IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA LASER POR FIBRA (FIBER LASER WELDING) EN LOS PROCESOS DE FABRICACION DE LOS EQUIPOS DISEÑADOS POR LA EMPRESA GRUPO LASSEN

Estiven Pérez Arbeláez

Informe de Semestre de Industria presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico

Asesor Interno Edwar Andrés Torres López

Asesor Externo Juan Esteban Posada- Director de proyectos

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita	(Pérez Arbeláez, 2024)
Referencia Estilo IEEE (2020)	Pérez Arbeláez, E "**Implementación del proceso de soldadura laser por fibra (fiber laser welding) en los procesos de fabricación de los equipos diseñados por la empresa grupo Lassen**", Trabajo de grado profesional, Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2024.

Ingenieria Mecánica, Semestre de industria

Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mi familia, especialmente a mi padre, quien con su habilidad y arte como cerrajero y herrero ha guiado y motivado mi camino en la soldadura y la ingeniería. A mi madre, que con su constancia y responsabilidad me ha enseñado el valor del compromiso y el amor por lo que se hace. También, a mi hermano, por ser una fuente de fortaleza, amor y dedicación incondicional, enseñándome a creer en mí mismo y a la convicción de que nacimos para hacerlo distinto.

Agradecimientos

Este proyecto no habría sido posible sin la intención de innovar y avanzar hacia nuevas tecnologías por parte de la empresa Grupo Lassen, a quienes expreso mi sincero agradecimiento por brindarme la oportunidad de realizar mis prácticas y por poner a disposición los recursos necesarios para llevar a cabo el proyecto. Agradezco especialmente a Juan Esteban Posada, Director de proyectos de Grupo Lassen, por su dinamismo y excelente disposición para contribuir al desarrollo del proyecto en todo momento. También quiero reconocer el trabajo de Rafael, soldador encargado del manejo del equipo, por su paciencia, dedicación y disposición para aprender y realizar de manera honesta todas las pruebas establecidas. A mis compañeros de equipo, gracias por su colaboración y disponibilidad. Asimismo, quiero agradecer a mi asesor académico, Edwar Andrés Torres López, por la confianza que me brindó para afrontar este proyecto, por su conocimiento compartido y por el constante cuestionamiento que me permitió mejorar y realizar todo de la mejor manera posible. Finalmente, agradezco a mi familia por su comprensión y motivación, que fueron fundamentales para superar los retos durante esta experiencia. A todos ellos, muchas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN 11

ABSTRACT 12

I. INTRODUCCIÓN 13

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 14

III. JUSTIFICACIÓN 15

IV. OBJETIVOS 17

A. Objetivo general 17

B. Objetivos específicos 17

V. MARCO TEÓRICO 18

A. Tanques y su fabricación por soldadura 18

B. Fundamentos de soldadura láser 21

C. Componente de un sistema láser 24

D. Cabezal láser 27

E. Tipos de procesos láser 28

F. Sistemas manuales de soldadura láser por fibra 32

G. Características del proceso de soldadura láser 34

H. Implementación de soldadura láser en la construcción de tanques 36

VI. METODOLOGÍA 39

A. Revisión bibliográfica y documentos de la compañía 39

B. Tipificación de las juntas a fabricar 39

C. Instalación de la fuente de soldadura láser 40

D. Desarrollo de ensayos preliminares de soldadura 41

E. Desarrollo de soldaduras finales y construcción de procedimientos 44

VII. RESULTADOS 47

A. Revisión bibliográfica y documentos de la compañía 47
B. Tipificación de las juntas a fabricar 48
C. Instalación de la fuente de soldadura láser 49
D. Desarrollo de ensayos preliminares de soldadura 50
E. Desarrollo de soldaduras finales y construcción de procedimientos 57
VIII. CONCLUSIONES 63
ANEXO 1 65
ANEXO FOTOGRAFICO 1 66
ANEXO 2 67
ANEXO FOTOGRAFICO 2 68
REFERENCIAS 69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos y características laser [12]. 26
Tabla 2. Tipos de fuente láser y factor de calidad del haz. 30
Tabla 3. Variables del equipo soldadura laser por fibra RayEdge - 2000W. 42
Tabla 4. Requerimientos de pruebas para procedimiento de calificación. 45
Tabla 5. Resultados de prueba de consumo de gases. 55
Tabla 6. Variables establecidas en los ensayos preliminares. 57
Tabla 7. Distribución de cupones para tracción. 57
Tabla 8. Resultados pruebas. 61
Tabla 9. Tiempos medidos en la fabricación de equipos. 62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tanques de almacenamiento fabricados por Grupo Lassen. 18
Figura 2. Etapas del proceso de fabricación para un recipiente [3]. 19
Figura 3. Ejemplo de distorsiones generadas por el proceso de soldadura [6]. 21
Figura 4. a) Corte laser, b) soldadura por láser y c) revestimiento laser. 22
Figura 5. a) Esquema del proceso de soldadura láser [8] y b) sistema de soldadura láser TruLaser Weld 5000. 22
Figura 6. Interacción fotones con redes cristalinas [13]. 23
Figura 7. Componentes de un sistema industrial para soldadura láser. 25
Figura 8. Sistema laser esquemático [11]. 26
Figura 9. Estructura cabezal. Adaptado de Amada [13]. 27
Figura 10. Fuente Laser por CO_2. 29
Figura 11. Fuente Laser de estado solida por cristal de Ruby. 29
Figura 12. Fuente laser por fibra [17]. 30
Figura 13. Tamaño de los cabezales para láser: a) para fuente Nd:YAG y b) para laser de fibra de proceso manual. 31
Figura 14. a) Sistema de posicionamiento cartesiano para cortadora láser y b) brazo robótico Kuka KR 60 HA™ 33
Figura 15. a) Sistema para soldadura manual láser por fibra y b) aplicación de la soldadura láser en acero al carbono. 33
Figura 16. a) Láser en modo continuo y b) pulsado. 34
Figura 17. Modos de soldadura láser: a) *keyhole* y b) conducción. 35
Figura 18. a) Conexión del cabezal y b) chequeo valores de la fuente. 40
Figura 19. Conexión legrand equipo RayEdge 2000W. 41
Figura 20. Registro de las variables de soldadura. 42
Figura 21. a) Modulo de extensión y b) calibración del punto focal del sistema. 43
Figura 22. a) Cupón preliminar y b) retales de prueba. 44
Figura 23. Distribución de las muestras para ensayos mecánicos en el cupón de soldadura. 45
Figura 24. Matiz de dobles diseñada para Grupo Lassen. 45

Figura 25. a) Junta a tope en lámina 3,0 mm para la fabricación del cilindro y b) junta a tope con preparación de lámina para la unión de las tapas laterales. 48
Figura 26. Equipo de soldadura láser manual RayEdge 2000 W instalado. 50
Figura 27. Patrones de oscilación en el modo de depósito de línea [13]. 51
Figura 28. Efecto de las variaciones de la amplitud de oscilación en la penetración. 52
Figura 29. Sistema para la alimentación del metal de aporte. 52
Figura 30. a) Efecto de velocidades baja de alimentación en la junta y b) esquemas de los cordones [14]. 53
Figura 31. Pruebas de ángulo efectivo entre el cabezal de soldadura y el material base. 54
Figura 32. Cupones fabricados con Ar y N_2: a) penetración y b) presentación con N_2 y c) presentación con Ar. 55
Figura 33. Soldadura de cañuela empleando Ar y N_2 como gases de protección. 56
Figura 34. Resultados prueba de traccion cupones 3,0 mm. 58
Figura 35. Resultados prueba de traccion cupones 1,9 mm. 58
Figura 36. Resultados prueba de tracción de las juntas de 3,0 mm. 59
Figura 37. Resultados prueba de tracción de las muestras de 1,9 mm. 60
Figura 38. Prueba de dobles dispositivo diseñado 60
Figura 39. Resultados de los ensayos de doblez de cara y de raíz. 61
Figura 40. Muestras prueba radiográfica: a) placa para 1,9 mm y b) placa para 3,0 mm. 61

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

- END: Ensayos no destructivos
- GTAW: Gas tungsten arc welding
- TIG: Tungsten inert gas
- SMAW: Shielded metal arc welding
- FCAW: Flux-cored arc welding
- FLW: Fiber laser welding
- LFW: Soldadura laser welding
- LBW: Laser beam welding
- FSW: Friction stir welding
- ZAT: Zona afectada termicamente
- CJP: Complete joint penetration
- PJP: Partial joint penetration
- CNC: Control numérico por computadora
- CAD: Computer aided desing
- μm: Micrón
- kW: Kilo Watts
- NA: Apertura numérica
- Nd: neodimio
- M^2: Factor de calidad del Haz
- YAG: Iterbio, Aluminio y Granate
- λ: Longitud de onda
- *f*: Frecuencia del pulso
- *v*: Velocidad de desplazamiento
- P: Potencia del laser
- PMW: Modulación ancho del pulso
- PW: Pulse wave
- CW: Continuos wave
- CO_2: Dióxido de Carbono
- N_2: Nitrógeno
- He: Helio
- Ar: Argón
- Yb^{3+}: Iterbio
- SiO_2: Oxido de silicio
- df: Diámetro del Haz
- ASME: American society of mechanical Engineers
- BPVC: Bolir and pressure Vessel Code
- WPS: Welding Procedure Specification
- PQR: Procedure Qualification Record
- WPQR: Welding Procedure Qualification Record

RESUMEN

Grupo Lassen es una empresa del sector metalmecánico, la cual se dedica a la fabricación de sistemas para el almacenamiento y procesamiento para diferentes industrias. Dado el nivel de complejidad de los equipos, se requiere de métodos de fabricación más efectivas, rápidas y confiables. Por esto Grupo Lassen propone la aplicación de un nuevo proceso de soldadura, llamada *fiber láser welding* (soldadura laser por fibra). Se busca que con la implementación de este proceso de soldadura semiautomática se permita una reducción importante en los tiempos y costos de producción, la cual mejore la confiabilidad y corrija las falencias en cuanto a reprocesos en soldadura. Para ello se busca implementar una serie de pruebas de soldabilidad, tendientes a determinar parámetros de soldadura adecuados para el proceso láser por fibra en juntas de acero inoxidable. La evaluación de las juntas fabricadas se realizará por medio de ensayos no destructivos (END), ensayos mecánicos y tiempos efectivos de soldadura.

Palabras clave: Láser por fibra manual, parametrización, fabricación de recipientes, acero inoxidable, procedimientos de soladura.

ABSTRACT

Grupo Lassen is a company in the metal-mechanical sector, dedicated to the manufacture of storage and processing systems for various industries. Due to the complexity of the equipment, more effective, faster and more reliable manufacturing methods are required. For this reason, Lassen Group proposes the application of a new welding process called fiber laser welding. The implementation of this semi-automated welding process is expected to significantly reduce production time and costs, improve reliability and eliminate the shortcomings related to welding rework. For this purpose, a series of weldability tests will be carried out to determine adequate welding parameters for the fiber laser process in stainless steel joints. The evaluation of the produced joints will be carried out by means of non-destructive tests (NDT), mechanical tests and effective welding times.

Keywords: Hand fiber laser, parameterization, vessel fabrication, stainless steel, welding procedures.

I. INTRODUCCIÓN

La empresa Grupo Lassen es reconocida en el sector metalmecánico e industrial por la fabricación de equipos para el almacenamiento y el procesamiento en diferentes campos de la industria como lo son la farmacéutica, química, alimenticia y en sectores más específicos como la cosmética, pintura y agroquímica. Es por esta razón que los equipos que se fabrican para los sectores mencionados deben cumplir con estándares y normativas exigentes. Para esto se deben aplicar métodos de fabricación y unión adecuados a estas exigencias y requerimientos.

Actualmente Grupo Lassen implementa para la fabricación de sus equipos el proceso de soldadura por arco de tungsteno con gas de protección (GTAW, Gas Tungsten Arc Welding). Este proceso, conocido coloquialmente como TIG (Tungsten Inert Gas), es implementado en la industria en la unión de elementos soldados fabricados en aceros inoxidables y aleaciones no ferrosas, el cual se caracteriza por su excelente presentación y producción de juntas de alta calidad. El proceso también posee limitaciones como su baja productividad, además de ser inherentemente manual, por lo cual la calidad de la soldadura y acabados depende en gran medida del soldador.

Al ser comparado con otros procesos de soldadura convencionales como SMAW, GMAW y FCAW, el proceso GTAW posee ventajas como su mayor densidad de energía, lo cual permite la obtención de juntas soldadas con menor aporte térmico, distorsiones, menor zona afectada térmicamente (ZAT), así como menor riesgo de agrietamiento en caliente y corrosión intergranular, estos dos últimos presentes en aceros inoxidables. La baja tasa de deposición afecta significativamente la productividad y el costo, lo cual se ha vuelto más evidente con el creciendo en los pedidos. Además, las distorsiones y perdida de propiedades en la ZAT se han vuelta notorias, debido a las mayores exigencias por parte de los consumidores, dando lugar a reprocesos y reparaciones cada vez más frecuentes. Para mitigar estos y otros aspectos como los tiempos de producción, las deformaciones en las piezas soldadas y la estandarización del proceso de soldadura, Grupo Lassen, pretende implementar el proceso de soldadura *fiber laser welding* (FLW). Debido a su alta densidad de energía, en comparación de GTAW, el FLW permitiría aumentar la velocidad de soldadura y reducir elementos deletéreos como las distorsiones y el tamaño de la ZAT. Sin embargo, su implementación requiere además de la instalación y puesta a punto de los equipos, la parametrización del proceso de forma que permita producir juntas soldadas con las características adecuadas, además de una alta repetitividad.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A lo largo de su trayectoria, Grupo Lassen se ha destacado por la calidad, durabilidad y buena presentación de los equipos manufacturados, gracias a la implementación del proceso de soldadura GTAW. Este proceso permite la fabricación de juntas soldadas con aspecto y sanidad adecuadas, lo que ha permito cumplir con las normativas y las políticas internas de manufactura. Sin embargo, dicho proceso de soldadura trae consigo diferentes exigencias como la necesidad de un personal altamente calificado en la aplicación de soldadura y procesamientos posteriores de acabado y limpieza de superficies. Esto son requerimientos establecidos por las industrias para las que la compañía produce los equipos, haciendo que el proceso de fabricación se vuelve ineficiente en costos y en tiempos.

Adicionalmente, el aumento en los pedidos de fabricación de maquinaria requiere como respuesta el aumento en la producción, lo cual es una sería limitante en el proceso, debido a la baja tasa de depósito de GMAW, lo cual acarrearía la necesidad de contratación de mayor cantidad de soldadores calificados para dicho fin. Sumando a esto las distorsiones de las juntas soldadas y el deterioro de las propiedades en la zona afectada térmicamente (ZAT), inherentes a los procesos de soldadura por fusión, conllevan a la necesidad de reprocesos o reparaciones de los productos. En este orden de ideas, la compañía Grupo Lassen apuesta por la optimizar de sus procesos de soldadura, por medio de la implementación de la soldadura laser, puntualmente, la soldadura laser por fibra, con la cual se pretende la reducción de tiempos de fabricación, así como mitigar los costos por la ejecución de procesos posteriores.

En esta apuesta, el Grupo Lassen ha realizado la compra de dos equipos de soldadura láser por fibras, para lo cual se requiere de la instalación y puesta a punto de los sistemas, además de la parametrización y realización de pruebas en distintas juntas soldadas en acero inoxidable, que permitan verificar la correcta fabricación de las juntas soldadas. Todo ello considerando la estandarización del proceso de soldadura al interior de la compañía y la evaluación de la resistencia mecánica y los tiempos de fabricación que corroboren la aplicabilidad de soldadura láser por fibra en los equipos producidos por la empresa Grupo Lassen. En ese merco, la actual propuesta de práctica académica, en la modalidad de semestre de industria, busca realizar la instalación y puesta punto del sistema, así como determinar parámetros adecuados de soldadura para distintas configuraciones de juntas empleadas por la compañía para la fabricación de sus productos.

III. JUSTIFICACIÓN

A pesar de que en Colombia y la región las tecnologías de unión implementadas en la industria metalmecánicas son las tradicionales basadas en la fusión por arco eléctrico: SMAW, GMAW y GTAW, estas son igualmente vigentes a nivel mundial, por lo que no se puede indicar que existe precariedad tecnológica en este sector de la industria. El país cuenta con excelente representación de las principales casas matrices productoras de fuentes de soldadura. No sucede los mismo con los insumos, pero la oferta es aceptable para los desafíos existentes en la industria nacional. En donde se presentan mayores desafíos es en la formación y certificación de personal calificado tanto en la aplicación como el desarrollo y evaluación de procedimientos de soldadura. A pesar de ello, es necesaria la actualización tecnológica de forma que sea posible mejorar la productividad en la industria metalmecánica, ya que actualmente existen herramientas que de forma versátil permitirían dar un salto en términos de calidad y reducción de tiempos de producción.

Una de ellas es la soldadura láser por fibra (FLW), de la cual los modelos más conocidos son los equipos de gran porte, para la industria pesada, con costos altos de inversión y capacitación del personal. Empero, una nueva versión de equipos de soldadura láser por fibra de menor potencia, costo y mayor maniobrabilidad está avanzando de forma consistente en el sector, principalmente en aquellos que envuelvan la soldadura de láminas metálicas de acero inoxidable y aleaciones no ferrosas, nicho en el cual el proceso GMAW es empleado con amplitud.

Dicha técnica de soldadura utiliza un haz de luz altamente concentrado (láser) para lograr fundir y soldar diferentes materiales, donde precisamente su concentración de energía permite obtener ventajas sobre los procesos convencionales GTAW, GMAW o SMAW. Algunas de las ventajas son: mayores velocidades de soldadura; mejor calidad y presentación de los cordones de depósitos, menor tamaño de la ZAT y de las distorsiones de la unión soldada, siendo este último aspecto el más llamativo.

Por mucho que el costo de los equipos manuales de FLW es inferior a su contraparte de mayor potencia, son comprensibles las reservas de los empresarios para implementar estos sistemas en su cadena de producción. No se trata solo de los costos de los equipos, igualmente se requiere de personal calificada para su instalación y puesta en funcionamiento, así como la determinación

de los parámetros adecuados para la obtención de juntas soldadas funcionales, la estandarización del proceso y la capacitación del personal.

Estas necesidades impulsaron a la compañía Grupo Lassen, acompañados por el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Antioquia, a dar un paso en favor de implementar la soldadura láser por fibra en los procesos de fabricación de sus tanques de almacenamiento y máquinas de procesamiento.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Determinar y estandarizar las variables de la soldadura láser por fibra (FLW, *fiber laser welding*) para la aplicación en distintas juntas soldadas, para la fabricación de los equipos de la empresa Grupo Lassen.

B. Objetivos específicos

- Instalar y adaptar los equipos de soldadura láser por fibra (LFW), y evaluar su funcionalidad, a partir de la variación de sus diferentes parámetros.
- Tipificar las juntas de la empresa Grupo Lassen y determinar los parámetros preliminares de LFW para su fabricación en láminas de acero inoxidable.
- Realizar la evaluación de las juntas soldadas mediante END, para la definición de parámetros adecuados de soldadura.
- Obtener juntas soldadas finales y evaluar su comportamiento mecánico.
- Evaluar la efectividad de los parámetros encontrados y los cambios desarrollados en los procesos aplicados en la empresa Grupo Lassen en términos de productividad. Lo cuales serán evaluados a través de la medición de los tiempos de fabricación de las juntas soldadas con diferentes procesos como los GTAW y LFW.

V. MARCO TEÓRICO

A. Tanques y su fabricación por soldadura

En la industria es frecuente recurrir a diferentes tipos de equipos para el almacenamiento y el procesamiento de materias primas, esenciales para una amplia gama de aplicaciones, desde la producción de alimentos y bebidas hasta la fabricación de productos químicos y farmacéuticos. Uno de estos sistemas corresponde a los recipientes o tanques, los cuales son diseñados para contener líquidos, gases u otras sustancias. Estos elementos pueden varias en su forma, tamaño y en los materiales empleados para su fabricación, de acuerdo con las características del producto a ser procesado o almacenado. Así, los recipientes pueden ir desde una simple botella hasta tanques industriales o recipientes a presión [1].

Son precisamente estos dos últimos tipos de equipos en los que se centra este proyecto, específicamente en lo relativo a su fabricación, para la cual es necesario seguir una serie de requerimientos y normativas para su aplicación en las industrias mencionadas. Algunos ejemplos de los recipientes fabricados por la compañía se presentan en la Figura 1.



Figura 1. Tanques de almacenamiento fabricados por Grupo Lassen.

Cabe mencionar que la construcción de recipientes es un proceso complejo de forma simplificada se puede resumir a dos etapas: (i) diseño del tanque, el cual consiste en la elaboración de los recipientes según los requerimientos específicos y en concordancia con las normas y los

códigos aplicables [2]; (ii) fabricación del recipiente, la cual puede implicar procesos de corte, conformado y soldadura, las cuales se pueden observar en la Figura 2.



Figura 2. Etapas del proceso de fabricación para un recipiente [3].

Sin embargo, el objetivo de este proyecto pretende direccionarse puntualmente en los temas relacionados a la fabricación, específicamente orientados a la soldadura. La soldadura, se puede definir como un proceso en el que se unen a nivel atómico dos o más materiales, dando continuidad a las propiedades físicas, químicas y metalúrgicas de aquellos [4]. Ahora bien, el proceso soldadura de dichos recipientes se ha implementado usando diferentes procesos para la unión de los componentes; Procesos como la soldadura por arco eléctrico, en los cuales se destacan técnicas puntuales como lo son; SMAW, GMAW y la GTAW.

El primer proceso SMAW (Shielded Metal Arc Welding) es un proceso de soldadura manual altamente conocida e implementado en el mundo que se caracteriza por el uso de un electrodo revestido y consumible para la unión de los componentes. Dicho electrodo es la parte preponderante de este proceso ya que es el que determina características como la penetración, el acabado superficial de la pieza y el material que se pretende soldar. Es precisamente el electrodo una de sus ventajas pues existe una enorme variedad de ellos los cuales permiten unir una amplia variedad de aleaciones. Por el contrario, este tipo de soldadura presenta limitaciones como la soldadura de espesores muy delgados, las afectaciones microestructurales generadas durante la soldadura de materiales como acero inoxidable y aleaciones no ferrosas, y una productividad baja, pues al tratarse de un electrodo que se consume constantemente la productividad se ve ralentizada [5].

Ya GMAW (Gas Metal Arc Welding) es un proceso de soldadura semiautomática donde, al igual que SMAW, se establece un arco entre un electrodo consumible y la pieza, con la diferencia que el electrodo es un alambre continuo lo cual mejora la productividad de forma significativa [5]. Además, el proceso posibilita la soldadura de espesores pequeños, debido a su menor capacidad de penetración en comparación con SMAW, siendo esto un limitante del proceso al momento de aplicar cierto tipo de soldaduras profundas, como en el pase de raíz.

La última de estas técnicas de soldadura es GTAW, la cual utiliza un electrodo no consumible de tungsteno puro o con algunos elementos de aleación como torio, lantano o serio. Este es un proceso de soldadura manual el cual puede ser realizado con metal de aporte o de forma autógena, siendo esta última una técnica que no requiere el uso de material de relleno. GTAW es un proceso el cual exige altas habilidades por parte del soldador para el control del aporte y la fuente de calor. Dentro de los beneficios que aporta esta técnica están su empleo en una amplia variedad de aleaciones en modo autógeno, la generación de mejores acabados y su alta densidad de energía, lo cual reduce significativamente el aporte de calor y sus efectos deletéreos como las distorsiones, riegos de agrietamiento y tamaño de la ZAT. No obstante, en términos de productividad, al aumentar los espesores de los materiales que se pretenden unir, dicha productividad es menor [5].

Estos son los procesos más usados en las industrias, sin querer señalar que son los únicos. Para este proyecto es relevante mencionarlos, en especial el proceso GTAW, ya que tiene una alta aplicabilidad en la fabricación de recipientes de presión, en las áreas industriales mencionadas anteriormente, en particular en aplicaciones que requieren como metal de fabricación el acero inoxidable. Cabe señalar que la importancia del acero inoxidable, al ser una aleación de hierro, con elementos como cromo y níquel, sus principales características son la resistencia a la corrosión y la oxidación, así como la inocuidad con las materias primas y productos, importantes para la industria de alimentos y farmacéutica.

El proceso de soldadura GTAW, conocido de forma coloquial como TIG, ha sido ampliamente usado en la construcción de estos equipos fabricados en acero inoxidable, dando resultados confiables y óptimos en temas de soldadura. Sin embargo, es un proceso que requiere mayor habilidad del soldador, debido a la longitud de arco tan corta que se requiere, generando un costo extra al proceso en el valor de la mano de obra. Ahora, si bien es un proceso que reduce el aporte térmico, en comparación con los otros procesos mencionados, es importante recalcar que,

igualmente, este genera el calor suficiente para producir distorsiones en las juntas soldadas, requiriendo de procesos extra en la terminación de estos equipos que solventen las distorsiones generadas, como se muestra en la Figura 3. Son estas razones las que llevan a considerar implementar otro proceso de soldadura, el cual propicie mitigar las deficiencias observadas de GTAW y mejorar el proceso de unión de componentes en pro de la producción, garantizando la misma calidad.

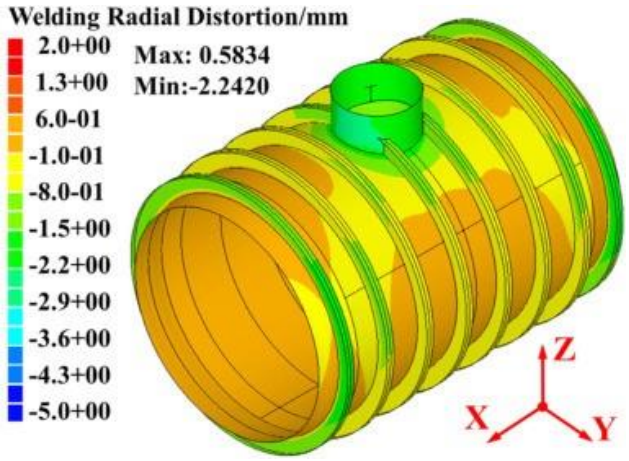


Figura 3. Ejemplo de distorsiones generadas por el proceso de soldadura [6].

Ahora, si bien si se reduce el aporte térmico, garantizando la fusión y soldadura adecuada de la junta, igualmente se pueden producir distorsiones, pero de menor magnitud, lo cual implica menos dificultades en los ensambles o reprocesos para la construcción de elementos de tamaño considerable. Por estas razones es posible considerar que la implementación de otro proceso de soldadura, de mayor densidad de energía, puede mitigar las deficiencias observadas de GTAW y mejorar el proceso de unión de componentes en pro de la producción, garantizando la misma calidad.

B. Fundamentos de soldadura láser

En este orden de ideas, se viene implementado en el mundo una serie de mejoras, gracias al empleo de nuevas tecnologías, que permitan un proceso de fabricación más ágil y eficiente, con un moderado costo de inversión y sin mayores necesidades de formación exhaustiva del personal.

Proceso de fabricación basados en el empleo de fuentes de calor por láser, son considerados procesos avanzados. A pesar de ello, algunos se encuentran bien consolidadas en la industria, mientras otras avanzan lentamente esperando nuevos desarrollos que permitan permear más fácilmente el sector productivo. Algunos de estos procesos son el corte, el revestimiento y la soldadura por láser (Figura 4).

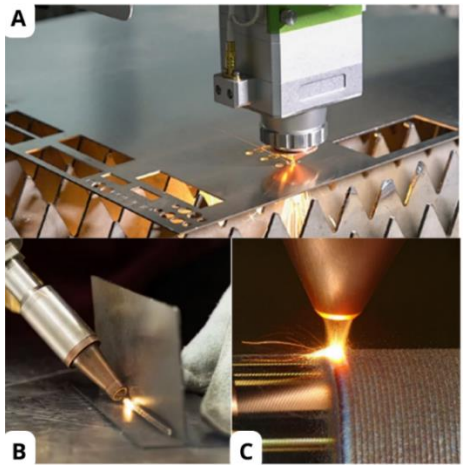
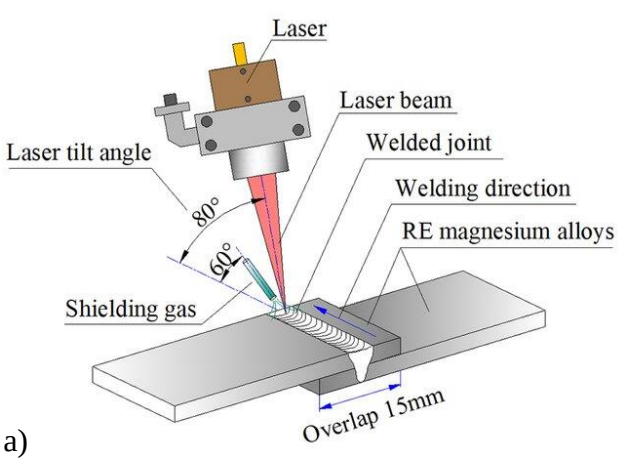
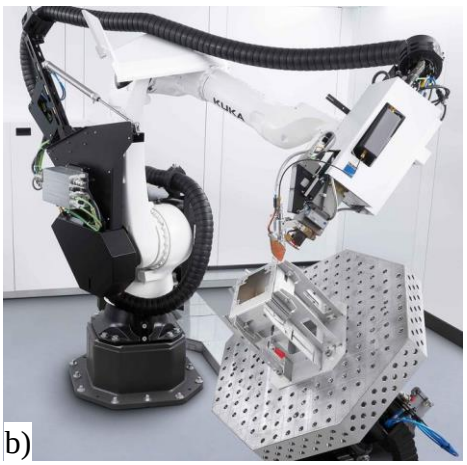


Figura 4. a) Corte laser, b) soldadura por láser y c) revestimiento laser.

En principio, la soldadura por rayo láser (LBW, Laser Beam Welding) es definida como un proceso de soldadura por fusión en el que se unen dos o más piezas mediante el uso de un haz láser, el cual proporciona una fuente de calor concentrada, lo que facilita la fusión y consolidación localizada de los elementos [7]. Un ejemplo de soldadura láser, con el cabezal, las características del láser, la junta y el sistema de posicionamiento, se presenta en la Figura 4a.



a)



b)

Figura 5. a) Esquema del proceso de soldadura láser [8] y b) sistema de soldadura láser TruLaser Weld 5000.

Para conseguir calentamiento y posterior fusión del metal, la conversión de fotones en calor es debido a la absorción parcial de los fotones emitidos, por parte del material a soldar. Dependiendo de las propiedades ópticas del metal y la longitud de onda del láser, la energía cinética de los fotones se transforma en calor debido a la interacción de los fotones absorbidos con los átomos del metal [12,13]. La energía cinética de los fotones es transformada en movimiento de los átomos y, por ende, en agitación de la red cristalina. Este movimiento atómico es calor, el cual aumenta paulatinamente hasta alcanzar la temperatura de fusión del metal, lo que no es otra cosa que el rompimiento de la red (Figura 6).

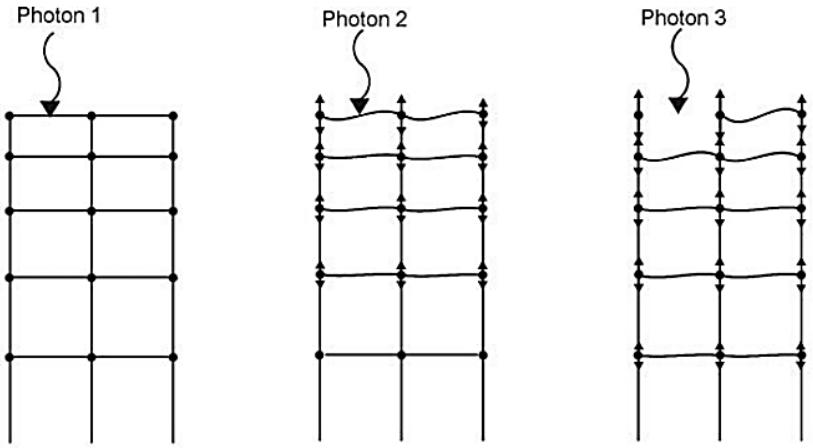


Figura 6. Interacción fotones con redes cristalinas [13].

La soldadura láser es un proceso versátil que permite soldar una gran variedad de metales y sus aleaciones, incluyendo aluminio, titanio, cobre, aceros al carbono, y acero inoxidable, siendo el último el que despierta interés en este proyecto [13].

Este proceso permite la obtención de cordones estrechos y profundos, a altas velocidades y con elevada precisión en la aplicación. Además, por tratarse de un proceso de alta densidad de energía, reduce el aporte térmico en las juntas, lo que redunda la generación de una zona térmicamente afectada (ZAT) menor, implicando una menor alteración microestructural del metal. Además, el menor aporte térmico reduce significativamente el tamaño del charco de soldadura, lo que deriva en la generación de menores esfuerzos residuales y distorsiones [12]. Por otro lado, el uso de alambre de soldadura continuo como lo es en el caso de soldadura GMAW, así como fuentes laser que constantemente están siendo refrigeradas evitando un sobre calentamiento en el sistema,

permitiendo el uso continuo del mismo a altas potencia de entrega, son factores que magnifican la producción en serie y en jornadas extensas sin incurrir en daños o paras en los equipos.

Estas características redundan en un aumento significativo en la productividad, derivada directamente de los menores tiempo de preparación de la junta, pues no admite biselado ni abertura de raíz. Disminuye la cantidad de pases de soldadura, ya que permite la realización de juntas de penetración completa (*complete joint penetration*, CJP) de hasta 3/8 in. También, se reduce el tiempo de fabricación, por la mayor velocidad de soldadura: velocidad de desplazamiento de la fuente de calor, a lo largo de la junta.

Sin embargo, el proceso también presenta desventajas como mayor costo de inversión, recapacitación de los soldadores y técnicos, así como el coste de insumos consumibles tales como lentes, boquillas los cuales son elementos escasos de conseguir; así mismo el diseño de nuevos procedimientos de soldadura como también los protocolos de seguridad necesario para el uso de los equipos láser y la de áreas circundantes, dado el hecho de que al tratarse de un láser que no necesita estar en contacto con la pieza para su generación, el láser puede rebotar ocasionando daños en diferentes elementos cercanos así como en personas [9].

C. Componente de un sistema láser

A grandes rasgos un sistema industrial láser está compuesto por tres elementos: un sistema para la generación del láser, un cabezal, el sistema de desplazamiento del láser y el sistema de fijación de la pieza, como se presenta en la Figura 7. La fuente láser es el corazón del sistema, generando el haz necesario para el proceso de soldadura. La fuente puede ser un láser de fibra, de dióxido de carbono (CO_2), Nd, entre otros, dependiendo de la aplicación. La elección de la fuente láser determina la longitud de onda, la potencia y las características del haz. Por su parte, el cabezal láser es el componente que dirige y enfoca el haz láser sobre la pieza de trabajo. Incluye lentes y espejos que ajustan el diámetro y la forma del haz para lograr la precisión necesaria en el proceso de soldadura. El cabezal puede ser móvil o fijo, dependiendo de la configuración del sistema. En tercer lugar, está el sistema de desplazamiento, el cual puede ser un sistema robótico o de movimiento CNC (control numérico por computadora), que posiciona el cabezal láser y/o la pieza de trabajo, con alta precisión, permitiendo que el haz láser siga la trayectoria deseada. Esto es crucial para aplicaciones que requieren alta repetibilidad y exactitud, además de garantizar la

velocidad de desplazamiento exigida para este tipo de soldadura. Finalmente, está el sistema de fijación, el cual asegura las piezas de trabajo en su lugar durante el proceso de soldadura, y puede incluir mesas, abrazaderas y otros dispositivos que evitan movimientos no deseados, garantizando que las piezas estén alineadas correctamente.

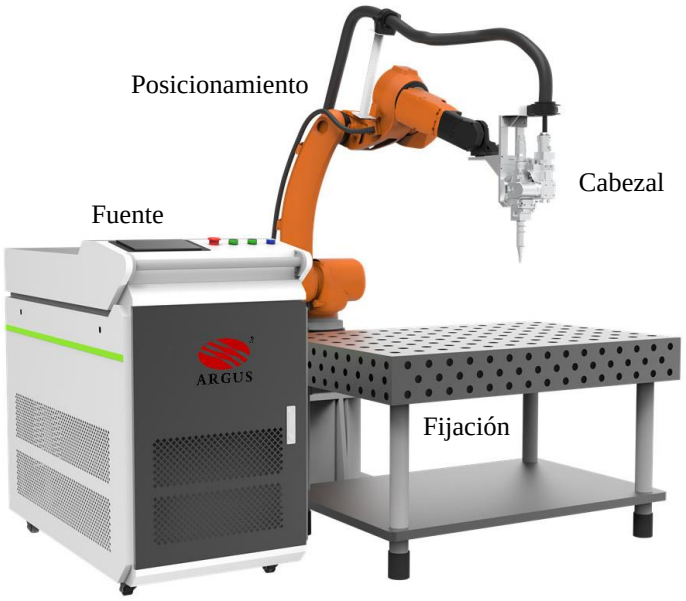


Figura 7. Componentes de un sistema industrial para soldadura láser.

Una fuente láser está compuesta por un conjunto de tres elementos los cuales trabajan en generar y acondicionar la luz laser [10]. El primero es el medio activo, siendo este el material utilizado para la emisión laser (emisión estimulada); estos medios pueden estar en estado sólido, liquido, gaseoso o puede ser incluso una fibra dopada. Seguidamente están los sistemas de bombeo que se encargan de proporcionar energía al medio activo con el fin de estimular los electrones del material del medio activo, creando las condiciones de excitación en los electrones para generar la emisión estimulada. Por último, está la cavidad resonante, siendo este un arreglo en la cual se ubica el medio activo y los espejos que permiten la reflexión y amplificación de la luz tal como se observa en la Figura 8.

El sistema cuenta con espejos en los extremos de la cavidad, uno es parcialmente reflectante, permite que una parte de la luz sea emitida como un haz láser, mientras el otro es 100% reflectante, originando que nuevamente la luz sea reflejada al medio activo contribuyendo a la excitación de más electrones. El resultado es la generación de la luz en el medio activo y

amplificada en la cavidad resonante, luz la cual es un haz de luz coherente, siendo esta coherencia un comportamiento de la luz en una misma longitud de onda y dirección.

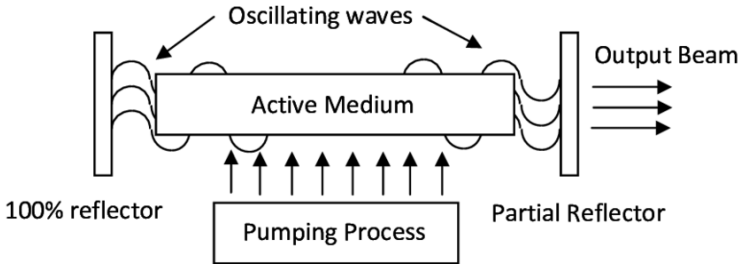


Figura 8. Sistema laser esquemático [11].

Existen varios tipos luz láser, los cuales tiene características diferentes, siendo la principal el tipo de medio activo utilizado para la generación del láser. Estas fuentes se caracterizan por generar luz con longitud de onda en un rango de entre los 0,8 μm y los 10,6 μm, entre otras características mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos y características laser [12].

Tipo de láser (fuente)	**Características del láser**
CO_2	Longitud de onda: 10,6 μm – rayo infrarrojo lejano Medios: gaseoso, mezclas de CO_2, N_2 y He Potencia: 1 kW – 50 kW Eficiencia: 8% – 18%
Láser Nd:YAG	Longitud de onda: 1,06 μm – rayo infrarrojo cercano Medios: estado sólido, cristales de granate, itrio y aluminio Potencia: 10 kW – 15 kW Eficiencia: 1% – 4%
Fiber laser	Longitud de onda: 1,07 μm – rayo infrarrojo cercano Medios: estado sólido, fibra con dopantes, Yb^{3+} (iterbio): SiO_2 (óxido de silicio) Potencia: 1 kW – 100 kW Eficiencia: 20% – 30%

D. Cabezal láser

Una vez generado el haz es conducido desde fuente por una fibra óptica y posteriormente acondicionado en el cabezal, el cual contiene el sistema de lentes o espejos (sistema óptico), responsable por el colimado y focalización de éste (Figura 9). El primero es un lente colimador el cual se encarga de ajustar la trayectoria laser a la salida de la fibra óptica, donde esta pude verse afectada por el aumento en el diámetro del rayo, el cual la convierte en un haz de luz completamente paralelo [13], tal como se muestra en la Figura 9.

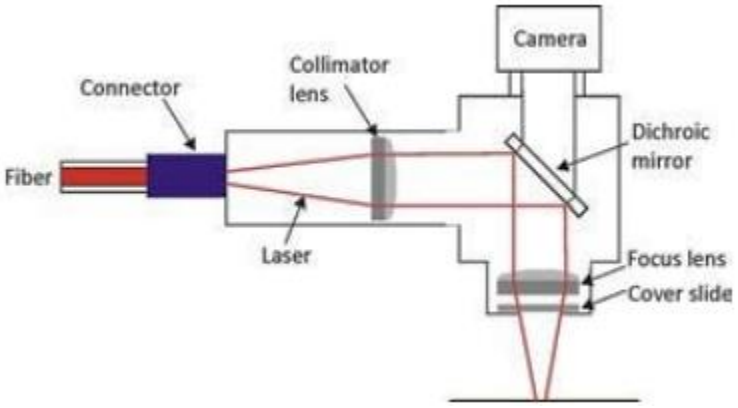


Figura 9. Estructura cabezal. Adaptado de Amada [13].

Seguidamente se encuentra el lente reflector, el cual consiste en un espejo reflectante móvil generalmente con un motor para ocasionar un movimiento oscilatorio y así varía el ángulo de movimiento del haz en pequeños rangos. Generalmente este lente se encuentra en ángulos cercanos a los 45º, lo que permite direccionar la luz del colimador hacia los últimos lentes: la objetiva y el lente protector. La objetiva es la encargada de enfocar el haz de luz láser en un punto fuera del cabezal, y define el diámetro del haz (d_f) y la distancia focal. El lente protector aísla el sistema óptico del ambiente, además de proteger la lente objetiva.

La longitud de onda es un factor crucial que determina las características de la luz láser. La longitud de onda es una medida que depende del tipo de fuente, y define la absorción de la luz en el material a procesar, así como la eficiencia del proceso. Por tanto, menor longitud de onda permite el empleo de equipos de menor potencia, como es el caso de la fuente láser por fibra. Igualmente, fuente de longitud de onda corta, como la del láser YAG y láser por fibra, permite generar puntos de focalización más pequeños y precisos, consiguiendo una mejor concentración del haz, y

consecuentemente mayor facilidad de calentamiento del material en la zona de enfoque [14]. La ecuación que define la relación entre el diámetro del haz y la longitud de onda es la siguiente:

$$d_f \propto \frac{\lambda}{NA} \qquad \text{Ec. 1 [15]}$$

Donde el tamaño del punto focal (d_f) está relacionado con la longitud de onda (λ) y la apertura numérica (NA) del sistema óptico. Esto implica una mayor densidad de energía del proceso. Por tanto, una menor longitud de onda aumenta la eficiencia del proceso al mejorar la absorción del láser en el metal, así como la densidad de energía, en ambos casos facilitando la fusión de la aleación siendo procesada. Esto explica el desuso en la industria metalmecánica de los láseres de gas y el aumento progresivo de los de fibra.

E. Tipos de procesos láser

Los procesos láser usan el principio de generación de un haz de luz colimado y de alta coherencia, enfocados de manera precisa para para aumentar la temperatura de un material de forma puntual.

En el mercado se encuentran diferentes tipos de procesos basados en este principio, los cuales se diferencian principalmente por el tipo de fuente de luz, descritos en la sección anterior. Uno de los sistemas más conocidos es el láser de gas que, como su nombre lo indica, utilizan mezclas de gases tales como el nitrógeno, el helio y el CO_2 como medio de generación del haz de luz, siendo que el empleo del CO_2 es el que le da el nombre al tipo de fuente CO_2.

Las fuentes laser de CO_2 son ampliamente reconocidas por ser uno de los primeros en ser empleados a nivel industrial (Figura 10). Como ha sido mencionado, es un proceso que requiere alta potencia, siendo que el medio activo produce un haz con una longitud de onda de 10,6 μm, lo que en su momento permitía excelentes acabados, tanto en procesos de corte como en soldadura. Sin embargo, esta longitud de onda, más larga en comparación con otras fuentes, presenta menor eficiencia en el proceso de calentamiento, debido a la más baja absorción del haz láser por parte de metal, promovido en parte por la mayor reflectividad de estos materiales. Por esto, este tipo de fuentes ha sido desplazada de la soldadura de metales a la unión de materiales no metálicos, como los son; plásticos; maderas, acrílicos y cerámicas [16].

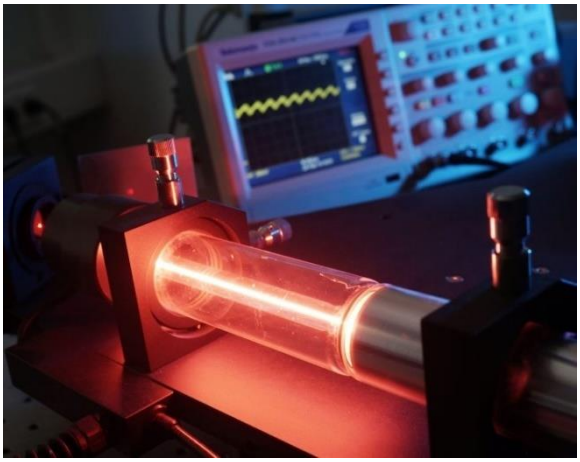


Figura 10. Fuente Laser por CO_2.

Otro de los sistemas empleados es el láser de estado sólido (Figura 11), el cual utiliza varios medios sólidos tales como cristales de rubí sintético (cromo en óxido de aluminio), neodimio en vidrio (Nd:vidrio) y neodimio en granate de itrio y aluminio (Nd-YAG), siendo este último el más comúnmente utilizado. Estos sistemas son empleados en una amplia gama de aplicaciones, desde procesos de manufactura hasta la investigación científica [14].

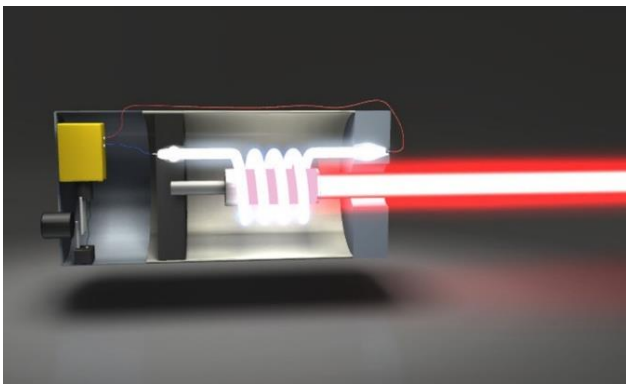


Figura 11. Fuente Laser de estado solida por cristal de Ruby.

A diferencia de los láseres de CO_2, los láseres de estado sólido presentan una longitud de onda más corta, lo que les permite ser utilizados en una mayor gama de materiales, especialmente en aquellos con menor absorción del haz, como muchos metales. Aunque los láseres de estado sólido son adecuados para aplicaciones industriales debido a su capacidad para generar pulsos de alta potencia, tienen desventajas en aspectos como eficiencia y calidad del haz, mejor conocida como factor de calidad del haz (M^2). El factor M^2 es una medida de la calidad de un haz láser y

oscila a partir de valores mayores que 1, siendo 1 el valor ideal que corresponde a un haz de calidad perfecta, lo que afecta su capacidad de ser enfocado en un punto pequeño. Un mayor valor de M^2 indica un haz menos ideal, lo que puede resultar en un diámetro de haz mayor y una disminución en la capacidad de calentamiento y fusión de los materiales (Tabla 2).

Tabla 2. Tipos de fuente láser y factor de calidad del haz.

Tipo de láser	Factor de calidad del haz (M^2)
Láser de CO_2	1.1 - 1.3
Láser de fibra	1.0 - 1.2
Láser Nd:YAG	1.1 - 1.5
Láser de diodo	5.0 - 30.0

Es por esta característica que los láseres de estado sólido son especialmente útiles para aplicaciones que requieren pulsos de alta potencia y corta duración, distinto a lo observado en procesos de soldadura láser continua.

Por último, se encuentra el láser de fibra, el cual es el proceso empleado en este trabajo. Este tipo de fuente es relativamente nueva en el mercado, por lo que persiste un alto grado de desconocimiento con relación a las características de los equipos, su funcionabilidad y aplicaciones.

Los láseres de fibra, al igual que los otros tipos de fuente, requiere de un medio que genere el haz. Para este caso, el medio es de estado sólido, donde los fotones de alta energía son generados en la propia fibra (Figura 12), la cual contiene elementos dopantes, responsables de la generación de los fotones.

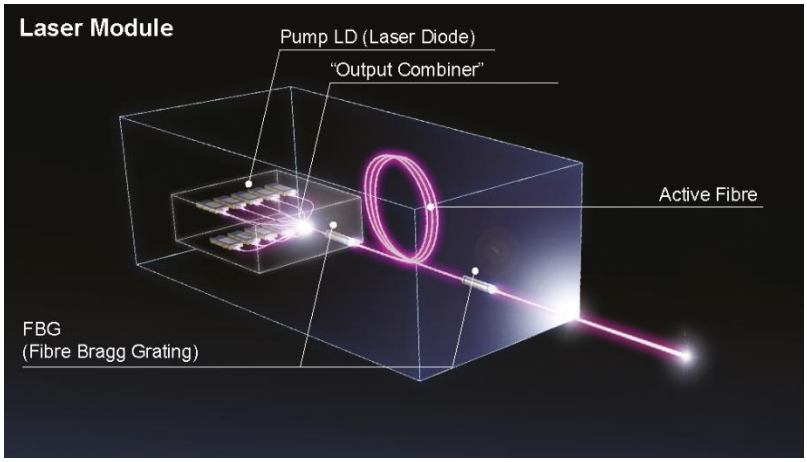


Figura 12. Fuente laser por fibra [17].

Los láseres de fibra, como todo láser de estado sólido, produce fotones con longitudes de onda cortas (1,07 µm), pero con una alta calidad de haz (Tabla 2), con valores muy cercano al ideal, permitiendo mejor enfoque en del haz. Estas dos características producen un haz de alta densidad de energía y muy eficiente, gracias a la mayor absorción de los fotones y un diámetro muy pequeño y de alta calidad, lo cual, aumenta rápidamente la temperatura, con menor aporte de calor. La mayor eficiencia redunda en equipos de menor potencia (menos robustos) para lograr procesar materiales, lo que le otorga nuevas funcionalidades como la de proceso láser manuales y de mayor portabilidad que los láseres industriales convencionales.

Estas características permiten que los cabezales de los equipos láser por fibra sean más pequeños, principalmente debido a la excelente calidad del haz de estos láseres, M^2 cercano a 1.0), lo que implica que el haz sea altamente colimado y enfocado, lo reduce el tamaño del sistema óptico. Además, los láseres de fibra transmiten la luz a través de una fibra óptica flexible, lo que facilita el diseño compacto del cabezal, ya que no se requieren espejos grandes ni sistemas complejos para guiar el haz, como en los láseres de CO_2. Esta miniaturización de los componentes ópticos y la eficiencia de transmisión permiten que los cabezales sean más ligeros y manejables, facilitando su integración en sistemas automatizados, incluso, la construcción de soldadores de tipo manual (Figura 13).

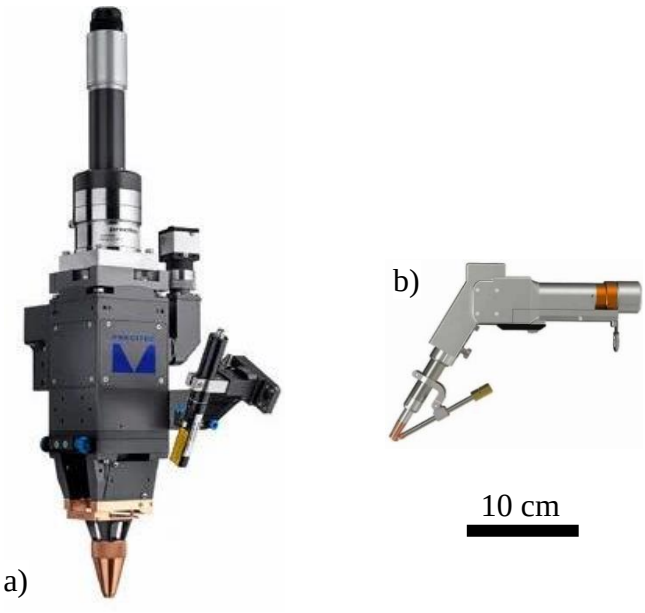


Figura 13. Tamaño de los cabezales para láser: a) para fuente Nd:YAG y b) para laser de fibra de proceso manual.

De las técnicas mencionadas, los laser de CO_2 y Nd-YAG son usados principalmente en la fabricación de piezas de alto volumen de producción o con características muy específicas, debido en parte al elevado costo de invención del sistema. La fuente de calor de alta energía propicia la soldadura a elevadas velocidades, lo que implica que el proceso sea realizado de forma automatizada, aumentando a un más los costos del sistema y siendo necesario la capacitación del personal para su operación. Estos son los láseres de tipo industrial, cuya potencia puede alcanzar hasta los 50 kW [12].

F. Sistemas manuales de soldadura láser por fibra

Un elemento característico de todos los sistemas de soldadura láser es la elevada taza de fusión, lo que implica una alta velocidad de soldadura. Esto en general es considerado como ventajoso, pues reduce significativamente los tiempos de fabricación. A esto se suma la necesidad de sujetar el cabezal, que con su elevado volumen y peso debe ser realizado con un sistema mecánico robusto. Por esto es que en general los procesos industriales de corte, mecanizado, soldadura o revestimiento láser requieren de sistemas de desplazamiento automático, siendo el más empleado el brazo robótico.

Para los procesos de corte es frecuente encontrar el uso de mesas o sistemas de control cartesiano (Figura 14a). Ya para para aplicaciones en soldadura y revestimiento es frecuente el empleo de brazos robóticos, que deben soportar tanto el cabezal láser, como de alimentación de metal de aporte y del gas de protección. Un ejemplo de este tipo de dispositivos se presenta en la Figura 14b, donde se presenta un brazo robótico con seis (6) grados de libertad, marca Kuka, para empleo en soldadura, revestimiento y manufactura aditiva de metales, acoplado a fuente de soldadura láser por fibra Laser TruDisk 6002. Este equipo está disponible en el Centro Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais, de la Universidad nacional de Pernambuco, en Brasil.

Al evaluar este criterio, resulta ser una desventaja de todos los procesos láser, pues los costos de inversión (equipos y adecuación de espacios) son elevados. Además, es necesaria la capacitación de los operarios, pues implica la generación de códigos para el trazado de las trayectorias, que en general son definidos por medio de plataformas CAD. En general, estos códigos posteriormente tienen que ser pos-procesados, para compatibilizarlos con el lenguaje de la máquina. Es así como el montaje de los sistemas láser típicamente empleados a nivel industrial requiere de inversiones y capacitación que muchas industrias no están dispuestas a atender.

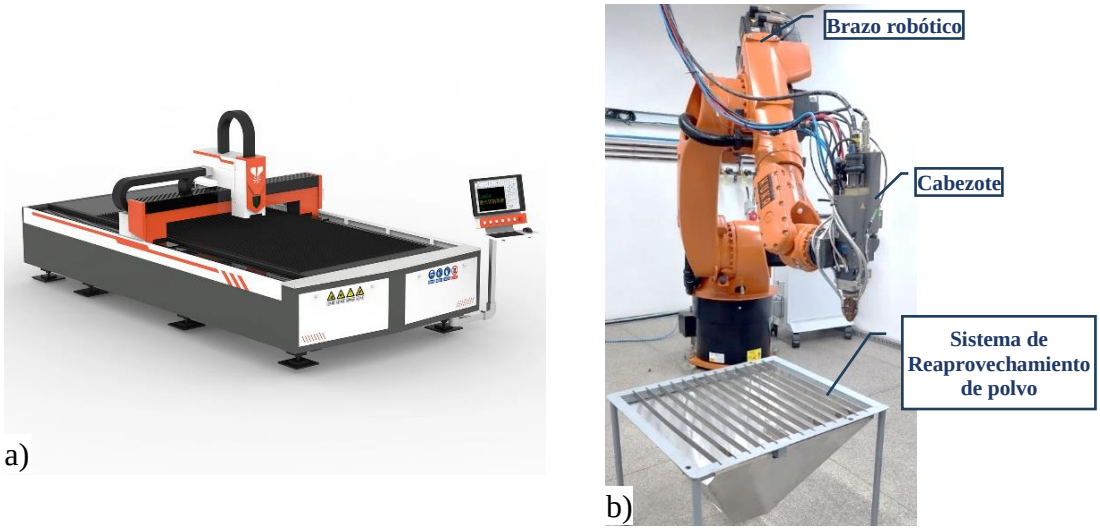


Figura 14. a) Sistema de posicionamiento cartesiano para cortadora láser[1] y b) brazo robótico Kuka KR 60 HA™.

Con en el surgimiento de las fuentes laser por fibra, así como el mejoramiento en la calidad de los sistemas de transmisión y ópticos, ha sido posible la construcción de sistema de láser de menor tamaño y potencia (1,5 kW y 3 kW), lo que facilita significativamente su instalación. Del mismo modo los sistemas de láser por fibra aumentaron significativamente la eficiencia y calidad del haz, haciendo posible la reducción del tamaño del cabezal (Figura 13). Finalmente, el tamaño del charo de soldadura, así como la velocidad de fusión pueden ser contraladas de forma manual, por un soldador. Estos elementos permiten la construcción de sistemas manuales de soldadura láser, dejando de lado las desventajas descritas anteriormente en los sistemas de soldadura láser tradicionales, asociadas a la automatización. Un ejemplo del sistema se presenta en la Figura 15.

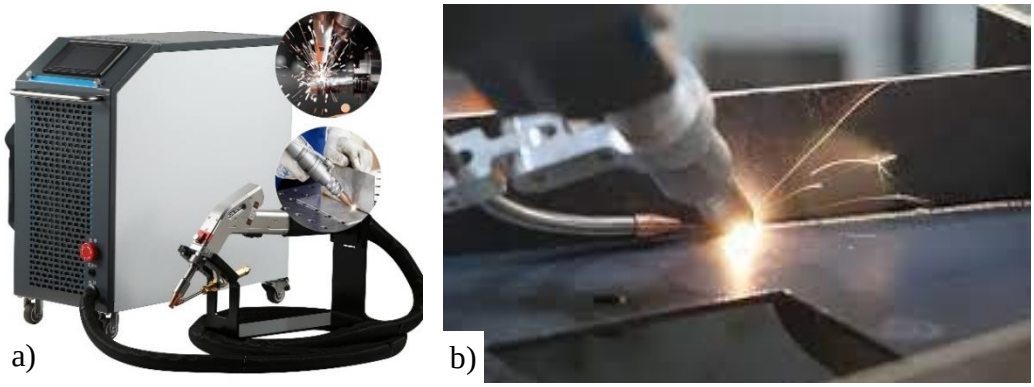


Figura 15. a) Sistema para soldadura manual láser por fibra y b) aplicación de la soldadura láser en acero al carbono.

[1] https://fortunelaser.en.made-in-china.com/product/RFdTefGvLjcq/China-1500W-3000W-Metal-Laser-Cutter-3015-Fiber-Laser-Cutting-Machine-for-Sale-in-Azerbaijan-Bahrain-Bangladesh.html.

G. Características del proceso de soldadura láser

El proceso de soldadura láser puede operar en dos regímenes de operación: continuo y pulsado (Figura 16), donde la elección de uno u otro depende de las características del material a soldar y la aplicación [18]. En el modo continuo (CW, *continuos wave*), el láser emite un haz constante, proporcionando una entrega de energía uniforme, lo que es ideal para soldaduras largas y profundas, o materiales de baja absorción. Por otro lado, el modo pulsado (PW, *pulsed wave*) entrega la energía en ráfagas cortas y controladas, lo que permite un mejor control del charco de soldadura y minimiza el riesgo de sobrecalentamiento en materiales más delgados. Este modo es ideal para soldaduras en aplicaciones donde se requiere alta precisión y control del aporte térmico.

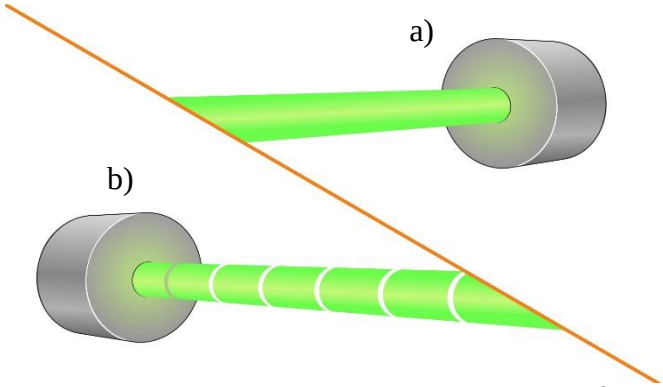


Figura 16. a) Láser en modo continuo y b) pulsado[2].

Otra característica de los procesos de soldadura láser es que se distinguen dos modos de operación, según la forma de la zona fundida: el modo *keyhole* y el modo conducción. El modo *keyhole* se caracteriza por la formación de un pequeño orificio en el material fundido, generado por la alta densidad de potencia del láser que vaporiza el metal, creando un canal profundo (Figura 17a).

Este modo permite una penetración profunda en el material, produciendo un cordón de soldadura estrecho, lo cual es ideal para aplicaciones que demandan juntas de alta resistencia y baja distorsión, como en la industria aeroespacial. Sin embargo, presenta la desventaja de que, si el *keyhole* no se mantiene estable, puede dar lugar a la formación de porosidad, afectando así la calidad de la soldadura.

[2] https://lasersafetyindustries.com/blogs/laser-safety-buyers-guide/continuous-wave-cw-laser-vs-a-pulsed-laser.

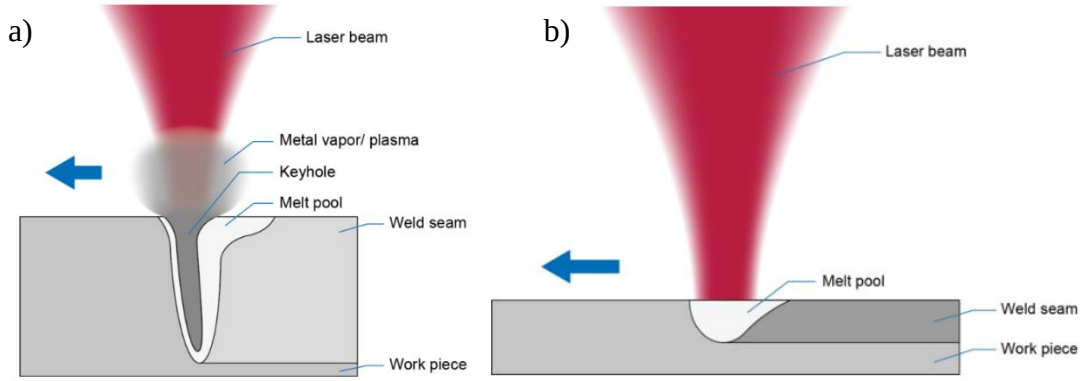


Figura 17. Modos de soldadura láser: a) *keyhole* y b) conducción[3].

En contraste, el modo conducción (Figura 17b) ocurre cuando la energía del láser es absorbida en la superficie del material, fundiendo el metal sin generar un *keyhole*. Este modo produce un cordón similar el generado en el proceso de soldadura GTAW, más ancho y menos profundo que el modo *keyhole*, pero menor que el de GTAW. Es adecuado para soldaduras de metales más delgados. Su principal ventaja es la menor propensión para generar porosidad y una ZAT más controlada. No obstante, tiene la limitación de una menor penetración, lo que lo restringe en aplicaciones donde se requiere una soldadura profunda. Ambos modos tienen aplicaciones específicas, y la elección entre ellos depende del espesor del material, la calidad requerida y las condiciones operativas del proceso.

El modo de soldadura continuo o pulsado, así como el modo de operación *keyhole* o conducción, están supeditados a los parámetros de soldadura empleados. Además, el ajuste adecuado de las variables es fundamental para obtener una unión de alta calidad. Las principales variables incluyen la potencia del láser (P), la velocidad de desplazamiento del haz (υ), la distancia focal del láser (d_f), y el tipo de gas de protección. La potencia (P) determina la cantidad de energía entregada al material y, por ende, la profundidad y anchura del cordón de soldadura, así como la tasa de fusión y el aporte térmico el tamaño de la ZAT y las distorsiones. Otra variable crítica es la velocidad de desplazamiento (υ) del cabezal láser, que afecta principalmente el aporte térmico. La distancia focal del láser (d_f), que define la distancia entre el haz y la superficie del material, resulta crucial para lograr una penetración adecuada y minimizar defectos, pues determina el tamaño del haz. Finalmente, la protección gaseosa (normalmente con argón o helio) que es necesaria para evitar la oxidación y contaminación del charco de soldadura, garantizando una soldadura limpia y

[3] https://www.hg-star.com/differences-bewteen-heat-conduction-welding-and-keyhole-welding/.

de alta calidad. Para el caso de la soldadura láser por punto, entra en juego otra variable que es la frecuencia de pulso (*f*), esencial en aplicaciones que requieren soldaduras precisas, ya que controla la entrega intermitente de energía, permitiendo un mejor control del charco de soldadura. El ajuste correcto de estas variables permite optimizar la eficiencia y la calidad del proceso de soldadura láser.

En el proceso de soldadura láser, las variables de entrada, como el tipo de metal y su espesor, son determinantes al momento de ajustar las variables operativas para obtener una soldadura de alta calidad. El tipo de metal ya sea aluminio, acero inoxidable, titanio u otro, influye directamente en la absorción del haz láser, lo que a su vez afecta la potencia necesaria para lograr la fusión adecuada. Por ejemplo, metales con alta reflectividad, como el aluminio, requieren mayores ajustes en la potencia del láser y un control preciso de la distancia focal para asegurar la penetración correcta. El espesor del material es otra variable crítica, ya que materiales más gruesos necesitan mayor potencia y una menor velocidad de soldadura para garantizar una penetración completa. La posición del foco y la distancia focal son ajustadas para concentrar la energía en el punto de la soldadura, lo cual es crucial para minimizar la zona afectada térmicamente (ZAT) y controlar el tamaño del cordón. Así, la interacción entre las variables de entrada y de ajuste, como la potencia, el foco, la distancia focal y la velocidad de soldadura, es clave para optimizar el proceso y garantizar resultados consistentes y de alta calidad.

H. Implementación de soldadura láser en la construcción de tanques

La tecnología de láser por fibra para aplicación manual es relativamente reciente a nivel industrial (mediados de 2010), siendo que su aceptación y marcado asenso en el sector metalmecánico se presenta desde 2015, lo que implica que aún es necesario el estudio del proceso para garantizar su implementación en las empresas del sector.

Esto también envuelve un asunto importante como lo es la estandarización o construcción de los procedimientos de soldadura para garantizar una aplicación que cumpla con los requerimientos de la industria donde sea aplicada. Para poder llevar a cabo esta estandarización, así como verificar las soldaduras fabricadas con los parámetros seleccionados en el equipo láser RayEdge 2000 W, implementados por la empresa Grupo Lassen, es imprescindible verificar el

cumpliendo de las exigencias tanto de Lassen como de las industrias a la que la empresa fabrica los equipos.

Por esto, es necesaria la construcción de procedimientos de soldaduras, para asegurar que las uniones soldadas cumplan con los requisitos de calidad, seguridad, eficiencias y rendimiento necesario para la construcción de los equipos, que para el caso en cuestión son los recipientes a presión. La soldadura es un proceso crítico y de particular atención en la fabricación de componentes industriales. La implementación de soldadura láser manual por fibra es un proceso novedoso en la industria, lo que genera inquietud en el entorno industrial, necesario recurrir a los lineamientos para la calificación del procedimiento.

Por esta razón el procedimiento debe ser contruido baja los requerimientos del estándar de la American Society of Mechanical Engineers (ASME), en la cual se es establece reglas y recomendaciones rigurosas para la calificación de procedimiento de soldadura. Para esto es necesario establecer rangos de variables a controlar y evidencia la calidad de las uniones mediante la evaluación de las discontinuidades, la calidad superficial de los depósitos y la respuesta mecánica de las uniones.

Aunque la soldadura es ampliamente usada en la industria desde hace mucho tiempo, no deja de ser susceptible a la aparición de defectos o discontinuidades que pueden comprometer la integridad y funcionalidad de las uniones, donde el reconocimiento de su causa, prevención y corrección se vuelve de suma importancia para llegar los parámetros óptimos de soldadura, y posterior calificación.

Para una evaluación correcta en una junta soldada es importante tener claro aspectos como la generación de discontinuidades y defecto, siendo la primera una interrupción en la homogeneidad de un material, las cuales son afectan el desempeño de la pieza soldada, por lo que no se considera una razón de peso para descartar una soldadura. Por su parte, un defecto es una discontinuidad que por su acumulación o tamaño sí atenta contra el adecuado funcionamiento de la piza o sistema soldado [19].

La discriminación de discontinuidades o defectos es de suma importancia para la construcción de procedimientos de soldadura, y para la toma las decisión y acciones correctivas. Las discontinuidades se pueden clasificar según el origen, la ubicación, la geométrica y su naturaleza, siendo frecuente en la soldadura la formación de las siguientes discontinuidades: poros, grietas, inclusiones, desalineamiento, falta de fusión, distorsión, etc. Es de suma importancia tener

claro que la consideración de una discontinuidad o defecto siempre estará regida por la norma que se esté usando para la fabricación del elemento, que para el caso en cuestión se trata de tanques.

Entre los estándares aplicables, se destacan los establecidos por la ASME, particularmente el ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC), que es fundamental para la fabricación de tanques de almacenamiento. Este código proporciona directrices exhaustivas sobre el diseño, los materiales, la fabricación y la inspección de recipientes a presión. Bajo el BPVC, es crucial considerar aspectos como la calificación del procedimiento de soldadura (WPS), la calificación de los soldadores (PQR) y las pruebas no destructivas (NDT) para asegurar que la soldadura cumpla con los requisitos de resistencia y durabilidad.

El WPS es un documento esencial que detalla los parámetros y procedimientos necesarios para realizar una soldadura de calidad y conforme a las normativas. En el caso de la soldadura láser manual, el WPS debe incluir la descripción del proceso de soldadura, especificando el tipo de láser, su potencia y los materiales base a soldar. Además, debe contemplar las variables de entrada del proceso, como el tipo de metal, el espesor de las piezas y la preparación de las juntas. Otro elemento clave es la configuración del equipo, que incluye detalles sobre el diámetro del haz, la distancia focal y la velocidad de soldadura. También se deben establecer los parámetros operativos, tales como la potencia, la velocidad de alimentación del aporte y el tipo y caudal del gas de protección. Asimismo, el WPS debe especificar las técnicas de soldadura a emplear, como el modo continuo o pulsado, la orientación del cabezal y los patrones de movimiento. Finalmente, el documento debe incluir los requisitos de inspección para garantizar que la soldadura cumpla con las especificaciones de calidad establecidas.

Estos lineamientos serán los empleados en el proyecto actual, para la obtención de WPS calificados, que permitan la implementación exitosa de la soldadura manual láser por fibra en la compañía Grupo Lassen.

VI. METODOLOGÍA

Para conocer el estado actual del área de soldadura y los requerimientos de mejoras fue de vital importancia el apoyo dado por Grupo Lassen, pues concedió total autonomía y acceso a la información y a la planta. Con esto fue posible realizar un levantamiento completo de la información, y así generar una serie de evaluaciones y diseñar metodologías para obtener condiciones de soldadura adecuadas para las aplicaciones de interés de la compañía. Es así, como para este proyecto, fue desarrollada la siguiente metodología:

A. Revisión bibliográfica y documentos de la compañía

Se realizó una revisión bibliográfica que incluyó el estudio teórico de los procesos de soldadura láser, abarcando sus diferentes tipos de fuentes, características y aplicaciones. Posteriormente, se profundizó en el proceso específico de soldadura láser por fibra para su aplicación manual, así como la comprensión de los parámetros de operación. Igualmente se realizó el levantamiento de información de la compañía Grupo Lassen, relativa a la calificación de procedimientos y soldadores.

B. Tipificación de las juntas a fabricar

Además, se llevó a cabo la tipificación de las juntas que se realizan en la empresa, con un enfoque en la fabricación de recipientes. Este análisis se basó en normativas como la ASME (BPVC), que establece los requisitos necesarios para el diseño, fabricación e inspección de calderas y recipientes a presión. Para la tipificación de las juntas, con el objetivo de identificar la mayor cantidad de configuraciones de juntas utilizados en Grupo Lassen y poder agruparlas en un número más reducido de juntas. Esto permitirá tener un control más preciso de los tipos de juntas que serán sometidas a pruebas, así como mejorar los procesos actuales de la compañía, proceso GTAW. Para llevar a cabo esta identificación, se revisó la documentación existente en la empresa, como los WPS, PQR y WPQR, además de los planos de fabricación de los equipos diseñados y fabricados en los últimos meses. De esta forma, se obtuvo una amplia gama de información que permitió identificar las juntas típicas utilizadas en la empresa.

C. Instalación de la fuente de soldadura láser

La instalación y puesta en funcionamiento del equipo láser RayEdge 2000W fue realizada en conjunto con el personal técnico de la compañía, así como la colaboración de la empresa proveedora de los equipos. Para llevar a cabo estos requisitos, primero se verificaron las conexiones de todos los sistemas, lo que requirió un desensamble del equipo por parte de los técnicos de la empresa proveedora. Se prestó especial atención a la conexión de la fuente láser, revisando tanto la fuente como el cabezal (Figura 18a). Seguidamente, se comprobaron las conexiones del sistema de control electrónico, asegurándose de que todo estuviera correctamente conectado y funcional, mediante chequeos con multímetro Figura 18b. Asimismo, se revisaron las conexiones de todo el sistema de refrigeración (chiller). Posterior a la verificación de cada una de las conexiones, fue necesario poner en funcionamiento el chiller, lo cual requirió la obtención de agua desionizada.

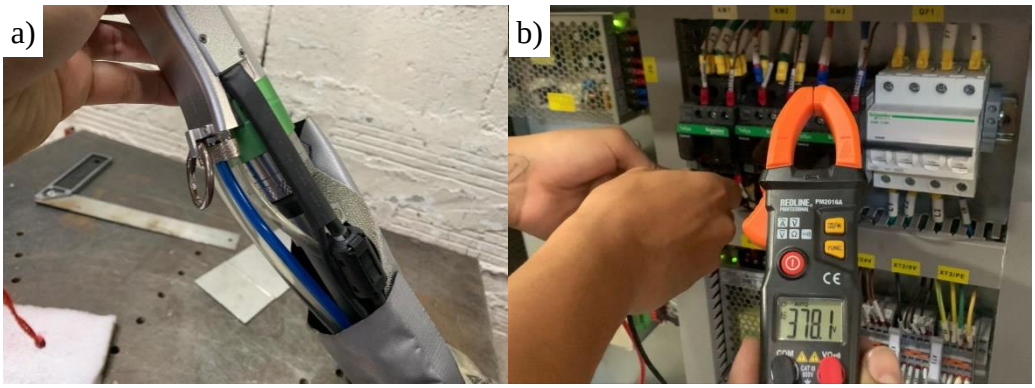


Figura 18. a) Conexión del cabezal y b) chequeo valores de la fuente.

En una segunda fase, se llevaron a cabo las corroboraciones eléctricas en la planta con el fin de cumplir los parámetros indicados por el fabricante y evitar riesgos de cortocircuitos en los sistemas del equipo. Tras estas verificaciones, fue necesario acondicionar una conexión exclusiva de 220V con puesta a tierra individual, destinada únicamente a este equipo. Para asegurar una instalación adecuada, se contrató a una empresa que realizó la instalación de una toma tipo Legrand como se muestra en la Figura 19, y así evitando así confusiones con otras conexiones de la empresa. Otro aspecto importante fue que, debido a las condiciones logísticas de la empresa, el equipo no iba a estar ubicado en un punto fijo. Por ello, fue necesario fabricar una extensión que permitiera movilidad dentro de toda el área de la planta.

El último paso para poner en funcionamiento el equipo, fue desbloquear su sistema. Para ello, se debió instalar el software brindado por la empresa fabricante del sistema laser, este se instaló en un computador para así poder generar una conexión con el sistema de la fuente y poder activar todas las funciones del equipo.



Figura 19. Conexión legrand equipo RayEdge 2000W.

D. Desarrollo de ensayos preliminares de soldadura

Para la obtención de juntas soldadas preliminares, se construyeron cupones de soldadura empleando láminas de acero AISI/SAE 304, empleando junta a tope y los espesores utilizados en la empresa, y que además fueran compatibles con la potencia del equipo. Los espesores empleados fueron 1,9 mm, 2,5 mm, 3,0 mm y 4,5 mm. El objetivo es la obtención de soldaduras con penetración completa (CJP, *complete joint penetration*), para lo cual se realizarán soldaduras de ranura simple (*single goove weld*), con bisel cuadrado, sin abertura de raíz y empleando metal de aporte ER308L de 1,2 mm de diámetro. Los parámetros de control del proceso se presentan en la Tabla 3.

Con el objetivo de identificar los rangos y valores adecuados de cada uno de los parámetros programables en el equipo, fue esencial diseñar una tabla que permitiera evidenciar los cambios en las variables durante las diferentes pruebas, la cual se presenta en la Figura 20. Así mismo, fue necesario usar los parámetros recomendados por el fabricante para algunas aplicaciones, los cuales fueron el punto de partida.

Tabla 3. Variables del equipo soldadura laser por fibra RayEdge - 2000W.

Variables	Rango
Potencia de entrega	1 – 2000 [W]
Frecuencia de laser	1 – 50000 [Hz]
Porcentaje de ocupación del laser	1 – 100 %
Patrón de oscilación	Punto o línea
Frecuencia de oscilación del laser	1 – 200 [Hz]
Amplitud de oscilación	1 – 5 [mm]
Velocidad de alimentación	1 – 100 [mm/s]
Distancia focal	-10 a 10 [mm]

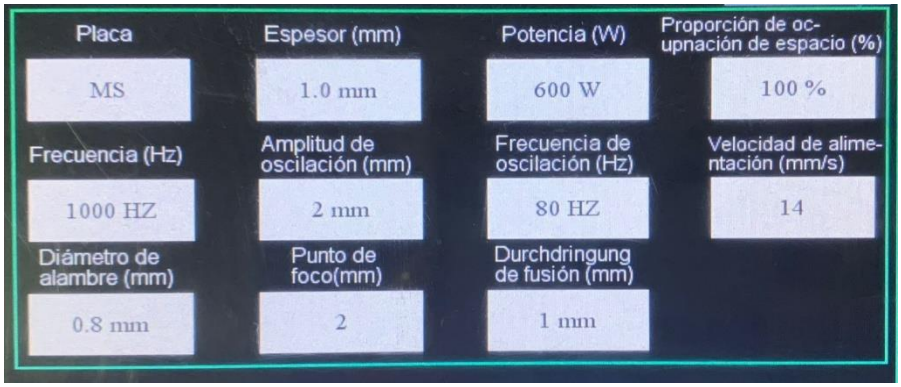


Figura 20. Registro de las variables de soldadura.

En primera medida, debe ser determinado el punto focal del láser, siendo esta la distancia que separa el lente de enfoque con el material base. Esta variación se realiza acercando o alejando el lente focal hasta lograr la mayor fusión puntual, la cual se consigue desplazando el módulo de extensión del cabezal Figura 21a. A partir de esta variación en la altura se genera una serie de puntos, los cuales indican, según las interpretaciones del operario, el punto ideal de la distancia focal Figura 21b. Una vez establecido según el operario el punto ideal, era necesario retraer nuevamente el módulo de extensión el espesor del material a soldar. Para el caso en cuestión, la junta a soldar es de 3 mm, por lo que se debe introducir el módulo esa distancia desde el punto donde se interpretó que era el foco ideal.

La metodología implementada por la empresa proveedora de los equipos para el establecimiento de foco de soldadura presentaba mucha inconsistencia al momento de encontrar el foco. La variación del módulo de extensión se vuelve subjetiva, por la que se implementó otra

metodología que permite controlar y establecer de manera precisa el valor del foco. La metodología consiste en establecer la distancia focal siempre en el valor del espesor que se fuera a soldar, omitiendo principalmente la primera variación del foco el cual podría ubicarse en cualquier lado.

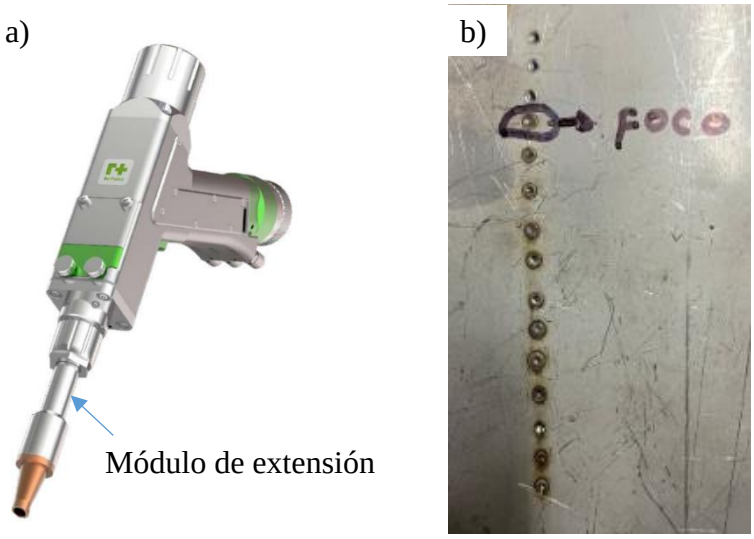


Figura 21. a) Modulo de extensión y b) calibración del punto focal del sistema.

Una vez establecido el foco, el primer parámetro a regular es la potencia del láser, seguido de la velocidad de alimentación del metal de aporte. Inicialmente, se ajustó la potencia necesaria para lograr la penetración completa de la lámina en un solo pase de soldadura, para luego variar la velocidad de alimentación del metal de aporte. Para esto se empleó la velocidad de alimentación recomendada por el fabricante, según el espesor y el material a soldar, ajustando la magnitud hasta encontrar el valor en el que la penetración en la raíz de la junta dejara de ser efectiva, el cual es considerado el límite superior de velocidad de alimentación.

Definidas la potencia y velocidad de alimentación adecuados, se ajustaron los demás parámetros de forma que no se alterará la penetración, generando mejoras en el aspecto visual de la soldadura. Para lograr los primeros acercamientos a los parámetros se utilizó retales de acero AISI/SAE 304 (Figura 22a), antes de realizar los cupones preliminares, lo que permitió ajustar las variables y evidenciar las posibles afectaciones en la soldadura aplicada de cada una de las variables. Cada una de estas modificaciones se registró en las tablas mencionadas anteriormente, lo que permitió mantener un registro claro de los parámetros y de las variaciones que se realizaban entre una comprobación y otra. Este procedimiento se repitió para cada uno de los espesores a soldar.

Una vez ajustados estos parámetros, se procedió a aplicar la soldadura en los cupones, enfocándose en la construcción de las juntas identificadas en el punto uno de esta sección. Estas juntas se evaluaron de acuerdo con los criterios e intereses de la compañía, tales como la penetración, la facilidad de pulido y aspectos clave como la ausencia de defectos que pudieran ser rechazables según la normativa visual.

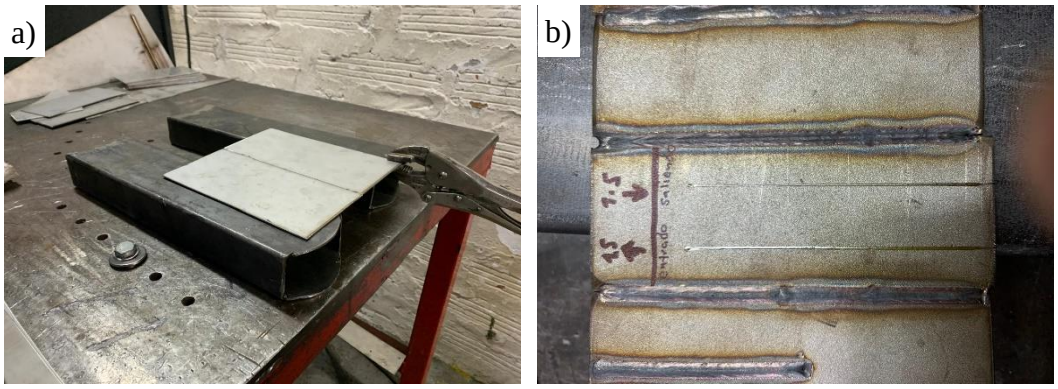


Figura 22. a) Cupón preliminar y b) retales de prueba.

E. Desarrollo de soldaduras finales y construcción de procedimientos

Finalmente, para llevar a cabo la fabricación de las juntas soldadas finales, empleando los parámetros determinados, se apela a una evaluación más rigurosa de las juntas, de forma que cumpla con los requerimientos para la fabricación de recipientes atmosféricos y a presión que son construidos en la empresa Grupo Lassen. Para ello fue empleado el estándar ASME sección IX del BPVC. Para la posible calificación de los procedimientos, se determinó, bajo norma la construcción de cupones de soldadura en los espesores 1,9 mm y 3,0 mm, siendo que para este rango es aceptada la calificación espesores 2T (3,8 a 6,0 mm).

Estos cupones serán sometidos a ensayos no destructivos y destructivos, de acuerdo con las instrucciones de la sección IX, siendo estos la inspección visual, radiografía, ensayos de tracción y dobles de cara y raíz. Los ensayos no destructivos fueron realizados internamente, mientras que la evaluación radiográfica de los cupones fue realizada en una compañía particular, siendo los resultados interpretados por ellos e internamente. El número de ensayos mecánicos, así como la cantidad son presentados en Tabla 4.

Tabla 4. Requerimientos de pruebas para procedimiento de calificación.

Espesor cupón soldadura	Número y tipos de pruebas requeridas		
	Tracción	Dobles de cara	Dobles de raíz
Calibre 14 (1,9 mm)	2	2	2
3,0 mm	2	2	2

Para cumplir con el requerimiento de las pruebas cada cupón de soldadura se dispondrá como se muestra en la Figura 23.

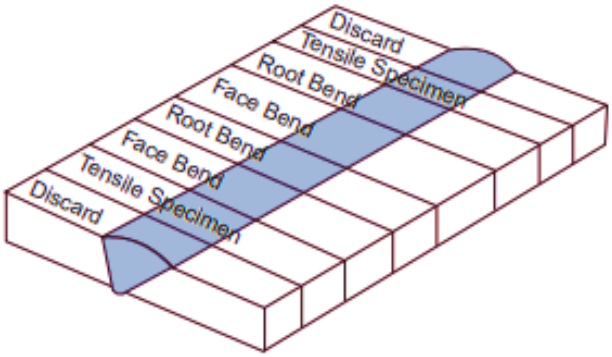


Figura 23. Distribución de las muestras para ensayos mecánicos en el cupón de soldadura.

Para los ensayos de doblez se diseñó una matriz (Figura 24), la cual facilita la evaluación de cupones en la misma empresa. La matriz fue diseñando y fabricada siguiendo los parámetros de diseños dados en la norma, siendo la ejecución e interpretación realizadas bajo el ASTM A190.



Figura 24. Matiz de dobles diseñada para Grupo Lassen.

Los ensayos de tracción fueron realizaron en el laboratorio de resistencia de materiales de la Facultad de Ingeniería de Universidad de Antioquia. Para ello fue empleada la maquina universal de ensayos Shimadzu AGS-X, según el estándar ASTM E8.

Una vez se realizaron todas las pruebas y con la información encontrada en los parámetros usados para fabricar los cupones de soldadura, es posible diseñar y diligenciar el PQR, con luz a diligenciar finalmente el WPS. Para construcción correcta para la calificación de un WPS, fue necesario seguir una serie de pasos establecidos en la norma mencionada, como se resume a continuación y cada punto fue detallado en esta sección.

1. Es necesario construir un documento preliminar donde se registren todos los elementos relativos al proceso de calificación: variables esenciales, características de la junta y rango de operación de estas variables (tabla diseñada ver Figura 20).
2. Con este documento, se realiza la construcción de una junta soldada denominada cupón de prueba, bajo los lineamientos establecidos.
3. Seguidamente, se llevan a cabo las pruebas de calificación, donde se evalúa el cupón en busca de discontinuidades, mediante técnicas de ensayos no destructivos (END) y destructivos, establecidos por el BPVC.
4. Se construye el Procedure Qualification Record (PQR), siendo éste el documento que contiene toda la información del documento preliminar para soldar el cupón, así como los resultados de los ensayos y pruebas mencionadas anteriormente.
5. De ser superados todos los requerimientos establecidos en el estándar, a partir del PQR se extraen los datos para ser depositados en el documento definitivo denominado WPS. Finalmente, con tendencia a evaluar la eficiencia del proceso será determinado el tiempo de fabricación, haciendo uso de las juntas ya tipificadas en el punto 1, donde se llevará a cabo pruebas usando los dos procesos que han sido foco en este trabajo GTAW y SLF, requerido tomar el tiempo de aplicación en un mismo tipo de junta, medida en un metro lineal de soldadura para cada uno de los procesos.

VII. RESULTADOS

A. Revisión bibliográfica y documentos de la compañía

Al momento de hacer una revisión precisa de la información y documentación concerniente al área de soldadura, la cual diera información de los procedimientos y calificación que se venían desarrollando en la planta de la empresa Grupo Lassen, se evidencio una serie de incongruencia en la parte de documentación y procedimientos.

Lo primero en ser identificado está relacionado con la calificación de soldadores, los cuales se venían realizando con frecuencias distintas a las que exigen la norma y fuera de las razones de recertificación, según los contenidos en la norma ASME-BVPC. Esta norma específica las razones por las cuales debe ser recertificado un soldador, donde al no salirse de estos requerimientos el soldador puede seguir con su calificación hasta el momento que incumpla con algunos de estos requisitos. Estos requerimientos son:

- No han soldado en un periodo de seis meses para los procesos y rangos en los que están calificados.
- Cambio en el proceso de soldadura o empresa.
- Existen problemas de calidad en sus soldaduras.
- Se introducen cambios en los procedimientos o materiales de soldadura.

Así mismo se encontraron procedimientos de soldadura (WPS) con información errónea y poco precisa, además de aplicaciones de soldadura por fuera de los condicionamientos establecidos en los WPS, lo que generaba errores que derivan en reprocesos. Por cuenta de esto se realizó un acompañamiento en los diferentes procedimientos de soldadura, específicamente en los relacionados con GTAW, para evidenciar el rango de cada una de las variables usadas en el proceso y con estos ajustar los WPS con los paramentos reales de aplicación, resultados que fueron soportando con pruebas de radiografía.

Otro aspecto es el poco conocimiento y el mal uso de los símbolos de soldadura, tanto en la realización de los planos, como en la interpretación de estos símbolos, por lo que fue necesario realizar una serie de capacitaciones de procesos de soldaduras y simbología al personal del área de

diseño y producción de la empresa. Esta actividad fue recibida de forma muy positiva, generando gran impacto, principalmente en el personal encargado de la soldadura. Posteriormente, a lo largo del proyecto, se realizó el acompañamiento del personal de diseño y planta, recalcando el uso adecuado de la simbología.

B. Tipificación de las juntas a fabricar

Para la fabricación de tanques de almacenamiento de materias primas las juntas soldadas deben ser del tipo CJP, lo cual corresponde a juntas de penetración completa. Bajo los documentos encontrados, así como lo observado en planta, se estableció que las juntas más empleadas en la fabricación de los tanques son: Para la fabricación del cilindro se emplean láminas curvas que posteriormente forman una junta a tope. Dependiendo del espesor de la lámina, en la junta se realiza una preparación de bisel en V o en X, para espesores menores o mayores a 4,5 mm, respectivamente. Para las tapas laterales es empleada una junta de a tope, para lo cual se utilizan láminas de 6,0 mm o 8,0 mm. Esto implica la preparación de la lámina de mayor espesor mediante un desbaste, de modo que ambas láminas tengan el mismo grosor en la junta a tope. En ambos casos, se emplea una abertura de raíz de 1/16". Dos ejemplos de las juntas descritas se presentan en la Figura 25.

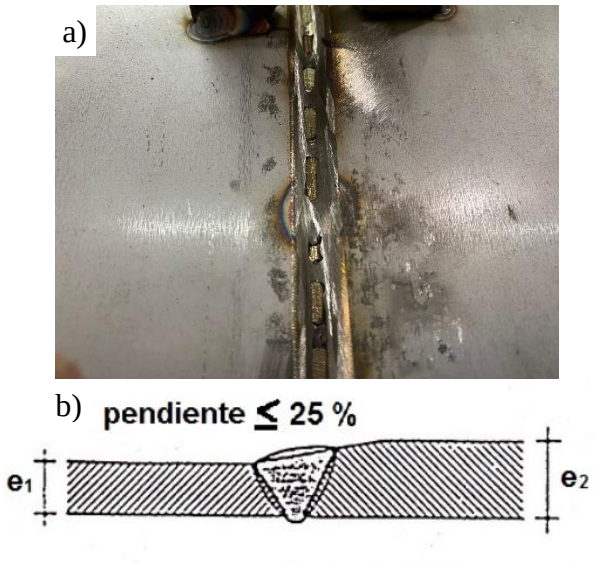


Figura 25. a) Junta a tope en lámina 3,0 mm para la fabricación del cilindro y b) junta a tope con preparación de lámina para la unión de las tapas laterales.

Entre estos dos sistemas: cilindro y tapas laterales, se determinó que el primero sería priorizado. Por tanto, para el proyecto en cuestión, fue considerada la fabricación de juntas a tope para espesores menores a 4,5 mm. Como el proceso de soldadura cambia de GTAW a láser, las características de la junta son diferentes, ya que el proceso láser no admite bisel ni abertura de raíz. Siendo así, para el proyecto en cuestión las juntas a tope serán fabricadas con bisel cuadrado y sin abertura de raíz, lo cual, en primera medida, ya es benéfico, pues se reduce el tiempo de preparación de la junta.

C. Instalación de la fuente de soldadura láser

Durante la instalación del equipo de soldadura láser en la planta, se procedió con el ensamblaje de los componentes y la configuración inicial. La ubicación del equipo en el área de trabajo requirió adecuaciones tanto en el espacio físico como en las conexiones eléctricas. Se configuraron conexiones específicas para un voltaje de operación del equipo; para ello se hicieron pruebas de funcionamiento las cueles permitieron ajustar parámetros clave como conexiones eléctricas, extensiones para el traslado del equipo en la planta, así como la necesidad de puesta a tierra que fuera individual así evitar alarmas en el equipo.

Así mismo, se añadieron barreras de seguridad alrededor del equipo, con señalización visible para advertir de los riesgos asociados con la operación de un láser de alta potencia, lo cual contribuyó a optimizar la seguridad en el entorno de trabajo. Este proceso inicial resultó esencial para validar el desempeño del equipo en condiciones controladas y permitió observar su adaptabilidad a los requisitos de la planta. La Figura 26 presenta el equipo de soldadura ya instalado para su puesta en operación.

Finalmente, se desarrollaron manuales de uso Anexo 1 y protocolos de operación (Anexo 2) específicos para el equipo de soldadura láser. Estos documentos contienen los pasos detallados para el encendido, apagado, y mantenimiento del equipo, además de las medidas de seguridad recomendadas para el manejo de materiales y el almacenamiento de accesorios. Este esfuerzo en documentación asegura que el equipo sea operado correctamente en el futuro y reduce el riesgo de posibles fallas operativas.



Figura 26. Equipo de soldadura láser manual RayEdge 2000 W instalado.

D. Desarrollo de ensayos preliminares de soldadura

Con el objetivo de lograr soldaduras de alta calidad, se realizaron ensayos preliminares en cupones de acero inoxidable 304 de diferentes espesores. Estos ensayos se centraron en la variación de distintos parámetros del proceso de soldadura. Debido a la limitada información disponible sobre la soldadura láser por fibra, fue fundamental entender cómo cada parámetro afecta la calidad de las juntas soldadas y su integridad. Por ello, fue analizo cada parámetro y su relación con la forma y calidad de los depósitos.

La potencia del láser (P): es una variable fundamental en el control de la penetración y la calidad de la soldadura. Es la responsable de suministrar al metal base la energía necesaria para fundir el metal. Variaciones en la potencia provocan cambios significativos en la penetración y en el aporte térmico. Cuando la potencia es excesiva, puede producirse distorsiones o incluso daños en el material. En casos de baja potencia, se observa falta de penetración, lo cual compromete la integridad de la junta soldada. Para el equipo láser RayEdge 2000 W, el rango de potencias disponibles varia de 0 a 2000 W.

La frecuencia del láser (*f*): corresponde a la cantidad de pulsos emitidos por el láser, siendo que para la fuente disponible ésta oscila entre 0 y 50.000 Hz. Junto con el control de modulación de ancho de pulso (PWM), permite que el equipo funcione en modo de haz continuo o pulsado. La regulación de la frecuencia afecta directamente la cantidad de energía aportada a la pieza siendo que frecuencias más altas aumentan la energía entregada por pulso y la penetración.

Modulación de ancho de pulso (PMW): se encontró que esta variable permite controlar la potencia efectiva de entrega y la energía suministrada. La escala de control varía de 0% a 100%, donde 0% apaga el láser y 100% mantiene constante el ciclo de trabajo del láser (láser continuo) [20]. Por esta razón, se optó por mantener este parámetro siempre al 100%, para alcanzar una mayor penetración y eficiencia, aprovechando además que el equipo permite operar con esta configuración en modo de onda continua.

Patrón de deposición: el equipo dispone de dos formas de deposición denominados por punto y por línea. El primero permite precisamente la obtención de puntos de soldadura, pues mantiene el haz encendido por un periodo corto de tiempo. Es de destacar que el depósito puntual es útil en la calibración del láser y en la regulación de la distancia focal. Por su parte el modo de depósito por línea sostiene el láser encendido durante toda la operación, obteniendo depósitos de forma continua. Para la generación de cordones de soldadura fue empleado el patrón de lineal, el que cuenta con dos modos de oscilación denominados *single* y *wobble*. El primero mantiene el láser fijo mientras la segunda oscilación perpendicular a la línea de la junta (Figura 27).

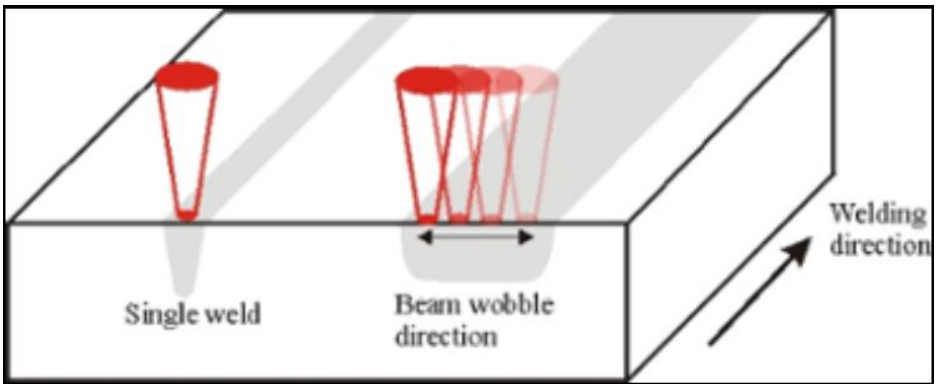


Figura 27. Patrones de oscilación en el modo de depósito de línea [13].

El patrón lineal en oscilación *wobble* permite variar tanto la frecuencia de oscilación como la amplitud, lo que resulta en un control más preciso del charco de soldadura. Esto tiene una gran incidencia en aspectos como la penetración, la geometría del charco y la calidad de la soldadura. Se observó que un aumento en el tamaño del rango de oscilación del *wobble* reduce notablemente la penetración, generando cordones más anchos pero superficiales (Figura 28). Para oscilaciones mayores, el patrón lineal es ideal para soldaduras de presentación, tal como se demuestra en Steen [14]. Por otro lado, al aumentar la frecuencia de oscilación, se mejora la presentación, se evita la formación de socavados y se incrementa el dinamismo del charco, ayudando a prevenir defectos

como la porosidad. Para los depósitos realizados en este proyecto fue utilizado el patrón de depósito en línea en modo *single*, con el fin de obtener cordones más estrechos y profundos, además, por que el bisel empleado es cuadrado.

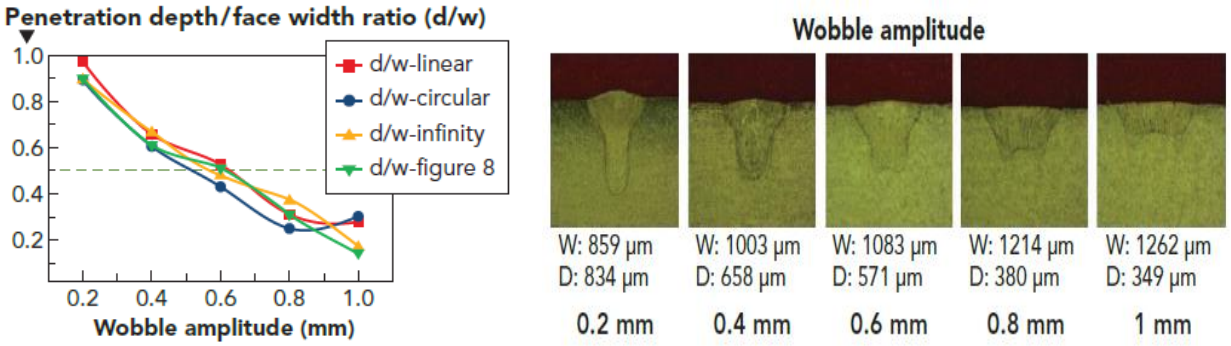


Figura 28. Efecto de las variaciones de la amplitud de oscilación en la penetración[4].

Velocidad de alimentación: corresponde a la rapidez con la que es introducir el alambre de soldadura hacia el láser, de modo que sea fundido al momento de la interacción entre ambos. La alimentación se realiza de forma automática por medio de un conductor en la parte inferior del cabezal (Figura 29). La velocidad de alimentación del metal de aporte varia de 0 a 100 mm/s, siendo que el valor empleado para los ensayos preliminares fue de 7 mm/s 11 mm/s.

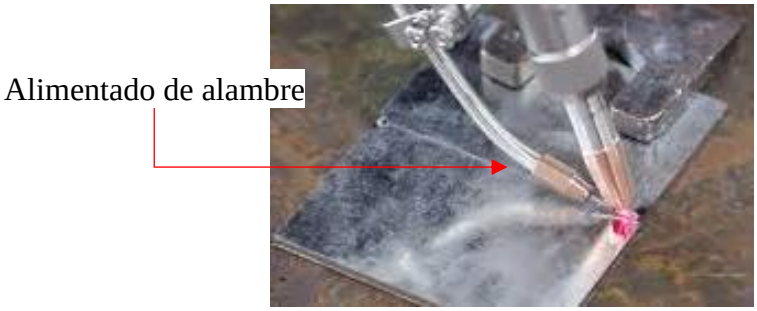


Figura 29. Sistema para la alimentación del metal de aporte.

4 https://laserwobblewelding.com/wobble-laserwelding-the-welding-revolution/wobble-laser-welding-a-real-technological-revolution-in-the-world-of-laser-welding.

Se evidenció que esta variable afecta tanto el rendimiento como la facilidad de soldadura, ya que la velocidad de aporte del alambre debe coincidir con la velocidad de desplazamiento del cabezal láser (velocidad de soldadura), lo que puede facilitar o dificultar el trabajo del operario. Además, la velocidad de alimentación tiene un impacto significativo en las características del cordón. Velocidades altas reducen la penetración y la energía transferida a la pieza, lo que puede comprometer la calidad de la soldadura. Por el contrario, velocidades muy bajas concentran demasiado el calor en un área específica, lo que puede llevar a una alta evaporación del material y generar no solo un exceso de penetración, sino también socavaciones en el cordón [14], como se observa en la Figura 30.

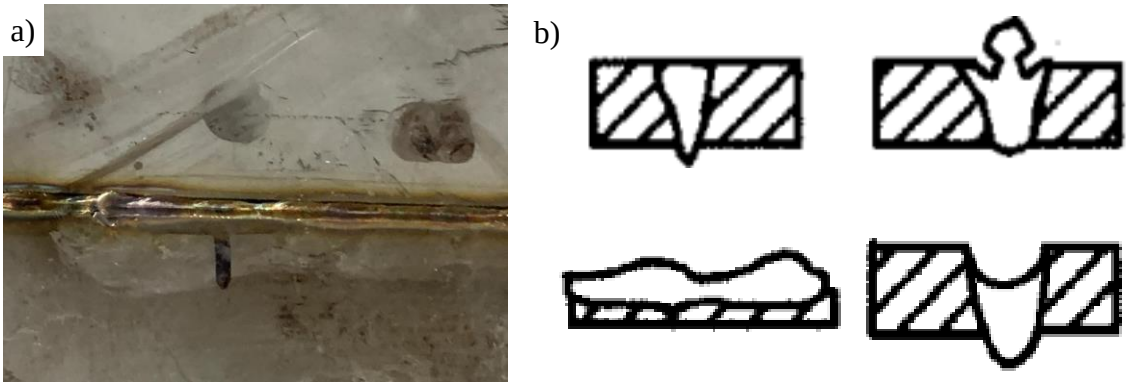


Figura 30. a) Efecto de velocidades baja de alimentación en la junta y b) esquemas de los cordones [14].

Distancia focal: la distancia focal es la variable que permite calibrar de manera óptima el resto de los parámetros del proceso de soldadura. Por esta razón, es fundamental establecer correctamente esta variable antes de ajustar otra. Una calibración incorrecta puede resultar en parámetros con valores superiores a los requeridos o, simplemente, en la incapacidad de alcanzar los objetivos de penetración esperados. Se evidenció que, para los aceros inoxidables, el punto focal debe ubicarse por debajo de la superficie de la pieza, lo que se conoce como condición de *negative defocus*. En esta configuración la penetración es mayor y el cordón más estrecho debido a la menor dispersión de los fotones. Por otro lado, cuando el foco se coloca por encima de la superficie del material, la cantidad de energía depositada disminuye, lo que puede llevar a soldaduras superficiales y a una reducción de la penetración. Este enfoque puede ser útil en aplicaciones donde solo se requiere una soldadura PJP (*partial joint penetration*) o superficial,

situaciones que se pudieron evidenciar en el trabajo de Zhang *et al.* [21]. Por tanto, la distancia focal está directamente relacionada con el espesor de la pieza a soldar.

Angulo de incidencia: durante el proceso de soldadura, se observó una variación en la calidad de los cordones al modificar el ángulo de incidencia entre el cabezal láser y la pieza. Esto dejó en evidencia que este aspecto es crucial para el control del proceso. Por lo tanto, se realizó una evaluación de esta variable, manteniendo fijas las demás. Se estableció que el rango óptimo de se ubicaba entre los 45° y 80°, donde se lograron resultados más consistentes y de mayor calidad en los cordones de soldadura (Figura 31).

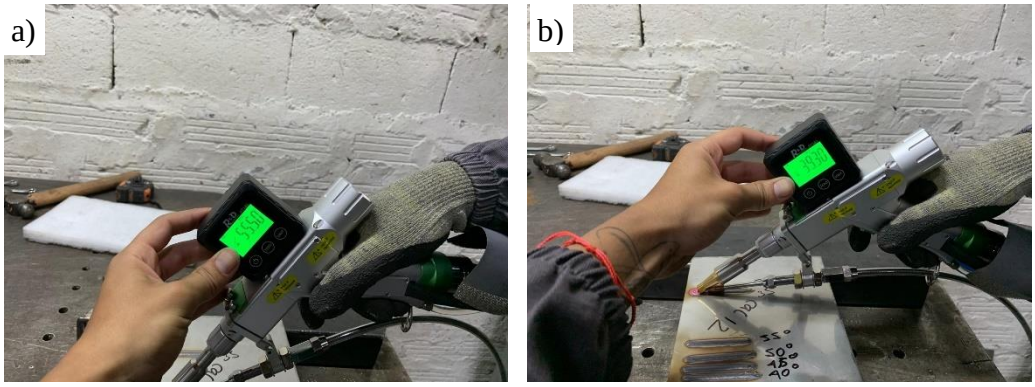


Figura 31. Pruebas de ángulo efectivo entre el cabezal de soldadura y el material base.

Con la variación del ángulo se encontró que ángulos menores a 45° producen menor penetración, debido a que se produce mayor reflejo del haz [22]; mientras, ángulos cercanos a 90° resulta nocivo al perjudicar la maniobrabilidad, así como al promover la formación de socavados [23].

Gas de protección: A diferencia de otros procesos convencionales, mencionados anteriormente, en la soldadura láser por fibra el gas solo se emplea como protección del charco de soldadura. Por cuenta de esto, es posible soldar utilizando gases como el nitrógeno y el helio, que no son comunes en otros procesos debido a su alto potencial de ionización [5], pero que son efectivos aislando el metal fundido de la atmosfera. Con la intención de verificar la viabilidad del uso de otros gases con la intención de reducir costos, manteniendo las características del depósito como la penetración y la presentación, se emplearon gases de protección de 100% argón (Ar) y 100% nitrógeno (N_2). Los resultados corroboraron que el tipo de gas no afecta las condiciones de

los depósitos, aunque se observó un pequeño cambio en la coloración del cordón (Figura 32). La Figura 32a muestra que la penetración no se vio alterada con el cambio del gas, así mismo muestran las Figura 32 b y c, donde las condiciones del cordón solo varia un poco en la coloración, pero sin discontinuidades visibles. Durante estas pruebas, se evidenció que el consumo de nitrógeno era aproximadamente el doble que el de argón, bajo las mismas condiciones de flujo.

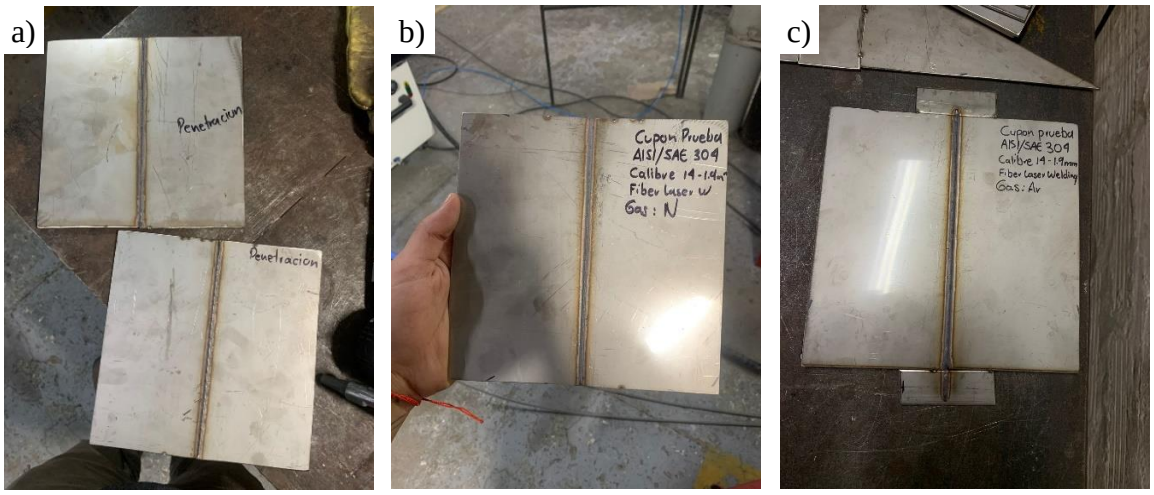


Figura 32. Cupones fabricados con Ar y N_2: a) penetración y b) presentación con N_2 y c) presentación con Ar.

En las primeras tres pruebas, todos los parámetros se mantuvieron constantes excepto el tipo de gas. La prueba consistió en aplicar soldadura hasta consumir 100 psi de gas y luego medir la cantidad de soldadura aplicada. Se observó que con argón se lograba aplicar el doble de soldadura que con nitrógeno. Sin embargo, considerando que el costo del nitrógeno es casi la mitad del del argón, surgieron expectativas positivas en cuanto a la reducción de costos Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de prueba de consumo de gases.

	Tipo de gas	Presion comercial	Costo por pipeta	Presion de suministro del gas (Psi)	Consumo gas(Psi)	Cantidad soldaduda (mm)	Valor unitario (gas)	Valor total consumo
1	Nitrogeno	2500	$ 100.000	36	100	4000	$ 40,00	$ 4.000,00
	Argon	2300	$ 220.000	36	100	8000	$ 96,00	$ 9.565,00
2	Nitrogeno	2500	$ 100.000	36	100	5000	$ 40,00	$ 4.000,00
	Argon	2300	$ 220.000	36	100	3000	$ 96,00	$ 9.565,00
3	Nitrogeno	2500	$ 100.000	36	100	2018	$ 40,00	$ 4.000,00
	Argon	2300	$ 220.000	36	100	4600	$ 96,00	$ 9.565,00
4	Nitrogeno	2500	$ 100.000	40	1800	38724	$ 40,00	$ 72.000,00
	Argon	2200	$ 220.000	40	900	38724	$ 100,00	$ 90.000,00

Para evaluar de manera más concreta la viabilidad de ambos gases, se realizó una cuarta prueba en una aplicación en campo, soldando una cañuela de aproximadamente 39 metros lineales (Figura 33). Un costado se soldó con argón y el paralelo con nitrógeno, midiendo el consumo final de cada gas. Nuevamente, se evidenció que el consumo de argón era aproximadamente la mitad en comparación con el nitrógeno.



Figura 33. Soldadura de cañuela empleando Ar y N_2 como gases de protección.

En la soldadura láser por fibra, existen varios parámetros que, como se evidenció, contribuyen a la optimización del proceso y a la obtención de una soldadura de alta calidad. Cada uno de estos parámetros afecta directamente la penetración, la apariencia y las propiedades mecánicas de la soldadura. La variación de cada parámetro permitió obtener configuraciones preliminares que cumplen con los requisitos de penetración, presentación y ausencia de discontinuidades visibles. Para ello, y tal como se describió en la metodología, se realizaron pruebas en diferentes espesores, variando una variable a la vez, hasta obtener el conjunto de parámetros consolidados por espesor, descritos en la Tabla 6.

Tabla 6. Variables establecidas en los ensayos preliminares.

N° proceso	1	2	3	4	5	6	7	8
Posicion	Todas	Todas	Todas	Todas	Todas	Todas	Todas	Todas
Junta	a tope	fillete	a tope	fillete	a tope	fillete	a tope	fillete
Alimentacion	si	si	si	si	si	si	si - doble	si - doble
Material	Acero inoxidable 304	Acero inoxidable 304	Acero inoxidable 304	Acero inoxidable 304	Acero inoxidable 304	Acero inoxidable 304	Acero inoxidable 304	Acero inoxidable 304
espesor (mm)	1,9	1,9	2,5	2,5	3	3	4,5	4,5
Potencia (W)	1275	850	1680	1100	1600	1400	2000	1600
Porcion de ocupacion del laser (%)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Frecuencia (Hz)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Amplitud de oscilacion (mm)	2,5	3,5	2,5	3,5	2,5	3,5	2,5	3,5
Frecuencia oscilacion (Hz)	60	60	60	60	60	60	60	60
Velocidad alimentacion(mm/s)	10	5	10	8	8	8	5	5
Flujo de gas (Psi)	36	36	36	36	40	40	45	45
Diametro alembre (mm)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Punto Focal (mm)	1,9	1,9	2,5	2,5	3	3	4,5	4,5

E. Desarrollo de soldaduras finales y construcción de procedimientos

Una vez definidos los parámetros, se fabricaron los cupones de soldadura finales y se evaluaron sus propiedades mecánicas conforme a los requisitos de la norma para la calificación del procedimiento. Se fabricaron ocho cupones según se describe en la Tabla 7.

Tabla 7. Distribución de cupones para tracción.

Marcación	**Espesor (mm)**	**Gas de protección**
P1	3,0	Nitrógeno
P2		Nitrógeno
P3		Argón
P4		Argón
C1	1,9	Nitrógeno
C2		Nitrógeno
C3		Argón
C4		Argón

La Figura 34 muestra los resultados de los ensayos de tracción de los cupones P1, P2, P3 y P4, donde se evidencia que ninguna de las probetas presentó fallas en la soldadura; las fallas ocurrieron en la zona afectada térmicamente (ZAT), lo cual es normal en las soldaduras por arco

convencional, ya que en esta región se produce el crecimiento de grano austenítico, reduciendo la resistencia a la tracción [24].

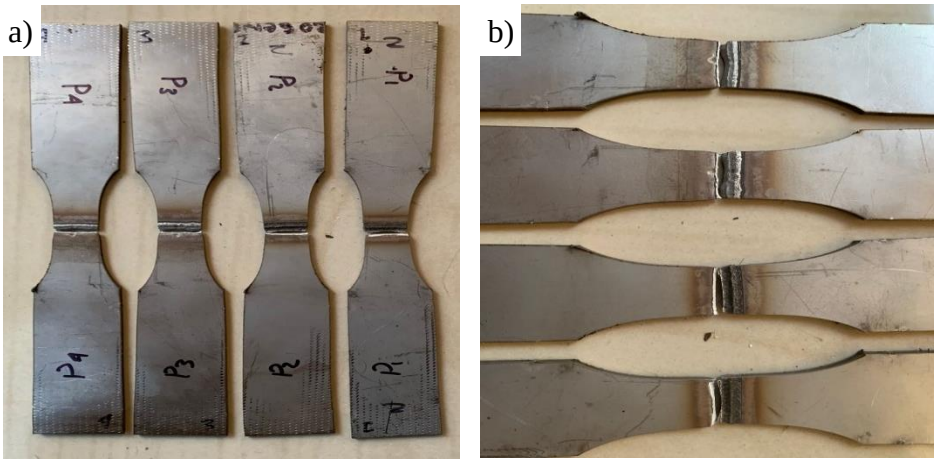


Figura 34. Resultados prueba de traccion cupones 3,0 mm.

Así mismo, los resultados para los cupones C1, C2, C3 y C4 muestran que las fallas ocurrieron lejos del área de soldadura, lo cual es positivo, ya que se busca que el cordón de soldadura presente propiedades mecánicas superiores a las del metal base.

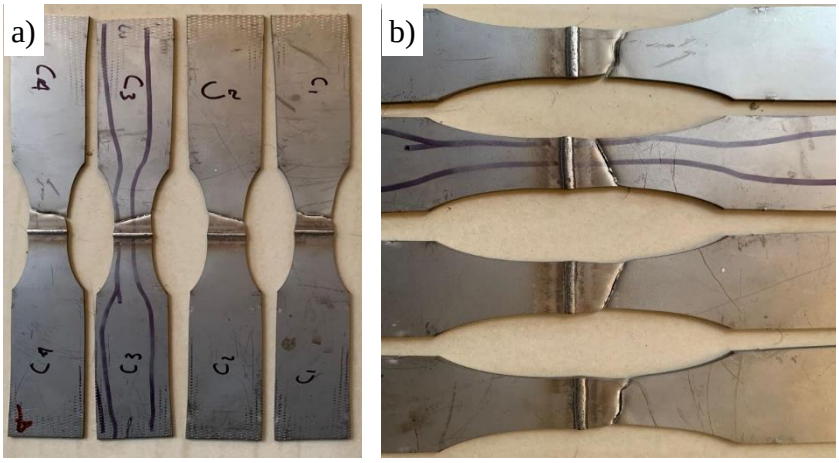


Figura 35. Resultados prueba de traccion cupones 1,9 mm.

A pesar de que la falla en la ZAT en la región aledaña a la línea de fusión debido al crecimiento de grano es la causa probable en las soldaduras por fusión, para la soldadura láser se esperaba un comportamiento diferente ya que el crecimiento de grano se ve significativamente restringido por el menor aporte térmico de este proceso.

Los criterios de aceptación de la ASME indican que, para los aceros inoxidables 304 (A240), la resistencia mínima permitida en el ensayo de tracción es de 515 MPa. Como se observa en la Figura 36 y Figura 37, los valores obtenidos para las probetas P y C son satisfactorios, ya que todas presentan valores de falla superiores a los exigidos. Específicamente los valores alcanzados están entre 645 y 702 MPa para las juntas P, 630 y 649 MPa para las C. Autores como Kumar *et al*. [25] demuestras el efecto del aporte térmico en el crecimiento de grano y la resistencia a la tracción de la junta, siendo que, para aportes térmicos de 2,56, 2,78 y 3,02 kJ/mm, obtiene resistencias de 657, 639 y 622 MPa, en acero inoxidable 304. Un caso particular es la soldadura por fricción con pin, conocida como FSW, la cual se caracteriza por su bajo aporte térmico y la formación de una estructura de grano refinada. En este caso Siddiquee *et al*. [26] obtuvieron juntas con resistencia (UTS) de 631 a 677 MPa, muy superior a los resultados presentados por Kumar *et al*. Los resultados de la soldadura láser se demuestran muy favorables, ya que alcanzan valores superiores a los reportados por Kumar *et al*. y cervanos a los alcanzados en FSW reportados por Siddiquee *et al*.

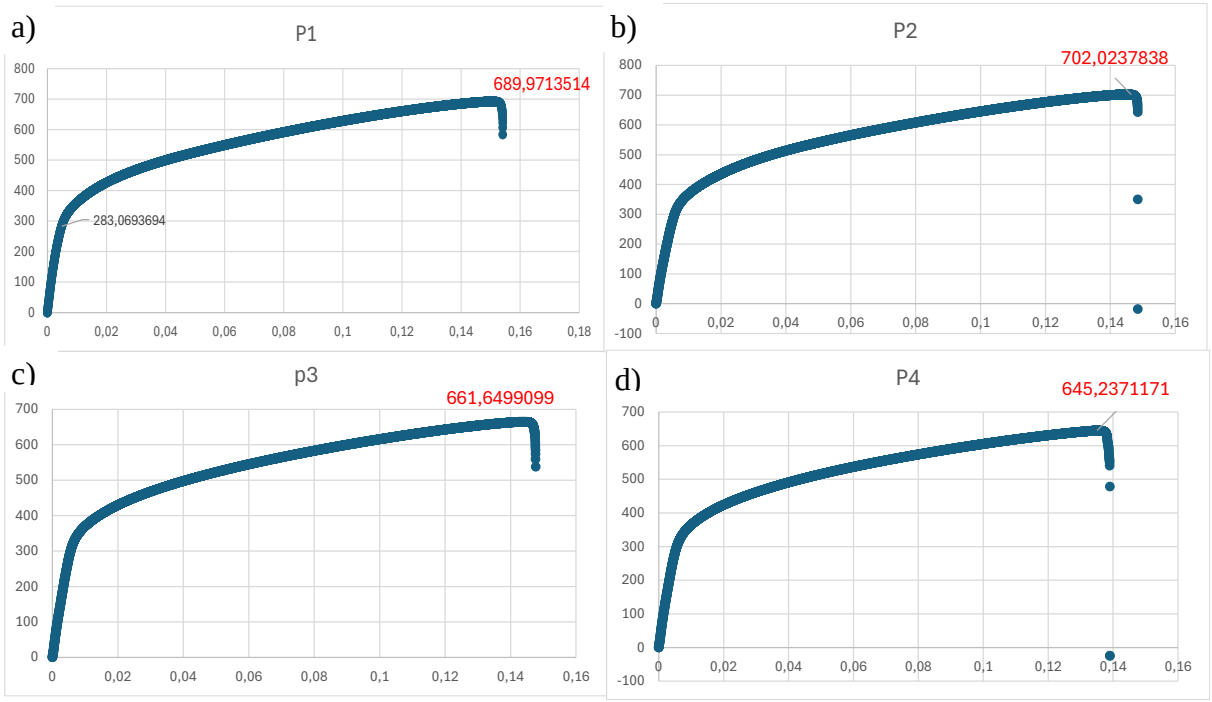


Figura 36. Resultados prueba de tracción de las juntas de 3,0 mm.

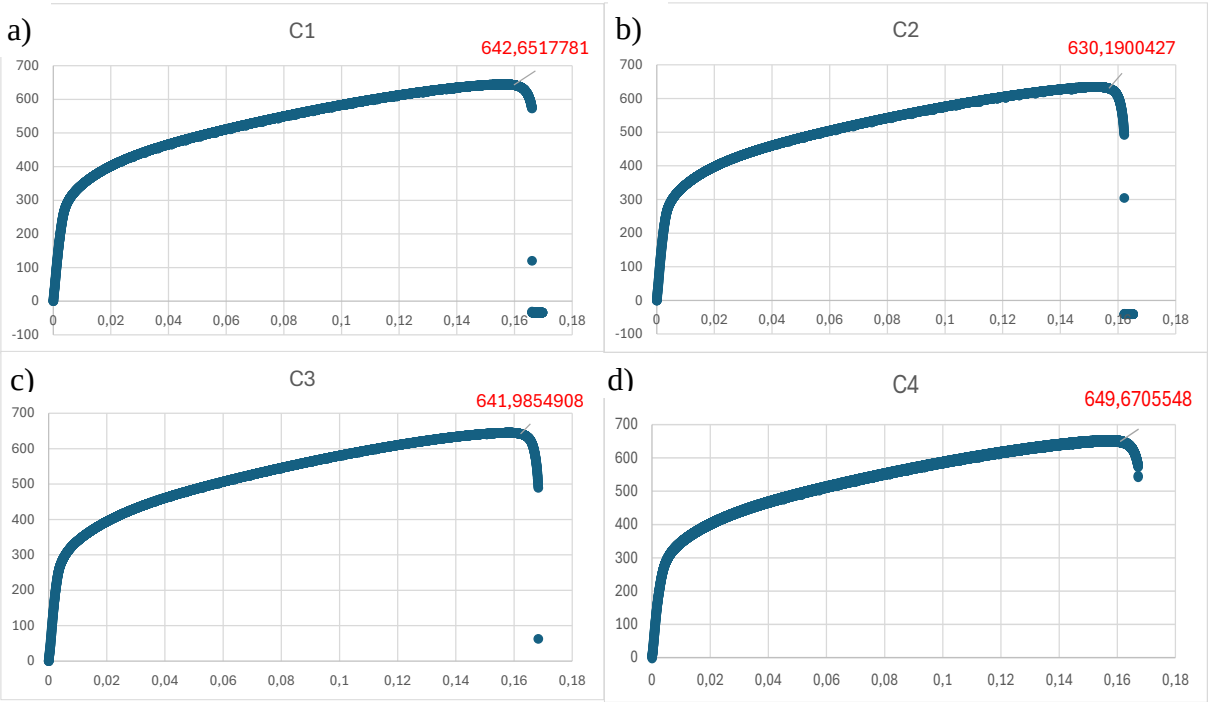


Figura 37. Resultados prueba de tracción de las muestras de 1,9 mm.

De manera similar, los resultados de las pruebas de doblez guiado, tanto de cara como de raíz, fueron satisfactorios (Figura 38). Los resultados de estas pruebas para las probetas tanto las P como la C reflejaron sanidad del cordón de soldadura sin reflejar alguna indicación abierta a la superficie, como lo demuestra las muestras de la Figura 39.



Figura 38. Prueba de dobles dispositivo diseñado



Figura 39. Resultados de los ensayos de doblez de cara y de raíz.

En resumen, los resultados obtenidos en las diferentes pruebas se presentan en la Tabla 8, donde se observa que cumplen con los requisitos de la norma y superan los valores mínimos indicados.

Tabla 8. Resultados pruebas.

Resistencia a la traccion Acero inoxidable 304 (Mpa)			515	Valor ASME					
Espesor cupon soldadura	Probeta	Tipo de pruebas y resultados							
			Falla (Mpa)						
1,9mm - Nitrogeno	1	Traccion	649,67	Dobles cara	Sin Indicaciones	Dobles raiz	Sin Indicaciones	Radiografia	OK
	2		643,93						
1,9mm -Argon	1	Traccion	630,82	Dobles cara	Sin Indicaciones	Dobles raiz	Sin Indicaciones	Radiografia	OK
	2		642,83						
3 mm - Nitrogeno	1	Traccion	689,97	Dobles cara	Sin Indicaciones	Dobles raiz	Sin Indicaciones	Radiografia	OK
	2		702,67						
3 mm - Argon	1	Traccion	664,53	Dobles cara	Sin Indicaciones	Dobles raiz	Sin Indicaciones	Radiografia	OK
	2		645,23						

Aunque, el estándar no exige la realización de ensayos no destructivos, se desarrollaron pruebas de radiografía para tener un panorama más claro sobre la calidad y sanidad de los cordones de soldadura. Los resultados de estas pruebas indican que la soldadura aplicada no presenta defectos según la norma, y que cumple con los parámetros requeridos de penetración.

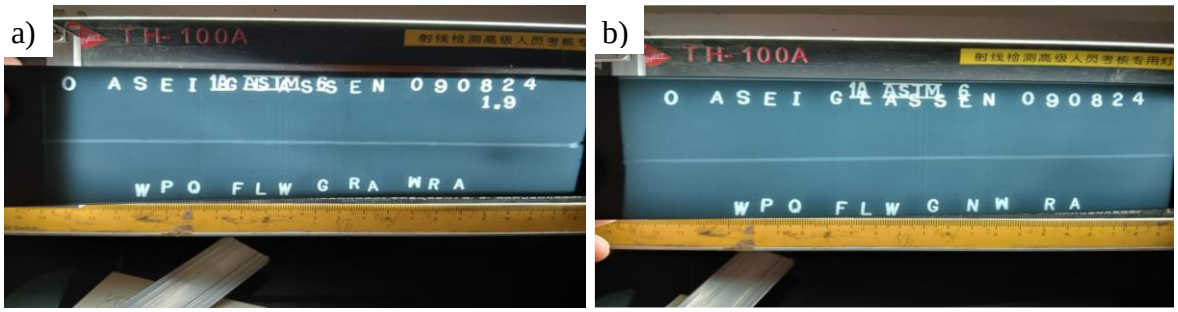


Figura 40. Muestras prueba radiográfica: a) placa para 1,9 mm y b) placa para 3,0 mm.

Finalmente, con los resultados obtenidos de los parámetros utilizados y los cupones soldados, se llevaron a cabo pruebas en equipos fabricados por la empresa Grupo Lassen, tanto con el proceso GTAW como con LSW, con el objetivo de comparar las ventajas en rendimiento de cada proceso. Los resultados obtenidos en la fabricación de varios equipos se presentan en la Tabla 9, donde se refleja una disminución de hasta un 90% en el tiempo de soldadura por metro lineal en algunas aplicaciones.

Tabla 9. Tiempos medidos en la fabricación de equipos.

Aplicaciones logradas				
Soldaduras a tope				
Espesores	Aplicación	Proceso	Metro - soldadura	
			Tiempo (min)	Disminucion
Cal 14 (1,9)	Soldadura Cubierta (Perimetral)	GTAW	12	-55%
		LASER	5,44	
	Soldadura Cubierta (longitudinal)	GTAW	14,43	-68%
		LASER	4,6	
3mm	Soldadura de Ranura (TANQUES PULMON)	GTAW	35	-84%
		LASER	5,5	
4.5 mm	Soldadura de ranura (Fondo PPG - empalme)	GTAW	66,4	-90%
		LASER	6,36	
4,5 mm - 3mm	Cañuela	GTAW	4,44	-50%
		LASER	2,2	

VIII. CONCLUSIONES

Este trabajo se enfocó en la determinación y estandarización de las variables del proceso de soldadura láser por fibra en diferentes tipos de juntas, específicamente en aquellas utilizadas en la empresa Grupo Lassen. Los resultados obtenidos demuestran que es un proceso de alta aplicabilidad en la industria, capaz de cumplir con requisitos normativos y ofrecer resultados confiables.

Las pruebas realizadas en Grupo Lassen evidencian que el equipo de soldadura es adaptable, no solo en aplicaciones de bajo espesor, sino también en industrias con exigencias mayores. Esto se reflejó en la construcción de equipos conforme a la norma ASME BPVC, donde se logró una adecuada integración las variables del proceso, así como de los requerimientos eléctricos, de espacio y movimiento de los equipos. Además, se observó una buena adaptación del personal al proceso. Los resultados obtenidos también indican la posibilidad de establecer parámetros estables y estándar según las necesidades específicas. Estos parámetros demostraron efectividad en términos de penetración, presentación y rendimiento, con una mejora en los tiempos de soldadura de más del 50%. Cabe destacar que, además de reducir el tiempo en soldaduras por metro lineal, se observó la posibilidad del uso de gases de menores valor como lo es el N_2, lo cual disminuye significativamente los costos operativos.

Las diferentes pruebas aplicadas, tanto ensayos no destructivos como ensayos de resistencia mecánica, proporcionaron información clave para evaluar la evolución de las juntas de soldadura. Estos ensayos permitieron no solo la obtención de parámetros preliminares, sino también la evaluación de las juntas finales, lo que confirmó la viabilidad de implementar los parámetros en los espesores calificados. Los resultados obtenidos en las pruebas de tracción y de dobles no solo respaldan los parámetros establecidos, sino que también posibilitan la estructuración de un procedimiento mediante la generación de documentos esenciales, como el Registro de Calificación del Procedimiento de Soldadura (PQR) y las Especificaciones del Procedimiento de Soldadura (WPS).

Finalmente, este estudio proporciona razones sólidas respaldadas tanto en fundamentos teóricos y normativos como en resultados óptimos obtenidos en los ensayos realizados. Esto demuestra la viabilidad del proceso de soldadura en aplicaciones de acero inoxidable y en industrias con altos estándares de exigencia. Los resultados evidencian un impacto significativo en el

rendimiento, asegurando calidad y estandarización en el área de soldadura. Además, se destaca la capacidad del proceso para estandarizar variables, así como las facilidades que ofrece para gestionar dichas variables de manera eficiente.

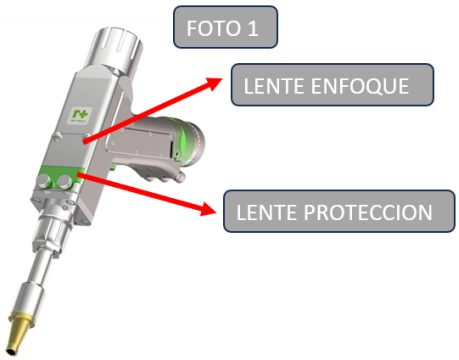
ANEXO 1

HOJA DE ELEMENTOS / JES-JOB ELEMENT STANDARD MANTENIMIENTO

Símbolos Operación · Chequeo de Calidad · Seguridad para el operador · Operación Crítica (C)		**Elaborado por:**	
		ESTIVEN PEREZ	
CONJUNTO (CÓDIGO ARTICULO	**CONJUNTO (DESCRIPCIÓN PT):**	**Equipo Autónomo:**	
		N/A	
Código:	**Descripción artículo:**	**FECHA ELABORACIÓN:**	9/10/2024

Símb,	Paso N°	Paso Principal	Punto Importante (Cómo)	Con que / (frecuencia)
C	1	PREOPERACION MANTENIMIENTO PISTOLA	Tapar con cinta de enmascarar cada que se quite uno de los lentes **FOTO 2**	Guantes de nitrilo, alchol isopropilico, pera de aire (Cada que sea necesario limpiar el lente)
C	2	CHEQUE ESTADO LENTE FOCAL	Verificar a la luz si el lente tiene presencia de suciedad -Limpiar con pañuelo humedesido con alcohol isopropilico -Quitar exesos y presencias de motas con pera de aire -Verificar a la luz que la superficie este libre de suciedad, de no ser posible limpiarce debe ser cambiado **FOTO 1 y FOTO 3**	Guantes de nitrilo, alchol isopropilico, pera de aire (Cada que sea necesario limpar el lente)
C	3	CHEQUE ESTADO LENTE PROTECTOR	Verificar a la luz si el lente tiene presencia de suciedad -Limpiar con pañuelo humedesido con alcohol isopropilico -Quitar exesos y presencias de motas con pera de aire -Verificar a la luz que la superficie este libre de suciedad, de no ser posible limpiarce debe ser cambiado **FOTO 1 Y FOTO 4**	Guantes de nitrilo, alchol isopropilico, pera de aire (Semanal)
	4	LIMPIEZA GENERAL	Sopolar con pistola de aire internamente el equipo, el sistema de alimentacion y el transformador. **FOTO 5**	Pistola para soplar (Dos veces por semena)
	5	CAMBIO DE AGUA REFRIGERANTE	Cambiar el agua del refigerante -Drenar el agua existente en su totalidad - Con el dranaje cerrado, remover el tapon de ingreso y llenar hasta el indicador color verder con agua nueva (*desionizada*) - Encender el equipo y ajustar el nivel del agua de ser necesario **FOTO 6**	Agua desionizada (4 a 6 meses maximo)
	5			

ANEXO FOTOGRAFICO 1













ANEXO 2

HOJA DE ELEMENTOS / JES-JOB ELEMENT STANDARD OPERACIONAL

Símbolos Operación · Chequeo de Calidad · Seguridad para el operador · Operación Crítica (C)		**Elaborado por:**	
		ESTIVEN PEREZ	
CONJUNTO (CÓDIGO ARTICULO	**CONJUNTO (DESCRIPCIÓN PT):**	**Equipo Autónomo:**	
		N/A	
Código:	**Descripción artículo:**	**FECHA ELABORACIÓN:**	9/10/2024

Símb,	Paso N°	Paso Principal	Punto Importante (Cómo)	Razón (Por qué)
	1	CALIBRACION DEL LASER	Verificar que el punto de salida del laser se encuentre centrado, se pude verificar desde la configuracion, lente galvo en el panel de control. FOTO 1 **NOTA**: Tener apagado interruptor laser ubicado en el panel de control hasta la operacion	Garantizar la seguridad del usuario y funcionamiento del equipo
	2	GAS DE SUMINISTRO	Verificar que la valvula de alimentacion del gas de proteccion se encuentre funcionando. (activar interruptor del gas) Colocar la presion del cilindro de gas entre 35 - 45 psi **FOTO 2**	Garantizar el correcto funcionamiento del equipo
	3	CALIBRACION DEL FOCO	Colocar el modulo de extencion ubicado en la pistola en el espesor que sea desea sodar. **Acero Inoxidables**: entrar la extension hasta el valor del espesor **FOTO 3 y FOTO 4**	Garantizar el correcto desarrollo del proceso
	4	SELECCIÓN DE LOS PARAMETROS	Llamar los parametros que se desean usar en la operación según el espesor del material y la tabla de procesos **FOTO 5**	Garantizar el correcto funcionamiento del equipo
	5	CALIBRACION FUENTE ALIMENTACION DE ALAMBRE	Colocar el velocidad de alimentacion bajo lo requerido en la tabla de proceso del paso N.4	Garantizar el correcto desarrollo del proceso
	5	INICIAR SOLDADURA	Activar el interruptor laser Activar el interruptor de alimentacion (si es necesario)	
	6			

ANEXO FOTOGRAFICO 2













REFERENCIAS

1. Pullarcot, S. (2015). Above Ground Storage Tanks: Practical Guide to Construction, Inspection, and Testing. Reino Unido: CRC Press. ISBN 1482222035.
2. Long, B., Gardner, B. (2004). Guide to Storage Tanks and Equipment. Reino Unido: Wiley. ISBN 1860584314.
3. Eurica. Stainless steel tanks Consultado en 14 de abril del 2024. https://www.eurica.co/en/food-industry/.
4. Nassar, M. (2019). Above Ground Storage Tanks: Design, Construction, Inspection and Maintenance. Amazon Digital Services LLC - KDP Print US. ISBN 1708002839.
5. Torres López, Edwar. (2020). Soldadura por arco metálico con gas de protección (GTAW). En Fundamentos de Soldadura, Universidad de Antioquia.
6. Zhou, H., Shen, C., & Wang, J. (2022). Computational analysis of welding radial deformation of typical pressure cylindrical shell with ring stiffener. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 14, 100460.
7. Svenungsson, J., Choquet, I., & Kaplan, A. F. (2015). Laser welding process–a review of keyhole welding modelling. Physics procedia, 78, 182-191.
8. Yanfei, C., Zhengqiang, Z., Fei, Z., & Jixue, Z. (2022). Study on the Strengthening Mechanism of Rare-Earth Element Ce on the Laser Welded Joints of Magnesium Alloys. Materials Research, 25, e20220242.
9. Laser mach. Protection for your reyes against Laser ligth Consultado en 08 de septiembre del 2024. https://laserwobblewelding.com/safety-health-protection-at-laser-welding/protection-for-your-eyes-against-laser-light.
10. Cuesta Arranz, A. (2010). Tecnologia Láser: Aplicaciones Industriales. España: Marcombo. ISBN 8426717276.
11. Jassam, M. H. (2021, March). Study of Multiple Quantum Wire Hg0. 8Cd0. 2Te/CdTe Laser. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1829, No. 1, p. 012005). IOP Publishing.
12. Katayama, S. (Ed.). (2013). Handbook of laser welding technologies. Elsevier.
13. Amada (2020). Laser Welding Fundamentals. Amada Weld Tech, Inc. https://amadaweldtech.com/wp-content/uploads/2019/12/Laser-Welding-Fundamentals.pdf.
14. Steen, W. M., & Mazumder, J. (2010). Laser material processing. springer science & business media.
15. Walsh, C. A. (2002). Laser welding–literature review. Materials Science and Metallurgy Department, University of Cambridge, England, 1.
16. Padmanabham, G., & Shanmugarajan, B. (2013). Laser-Based Joining of Metallic and Non-Metallic Materials. Laser-Assisted Fabrication of Materials, 159-220.
17. https://www.amada.eu/es-es/productos/maquinas-y-automatizacion/combinadas/lc-c1-aj/

18. Assuncao, E., & Williams, S. (2013). Comparison of continuous wave and pulsed wave laser welding effects. Optics and lasers in Engineering, 51(6), 674-680.

19. Torres López, Edwar. (2020). Discontinuidades Y Defectos En Fundamentos de Soldadura, Universidad de Antioquia.

20. Fundamentals of Power Electronics. (Erickson, R. W., & Maksimovic, D. 2007). Fundamentals of power electronics. Springer Science & Business Media.) (Capítulo 7- Pag 270).

21. Zhang, M., Chen, G., Zhou, Y., & Liao, S. (2014). Optimization of deep penetration laser welding of thick stainless steel with a 10-kW fiber laser. Materials & Design, 53, 568-576.

22. Pathak, J. K., Babu, N. R., & Srinivasu, D. S. (2024). Effect of laser beam incident angle on welding of Ti6Al4V with fiber lasers. Manufacturing Letters, 41, 469-474.).

23. Wang, Y., Liu, W., Cui, H. et al. Efecto del ángulo de incidencia del haz láser en el mecanismo de formación de la soldadura y la resistencia a la corrosión del cobre T2/acero inoxidable 304. Sci Rep 14, 6824 (2024).

24. Mahajan, A., Singh, H., Kumar, S., & Kumar, S. (2022). Mechanical properties assessment of TIG welded SS 304 joints. Materials Today: Proceedings, 56, 3073-3077.

25. Kumar, S., & Shahi, A. S. (2011). Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AISI 304 stainless steel joints. Materials & Design, 32(6), 3617-3623.

26. Siddiquee, A. N., & Khan, N. Z. (2015). Friction stir welding of austenitic stainless steel: a study on microstructure and effect of parameters on tensile strength. Materials Today: Proceedings, 2(4-5), 1388-1397.