



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMA PARA EL CONTROL DEL KEY
HOLE EN SOLDADURA LÁSER ND-YAG PULSADO

POR:

YAIR VENTURA RAMÍREZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA

OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO

DICIEMBRE, 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMA PARA EL CONTROL DEL KEY
HOLE EN SOLDADURA LÁSER ND-YAG PULSADO”**

POR:

Yair Ventura Ramírez

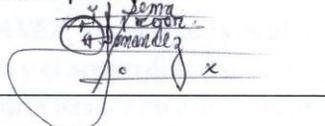
TESIS

Que Somete a Consideración del H. Jurado Examinador Como Requisito Parcial
para Obtener el Título de:

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

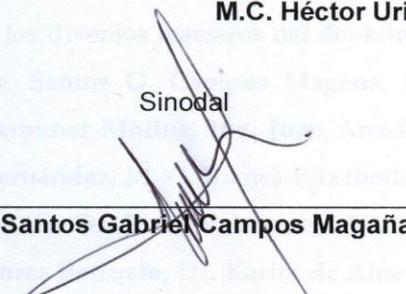
Aprobado por el Comité de Tesis

Asesor principal



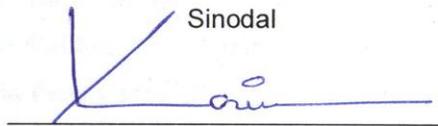
M.C. Héctor Uriel Serna Fernández

Sinodal



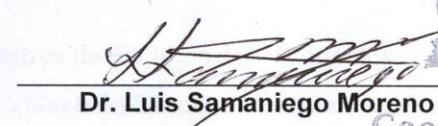
Dr. Santos Gabriel Campos Magaña

Sinodal



Dr. Karim de Alba Romenus
Universidad Autónoma Agraria
“ANTONIO NARRO”

Coordinador de la división de ingeniería



Dr. Luis Samaniego Moreno

Coordinación de
Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Diciembre de 2015

AGRADECIMIENTOS

Dedico mi tesis con todo amor y cariño.

A **DIOS PADRE** por haberme dado la vida, cuidarme, protegerme y darme la fuerza para dar todo lo mejor de mí día a día y guiarme por el mejor camino, porque sus palanes siempre han sido mejores que los míos por eso y mucho más gracias señor.

A la **UAAAN** por haberme abierto sus puertas para poder terminar mis estudios profesionales, y ser uno de los afortunados de tener una educación universitaria, gracias mi Alma máter.

A la **CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**, por darme la oportunidad de realizar mis prácticas profesionales y así mismo mi tesis, y por prestarme sus instalaciones.

Al **M.C. HÉCTOR URIEL SERNA FERNÁNDEZ**, por haberme brindado su confianza, por el gran apoyo que ejerció en mí, dedicación en el tiempo transcurrido para este proyecto y por su excelente conocimiento en el programa de Ingeniero Mecánico Agrícola.

Al **Dr. CARLOS GUEVARA CHAVEZ**, sin el esto no hubiera sido posible, gracias por el tema de tesis, por la asesoría y el apoyo desinteresado que siempre me brindo, por su excelente dirección y asesoría técnica en este trabajo de tesis.

A los diversos maestros del departamento de Maquinaria Agrícola en especial al, **Dr. Santos G. Campos Magaña, M.C. Mario Méndez Dorado, M.C. Genaro Demuner Molina, Ing. Juan Arredondo Valdez, M. C. Juan Antonio Guerrero Hernández, M. C. Blanca Elizabeth de la Peña Casas, M. C., Ing. Tomás Gaytán Muñiz, Dr. Jesús Valenzuela García, Ing. Rosendo González Garza, Ing. Jorge Flores Berrueto, Dr. Karim de Alba Romenus**, que aportaron sus conocimientos y experiencias durante el desarrollo de mi carrera.

Al igual a los maestros de distintos departamentos como al de Estadística y Cálculo en especial al **M.C. Gerardo Sánchez Martínez, Dr. Rolando Cavazos**

Cadena, Ing. Sergio Sánchez Martínez, por su gran enseñanza, sus experiencias, sus regaños, por enseñarme a controlar la presión y porque son grandes personas muy carismáticas. A los maestros del Centro de Idiomas en especial a **Ana Maria Fuentes** y **Patty Dorantes**, excelentes maestras con una gran técnica para enseñar y sobre todo por su sencillez quienes me apoyaron desinteresadamente y formaron parte de mi vida.

A mis **Compañeros** de la carrera de Ing. Mecánico Agrícola, en especial a **Juan Manuel Sanchez Flores**, **Joel Armendáriz Echeverría**, **Antuan Cano Ventura**, **Michel Torres Santoyo**, **Ismael Juárez Domínguez**, **Saúl Ávila Lang**, gracias a todos ellos por su amistad sincera y desinteresada.

A las personas que me apoyaron económica mente como: **MIS PADRES**, mi tía **Patricia**, mi prima **Yoana** y mi primo **Argenis**, mi padrino **Leonel** y mi tío **Salvador**, a ellos les estoy eternamente agradecidos por compartir parte de su sustento.

DEDICATORIA

Este trabajo es producto del esfuerzo y sacrificios de muchas personas amadas por mí, por tal motivo es para ustedes:

A mis Padres:

Sra. Francisca Graciela Ramírez Olmedo

Prof. Miguel Ángel Ventura Medel

Por el gran apoyo que me han brindado durante toda mi vida.

A mi Madre el ser más maravilloso y única, por tu amor incondicional, protección, por tus consejos, por ser mi confidente porque siempre te has preocupado por mí, por ser la mejor mamá de todo el mundo por eso y muchas cosas más este trabajo es para ti.

A mi Padre por ser una persona que supo guiar mi camino hacia el bien y siempre estuvo a mi lado en decisiones muy difíciles, por sus regaños, sus consejos, por los buenos momentos que disfrutamos juntos, porque gracias a él he logrado mis éxitos y siempre ha estado conmigo en las buenas y en las malas, por eso y más este trabajo te lo dedico.

A mis Hijos:

Anthony Yahir Ventura Hernández

Zoe Isabel Ventura Baños

Ustedes son lo más importante en mi vida, por ustedes y para ustedes es mi preparación, por ustedes hare hasta lo imposible para su bienestar, los amo mucho y son mis fuerzas de cada día, les dedico este logro.

A mis hermanos:

Jonathan Ventura Ramírez

Yareli Ventura Ramírez

Miguel Ángel Ventura Ramírez

A los tres les doy gracias por haberme brindado su apoyo en todo momento, me siento orgulloso de ser su hermano, y muy importante gracias por creer en mí siempre, mis logros serán sus logros.

A mi esposa:

Diana Baños Peláez

Por ser el gran amor de mi vida, por ayudarme a ver el mundo de otra manera, por el apoyo brindado durante mi preparación, por tu amor y cariño incondicional, porque siempre has dado lo mejor de ti y sea cual sea la situación siempre contare contigo, tu eres mi complemento y soy muy feliz por esto, por estas cosas y muchas más te dedico este trabajo.

Por ser el gran amor de mi vida, que aun pequeñita eres lo más grande que tengo, por tu amor y cariño incondicional, porque siempre has dado lo mejor de ti y que aun y la situación se torne muy mal sé que siempre contare contigo, porque contigo me siento completo y muy feliz por esto y muchas cosas más este trabajo también es para ti mi peque.

A toda mi familia y personas que me apoyaron quienes no menciono para no omitir a alguien pero ustedes saben que de corazón les agradezco su interés, palabras y consejos que me dieron y esto es por ustedes.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	I
DEDICATORIA	III
ÍNDICE	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
RESUMEN	XI
PALABRAS CLAVE:	XII
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	4
1.2 Propósito del proyecto	6
1.3 Objetivo general	6
1.4 Objetivos específicos	6
1.5 Hipótesis	6
II. REVISIÓN DE LITERATURA	7
2.1 Soldadura láser	7
2.2 México y tecnología laser	11
2.3 Principios del proceso	11
2.4 Ventajas y limitaciones del proceso	12
2.4.1 Ventajas:	12
2.4.2 Limitaciones:	13
2.5 Láser de estado sólido ND-YAG y de gas CO ₂	13
2.5.1 Láser de estado sólido (Nd-YAG)	13
2.5.2 Láser de gas (CO ₂)	14

2.5.3 Laser cladding-----	15
2.6 Generalidades de los parámetros y defectos involucrados -----	17
2.6.1 Generalidades de los parámetros -----	17
2.6.2 Defectos en soldaduras por rayo láser: -----	18
2.7 Efecto de la variación de voltaje, ancho de spot, y duración del pulso en la soldadura láser -----	21
2.7.1 Voltaje -----	21
2.7.2 Duración del pulso-----	22
2.7.3 Ancho de spot -----	23
2.8 Efecto del tipo y flujo de gas de protección en la calidad de la soldadura -----	24
2.8.1 Generalidades-----	24
2.8.2 Efecto del plasma-----	24
2.8.3 Variables en la aplicación y elección del gas protector -----	25
2.8.4 Influencia del caudal del gas-----	28
2.9 Soldadura láser con doble haz -----	31
2.10 Láser de un haz contra láser doble haz -----	32
2.11 Endurecimiento superficial con láser -----	33
2.12 Tratamiento superficial con adición de material -----	34
2.13 Descripción de dispositivos de distribución de polvo-----	38
2.13.1 Mecanismos dispensadores de polvo-----	39
2.13.2 Toberas-----	40
2.14 Parámetros y características del proceso-----	42
2.14.1 Parámetros de operación -----	42
2.14.2 Propiedades de la pista fundida -----	44
2.14.3 Efecto de los parámetros en el proceso-----	46
2.15 Interacción entre los materiales -----	47
2.16 Descripción del modelo de Rosenthal y su aplicación en el tratamiento de superficie--	50
2.17 Recubrimiento láser -----	51
2.17.1 Laser cladding -----	52
III. MATERIALES Y MÉTODOS -----	59
3.1 Ubicación del lugar del proyecto -----	59
3.2 Equipo y material utilizados en el proyecto -----	59
3.3 Metodología-----	61
3.3.1 Primera etapa -----	62

3.3.2 Segunda etapa	62
3.3.3 Tercera etapa	63
3.4 Cuarta etapa	66
3.5 Quinta etapa	66
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	70
4.1 Piezas para experimentación	70
4.1.1 Análisis metalográfico (replica) ASTM E-3/07, E-407/05	71
4.1.2 Análisis químico (espectrometría de emisión óptica)	71
4.1.3 Ensayo de dureza (Equotip)	72
4.2 Aplicación de la soldadura	72
4.2.1 Prueba 1 (microdureza)	73
4.2.2 Prueba 2 (microdureza)	74
4.2.3 Prueba 3 (microdureza)	76
4.2.4 Prueba 4 (microdureza)	77
4.2.5 Tratamiento superficial	78
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
VI. BIBLIOGRAFÍA	83

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2. 1 DISTINTOS PROCESOS LÁSER EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD DE POTENCIA Y TIEMPO DE INTERACCIÓN (PÉREZ, 2008). -----	10
FIGURA 2. 2 PROCESO DE SOLDADURA POR RAYO LÁSER (LBW).-----	12
FIGURA 2. 3 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO SOLDADURA POR RAYO LÁSER DE ESTADO SÓLIDO ND-YAG (BROWN, 2003). -----	14
FIGURA 2. 4 MOVIMIENTO DE LOS ELECTRONES AL SER EXCITADOS (BROWN, 2003). -----	14
FIGURA 2. 5 SOLDADURA POR RAYO LÁSER.-----	15
FIGURA 2. 6 PRIMER DISPOSITIVO LÁSER INVENTADO POR THEODORE MAIMAN.-----	16
FIGURA 2. 7 PROCESO DE REPARACIÓN POR LÁSER CLADDING DE UN ALABE DE TURBINA.-----	16
FIGURA 2. 8 PARÁMETROS Y VARIABLES IMPORTANTES DURANTE LA APLICACIÓN DE SOLDADURA LÁSER. -	18
FIGURA 2. 9 POROSIDAD POR EVAPORACIÓN.-----	18
FIGURA 2. 10 FALTA DE PENETRACIÓN EN EL MATERIAL.-----	19
FIGURA 2. 11 SALPICADURAS EN SOLDADURA.-----	19
FIGURA 2. 12 SOLDADURA CON FALTA DE FUSIÓN EN SUPERFICIE. -----	20
FIGURA 2. 13 GRIETAS EN UNA SOLDADURA. -----	20
FIGURA 2. 14 SOCAVAMIENTO EN UNA SOLDADURA LÁSER.-----	21
FIGURA 2. 15 EFECTO DEL VOLTAJE EN LA SOLDADURA LÁSER.-----	22
FIGURA 2. 16 EFECTO DE LA DURACIÓN DEL PULSO EN LA SOLDADURA LÁSER. -----	23
FIGURA 2. 17 EFECTO DEL ANCHO DE SPOT EN LA SOLDADURA LÁSER.-----	24
FIGURA 2. 18 PENETRACIÓN EN FUNCIÓN DE INCLINACIÓN DEL PLASMA. -----	25
FIGURA 2. 19 INFLUENCIA DE LA INCLINACIÓN DEL ÁNGULO DE LA BOQUILLA (TANI & CAMPANA, A., 2007). -----	26
FIGURA 2. 20 ÁNGULO DE BOQUILLA DE 0 GRADOS. -----	27
FIGURA 2. 21 ÁNGULO DE BOQUILLA 60 GRADOS. -----	27
FIGURA 2. 22 EQUIPO LÁSER CO ₂ CON UNA POTENCIA DE 6 KW. -----	28
FIGURA 2. 23 INFLUENCIA DEL CAUDAL DEL GAS (ARGÓN). -----	29
FIGURA 2. 24 INFLUENCIA DEL CAUDAL DEL GAS (HELIO). -----	30
FIGURA 2. 25 INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DEL GAS DE PROTECCIÓN.-----	31
FIGURA 2. 26 DISTRIBUCIÓN DE LA DENSIDAD DE POTENCIA HAZ DE LÁSER DOBLE. -----	32
FIGURA 2. 27 ABSORCIÓN DE LA LUZ LÁSER EN EL HIERRO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA Y LONGITUD DE ONDA (KOEBSNER, 1984). -----	34
FIGURA 2. 28 TIPOS DE TRATAMIENTOS LÁSER DISTINGUIENDO RESPECTO A LA TEMPERATURA SUPERFICIAL (FASE SÓLIDA O LÍQUIDA) Y LA ADICIÓN DE MATERIAL.-----	35
FIGURA 2. 29 A) ALEACIONES LÁSER, B) SOLUCIÓN SÓLIDA CON LÁSER, C) CLADDING LÁSER (MB=MATERIAL BASE, AM= MATERIAL DE APORTE).-----	37
FIGURA 2. 30 DISEÑO DE TOBERAS; A) TOBERA COAXIAL, B) TOBERA LATERAL. -----	41
FIGURA 2. 31 DISTRIBUCIÓN PARABÓLICA DEL FLUJO DE POLVO A LA SALIDA DE LA TOBERA. -----	42
FIGURA 2. 32 ESQUEMA DE PILETA Y PISTA FUNDIDA SOBRE EL MATERIAL BASE. -----	44
FIGURA 2. 33 DIAGRAMA DE FASES CR-FE. -----	46
FIGURA 2. 34 DIAGRAMA PARÁMETROS Y VARIABLES DEL PROCESO. -----	47
FIGURA 2. 35 CONVECCIÓN DE MARANGONI A) CON COMPONENTE NEGATIVO, B) CON COMPONENTE POSITIVO. -----	49
FIGURA 2. 36 ISOTERMA DE FUSIÓN, SEGÚN MODELO DE ROSENTHAL. -----	50

FIGURA 2. 37 GRÁFICO Z MÁXIMO SEGÚN MODELO ROSENTHAL EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA. -----	51
FIGURA 2. 38 A) LASER ALLOYING B) LASER DISPERSING C) LASER CLADDING. -----	52
FIGURA 2. 39 PROCESO ESQUEMATIZADO DE LASER CLADDING CON INYECCIÓN DE POLVO CON TOBERA LATERAL.-----	53
FIGURA 2. 40 PROCESO ESQUEMATIZADO DE LASER CLADDING CON INYECCIÓN DE POLVO CON TOBERA COAXIAL.-----	53
FIGURA 2. 41 DISTINTOS CORDONES DE CLADDING.-----	54
FIGURA 2. 42 A) ALIMENTACIÓN POR ALAMBRE. B) INYECCIÓN POR POLVO. -----	56
FIGURA 2. 43 TOBERA LATERAL. -----	57
FIGURA 2. 44 MÚLTIPLE TOBERA LATERAL. -----	58
FIGURA 2. 45 TOBERA COAXIAL. -----	58
FIGURA 3. 1 WORKSTATION DELL PRECISION M6600. -----	59
FIGURA 3. 2 SOFTWARE DE DISEÑO NX UNIGRAPHICS 10. -----	60
FIGURA 3. 3 MÁQUINA DE ALTA FRECUENCIA DEL LÁSER ND-YAG. -----	60
FIGURA 3. 4 HERRAMENTAL Y PIEZAS ELABORADAS. -----	61
FIGURA 3. 5 DISEÑO CONCEPTUAL DE CELDA. -----	63
FIGURA 3. 6 VISTA ISOMÉTRICA DE DISEÑO PARA FABRICACIÓN.-----	65
FIGURA 3. 7 VISTA LATERAL DE DISEÑO PARA FABRICACIÓN. -----	65
FIGURA 3. 8 ENSAMBLAJE DE PROTOTIPO TERMINADO.-----	66
FIGURA 3. 9 PRIMERAS PRUEBAS EXPERIMENTALES. -----	67
FIGURA 3. 10 UNIÓN A TRASLAPE CON PULSOS DE ND-YAG. -----	67
FIGURA 3. 11 ALABE MODIFICADO SUPERFICIALMENTE. -----	68
FIGURA 3. 12 ACERCAMIENTO DE ZONA REPARADA. -----	68
FIGURA 3. 13 MOLDE MODIFICADO EN LA SUPERFICIE DE DESGASTE.-----	69
FIGURA 4. 1 ANILLOS O RODILLOS DE ACERO D2. -----	70
FIGURA 4. 2 FOTOGRAFÍA DE MUESTRA DE ESPESOR DE ANILLO.-----	70
FIGURA 4. 3 CARBUROS PRIMARIOS $M_{23}C_6$ EN MATRIZ DE MARTENSITA REVENIDA. 400X. PICRAL. -----	71
FIGURA 4. 4 FOTOGRAFÍA DE SOLDADURA CON DISTINTOS PARÁMETROS.-----	72
FIGURA 4. 5 CORTE TRANSVERSAL DE PRUEBAS SOMETIDAS A ANÁLISIS. -----	73
FIGURA 4. 6 DISTRIBUCIÓN DE MICRODUREZAS EN PRUEBA 1 (EN HV CON 0.3 KG DE CARGA), 0.250 MM DE PROFUNDIDAD.-----	74
FIGURA 4. 7 DISTRIBUCIÓN DE MICRODUREZAS EN PRUEBA 2 (EN HV CON 0.3 KG DE CARGA) A 0.200 MM Y 0.700 MM DE PROFUNDIDAD.-----	76
FIGURA 4. 8 DISTRIBUCIÓN DE MICRODUREZAS EN PRUEBA 3 (EN HV CON 0.3 KG DE CARGA), 0.250 MM DE PROFUNDIDAD.-----	77
FIGURA 4. 9 DISTRIBUCIÓN DE MICRODUREZAS EN PRUEBA 4 (EN HV CON 0.3 KG DE CARGA), 0.250 MM DE PROFUNDIDAD.-----	78
FIGURA 4. 11 SUPERFICIE DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO SUPERFICIAL. -----	79
FIGURA 4. 12 SECCIÓN TRANSVERSAL DEL TRATAMIENTO SUPERFICIAL. -----	79

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2. 1 PROPIEDADES GENERALES DE UNA PISTA FUNDIDA. -----	44
TABLA 2. 2 EFECTOS REPORTADOS ENTRE PARÁMETROS OPERATIVOS Y PROPIEDADES DE LA PISTA. -----	47
TABLA 4. 1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE HERRAMENTALES PARA PRUEBAS -----	71
TABLA 4. 2 RESULTADOS DE DUREZA DE PRUEBAS DE CAMPO.-----	72
TABLA 4. 3 PARÁMETROS PARA CADA UNA DE LAS PRUEBAS. -----	73
TABLA 4. 4 RESULTADOS DE LA PRUEBA 1.-----	74
TABLA 4. 5 RESULTADOS DE PRUEBA 2.-----	75
TABLA 4. 6 RESULTADOS DE PRUEBA 3.-----	77
TABLA 4. 7 RESULTADOS DE PRUEBA 4.-----	78

RESUMEN

En esta tesis se busca el diseño y construcción de un sistema para el control de la profundidad de penetración (key hole) en soldadura láser ND-YAG pulsado para realizar tratamientos superficiales con dos tipos diferentes de aporte en polvo que se inducirán a través del tratamiento térmico superficial y buscar una difusión de las partículas depositadas para mejorar la superficie y prologar la vida en servicio del herramental con diferentes condiciones de temperatura y kilowatts, comparando los resultados obtenidos con los mismos, en cuanto a calidad del aporte y la optimización de las propiedades tribológicas. En el dispositivo experimental, el haz láser es guiado a la zona de trabajo a través de una fibra óptica de 600 μm de diámetro, acoplada a un cabezal coaxial, el cabezal está sujeto a un sistema de movimiento diseñado para esta aplicación. Por otra parte, el polvo metálico está dirigido a través del cabezal láser coaxial por medio de un alimentador de polvo, para el precalentamiento con la radiación generada se alcanza hasta 800 C. En cuanto a la aplicación potencial con aporte de hilo, se utilizó un láser de diodos, con una potencia de 1500 W. para obtener capas más profundas y manipular la superficie de tal manera que se precipiten fases fuera de equilibrio en la superficie sin la distorsión generada por otros procesos y con muy baja cantidad de esfuerzos residuales en las zonas de modificación del herramental, que son concentradores de esfuerzos naturales, para poder concentrar la mayor cantidad de energía se empleada al usar una distancia focal de 165 mm y se colocaron los herramientas a tratar térmicamente a una distancia de 125mm que. Con estas condiciones el haz láser presenta un spot rectangular de dimensiones 1.3 x 1.5 mm. Con estas consideraciones se pudo tratar térmicamente a los herramientas de manera superficial y así poder incrementar la resistencia al desgaste con aportes en polvo o hilo de aleaciones misiles con los herramientas que conformen una serie de carburos en la matriz para proveer una resistencia al desgaste muy superior y asumir la prolongación de la vida útil y los tiempos de mantenimiento de los herramientas. Por lo que el diseño del sistema de control es fundamental para lograr la concentración del haz de soldadura y favorecer el tratamiento de estos herramientas de alto carbono alto cromo.

Palabras Clave: Sistema para soldadura láser, Recubrimiento láser; Diseño para key hole; Soldadura para desgaste.

Correo electronico; Yair ventura Ramírez, yair.ventura.ramirez@gmail.com

Palabras Clave: Sistema para soldadura láser, Recubrimiento láser;
Diseño para key hole; Soldadura para desgaste.

I. INTRODUCCIÓN

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V. es un Centro Público de Investigación perteneciente al Sistema CONACYT, creado a finales de 1991, enfocada a actividades de investigación y desarrollo tecnológico bajo el concepto de mercado y con criterios de rentabilidad, por lo que se ha desarrollado un modelo de actuación innovador, el cual le permite no solo operar con autosuficiencia financiera, sino que además lograr una verdadera vinculación con el sector académico y con otros centros de investigación. Ofrece a la industria servicios especializados en el campo de los materiales, como recuperación y modificación de herramientas de acero grado herramienta por técnicas de soldadura avanzadas (Laser Welding) ubicada en el municipio de Saltillo, Coahuila con sucursales en el interior de la República Mexicana. La empresa cuenta con sistema de calidad ISO 9001 2008, certificada bajo esquemas de AWS (American Welding Society) y acreditados ante la EMA (Entidad Mexicana de Acreditación) bajo la norma NMX-EC-17025-IMNC-2006, así como un elevado cumplimiento de las normas tecnológicas del sector metal mecánico, promoviendo condiciones de trabajo adecuadas a su personal y con la misión del constante desarrollo tecnológico (COMIMSA, 2013).

COMIMSA lleva a cabo el proceso de recuperación y modificación superficial de herramientas para conformado de alto valor. La soldadura de mantenimiento y reparación, a lo largo de casi 4 años se ha estado desarrollando proyectos con el clúster automotriz de la región noreste de México con empresas del sector metal mecánico colaborando en conjunto para lograr varios desarrollos entre los que destacan: el desarrollo con Metalsa, ZF-Sachs, Magna, Martin Rea, para optimizar sus procesos de conformado (PYME, 2015).

A pesar de ser una de las aplicaciones que mayor cantidad de soldadores emplea, cuenta en sentido general con una reputación mal ganada, debido a que el soldador es a veces quien tiene la responsabilidad de intentar reparar el equipo o pieza y no cuenta con la información adecuada para poder realizar dicho trabajo.

Entre las razones por las que la soldadura de mantenimiento o reparación está carente de reconocimiento como una disciplina independiente y de incuestionable valor económico están las siguientes:

- Los ingenieros aún confían solamente en las técnicas estándar de producción y en los procedimientos disponibles.

- Son pocos los ingenieros con conocimiento en soldadura que se especializan en procesos específicamente en el mantenimiento o reparación.
- Firmas comercializadoras de consumibles de soldadura ofrecen productos que en muchas ocasiones no cumplen las expectativas esperadas, recomiendan productos inadecuados, aparentando que están ofreciendo un consejo de especialista.
- La carencia o falta de programas de entrenamiento en soldadura de reparación.
- La falta de conocimiento en técnicas laser de estado sólido como alternativa de reparación para proveer propiedades tribológicas superiores en zonas susceptibles a presentar falla (Villoresi, 2007).

Se suma a esto la falta de información experta y su divulgación. La responsabilidad de la función de la soldadura de mantenimiento y reparación es devolver al servicio con suficiente eficiencia y bajo costo, cualquier pieza agrietada o desgastada en sustitución de una nueva. En este tipo de soldadura, lo desconocido y las restricciones son los aspectos más frecuentes a encontrarse. El metal base puede no tenerse definido, la presencia de contaminantes pueden afectar los resultados, así como los esfuerzos residuales propios de la soldadura también tienen influencia en el resultado final (Villoresi, 2007).

Otro de los aspectos difíciles de contrarrestar en ocasiones es el de la accesibilidad, ya que hay que trabajar con una pieza que ya está conformada y no es el caso de una producción nueva que puede contemplar un ensamblaje por partes, además de no contar con la tecnología adecuada para obtener propiedades superiores a las del material base mediante técnicas no convencionales, buscando obtener resistencia tanto en piezas agrietadas, desgastadas o dañadas en las zonas de trabajo; estas piezas por lo general son relativamente costosas.

Las características que tienen las piezas que se recuperan; en primer lugar a la complejidad de la tecnología de fabricación, dadas las altas exigencias que requieren, que incluye procesos tales como el electro-erosivo, el uso de herramientas con control numérico, tratamientos térmicos, entre otros. Además del costo elevado del material, con relación a los aceros de más baja aleación. Teniendo en consideración lo primeramente planteado, no quedan dudas de la importancia de aumentar conocimientos y experiencias dentro del tema de la reparación de herramientas de conformado, siendo una alternativa el empleo de técnicas no convencionales como el tratamiento de herramientas con láser beam welding (Ready, Industrial Applications of Lasers, 1997)

Aunado a lo anterior, en la región existen varias empresas, tales como: Magna, Estampados Martin-Rea, Metal Work Stamping, Metalsa, Zf-Sachs entre otras donde se utilizan para la producción procesos de conformación en los que emplean herramientas, las cuales, luego de perder sus dimensiones de trabajo o sufrir agrietamiento, salen de la producción y son vendidas como materias primas a precios sumamente inferiores a su costo de producción. Esto se debe a que estas empresas no poseen procedimientos adecuados para la recuperación de este tipo de piezas. Es por ello que este trabajo de investigación se orienta a la obtención de información técnico-científica enfatizando en el mejoramiento de las propiedades mecánicas y microestructurales, por medio de tratamientos térmicos con ayuda de soldadura laser superficial, obteniendo alta resistencia al desgaste, que permita generar una base de información con vistas a enfrentar el trabajo de la recuperación y optimización de las propiedades tribológicas de herramientas de conformación en la industria nacional y proveer soluciones en la temática de modificación de las propiedades de resistencia al desgaste y el conformado de piezas de mayor dureza.

Para impulsar la competitividad y modernización del Estado de Coahuila, en la región norte en ciudades como Piedras Negras, Monclova y de México en general, COMIMSA busca apoyar a los sectores académicos, empresariales y de investigación en la detección de nuevas oportunidades de desarrollo económico, en donde la ciencia y la innovación juegan un papel importante. Deloitte (2014) hace un estudio de estos sectores es el conformado de piezas de alto valor, industria que está creciendo a ritmo acelerado en el mundo y en particular en México, país que ocupa el primer lugar en atracción de inversiones de manufactura en el mundo, con 30,000 millones de dólares en el periodo 2006-2012, superiores a las captadas por Estados Unidos, China, Rusia e India.

Un proceso de tratamiento de superficie por láser se basa en el principio del punto central (keyhole) es decir si se alcanza una alta densidad de potencia, la reducida energía trasladada al material produce una zona afectada térmicamente (ZAT) muy estrecha, con baja tensión residual y pequeñas distorsiones. Si el proceso se lleva a cabo con la presencia del keyhole se hallará un mayor grado de absorción del láser, una mejor calidad y una mayor área de la zona tratada permitiendo así la alta velocidad de enfriamiento favorece la formación de una microestructura fina, y esto normalmente causa una mejora en las propiedades mecánicas y de resistencia al desgaste (Ready, LIA handbook of laser materials processing, 2001).

De igual manera la selección del material base, diseño de componentes y diseño del tratamiento superficial (principalmente la elección de los parámetros adecuados), tienen también influencia en las características de las propiedades mecánicas y calidad superficial del tratamiento por láser, por lo anterior en el

presente tesina se muestra el análisis de los factores más importantes, que influyen en el diseño de un sistema para el control del haz de soldadura usado en el tratamiento superficial mediante el proceso de láser Nd-YAG a aleaciones grado herramienta, con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas y tribológicas en la superficie del herramental expuesto a condiciones severas de trabajo. Para alcanzar durezas de hasta 70 HRA muy superiores a las obtenidas de los procesos de fabricación que oscilan entre los 40 y 60 HRC, con este tratamiento de laser se puede alcanzar una mayor resistencia al desgaste previendo una mayor vida al herramental, prolongando los tiempos de mantenimiento y evitando reparaciones por soldadura que tienden a fatigar la vida de este herramental que por su proceso de fabricación y características químicas y mecánicas se considera un acero de alto costo, de ahí que optimizar la vida útil de este herramental de conformado toma una importancia en el sector metal-mecánico prioritaria. Esta propuesta debe verse como un detonador, que busca invitar a las distintas instancias a participar en este esfuerzo, que tiene la intención de desarrollar la visión nacional que deberá revisarse periódicamente, generando una guía estratégica del sector del Estado de Coahuila en un motor de innovación, creador de talento e inversión, posicionándolo como modelo de alta competitividad nacional.

1.1 Antecedentes

Los láseres de estado sólido son definitivamente la tendencia actual de desarrollo tecnológico en el área de la óptica aplicada. Los láseres de neodimio: itrio-aluminio-granate (Nd:YAG) son uno de los más usados tanto en la industria como en investigación, debido a su flexibilidad, miniaturización y alta eficiencia óptica (Saunders & Shiner, 1985). Sin embargo, la utilización de este equipo es una innovación en recubrimientos por soldadura laser, por lo que no es posible encontrar una celda comercial específica para esta aplicación, y es donde se encuentra la problemática.

En el campo industrial los láseres más utilizados son los de bióxido de carbono (CO₂) y de Nd:YAG, por que los materiales que absorben sus longitudes de onda son la materia prima de los procesos industriales. Normalmente el láser se utiliza para evaporar el material a tratar, con la ventaja de no tener contacto físico directo con él, así como una alta precisión. El haz láser da como resultado una resolución que no es posible obtener con otros métodos (Saunders & Shiner, 1985).

COMIMSA se ubica en el Subsistema de Desarrollo e Innovación Tecnológica y Servicios, en el que se desarrollan líneas de investigación específicas para el sector productivo, además de ofrecer servicios de consultoría y capacitación a los

diversos sectores industriales, tales como las industrias metalmecánica y metalúrgica, de transporte, de la construcción y de energía, entre otras, proporcionando ventajas comparativas basadas en innovación tecnológica, principalmente para el desarrollo de maquinaria, equipos, procesos y sistemas. También brinda acceso a servicios de información, consultoría y capacitación (CONACYT, 2011).

Actualmente COMIMSA no cuenta con una celda especializada para utilizar soldadura avanzada (laser welding), y es muy demandada esta técnica, por lo que se da una oportunidad de desarrollar una celda prototipo. Dar una solución de desarrollo tecnológico y mejora continua en la calidad y reducción de tiempos en el mantenimiento de herramientas de alto valor para la industria del conformado de aceros grado herramienta, mediante el tratamiento térmico superficial de láser para proveer una modificación superficial dura y resistente al desgaste, prolongar la vida útil del componente al obtener altos rendimientos, prolongar los servicios de mantenimiento y reducir el número de fallas. Los avances tecnológicos en los tratamientos por soldadura laser, proveen a las industrias, algunos de los medios más eficaces para combatir el desgaste prematuro, adelantándose a la falla o al momento que el equipo deja de trabajar en sus condiciones óptimas incluso recuperarlos herramientas de desecho. De esta forma se perfecciona la disponibilidad de la maquinaria, se disminuye el costo de mantenimiento y se maximiza la vida útil, aumentar sus propiedades tribológicas para prolongar su duración en servicio.

El láser de Nd: YAG y CO₂ es uno de los más usados en los sistemas industriales. Con un sistema de movimiento es posible soldar, marcar, perforar o cortar fierro, acero, baquelita, cobre, plástico, grabar en vidrio o emplearse en el área médica. No hay duda que este tipo de rayo láser gana más terreno cada día en las aplicaciones industriales y debido a esto provoca un gran interés en investigación con la finalidad de mejorar e incrementar el número de aplicaciones.

1.2 Propósito del proyecto

Contribuir en el diseño y la implementación de un sistema para el control de la profundidad de penetración (keyhole) de soldadura láser ND-YAG pulsado para recubrimiento de herramientas; el cual a corto plazo permitirá realizar trabajos específicos y de alto valor en el área metalmecánica de la región, así como el fortalecimiento de la corporación en esta línea de servicios.

1.3 Objetivo general

- Diseño, construcción y análisis por elemento finito; de un sistema para el control de la profundidad de penetración en soldadura láser ND-YAG pulsado para recubrimiento de herramientas usado en la modificación de las propiedades mecánicas y microestructurales para obtener un incremento de resistencia al desgaste a través de tratamientos térmicos con proceso de soldadura laser superficial.

1.4 Objetivos específicos

- Diseñar en el software NX 10 la estructura y componentes para la maquina laser.
- Realizar cálculos para proponer los materiales a utilizar.
- Analizar por medio de elemento finito con el software de NX 10 el diseño final.
- Fabricación, ensamble y prueba piloto de la máquina.

1.5 Hipótesis

Mediante un dispositivo para el control apropiado de la distancia de trabajo, se puede realizar tratamientos térmicos superficiales en materiales de soldabilidad compleja, minimizando los riesgos de fragilización por medio del control adecuado del calor de entrada y zona afectada, mediante el desarrollo de tratamientos térmicos superficiales por láser ND-YAG se mejoran dichos materiales.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Soldadura láser

El proceso de soldadura por rayo láser (laser beam welding LBW) es un proceso de unión por fusión que produce la unión de materiales gracias al calor generado por un haz concentrado de luz coherente monocromática que incide sobre la unión que se va a soldar (tiene como principal característica que es capaz de concentrar una gran cantidad de energía en un pequeño punto). El láser es un dispositivo que produce un haz de luz coherente (todas las ondas están en fase) concentrado estimulando transiciones electrónicas a niveles de energía más bajos. El rayo láser se dirige mediante elementos ópticos planos, como espejos, y luego se enfoca a un punto pequeño en la pieza de trabajo empleando elementos de enfoque reflejantes o bien lentes. Los láseres más comunes en la industria son el láser de Nd-YAG (neodimio-itrio-aluminio-granate) y el de CO₂ (dióxido de carbono) (Welding Handbook, 2001).

La soldadura por rayo láser se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones como son, las transmisiones automotrices, unidades de embragues de acondicionamiento de aire, recipientes, para sellar dispositivos electrónicos, estuches de marcapasos, soldadura continua para tubos, etc. además es capaz de unir casi cualquier metal consigo mismo como los aceros al carbono, aceros inoxidables, cobre, latón y aluminio, así como materiales disímiles compatibles metalúrgicamente (Welding Handbook, 2001).

La soldadura láser, permite una alta velocidad de proceso, es una soldadura de extrema precisión (hay que tener en cuenta que se pueden conseguir anchos de cordón de 1-2 mm o incluso inferiores). Es precisamente esto lo que origina que los parámetros de soldadura deban estar muy bien controlados (Welding Handbook, 2001).

La presente investigación hace un análisis detallado del efecto que tiene cada uno de los principales parámetros involucrados en el proceso de soldadura por rayo láser. Dentro del análisis se describe los efectos que tiene la variación de los parámetros en los cambios y defectos micro y macroestructurales, de la misma forma en las propiedades mecánicas de las uniones de soldadura (Welding Handbook, 2001).

La soldadura por láser puede considerarse como una de las tecnologías emergentes, más versátiles y de mejor calidad, tanto estéticamente como estructuralmente, esto la coloca con más posibilidades de aplicación tanto en la

actualidad como en el futuro, así mismo cada vez son más las áreas de la industria donde se está utilizando (Welding Handbook, 2001).

El término “LASER” es un acrónimo de: Amplificación de Luz Mediante la Emisión Estimulada de Radiación (Light Amplificación by the Stimulated Emision of Radiation) y una vez que fue desarrollado inició utilizándose para procesos de corte de metales en función de sus anteriormente citadas ventajas, el proceso de soldadura láser logra además de penetración más profunda una mayor limpieza que la que logran los otros procesos (Welding Handbook, 2001).

Puede entregar potencias desde pocos vatios (punteros láser) hasta cercanas a 100 kW focalizado en una pequeña área, con un tiempo de interacción de entre y segundos en cualquier sustrato y a través de cualquier medio gaseoso. La diferencia del láser con respecto a las otras formas de radiaciones electromagnéticas es principalmente la coherencia temporal y espacial, que le otorga su capacidad para propagarse por una línea recta (Khajepour, 2007).

El fenómeno físico del láser se basa en la mecánica cuántica. En un átomo o molécula, los electrones al experimentar una transición energética entre dos estados permitidos, absorben o emiten un fotón de energía radiante proporcional a la diferencia de energías entre los dos estados (Saunders & Shiner, 1985).

En el modelo de láser se distinguen tres procesos elementales:

- *Absorción estimulada:* Un átomo o molécula de baja energía, absorbe un fotón y se produce una transición electrónica, situándose en un estado de mayor energía (menos negativa).
- *Emisión Espontánea:* Un átomo o molécula excitada emite un fotón, produciendo una transición electrónica, reduciendo su energía (más negativa).
- *Emisión Estimulada:* Un átomo o molécula excitada realiza una transición electrónica forzada por un fotón incidente, la transición libera otro fotón idéntico en fase, dirección y estado de polarización, obteniendo dos fotones con igual energía, dirección y frecuencia (Pérez, 2008).

Para poder lograr una emisión láser utilizable, son necesarios tres elementos fundamentales: un medio activo compuesto por átomos y/o moléculas, un sistema óptico amplificador llamado resonador óptico y un proceso de excitación para traspasar energía a las moléculas. La emisión del haz láser, se produce por un efecto en cadena, cuyo origen se remonta a la emisión espontánea de fotones en todas direcciones producto de un cambio del nivel energético de los electrones de

las moléculas o átomos del medio activo. Este salto es originado por la estimulación de dicho medio a través de una fuente externa de energía. Los fotones así generados, viajan por el eje del sistema óptico, reaccionando con otras moléculas y generando un segundo fotón, provocando la amplificación del frente de onda electromagnético a medida que los fotones atraviesan el medio activo desplazándose dentro del resonador óptico (Pérez, 2008).

El resonador óptico es básicamente un tubo con dos espejos en sus extremos. Uno de ellos, con una reflectividad total, refleja los fotones promoviendo la excitación de las moléculas y amplificando la emisión estimulada hasta llegar al extremo del resonador óptico donde se encuentra el segundo espejo, con reflectividad parcial, el cual deja salir parte de los fotones en forma de un haz láser que puede ser guiado mediante ópticas generalmente fabricadas de ZnSe, GaAs o CdTe y espejos fabricados en cobre o revestidos en oro, dada su gran reflectividad (Nishimoto, 1992).

El láser más utilizado en aplicaciones industriales es el de CO₂. Funciona con una mezcla de gases a baja presión la cual se somete a una descarga eléctrica para formar un plasma. Se excita la molécula de N₂ a través de una descarga eléctrica, su energía se traspassa al CO₂ en forma de colisiones entre las moléculas, aumentando de nivel energético (absorción estimulada). La molécula en estado excitado emite un fotón al reducir su energía (emisión espontánea). Dicho fotón viaja dentro de la cavidad del resonador y estimula la transición energética en otras moléculas (emisión estimulada), obteniendo fotones con igual energía, dirección y frecuencia viajando dentro del resonador (Nishimoto, 1992)

El láser permite procesar una gran variedad de materiales mediante la aplicación de distintas técnicas de procesamiento, que varían según la cantidad de energía aportada al material. Mediante la aplicación del láser es posible trabajar el material en estado sólido, logrando calentamiento para doblar placas o producir un tratamiento térmico, conseguir un cambio de fase en cierta zona del material para realizar recubrimientos o recristalización del material base y finalmente lograr vaporización del material, para procesos de corte o perforado principalmente (Pérez, 2008).

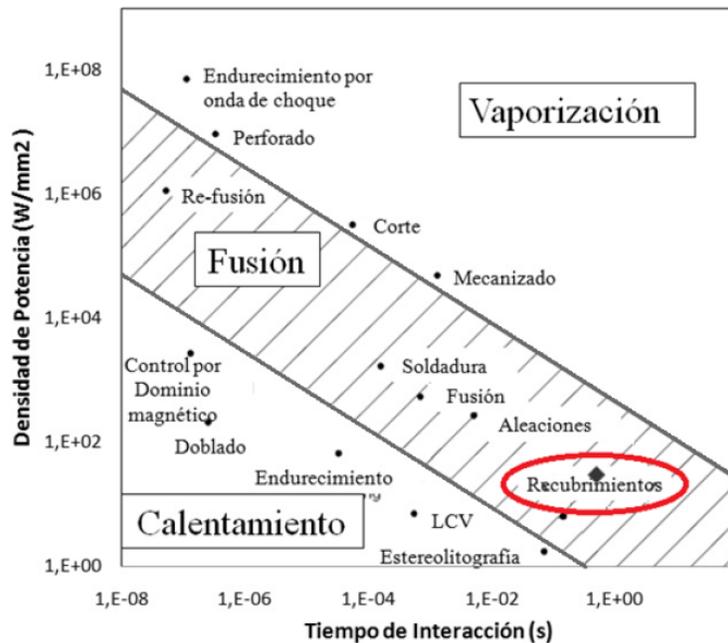


Figura 2. 1 Distintos procesos láser en función de la densidad de potencia y tiempo de interacción (Pérez, 2008).

La soldadura por haz de luz láser puede considerarse como una de las tecnologías emergentes, tanto por el relativo poco tiempo de estudio que tiene y desarrollo, como por la continua evolución que sigue teniendo hasta estos días. Esto también la coloca como una de las tecnologías con más posibilidades de aplicación en la actualidad, en el futuro y cada vez son más las áreas de la industria donde se está utilizando (Welding Handbook, 2001).

Por otra parte, la soldadura por haz de láser tiene otras aplicaciones como son la de dispositivos médicos implantables en la industria manufacturera (Roble & Cassina, 2007), como por ejemplo el láser de corte para baja necesidad de producción (Gould, 2015).

Finalmente, cabe mencionar que el haz de láser puede ser principalmente producido por:

- Láser de estado sólido (Nd-YAG).
- Láser de gas (CO₂).
- Láser de diodo
- Láser térmico.
- Láser excimer.
- Láser de kriptón.

2.2 México y tecnología laser

México se encuentra en la fase inicial en el entendimiento y uso de este proceso, aún dentro de las empresas trasnacionales que operan en México el uso de estos procesos es limitado y se le considera como proceso de uso especial. Esto ocasiona que no se tenga tecnología propia ni desarrollos nacionales que permitan la difusión y mayor utilización de la tecnología láser por un mayor número de empresas de diferentes capacidades y tener, así acceso a los beneficios y competitividad que se pueden alcanzar utilizando tecnologías de vanguardia (Villoresi, 2007).

2.3 Principios del proceso

Un láser es un dispositivo que produce un haz de luz coherente concentrado estimulando transiciones electrónicas o moleculares a niveles de energía más altos, que al regresar a su estado base emiten fotones (emisión estimulada), los cuales al pasar por dos espejos (resonador) que reflejan y amplifican la luz que esta entre ellos, antes de que la luz salga como luz láser. Dicho dispositivo de conversión de energía transforma de una fuente primaria (eléctrica, química, térmica, óptica o nuclear) en un haz de radiación electromagnética con una frecuencia específica (ultravioleta, visible o infrarroja) (Europe, 2011).

En el caso de la soldadura con rayo láser (Figura 2. 2), el rayo láser se dirige mediante elementos ópticos planos, como espejos, y luego se enfoca a un punto pequeño en la pieza de trabajo empleando elementos de enfoque reflejantes o bien lentes. En general se emplea con gas inerte para evitar la oxidación del charco fundido y en ocasiones puede usarse metal de aporte (Welding Handbook, 2001).

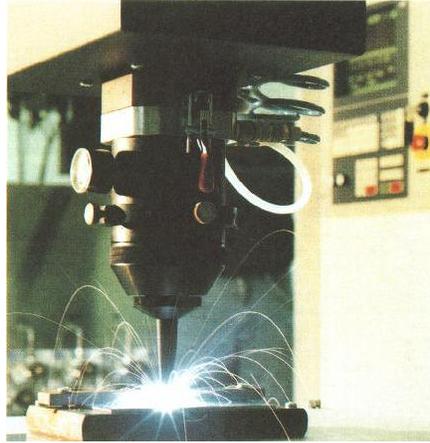


Figura 2. 2 Proceso de soldadura por rayo láser (LBW).

2.4 Ventajas y limitaciones del proceso

Como cada proceso existente en el mercado para unión de materiales, el proceso de soldadura por rayo láser tiene sus ventajas y limitaciones, las más importantes son las siguientes:

2.4.1 Ventajas:

1. Zonas afectadas por el calor mínimas y mínima distorsión.
2. No se requieren electrodos, la soldadura queda libre de contaminación por electrodos, es un proceso sin contacto.
3. Los rayos láser se enfocan, alinean y dirigen fácilmente con elementos ópticos, para soldar áreas de difícil acceso.
4. La pieza puede soldarse en una cámara de vacío o de atmosfera controlada.
5. El rayo láser puede enfocarse en un área pequeña, lo que permite unir componentes pequeños.
6. Es posible soldar una amplia variedad de materiales incluidas diversas combinaciones de materiales de diferentes tipos.
7. El láser se puede automatizar con facilidad para soldadura automatizada
8. Alta velocidad.
9. Se pueden lograr relaciones (profundidad / ancho) del orden de 10:1.
10. El rayo puede transmitirse a más de una estación de trabajo empleando óptica de conmutación del rayo lo que permite compartir el tiempo del rayo.

11. Apariencia estética (Ready, LIA handbook of laser materials processing, 2001).

2.4.2 Limitaciones:

1. Las uniones deben colocarse lateralmente con mucha exactitud bajo el rayo y en una posición controlada respecto al punto de foco del rayo.
2. Los mecanismos de sujeción deben garantizar que la posición final de la unión este alineada exactamente con el punto de incidencia del rayo.
3. El espesor máximo de una unión que puede soldarse con un rayo láser es de 20 mm en acero como máximo para aplicaciones en producción. Actualmente se están desarrollando nuevos láser que prometen soldar hasta 30mm (Láser en fibra)
4. Las elevadas reflectividad y conductividad térmica de algunos materiales, como las aleaciones de aluminio y de cobre pueden afectar su soldabilidad.
5. Los láseres tienden a tener eficiencias de conversión de energía bastante bajas (por debajo del 10% para el CO₂ y 15% para el Nd-YAG) (Ready, LIA handbook of laser materials processing, 2001).

2.5 Láser de estado sólido ND-YAG y de gas CO₂

2.5.1 Láser de estado sólido (Nd-YAG)

Por lo general es pulsado, en este proceso los electrones del elemento dopante son llevados a una energía superior al estar expuestos a la lámpara de alta intensidad (ver la Figura 2. 3), el láser surge cuando los electrones excitados regresan a su estado normal de energía. En el proceso en estado sólido el cristal es dopado por elementos de transición o tierras raras. En la Figura 2. 4 se puede observar como la energía que los electrones absorben de la lámpara eleva sus niveles de energía, y a su vez esta energía se transforma en fotones cuando los electrones regresan a sus orbitas normales (Brown, 2003). La lámpara es el medio que provee energía para el cristal del elemento dopante y así se generen los fotones que darán origen al láser. Por lo general las lámparas de kriptón son las que se utilizan para el equipo ya que existe menos desperdicio de energía (mayor eficiencia) que utilizando una de Xenón ya que en esta hay muchas pérdidas por la producción de luz blanca (Brown, 2003).

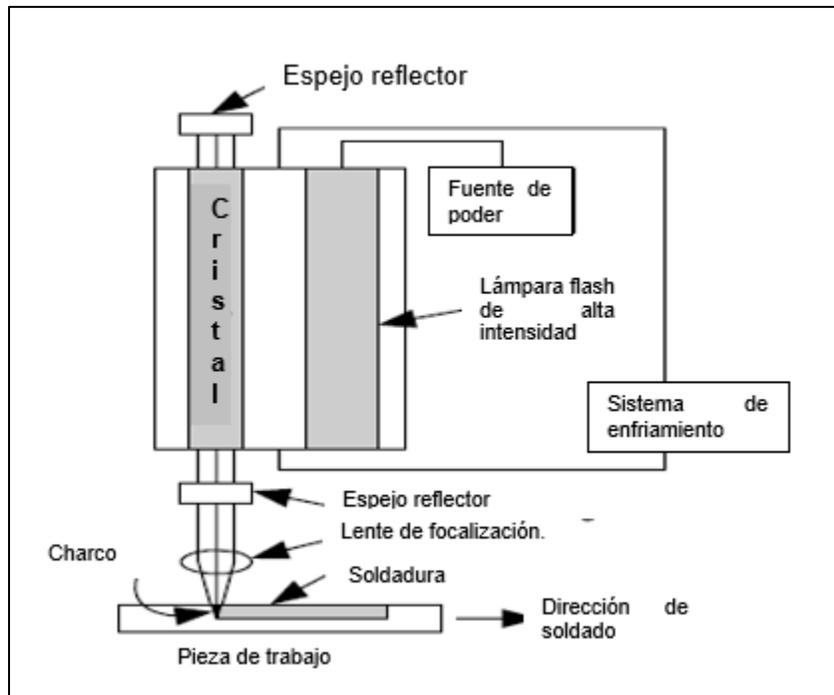


Figura 2. 3 Esquema de funcionamiento soldadura por rayo láser de estado sólido Nd-YAG (Brown, 2003).

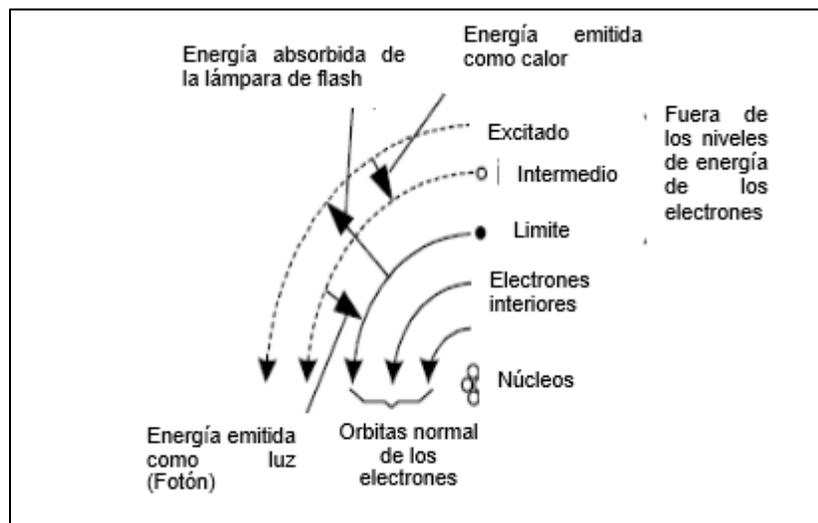


Figura 2. 4 Movimiento de los electrones al ser excitados (Brown, 2003).

2.5.2 Láser de gas (CO₂)

Por lo general es continuo, en un láser de CO₂, una mezcla de gases de CO₂, N₂ y He es continuamente excitada por electrodos conectados a la fuente de

alimentación. El poder que puede alcanzar (25kw) es mucho mayor que el de un láser de estado sólido (3kw-9kw) (Brown, 2003). La siguiente Figura 2. 5 muestra el proceso de soldadura láser.

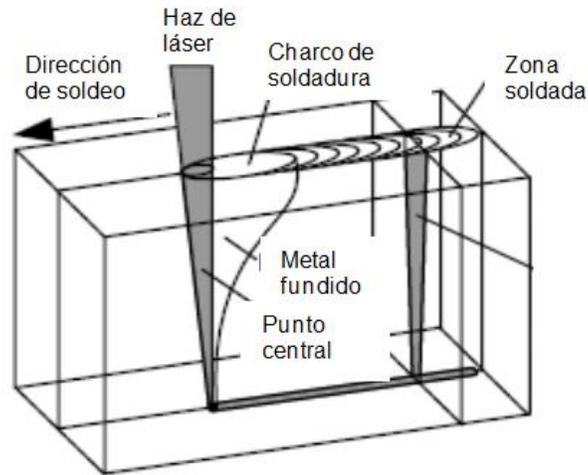


Figura 2. 5 Soldadura por rayo láser.

El choque de los electrones en el gas, excita a las moléculas de nitrógeno que son homonucleares y no pueden perder su energía por emisión de fotones, en cambio las moléculas de dióxido de carbono al colisionar con las de nitrógeno existe una emisión de fotones (Brown, 2003).

2.5.3 Laser cladding

A finales de los setenta, Daniel S. Gnanamuthu comenzó a estudiar la posibilidad de realizar tratamientos de endurecimiento superficial con láser, pero no fue hasta 1980 que esta tecnología comenzó a adoptarse en la industria, como un método para mejorar la resistencia a la corrosión y al desgaste (Reed, Natesan, Xu, & Smith, 1999).



Figura 2. 6 Primer dispositivo láser inventado por Theodore Maiman.

El constante desarrollo de la tecnología láser de alta potencia se traduce en un aumento de la aplicación industrial de tratamientos superficiales láser. Hoy en día complejos componentes como álabes de turbinas o válvulas de motores son procesados de esta manera (Brown, 2003). Mediante los tratamientos de superficie con láser, junto con la utilización de sistemas de control numérico, se pueden realizar variadas aplicaciones, tales como recubrir grandes áreas sometidas a desgaste o corrosión, reparación de elementos dañados o con fallas de fábrica, prototipado rápido o fabricación de matrices (Ready, LIA handbook of laser materials processing, 2001).

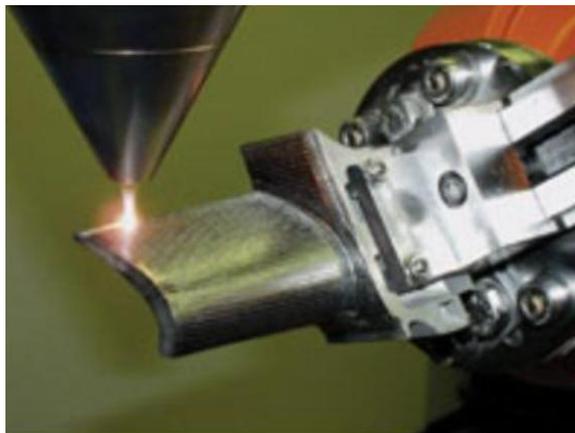


Figura 2. 7 Proceso de reparación por láser cladding de un alabe de turbina.

Sin embargo, pese a las ventajas que puede aportar a la industria el láser, su uso aún no está del todo generalizado debido al alto coste implicado: equipos láser, equipos de posicionamiento, dispositivos de suministro de material de aporte.

Además es necesaria la utilización de control numérico para asegurar la precisión y la repetitividad del proceso (Europe, 2011).

2.6 Generalidades de los parámetros y defectos involucrados

2.6.1 Generalidades de los parámetros

Recientemente se han realizado numerosos estudios encaminados a la medición, supervisión y optimización de los parámetros del proceso y la calidad de la soldadura láser. Como resultado, se han desarrollado sistemas de monitorización del estado, supervisión del proceso y control en línea de la calidad de la soldadura, incluyendo técnicas adaptativas y de optimización, introducción de sensores de medición y estudios exhaustivos de la influencia de las variables medibles o controlables del proceso (Khajepour, 2007).

El objetivo de cualquier sistema de supervisión y control de soldadura es mejorar la calidad y detectar los defectos producidos en el proceso de soldadura, evitándolos en la medida de lo posible. Estos defectos pueden tener dos orígenes:

1. Defectos causados por la preparación del material, lugar de trabajo o configuración de la junta de soldadura.
2. Defectos causados por condiciones cambiantes del proceso debidas a variaciones de los parámetros reales del láser o de las condiciones del proceso (Khajepour, 2007).

La soldadura láser, permite una alta velocidad de proceso, es una soldadura de extrema precisión (hay que tener en cuenta que se pueden conseguir anchos de cordón de 1-2 mm o incluso inferiores). Siendo esto, precisamente lo que origina que los parámetros de soldadura deben estar correctamente ajustados. Los más importantes son:

- Posición del spot.
- Relación potencia-velocidad óptima.
- Posición del spot en la junta de la soldadura).
- Desviación del haz sobre la posición en la junta.
- Tamaño del spot.
- Presión entre piezas (Brown, 2003).

Alguna de las variables de mayor relevancia involucradas en el proceso de unión a partir de un haz de láser se aprecia en la Figura 2. 8.

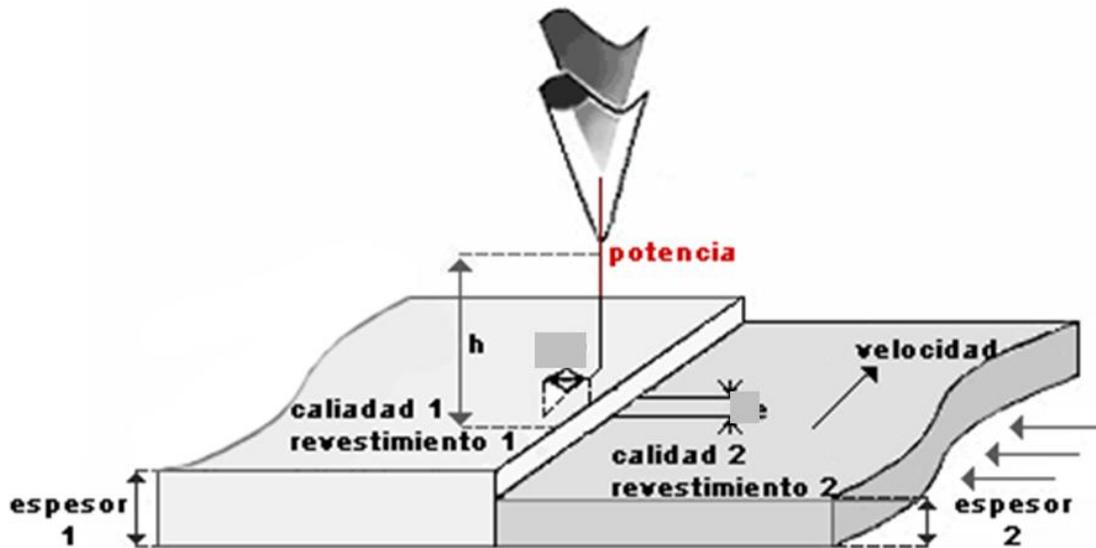


Figura 2. 8 Parámetros y variables importantes durante la aplicación de soldadura láser.

2.6.2 Defectos en soldaduras por rayo láser:

Presencia de poros:

La mayor parte de las ocasiones, los poros están producidos por el atrapamiento de gas en el interior de la soldadura o por evaporación de materiales por un excesivo calor de entrada, por lo que se sugiere evitar contaminación de la superficie que la pueda provocar o, en el caso de ser porosidad producida por recubrimientos volátiles hay que posicionar las piezas dejando un pequeño hueco (sin superar las tolerancias de posicionado), que permita la salida de los gases (ver Figura 2. 9).

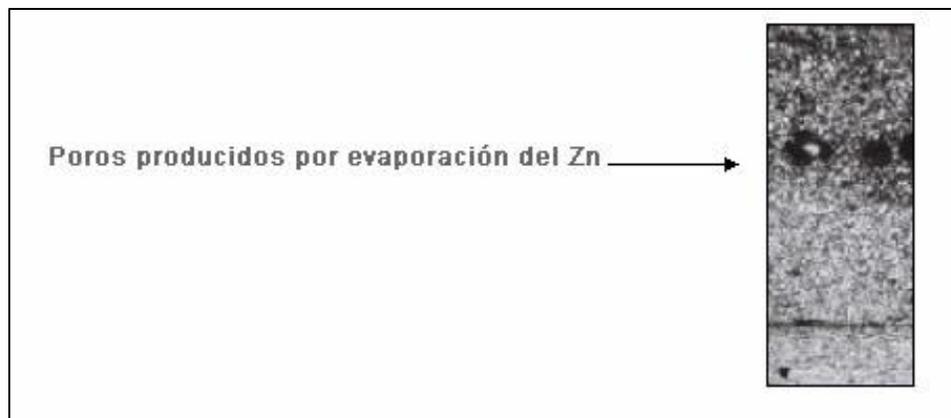


Figura 2. 9 Porosidad por evaporación.

Falta de penetración:

Esta tiene su origen cuando la velocidad de proceso es excesiva para la potencia utilizada (ver Figura 2. 10).

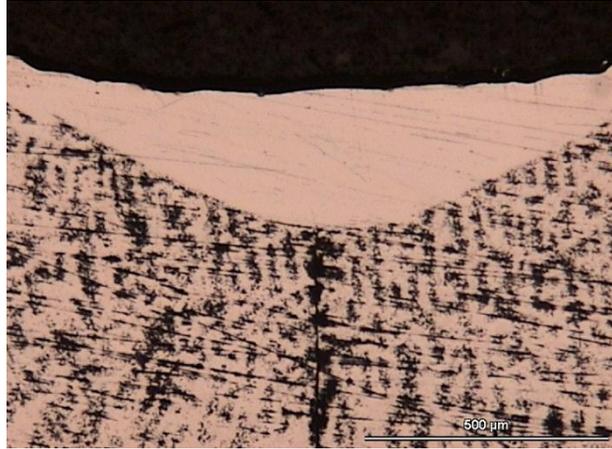


Figura 2. 10 Falta de penetración en el material.

Exceso de salpicaduras:

Los excesos de salpicaduras son ocasionadas en la mayor parte de las veces por la presencia de aceites o contaminantes en las láminas o por utilización de una potencia excesivamente alta para la velocidad de proceso utilizada (ver Figura 2. 11).



Figura 2. 11 Salpicaduras en soldadura.

Falta de fusión en raíz o superficie:

Además de una mala relación potencia-velocidad, la falta de fusión en raíz o superficie puede estar ocasionada por un excesivo hueco o espacio entre las piezas (ver Figura 2. 12).



Figura 2. 12 Soldadura con falta de fusión en superficie.

Agrietamiento de la soldadura:

En este caso no existe ninguna causa que sobresalga de las demás. Sin embargo, se cree que se deba a un mal posicionado de las piezas, exceso de potencia o de carbono en el material. Para solucionar esto es conveniente realizar un análisis más exhaustivo (ver Figura 2. 13).



Figura 2. 13 Grietas en una soldadura.

Socavamiento:

Se emplea este término para describir, la eliminación por fusión de la pared de una ranura de soldadura en el borde de una capa o cordón, con la formación de una depresión marcada en la pared lateral en la zona a la que debe unirse por fusión la

siguiente capa o cordón y, también para la descripción de la reducción de espesor en el metal base, en la línea en la que se unió por fusión el último cordón de la superficie (ver Figura 2. 14).



Figura 2. 14 Socavamiento en una soldadura láser.

2.7 Efecto de la variación de voltaje, ancho de spot, y duración del pulso en la soldadura láser

2.7.1 Voltaje

El voltaje es una variable relativa al equipo de láser de Nd-YAG. El voltaje es una variable directamente proporcional al calor de entrada en un proceso de láser. Por mencionar su importancia, resulta ser un factor influyente en la resistencia a la corrosión de aceros súper austeníticos, ya que si se usa menor calor de entrada, el material soldado es más resistente a la corrosión (Ready, Industrial Applications of Lasers, 1997).

En la Figura 2. 15 se muestra el efecto que tiene el aumento del voltaje en la penetración causada por el charco de soldadura. Se ve claramente que al aumentar el voltaje la penetración en el material se incrementa (Ready, Industrial Applications of Lasers, 1997).

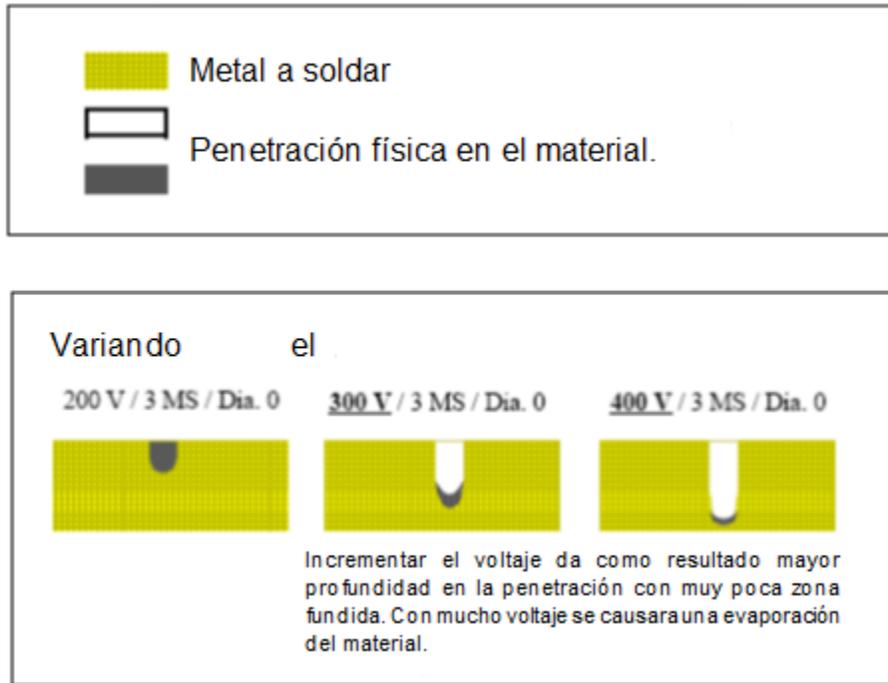


Figura 2. 15 Efecto del voltaje en la soldadura láser.

2.7.2 Duración del pulso

El efecto que tiene la duración del pulso en el material soldado con soldadura láser, se puede observar, en la siguiente figura, se aprecia que al aumentar la duración del pulso incrementa la penetración, pero en mayor proporción el tamaño de la zona fundida. Por lo que se ve claramente que a mayor duración de pulso hay una mayor zona fundida (ver Figura 2. 16) (Ready, Industrial Applications of Lasers, 1997).



Figura 2. 16 Efecto de la duración del pulso en la soldadura láser.

2.7.3 Ancho de spot

El aumento de diámetro del spot de soldadura por rayo láser, va provocar un aumento en el diámetro del charco de soldadura, lo cual va a originar una disminución en la densidad de concentración de energía en la pieza que causará una menor penetración de la zona fundida y además con mayor diámetro. Lo anterior se esquematiza en la Figura 2. 17 (Ready, Industrial Applications of Lasers, 1997).

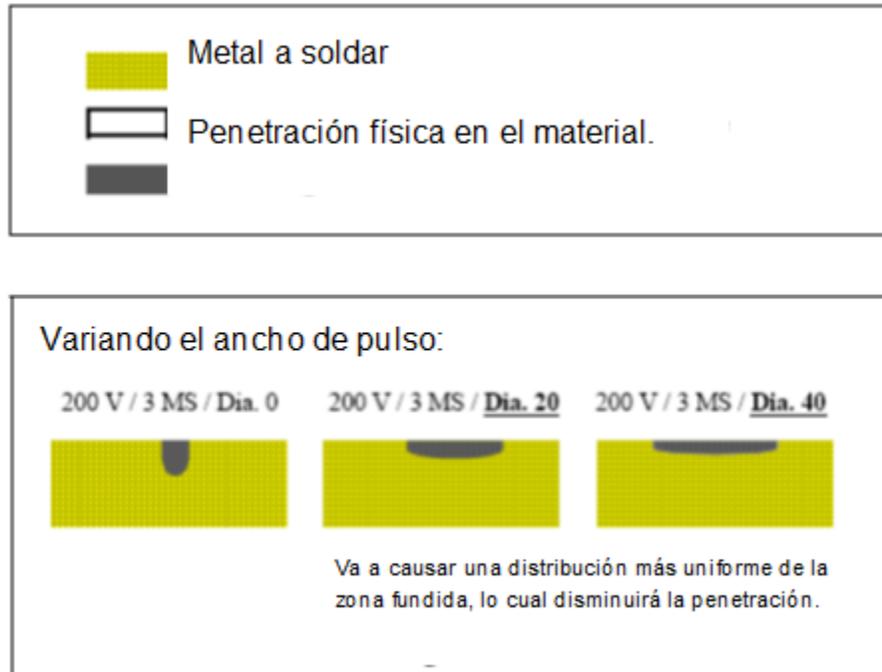


Figura 2. 17 Efecto del ancho de spot en la soldadura láser.

2.8 Efecto del tipo y flujo de gas de protección en la calidad de la soldadura

2.8.1 Generalidades

El objetivo del gas de protección es disminuir el plasma causado por la ionización del gas que rodea a la zona soldada y de la ionización de los vapores que provienen del metal base. El gas de protección tiene gran influencia en la obtención de características en la soldadura, puede influir en una buena penetración (Chung, Lee, & Rhee, 1999).

2.8.2 Efecto del plasma

El plasma provoca efectos no deseados en el haz de láser, el plasma absorbe energía del haz y además causa desfocalizaciones. La Figura 2. 18 muestra la consecuencia que tiene el uso del gas protector en la columna de plasma, y además en la penetración del haz de láser (Ancona, y otros, 2005).

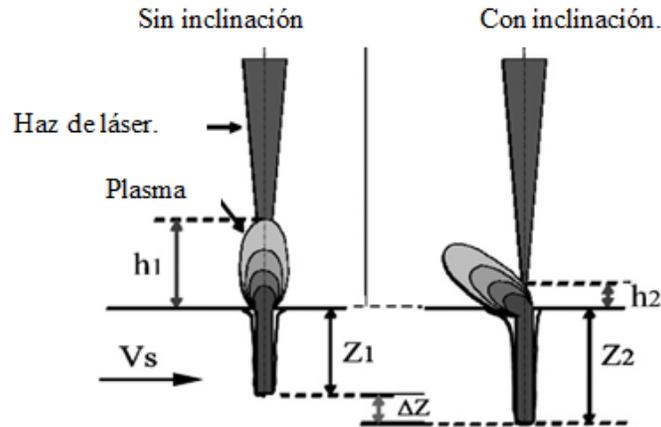


Figura 2. 18 Penetración en función de Inclinación del plasma.

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

De acuerdo al propósito de protección que tienen estos gases. Los gases deben de cumplir con algunas características específicas:

1. Potencial de ionización.- Gases con gran potencial de ionización ayudan a reducir la cantidad de plasma durante el soldeo.
2. Composición.- El gas debe de ser inerte con respecto a altas temperaturas y a los componentes del material base.
3. Caudal.- La energía cinética del flujo del gas debe ser alta, lo suficiente para desviar la columna del plasma fuera del camino del haz.
4. Distribución.- El área alrededor de la zona soldada debe estar uniformemente protegida del atmosfera y medio ambiente (Tani & Campana, A., 2007).

2.8.3 Variables en la aplicación y elección del gas protector

1. Ángulo de la boquilla.
2. Caudal.
3. Tipo y densidad del gas.
4. Influencia de la inclinación de la boquilla.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestra la influencia que tiene el ángulo de la boquilla que suministra el gas protector, sobre

el porcentaje de gas de protección incidente en la pieza soldada, a diferentes distancias del punto central (keyhole). En este caso el caudal del gas fue de 30l/min (Tani & Campana, A., 2007).

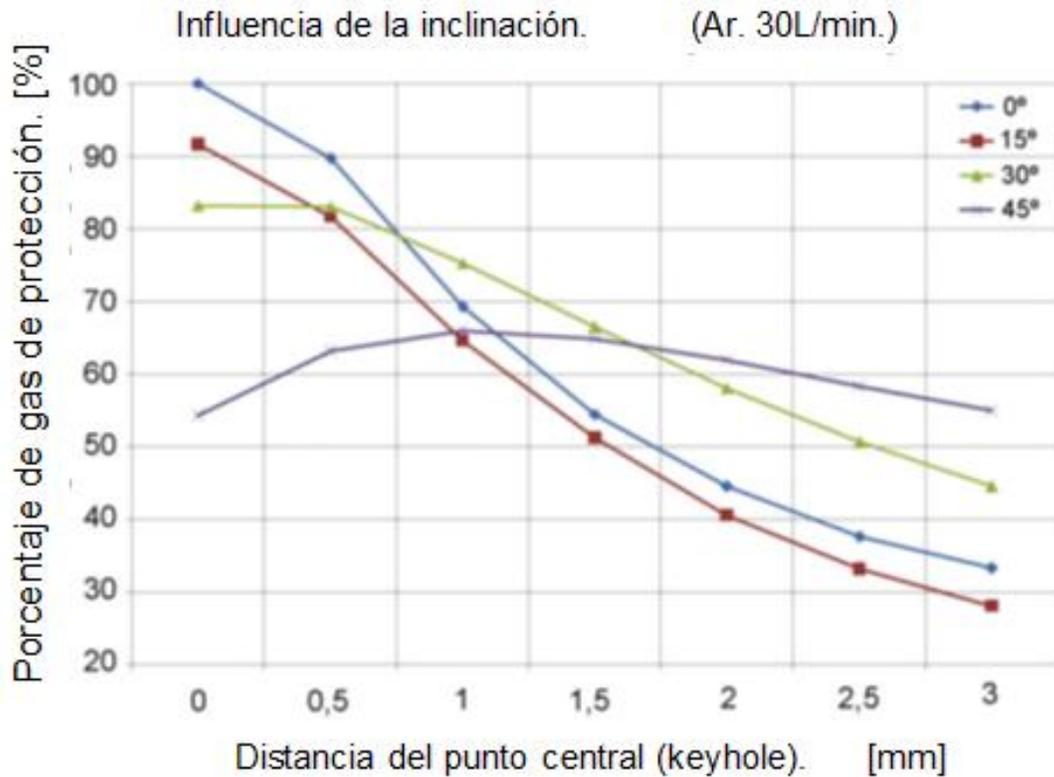


Figura 2. 19 Influencia de la inclinación del ángulo de la boquilla (Tani & Campana, A., 2007).

También se observa en la gráfica que definitivamente el ángulo de la boquilla tiene una gran influencia en la eficiencia de protección de la pieza a soldar, se ve claramente que a un ángulo menor la eficiencia es muy alta a distancias cercanas al keyhole, pero cae dramáticamente cuando se aleja de este. En cambio a ángulos mayores (45 grados) la eficiencia es menor, pero se mantiene más estable a distancias lejanas al keyhole.

En la Figura 2. 20 y Figura 2. 21, se muestra una simulación de la distribución del gas de protección a dos diferentes ángulos de boquilla, 0 y 60 grados. El color rojo indica la mayor concentración de gas protector (Tani & Campana, A., 2007).

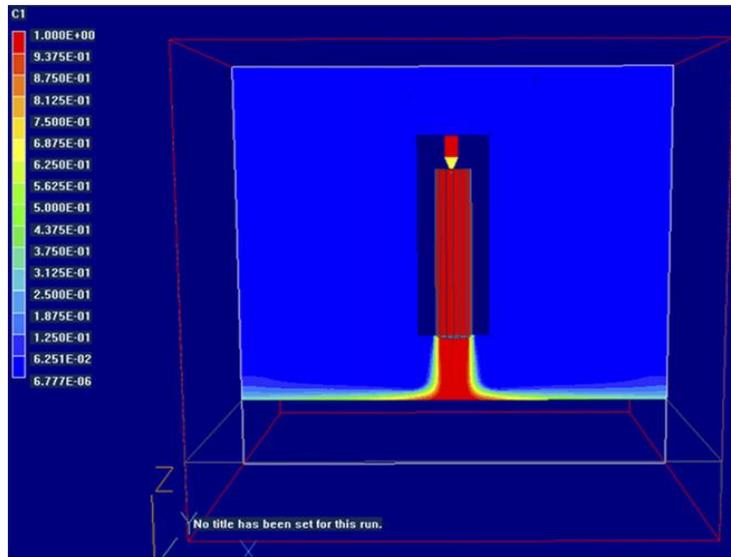


Figura 2. 20 Ángulo de boquilla de 0 grados.

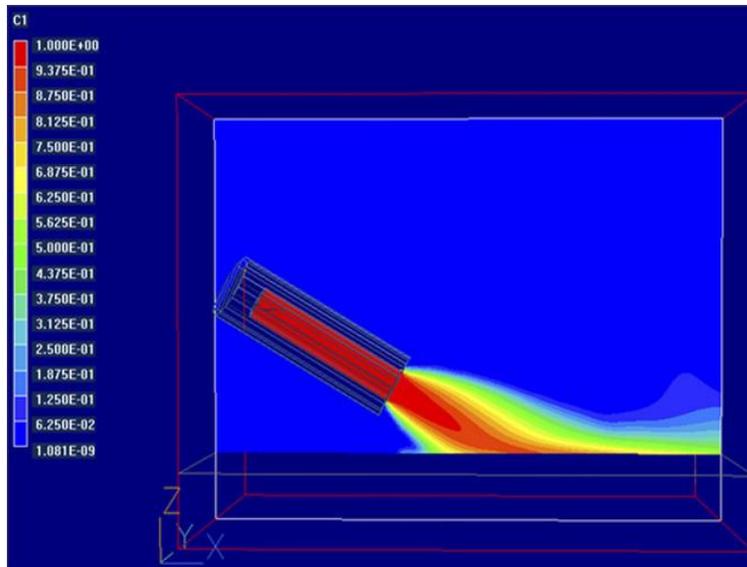


Figura 2. 21 Ángulo de boquilla 60 grados.

En las figuras anteriores se observa que la distribución del gas protector abarca mayor superficie a un ángulo de boquilla de 60 grados con una buena concentración de gas, en cambio en la figura 5.24 en la cual la boquilla se encuentra a un ángulo paralelo al keyhole (0 grados), la distribución del gas es muy pobre y solo se logra una alta eficiencia de protección en lugares adyacentes al punto central (keyhole).

En la mayoría de los casos es preferible lograr una protección estable cubriendo una mayor superficie ya que así se logrará proteger más tiempo el charco de soldadura mientras este está solidificando, es por eso que en la mayoría de los equipos de soldadura por rayo láser los ángulos de la boquilla son semejantes al de la Figura 2. 21.

En la Figura 2. 22 se muestra un equipo de soldadura láser de CO₂, en este se puede observar que el ángulo de boquilla está cercano a 60 grados.

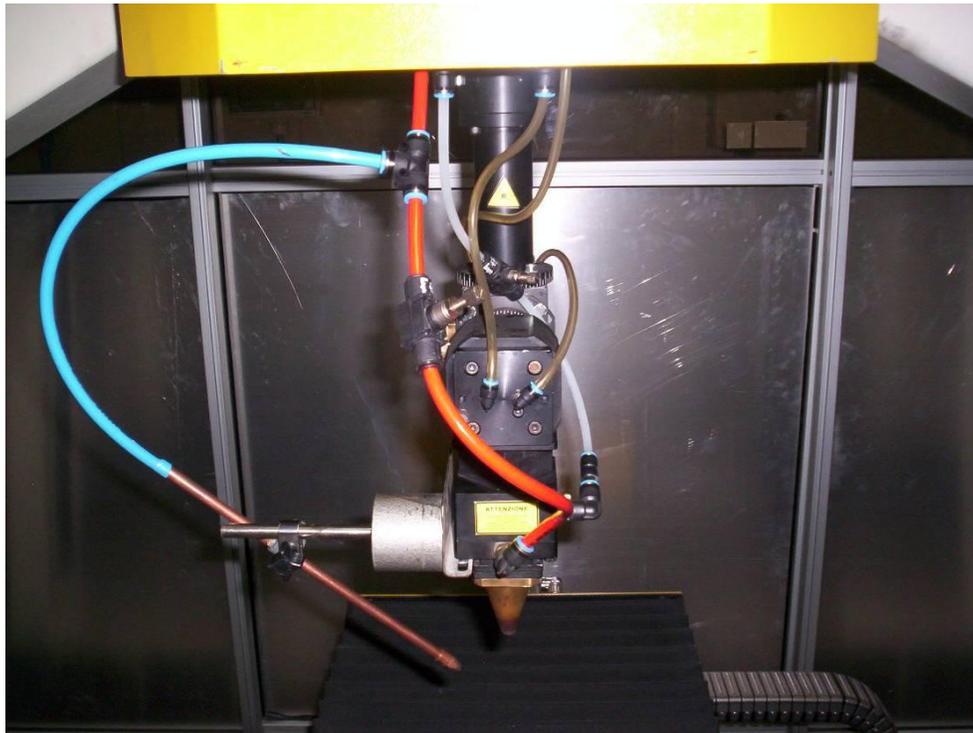


Figura 2. 22 Equipo láser CO₂ con una potencia de 6 kW.

2.8.4 Influencia del caudal del gas

En la gráfica de la Figura 2. 23 se muestra la variación del caudal del gas protector con caudales de 15, 30 y 45 L/min y con un ángulo de boquilla de 45°. Se ve que el porcentaje de gas protector a determinada distancia, es casi el mismo a los tres distintos caudales, esto se debe principalmente a que la densidad del argón tiene mayor densidad que el aire lo cual contribuye a que este permanezca en contacto con el área que se desea proteger (Tani & Campana, A., 2007).

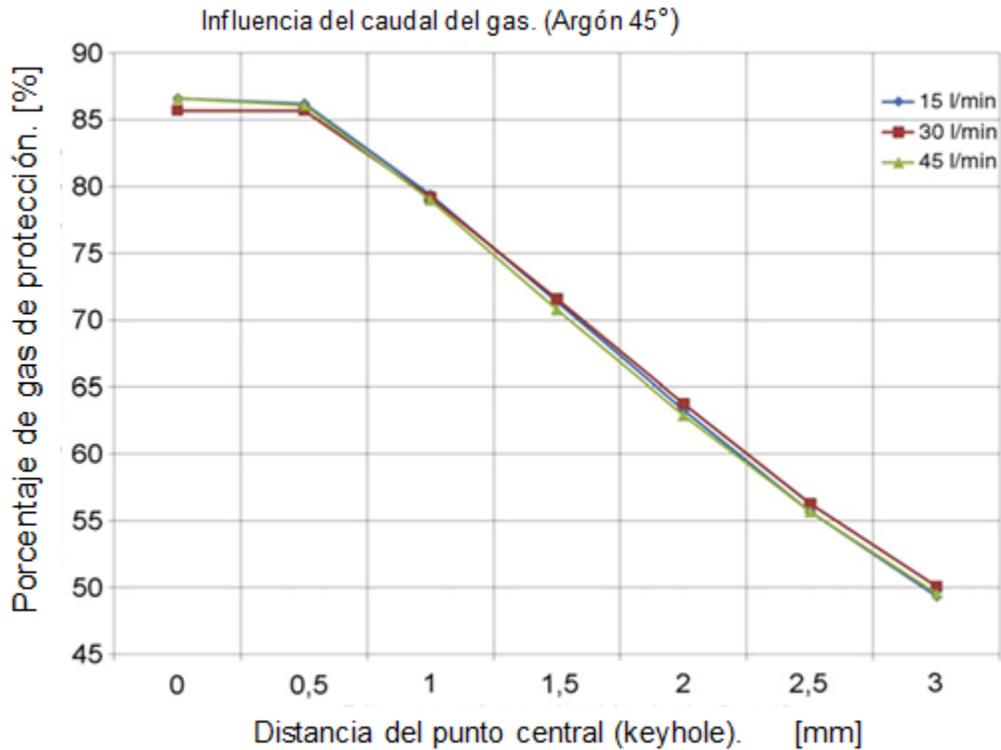


Figura 2. 23 Influencia del caudal del gas (argón).

En la gráfica anterior se muestra la influencia que tiene la variación del caudal en el porcentaje de gas protector con respecto a una distancia, si el gas protector es el helio. En este caso se puede observar que existe una gran diferencia entre cada uno de los resultados, esto es debido a que la densidad del Helio es menor a la del aire, lo cual provoca que este tenga una pobre e inestable eficiencia de protección en el charco de soldadura. En este caso el ángulo de la boquilla es de 45°.

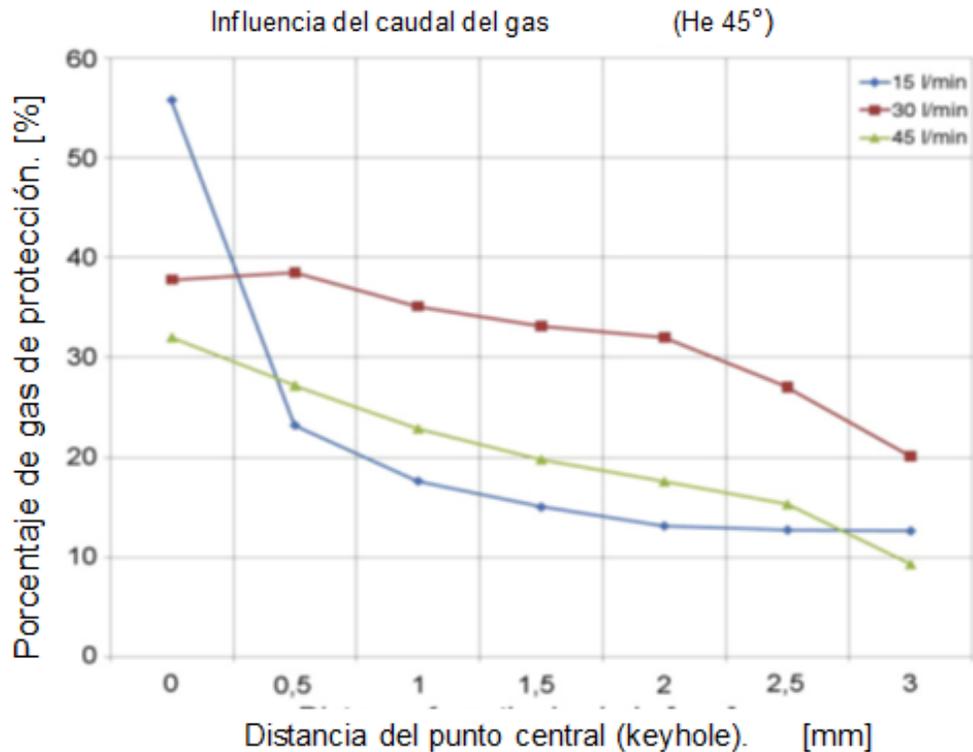


Figura 2. 24 Influencia del caudal del gas (Helio).

Como se pudo ver en las gráficas anteriores, la densidad del gas juega un papel muy importante en la eficiencia de la protección del charco de soldadura, a continuación se presenta en la gráfica 9, el porcentaje de gas protector a distintas distancias con respecto al punto central (keyhole), utilizando tres diferentes tipos de gas: He, Ar y Ni. Es importante mencionar que el ángulo de boquilla fue de 45° y el caudal del gas fue de 45L/min.

En la gráfica de la Figura 2. 25 se observa que una mayor densidad en el gas de protección provoca una mayor estabilidad y eficiencia de protección en el charco de soldadura (Tani & Campana, A., 2007).

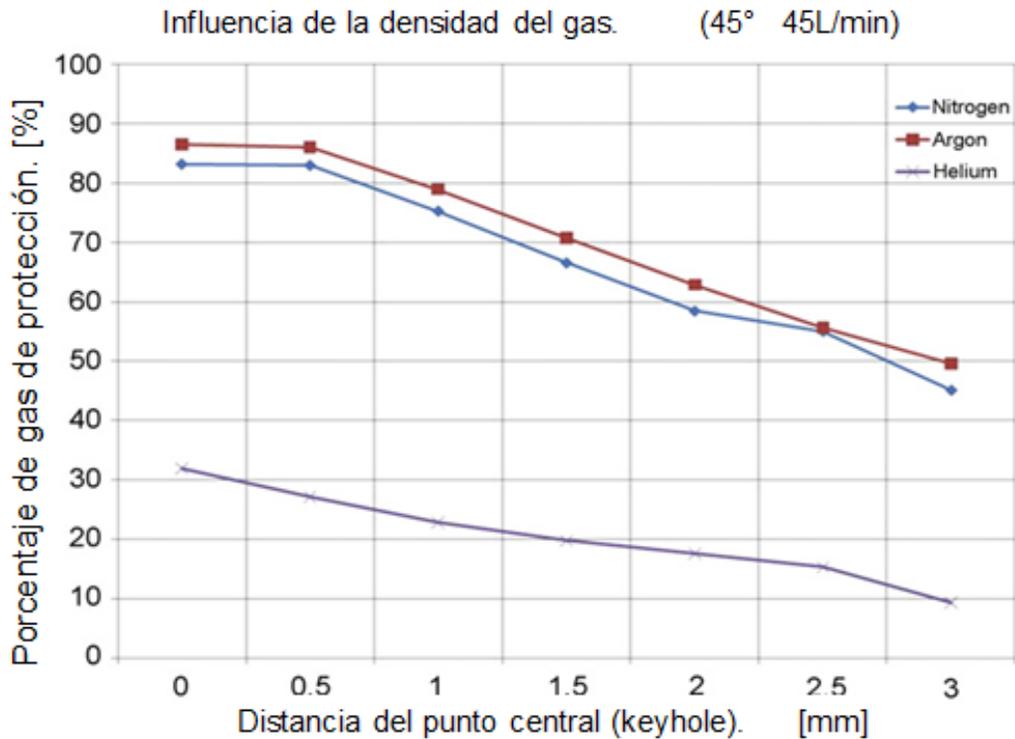


Figura 2. 25 Influencia de la densidad del gas de protección.

2.9 Soldadura láser con doble haz

La soldadura por láser usando doble haz es una tecnología reciente. En los estudios experimentales se muestra que usando doble haz se provee calidad a la soldadura para aceros y aluminios, ya que la inestabilidad en el proceso durante la soldadura por láser se minimiza. Se han realizado estudios en los cuales la morfología de la soldadura, usando doble haz presenta buen perfil, penetración profunda y soldadura ancha (Brown, 2003).

Se encontró que mediante la aplicación de la soldadura láser con doble haz se desarrollan soldaduras anchas en la superficie de la pieza de trabajo y estrecha bajo la superficie, formando una “uña”. La penetración es profunda comparándola con un solo haz en las mismas condiciones.

La velocidad crítica es el límite de velocidad antes que un láser de haz doble funcione como un láser de un solo haz a consecuencia de que es muy poco el tiempo que tarda en llegar el segundo haz a la zona fundida que deja el primer haz (Brown, 2003).

Una expresión para la velocidad crítica se obtuvo comparando la velocidad de avance a un rango de expresión de una capa termal en la dirección transversal de los lados longitudinales. El pronóstico de velocidad crítica fue de 4.29 m/min para el acero y de 21.45 m/min para el aluminio. Una expresión matemática para pronosticar la diferencia en penetración profunda entre un solo haz y doble haz se desarrolló en valores teóricos de las diferentes penetraciones de acuerdo con los datos experimentales. Los análisis muestran como la habilidad de penetración usando doble haz disminuye con el incremento en el espacio entre los haz (Brown, 2003).

2.10 Láser de un haz contra láser doble haz

La soldadura por láser se usa en la industria automotriz, aeroespacial, electrónica y la industria médica para unir una gran variedad de materiales, ya que este tipo de soldadura ofrece grandes ventajas sobre los procesos convencionales de unión. Como es un bajo calor de entrada, minimiza distorsión, es un proceso rápido, procesos de precisión y poco contacto.

Sin embargo, defectos de soldadura se han encontrado como por ejemplo porosidad, rechupe, chisporroteo, fracturas, hoyos superficiales. La industria constantemente se pregunta cómo mejorar la calidad de la soldadura, una variación del proceso de soldadura por láser es usando doble haz, para detectar las diferencias y cuantificar los beneficios de la soldadura láser con doble haz, se planteó un estudio donde el haz de láser con alto poder de CO₂ fue dividido en dos haces de igual poder por una cuña de espejo. El espacio entre los dos haz de luz láser o la división, fue pequeña de 1.2 mm de centro a centro. El haz de láser doble se movió en intercambio durante la soldadura, como se muestra en la Figura 2. 26.

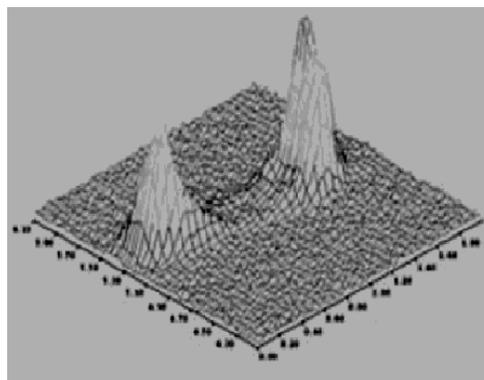


Figura 2. 26 Distribución de la densidad de potencia haz de láser doble.

2.11 Endurecimiento superficial con láser

El calentamiento con láser es un proceso superficial y similar al proceso de inducción en el cual el calor es generado en la superficie del material. Un haz láser no tiene temperatura intrínseca, pero se puede asociar una temperatura con la densidad de potencia vinculada al haz láser, usando la ecuación de Stefan-Boltzmann, con la cual para una potencia de 1000 W se obtiene una temperatura de 3700 K. La luz es una onda electromagnética transversal, la cual es caracterizada por campos eléctricos y magnéticos, cuando la luz incide en la superficie estos campos interactúan con el material causando reflexión, transmisión y absorción de la energía del haz. En metales la interacción con la luz es controlada por los electrones libres, los cuales pueden ser considerados como un gas rodeando los átomos. Los electrones en el gas son excitados hasta la oscilación por la onda incidente, mientras tanto el campo eléctrico entrando en el metal es fuertemente amortiguado previniendo la propagación de la luz a través del metal. Estos efectos son característicos de la gran mayoría de metales, son buenos reflectores al infrarrojo a pesar de ser opacos. Sin embargo ninguna de estas características es favorable para el tratamiento con láser, la alta reflectividad es directamente asociada con una baja absorción de la radiación incidente, obteniendo una baja eficiencia en el proceso (Maco & Belzunce, 2012).

El porcentaje de absorción de la energía láser en el material es función de las propiedades ópticas del material, incluyendo el acabado superficial, presencia de óxidos en la superficie, temperatura y la longitud de onda del material a temperatura ambiente. Entre el 6% y 10% de la emisión láser incidente es absorbida en la superficie de un acero de bajo carbono (Stern & Sognaes, 2006).

En haces focalizados con densidades de potencia del orden de 10^5 a 10^6 W/cm² la absorción del material cambia debido al rápido aumento de la temperatura y cambio de fase de sólido a líquido, produciéndose un aumento considerable en el porcentaje de la energía absorbida por el material, dicho aumento de absorción continúa mientras más alta sea la temperatura (Figura 2. 27). Sin embargo, existen capas especiales que pueden ser aplicadas en la superficie en forma de pintura antes de inducir el láser para mejorar el acople. Dichas pinturas son fabricadas en base a grafito, carbón, óxidos de hierro o cobre, disueltos en un líquido, el cual se evapora sin dejar residuos después de la aplicación. Con la aplicación de esta capa, la absorción mejora a valores cercanos al 80% (Koebner, 1984).

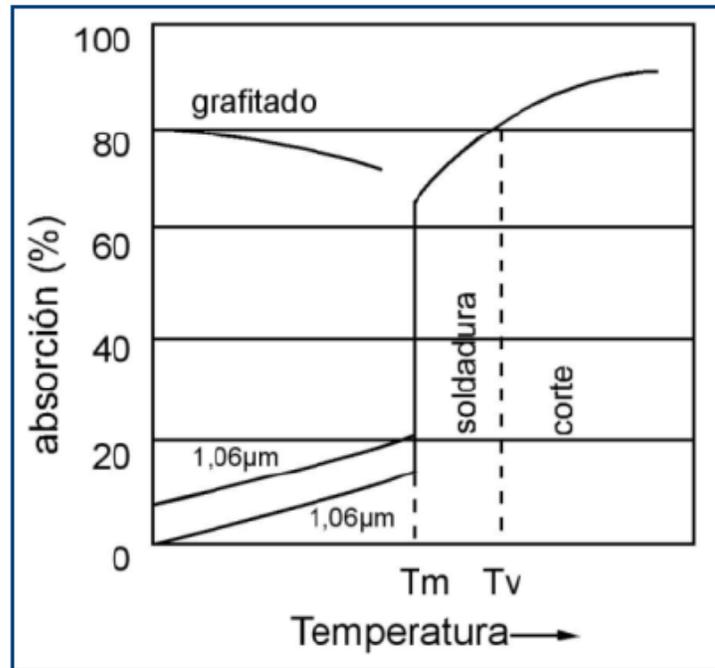


Figura 2. 27 Absorción de la luz láser en el hierro en función de la temperatura y longitud de onda (Koebner, 1984).

2.12 Tratamiento superficial con adición de material

El término recubrimiento es muy general, entre los tipos de recubrimiento se encuentran pinturas, deposición de vapores, recubrimientos en caliente, rociado térmico, soldaduras convencionales como recubrimiento y recubrimiento con láser.

Los tratamientos superficiales con láser pueden ser distinguidos en tres grupos según el grado de modificación de la superficie: sin fusión del material base, con fusión del material base y con fusión y adición de otro material a la superficie. El mecanismo puede ser visto en la Figura 2. 28 en la que se aprecian los diagramas de los diferentes tratamientos (Schneider, 2008).

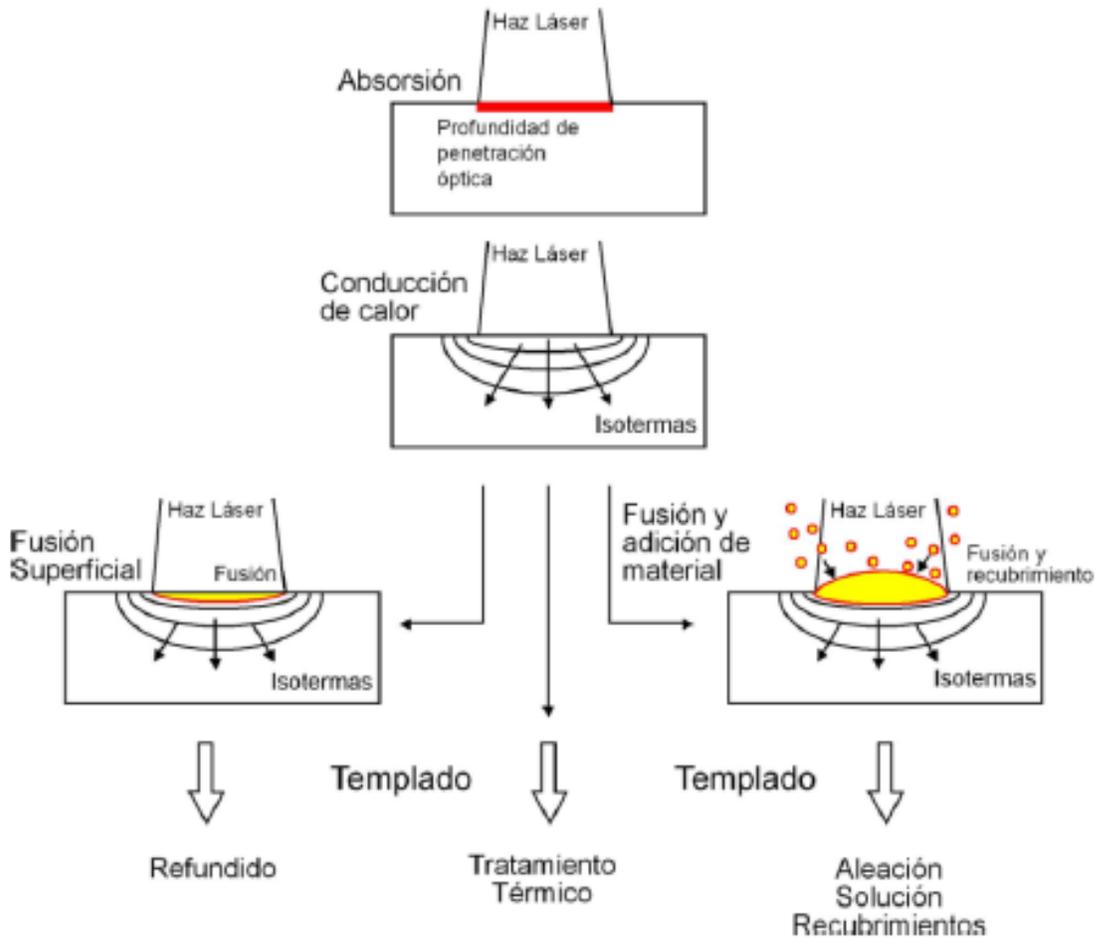


Figura 2. 28 Tipos de tratamientos láser distinguiendo respecto a la temperatura superficial (fase sólida o líquida) y la adición de material.

Los tratamientos con y sin fusión de material, se basan en los cambios microestructurales producidos en la capa superficial del material, generados a partir de la recristalización y enfriamiento repentino producido por la conducción de calor hacia el interior del material base, produciendo un auto templado en la zona calentada.

El patrón de tratamiento térmico producido por láser tiene características únicas, entre las cuales se destacan las siguientes:

Debido al elevado gradiente térmico y el auto templado producto de la conducción de calor hacia el interior del material, la zona martensítica está muy bien definida. Cuando se realiza un perfil de micro dureza, esta permanece constante a través del área transformada, luego baja drásticamente hasta el material base. Raramente es necesario revenir la pieza ya que la martensita producida por el tratamiento láser no genera problemas de fragilidad, debido a que posee un tamaño de grano pequeño.

El tratamiento láser generalmente se realiza traslapando pistas sobre la superficie, lo cual crea lugares en los cuales la dureza es ligeramente menor entre dichos pasos. La adición de material sobre la superficie es necesaria cuando los requerimientos sobre un componente requieren materiales de alto desempeño, resistentes a la abrasión, el impacto, corrosión y alta resistencia al roce adhesivo bajo grandes cargas. Dichos materiales generalmente son caros y muy difíciles de mecanizar, esto favorece la aplicación de materiales de alto desempeño en cierta parte de la superficie de un componente donde se requieran características especiales, usando un material base relativamente fácil de mecanizar y con menor costo, logrando una aleación determinada en la superficie basada en el sustrato, o simplemente una capa con un material completamente diferente, lo cual también es aplicable para producir superficies de alta calidad en piezas nuevas, producir piezas completas y recuperar o mejorar partes usadas (Schneider, 2008). Estos procesos son ampliamente utilizados en el área petrolífera, válvulas industriales, bombas, motores de combustión interna, en dichas aplicaciones es necesario componentes de precisión los cuales deben resistir condiciones extremas y generalmente deben ser mecanizados después del tratamiento para obtener la precisión requerida.

En el recubrimiento láser principalmente se crea una unión metalúrgica entre las dos capas a diferencia del rociado térmico el cual solo crea una unión mecánica entre capas y posee cierto porcentaje de porosidad.

El láser es una mejora al arco eléctrico como lo fue en su tiempo el carbón a la leña en el trabajo en caliente de metales. Controlando la densidad de potencia es posible fundir parte del metal sin afectar térmicamente el resto del material. El único aparato que se asemeja a los niveles de densidad de potencia alcanzados por el láser es el haz de electrones, su desventaja es que necesita vacío para propagarse, mientras que el láser puede transmitirse a través de aire o atmósfera controlada si es requerido.

El procesamiento con láser no ejerce fuerzas sobre la superficie a diferencia de procesos como recubrimientos por fricción (Hassan, Mahmoud, & Khalifa, 2010) o por explosión (Ettaqi, Langlois, & Bigot, 2008). Además el láser necesita alrededor de un quinto de la energía con respecto al proceso de soldadura TIG para obtener el mismo resultado con lo cual los daños por distorsiones térmicas son minimizados, al igual que el mecanizado posterior al tratamiento (Migliore, 1996).

Para poder asegurar una unión metalúrgica, el material de aporte y el material base deben fundirse juntos, para esto es necesario controlar la potencia aplicada para obtener una fusión de ambas capas permitiendo así la difusión en estado líquido y la mezcla parcial o total de ambas capas. Gracias a la rápida

solidificación de ambas capas, se obtienen las características de los materiales endurecidos por efecto del enfriamiento repentino y de la aleación formada entre ellos.

Pese a todas las ventajas del láser, este se ocupa solo en pequeña cantidad en la industria, debido al alto costo de adquisición de los equipos láser, equipos de posicionamiento, dispositivos de distribución de material de aporte ya sea en polvo o alambre, los cuales deben ser controlados numéricamente para asegurar la repetitividad y precisión del proceso, todo esto aparte de la complejidad del resonador láser (Maco & Belzunce, 2012).

Existen tres tipos de recubrimiento con láser, los cuales se clasifican según la composición, la mezcla entre nuevo material y el material base. Los 3 métodos se conocen como: Aleaciones láser, Soluciones sólidas con láser y Cladding Láser (*Láser alloying*, *Láser dispersing* y *Láser cladding*).

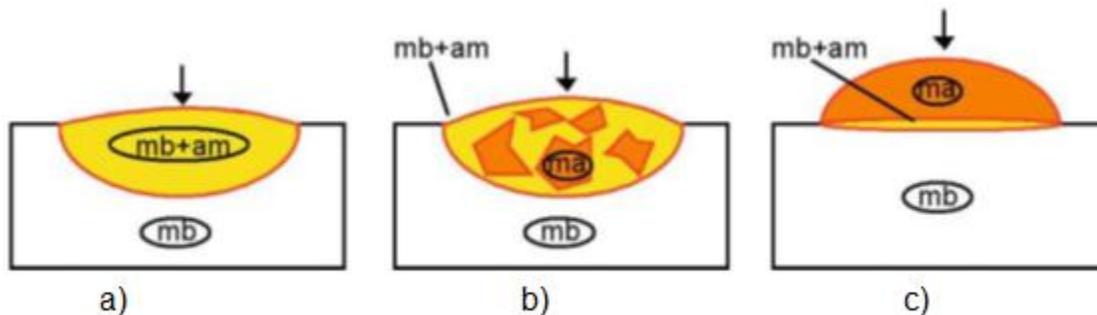


Figura 2. 29 a) Aleaciones láser, b) Solución sólida con láser, c) Cladding láser (mb=material base, am= material de aporte).

Los tres métodos consisten en fundir una parte del material base, al cual se le aplica el material de aporte, pero se diferencian en los parámetros utilizados en el proceso tales como la cantidad de polvo utilizada, velocidad relativa, potencia, focalización. Según el grado de mezcla entre ambos materiales podemos clasificar en tres grupos:

Soluciones sólidas, se logra una solución de partículas sólidas del material de aporte en una matriz de material base fundido, lo cual logra una unión principalmente mecánica entre los dos materiales, la cual es utilizada especialmente para carburos y otros materiales de aporte con elevado punto de fusión.

Cladding láser es un proceso en el cual los dos materiales se funden completamente mediante el haz láser, pero se mezclan y reaccionan químicamente solo en la interfaz formada. En la sección transversal se diferencian

tres zonas, material base fundido, mezcla y la capa superficial solo con el material de aporte fundido, el cual le da las características a la superficie (Welding Handbook, 2001).

Aleaciones láser es un caso particular de los recubrimientos pero en este caso, material base y de aporte se mezclan completamente debido a la mayor difusión en estado líquido y el efecto de la convección dentro del charco de soldadura. Al solidificar ambos materiales, estos se unen metalúrgicamente, reaccionan químicamente, creando una aleación en la zona fundida, la cual es responsable de las características superficiales.

2.13 Descripción de dispositivos de distribución de polvo

Existen tres métodos distintos para aplicar el material de aporte sobre el material base, los cuales son: alimentación de alambre, mediante inyección de polvo y polvo pre depositado. Este último tiene dos etapas, en la primera etapa se pre deposita el polvo sobre la superficie del material el cual va disuelto en algún líquido, formando un barro y en la segunda etapa el material es fundido mediante el haz láser. El método de alimentación de alambre, consiste en aplicar el material en forma de alambre mediante una guía lateral la cual dirige el alambre hacia la zona de interacción en la cual es fundido junto al material base por el haz láser. Finalmente la inyección de polvo mediante tobera lateral o coaxial. Va distribuyendo el material de aporte al mismo tiempo que el haz láser va fundiendo el polvo y material base (Láser, 2015).

En el proceso de alimentación con alambre es necesario un posicionamiento exacto y una velocidad adecuada para que el alambre no intervenga en charco de soldadura fundida alterándola y además atenúa el láser que llega al material. El alambre se dirige a la zona de interacción y es impulsado a cierta velocidad que determina la cantidad de material de aporte aplicado. Por otra parte, en el caso de polvo inyectado, son necesarios ciertos dispositivos que regulen la cantidad deseada de polvo y la proyecten al material mediante un flujo de gas el cual es dirigido por medio de toberas. Una ventaja del polvo frente al alambre es que acopla mejor la energía del láser, debido a que está compuesto de partículas, la reflexión se dispersa (de cada una, llega a otra partícula), aumentando la energía acoplada, lo cual hace más efectivos los recubrimientos con polvo que con alambre. Con el polvo el proceso es más flexible, ya que permite variaciones de concentración y cantidad en tiempo real, logrando un recubrimiento variable en dimensiones y/o composición, y además existe mayor cantidad de elementos en polvo que en alambre (Schneider, 2008).

Para alimentar el polvo a la zona tratada, es necesario tener un dispositivo dispensador de polvo, el cual entregue la cantidad deseada para el proceso, dichos dispositivos son parte importante del equipo en recubrimientos superficiales y son utilizados en aplicaciones tales como: rociado térmico, recubrimiento con láser y otros métodos de procesamiento de materiales. Debido a la gran cantidad de polvos utilizados, con distintas propiedades físicas y mecánicas, es imposible utilizar un solo tipo de dispensador de polvo para todos ellos.

Al disminuir el tamaño de partícula del polvo, su fluidez disminuye causando problemas en el transporte de este, la fluidez también se ve afectada por partículas adhesivas y aglutinantes, además de partículas cargadas electroestáticamente. Por estas razones es necesario un tipo de dispensador de polvos para cada tipo de polvo.

En el caso de recubrimientos con láser, es necesario un dispensador de polvos que entregue un flujo uniforme y continuo de polvo, con gran precisión y en el rango requerido. Un sistema dispensador de polvo requiere una tolva para almacenar el polvo, un mecanismo que provee el material de manera continua y en la cantidad deseada un flujo de gas que arrastre el polvo hacia la tobera la cual direcciona el flujo de polvo a la superficie del material base, donde interactúa con el haz láser.

Las tasas de polvo para recubrimientos varían en el rango de 5 a 50 g/min, el dispensador de polvos puede generar esa cantidad mediante diferentes mecanismos, se requiere una estabilidad con una variación menor a 4% para ser aceptable (Schneider, 2008).

2.13.1 Mecanismos dispensadores de polvo

Existen muchos tipos de dispensadores de polvos, en general son categorizados en las siguientes clases según sus principios de operación: basados en la gravedad, sistemas mecánicos, cama fluidizada y vibración. En algunos casos se utiliza más de un principio para asegurar una mejor estabilidad en el flujo de polvo. En todos los tipos de dispensadores es necesario utilizar un gas para transportar las partículas del polvo hasta la zona de interacción con el material base y se utilizan diferentes tipos de toberas para dirigir el polvo hacia dicha zona (Láser, 2015).

- Los sistemas basados en la gravedad, funcionan de manera similar a un reloj de arena, en el cual se varía el diámetro de la garganta, lo cual cambia la cantidad de polvo que sale y se retroalimenta con un mecanismo de pesaje electrónico.

- El dispositivo basado en el polvo fluidizado, se basa en principios de los fluidos, con lo cual elimina la necesidad de partes móviles reduciendo el desgaste y la mantención. El dispositivo consiste en una tolva diseñada especialmente, en la cual ingresa gas y arrastra las partículas del polvo que van moviéndose en la tolva. La cantidad se regula variando la apertura en la tolva.
- Un alimentador por vibración consiste en una tolva con en una serie de placas delgadas inclinadas en cierto ángulo, sobre las cuales el polvo se va desplazando a medida que varía la frecuencia y amplitud de la vibración del dispositivo, llevando el polvo que cae en la serie de placas a una cámara donde es arrastrada por el gas.
- Existe otro tipo de sistema de alimentación de polvo mediante mecanismos uno de ellos es conocidos como dispensador de polvo por tornillo, puede manejar un amplio rango de polvos con diferentes tamaños de partículas, normalmente operan con poca o nula diferencia de presión con el exterior. La cantidad de polvo transportada por un tornillo típico depende de sus características geométricas tales como paso y diámetro, y la velocidad de giro del tornillo, la cual es controlada mediante un circuito electrónico que controla la velocidad del motor el cual impulsa el tornillo (Láser, 2015).

Una de las desventajas, es la interacción entre las partes móviles y las partículas del polvo, causando desgaste en los componentes afectando la precisión del sistema, lo que requiere constante mantenimiento y reemplazo de componentes.

2.13.2 Toberas

Las toberas desempeñan un rol fundamental en el proceso de recubrimientos láser, ellas se encargan de dirigir el flujo de polvo que sale del dispensador, a la zona de interacción entre los materiales y el haz láser.

El diseño de la tobera puede ser lateral o coaxial, la tobera lateral es adecuada para procesamiento unidireccional, en cambio con la tobera coaxial es posible realizar procesos omnidireccionales. Producto de las buenas propiedades conductivas y reflectivas del cobre, las toberas son fabricadas en este material, facilitando su refrigeración y resistiendo la energía láser reflejada desde la zona de interacción, la cual transmiten hacia el cabezal donde se disipa (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2004).

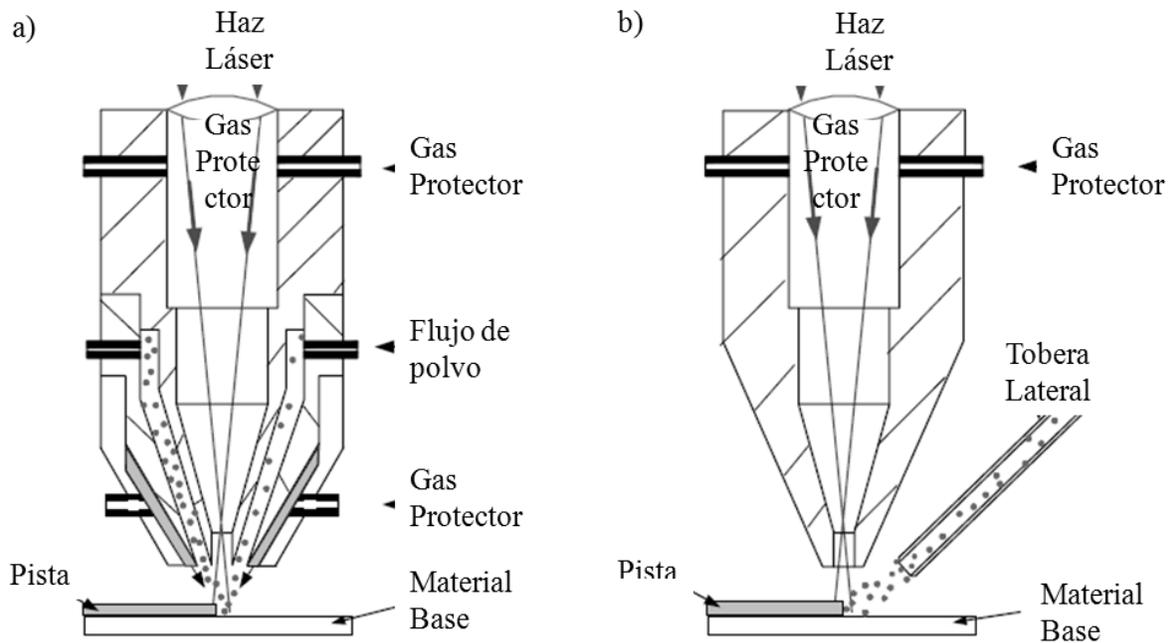


Figura 2. 30 Diseño de Toberas; a) Tobera coaxial, b) Tobera lateral.

Tobera coaxial:

La tobera coaxial, generalmente va integrada con el sistema óptico del láser. Su principal ventaja es la independencia de la calidad de la pista en función de la dirección de procesamiento. En la tobera coaxial, existen tres flujos involucrados que interactúan con la superficie del material, el gas protector por el centro de la tobera, el gas con polvo y un flujo de gas que rodea el flujo de polvo. Su esquema se aprecia en la Figura 2. 30.

Un flujo de polvo coaxial al haz láser se forma al salir de la tobera, el cual debe tener su punto focal al nivel de la zona fundida y mantener un flujo laminar con una distribución homogénea de polvo. Es posible llegar a una configuración semejante a la tobera coaxial, posicionando múltiples toberas laterales alrededor del cabezal (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2004).

Tobera lateral:

La tobera lateral es básicamente un tubo con diámetro interno determinado, largo y forma apropiada, el cual guía el polvo hacia la zona de interacción y es posible posicionarla a diferente distancia y ángulo respecto a la zona de interacción, para poder obtener una intersección entre el flujo de polvo y el haz láser.

En pruebas realizadas tomando fotografías de la corriente de polvo para obtener el perfil de polvo en función de la distancia desde el extremo de la tobera, se encontró que el perfil se aproxima a una parábola tal como se aprecia en la Figura siguiente. Dicha ecuación, permite obtener el diámetro de la corriente de polvo en función de la distancia desde la tobera al material (z [mm]), el diámetro interno de la tobera y un coeficiente λ (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2004). La ecuación para esta parábola es:

$$D_p = \lambda Z^2 + d_0$$

En este caso, el coeficiente λ se obtiene a partir del estudio indicado por Toyserkani et al (2004). Para una tobera de diámetro de 1,8 mm y $z < 23$, toma el valor de $2,58 \cdot 10^{-2} \frac{1}{mm}$.

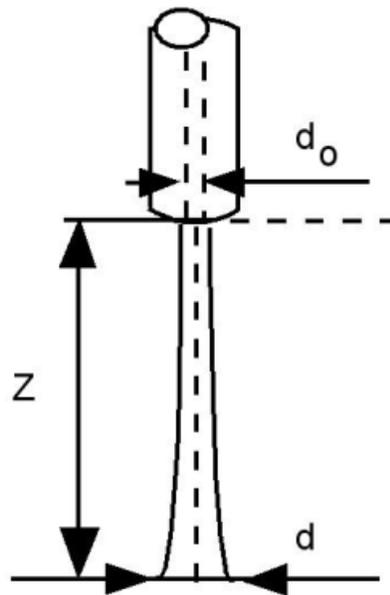


Figura 2. 31 Distribución parabólica del flujo de polvo a la salida de la tobera.

2.14 Parámetros y características del proceso

2.14.1 Parámetros de operación

El proceso de recubrimientos láser tiene como principales parámetros de operación la potencia láser entregada por el equipo, si es pulsada o continua, la velocidad de avance, la cantidad, tipo de polvo utilizado y manera de proyectarlo, el material base entre otros. Es importante que todos estos parámetros estén en

ciertas combinaciones adecuadas para tener los resultados requeridos. A continuación se detallan los parámetros más relevantes en el proceso.

- **Potencia:** su combinación con otros parámetros, en especial velocidad y diámetro focal, dependerán principalmente de los resultados obtenidos, ya sea poca o nula fusión de los materiales hasta demasiada fusión incluyendo vaporización. Según el tipo de láser y la aplicación, la potencia puede ser entregada en forma continua o pulsada, además de poder variar su distribución de potencia dentro del haz láser según la polarización del haz.
- **Velocidad:** se refiere a la velocidad relativa entre el material base y el haz láser, es un parámetro fuerte dentro del proceso, ya que determina el tiempo de interacción entre el láser y el material. Generalmente dada las dimensiones trabajadas, se mide en mm/s y depende principalmente del sistema posicionador, si es el material el que se mueve o el haz láser mediante espejos o brazos robóticos.
- **Diámetro focal:** se define como el ancho del haz láser sobre el material base, es otro de los parámetros fuertes en el proceso junto con velocidad y potencia, de él depende la concentración de la potencia sobre el material base, a igual potencia para un diámetro menor, tendremos una mayor concentración de la potencia en el material.
- **Flujo de polvo:** determina las dimensiones de la pista sobre el material base y según su cantidad, la proporción en la aleación formada. Generalmente se mide en g/min y su cantidad depende principalmente del dispensador de polvos. Demasiado polvo podría no fundirse con el haz láser, y atenuar demasiado la luz incidente sobre el material.

La combinación de los parámetros detallados anteriormente lleva a 2 parámetros referidos en la literatura por los cuales corresponden a energía específica y densidad de polvo (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2004).

$$E_{especifica} = \frac{P_{láser}}{D_{láser} \cdot v} \frac{J}{mm^2}$$

$$G = \frac{m}{D_{láser} \cdot v} \frac{m}{mm^2}$$

2.14.2 Propiedades de la pista fundida

Se clasifican en cuatro grupos los cuales se detallan en la Tabla. Algunas de las propiedades están interrelacionadas, por ejemplo la resistencia al desgaste se ve afectada por la dureza, microestructura número de grietas con su profundidad y dirección, la adhesión etc. Es importante prevenir las grietas, ya que estas inician la fractura por corrosión y reducen la resistencia a la fatiga.

Tabla 2. 1 Propiedades generales de una pista fundida.

Propiedades Geométricas	Propiedades Mecánicas	Propiedades Metalúrgicas	Propiedades Cualitativas
Dimensiones de la pista	Distribución de dureza	Microestructura	Porosidad
Dilución	Tensiones residuales	Dilución	Grietas
Rugosidad	Resistencia al desgaste	Tamaño de grano	
	Resistencia a la tracción	Homogeneidad	
		Resistencia a la corrosión	

A continuación se profundizará en las propiedades más relevantes y utilizadas en este estudio.

- **Propiedades geométricas:** son consecuencia de la combinación de parámetros de operación, son medidas mediante microscopio óptico y un software de procesamiento de imágenes. Las principales medidas son alto y ancho de las zonas afectada térmicamente, fundida y pista superior, y se especifican en la Figura 2. 32.

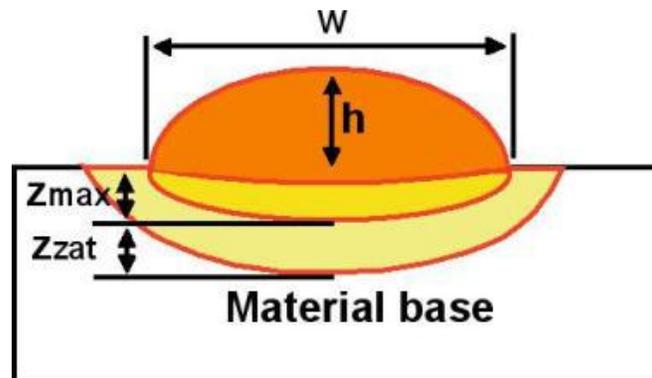


Figura 2. 32 Esquema de piletas y pista fundida sobre el material base.

Mediante la combinación de las mediciones, es posible calcular el área de cada una de las 3 zonas aproximándolas a media circunferencia con diámetro igual al ancho de la zona. Otro parámetro combinado es la razón de aspecto, la cual mide cuantas veces el alto de la pista está contenido en el diámetro, se calcula como la razón entre el ancho y el alto total.

$$RA = \frac{w}{h + Z}$$

- **Propiedades Mecánicas:** dependen de las propiedades metalúrgicas y termo físicas de los materiales, principalmente de la aleación formada, solidificación y posterior tratamiento térmico producido al enfriarse rápidamente. Dadas las condiciones del laboratorio, solo es posible medir la dureza en la zona transversal de la zona tratada, realizando perfiles de dureza y obteniendo un promedio en la zona fundida.
- **Propiedades Metalúrgicas:** basándose en el análisis metalográfico, es posible observar la microestructura, tamaño de grano, dirección de crecimiento y la homogeneidad de la zona tratada en su sección transversal, además de observar la zona afectada térmicamente.

Es necesario determinar o bien, definir, el porcentaje con el cual cada componente aporta a la aleación, a fin de saber que fases hay presentes y conocer los diagramas de fases respectivos. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, presenta el diagrama de fases binarias para el complejo Cr-Fe, en donde podemos obtener información sobre que temperatura y composición de la aleación es necesaria para obtener cierta fase. Además es posible es realizar análisis de difracción de rayos X, para obtener el patrón de difracción y obtener así las fases presentes en el material.

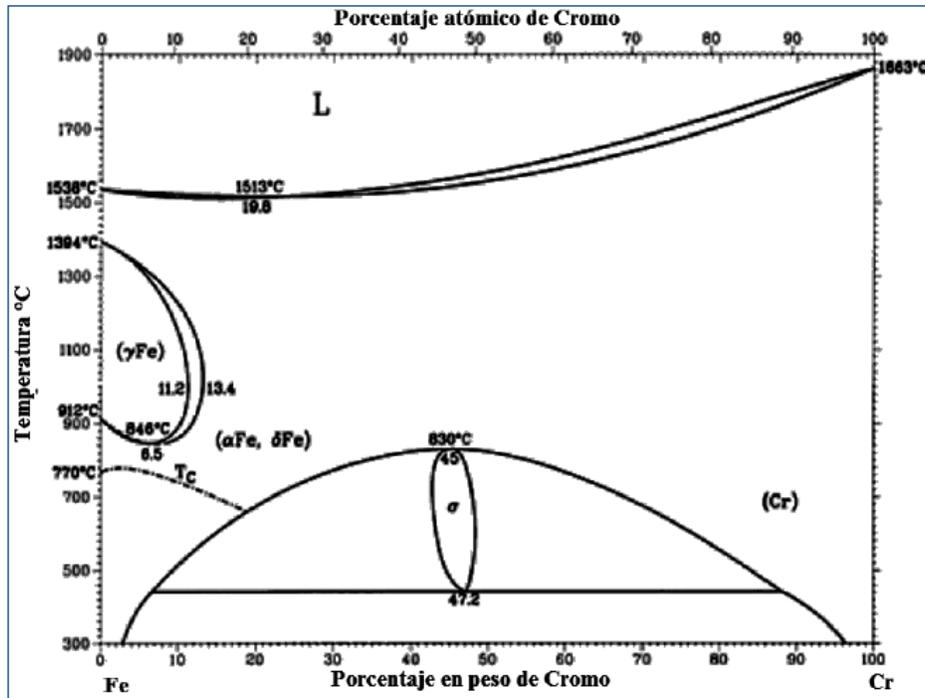


Figura 2. 33 Diagrama de fases Cr-Fe.

- Propiedades Cualitativas:** observables principalmente a través del análisis metalográfico, se indica la presencia de porosidades o grietas en la sección transversal, en especial en la interfaz del material de aporte fundido sobre el material base sólido, la forma de charco de soldadura y aspecto de la pista solidificada (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2004).

2.14.3 Efecto de los parámetros en el proceso

Las variables físicas y del proceso pueden afectar los resultados obtenidos en la pista, los cuales son mostrados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Para que sea posible predecir los resultados, las relaciones entre estas variables y los resultados de la pista deben ser conocidas y resolverse simultáneamente, pero hasta el momento no hay soluciones exactas disponibles (Láser, 2015).

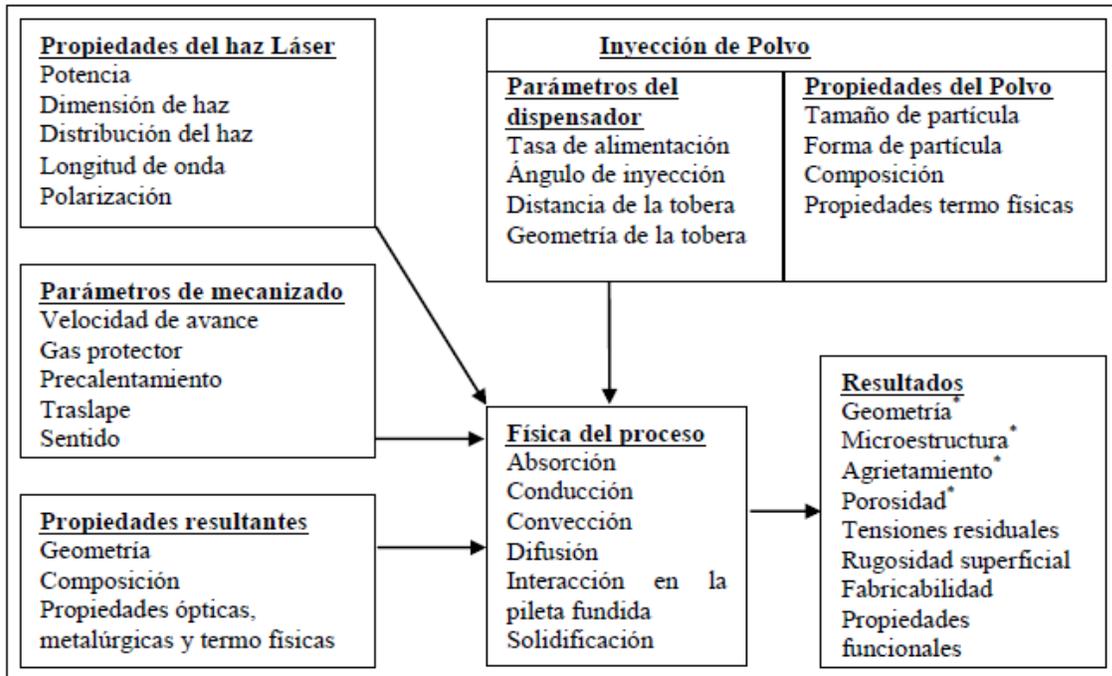


Figura 2. 34 Diagrama parámetros y variables del proceso.

Mediante la variación de los parámetros involucrados en el proceso y el registro de sus resultados, Schneider (2008) ha confeccionado la Tabla 2. 1, la cual muestra cualitativamente como se ven influenciadas las características de la pista por los parámetros del proceso.

Tabla 2. 2 Efectos reportados entre parámetros operativos y propiedades de la pista.

Parámetros \ Propiedades	Alto de pista	Profundidad fundida	Dilución	Dureza	Espesor máximo pista
Potencia láser	-	+	+	-	+
Velocidad avance	+	-	-	+	-
Flujo material	+	-	-	+	+
Diámetro focal	+	-	-	+	-

2.15 Interacción entre los materiales

El proceso de recubrimiento láser es usado para mejorar las propiedades superficiales de piezas mecánicas. En la actualidad, existe una gran variedad de

polvos metálicos y cerámicos disponibles comercialmente, los cuales fueron desarrollados para ser usados en rociado térmico con llama y plasma, pero también sirven como material de aporte en recubrimientos láser, ya que las propiedades requeridas en la superficie luego del tratamiento son esencialmente las mismas, variando en el tipo de energía utilizada para su deposición.

Un aspecto fundamental en los recubrimientos con láser es lograr una unión metalúrgica fuerte, mediante fusión de los dos materiales, lo cual se dificulta en algunas combinaciones debido a la poca solubilidad entre el sustrato y el material de aporte, tal es el caso de materiales cerámicos en metales (Schneider, 2008). Las posibles soluciones a esta dificultad consisten en realizar recubrimientos del tipo Sándwich, precalentar o usar otro material intermedio que sea soluble en ambos materiales.

El requisito básico para una buena unión metalúrgica por fusión es que los 2 materiales sean solubles entre sí, para lo cual es importante conocer el diagrama de fases de los materiales y ver los compuestos que se forman a distintas concentraciones y temperaturas. En general para las aleaciones la solubilidad no es un problema, pero en el caso de materiales puros pueden existir dificultades para lograr una buena unión. En dicho caso se utiliza un material intermedio tal como en el caso del aluminio y cobalto entre los cuales es necesario aplicar algún compuesto inter metálico para lograr una buena unión.

En ciertos casos conviene aplicar múltiples capas para reducir el impacto térmico o para lograr una capa con un gradiente de composición del material y baja dilución (Schneider, 2008).

La convección es el factor más importante que influencia la geometría de charco de soldadura fundida y las ondas en la superficie, además es el principal mecanismo responsable de la mezcla entre el material de aporte y el sustrato. Dentro del material fundido se producen flujos de material con características gobernadas por los gradientes de tensión superficial conocidos como convección o flujo de Marangoni, los cuales imponen una condición de borde de esfuerzo de corte en el flujo fundido. Este gradiente depende del coeficiente de tensión superficial el cual es función de la temperatura. Un coeficiente negativo para la tensión superficial es el caso más común, lo cual resulta en una baja tensión superficial en la zona media de charco de soldadura fundida y una gran tensión hacia la interfaz sólido-líquido. Esta diferencia de tensiones crea corrientes que desplazan material hacia los costados de la zona fundida.

Debido a la existencia de puntos de estancamiento en la interfaz sólido-líquido, combinado con la conservación de masa, se generan vórtices dentro de charco de

soldadura fundida, en los cuales el material fundido fluye hacia abajo a través de la interfaz sólido-líquido, (la posibilidad de fluir hacia arriba está limitada por la tensión superficial). Luego el flujo llega al centro, en la región más profunda de charco de soldadura y sube nuevamente.

Este mecanismo puede ser uno de los orígenes de la forma de bala, típica de charco de soldadura fundida (Dowden, 2009).

Bajo ciertas circunstancias, como en el caso de adición de elementos en la superficie tales como azufre u oxígeno, el coeficiente de temperatura de la tensión superficial es positivo, el flujo se dirige en el sentido opuesto al señalado anteriormente, el flujo baja en el centro de charco de soldadura, y sube por la interfaz sólido-líquido, obteniendo una zona fundida de mayor profundidad. Como acotación final, es posible obtener en una misma zona fundida, combinaciones de ambos flujos.

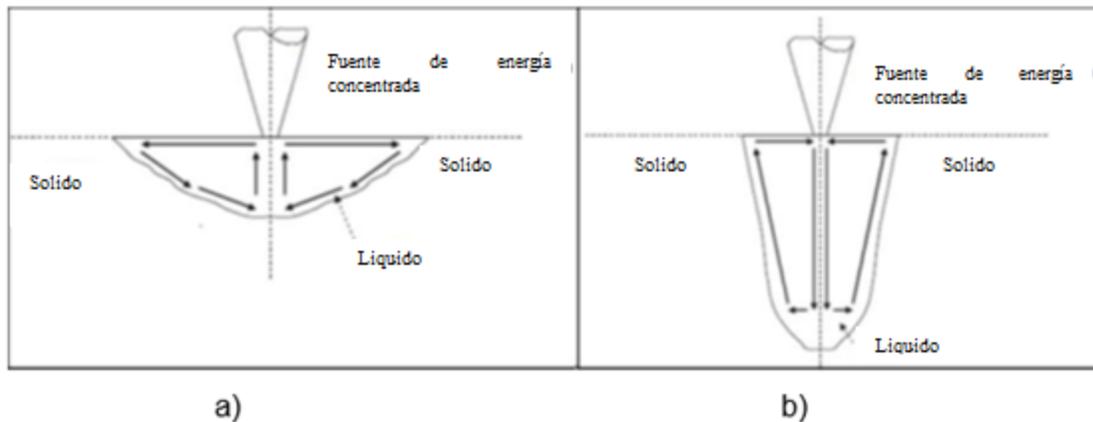


Figura 2. 35 Convección de Marangoni a) con componente negativo, b) con componente positivo.

La microestructura y la composición química de la pista dependen fuertemente del grado de mezcla y las tasas de enfriamiento durante la solidificación y el enfriamiento posterior, los parámetros que controlan estos mecanismos son importantes en el proceso y son característicos para cada material (Komvopoulos & Cheng, 2012).

El punto de fusión del sustrato es preferible que sea menor al del material de aporte, de lo contrario es posible que durante la solidificación y el posterior enfriamiento de la pista, la región bajo la pista pueda calentarse sobre la temperatura de fusión, perdiendo parte de la dureza y resistencia.

La formación de grietas en la pista fundida, es causada principalmente por los esfuerzos térmicos inducidos por el gradiente de temperatura durante el enfriamiento y la diferencia entre los coeficientes de expansión térmica. Especialmente las capas creadas con materiales duros y frágiles tales como carburos o cerámicas, son propensas al agrietamiento, lo cual es factible de reducir precalentando el material base logrando así tasas de enfriamiento menor. (Schneider, 2008).

2.16 Descripción del modelo de Rosenthal y su aplicación en el tratamiento de superficie

Rosenthal (1946) en su publicación “*Theory of moving sources of heat and its application to metal treatments*” propuso una teoría para una fuente puntual de calor, moviéndose a velocidad constante sobre una placa semi-infinita, en un proceso quasi-estacionario, el cual es aplicable al fenómeno de transferencia de calor producido al irradiar con láser una placa a velocidad constante.

En su solución para obtener el campo de temperaturas de una fuente puntual de calor, moviéndose a velocidad v en un material, Rosenthal (1946) consideraban una placa plana semi-infinita y valores constantes de la conductividad y difusividad térmica, pero en la práctica estos valores dependen fuertemente de la temperatura, lo cual no se considera en esta solución.

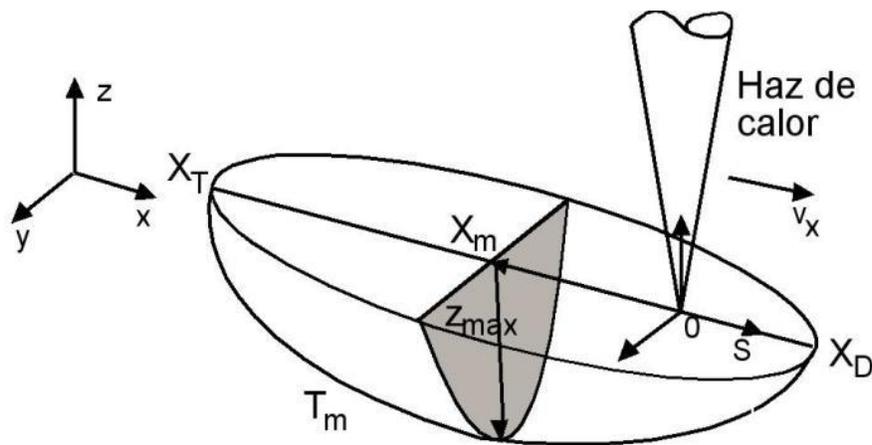


Figura 2. 36 Isotherma de fusión, según modelo de Rosenthal.

La solución particular a la ecuación de Rosenthal (1946) considerando un estado estacionario, un marco de referencia móvil y sin flujo de calor en las caras de la placa, se puede escribir como:

$$\Delta T(x, z) = \frac{P_{laser} \cdot \eta}{2\pi k \sqrt{X^2 + Z^2}} e^{\frac{V_x}{2\alpha} \sqrt{X^2 + Z^2}}$$

En el modelo de Rosenthal, para un valor ΔT correspondiente a la temperatura de fusión del material, el valor de z corresponde al valor en el cual la profundidad de la zona fundida es máxima ($Z_{m\acute{a}x}$) y el valor de x , a la distancia entre la fuente puntual de calor y la zona donde se ubica $Z_{m\acute{a}x}$, dicho valor es conocido como $X_{m\acute{a}x}$. Para velocidades bajas (en este caso $V_x=0,002$ m/s) $X_{m\acute{a}x}$ es cercano a 0 y la ecuación puede reescribirse despejando $Z_{m\acute{a}x}$, el cual es directamente proporcional a la potencia aplicada. Dicha constante de proporcionalidad depende de la eficiencia de acople, conductividad térmica, difusividad térmica y velocidad relativa entre el haz láser y la placa.

$$Z_{M\acute{a}x} \sim P_{l\acute{a}ser} \cdot Cte$$

Para observar la linealidad entre la profundidad de fusión y la potencia a bajas velocidades, se adjunta el gráfico en la Figura 2. 37, este gráfico se obtuvo a partir de la ecuación de Rosenthal considerando una eficiencia de acople de 20% y propiedades térmicas del acero SAE1020.

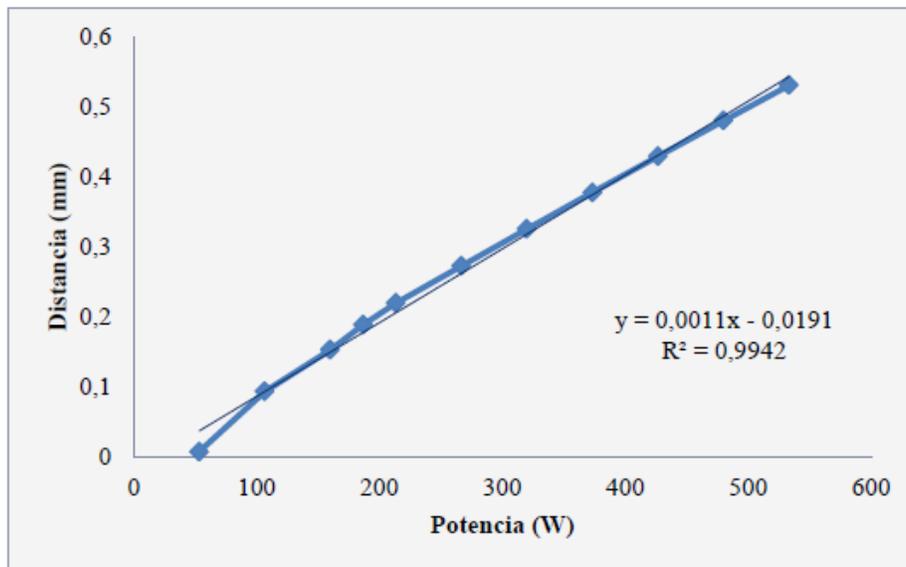


Figura 2. 37 Gráfico Z máximo según modelo Rosenthal en función de la potencia.

2.17 Recubrimiento láser

Los recubrimientos láser son un tratamiento superficial con adición de material. Se distinguen tres tipos atendiendo a la mezcla resultante entre el material de aporte y el material base. Todos consisten en fundir el material de aporte y una parte del material base, pero se diferencian en los parámetros empleados, cantidad de material de aporte, velocidad relativa de desplazamiento, potencia (Shida, Ohtsuka, Murayama, & Fujikawa, 1983).

- *Laser alloying* (aleación láser): material base y de aporte se mezclan completamente debido a la mayor difusión en estado líquido y el efecto de la convección dentro de la pileta.
- *Laser dispersing* (solución sólida con láser): se logra una solución de partículas sólidas del material de aporte en una matriz de material base fundido.
- *Laser cladding* (plaqueado láser): los dos materiales se funden completamente mediante el haz láser, pero se mezclan y reaccionan químicamente solo en la interfaz formada. En la sección transversal se diferencian tres zonas, material base fundido, mezcla y la capa superficial solo con el material de aporte fundido, que definirá las características superficiales (Shida, Ohtsuka, Murayama, & Fujikawa, 1983).

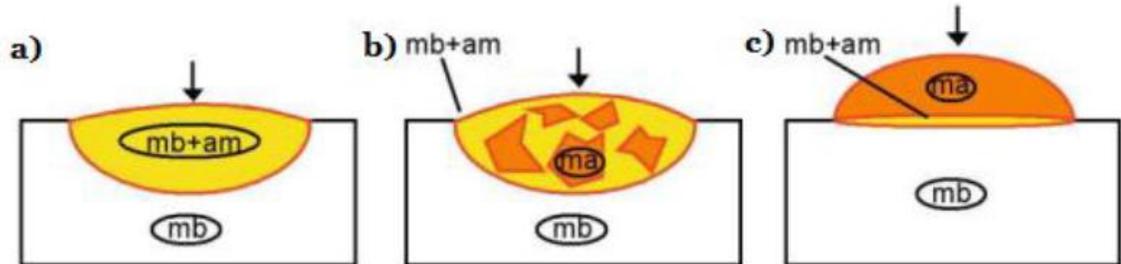


Figura 2. 38 a) Laser alloying b) Laser dispersing c) Laser cladding.

2.17.1 Laser cladding

El proceso de *laser cladding* consiste en depositar una capa protectora de entre 0.1 y 1.5 mm sobre la superficie deseada utilizando la tecnología láser para fundir total o parcialmente el material de aporte que se desea emplear como recubrimiento, creando un cordón de dicho material sobre la superficie de trabajo. Este material se aporta normalmente mediante alimentación en forma de polvo simultáneamente al proceso de deposición. El movimiento relativo del sustrato y la fuente de haz láser permite obtener un recubrimiento de grandes superficies

(mucho mayores que el diámetro del haz del láser), superponiendo parcialmente sucesivos cordones. Mediante esta tecnología se obtienen recubrimientos de materiales muy diversos, como pueden ser materiales cerámicos, cerámico-metal y metálicos (Foct, 1988), (Meyer & Du Toit, 1996), (Munitz, Cotler, Stern, & Kohn, 2001).

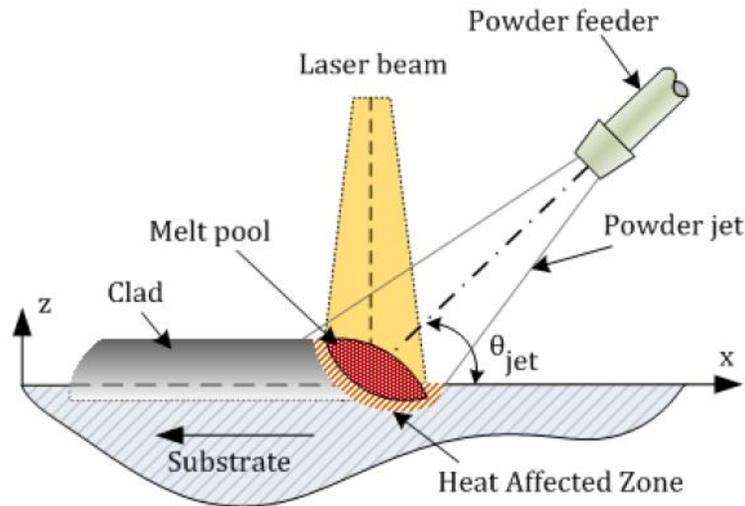


Figura 2. 39 Proceso esquematizado de laser cladding con inyección de polvo con tobera lateral.

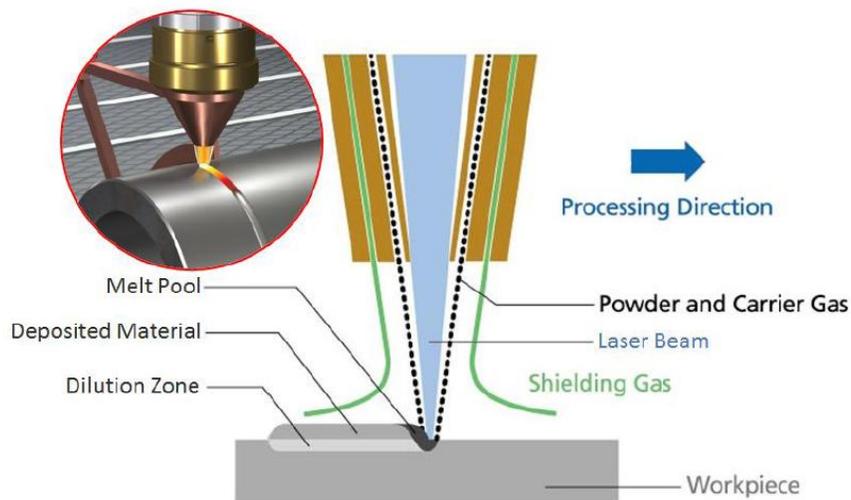


Figura 2. 40 Proceso esquematizado de laser cladding con inyección de polvo con tobera coaxial.

La principal ventaja del proceso es la baja afectación térmica del sustrato a recubrir, así como la minimización de las tensiones residuales introducidas durante

el proceso de recubrimiento, lo que permite recubrir un amplio espectro de sustratos difícilmente procesables mediante otras tecnologías. Además, el proceso puede ser fácilmente robotizado de manera que se puede garantizar una gran calidad del recubrimiento obtenido.

Desafortunadamente el láser cladding es un proceso difícil de controlar debido a las interacciones entre el haz láser, las partículas de polvo y la zona fundida. De hecho, aunque la mayoría de la energía del láser alcanza la superficie de trabajo, una fracción es captada por las partículas de polvo, calentándolas. Además solo las partículas de polvo que impacten con la zona de fusión quedaran adheridas, mientras que el resto tan solo rebotaran contra la superficie y se perderán. Otro complejo fenómeno es la variación de energía absorbida por la superficie de trabajo (esto es, ratio entre la energía disponible en la superficie de trabajo y la energía que dicha superficie de trabajo absorbe) según el tamaño de la zona de fusión. Finalmente hay que comentar que a causa de la compleja geometría del recubrimiento debajo del haz láser, es difícil predecir la energía proporcionada por dicho láser que minimiza la profundidad de la zona de fusión del elemento que se desea recubrir (ya sea la propia pieza o un cordón de un cladding anterior) pero que aún proporciona la suficiente como para fundir el polvo aportado (Brown, 2003).

En la Figura 2. 41 podemos observar los diferentes cordones de cladding que se producen en una pasada, así como la superposición de dos pasadas consecutivas.



Figura 2. 41 Distintos cordones de cladding.

Los parámetros del proceso son numerosos. Cabe destacar entre ellos las propiedades del haz del láser y la velocidad relativa de este respecto a la superficie de trabajo, la distancia entre dos cordones sucesivos, el tipo de inyector de polvo y su geometría y las propias condiciones de inyección. Todos estos parámetros están, por supuesto, altamente relacionados. Por ejemplo, cambiar el diámetro del haz del láser implica un cambio en la distancia de separación de dos cordones sucesivos. De la misma manera es posible obtener la misma altura de recubrimiento a diferentes velocidades de desplazamiento, aumentando la cantidad del polvo aportado. Por lo tanto podemos observar que alcanzar un estado óptimo es sumamente complicado.

Dispensador de material de aporte

Existen diferentes soluciones a la hora de suministrar el material de aporte, atendiendo a la forma física en la que se encuentre este y a la propia manera de aportarlo. De este modo se distingue entre alimentación por alambre, polvo predepositado e inyección de polvo.

En el caso de alimentación por alambre se aplica el material en forma de alambre mediante una guía lateral, que dirige el alambre hacia la zona de interacción en la cual es fundido por el haz láser.

La alimentación mediante polvo predepositado se realiza en dos fases, una primera en la que se deposita sobre la superficie deseada el material de aporte, polvo disuelto en algún tipo de líquido, formando una especie de barro. A continuación en una segunda fase el material es fundido por el láser.

Por último, en el caso de inyección de polvo, el material que se aporta es polvo y se suministra, al mismo tiempo que es fundido por el láser, mediante una o varias toberas laterales o coaxiales (Láser, 2015).

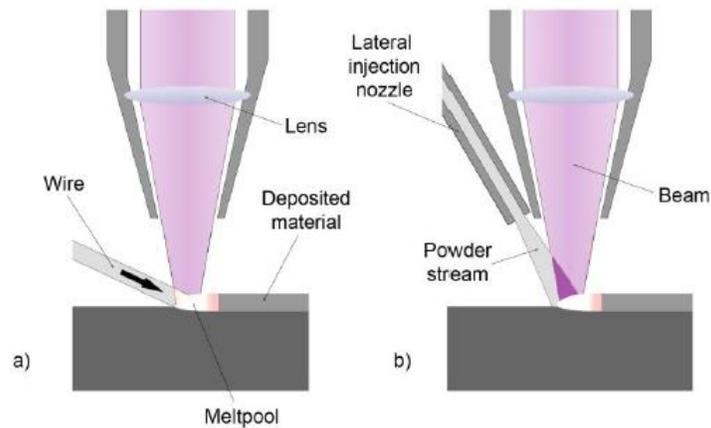


Figura 2. 42 a) Alimentación por alambre. b) Inyección por polvo.

Dispositivo suministrador de polvo por inyección

Comparando el uso de polvos en lugar de alambre como modo de alimentación encontramos una serie de ventajas. El polvo está compuesto de infinidad de partículas independientes que permiten una mayor reflexión de energía entre ellas, lo que propicia que la absorción de energía por parte del material de aporte sea mayor que en el caso de usar alimentación por alambre, lo cual hace más efectivos este tipo de recubrimientos. El uso de polvos aporta flexibilidad al proceso, ya que permite variaciones de concentraciones y cantidad en tiempo real, logrando un recubrimiento variable en dimensión y/o composición. A todo esto hay que sumar que actualmente existe mayor variedad de elementos de aporte en polvo que en alambre (Shida, Ohtsuka, Murayama, & Fujikawa, 1983).

Para llevar a cabo un aporte de material mediante inyección de polvos es imprescindible contar con un dispositivo dispensador de polvo que proporcione la cantidad de polvo deseada en cada momento, manteniendo un flujo constante y continuo, con gran precisión y en el rango superficial requerido. Otro problema que se le plantea a este tipo de dispositivos es el desgaste que se produce de sus componentes a causa de la fricción con las partículas de polvo, lo que conlleva una necesidad constante de mantenimiento del mismo.

Debido a la gran variedad de polvos empleados, con propiedades muy diferentes, no es posible la utilización de un único dispositivo suministrador, sino que existen muchos tipos, clasificados de manera general según su principio de operación. Encontramos los basados en la gravedad, cuyo funcionamiento es similar a un reloj de arena. Los sistemas mecánicos, que emplean diferentes mecanismos para realizar esta función, por ejemplo, el suministrador de polvo por tornillo. Los

basados en principios de los fluidos, que básicamente consisten en disolver el polvo en un fluido; este método reduce el desgaste y la manutención. Y los sistemas con alimentador por vibración, que consiste en una tolva con una serie de placas delgadas inclinadas un cierto ángulo sobre las que se desplaza el polvo a medida que varía la frecuencia y amplitud de la vibración del dispositivo.

Pero todos ellos poseen una serie de elementos comunes: una tolva, donde almacenar el polvo; una tobera que dirija el material de aporte; y un flujo de gas que arrastre al polvo.

La tobera es el componente encargado de dirigir el flujo de polvo que sale del dispensador, a la zona de interacción entre los materiales y el haz láser. Existen dos posibilidades, la tobera lateral, adecuada para el procesamiento unidireccional, y la tobera coaxial que permite realizar procesos omnidireccionales. En el caso de las toberas laterales es posible emplear varias de ellas desde diferentes posiciones, lo que permitirá asemejar esta configuración al caso de tener una tobera coaxial.

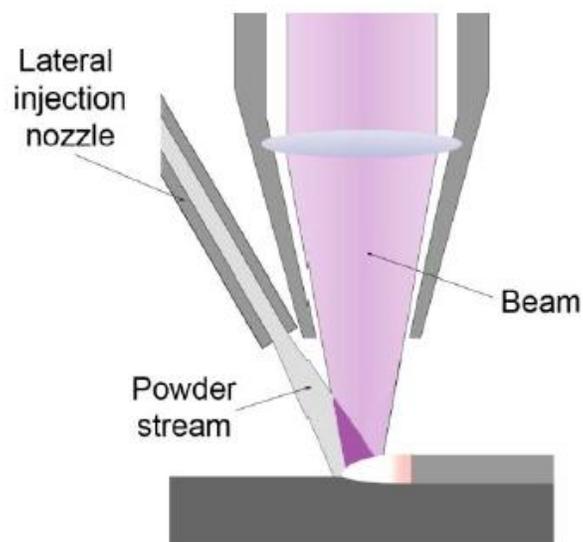


Figura 2. 43 Tobera lateral.

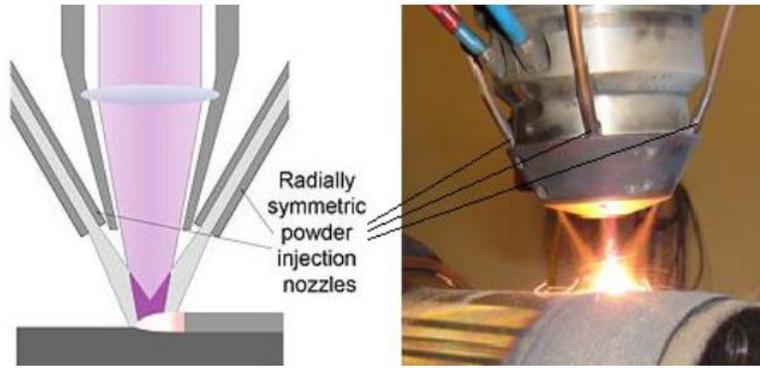


Figura 2. 44 Múltiple tobera lateral.

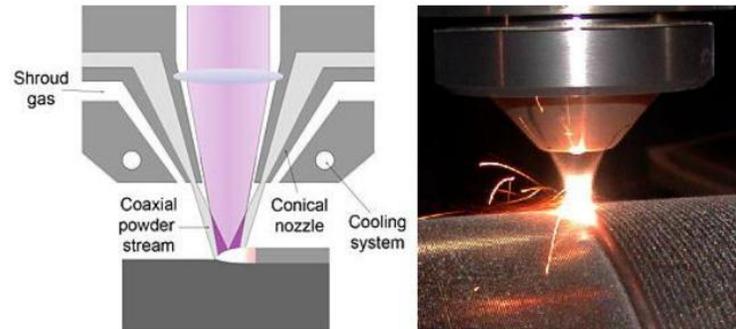


Figura 2. 45 Tobera coaxial.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del lugar del proyecto

El proyecto se llevó a cabo en el laboratorio de recubrimiento y tratamiento superficial por soldadura láser ND-YAG, localizado en el edificio "I", de la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA), en el municipio de Saltillo en el estado de Coahuila de Zaragoza, con una superficie de 25 m².

3.2 Equipo y material utilizados en el proyecto

- Se utilizó una Workstation de la marca Dell que cuenta con: Procesador Intel Core i7, Windows 7 Professional 64 bit, 16 GB de memoria RAM DDR3L a 1600 MHz, disco duro de 500 GB 2.5" 5400 rpm, tarjeta de video NVIDIA Quadro K1100M con 2GB. Para investigación y manejo de software (Figura 3. 1).



Figura 3. 1 Workstation Dell Precision M6600.

- El software de apoyo para el diseño y simulación mecánica es NX Nastran o NX UNIGRAPHICS 10, presenta varios módulos de trabajo como diseño mecánico con su simulación de movimiento y análisis por FEM, diseño de sistemas electromecánicos que incluye la simulación para modos de fallo primarios correspondientes a temperatura, vibración, polvo o humedad. Además proporciona información visual y análisis de alta definición en

tecnología 3D (HD3D) para recopilar datos PLM al instante; aplicaciones para diseñar utillajes, moldes, troqueles y accesorios precisos; simulación de mecanizado para programar máquinas-herramienta; gestión de procesos de ingeniería para obtener información sobre ingeniería de productos y procesos integrada a la perfección con CAD, CAM y CAE; simulación multidisciplinar para la preparación de modelos, resolución de problemas y posprocesamiento (Figura 3. 2).

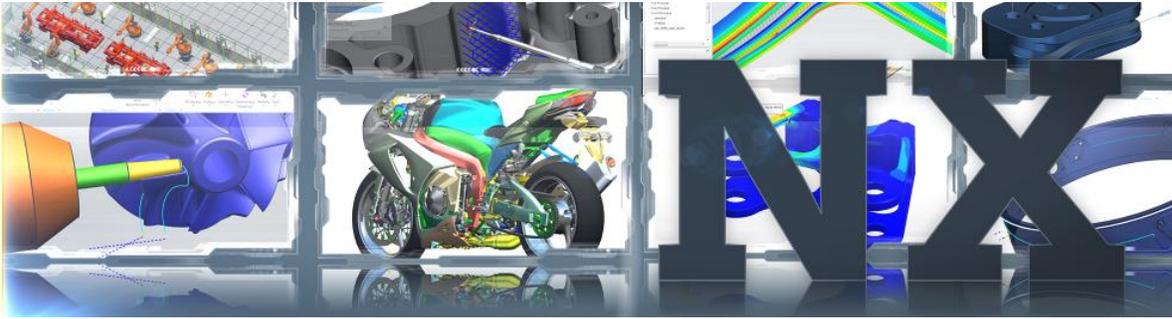


Figura 3. 2 Software de diseño NX Unigraphics 10.

- Láser de estado sólido ND-YAG y revestimiento (cladding), las características son confidenciales. Este equipo se seleccionó con ayuda de la simulación por elemento finito con respecto a la transferencia de calor que presenta al realizar el proceso de recubrimiento (Figura 3. 3).



Figura 3. 3 Máquina de alta frecuencia del láser ND-YAG.

- Herramientales de prueba, estos son proporcionados por el área de pruebas mecánicas que labora en COMIMSA (Figura 3. 4).

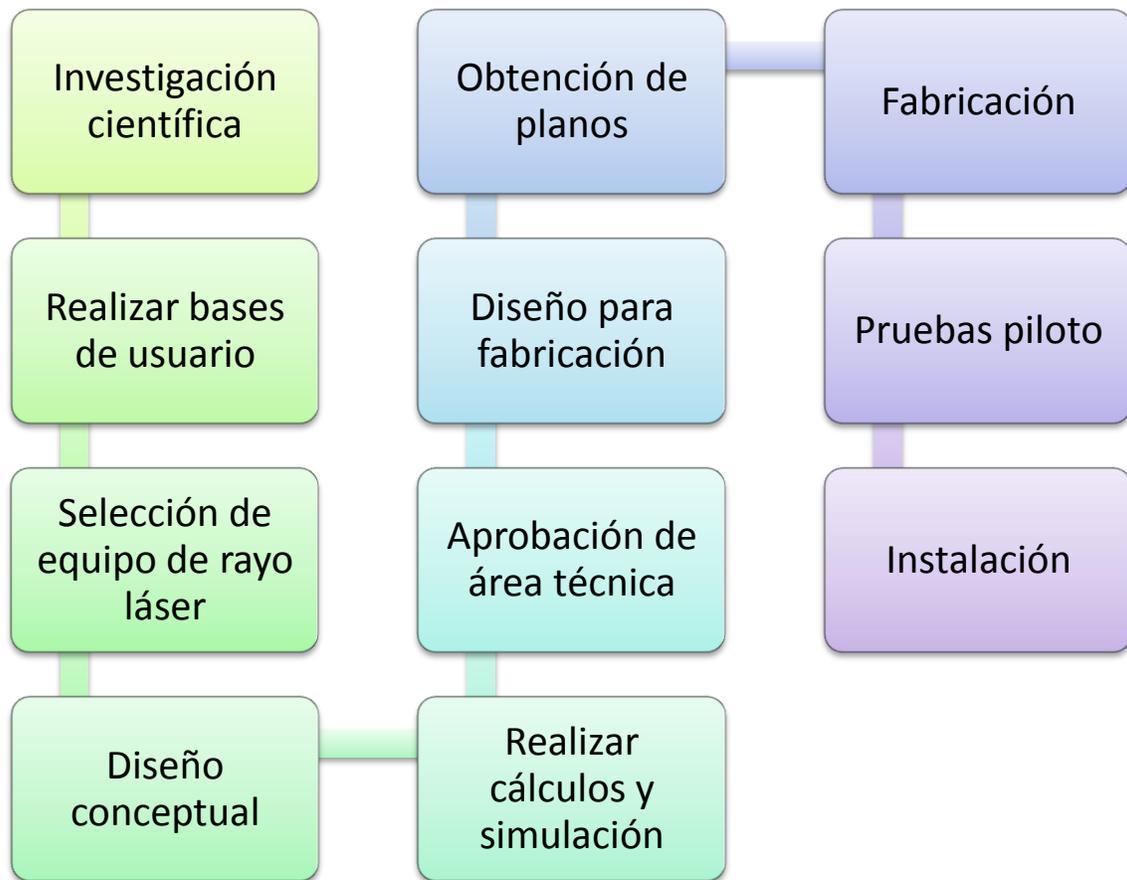


Figura 3. 4 Herramental y piezas elaboradas.

- Otros materiales: se utilizaron otros materiales los cuales son confidenciales, así como el uso de algunos laboratorios para obtención de resultados.

3.3 Metodología

El primer paso fue conseguir un laboratorio, para el acondicionamiento del mismo y así trabajar sobre las condiciones presentadas en área de trabajo. Se realizó un previo estudio con respecto a los acondicionamientos necesarios y básicos que necesitaba el laboratorio. A continuación se muestra un diagrama de la metodología:



3.3.1 Primera etapa

Se realizó una exhaustiva investigación sobre el equipo de soldadura láser. Desde su forma geométrica hasta los parámetros a los cuales opera. Esto para el establecimiento de las bases de usuario, y para tener un punto de partida en el diseño y los parámetros importantes para la simulación de la estructura.

3.3.2 Segunda etapa

Se realizó un diseño conceptual para realizar una simulación del equipo a construir, este diseño no es el final (Figura 3. 5). Este modelo fue la base para trabajar sobre las dimensiones reales. La simulación es confidencial al igual que los resultados obtenidos.

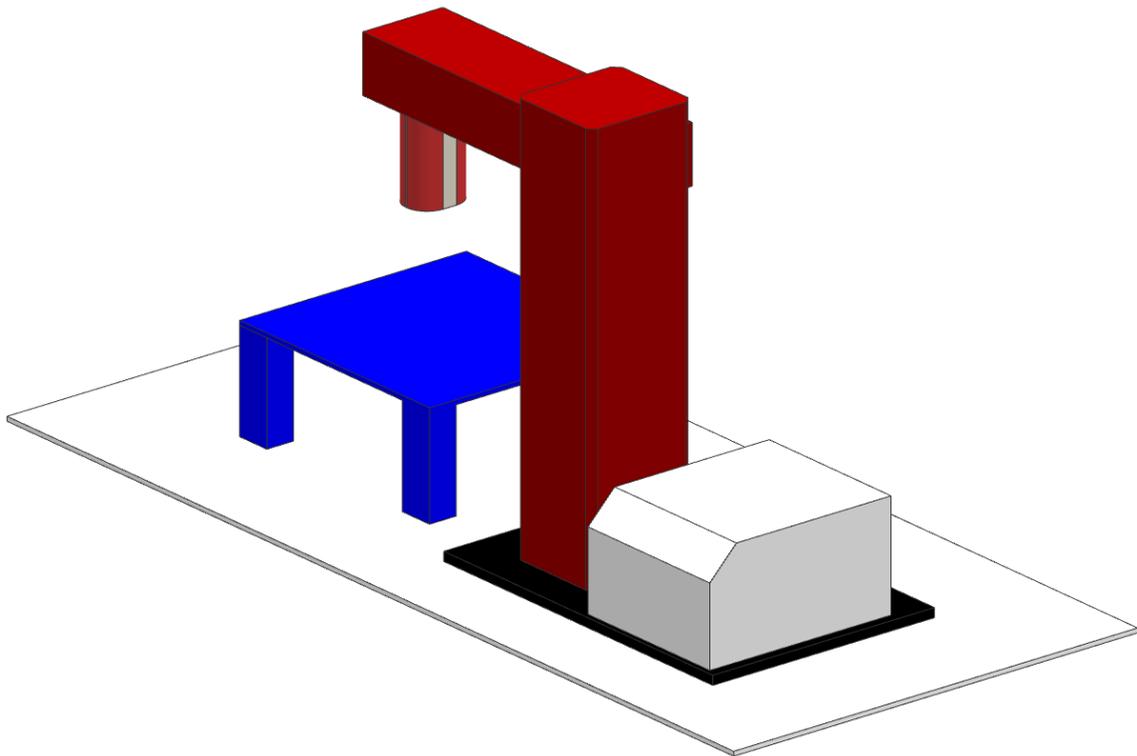


Figura 3. 5 Diseño conceptual de celda.

El modelo anterior muestra resultados satisfactorios con respecto a la simulación por elemento finito realizada, lo cual permite pasar a la siguiente etapa.

En esta etapa también se hace selección del equipo de soldadura láser en estado sólido que se va a emplear en el prototipo. El equipo seleccionado es confidencial por lo que no se hace mención específica de los componentes a utilizar.

3.3.3 Tercera etapa

Como se ha establecido en los puntos anteriores es necesario desarrollar un sistema de tres ejes para la modificación de las propiedades mecánicas y microestructurales para incrementar la resistencia al desgaste a través de tratamientos térmicos con procesos de soldadura laser superficiales.

El temple es un tratamiento térmico en el que el acero es calentado hasta temperaturas de austenización y posteriormente es enfriado rápidamente, con el fin de obtener una transformación que proporcione una estructura martensítica dura y resistente. El temple superficial se utiliza generalmente para componentes

que necesiten una superficie dura y un sustrato que sea tenaz. Como lo es el caso de herramientas de alto valor.

El tratamiento térmico de endurecimiento superficial (temple) por láser es un proceso en el cual se utiliza la energía de un haz láser para producir un rápido calentamiento de la zona a tratar. El endurecimiento térmico consiste en proporcionar al material la suficiente energía para conseguir niveles de temperatura capaces de provocar cambios en sus propiedades metalúrgicas, sin llegar a la fusión o evaporización del material.

En esta etapa se desarrolla la celda experimental que consiste en disponer el material de la aleación sobre la pieza a tratar en forma de polvo, láminas o varillas. Al actuar el haz láser con su gran intensidad se genera la alta temperatura y el gradiente térmico que exige la aleación. A través de ellos el material añadido se funde, se agita vigorosamente y se difunde por las capas adyacentes del material base, consiguiendo unas velocidades de difusión altísimas. El enfriamiento brusco determina la microestructura fina de las capas aleadas. Por selección apropiada de las condiciones de aplicación láser se puede incluso ajustarse con precisión la distribución en profundidad de los elementos que forman la aleación

El dispositivo o brazo está diseñado para la reparación de piezas de alto valor añadido (errores en cotas de fabricación, desperfectos producidos en servicio, cambios de plano en prototipos, etc.).

- Aumento de vida en servicio de piezas mediante recubrimiento de materiales de altas prestaciones (resistentes a desgaste, corrosión, temperatura etc.).
- Posibilidad de utilización de materiales más baratos reforzados superficialmente (herramientales de acero de baja aleación reforzados superficialmente con aceros de herramientas o aceros rápidos

A continuación se presenta el esquema de la celda desarrollada para tratar térmicamente a través de laser en la combinación de cladding con Nd-YAG con lo cual se pueden reparar y modificar componentes de alto valor.

Se procedió a modificar los componentes de la máquina de Nd-YAG, adaptando un sistema de recargue de micro-polvo con un tamaño de tamiz menor a 0.007 pulg. con lo cual a través de los micro-pulsos se funde el material de aporte modificando e incrementando las propiedades tribológicas de los herramientas.

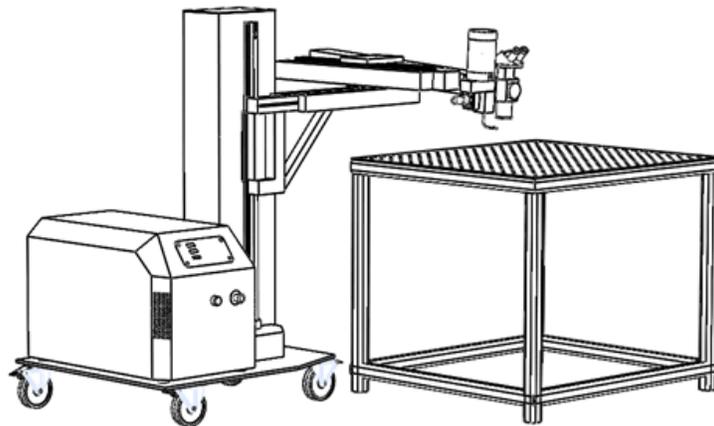


Figura 3. 6 Vista isométrica de diseño para fabricación.

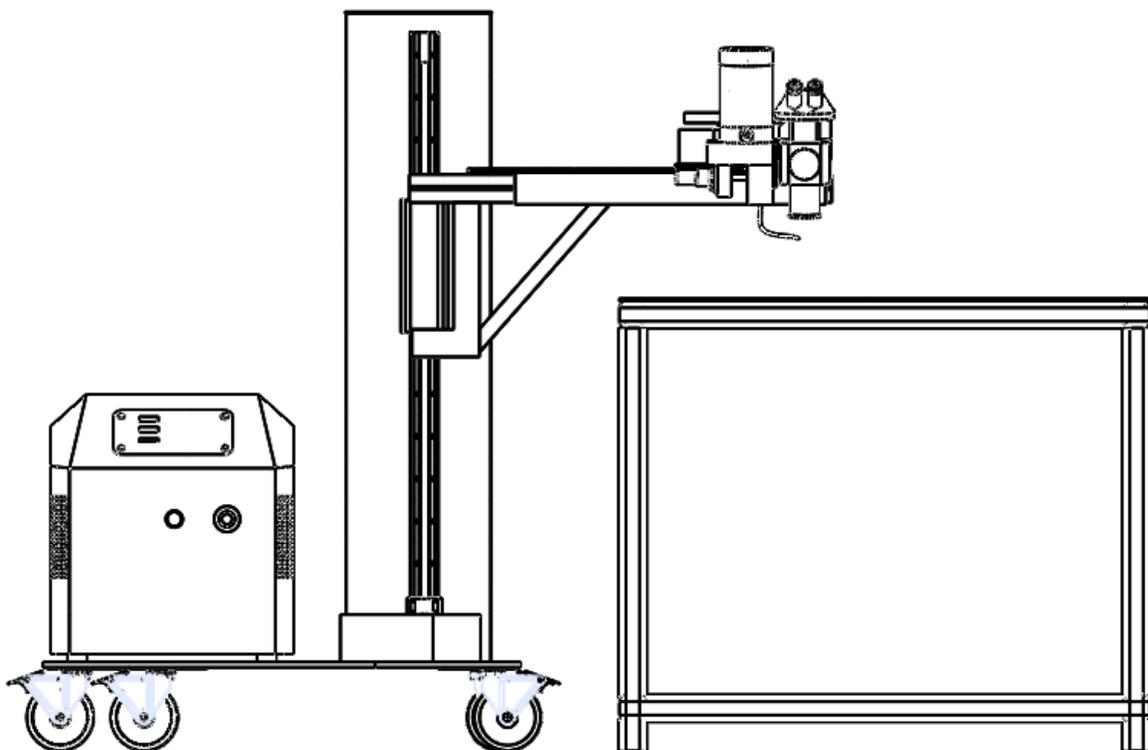


Figura 3. 7 Vista lateral de diseño para fabricación.

Una vez aprobado por parte del área técnica se procedió a fabricar los componentes necesarios para la celda para la modificación de las propiedades

mecánicas y microestructurales para incrementar la resistencia al desgaste a través de tratamientos térmicos con procesos de soldadura laser superficiales para posteriormente realizar las pruebas experimentales e incrementar la vida útil de los componentes.

3.4 Cuarta etapa

Se fabricaron los distintos componentes de acuerdo al diseño propuesto y aprobado por el área técnica. Y se compraron componentes mecánicos de línea, como: transmisiones lineales, rodamientos, sistemas de desplazamiento lineal, ruedas de desplazamiento, tornillería, etc., lo cual redujo el tiempo de fabricación y una mejor calidad de los componentes.



Figura 3. 8 Ensamblaje de prototipo terminado.

En este proyecto participo el área **eléctrica, electrónica y materiales**, que con su apoyo quedo resuelta esa parte del proyecto, en la Figura 3. 8 se observan componentes electrónicos como motores y sensores los cuales fueron seleccionados por especialista en esa área y al igual el material de aporte fue seleccionado por el especialista en materiales que de acuerdo a las propiedades mecánicas que se busca obtener es el material de aporte requerido, con respecto a los cálculos realizados del área mecánica.

3.5 Quinta etapa

Se realizaron las primeras pruebas de la celda de recubrimiento (Figura 3. 9), para corroborar el funcionamiento de los sistemas mecánicos, estas pruebas se realizaron a distintos herramientas y piezas que fueron proporcionadas por el área de pruebas mecánicas que colabora en COMIMSA. En la Figura 3. 10 se muestra la primera unión realizada por el dispositivo, en esta unión se observó una soldadura de calidad y se concluye que el diseño cumple con las expectativas propuestas.



Figura 3. 9 Primeras pruebas experimentales.



Figura 3. 10 Unión a traslape con pulsos de Nd-YAG.

En la Figura 3. 11, se realiza la modificación superficial de un alabe de una turbina, obteniendo buenos resultados. A esta prueba se le realizó una inspección visual, en la que participo un especialista en soldadura.



Figura 3. 11 Alabe modificado superficialmente.

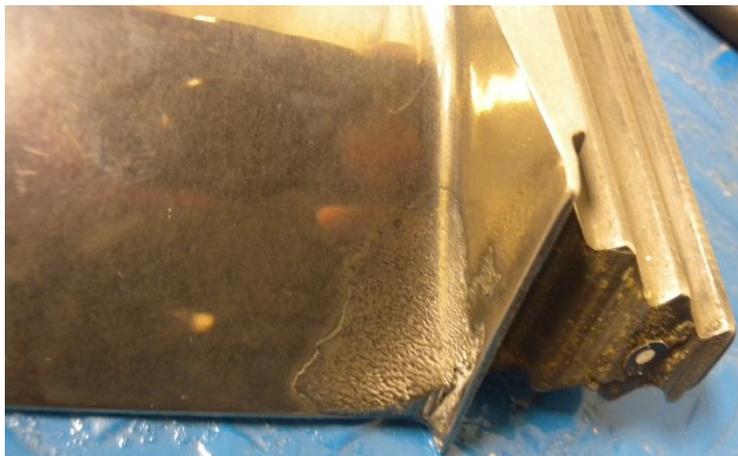


Figura 3. 12 Acercamiento de zona reparada.

En la Figura 3. 13 se observa una modificación superficial uniforme de un molde que se encuentra en desgaste, este molde es parte de un herramental.



Figura 3. 13 Molde modificado en la superficie de desgaste.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Piezas para experimentación

Toda la experimentación fue realizada en piezas en forma de anillo de material AISI/SAE D2 como se muestra en la Figura 4. 1 y Figura 4. 2. En estas se aprecia las dimensiones y la geometría de los anillos del material a tratar. Y un molde para manufacturar cucharas.



Figura 4. 1 Anillos o rodillos de Acero D2.

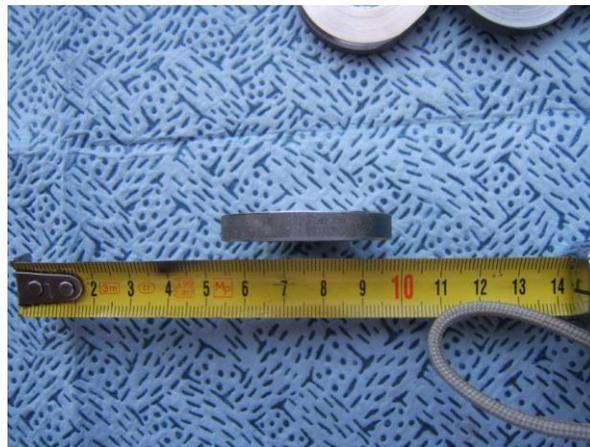


Figura 4. 2 Fotografía de muestra de espesor de anillo.

4.1.1 Análisis metalográfico (replica) ASTM E-3/07, E-407/05

El análisis revela una microestructura compuesta por carburos primarios $M_{23}C_6$ dispersos en una matriz de martensita revenida. Ver fotografía siguiente fotomicrografía (ver Figura 4. 3).

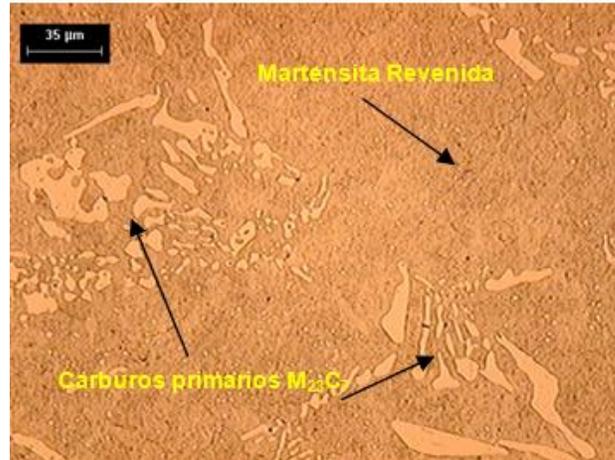


Figura 4. 3 Carburos primarios $M_{23}C_6$ en matriz de martensita revenida. 400X. Picral.

4.1.2 Análisis químico (espectrometría de emisión óptica)

El análisis se realizó mediante la técnica espectrometría de emisión óptica, al molde encontrándose las siguientes especies químicas:

Tabla 4. 1 Composición química de herramientas para pruebas

Identificación	% Elemento							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
Molde para cucharas	1.59	0.42	0.51	0.005	0.002	11.53	0.69	0.70
Anillos	1.47	0.38	0.87	0.005	0.002	12.02	0.43	0.38
Designación	1.40-	0.30-	0.50-	0.400	0.040	11.00-	1.00	1.00
AISI/SAE D2	1.60	0.50	0.90	Max.	Max.	13.00	Max	Max

4.1.3 Ensayo de dureza (Equotip)

Se realizó un total de 4 identaciones a la muestra, utilizando un equipo de campo encontrándose lo siguiente:

Tabla 4. 2 Resultados de dureza de pruebas de campo.

Identificación	HRC (Dureza Rockwell C)				Promedio
Molde para cucharas	55	55	54	54	54
Anillos	56	58	56	57	57
Designación AISI/SAE D2	54-58 HRC				

4.2 Aplicación de la soldadura

En esta sección se exhiben los resultados arrojados después de realizar cuatro soldaduras con distintos parámetros, La Figura 4. 4 muestra las características superficiales de los 4 cordones. Asimismo se realizó un corte transversal a la pieza y montaje en una probeta metalográfica, esta imagen muestra la geometría interna de los cordones de soldadura (ver Figura 4. 5).

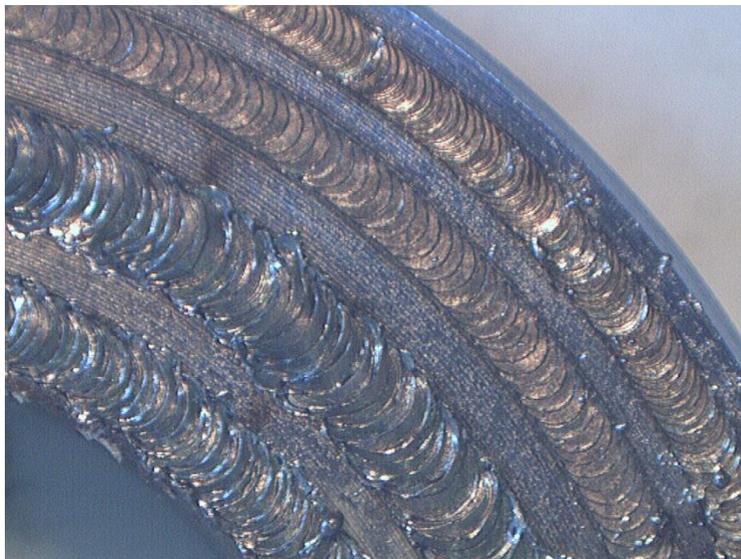


Figura 4. 4 Fotografía de soldadura con distintos parámetros.

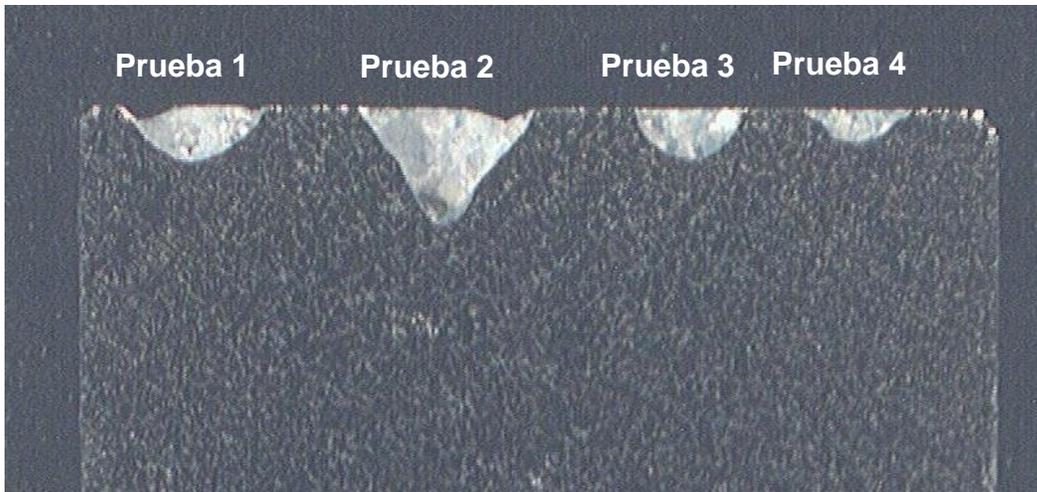


Figura 4. 5 Corte transversal de pruebas sometidas a análisis.

Los parámetros de cada una de las pruebas están exhibidos en la siguiente tabla:

Tabla 4. 3 Parámetros para cada una de las pruebas.

# de prueba	Voltaje (v)	Duración de pulsos (ms)	Frecuencia (Hz)	Potencia (kW)
Prueba 1	270	5.2	4.2	2.9
Prueba 2	310	6	4.2	4
Prueba 3	235	5	5	2
Prueba 4	200	4	8	1.2

4.2.1 Prueba 1 (microdureza)

La gráfica de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra la distribución de microdurezas. Las identaciones fueron colocadas comenzando en el metal base, pasando por la zona fundida y terminando en el metal base. La Tabla 4. 4 expone los valores de microdureza en vickers. Las identaciones fueron colocadas a una profundidad de 0.250 mm.

Tabla 4. 4 Resultados de la prueba 1.

Número de indentación	Microdureza en Vicker's HV, 0.3 kg (0.250 mm)
1	517
2	492
3	540
4	541
5	519
6	501
7	526
8	494

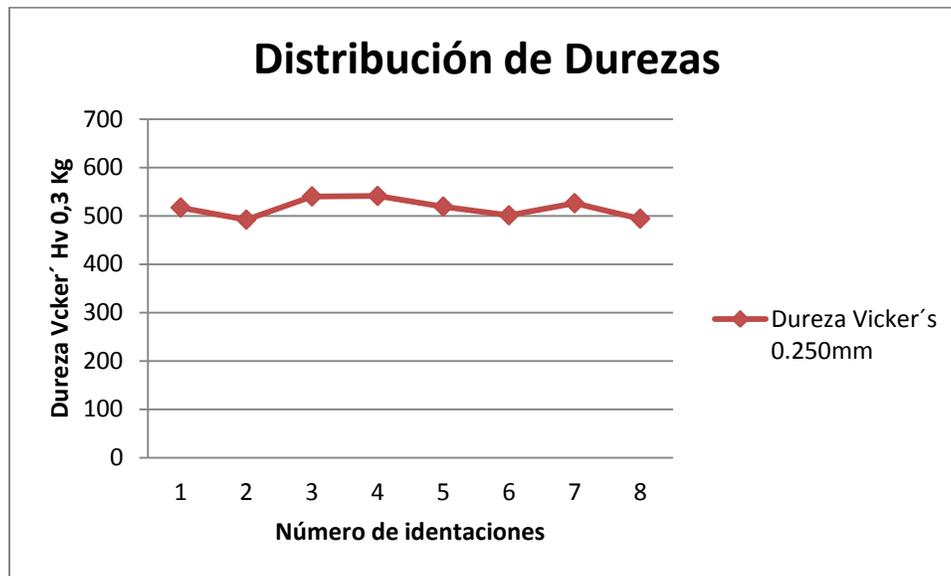


Figura 4. 6 Distribución de microdurezas en prueba 1 (en Hv con 0.3 kg de carga), 0.250 mm de profundidad.

Con los resultados obtenidos es fácil deducir que el efecto del haz de láser en este material AISI/SAE D2 es de elevar la dureza, a mayor grado en zonas cercanas al centro de la soldadura.

4.2.2 Prueba 2 (microdureza)

La grafica de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra la distribución de microdurezas, las indentaciones fueron colocadas iniciando en el metal base, pasando por la zona fundida y terminando en el metal base. Se

muestra los valores de microdureza en vickers. En este caso se colocaron dos líneas de indentaciones las cuales fueron ubicadas a una profundidad de 0.200 mm y 0.700 mm.

Tabla 4. 5 Resultados de prueba 2.

Número de indentación	Microdureza en Vicker's HV, 0.3 kg (0.200 mm)	Microdureza en Vicker's HV, 0.3 kg (0.700 mm)
1	310	364
2	377	381
3	400	394
4	439	388
5	552	394
6	546	520
7	554	533
8	575	527
9	568	557
10	575	408
11	431	383
12	364	406
13	369	389
14	349	334

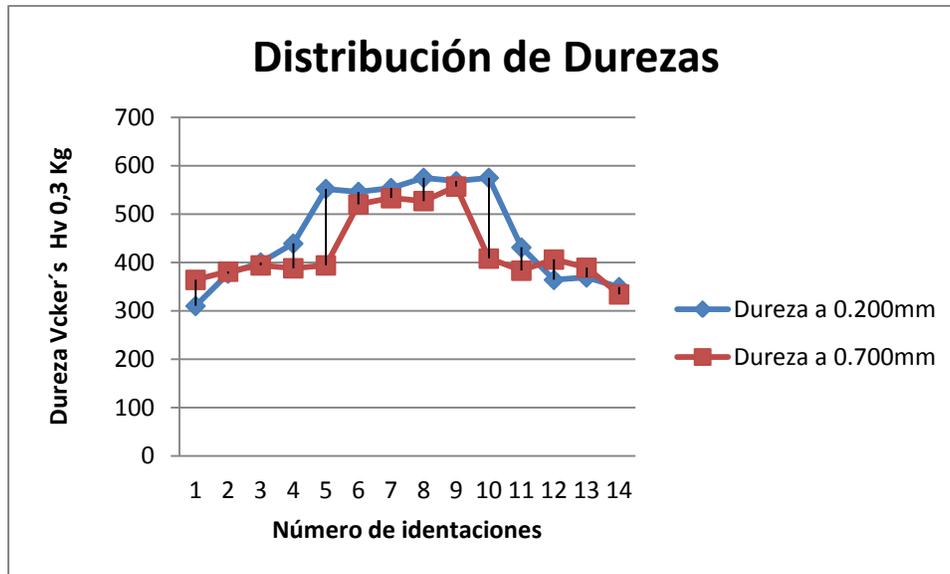


Figura 4. 7 Distribución de microdurezas en prueba 2 (en HV con 0.3 kg de carga) a 0.200 mm y 0.700 mm de profundidad.

Como se puede observar en la tabla anterior, en la zona fundida hubo un notable incremento de microdureza, a mayor grado en zonas centrales del metal que funde. Además hubo un leve incremento en la microdureza con respecto a la prueba 1, esto gracias a que el calor de entrada fue mayor debido a la potencia en esta prueba, lo que causo un mayor gradiente de temperatura entre la zona fundida y el metal base, esto ocasiona una mayor velocidad de enfriamiento causando un incremento en la microdureza del material que funde.

4.2.3 Prueba 3 (microdureza)

Al igual que en las pruebas 1 y 2, la microdureza aumenta a medida que las indentaciones son más cercanas al centro de la zona fundida (gráfica de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Las indentaciones fueron colocadas a una profundidad de 0.250 mm y los valores de cada una de ellas están expresados en la Tabla 4. 6.

Tabla 4. 6 Resultados de prueba 3.

Número de indentación	Microdureza en Vicker's HV, 0.3 kg, (0.250 mm)
1	377
2	406
3	543
4	606
5	577
6	568
7	459
8	310

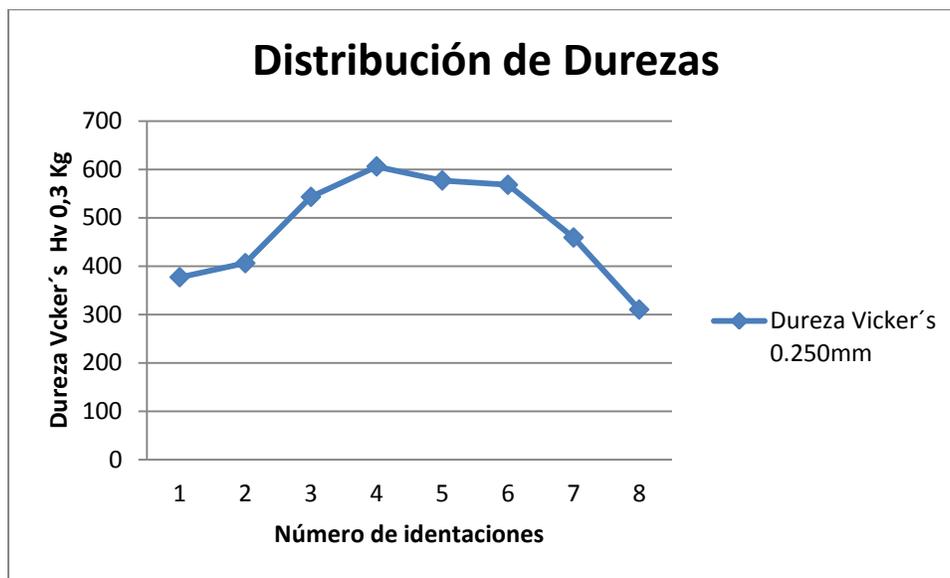


Figura 4. 8 Distribución de microdurezas en prueba 3 (en HV con 0.3 kg de carga), 0.250 mm de profundidad.

4.2.4 Prueba 4 (microdureza)

Al igual que en las pruebas anteriores la microdureza aumenta a medida que las indentaciones son más cercanas al centro de la zona fundida. Las indentaciones fueron colocadas a una profundidad de 0.250 mm y los valores de cada una de ellas están expresados en la Tabla 4. 7.

Tabla 4. 7 Resultados de prueba 4.

Número de indentación	Microdureza en Vicker's HV, 0.3 kg (0.250 mm)
1	373
2	427
3	459
4	504
5	507
6	418
7	404
8	387

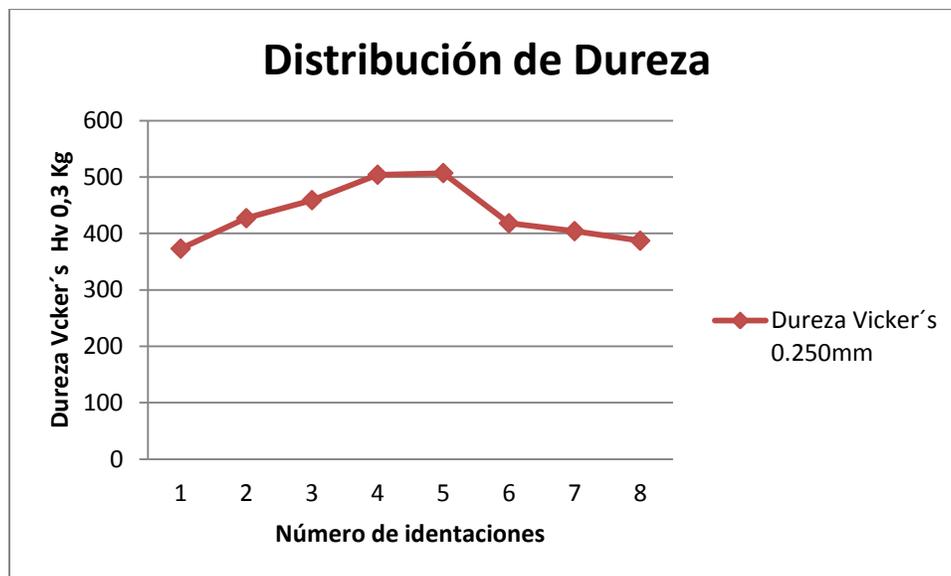


Figura 4. 9 Distribución de microdurezas en prueba 4 (en HV con 0.3 kg de carga), 0.250 mm de profundidad.

4.2.5 Tratamiento superficial

Para lograr un tratamiento superficial uniforme se eligieron parámetros similares a los de la prueba 1 y 2, obteniendo la siguiente superficie.

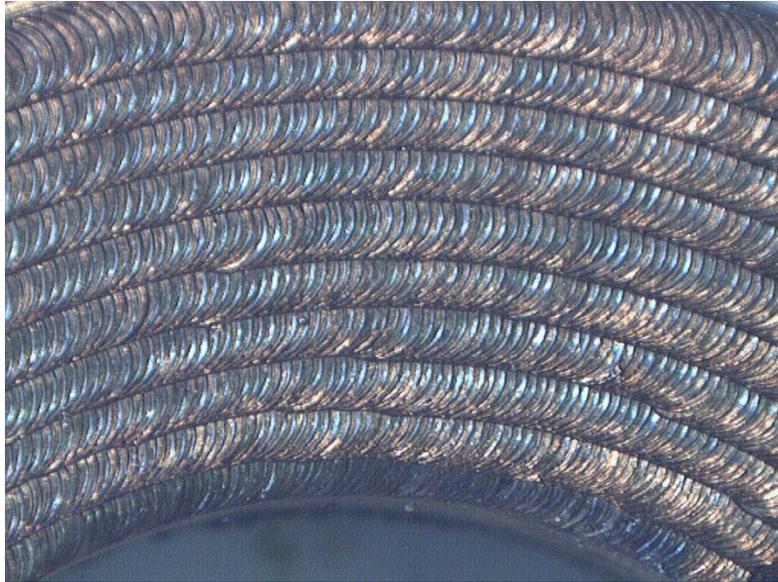


Figura 4. 10 Superficie después de la aplicación del tratamiento superficial.

En la Figura 4. 10 se puede observar una buena calidad superficial y uniformidad en cada uno de los cordones aplicados de soldadura.

Los parámetros del tratamiento superficial anterior fueron los siguientes:

- Voltaje: 260 v
- Duración del pulso: 4.2 ms
- Frecuencia: 6Hz
- Potencia: 2.6 kW

La Figura 4. 11 muestra una sección transversal de la zona interesada al tratamiento de la superficie mediante láser.

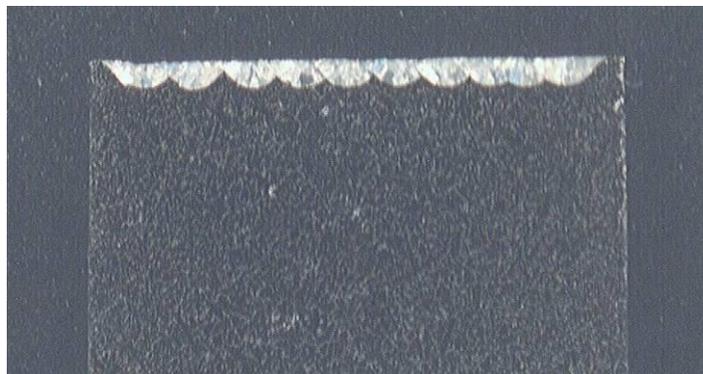


Figura 4. 11 Sección transversal del tratamiento superficial.

En la Figura anterior se ve claramente una buena calidad interna en la zona solidificada, y además se ve uniforme en cada una de las zonas tratadas.

La penetración que logro el tratamiento superficial fue de 0.500 mm, menor con respecto a la de la prueba 1, ya que la diferencia de parámetros es relativamente poca entre la prueba 1 y el tratamiento superficial.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Los objetivos se lograron satisfactoriamente, el sistema diseñado es de tres ejes de desplazamiento lo que permite un control eficiente con respecto al key-hole que es la principal función, a este sistema se le acoplo el rayo láser y posteriormente se realizaron las automatizaciones correspondientes con ayuda de sensores de distancias de mucha eficiencia. Por lo anterior mencionado se crea un prototipo eficaz y de gran impacto en el área de recubrimiento y reparación de herramientas.
- Los cálculos mecánicos, lista de materiales, planos y simulación del prototipo no se pueden plasmar en la tesis, debido a una ley de confidencialidad que rige a COMIMSA, por lo que se les ofrece una disculpa con respecto a estas partes que no están mencionada. Es por esto que se decidió hacer una evaluación del prototipo realizando pruebas pilotos y así obtener resultados reales del equipo.
- En el diseño conceptual se obtuvieron ideas que finalmente fueron corroboradas con la simulación. La simulación por elemento finito es una herramienta de la cual puedes obtener grandes beneficios, fue muy útil en el proyecto para avanzar. Con la simulación se pudo visualizar el comportamiento de componentes mecánicos y electrónicos y la afectación que les provocaba la soldadura.
- El dispositivo prototipo es de un fácil manejo y se puede transportar a distintas empresas debido a las dimensiones con las que cuenta. Este sistema puede llegar a implementarse en distintas empresas ya que su construcción es muy factible desde el punto de vista económico así como por su facilidad en el montaje.
- Con una buena comprensión de los parámetros involucrados en un proceso de soldadura por rayo láser, y su interacción con los materiales, se abren muchas oportunidades en el uso del rayo láser en la soldadura industrial. No solo se debe entender la influencia de un parámetro específico en la soldadura de materiales, también es importante tener en cuenta como se

afectan los materiales variando no solo uno si no varios parámetros simultáneamente.

- Si se tiene un buen conocimiento del efecto causado por cada uno de los parámetros, ya sea en conjunto o individualmente, será posible dar un pronóstico de las características que se obtendrán en la soldadura por rayo láser, esto ayudará a cumplir con los estándares requeridos para la función que desempeñará la pieza soldada. Un control en los parámetros de soldeo es importante para la predicción de las características finales en un cordón de soldadura o en un tratamiento superficial.
- El proceso de soldadura por rayo láser es capaz de concentrar una gran cantidad de energía en un pequeño punto, esto da como resultado gradientes térmicos muy grandes entre la zona expuesta al haz de láser y el material base. Es importante establecer correctamente una relación velocidad de avance y la potencia, para tener un control absoluto en el calor de entrada del proceso.
- Con este desarrollo se pueden tratar e incrementar la vida útil de los herramientas de la industria de conformado que son de alto valor, reduciendo así las importaciones y optimizando el recurso mexicano. Asimismo es para nosotros un nicho de mercado que actualmente estamos explotando gracias a este desarrollo se incrementó la capacidad de trabajo así como la formación de recurso humano especializado y el incremento en capacidad productiva así como el personal que actualmente trabaja en investigación y desarrollo.

VI. Bibliografía

1. Ancona, A., Sibillano, T., Tricarico, L., Spina, R., Lugara, P., Basile, G., y otros. (2005). Preprocess. *Technol*, 164-165.
2. Brown, D. (2003). Laser Welding Basic Primary Adjustable Welding Parameters. *The Bench*, 2.
3. Chung, B., Lee, C., & Rhee, S. (1999). Science. *Engineer*, 357-362.
4. COMIMSA. (23 de Octubre de 2013). COMIMSA. Recuperado el 20 de Septiembre de 2015, de <http://www.comimsa.com.mx/ing-materiales.html>
5. CONACYT. (2011). *Cofemermir*. Recuperado el 10 de 2015, de <http://207.248.177.30/mir/uploadtests/23358.131.59.1.Copia%20de%20MANUAL%20DE%20ORGANIZACION%20COMIMSA%20VALIDADO%207-04-11.pdf>
6. Dowden, J. (2009). The Theory of Laser Materials Processing Springer. *Wiesbaden*.
7. Ettaqi, S., Langlois, L., & Bigot, R. (2008). Cobalt-based superalloy layers deposited on X38CrMoV5 steel base metal by explosion cladding process. *Surface & Coatings Tchnology*, 1010-1016.
8. Europe, L. (Noviembre de 2011). *Laserlab Europe*. Recuperado el 8 de Marzo de 2015, de www.fascination-of-light.net/campana/exibicion/el-laser/principio-basico-del-laser-3
9. Foct, J. (1988). *High Nitrogen Steels*. Institute of Metals & Science Francaise de Metallurgie and Held Liffle in France: The Institute of Metals London.
10. Gould, G. (15 de Septiembre de 2015). *Wikipedia The Free Encyclopedia*. Recuperado el 2 de Octubre de 2015, de https://en.wikipedia.org/wiki/Gordon_Gould#cite_ref-15
11. Hassan, A., Mahmoud, T., & Khalifa, T. (2010). Friction stir welding of dissimilar A319 and A356 aluminium cast alloys. *Science and Technology of Welding & Joining*, 414-422.
12. Khajepour, A. (2007). *UNIVERSITY OF WATERLOO*. Recuperado el 04 de 2015, de http://resonance.uwaterloo.ca/p/research_areas/lam.php

13. Koebner, T. (1984). *Literatur und sozialismus*. Wiesbaden: In News Handbuch der Literaturwissenschaft.
14. Komvopoulos, K., & Cheng, Q. (2012). Nanoscale mechanical and tribological properties of fluorocarbon films grafted onto plasma-treated low-density polyethylene surfaces. *Journal of Physics D: Applied Physics*.
15. Láser, G. N. (08 de 2015). *GNC Láser*. Obtenido de <http://gnclaser.es/index.php?id=es>
16. Maco, A., & Belzunce, F. (2012). Estudio del endurecimiento superficial por láser de fundiciones grises. *Metalurgia*, 126-130.
17. Meyer, M., & Du Toit, M. (1996). *Welding Research Supplement*. AWS & WRC.
18. Migliore, L. (1996). *Laser material Processing*. New York.
19. Munitz, A., Cotler, C., Stern, A., & Kohn, G. (2001). Mechanical properties and microstructure of gas tungsten arc welded magnesium AZ91D plates. *Materials Science and Engineering*, 30268-30273.
20. Nishimoto, K. (1992). Prediction of weld metal microstructure Stainless steels. *Welding International*, 848-852.
21. Perez, J. (2008). *Universidad Carlos III de Madrid*. Recuperado el 05 de 2015, de <http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/14714>
22. PYME. (15 de Enero de 2015). *Fondo PYME*. Recuperado el 8 de Febrero de 2015, de <http://www.contactopyme.gob.mx/cpyme/estudios/docs/CAPITULO%20VII.pdf>
23. Ready, J. (1997). *Industrial Applications of Lasers* (2 ed.). San Diego: Academic Press.
24. Ready, J. (2001). *LIA handbook of laser materials processing*. Orlando: Laser Institute of America.
25. Reed, C., Natesan, K., Xu, Z., & Smith, D. (1999). The effect of laser welding process parameters on the mechanical and microstructural properties of V-4CR-4TI structural materials. *Conference: 9th International Conference on Fusion Reactor Materials*, 22.

26. Roble, M., & Cassina, J. (2007). Estudio, optimización y monitoreo del proceso de soldadura láser de la envoltura de titanio de dispositivos médicos implantables. *IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires- Octubre 2007* (pág. 12). Buenos Aires: Americana Conference .
27. Rosenthal, D. (1946). *The Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatments* (Vol. 68). Transactions of the ASME.
28. Saunders, R., & Shiner, W. (1985). *LÁSERES Operacion, equipo uso y diseño*. Limusa.
29. Schneider, M. (2008). *Laser cladding with powder, effect of some machining parameters on clad properties*. University of Twente.
30. Shida, V., Ohtsuka, N., Murayama, J., & Fujikawa, N. (1983). High Temperature Corrosion. *Journal of the Japan Institute of Metals and Materials*, 631.
31. Stern, R., & Sognaes, R. (2006). Laser beam effect on dental hard tissues. *Dent. Res*, 873.
32. Tani, G., & Campana, A. (2007). A study on shielding gas contamination in laser welding of non-ferrous alloys. *Applied Surface Science*, 906-908.
33. Toyserkani, E., Khajepour, A., & Corbin, S. (2004). *Laser Cladding*. CRC Press.
34. Villaresi, P. (7-9 de Noviembre de 2007). Introducción a las aplicaciones del láser: interacción luz-materiales y su explotación industrial. *ICS- UNIDO Training Course on Laser technologies for the industrial sector*, 79.
35. Welding Handbook, A. (2001). *Welding Processes AWS International* (8 ed., Vol. 2). Miami: American Welding Society.