios de atrapamiento de hidrógeno en la superficie. c) Sub superficialmente. d) En límites de grano. e) En dislocaciones. f) En vacancias.[31]

2.12.5. Fragilización por hidrógeno

La fragilización por hidrógeno es un fenómeno que ocurre en diferentes componentes mecánicos llevándolos a fallas en atmósferas ricas en este gas[32,33], lo que resulta, por lo general, en una fractura catastrófica que ocurre de manera inesperada después de varios años de servicio[34]. Si el hidrógeno está presente en un material, este puede fallar cuando es sometido a niveles de tensión mucho menores de los verificados cuando no contiene hidrógeno en solución sólida.

La fragilización por hidrógeno puede restringir el uso de varios metales y aleaciones ya que se presenta degradación de las propiedades mecánicas como resultado del ingreso de hidrógeno en el material. Cuanto mayor sea la resistencia mecánica de la aleación mayor es la susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno.[35]

El átomo de hidrógeno después de ser absorbido superficialmente y absorbido se difunde rápidamente en la red cristalina (en temperaturas próximas al ambiente), debido a que es un elemento químico de diámetro muy pequeño y de gran movilidad, a través de su difusión en estado sólido.[32]

La interacción del hidrógeno con las heterogeneidades de la red cristalina de un metal es fuerte influencia en la susceptibilidad a la fragilización.[36] Las heterogeneidades

estructurales son sitios aprisionadores del hidrógeno difusivo y la naturaleza de interacción de hidrógeno con estos sitios afecta la resistencia del metal a la fragilización por hidrógeno y pueden iniciar una serie de eventos que llevan a la fractura. La acumulación de hidrógeno en partículas de segunda fase y precipitados es, generalmente, considerado como la iniciación de microgrietas.

El hidrógeno se solubiliza en el metal sólido en sitios intersticiales a través de los cuales se mueve en difusión en estado sólido. Además, los átomos de hidrógeno también pueden encontrarse en solución sólida y aprisionados en trampas de la microestructura. La ocupación de las trampas es determinada por la concentración de energía de enlace de los átomos de hidrógeno alrededor de estos sitios de la red.[37]

2.12.6. Teorías de fragilización por hidrógeno

Teoría de presión

Zapffe y Sims[38], en 1941 propusieron que la fragilización por hidrógeno ocurría en función de la presión interna promovida por la acumulación de hidrógeno gaseoso en una cavidad preexistente y ayudada por la presión aplicada. Esta presión interna facilitaría la iniciación y propagación de una grieta

Teoría de adsorción de energía superficial

Petch y Stables[39], propusieron que los átomos de hidrógeno en solución sólida en el material se difundirían hacia la punta de una grieta, causando la disminución de energía de superficie de las caras de la grieta. Este decaimiento de la energía sería responsable por la disminución de la resistencia del material a clivage o a fractura intergranular. Esto explicaría el carácter retardado de la fractura y la propagación intermitente de la grieta.

2.13. ABSORCIÓN DE LA RADIACIÓN LÁSER

Cuando la radiación electromagnética incide en la superficie de un material, varios fenómenos que ocurren incluyen en la reflexión, refracción, absorción, dispersión y transmisión (Figura 10.).

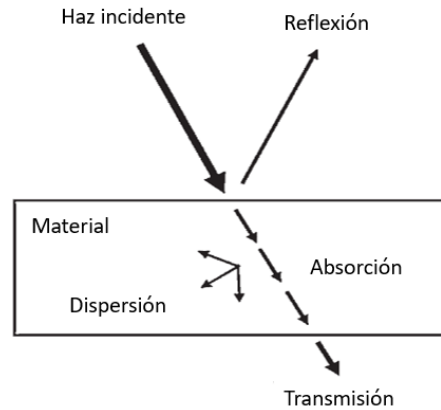


Figura 10. Posibles interacciones de la luz láser con el material[2]

Uno de los más importantes en el procesamiento de láser de materiales, es el fenómeno de la absorción de la radiación.

La absorción de radiación en los materiales produce varios efectos, como es el calentamiento, fusión, vaporización, formación de plasma, etc., que forma la base de varias técnicas de procesamiento láser de materiales. El alcance de estos efectos principalmente depende de la característica de la radiación electromagnética y la termofísica de las propiedades del material.

Los parámetros del láser incluyen intensidad, longitud de onda, coherencia temporal y espacial, ángulo de incidencia, polarización, tiempo de iluminación, etc., mientras que los parámetros de los materiales incluyen absorción, conductividad térmica, calor específico, densidad, calores latentes, etc.

La absorción de luz puede explicarse como la interacción de la radiación electromagnética (caracterizada por vectores eléctricos y magnéticos) con los electrones (libres o unidos) del material. La radiación electromagnética solo puede interactuar con los electrones de los átomos del material porque los núcleos mucho más pesados no pueden seguir las altas frecuencias de la radiación láser, los electrones ejercen una fuerza y pone los electrones en movimiento por el campo eléctrico de la radiación.

Uno de los parámetros importantes que influyen en los efectos de las interacciones láser-material es la capacidad de absorción del material para la radiación láser. Se puede definir como la fracción de radiación incidente que se absorbe con incidencia normal. Para materiales opacos, la capacidad de absorción (A) se puede expresar como (Duley 1983):

$$A = 1 - R \quad \text{(Ecuación 2.4)}$$

donde R es la reflectividad del material. La reflectividad y la capacidad de absorción del material puede calcularse a partir de las mediciones de constantes ópticas o el índice de refracción complejo.

El índice de refracción complejo (N_c) se define como:

$$N_c = n - ik \quad \text{(Ecuación 2.5)}$$

donde n y k son el índice de refracción y el coeficiente de extinción, respectivamente. Los parámetros son funciones fuertes de longitud de onda y temperatura. La reflectividad en la incidencia normal se define como:

$$R = (n - 1)^2 + k^2 / (n + 1)^2 + k^2 \quad \text{(Ecuación 2.6)}$$

Dado que los parámetros n y k son funciones de longitud de onda y temperatura, la reflectividad (y por lo tanto la capacidad de absorción) del material está muy influenciada por la longitud de onda y temperatura (Duley 1983).

La variación de la reflectividad con la longitud de onda de algunos materiales metálicos comunes se presenta en la Fig. 11

Las longitudes de onda de dos láseres importantes (Nd: YAG y CO_2) se superponen en la figura. Como se indica en la figura, la reflectividad del material generalmente aumenta

con el aumento de la longitud de onda. Por lo tanto, los materiales son absorbentes fuertes (menos reflectantes) a longitudes de onda más cortas.

Para un material dado, la radiación del láser Nd: YAG ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$) se absorbe fuertemente que el láser de CO_2 ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$). Sin embargo, dicha dependencia de la longitud de onda de la reflectividad (y por lo tanto absorción) debe usarse solo como pautas porque hay varios otros factores que puede influir fuertemente en la capacidad de absorción.

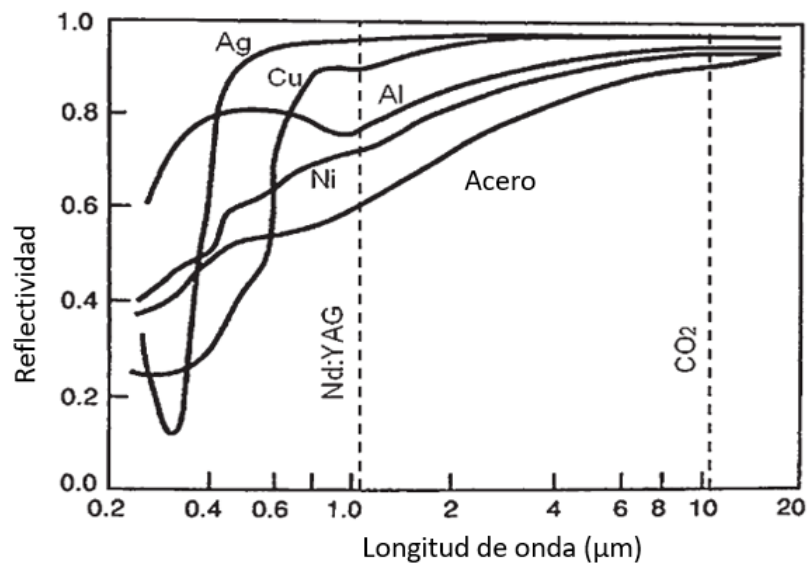


Figura 11. Variación de reflectividad con longitud de onda de algunos materiales metálicos. La longitud de onda de dos láseres importantes (Nd: YAG y CO_2).[2]

Por ejemplo, la reflectividad de un material generalmente disminuye con el aumento de la temperatura (Figura 12). Por lo tanto, un material que es altamente reflectante a baja temperatura puede volverse muy absorbente a alta temperatura. Esto es de particular importancia en el procesamiento láser de materiales donde la interacción láser-materiales resulta en un aumento significativo en las temperaturas de la superficie.

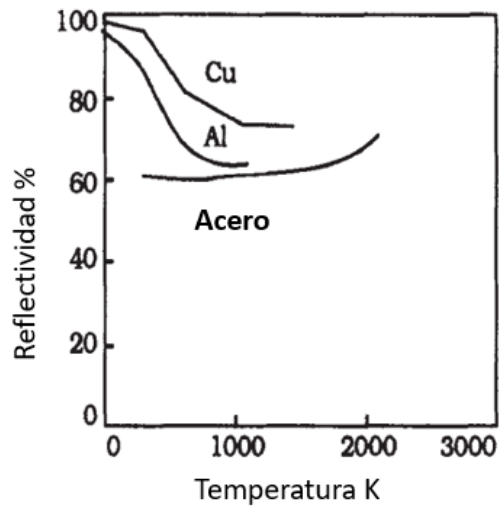


Figura 12. Variación de reflectividad con temperatura por 1.06 μm de radiación.[2]

La energía láser absorbida por el material durante la interacción láser-material es convertida en calor por degradación de la energía de excitación primaria ordenada y localizada. Los tiempos de relajación energética típicos en general son del orden de 10^{-13}s para metales. La conversión de la energía de la luz en calor y su conducción posterior en el material establece las distribuciones de temperatura en el material. Dependiendo de la magnitud del aumento de temperatura, varios efectos físicos en el material incluyen como: calentamiento, fusión y vaporización del material.

Además, la ionización del vapor durante la irradiación con láser puede conducir a la generación de plasma. Además de los efectos térmicos, las interacciones láser-material pueden ser asociadas con procesos fotoquímicos como la foto ablación del material[2].

Estos efectos de las interacciones láser-material se presentan esquemáticamente en la figura 13.

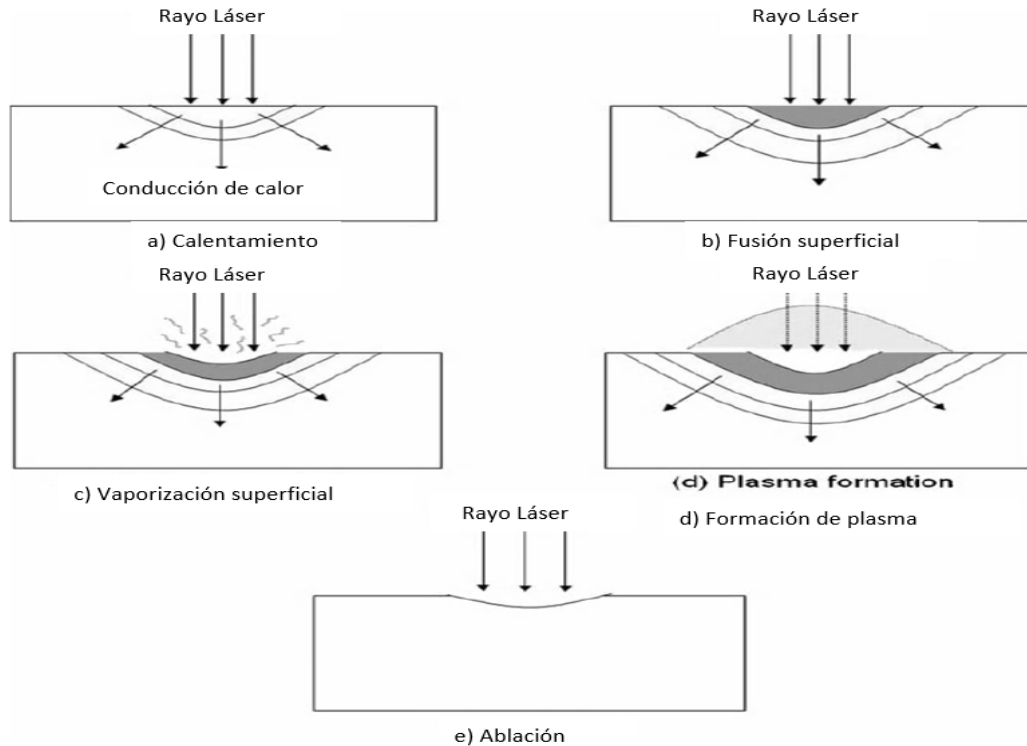


Figura 13. Efectos de interacción de láser-material: a) calentamiento, b) fusión superficial c) vaporización superficial, d) formación de plasma e) ablación[2].

2.14. MICROINDENTACIÓN

La prueba de dureza por microindentación (o prueba de micro dureza) es un método para medir la dureza de un material a escala microscópica. Un penetrador de diamante de precisión se imprime en el material con cargas de unos pocos gramos a 1 kilogramo. La longitud de impresión, medida microscópicamente, y la carga de prueba se utilizan para calcular un valor de dureza. Los valores de dureza obtenidos son indicadores útiles de las propiedades de un material y el comportamiento esperado del servicio. Las conversiones de valores de dureza de microindentación a resistencia a la tracción y otras escalas de dureza (por ejemplo, Rockwell) están disponibles para muchos metales y aleaciones.

Las hendiduras generalmente se realizan utilizando un penetrador piramidal de base cuadrada (escala de dureza Vickers) o un penetrador alargado de forma romboédrica (escala de dureza Knoop). El probador aplica la carga de prueba seleccionada

utilizando pesos muertos. La longitud de las impresiones de dureza se mide con precisión con un microscopio óptico utilizando un ocular filar o una imagen de video y software de computadora. Luego se calcula un número de dureza utilizando la carga de prueba, la longitud de impresión y un factor de forma para el tipo de penetración utilizado para la prueba. [40]

2.14.1. Selección de un método de prueba de dureza de microindentación

Los factores que influyen en esta decisión son los siguientes:

1. forma, tamaño y grosor de muestras.
- 2.-Dureza, y ductilidad del material.
3. Muestra de homogeneidad
- 4.- Los límites estadísticos de confianza deseados de los resultados.
5. Motivo por el cual se necesitan los datos de dureza de microindentación.

Se pueden identificar dos amplias categorías de pruebas de dureza de microindentación:

1. control de calidad y desarrollo de procesos.
2. Investigación, tanto básica como aplicada.

2.14.2. Tipos de Microindentador

Se han utilizado varias geometrías de microindenter en las pruebas de microindentación. El microindenter más utilizado en los EE. UU. Y Europa es el Vickers, siendo el Knoop el segundo.

Cabe señalar que el penetrador Vickers es algo menos sensible a los efectos de orientación microestructurales que el Knoop y penetra tres veces más profundo para una carga dada y el mismo número de dureza. El Knoop fue desarrollado para una penetración poco profunda y para minimizar el agrietamiento en materiales frágiles. Se dobla para ser más sensible a los efectos de baja carga y la preparación de la superficie

que los Vickers, pero su forma de impresión alargada es a menudo una ventaja al colocar las ideas en bandas estrechas de material.

Además de esto, la penetración superficial del Knoop puede ofrecer ventajas cuando se va a probar un recubrimiento delgado. [41]

Tabla 3. Tipos de Microindentador y sus características[41]

Nombre	Geometría	Referencia	Comentarios
Vickers	pirámide de diamante equiaxial, cuatro caras; 136° ángulo del ápice facetario	10,11	Penetrador común disponible comercialmente; relación de longitud de diagonal a profundidad aproximadamente 7:1
Knoop	Pirámide de diamante alargada, cuatro caras ángulo del ápice del borde mayor ángulo del ápice del borde menor	10	Penetrador común disponible comercialmente; menos profundo que los Vickers en el arnés y la carga dados, la relación de longitud de la diagonal larga a la profundidad típicamente 30:1
Brinell	10 mm de diámetro de la esfera	4	Generalmente se usa para cargas más altas (mayor a 1 kg), así como micro dureza; Una técnica muy bien establecida en pruebas de micro dureza
Berkovich	penetrador de diamantes; tres facetas, 142° borde a faceta opuesta	1,12	Impresión triangular
Grodzinski	Diamante; borde de bases de dos conos de base a base 66°; Radio base de 2 mm.	1	Altamente alargada; longitud a profundidad puede exceder 130:1 radio.
Pfund	Hemisferios de zafiro	13	Penetrador de cuarzo también usado
Brookes	Pentagonal	14	Menos sensible a los efectos de orientación cristalográfica que Vickers, Berkovich y Knoop

2.15. ESPECTROMETRÍA DE EMISIÓN ÓPTICA POR CHISPA Y ARCO

Es un método estándar para el análisis directo de muestras metálicas, de gran utilidad en fabricación y control de la producción en la industria del metal. Se basa en la obtención de chispas entre dos electrodos, lo que produce un plasma de vapor en el cátodo, de una temperatura mayor de 10 000 °K. Esta técnica permite la determinación rápida y simultánea de muchos elementos químicos en aleaciones, incluyendo elementos ligeros como C, S, B y P, por lo que es complementaria con la espectrometría de fluorescencia de rayos X para análisis metalúrgicos.

Se caracteriza por su flexibilidad analítica, al emplear dispositivos de carga acoplada como medio de captura de la luz de emisión. Cuenta con las siguientes características:

- Análisis de aleaciones de Fe, Al, Cu, Ni y Ti.
- Dispositivos de carga acoplada rápidos, con un rango de captura de 160-670 nm.
- Fuente digital de chispeo, con una corriente de plasma de 1 a 80 A.
- Tiempo de chispeo de 0,01 a 10 ms, con una frecuencia de 1 a 600 Hz.
- Una sola muestra de recalibración para todos los programas y bases metálicas[43].

2.16. ESTEREOSCOPIA

La estereoscopia es una técnica óptica-visual, basada en los principios de la percepción binocular, que nos permite crear o fotografiar, imágenes tridimensionales tal cual las observamos en la realidad. El efecto 3D se produce cuando el cerebro decodifica y funde la información capturada por las retinas del ojo izquierdo y derecho, permitiendo que las imágenes se vean con profundidad. Mientras más relieve tenga una imagen, mejor será la sensación de volumen que podremos percibir de esta.

El término 3D es una abreviatura estandarizada, comúnmente utilizada para representar a la tercera dimensión o tri-dimensión. Hace referencia al volumen y a la profundidad de los cuerpos.

La visión estereoscópica es la reproducción artificial de la visión en relieve o visión binocular.

El estereoscopio es una pequeña máquina de visualización 3D que permite forzar la vista, fusionar las imágenes derecha e izquierda de los ojos para percibir escenas con volumen. Este instrumento funciona a través de lentes prismas y espejos, que dirigen y desvían el enfoque de la mirada para que el cerebro pueda interpretar las imágenes con profundidad. El primer estereoscopio que se presentó en el mercado fue el diseñado por el científico Charles Wheatstone en el año de 1838. Actualmente existen diversos modelos de este instrumento y nueva tecnología que se ha adaptado para que cada vez la visión tridimensional se pueda captar de manera más cómoda [43].

2.17. MICROSCOPIA ESTEREOSCÓPICA

Ya desde su introducción por Horatio S. Greenough, la microscopia estereoscópica se basa en fundamentos ópticos, que habían sido investigados por Ernst Abbe, sobre todo. Durante más de un siglo, ingeniosos diseñadores e ingenieros ópticos han trabajado para llevar el aumento, la resolución y la fidelidad en la reproducción hasta los límites de lo que es posible desde el punto de vista óptico. Al hacerlo, siempre se han visto vinculados con la relación alterna entre estos tres factores: cuanto mayor debe ser la resolución de un microscopio, mayor será el ángulo de convergencia entre la trayectoria izquierda y derecha de rayos y menor la distancia de trabajo disponible. Si se incrementa la distancia de los ejes ópticos, se distorsionará la reproducción tridimensional que obtiene el observador. Un cubo en el objeto aparece entonces en una imagen tridimensional en forma de torre alta.

Los microscopios estereoscópicos existentes hasta el momento se distinguían por estar fabricados con un sinfín de componentes. Además, para la iluminación se requería echar mano de complejos accesorios. Aunque cada uno de los componentes es compatible, desde el punto de vista mecánico, se precisa de mucho espacio y no terminan de encajar entre sí.

La tecnología de diodos luminosos con visión de futuro ofrece un estupendo concepto en materia de soluciones para eliminar dichas deficiencias. Los diodos luminosos son pequeños y, en contra a lo que ocurre con las bombillas halógenas convencionales, consumen poca corriente. La última generación se distingue por una intensidad luminosa excepcional pudiéndose direccionar de forma individual. Gracias a estas nuevas posibilidades, por primera vez se ha logrado integrar la iluminación en todo el sistema, eliminándose así la sensación de ser un cuerpo ajeno.

Los parámetros de funcionamiento permiten un sinfín de aplicaciones que habían permanecido ocultas hasta el momento. Gracias a la imagen estereoscópica, incluso en aumentos elevados, se pueden obtener evidencias cualitativas y cuantitativas para muestras extensas en cuanto a su espacio[44].

3. PROCEDIMIENTO

La metodología de trabajo aplicada durante el análisis de las principales causas de porosidad en el proceso de Soldadura Láser es el diagrama de Ishikawa[45], herramienta fundamental para el análisis de las principales variables dentro de la solución de un problema crítico de proceso o producto.

En la tabla 4. se muestran las variables principales identificadas en el proceso, las cuales se analizaron las que más impactaban y contribuían a la generación del defecto.

Tabla 4. Variables de proceso por Ishikawa

Variables en el Proceso	
<i>Material</i>	Contaminación en piezas de soldadura axial.
	Variación de composición química del material.
	Reemplazo de lente óptico.
<i>Maquinaria</i>	Potencia Láser.
	Punto focal de la proyección del láser.
	Densidad de potencia láser.
	Tiempo de penetración y soldado
	Posición angular.
	Velocidad de soldadura.
	Longitud de penetración.
<i>Mano de obra</i>	Rotación de personal.
	Entrenamiento técnico de la nueva tecnología.
<i>Medición</i>	Medición de la densidad de potencia
	Calibración de láser.
<i>Método</i>	Plan de mantenimiento preventivo y correctivo.
	Entrenamiento de operación.

(Elaboración propia)

Para el análisis de las posibles causas, se estudiaron las variables por medio de los métodos de caracterización y de DOE, para poder alcanzar el objetivo.

3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MATERIALES UTILIZADOS

- Aceros de bajo carbono
- Punto de Fusión: 1510°C / 2750°F
- Clase de materiales II
- Densidad de potencia a vaporizar: $>5.0E+07$ w/in²
- Densidad de potencia a fundir: $\sim 1.5E+06$ w/in²

3.1.1. Características específicas de acero 5120H (engrane)

- 0.17-0.23% de carbono.
- Con tratamiento térmico ESHL3P-7A348-AA.
- Dureza superficial y del núcleo del producto normalizado: HRB 79-91 con diámetro DI de 2.5.
- Bainita se limitará al 20% como máximo con un aumento de 400X.
- $\leq 30\%$ de retención de austenita.

3.1.2. Características específicas de acero SAE J2340 grado 420XF (plato)

- 0.12% máximo de carbono
- Acero laminado en caliente
- Aleación de acero de alta resistencia

3.2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

Es el método que se utiliza para obtener datos acerca de un material, para conocer su condición o predecir las propiedades de este, con la finalidad de poder utilizarlos en algunas aplicaciones en base a los resultados de composición, microestructura, etc.

Se realizó una caracterización de la unión de las dos partes por medio de la tecnología de Soldadura Láser por Fusión.

El plato es de acero SAE J2340 Grade 420XF y el engrane de acero 5120H, esto para conocer y correlacionar sus condiciones ideales y analizar cuál es uno de los factores que contribuyen que se originen poros y explosiones superficiales en su proyección axial de penetración al ser unidos mediante esta tecnología. Para la caracterización se utilizaron varias técnicas para su análisis y demostración.

Las características del láser utilizado en el proceso son las siguientes:

- Clase 4, Láser Nd-YAG
- Tipo: Láser de Fibra
- Longitud de Onda: 1070nm infrarrojo cercano, invisible.
- Salida Láser Integrada: 6000 CW, clase 4

Se realizó un análisis o caracterización de los materiales involucrados en el proceso de soldadura a fin de evaluar su pureza o contrastar su composición química, características microestructurales y propiedades mecánicas con las fichas técnicas y requerimientos señalados de penetración de soldadura.

En la caracterización de los materiales se procedió como se muestra en el diagrama de Bloques (Figura 18).

Para el análisis en el material de Acero SAE J2340 Grade 420XF y 5120H se tomaron tres zonas de estudio, de las cuales se tomaron 10 muestras de cada una: partes directas de proveedor, partes con proceso de tratamiento térmico y carburizado, además de partes unidas a través del proceso de Soldadura Láser.

3.2.1. Caracterización de composición química

La composición química se estudió mediante la técnica de espectrometría de emisión óptica por arco y chispa, analizando los elementos de C, Mn, Si, Cr, Al, P y S de los dos materiales en estudio ya mencionados, para estas muestras de partes, provenientes de proveedor se utilizó el espectrómetro de marca AMETEK, modelo SpectroLAB M12. Para confirmar el elemento de carbono (c) de las partes con proceso de carburizado se usó el espectrómetro de marca LECO, modelo GDS500A.



Figura 14. Espectrómetro de emisión óptica por arco y chispa
(Elaboración propia)

3.2.2. Caracterización de la microestructura

La caracterización de la microestructura se llevó a cabo mediante un microscopio estereográfico de marca Nikon, modelo ECLIPSE MA200 con certificado de calibración, donde se tomaron imágenes con un aumento de 400X, analizándose el porcentaje de bainita del 20% máximo permitido para la zona de estudio de las muestras de partes de proveedor. Además, con éste mismo equipo de medición se analizó el porcentaje de austenita retenida con requerimiento de $\leq 30\%$ para las muestras con carburizado.

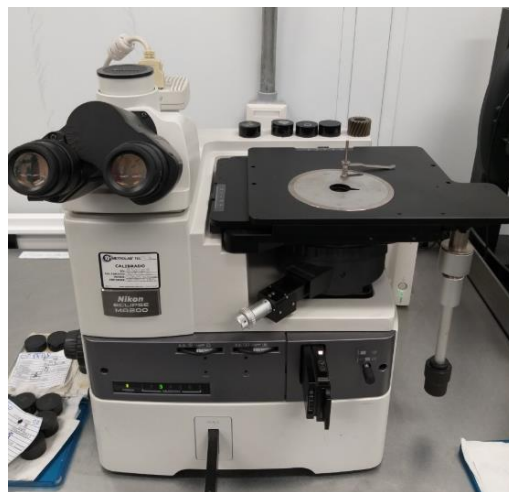


Figura 15. Microscopio estereográfico
(Elaboración propia)

3.2.3. Caracterización de propiedades mecánicas

De las propiedades mecánicas se estudió la dureza, la cual se verificó y se caracterizó con dos durómetros de diferente escala para dureza superficial y de núcleo. El durómetro para dureza superficial y de núcleo son de marca BUEHLER de modelo WH2002T utilizando carga o punta de 15kgf para la superficial y una carga de 150kgf para la de núcleo. La caracterización también se llevó a cabo con un microdurómetro Vickers realizando 25 indentaciones en cada muestra a 0.1kgf. Los equipos de medición están certificados correctamente.



Figura 16. Durómetro superficial y de núcleo
(Elaboración propia)

3.2.4. Caracterización por penetración de soldadura

Mediante un estereoscopio calibrado de marca Nikon de modelo SMZ 745T se tomaron imágenes para observar la penetración y porosidad de la soldadura. Teniendo como requerimiento de diseño, cumplir con una penetración de soldadura en la proyección axial de 5mm y en la superficie no se permite imperfecciones individuales de 2mm.



Figura 17. Estereoscopio para análisis de penetración de soldadura (Elaboración propia)

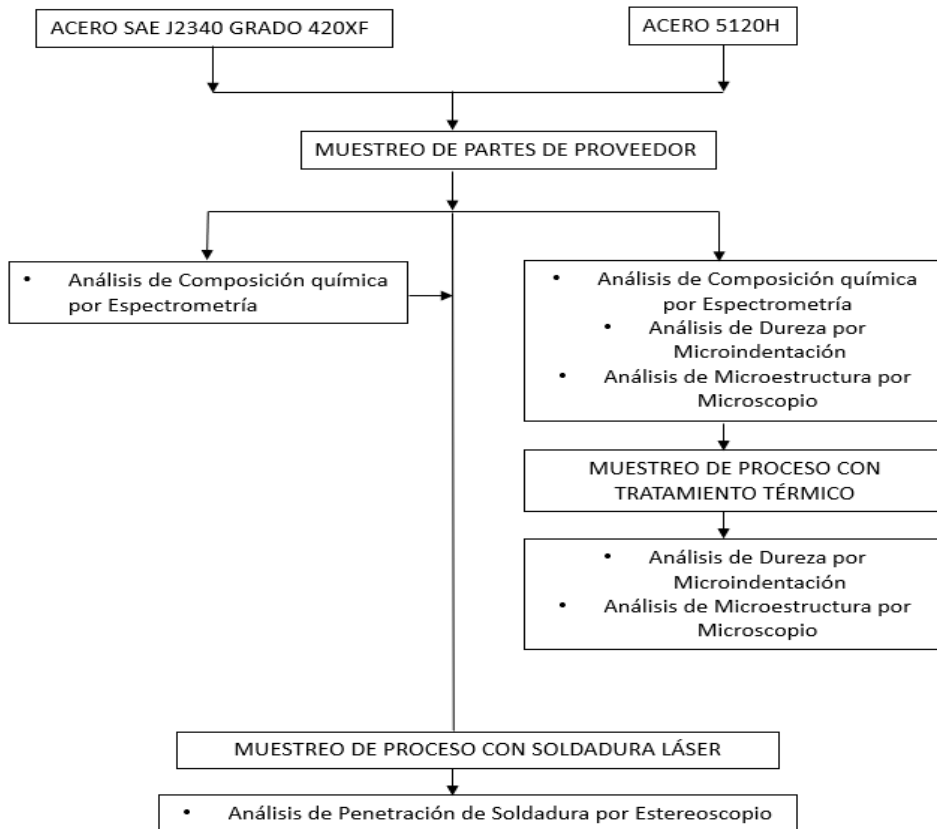


Figura 18. Diagrama de bloques de la metodología empleada en la caracterización (Elaboración propia)

3.3. IDENTIFICACIÓN DE IMPUREZAS

En el flujo de proceso se tiene una operación previa a Soldadura Láser, el cual consiste en ingresar el material de acero 5120H a un proceso de lavado, donde se usa como principal químico un Inhibidor de corrosión sintética para prevenir la oxidación.

Los inhibidores de corrosión son compuestos químicos que se incorporan, en bajas concentraciones, al ambiente en que se encuentran las piezas metálicas a proteger. La protección de metales mediante inhibidores de corrosión constituye un método original cuyas características deseables son:

- Eficacia a baja concentración, entre 0.1y 1.0g/L.
- No modificadores de las propiedades físicas del medio al que se incorporan.
- Fácil manipulación
- No tóxicos
- Poco onerosos, para justificar su uso sobre otros métodos de protección. [46]

3.3.1. Validación de proceso

Durante la validación de proceso de una corrida normal de producción de 200 partes, se identificaron las siguientes variables que afectan directamente a la limpieza del engrane acero 5120H y del plato SAE J2340 grado 420XF:

- No se tiene estandarizado un cambio del químico de Inhibidor de corrosión en las lavadoras para el acero 5120H.
- El Inhibidor se presenta de forma excesiva en la superficie del material después del lavado del acero 5120H, permitiendo formar una capa de partículas que se encuentran en el medio donde se almacena.
- Hay incrustaciones de este químico en el herramental principal donde se lleva a cabo la unión por láser.
- En el área de almacenamiento del SAE J2340 grado 420XF se presentan partículas de polvo.
- No se tiene determinado un cambio de frecuencia de filtros en el sistema de extracción de la celda de soldadura láser en general.

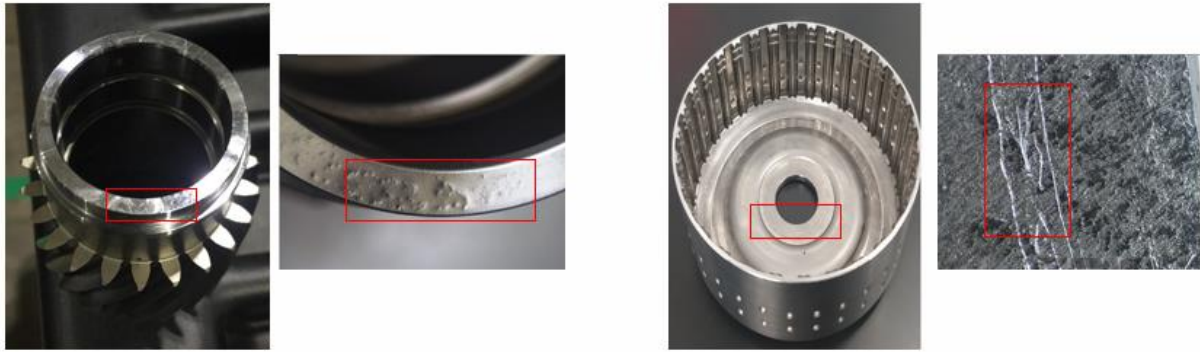


Figura 19. Los materiales presentan impurezas de inhibidor para prevenir la corrosión.
(Elaboración propia)



Figura 20. Sistema de extracción con impurezas
(Elaboración propia)

Se realizó una prueba en dos lotes de 100 partes de acero 5120H para demostrar la importancia de la limpieza en un proceso de soldadura láser.

- En la primera prueba se ingresaron las partes sin ejecutar limpieza superficial del área a soldar ni de la estación de trabajo del proceso láser,
- Para la segunda prueba se ejecutó una mejora en la operación de limpieza láser para ambas partes, ya que previamente sólo se hacía la limpieza para el engrane 5120H, donde se removió los residuos del Inhibidor de la superficie a soldar, se realizó un mantenimiento preventivo de limpieza a toda la celda y herramienta del proceso de soldadura láser, cambiando filtros y retirando toda la escoria en el sistema de extracción y herramientas.

3.4. DISEÑO DE EXPERIMENTOS (DOE)

Esta es una herramienta científica y efectiva para realizar pruebas, analizar correctamente los resultados y tomar las decisiones adecuadas respecto a la intervención de un proceso. Los resultados de un experimento proporcionan evidencias objetivas que permiten resolver las hipótesis planteadas y de esta manera clarificar los aspectos inciertos de un proceso.

Algunos problemas típicos que usted puede resolver mediante DOE son:

- Comparar diferentes tipos de material y elegir el más adecuado para su proceso.
- Comparar varios instrumentos de medición y verificar si trabajan con niveles similares de precisión y exactitud.
- Determinar cuáles variables de proceso afectan (y de qué forma) las características de calidad del producto.
- Encontrar condiciones de operación adecuadas para el cumplimiento de las especificaciones del producto final.
- Reducción de tiempos de ciclo. Apoyar el diseño de nuevos productos. [47]

Para el desarrollo del DOE de densidad de potencia, se llevó a cabo en la estación de soldadura láser donde se hicieron 18 pruebas en distintas posiciones de:

- Posición de máquina en eje Z, para soldar en proyección axial.
- Posición de pieza en eje Z, para soldar en proyección axial.

Los parámetros fijos de entrada en la máquina:

- Energía: 4 Joules
- Ancho de pulso: 0.002 s
- Potencia: 2000 watts

Para medir la Densidad de Potencia óptima para el proceso, se llevó a cabo mediante la técnica de hacer los disparos del láser hacia una cinta especial llamada Kapton, la cual permitiría calcular el diámetro del hueco y así poder obtener el área total necesaria para el cálculo de densidad de potencia. Para la medición del área de cada disparo

se utilizó un Equipo de Medición de visión especializado con proveedor externo para sacar estos resultados. Ver Figura 21.

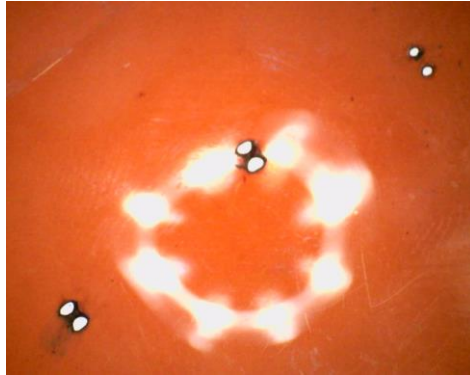


Figura 21. Disparo de rayo láser en Kapton
(Elaboración propia)

A continuación, se muestran en la Tabla 5 las diferentes posiciones y valores a las que se hizo el DOE para densidad de potencia óptima del proceso, cada prueba se proyectaron 2 disparos por diseño del láser, además teniendo las siguientes ventajas:

- Genera menor chispa, por lo tanto, optimización de energía.
- Mayor penetración de soldadura con menor potencia.
- Mejor acabado superficial en la unión por soldadura.

Tabla 5. Densidad de potencia a través del rayo láser en diferentes ubicaciones.

Parámetros de entrada									
Energía	Joules								4.0
Ancho de pulso	segundos								0.002
									Potencia = 2000 watts
Pos Z Máquina (mm)	Posición mm	Diámetro de hueco						I w/in ²	
		mm (1)	mm (2)	inch (1)	inch (2)	area in ² (1)	area in ² (2)		
<small>mm conv. to inch</small>									
1	371.801	-9.0	0.125	0.120	0.00494	0.00474	0.00019	0.00019	5.25E+06
2	369.801	-8.0	0.134	0.124	0.00526	0.00488	0.00021	0.00019	5.01E+06
3	368.801	-7.0	0.142	0.136	0.00558	0.00534	0.00022	0.00021	4.65E+06
4	367.802	-6.0	0.140	0.121	0.00551	0.00478	0.00022	0.00019	4.94E+06
5	366.803	-5.0	0.163	0.163	0.00641	0.00642	0.00025	0.00025	3.96E+06
6	365.801	-4.0	0.198	0.182	0.00778	0.00715	0.00031	0.00028	3.40E+06
7	364.8	-3.0	0.242	0.220	0.00952	0.00868	0.00037	0.00034	2.79E+06
8	363.803	-2.0	0.251	0.255	0.00990	0.01003	0.00039	0.00039	2.55E+06
10	362.803	-1.0	0.298	0.285	0.01173	0.01124	0.00046	0.00044	2.21E+06
11	361.801	0.0	0.676	0.579	0.02660	0.02278	0.00105	0.00090	1.03E+06
12	360.801	1.0	0.421	0.396	0.01659	0.01559	0.00065	0.00061	1.58E+06
13	359.801	2.0	0.396	0.394	0.01560	0.01552	0.00061	0.00061	1.63E+06
14	358.8	3.0	0.490	0.477	0.01929	0.01876	0.00076	0.00074	1.34E+06
15	357.801	4.0	0.450	0.469	0.01773	0.01848	0.00070	0.00073	1.40E+06
16	356.801	5.0	0.518	0.508	0.02041	0.01999	0.00080	0.00079	1.26E+06
17	355.8	6.0	0.564	0.524	0.02221	0.02064	0.00087	0.00081	1.19E+06
18	354.802	7.0	0.675	0.602	0.02658	0.02368	0.00105	0.00093	1.01E+06

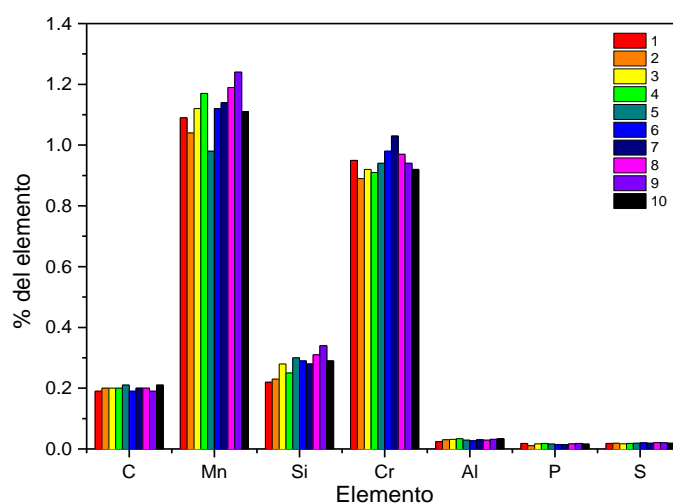
(Elaboración propia)

4. RESULTADOS

4.1. CARACTERIZACIÓN

4.1.1. Caracterización en composición química

En la gráfica 1 se muestra el resultado del análisis de composición química de partes de proveedor 5120H por espectrometría de la muestra de 10 partes suministradas por proveedor, analizando los siete elementos importantes: C, Mn, Si, Cr, Al, P y S.



Gráfica 1. Resultado de Análisis de Composición Química de Blank Acero 5120H por Espectrometría.
(Elaboración propia)

En la tabla 6 se muestran los resultados obtenidos del promedio de cada elemento en la muestra, siendo favorables, ya que en cada elemento se cumplió con la tolerancia del porcentaje establecido de acuerdo con los requerimientos de la norma ASTM A29[48].

Tabla 6. Especificación y resultados promedio de cada elemento en el análisis de Composición Química de Blank Acero 5120H por Espectrometría.

Elemento	Especificación	% Promedio
%C	0.17-0.23	0.19
%Mn	0.8-1.4	1.12
%Si	0.15-0.35	0.279
%Cr	0.8-1.2	0.945
%Al	0.02-0.045	0.03
%P	0.020max	0.016
%S	0.015-0.025	0.019

(Elaboración propia)

En la tabla 7 se obtiene los resultados de composición química de Blank del Acero SAE J2340 GRADE 420X de la muestra de 10 partes de proveedor. Se tiene como resultado que 5 de los elementos importantes: C, Mn, Si, P y S, se encuentran en un promedio dentro de la especificación de cada uno de acuerdo con la norma ASTM A370[49].

Tabla 7. Especificación y resultados promedio de cada elemento en el análisis de Composición Química de Blank Acero SAE J2340 GRADO 420X por Espectrometría

Elemento	Especificación	% Promedio
%C	0.12max.	0.06
%Mn	1.6max.	0.63
%Si	0.5max.	0.11
%P	0.025max	0.008
%S	0.015max	0.002

(Elaboración propia)

El Acero 5120H es sometido a otros procesos de fabricación como es el maquinado y posteriormente es sometido al proceso de carburizado a una temperatura de $940^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ con la finalidad de endurecer la superficie de las piezas, de igual manera pasa por tratamiento térmico de Revenido a una temperatura de $170^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, con objetivo de eliminar tensiones, disminuir la fragilidad y variar su dureza,

esto con el fin único de cumplir con su tiempo de vida útil en su aplicación final industrial.

Para analizar uno de los componentes importantes que es el carbono durante este proceso de revenido y carburizado, mediante espectrometría se comprobó que en el muestreo de este proceso se tiene un 0.89% de carbono, cumpliéndose el requerimiento mínimo de 0.75%.

4.1.2. Caracterización en microestructura

De igual manera se analizó la microestructura de la muestra de partes de proveedor de Blank Acero 5120H por medio de microscopio con una resolución de la imagen a 400X, esto para verificar la condición ideal que se debe de tener.

El requerimiento es el siguiente: cada blank debe exhibir una microestructura de ferrita predominantemente en bloque con perlita laminar fina, en la dirección longitudinal y transversal del material cuando se examina a un aumento de 400X. La bainita se limitará al 20% como máximo con un aumento de 400X de acuerdo con la especificación de Ingeniería Interna de Producto.

En la figura 22 se muestra la referencia de una fotomicrografía donde se proporciona la microestructura esperada.

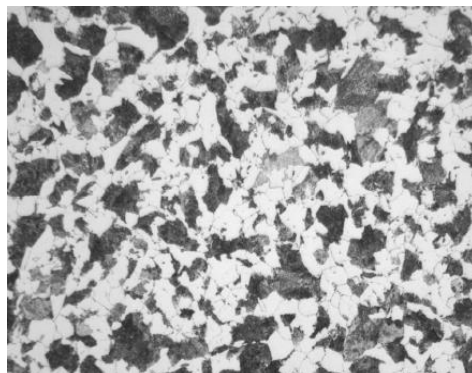


Figura 22. Referencia de microestructura esperada en blank Acero 5120H.
(Elaboración propia)

El resultado promedio de la muestra se refleja en la Figura 23 obteniéndose una microestructura semejante a la requerida con el aumento de 400X en el microscopio.



Figura 23. Resultado de análisis de microestructura de blank Acero 5120H con resolución a 400X.
(Elaboración propia)

Para la verificación de microestructura de austenita retenida de las partes procesadas después del carburizado y del tratamiento térmico de revenido del Acero 5120H, se tomaron de referencia las siguientes imágenes con aumento de 20X, con $\leq 30\%$ de retención de austenita a cumplir de acuerdo con la especificación de Ingeniería Interna de Producto. Ver la Figura 24.

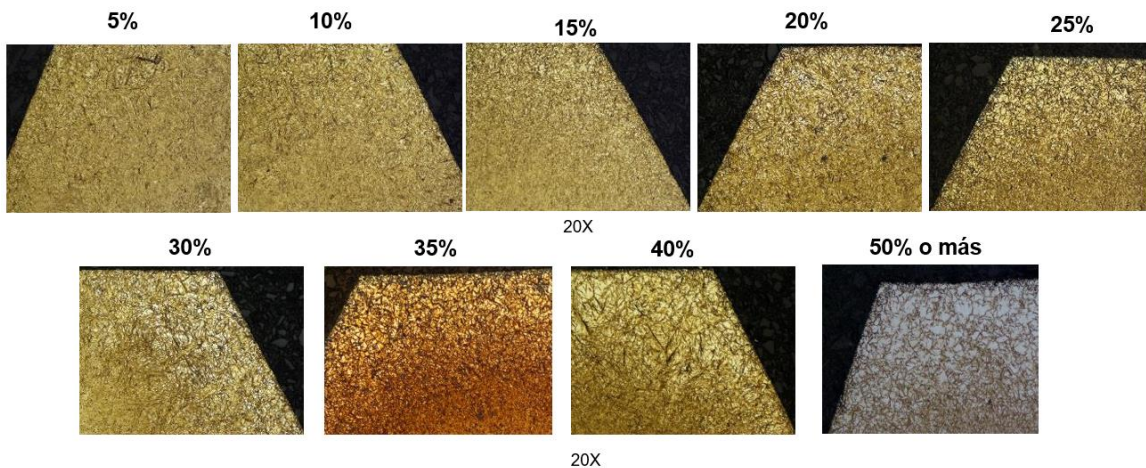


Figura 24. Referencias de especificación de austenita retenida en Acero 5120H.
(Elaboración propia)

El resultado de cada parte analizada de la muestra fue semejante a los porcentajes del 10%, 15% y 20%, cumpliendo con la especificación antes mencionada. Ver figura 25.

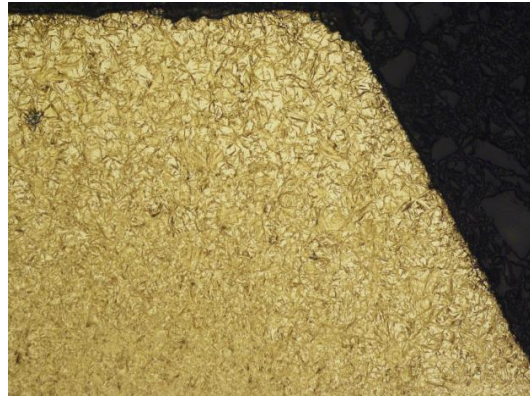


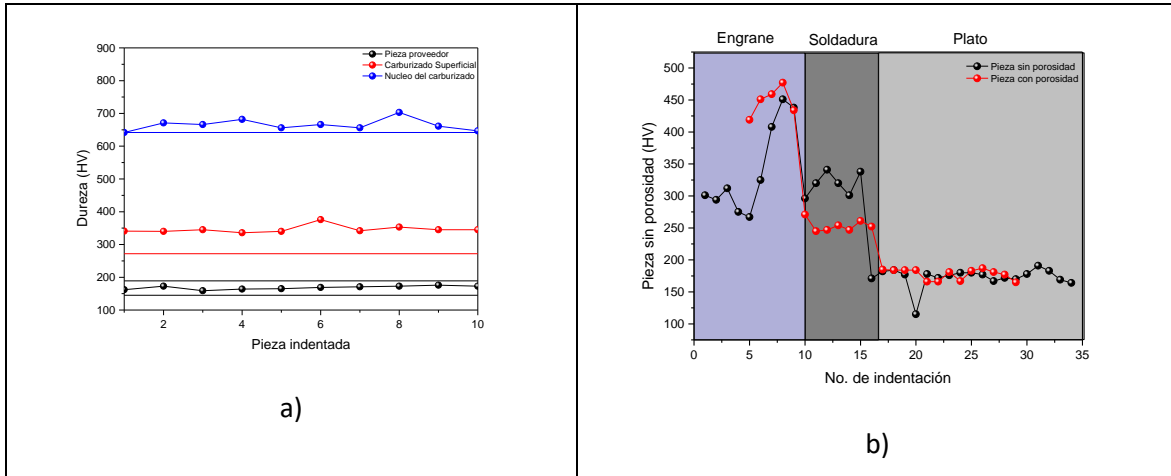
Figura 25. Resultado de análisis de austenita retenida en Acero 5120H con resolución a 20X.
(Elaboración propia)

4.1.3. Caracterización de propiedad mecánica de dureza

La evaluación de dureza se llevó a cabo en cada zona de estudio del proceso con la siguiente justificación: para la zona de partes provenientes de proveedor, es necesario verificar que se cuente con la dureza requerida antes de ser sometido a un proceso de maquinado y a tratamientos térmicos. Para la zona posterior, el tratamiento térmico es importante para evaluar si dicho proceso fue eficiente al aumentar su dureza superficial y de núcleo en el material.

Se realizaron las medidas de dureza a muestras de partes tal cual llegaron de proveedor y a partes después de los tratamientos térmicos del proceso para evaluar la dureza en el núcleo y la dureza superficial esto para verificar las tolerancias de la norma ASTM E18 [50].

En la gráfica 2 a) se muestran los resultados que son favorables y se encuentran dentro de especificación en el material de acero 5120H.



Gráfica 2. a) Resultados de dureza como materia prima y carburizado de 5120H, b) caracterización de la dureza de piezas soldadas, en negro la pieza que resultó con porosidad en la soldadura y en rojo la pieza en la que la soldadura fue exitosa.

(Elaboración propia)

En la gráfica 2 b) se muestran los resultados de 25 indentaciones realizadas a una pieza con soldadura que presentó porosidad y 25 indentaciones a una pieza que no presentó porosidad después de la soldadura. Se observa que los valores de propiedades mecánicas del engrane y el plato son los valores nominales encontrados en la caracterización de las piezas independientes que a su vez son los valores recomendados en las fichas técnicas de las piezas. En la zona de soldadura fue donde se logró observar una diferencia en valores de dureza, en la pieza con porosidad se observaron valores más bajos de esta propiedad lo cual se atribuye a la porosidad, ya que la dureza en bulto es una propiedad que es afectada por presencia de porosidad en las piezas. De esta caracterización se puede corroborar que los valores de dureza de los materiales antes y después del proceso de soldadura se mantienen en los rangos especificados, el valor de la zona con soldadura no viene especificado en las fichas técnicas, por lo que esta caracterización se puede tomar como una referencia para estudios a futuro de los valores de dureza de esta zona.

4.1.4. Caracterización de penetración de soldadura

Durante el proceso de soldadura láser al unir Acero SAE J2340 Grado 420XF y Acero 5120H de la muestra que en conjunto se vino analizando con las otras zonas de estudio previas a éste, se obtuvo que, al momento de ser sometidas a esta unión, 10 de las partes procesadas, solamente 3 fueron aceptables y 7 de las partes presentaron defectos de soldadura no aceptables, entre ellos poros internos y defectos superficiales de soldadura que se presentan específicamente en la proyección axial.

Se tiene como especificación de diseño cumplir con una penetración de soldadura en la proyección axial de 5mm y en la superficie no se permite imperfecciones individuales de 2mm.

En la figura 26, se muestra la referencia ideal de una buena unión de soldadura láser entre el Acero SAE J2340 Grado 420XF y de Acero 5120H, sin presentación de algún defecto de soldadura no aceptable que afecte la funcionalidad y la vida útil del producto. Con esta información se afirma que la formación de porosidad se origina al momento de generarse la unión entre los materiales, ya que procesos anteriores cumplen con sus especificaciones de proceso.



Figura 26. Penetración de soldadura aceptable axial y radial.
(Elaboración propia)

La figura 27 presenta la microestructura de la soldadura entre el Acero SAE J2340 Grado 420XF y de Acero 5120H, mostrando la formación de grandes y pequeños vacíos con forma de burbuja en el interior y en la superficie, lo cual es considerada una condición no aceptable.

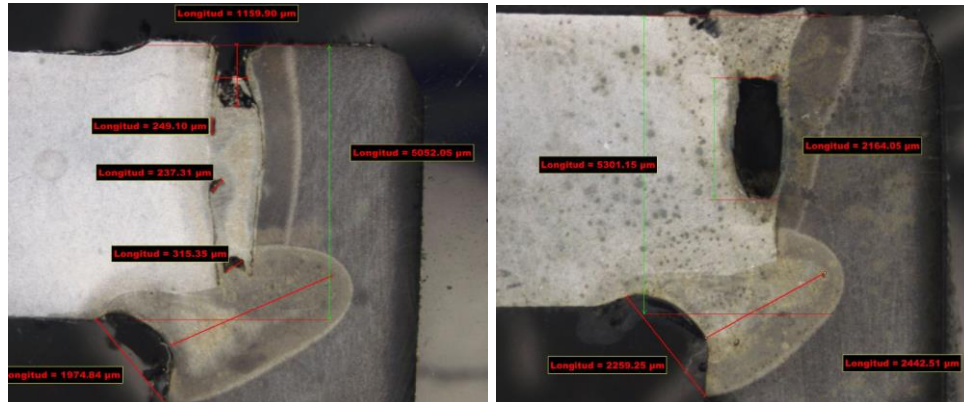


Figura 27. Penetración de soldadura no aceptable.

(Elaboración propia)

4.2. ESTANDARIZACIÓN PARA REDUCIR LAS IMPUREZAS

4.2.1. Resultados en validación de proceso

En la validación de los dos lotes de 100 partes de acero 5120H fue la siguiente:

- Para la primera prueba sin implementar ningún tipo de limpieza superficial en las partes, ni en la estación de soldadura láser, se obtuvo que un 5% del total presentó defectos de soldadura, tanto en el interior como en la superficie de poros y grietas, siendo rechazadas de acuerdo con el criterio de calidad.
- Para la segunda prueba se implementó una mejora en la estación de limpieza láser para remover las impurezas del inhibidor de corrosión en el área a soldar de ambos materiales, donde se estandarizaron los siguientes puntos críticos de acuerdo con las recomendaciones del OEM:
 - Sección de cobertura para limpieza del puntero láser en el engrane y plato.
 - Distancia entre láser de limpieza y la parte.

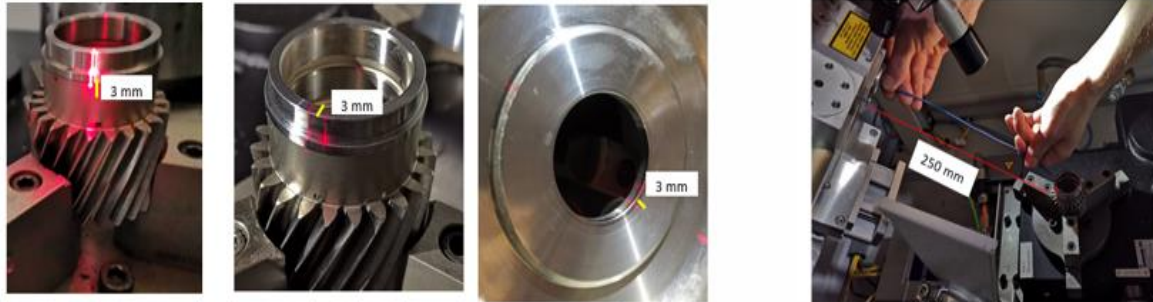


Figura 28. Estandarización de puntero láser de limpieza.
(Elaboración propia)

De igual manera para la prueba se realizó un mantenimiento preventivo de limpieza a toda la celda y herramental del proceso de soldadura láser, cambiando filtros y retirando toda la escoria en el sistema de extracción y herramientas, el resultado fue que todas las partes procesadas en láser no presentaron algún tipo de porosidad o fractura superficial.

Esto comprueba que, debido a los residuos del compuesto de Inhibidor de corrosión, se origina el fenómeno de fragilización por hidrógeno, debido a que estas partículas se impregnan en el material, afectando y generando las fracturas y porosidad al momento de la solidificación entre la unión de los materiales, éste fenómeno será analizado en trabajo futuro mediante el desarrollo de una caracterización enfocada principalmente a este.

El resultado del análisis de impurezas en toda la celda de soldadura láser, se obtuvo estandarizar los siguientes puntos críticos de proceso para el mantenimiento preventivo y lograr la reducción de la porosidad en la unión de los materiales:

Tabla 8. Puntos críticos de limpieza en celda de soldadura láser.

KCC	Actividad	Tolerancia	Herramienta / Método	Frecuencia
Alineación de tubo de succión (Vacío)	Confirmar la alineación del tubo de succión contra la parte a soldar. Asegurarse de utilizar los tornillos especiales para la sujeción de este.	4 a 5mm de espacio entre la cara del tubo y la pieza a soldar	Verificar con escala o llave de 5mm el espaciamiento del tubo.	Diaria
Limpieza de tubo de succión.	Confirmar limpieza del tubo de succión.	Tubo sin exceso de escoria en el interior.	Verificar interior del tubo libre de escoria.	Cada 200 piezas Limpieza de la entrada del tubo. 1 Vez al turno limpieza del tubo completo.
Distancia Focal en laser de Limpieza.	Confirmar distancia focal entre el láser y la parte a soldar.	Distancia entre laser y pieza: 250mm. Área de cobertura del láser: 3mm en la parte superior e inferior del engrane.	Escala para confirmar distancia y cobertura.	Semanal
Limpieza en lentes de protección del láser de limpieza.	Confirmar correcto estado de los lentes de protección en laser de limpieza	Lente debe estar en buen estado y libre de residuos.	Comprobación visual de estado actual del lente.	Semanal
Limpieza en lentes de protección del láser de soldadura.	Confirmar correcto estado de los lentes de protección en laser de soldadura.	Máximo nivel de contaminación permitida 48	Panel de monitoreo EMAG	Diaria

(Elaboración propia)

4.3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS (DOE)

Para el desarrollo del DOE para seleccionar la densidad de potencia óptima para el proceso de soldadura láser, se obtuvo que con las siguientes posiciones se obtiene el mejor resultado en la penetración de soldadura, cumpliendo con la especificación de diseño de 5mm, y además que es el punto con el que se tiene menor generación de chispa, que me genere pérdida de energía en la unión entre los materiales, y así lograr una reducción de porosidad.

Tabla 9. Parámetros óptimos en soldadura láser

Posición de máquina	Posición pieza(mm)	Diámetro de hueco (disparo 1) mm	Diámetro de hueco (disparo 2) mm	Área de disparo 1 (in ²)	Área de disparo 2 (in ²)	Densidad de Potencia w/in ²
359.801	2	0.396	0.394	0.00061	0.00061	1.63E+06

(Elaboración propia)



Figura 29. Resultado de penetración de soldadura con parámetros óptimos.

(Elaboración propia)

Para la confirmación de las posiciones óptimas, se llevó a cabo el cálculo de diámetro focal teórico con la siguiente fórmula recomendada por el OEM del equipo de soldadura láser:

Fórmula del diámetro del punto focal:

$$d_f = \frac{F_f}{F_C} \times d_{LF} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

Tabla 10. Resultados de diámetro focal teórico.

	Distancia focal del colimador, F_C (mm)	Longitud focal, F_f (mm)	Diámetro de Fibra de proceso (μm)	Diámetro de Fibra de proceso, d_{LF} (mm)	Diámetro Focal, d_f (mm)
AXIAL	150	300	150	0.15	0.3

(Elaboración propia)

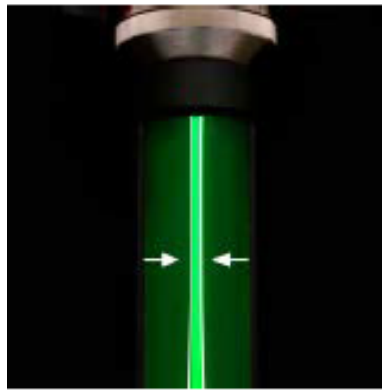


Figura 30. Diámetro focal en una proyección láser

(Elaboración propia)

El resultado fue favorable, ya que ambos diámetros tanto focal, como el obtenido en el disparo en la cinta Kapton coincidieron, además que se identificó que con otras posiciones se tenían variaciones y defectos en la penetración se soldadura.

CONCLUSIONES

- Después de implementar una limpieza superficial en el área a unir de las partes y a la estandarización de limpieza en general de la celda láser, se logró reducir un 2.5% del total de rechazo que se tenía de las partes con porosidad.
- Al encontrar la densidad de potencia óptima, se logró cumplir la especificación de penetración de soldadura y superficial, ayudando a reducir la porosidad.
- Se observó que los materiales 5120H y SAE J2340 420XF cumplieron los requerimientos de especificación de composición química, microestructura, dureza superficial y de núcleo.

RECOMENDACIONES

- Estudiar mediante una caracterización que la presencia del inhibidor de corrosión sea un catalizador de la fragilización por hidrógeno.
- Estudiar los fenómenos de reflexión y absorción entre las partes metálicas a soldar con impurezas y sin impurezas antes del proceso de soldadura láser a través de un equipo de medición especializado, para demostrar algún modelo matemático.
- Ejecutar una simulación para analizar las transformaciones de fases que se presentan en el proceso y encontrar algo anormal que se pueda estar presentando.
- Analizar los parámetros del láser de limpieza mediante el desarrollo de un DOE para su optimización.
- Desarrollar un DOE de distancia focal entre cabezal láser y parte a soldar.

APORTACIÓN DE LA TESIS

El desarrollo de esta investigación hizo la aportación de encontrar las principales variables y causas que originan la porosidad en un proceso de soldadura láser, así como los puntos clave que se deben de estudiar y controlar para ayudar a la reducción de este defecto, ya que es uno de los más comunes que se tiene en dichos procesos con esta tecnología y la cual generan pérdidas en la rentabilidad de la compañía. Gracias a cada elemento estudiando, se pudo mejorar y estandarizar el proceso, lo cual apporto en poder alcanzar los objetivos internos de productividad y calidad, que en conjunto ayudan a cumplir la misión y visión de la compañía enfocadas a ofrecer el mejor producto al cliente.

APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS

La aportación social generada en el desarrollo de este proyecto va dirigida principalmente a especialistas y técnicos que se dedican a la implementación de esta nueva tecnología de soldadura láser en la industria automotriz, ya que debido a sus ventajas y rentabilidad es una buena opción para ejecutar en los procesos de unión de materiales con un excelente acabado en cuanto a calidad del producto. Esto da como resultado la reducción del consumo de materiales y recursos utilizados en cada etapa de proceso de fabricación, lo cual contribuyen a no generar costos extras a la compañía y además ayudan a sustentabilidad de nuestro medio ambiente.

REFERENCIAS

- [1] GNC Láser. (2018). Soldadura por láser.
https://www.trumpf.com/es_ES/aplicaciones/soldadura-por-laser/.
- [2] Dahotre, N.B., Harimkar, S.P. (2008). Laser fabrication and machining of materials. doi:10.5860/CHOICE.45-5603.
- [3] Engel, S. L. (2018). Laser welding technology engineering manual. HDE Technologies, Inc.
- [4] Engel, S. L. (1987). Classification of materials. SME Paper No. MR87-238.
- [5] Engel, S. L. (2016). WP01. Laser materials processing – the keystone characteristics. HDE Technologies, Inc.
- [6] Engel, S. L. (2017). WP05. Cracks in CW laser welded metals – due to surface tension. HDE Technologies, Inc.
- [7] Engel, S. L. (2016.) Laser welding technology engineering manual. HDE Technologies, Inc.
- [8] Engel, S. L. (2016). WP04. Pulsing and pulse shaping when laser welding metals. HDE Technologies, Inc.
- [9] Engel, S. L. (2017). WP08. Weld geometry – control of quality of the weld. HDE Technologies, Inc.
- [10] Engel, S. L. (2017). WP06. Cracks in pulsed laser welded metals – metallurgical reasons. HDE Technologies, Inc.
- [11] Akinlabi, E.T., Mahamood, R.M., Akinlabi, S.A. (2016). Advanced manufacturing techniques using laser material processing.
<https://books.google.com/books?id=Nz0BDAAQBAJ&pgis=1>.
- [12] Yilbas, B.S., Shuja, S.Z. (2013). Laser surface processing and model studies.
<http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-36629-1>.
- [13] Costa, L., Vilar, R., Reti, T., Deus, A.M. (2005). Rapid tooling by laser powder deposition: Process simulation using finite element analysis. Acta Mater. 53, 3987–3999. doi:10.1016/j.actamat.2005.05.003.
- [14] Huang, F., Jiang, Z., Liu, X., Lian, J., Chen, L. (2009). Microstructure and properties of thin wall by laser cladding forming. J. Mater. Process. Technol., 209, 4970–4976. doi:10.1016/j.jmatprotec.2009.01.019.

- [15] Van Brussel, B. A., De Hosson J.T.M. (1993). Residual stresses in the surface layer of laser-treated steels. *Mater. Sci. Eng. A.*, 161, 83-89.
doi:<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.559.5341&rep=rep1&type=pdf>.
- [16] Kattire, P., Paul, S., Singh, R., Yan, W. (2015). Experimental characterization of laser cladding of CPM 9V on H13 tool steel for die repair applications. *J. Manuf. Process.*, 20, 492–499. doi:10.1016/j.jmapro.2015.06.018.
- [17] API. (2013). API 1104: Welding of pipelines and related facilities. USA.
https://global.ihc.com/doc_detail.cfm?document_name=API STD 1104&item_s_key=00010421.
- [18] ASM International. (1993). Welding, brazing and soldering. *ASM Handbook*. 6A.
- [19] Ma, J., Kong, F., Kovacevic, R. (2012). Finite-element thermal analysis of laser welding of galvanized high-strength steel in a zero-gap lap joint configuration and its experimental verification. *Mater. Des.*, 36, 348–358.
doi:10.1016/j.matdes.2011.11.027.
- [20] Stützer, J. (2017). Studies on the pore formation in super duplex stainless steel welds. *Weld. World*. 351–359
- [21] Trevisan, R.E., Schwemmem, D.D., Olson, D.L. (1990). The fundamentals of weld metal pore formation. 79–115. doi:10.1016/B978-0-444-87427-6.50009-5.
- [22] Jeffus, L. (2012). *Welding principles and applications*. 7th ed. New York, USA: Delmar Cengage Learning.
- [23] Houldcroft, P.T. (1989). *Submerger-arc welding*. England: Abington Publishing.
- [24] Johnson, H.H. (1988). Hydrogen in iron. *Metall. Trans.*, 19, 2371–2387.
doi:10.1007/BF02645465.
- [25] Troiano, A.R. (1960). The role of hydrogen and other interstitials in the mechanical behavior of metals. *Trans. ASM*. 52, 55.
doi:<https://ci.nii.ac.jp/naid/10024044710/>.
- [26] Días de Morales, F. (1994). Estudio de los efectos de fragilización por el hidrógeno en aceros UNS-G41300 E UNS- 531803 a través de ensayos de tracción con baja tasa de deformación en soluciones de tiosulfato de sodio. COPPE/UFRJ. Río de Janeiro, Brasil. 3-21.
<http://biblioteca.clacso.edu.ar/clacso/otros/20111218115541/4.conf3.pdf>.

- [27] Zamporio M.A. (1995). Revestimientos superficiales en acero para limitar a contaminación por hidrógeno. COPPE/UFRJ. Río de Janeiro, Brasil. 191.
- [28] API. (2007). API 579-1/Asme FF-1, Segunda edición. Partes 3,7 y 9.
- [29] Shin, I.O.,Byrne, J.G. (1990). Study of hydrogen embrittlement in 4340 steel I: mechanical aspects, Mater. Sci. Eng. 123, 169–180. doi:10.1016/0921-5093(90)90281-7.
- [30] Pressoure, G.M. (1979). A classification of hydrogen traps in steel. Metall. Trans., 10, 1571–1573. doi:10.1007/BF02812023.
- [31] Bastien, P., Azou, P. (1951). Effect of hydrogen on the deformation and fracture of iron and steel in simple tension. Proceedings first world metallurgical congress, ASM, Cleveland, Ohio, U.S.A, 535–552.
- [32] Pronsato, M. E., Brizuela, G., Juan, A. (2001). The electronic structure and location of H pairs in bcc Fe edge dislocation. Applied Surface Science, 173, 378-379.
- [33] Eliaz, N. Schachar, A., Tal, B, Eliezer, D. (2002). Characteristics of hydrogen embrittlement, stress corrosion cracking and tempered martensite embrittlement in high-strength steels. Eng. Fail. Anal. 9, 167–184. doi:10.1016/S1350-6307(01)00009-7.
- [34] Taha, A., Sofronis, P. (2001). A micromechanics approach to the study of hydrogen transport and embrittlement. Eng. Fract. Mech. 68, 803–837. doi:10.1016/S0013-7944(00)00126-0.
- [35] Lukito, H.E., Szklarska-Smialowska Z. (1997). Susceptibility of medium-strength steels to hydrogen-induced cracking. Corros. Sci. 39, 2151–2169. doi:10.1016/S0010-938X(97)00099-1.
- [36] Pound, B.G. (1991). Hydrogen trapping in work-hardened alloys. Acta Metall. Mater. 39, 2099–2105. doi:10.1016/0956-7151(91)90180-9.
- [37] Turnbull, A., Hutchings, R.B.E., Ferriss, D.H. (1997). Modelling of thermal desorption of hydrogen from metals. Mater. Sci. Eng. 238, 317–328. doi:10.1016/S0921-5093(97)00426-7.
- [38] Zapffe, C.A., Sims, C. E. (1941). Hydrogen embrittlement, internal stress and defects in steel. Am. Inst. Mining, Metall. Pet. Eng. 145, 225-261.
- [39] Petch, N. J. E., Stables, P. (1952). Delayed fracture of metals under static

- load. *Nature*. 169, 842–843. doi:10.1038/169842a0.
- [40] I. Materials Evaluation and Engineering. (2019). Micro indentation hardness testing. <https://www.mee-inc.com/hamm/microindentation-hardness-testing/>.
- [41] Vander G.F. (1986). *Applied metallography*. Springer US, Boston, MA. doi:10.1007/978-1-4684-9084-8.
- [42] Vázquez, M. Espectrometría de emisión por chispa. Universidad Politécnica de Cartagena, n.d. <http://www.upct.es/sait/es/tecnicas-espectrometricas-y-afines/espectrometro-de-emision-por-chispa/>.
- [43] Guerrero Giacometti, A. (2010). *Manual básico sobre la estereoscopia*. Universidad de las Américas.
- [44] Göggel, D., Berchtel, M. (2008). *La microscopia estereoscópica entra en una nueva dimensión*. Leica Microsystems.
- [45] Réquillard, M. (2020). *Como realizar un diagrama de Ishikawa. Metodología paso a paso, consultas y trucos, ejemplos prácticos*.
- [46] Godínez, L.A., Meas, Y., Ortega-Borges, R., Corona, A. (2003). Los inhibidores de corrosión. *Rev. Metal.* 39, 140–158. doi:10.3989/revmetalm.2003.v39.i2.325.
- [47] Vinasco, L. (2018) Centro de ingeniería de la calidad. <https://cicalidad.com/member/luz-elena-vinasco/>
- [48] ASTM A29/A29M-16. (2009). Standard specification for general requirements for steel bars, carbon and alloy, hot-wrought. ASTM Int. doi:10.1520/A0029.
- [49] ASTM A370-20. (2014). Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. ASTM Int.
- [50] ASTM E18-14. (2014). Standard test methods for rockwell hardness of metallic materials. ASTM Int. doi:10.1520/E0018-14.2.