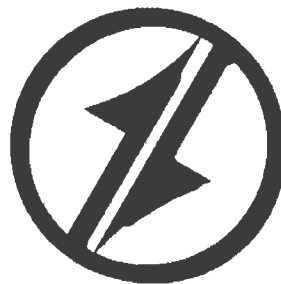


CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS INVOLUCRADOS EN EL PROCESO DE
SOLDADURA POR RAYO LÁSER.**

POR

ING. FRANCISCO CEPEDA RODRÍGUEZ.

MONOGRAFÍA

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO COAHUILA MÉXICO 03 NOVIEMBRE 2008.

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS INVOLUCRADOS EN EL PROCESO DE
SOLDADURA POR RAYO LÁSER.**

POR

ING. FRANCISCO CEPEDA RODRÍGUEZ.

MONOGRAFÍA

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO

03 NOVIEMBRE 2008

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A. de C.V.
Gerencia de Desarrollo del Factor Humano
División de Estudios de Postgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la monografía "Estudio de los parámetros involucrados en un proceso de soldadura por rayo láser", realizada por el alumno Francisco Cepeda Rodríguez con número de matrícula sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial



Tutor Académico

Dr. Jorge Leobardo Acevedo Dávila.



Tutor en Planta
Ing. German León Lara.



Asesor
Dr. Eliezer Luciano Ramírez Vidaurri.



Vo.Bo
Ing Claudia A. González Rodríguez.
Coordinador de Postgrado

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo va dedicado a Dios por haberme dado salud y fuerza para realizarlo.

A mi padres Francisco Cepeda Tijerina y Yolanda Rodríguez De La Peña y a mis hermanos José, Julia y Yolanda, quienes fueron pacientes, creyeron en mí y lo más importante me brindaron cariño y apoyo.

Muy especialmente a mi novia Celia, quien con su comprensión y ánimos me dio mucha motivación y entusiasmo para realizar este trabajo.

A mi Tutor académico el Dr. Jorge Leobardo Acevedo Dávila principalmente por su amistad y asimismo por su asesoramiento, ayuda y guía en el desarrollo del trabajo.

A la Corporación Mexicana De Investigación En Materiales S.A. de C.V. y todo su personal, en especial a los catedráticos de postgrado, Dr. Felipe A. Reyes, Dr. Alejandro Garza, M.C. Gabriel García y al M.C. Víctor López.

A mi tutor de planta Ing. German León Lara y a mi asesor académico Eliezer Luciano Ramírez Vidaurri por su accesoria y apoyo en este trabajo.

Al personal del Instituto Italiano de la soldadura por darme la oportunidad de efectuar mi estadía industrial, principalmente al Dr. Luis Mario Volpone y a la Ing. Stefanie Mueller por su gran apoyo y amistad durante el periodo de la estancia.

ÍNDICE

1.- SÍNTESIS	7
2.- JUSTIFICACIÓN	9
3.- OBJETIVO	10
4.- INTRODUCCIÓN	11
5.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	14
5.1.- Proceso de soldadura láser	14
5.1.1.- Principios del proceso	14
5.1.2.- Ventajas y limitaciones del proceso	15
5.1.3.- Láser de estado sólido Nd-YAG y láser de gas CO2	17
5.2.- Generalidades de los parámetros y defectos involucrados	19
5.3.- Efecto de la velocidad de avance	25
5.3.1.- Caso de estudio.	25
5.3.2.- Análisis de resultados.	27
5.4.- Efecto de la variación voltaje, ancho de spot, y duración del pulso en la soldadura láser	33
5.4.1.- Voltaje	33
5.4.2.- Ancho de pulso	34
5.4.3.- Duración de pulso	34
5.4.4.- Variación de los tres parámetros en la misma prueba	35
5.5.- Efecto del calor de entrada	36
5.5.1.- Efecto microestructural y macroestructural	37
5.5.2.- Efecto en el grosor de la banda de granos columnares	41
5.5.3.- Efecto en la distribución de precipitados	42
5.5.4.- Efecto en las propiedades de tensión	43

5.6.- Efecto de la energía y duración del spot del láser	45
5.6.1.- Caso de estudio.	45
5.6.2.- Análisis de resultados	46
5.7.- Efecto del tipo y flujo de gas de protección en la calidad de la soldadura	47
5.7.1.- Generalidades	47
5.7.2.- Caso de estudio	48
5.7.3.- Análisis de resultados en el caso de estudio	49
5.8.- Soldadura láser con doble haz	55
5.8.1.- Descripción	55
5.8.2.- Láser de un haz contra láser doble haz	56
6.- Diseño de un tratamiento superficial	58
6.1.- Generalidades	58
6.1.1.- Aleación ASTM F-75	58
6.1.2.- Equipo de soldadura láser Nd-YAG	61
6.2.- Soldaduras con varios parámetros (Efecto de los parámetros involucrados)	62
6.3.- Tratamiento superficial	72
7.- CONCLUSIONES	75
8.- REFERENCIAS	76
9.- LISTA DE FIGURAS	79

1.

SÍNTESIS

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).

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.

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.

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.

Finalmente, este trabajo de investigación incluye los conocimientos necesarios para elegir los parámetros indicados para obtener las características deseadas en cuanto a, geometría de la junta, propiedades mecánicas, características macro y microestructurales, etc. en soldaduras hechas con un proceso de soldadura por rayo láser.

2. JUSTIFICACIÓN

La soldadura por láser puede considerarse como una de las tecnologías emergentes, mas 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 mas las áreas de la industria donde se esta utilizando.

Por lo anterior, este proyecto tiene la finalidad de estudiar a fondo los parámetros involucrados en el proceso de soldadura por rayo láser generado por diferentes fuentes, enfatizándose en aquellas con mayor aplicación industrial.

3.

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es estudiar los parámetros involucrados en el proceso de soldadura con haz láser aplicado industrialmente.

Para lograr el objetivo principal se deben cumplir los siguientes objetivos específicos:

- Detectar los diferentes procesos donde se aplica la soldadura láser.
- Estudiar los parámetros de operación de cada uno de los procesos.
- Realizar un estudio comparativo entre los diferentes equipos de soldadura mediante láser existentes en el mercado.
- Realizar pruebas experimentales variando los diferentes parámetros (caso de estudio).
- Análisis y discusión de la información.
- Escritura y defensa del trabajo.

4.

INTRODUCCIÓN.

El término "LASER" es un acrónimo de: Amplificación de Luz Mediante la Emisión Estimulada de Radiación (Light Amplificación by the Stimulated Emission 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.

La historia del láser se remonta al año de 1916, cuando Albert Einstein estudió y predijo el fenómeno de emisión estimulada en los átomos, según el cual un átomo que recibe luz de la misma longitud de onda de la que puede emitir, es estimulado a emitirla en ese instante.

En este proceso se tiene la interacción entre un fotón y un átomo que inicialmente se encuentra en un estado excitado. Como resultado de esta interacción el átomo pasa a su estado base, emitiendo en el proceso un fotón que tiene las mismas características de dirección y de fase que el fotón inicial, cuando esto ocurre decimos que la radiación electromagnética resultante es coherente. Es importante destacar que en este proceso esta ocurriendo realmente una amplificación de fotones, pues inicialmente tenemos un solo fotón y después del proceso de emisión estimulada tenemos dos fotones. La primera propuesta conocida para la amplificación de la emisión estimulada apareció en una solicitud de patente soviética en el año 1951, presentada por

V.A. Fabrikant y dos de sus alumnos. Sin embargo, dicha patente no se publicó hasta 1959 y por consiguiente no afectó a los demás investigadores. Fabrikant sigue siendo un misterio en la actualidad, uno de los olvidados en la ruta de la investigación del láser. En 1953, Joseph Weber, de la Universidad de Maryland, propuso también la amplificación de la emisión estimulada y al año siguiente los rusos Basov y Prokhorov, escribieron un artículo explorando a fondo el concepto.

Tiempo después se desarrolla esta técnica para operaciones de soldadura en materiales de poco espesor y más tarde se empleó para materiales con mayor masa, dependiendo de la fuente de luz utilizada. Las características que hicieron utilizable el haz de láser para corte de metales son también válidas para los procesos de soldadura por este método.

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.

México se encuentra en la fase inicial en el entendimiento y uso de este proceso, aún dentro de las empresas transnacionales 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 [3].

Por otra parte, la soldadura por haz de láser tiene otras aplicaciones como son la de dispositivos médicos implantables en la industria manufacturera [8], como por ejemplo el láser de corte para baja necesidad de producción [5-6].

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.

5.

Revisión Bibliográfica

5.1.- PROCESO DE SOLDADURA POR RAYO LÁSER.

5.1.1.- PRINCIPIOS DEL PROCESO.

Definición.

Un láser es un dispositivo que produce un haz de luz coherente concentrado estimulando transiciones electrónicas o moleculares a niveles de energía mas altos, que al regresar a su estado base emiten fotones (emisión estimulada), los cuales al pasar por dos espejos (resonador) los cuales 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) [12].

En el caso de la soldadura con rayo láser (Figura 5.1), 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.



Figura 5.1.- Proceso de soldadura por rayo láser (LBW)

5.1.2.- 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 mas importantes son las siguientes:

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. [10]
- 11.- Apariencia estética.

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) . [10]

5.1.3.- LÁSER DE ESTADO SÓLIDO Nd-YAG Y DE GAS CO₂.

Láser de estado sólido (Nd-YAG).

Principios de funcionamiento.

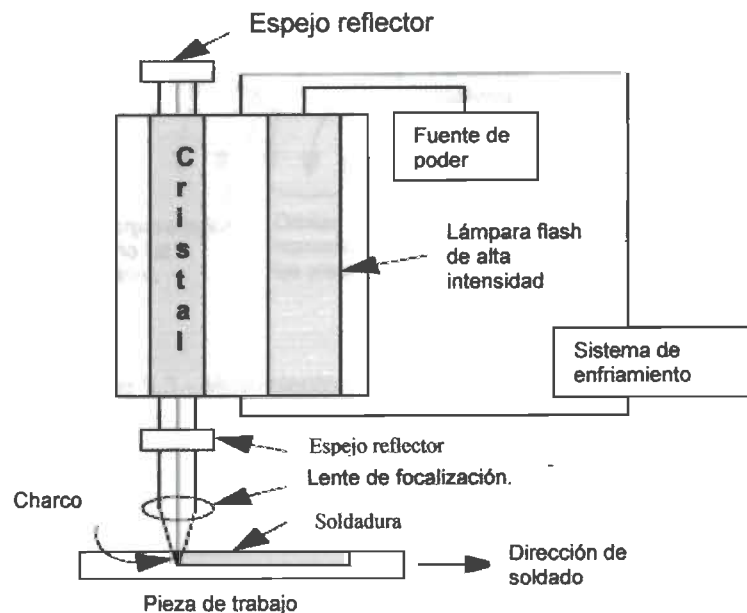


Figura 5.2.- Esquema de funcionamiento soldadura por rayo láser de estado sólido Nd-YAG

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 Figura 5.2), 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 siguiente figura (5.2) 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 [7-10]. 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 perdidas por la producción de luz blanca.

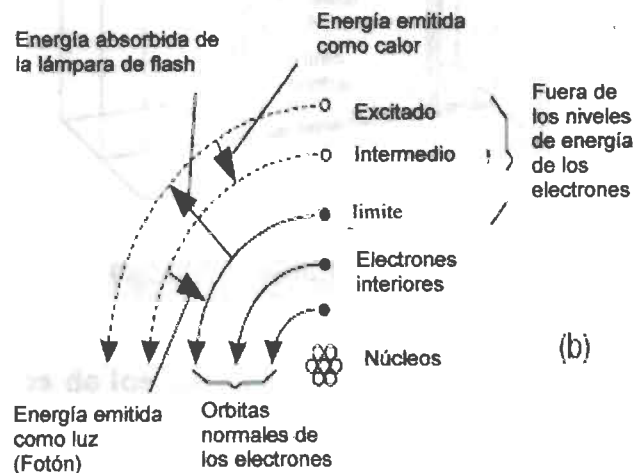


Figura 5.3.- Movimiento de los electrones al ser excitados.

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). La siguiente figura (Figura 5.4) muestra el proceso de soldadura láser [7-11].

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.

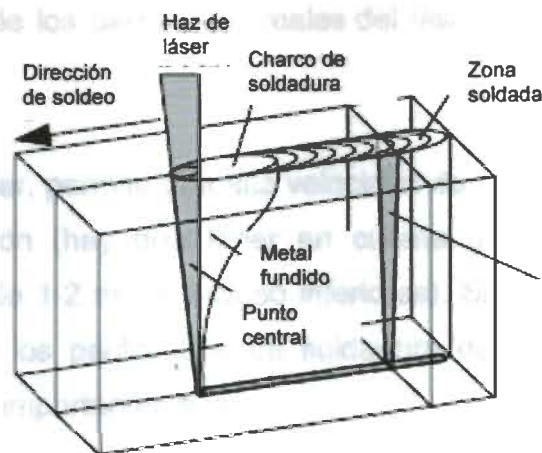


Figura 5.4.- Soldadura por rayo láser.

5.2.- Generalidades de los parámetros y defectos involucrados.

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 [1].

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. [2]

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. [3]

Alguna de las variables de mayor relevancia involucradas en el proceso de unión a partir de una haz de láser se aprecia en la figura 5.5.

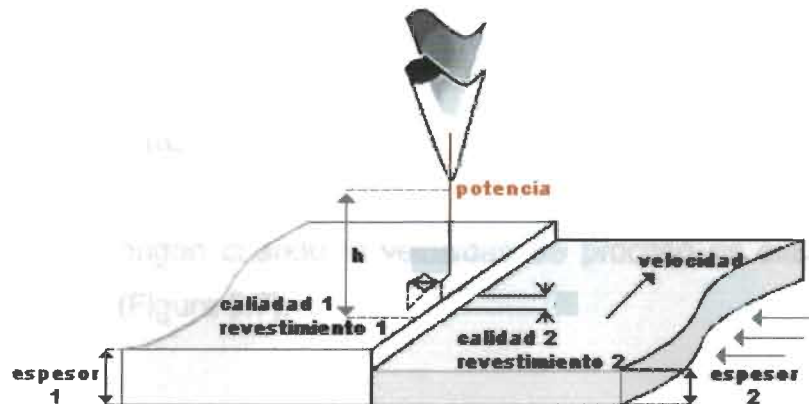


Figura 5.5.- Parámetros y variables importantes durante la aplicación de soldadura láser.

Defectos en soldaduras por rayo láser [2-4]:

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 5.6).

Poros producidos por evaporación del Zn →

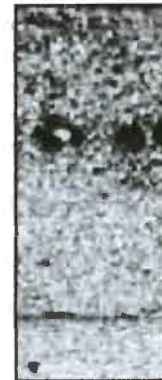


Figura 5.6. - Porosidad por evaporación.

Falta de penetración.

Esta tiene su origen cuando la velocidad de proceso es excesiva para la potencia utilizada (Figura 5.7).

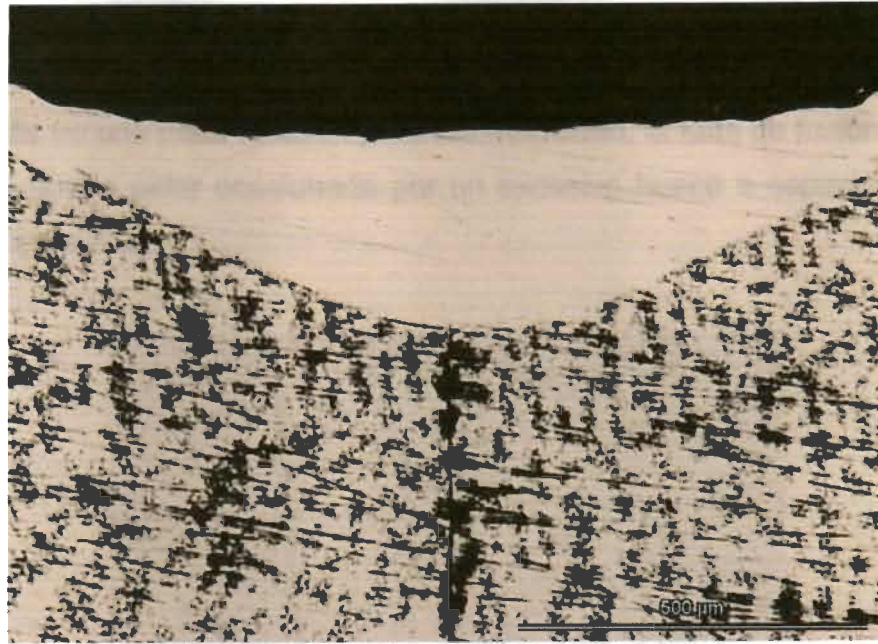


Figura 5.7.- Falta de penetración en el material.

Exceso de salpicaduras.

El exceso 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 (Figura 5.8).

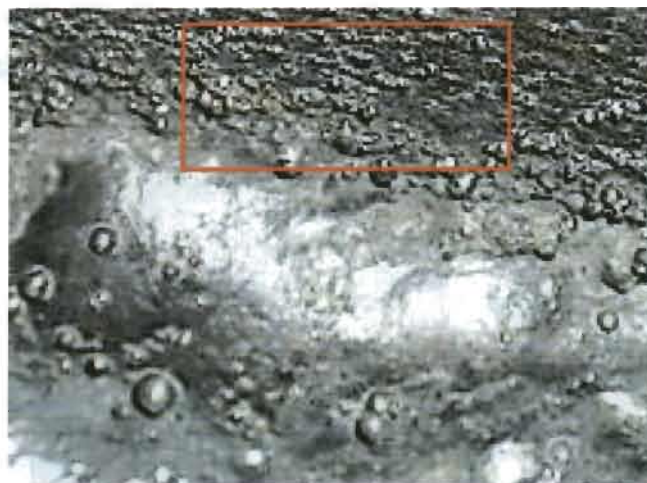


Figura 5.8.- Salpicaduras en soldadura.

Falta de fusión en raíz o superficie.

Son las más comunes.

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 (Figura 5.9).



Figura 5.9.- 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 (Figura 5.10).



Figura 5.10.- Grietas en una soldadura.

Socavamiento.

50 DE ESTUDIO

Se emplea este termino 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.

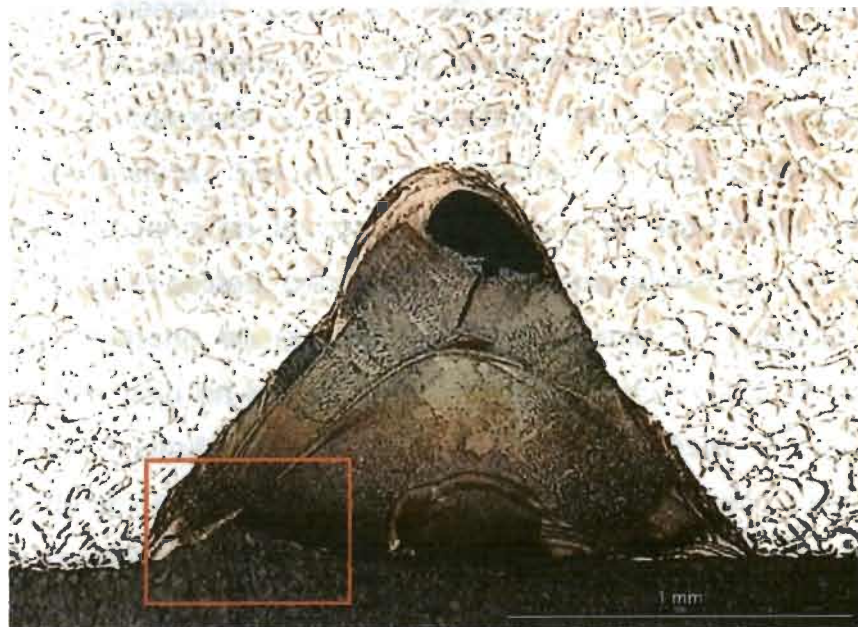


Figura 5.11.- Socavamiento en una soldadura láser.

una de las
 defectos por
 durante la
 en parte, el
 on en la mi
 Por lo max
 estructural co
 oxidación.

5.3.- EFECTO DE LA VELOCIDAD DE AVANCE.

5.3.1.- CASO DE ESTUDIO.

Para el análisis del efecto de esta variable se reviso un caso de estudio encontrado en la literatura. [33]

En el estudio en cuestión, se menciona que los aceros ASS 316L son usualmente preferidos sobre otras variedades, por su resistencia a la corrosión y mejores propiedades mecánicas a altas y bajas temperaturas. Además cuando esta aleación contiene nitrógeno (316LN) exhibe mayores características de resistencia a altas temperaturas ambientales, excelente resistencia a la corrosión y es el principal material para remplazar otros materiales expansivos. Sin embargo, muchas de las uniones presentan pérdidas de nitrógeno en la zona de fusión y en las zonas parcialmente fundidas, durante el soldeo, principalmente las que se soldán con GTAW. Las pérdidas de nitrógeno en el material base durante la fundición, provocan porosidad y una baja en la resistencia en la soldadura. [12]. Una alternativa propuesta fue el empleo del proceso de soldadura láser, el cual ofrece la oportunidad de unir estos materiales sin la pérdida de nitrógeno y sin porosidad; debido a la rápida solidificación que ofrece este proceso, esto produce juntas con una resistencia similar a la de el metal base. De cualquier forma la rápida solidificación de este proceso habilita la aparición de microestructuras fuera del equilibrio en la zona de fusión y con una producción de una mínima o no existente zona afectada por el calor (ZAC). Se reporto que los cambios microestructurales durante la soldadura láser tuvieron influencia en el rango de oxidación. Por otra parte, el complejo ciclo termal durante la soldadura dio como resultado variación en la microestructura, morfología de la oxidación y en el comportamiento. Por lo mencionado, en el presente caso de estudio mostró la variación microestructural con la velocidad de avance, y su efecto en la resistencia a la oxidación.

Proceso experimental aplicado en el caso de estudio.

Material: Acero (Figura 5.12)

Tamaño placa.- 110x55x6mm.

Tratamiento térmico.- Solubilización de 20 minutos a 1373°K.

Composición química:

Tabla1.- Composición química de dos tipos de acero inoxidable.

Variedad ASS	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Ni	Al	N2 ppm
316L	.025	1.87	.039	.019	.30	16.79	2.12	10.59	.014	190
316LN	.022	1.77	.036	.012	.30	17.95	2.40	12.25	.02	600

Condiciones durante la soldadura en el caso de estudio:

La soldadura fue aplicada con un equipo de láser CO₂ de 3kw de potencia, variando solamente la velocidad de avance y manteniendo constantes los otros parámetros, todas las soldaduras fueron hechas en dirección perpendicular al rolado de la placa. Los parámetros de soldeo están dados por la siguiente tabla (Tabla2):

Tabla2.- Parámetros empleados en el caso de estudio.

Ejemplo #	Velocidad de avance en mm/seg	Poder del láser.	Voltaje (v).	Corriente (A)	Punto de focalización dentro del material.	Gas de protección.
L1	11.66	3	110	20	1mm	argon
L2	25	3	110	20	1mm	argon
LN1	15	3	110	20	1mm	argon
LN2	16.66	3	110	20	1mm	argon
LN3	20	3	110	20	1mm	argon

Prueba de oxidación:

La prueba se realizó en especímenes de 6x6x6mm como lo muestra la siguiente figura (Figura 5.12).

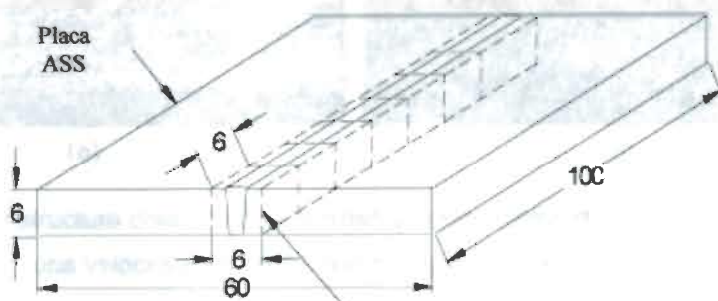


Figura 5.12.- Especímenes cortados de la placa de 6x6x6mm.

El periodo de oxidación se realizó en un horno en el cual el espécimen estuvo expuesto a 670°C en un periodo de 240 hrs.

5.3.2.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

Microestructurales.

En la siguiente figura (Figura 5.13) se observa la microestructura obtenida a una velocidad de 11.66 mm/seg esta micrografía presenta la morfología de una mezcla de lazos de ferrita y de ferrita vermicular, cerca de la frontera de fusión. La misma región microestructural pero con una velocidad de avance 25mm/seg se muestra en la Figura 5.13 (b), en esta, la microestructura cambio a austenita celular con menos cantidad de ferrita. En el centro de la soldadura sin consideración de la velocidad de avance se encuentra ferrita acicular pero con la misma condición que es, a menor velocidad, mayor la cantidad de ferrita vermicular y conforme aumente la velocidad va a decrecer el contenido de esta. [14-15].

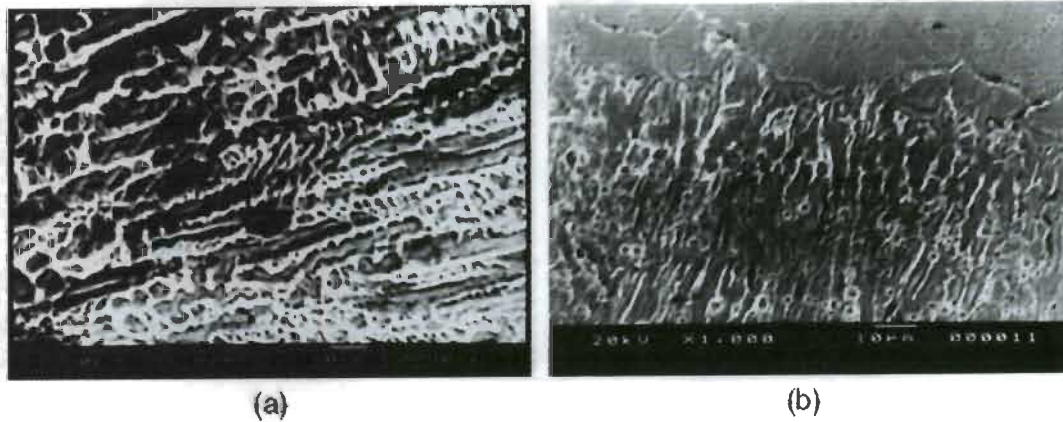


Figura 5.13.- Microestructura obtenida con microscopio electrónico de barrido (SEM) de 316L a una velocidad de (a) 11.66mm/seg. y (b) 25mm/seg.

En el caso del material ASS 316LN con una velocidad de avance de 15mm/seg. la microestructura cercana a la frontera de la zona de fusión esta compuesta principalmente por austenita celular con alguna cantidad de ferrita (Figura 5.14 (c)), además no se aprecia un cambio microestructural significativo entre la frontera de la zona de fusión y el centro de la soldadura. Casi la misma microestructura se observa con el incremento de la velocidad de avance de 15mm/seg. a 16.66mm/seg. (Figura 5.14 (d)). La austenita celular indica las características de que ocurrió primero una solidificación austenítica. La diferencia microestructural de la soldadura de un ASS 316L y un ASS 316LN se debe principalmente a que el 316LN contiene nitrógeno que es un elemento estabilizante de la austenita.

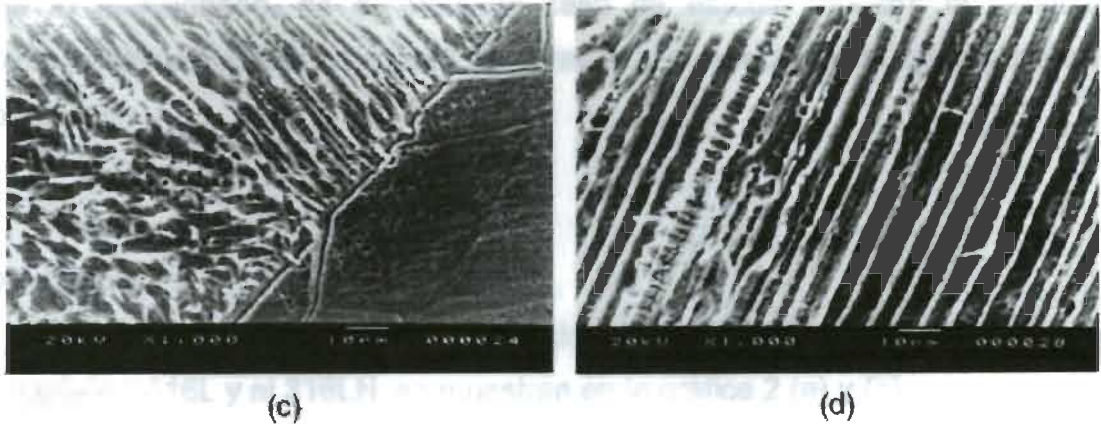
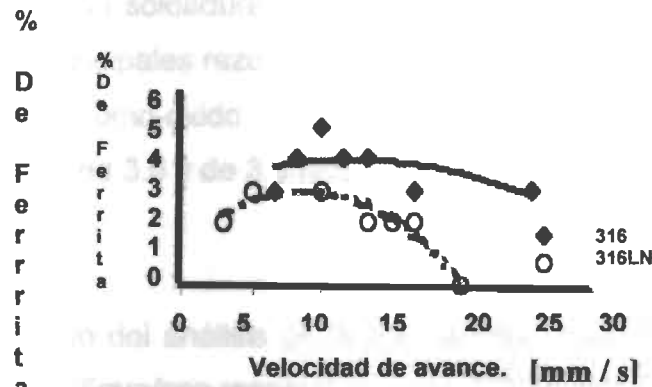


Figura 5.14.- Microestructura obtenida con microscopio electrónico de barrido (SEM) de 316LN a una velocidad de (c) 15mm/seg. y (d) 16.66mm/seg.

En las figuras anteriores (Figura 5.13 y 5.14) se observa que el aumento de la velocidad de avance de la soldadura, causará un decrecimiento en la cantidad de ferrita.

En el caso de el material 316LN que consta de nitrógeno que es un elemento estabilizante de la fase austenítica, se puede lograr un microestructura totalmente austenítica si se aumenta la velocidad de avance a 20mm/seg. , en cambio en el material 316L no se observa esto al aumentar la velocidad hasta 25mm/seg. (Grafica 1).

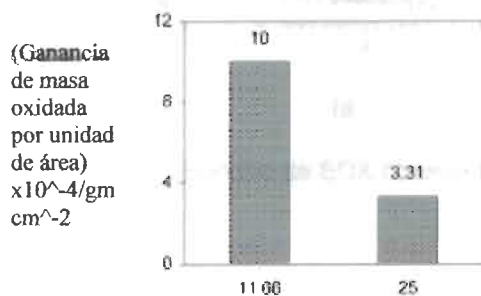


Grafica 1.- Porcentaje de ferrita con respecto a la velocidad de avance.

Por lo mencionado, en el presente caso de estudio muestra la variación microestructural con la velocidad de avance, y su efecto en la resistencia a la oxidación.

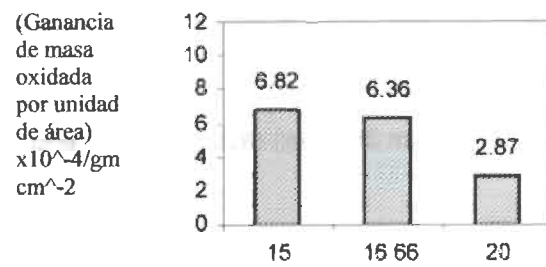
Oxidación.

Los resultados para la prueba de oxidación para ambas soldaduras de los materiales 316L y el 316LN, se muestran en la gráfica 2 (a) y (b).



Velocidad de avance (mm/sec)

(a)



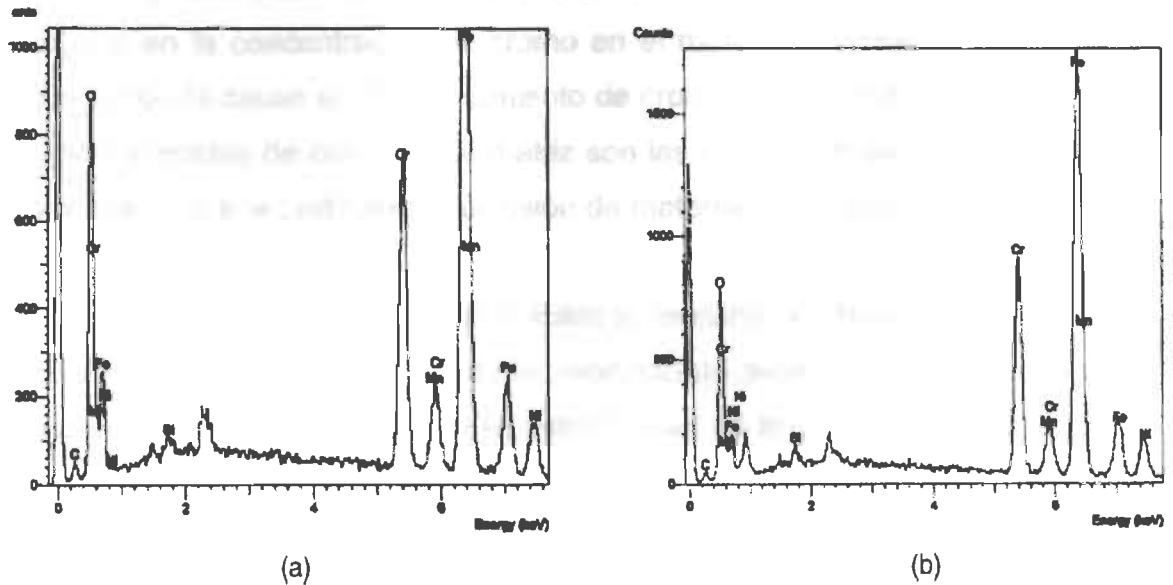
Velocidad de avance (mm/sec)

(b)

Gráfica 2.- Ganancia de masa de óxidos por área con respecto al incremento de la velocidad de avance.

Las graficas anteriores muestran claramente que el aumento de la velocidad de avance en la soldadura va a generar una mayor resistencia a la oxidación. Una de las principales razones, es el contenido de cromo, y de la escala interior hierro-cromo/cromo-óxido. La razón Fe/Cr para velocidades de 11.66 y 25mm/seg es de 3.5 y de 3.0 respectivamente, esto se puede ver en la gráfica 3 (a) y (b).

El promedio del análisis de la escala interna muestra 11.24% y 13.42% Cr para 11.66 y 25mm/seg respectivamente. [13-16-17].



Gráfica 3.- Espectro de EDX obtenido sobre la zona de la soldadura (a) 11.66 mm/seg y (b) 25 mm/seg.

En la Gráfica 3(a) se muestra el resultado del EDX para la unión que es soldada con baja velocidad, en este se observa menor cantidad de cromo, esto podría ser la principal razón de los altos valores de ganancia de masa oxidada por unidad de área (Gráfica 2 (a)), a comparación de la gráfica obtenida para una velocidad de avance de 25mm/seg.

En el caso del material ASS 316LN la presencia del nitrógeno causa precipitados de Cr_2N en las fronteras de grano los cuales bloquean una fácil migración de los iones, mejorando así la resistencia a la oxidación. [12-18,19].

Por otra parte, a una velocidad de 20mm/seg la zona soldada muestra una microestructura totalmente austenítica, esta puede ser la principal razón por la cual se mejore la tasa de oxidación a esta velocidad de avance.

Es importante saber que la concentración de cromo varía a medida que existe una variación en la velocidad de avance del soldeo, cuando la velocidad de avance es de 25 mm/seg la concentración será mayor en la zona de

soldadura, lo cual hace evidente que la velocidad de avance juega un papel importante en la concentración de cromo en el metal base. Una velocidad de avance reducida causa un enriquecimiento de cromo en las fronteras de la zona de fusión, pérdidas de cromo en la matriz son las principales causas de la baja en la resistencia a la oxidación y corrosión de materiales austeníticos.

Por lo tanto, el material ASS 316LN soldado muestra una buena resistencia a la oxidación, independientemente de la velocidad de avance de soldeo, esto se debe al contenido nitrógeno el cual es estabilizador de la fase austenítica.

5.4.- EFECTO DE LA VARIACIÓN DE VOLTAJE, ANCHO DE SPOT, Y DURACIÓN DEL PULSO EN LA SOLDADURA LÁSER.

5.4.1 VOLTAJE.

El voltaje es una variable 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 mas resistente a la corrosión [9].

En la figura 5.15 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 crece.

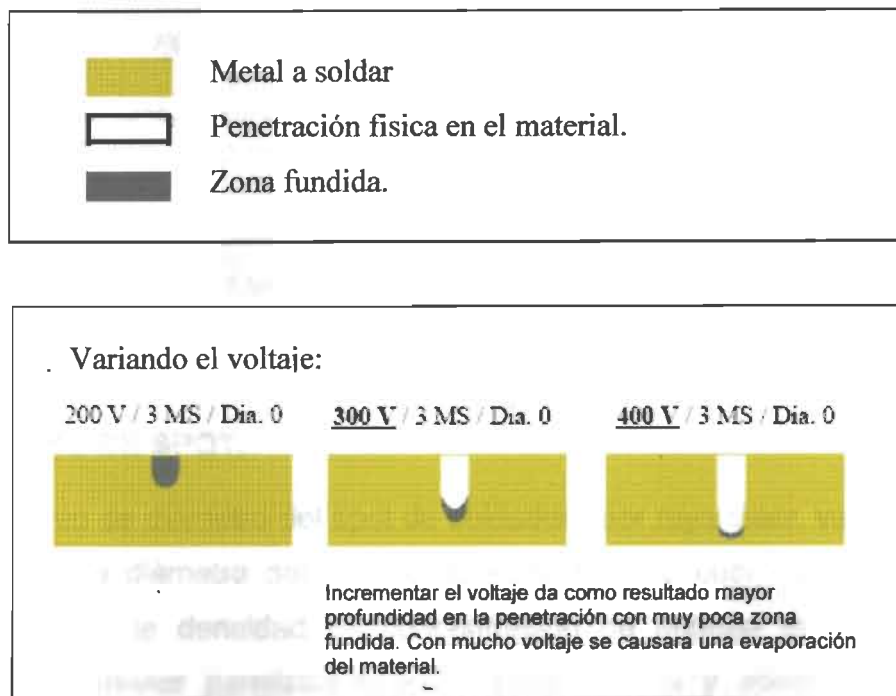


Figura 5.15.- Efecto del voltaje en la soldadura láser.

5.4.2 DURACIÓN DEL PULSO.

El efecto que tiene la duración del pulso en el material soldado con soldadura láser, se puede observar, en la figura 5.16, 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.

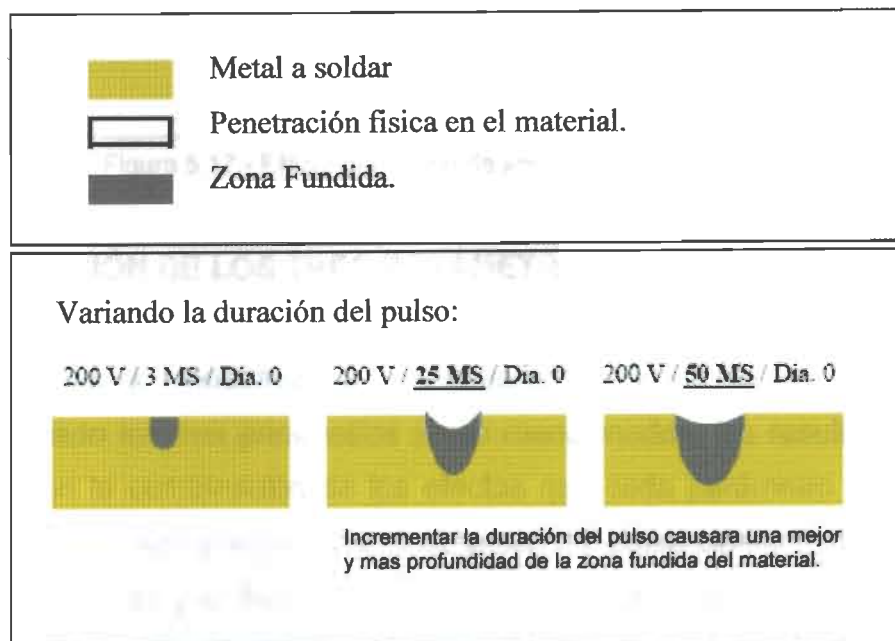


Figura 5.16.- Efecto de la duración del pulso en la soldadura láser.

5.4.3 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 5.17 [9]

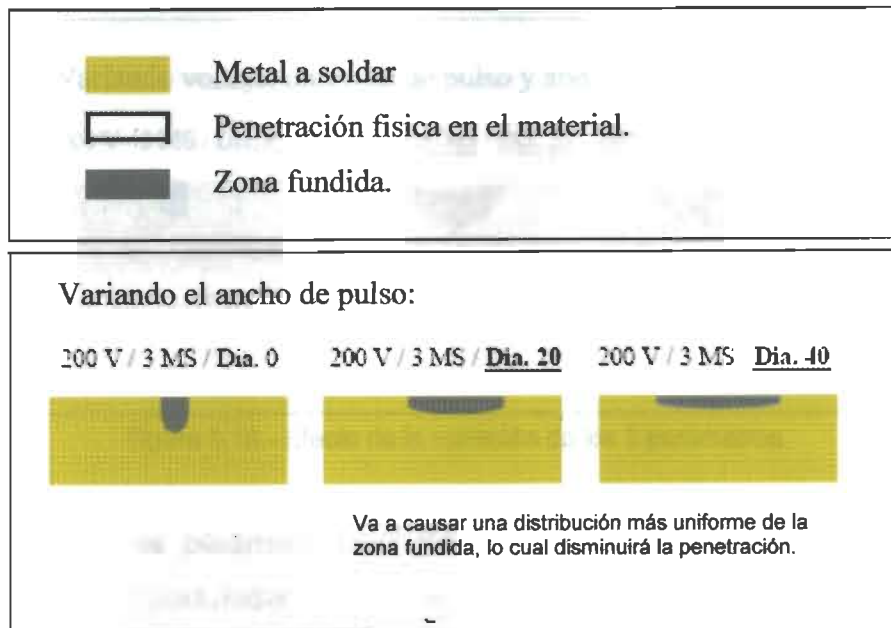
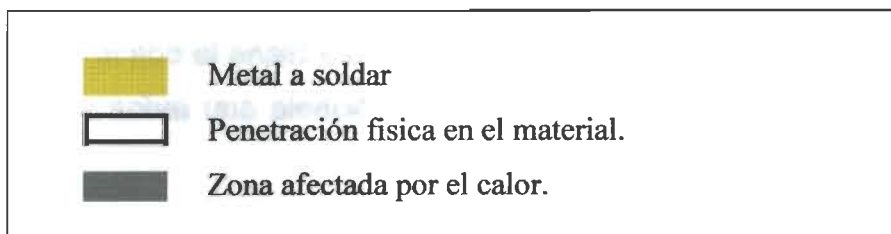


Figura 5.17.- Efecto del ancho de spot en la soldadura láser.

5.4.4 VARIACIÓN DE LOS TRES PARÁMETROS EN LA MISMA PROBETA.

En la figura mostrada a continuación (Figura 5.18) se muestra esquematizado los tres parámetros antes mencionados, los resultados que se obtienen son la combinación de los efectos que cada parámetro causa por si solo: el voltaje mayor penetración, la duración del pulso extiende la penetración en la zona fundida, y el diámetro del spot disminuye la densidad de energía, lo cual provoca menor espesor o penetración de la zona fundida pero mayor diámetro.



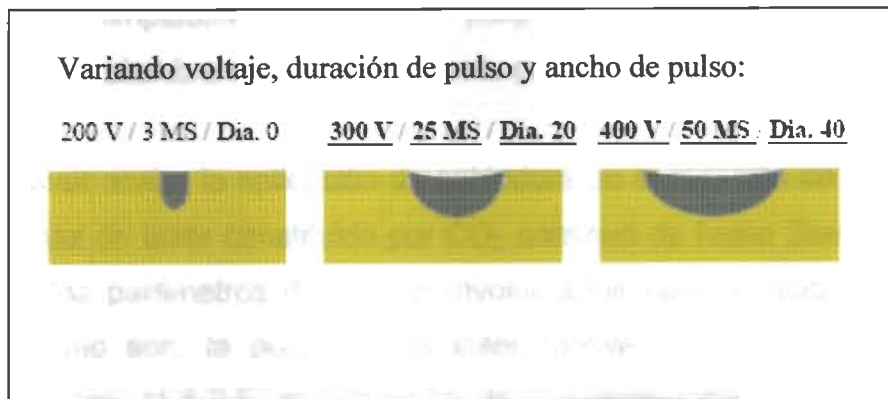


Figura 5.18.- Efecto de la variación de los 3 parámetros.

Entendiendo los parámetros del láser, y su interacción con el material se abren muchas oportunidades en el uso del rayo láser en la industria manufacturera. Por lo que el ingeniero no solo debe entender la influencia de los parámetros si no también como afectan a los materiales variando no solo uno si no varios simultáneamente [9].

5.5.- EFECTO DEL CALOR DE ENTRADA.

El calor de entrada es una medida relativa de la energía trasferida por unidad de longitud en la soldadura, y esta dada por la siguiente ecuación: $HI = P/V$; donde HI es el calor de entrada, P es la potencia y V es la velocidad de la soldadura [22].

Para llevar acabo el análisis de dicha variable se eligió un estudio reportado en la literatura sobre una aleación de magnesio AZ31 [26], cuya composición es:

Al 2.5–3.5, Zn 0.5–1.5, Mn 0.2–1.0, Ca 0.04, Si 0.1, Cu 0.05, Ni 0.005, Fe 0.005.

En este estudio las dimensiones de las probetas fueron de 100 mm×50 mm×1.5 mm en forma rectangular. Una vez habilitadas, antes de ser soldadas,

estas fueron limpiadas con acetona para remover la grasa y residuos y cepilladas con alambre de acero inoxidable para remover los óxidos.

Para llevar acabo la aplicación de soldadura en la aleación de magnesio se utilizo un haz de láser constituido por CO₂ continuo de hasta 3kw de potencia, habiendo dos parámetros de control involucrados para modificar el calor de entrada, como son, la potencia del láser (800w-1000w) y la velocidad de desplazamiento (1.5-2.5 m/min.). En la siguiente tabla se observa las condiciones de los parámetros empleados para el estudio en cuestión [26].

Tabla 3.- Parámetros empleados para análisis del calor de entrada.

Experimento no.	Potencia (W)	Velocidad (m/min)	Calor de entrada (J/mm)
1#	800	2.5	19.2
2#	900	2.5	21.6
3#	1000	2.5	24
4#	800	2.0	24
5#	900	2.0	27
6#	1000	2.0	30
7#	800	1.5	32
8#	900	1.5	36
9#	1000	1.5	40

5.5.1.- EFECTO MICROESTRUCTURAL Y MACROESTRUCTURAL EN FUNCIÓN DEL CALOR DE ENTRADA.

Los resultados arrojan lo siguiente. Cuando el calor de entrada es poco, poca penetración es alcanzada y viceversa (Figura 5.19 (a)), (b) y (c)), la soldadura se empieza a ver mas sana en las Figuras 5.19 (c) a (e). Al mismo tiempo, al aumentar el calor de entrada se da un ligero ensanchamiento en el lado superior de la soldadura, así como la anchura inferior de la soldadura obviamente también aumenta. Esto ocurrió en todas las condiciones realizadas. Cabe mencionar que la diferencia en el ancho de la parte superior de la soldadura y la parte inferior disminuye cuando aumenta el calor de entrada

(Figura 5.19 (g) a (i)). La principal razón puede ser que el rango de enfriamiento disminuye cuando se incrementa el calor de entrada, por lo tanto si se tiene un calor de entrada muy alto mas volumen del material base se va a fundir y el calor en la soldadura tarda más tiempo en conducirse de la parte superior a la inferior.

Es fácil percibir que a una entrada de calor muy alto aparecen algunos de los defectos típicos en la soldadura, como el socavado en el centro de la parte superior de la soldadura debido a la vaporización del magnesio y del zinc que tienen punto de fusión bajo (Figura 5.19 (f) a (i)). Adicionalmente se puede observar porosidad en la zona de fusión especialmente cuando el calor de entrada es muy alto (Figura 5.19 (h) a (i)) esto indica que la porosidad es causada por la vaporización de elementos químicos [21-23].

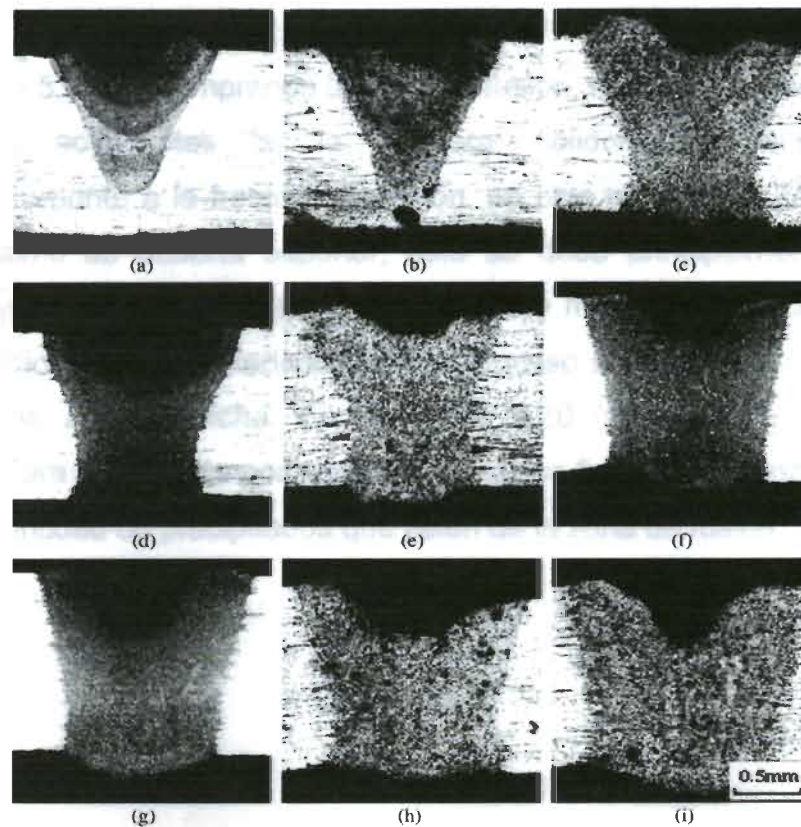


Figura 5.19.- Efecto de calor de entrada a diferentes condiciones establecidas en la macroestructura de una aleación de magnesio. a) 19.2 J/mm, b) 21.6 J/mm, c) 24 J/mm, d) 24 J/mm, e) 27 J/mm, f) 30 J/mm, g) 32 J/mm, h) 36 J/mm y i) 40 J/mm.

Después de el análisis de la figura anterior (Figura 5.19), se sabe que el calor de entrada tiene un gran efecto en la geometría de la junta de un aleación de magnesio AZ31, aumentando el calor de entrada la penetración va a ser mayor, la diferencia de tamaño del lado superior y el inferior de la soldadura se va a reducir, pero a su vez si el calor de entrada es muy grande va a causar poros y socavados en la junta.

Por otra parte, en la figura siguiente (Figura 5.20) se muestra la microestructura en la zona de soldadura, en las Figura 5.20 (a) y (b) que corresponden desde la orilla de la soldadura hasta el centro de la soldadura se puede observar una microestructura muy parecida a la de la aleación, además el tamaño de grano no es uniforme y se ve una recristalización alrededor de los granos largos.

La Figura 5.20 (d) comprende la zona de fusión, en esta se observan granos columnares adyacentes a la frontera sólido/liquido que crecieron perpendicularmente a la frontera de fusión, en este material la ZAC no es tan estrecha como se debería suponer, esto se debe principalmente a que la aleación tiene una gran conductividad térmica y muy baja capacidad térmica, esto contradice a las características de un proceso de soldadura por rayo láser que son una ZAC estrecha. En la Figura 5.20 (g) y (h) se observa una microestructura constituida por granos equiaxiales finos, esto principalmente se debe a la cantidad de precipitados que salen de la zona de fusión.

Calor de entrada,
Potencia del láser,
Velocidad de soldadura,
Distancia de soldadura.

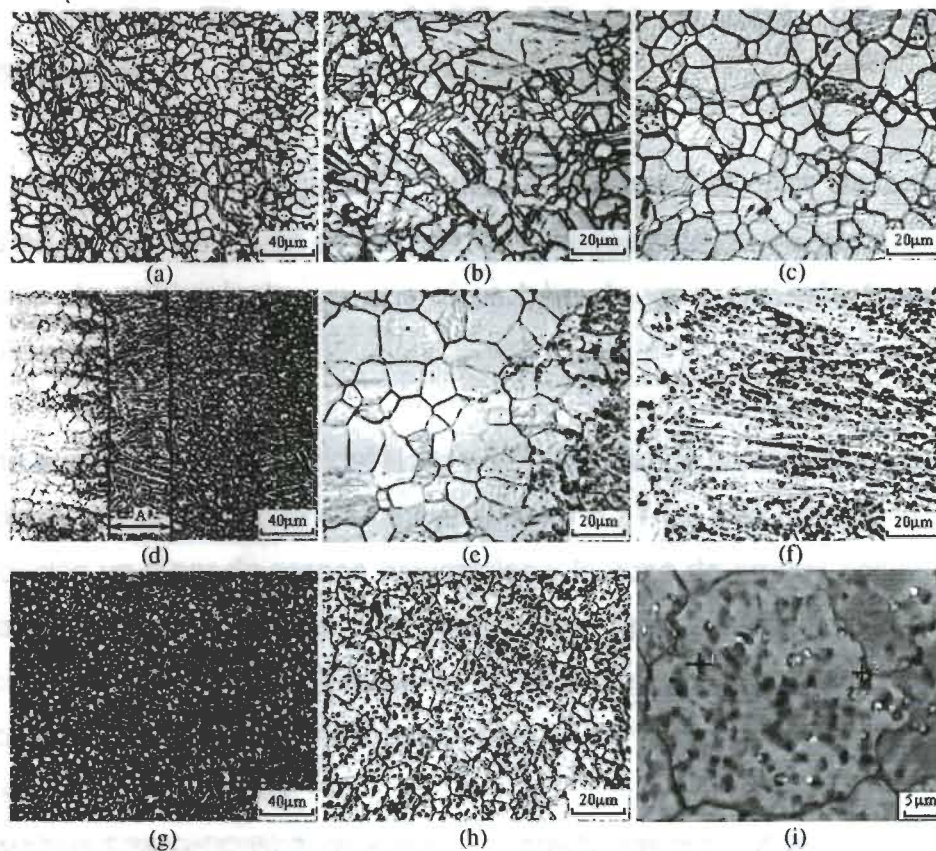


Figura 5.20.- Micrografías de estructuras de la aleación de magnesio a diferentes calores de entrada: a) 19.2 , b) 21.6 , c) 24 , d) 24 , e) 27 , f) 30 , g) 32 , h) 36 y i) 40 J/mm.

Por lo anterior, se concluye que el calor de entrada esta directamente relacionado con la potencia del láser, la velocidad de soldadura y la eficiencia del soldeo, como se puede ver en la siguiente formula: [22]

$$E = (P/v) \times \eta$$

Donde

E = calor de entrada,

P = poder del láser,

V = velocidad de soldadura

η = eficiencia de soldeo.

5.5.2.- EFECTO EN EL GROSOR DE LA BANDA DE GRANOS COLUMNARES.

Se puede ver en la Figura 5.21 que al aumentar el calor de entrada los granos en la zona de fusión se hacen mas gruesos esto ocurre por el fenómeno del rango de enfriamiento, ya que si es bajo, le va a dar más tiempo a los granos de engrosarse.

Si se aumenta la potencia del láser y la velocidad de soldadura es constante, el gradiente de temperatura disminuye (Figura 5.21 (a) a la (c)) por lo tanto la solidificación va a ser de granos equiaxiales y la zona de granos columnares va a ser mas estrecha. Las Figura 5.21 (c) a la (e) fueron soldadas con la misma potencia del láser, pero disminuyendo la velocidad de desplazamiento lo cual provoca que el rango de crecimiento baje y los granos pasen de crecer de forma equiaxial a columnar.

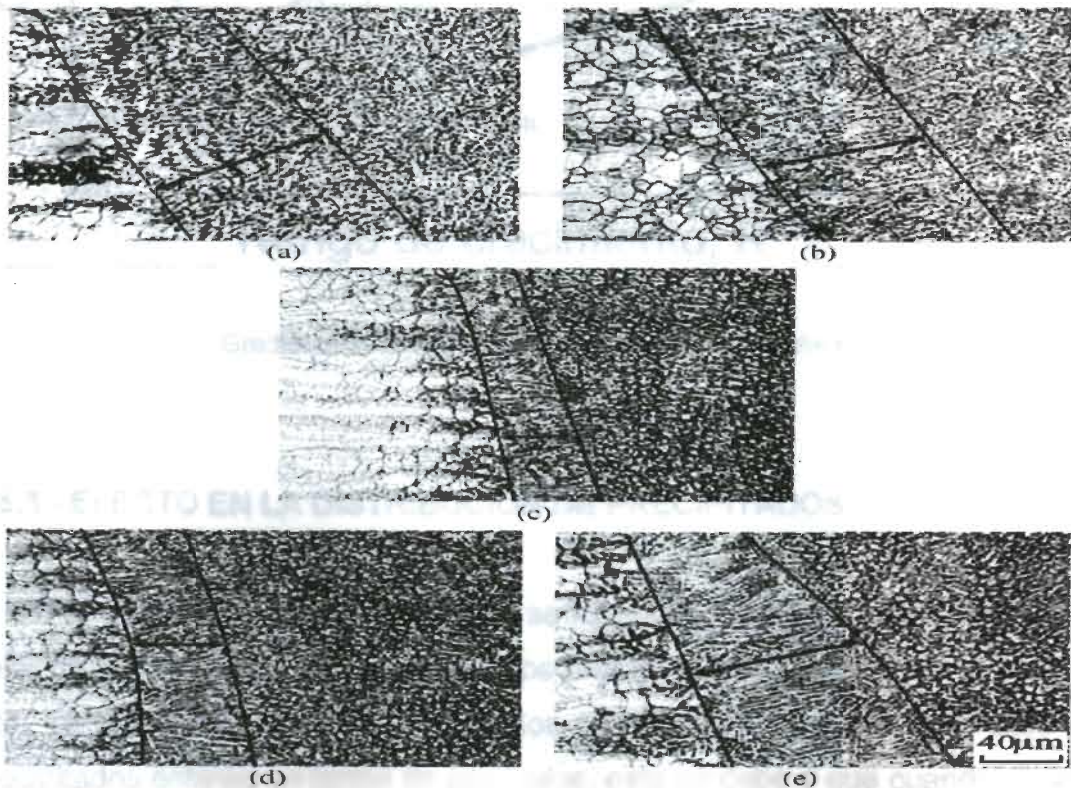
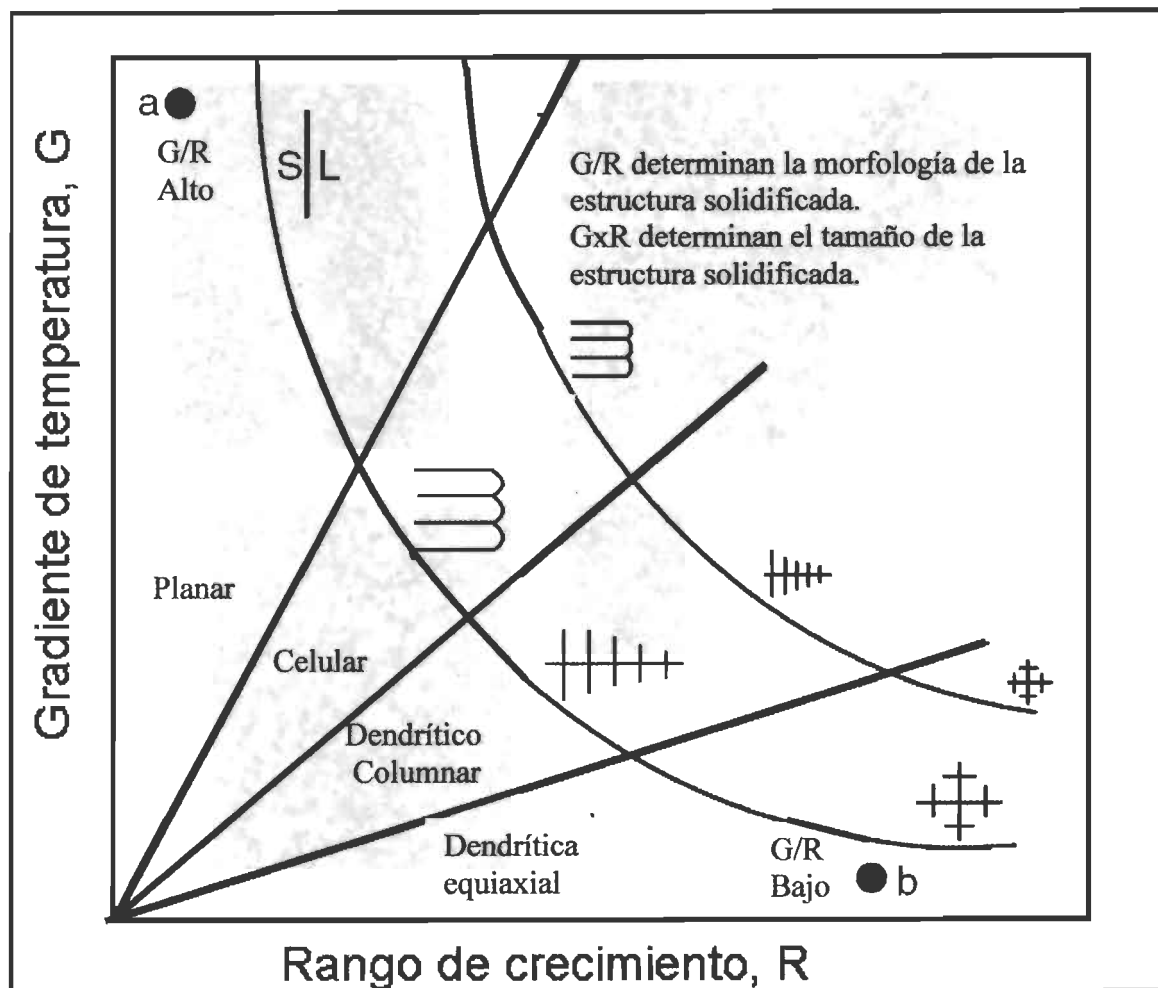


Figura 5.21.- Tamaño de la banda de granos columnares.

Lo ocurrido es más fácil de comprender con la gráfica 4 [22]:



Gráfica 4.- Gradiente de temperatura con respecto al crecimiento dendrítico.

6.5.3.- EFECTO EN LA DISTRIBUCIÓN DE PRECIPITADOS.

En la figura siguiente (Figura 5.22) se muestra el resultado del aumento del calor de entrada en la distribución de los precipitados. Si el calor de entrada es alto, los precipitados estarán contenidos en placas, en cambio si es bajo los precipitados estarán en forma de partículas, esto se debe a que cuando el calor de entrada es bajo, el rango de enfriamiento sea menor, esto provoca que los

átomos no puedan regresar a tiempo a las fronteras de grano y queden esparcidos como partículas intragranulares.

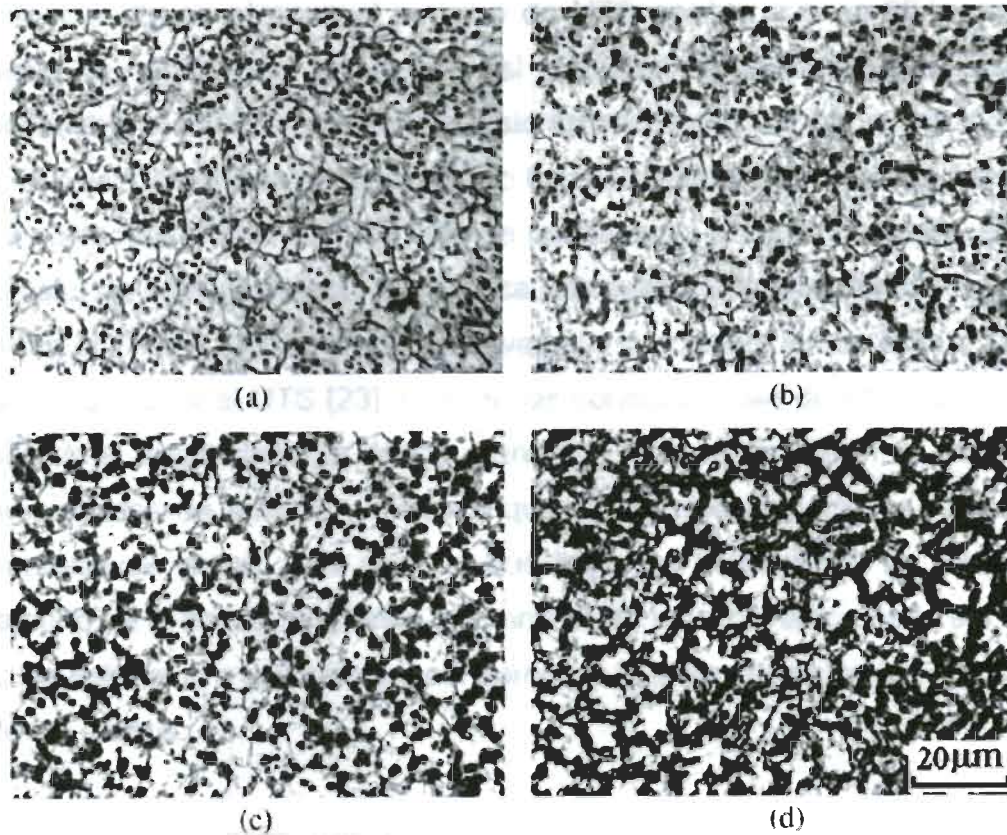


Figura 5.22.- Distribución de los precipitados.

6.5.4.- EFECTO EN LAS PROPIEDADES DE TENSIÓN DEL MATERIAL.

El efecto sobre las propiedades a la tensión en un caso de estudio se aprecia en la tabla 4.

Tabla 4.- Resultados de la prueba de tensión.

Experimento no.	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	Metal base
UTS(MPa)	205	245	305	285	280	275	275	230	215	315
Elongación	4.5	6.0	6.5	6.5	6.5	6.5	5.5	5.5	5.0	12.5

En la tabla anterior (Tabla 4) se ve claramente que el esfuerzo máximo a la tensión (UTS) tiende a aumentar al principio y luego baja al aumentar el calor de entrada a un rango mayor [20]. Cuando el calor de entrada es de 24 J/mm (probeta #3) se alcanza el máximo de UTS posible que es 96.8% del metal base, la elongación es la que si decrece significativamente alcanzando solamente el 50% del metal base, esto se puede explicar por que primeramente si el calor de entrada es muy bajo no hay tiempo para formarse un buen charco de soldadura lo cual provoca falta de penetración, en caso contrario, es decir si el calor de entrada es alto, se provoca una evaporación de elementos químicos, como el Zn o el Mg, causando socavados y porosidad, lo que lleva a la baja de la elongación y el UTS [23]. Otra de las consecuencias de un calor de entrada alto es el engrosamiento de los granos en la zona de fusión, lo cual baja las propiedades de tensión y provoca que los precipitados formen placas en las fronteras de grano. Otro aspecto que baja sus propiedades de tensión es el tamaño de la banda de granos columnares en la unión, esto puede ser reducido si los esfuerzos a los que va a ser sometida la junta son paralelos al crecimiento de los granos.

Como conclusión general se observa claramente que cuando hay un incremento en el calor de entrada, los granos en la zona de fusión tienden a ser mas gruesos, bajando propiedades mecánicas; con un calor de entrada bajo, los precipitados se distribuyen en forma de particulas y con un calor de entrada alto en forma de paquetes en las fronteras de grano, lo cual causa menores propiedades de tensión y el valor óptimo de calor de entrada para el presente caso de estudio es de 24 J/mm en la probeta N°3 ya que fue la probeta que presentó mejores las propiedades de tensión. [26]

5.6.- EFECTO DE LA ENERGÍA Y DURACIÓN DEL SPOT DEL LÁSER.

5.6.1.- CASO DE ESTUDIO.

Para el análisis del efecto que causan la energía y la duración del pulso en la soldadura con láser, se tomo un caso de estudio reportado en la literatura [24].

Proceso experimental

En este caso de estudio se tomaron las siguientes consideraciones experimentales.

- Equipo de soldadura láser Nd-YAG.
- Las variaciones en la energía del pulso se presentaron en el rango de 1 - 5.5 joules.
- La duración del pulso fue variada de 2.2 a 7 milisegundos.
- Las pruebas se hicieron en un acero 304 (dimensiones: 55 x 104 x 6 mm) en el cual se colocaron 900 puntos de soldadura.
- La frecuencia del pulso fue de 15-40 Hz.
- El gas de protección fue argón.
- El espacio entre spot esta comprendido entre 1.3-4mm.
- Se utilizó una velocidad de soldadura de 51 mm/seg.

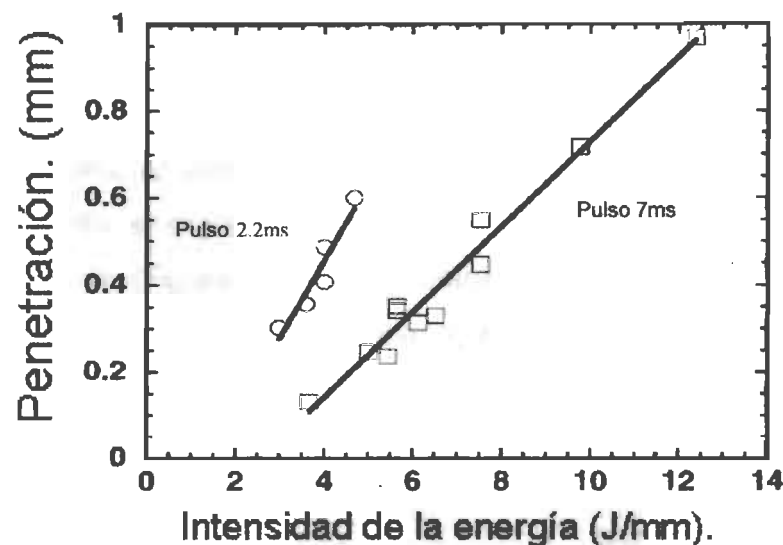
Durante la realización del experimento se consideró lo siguiente.

- Las mediciones de calor en el material fueron realizadas con un calorímetro, que entrega un voltaje de salida que fue conectado a un osciloscopio digital, para así determinar la energía total absorbida por la pieza.

- La energía absorbida en un solo spot se determina dividiendo la energía total absorbida entre el número total de spots.
- El tamaño del spot se midió con un lasercopio PROMETEC UFF100.

5.6.2.- ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este caso de estudio con un acero 304 se puede observar a simple vista en la gráfica 5 que la duración del pulso es un parámetro que afecta directamente a la penetración del material y además se puede observar claramente que con una buena elección de la duración de pulso se puede lograr una buena penetración con menor gasto de energía en el proceso [24].



Gráfica 5.- Intensidad energía contra penetración.

Después del análisis de los resultados es obvio que existe una gran influencia en la penetración de la pieza variando la intensidad de la energía. Es importante mencionar que al utilizar pulsos de menor duración va a ser menos la intensidad de energía requerida para lograr una mayor penetración. En cambio es más intuitivo que al aumentar el poder máximo se incremente la penetración en la pieza. La energía absorbida de todas las soldaduras, en el

caso de estudio, se encuentra en un rango entre 0.38% y 0.67%, siendo baja la absorción que se obtuvo. Se esperaba obtener absorción parecida a la del láser de CO₂ de 0.92% para este tipo de aceros

5.7.- EFECTO DEL TIPO Y FLUJO DE GAS DE PROTECCIÓN EN LA CALIDAD DE LA SOLDADURA.

5.7.1.- 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 [30].

Efecto del plasma. El plasma provoca efectos no deseados en el haz de láser, el plasma absorbe energía del haz y además causa desfocalizaciones. En el esquema siguiente (Figura 5.23) se muestra la consecuencia que tiene el uso del gas protector en la columna de plasma, y además en la penetración del haz de láser [29].

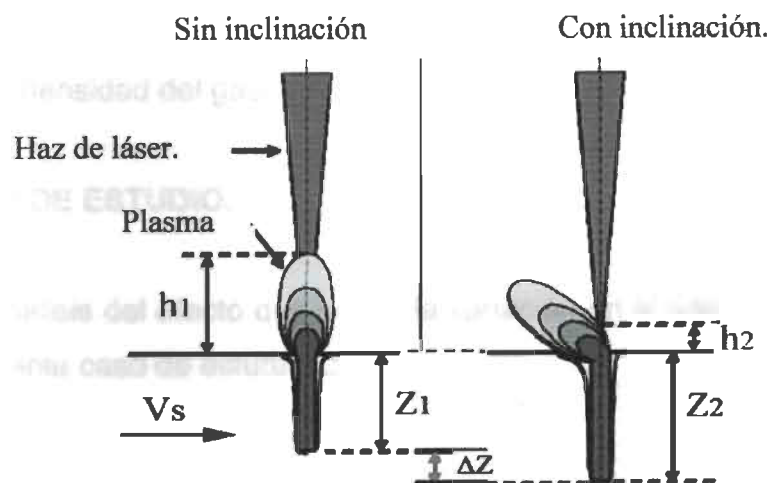


Figura 5.23.- Penetración en función de Inclinación del plasma [28].

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. [27]

Variables en la aplicación y elección del gas protector:

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

5.7.2.- CASO DE ESTUDIO.

Para el análisis del efecto que causa la variación en el gas de protección se tomo el siguiente caso de estudio [27].

Consideraciones en el entorno experimental.

- Medida de la placa: 80 mm x 40 mm x 10 mm.
- Espesor de la boquilla: 6 mm.
- Temperatura: 20 grados centígrados.
- Presión: 10^5 Pa.

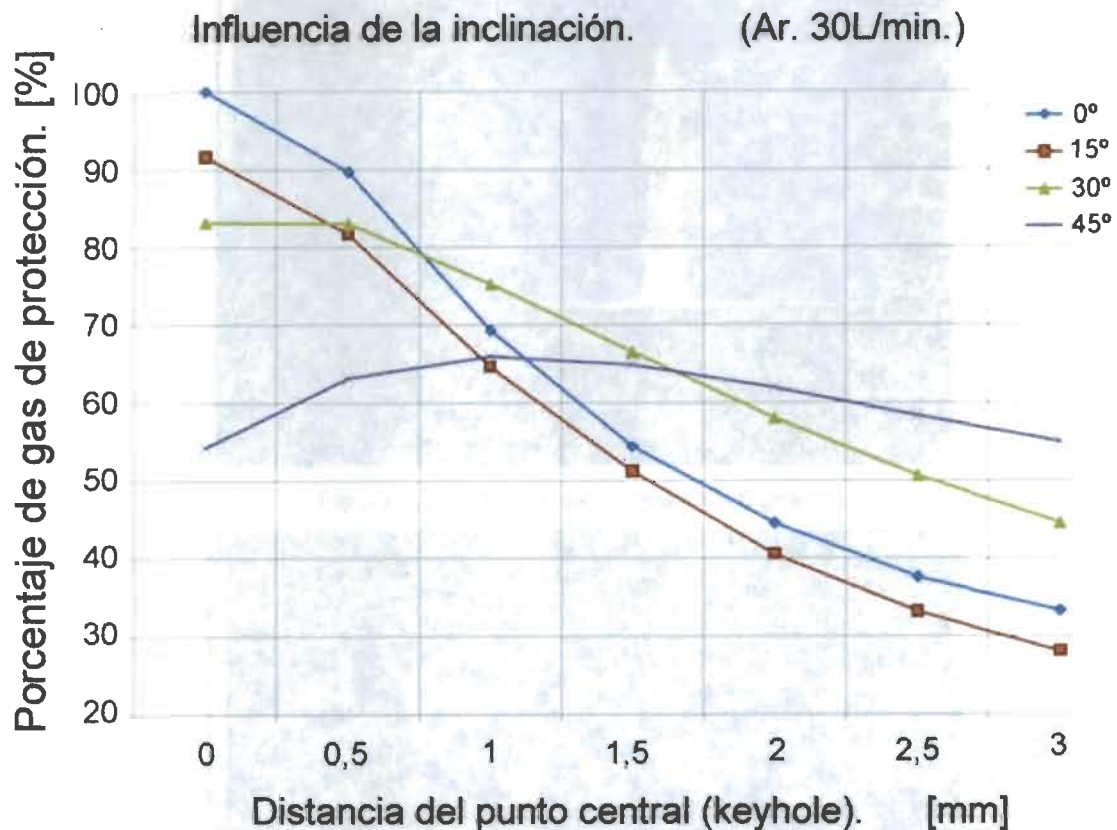
Los parámetros variables fueron los siguientes:

- Láser híbrido con GMAW y las simulaciones se hicieron con CFD software PHOENICS [31-32]
- 3 diferentes gases:
 1. Helio ($d=0.178$ kg/m³).
 2. Argon ($d=1.74$ kg/m³).
 3. Nitrógeno ($d=1.205$ kg/m³).
- 4 diferentes inclinaciones en la boquilla: 0, 30, 45 y 60 grados.
- 3 diferentes caudales: 15, 30 y 45 litros por minuto.

5.7.3.- ANÁLISIS DE RESULTADOS EN EL CASO DE ESTUDIO.

Influencia de la inclinación de la boquilla.

En la siguiente gráfica 6, 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.



Gráfica 6.- Influencia de la inclinación del ángulo de la boquilla.

En la gráfica 6 se observa 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 las siguientes simulaciones (Figura 5.24 y 5.25) 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.

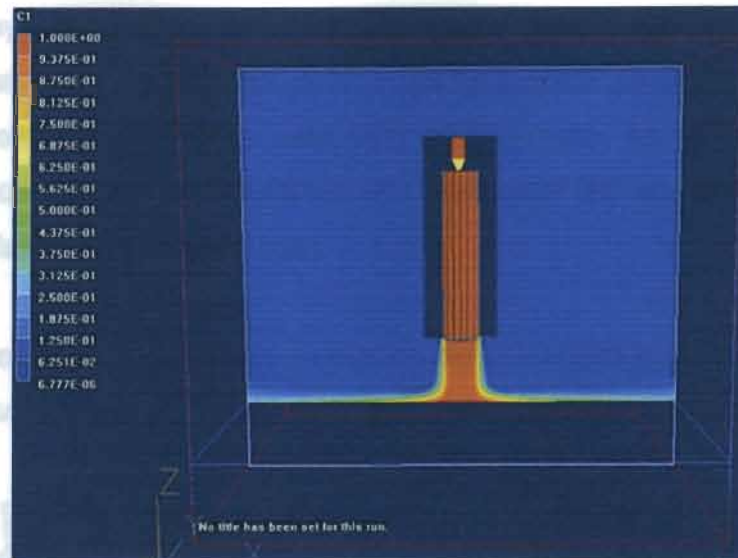


Figura 5.24.- Ángulo de boquilla de 0 grados.

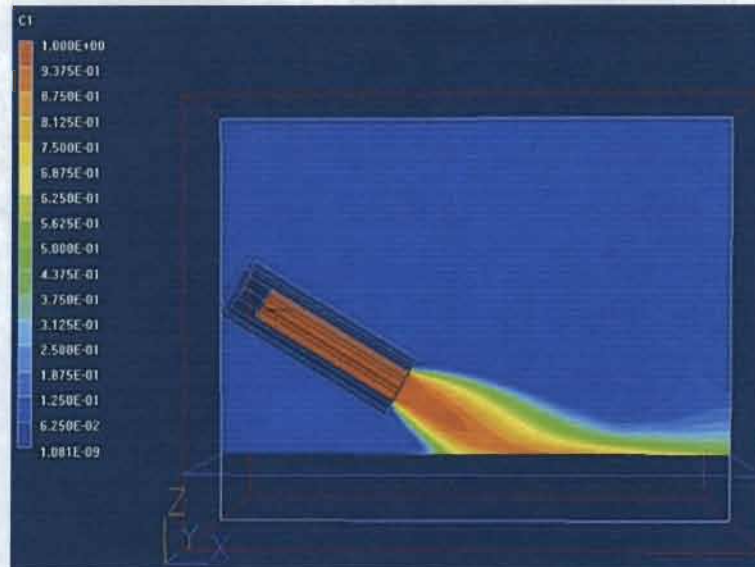


Figura 5.25.- Ángulo de boquilla 60 grados

En las figuras anteriores se observa que la distribución del gas protector abarca mayor superficie a un ángulo de boquilla de 60 grados (figura 5.25) 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 mas tiempo el charco de soldadura mientras este esta 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 5.25.

En la figura 5.26 se muestra un equipo de soldadura láser de CO₂, en este se puede observar que el ángulo de boquilla esta cercano a 60 grados.

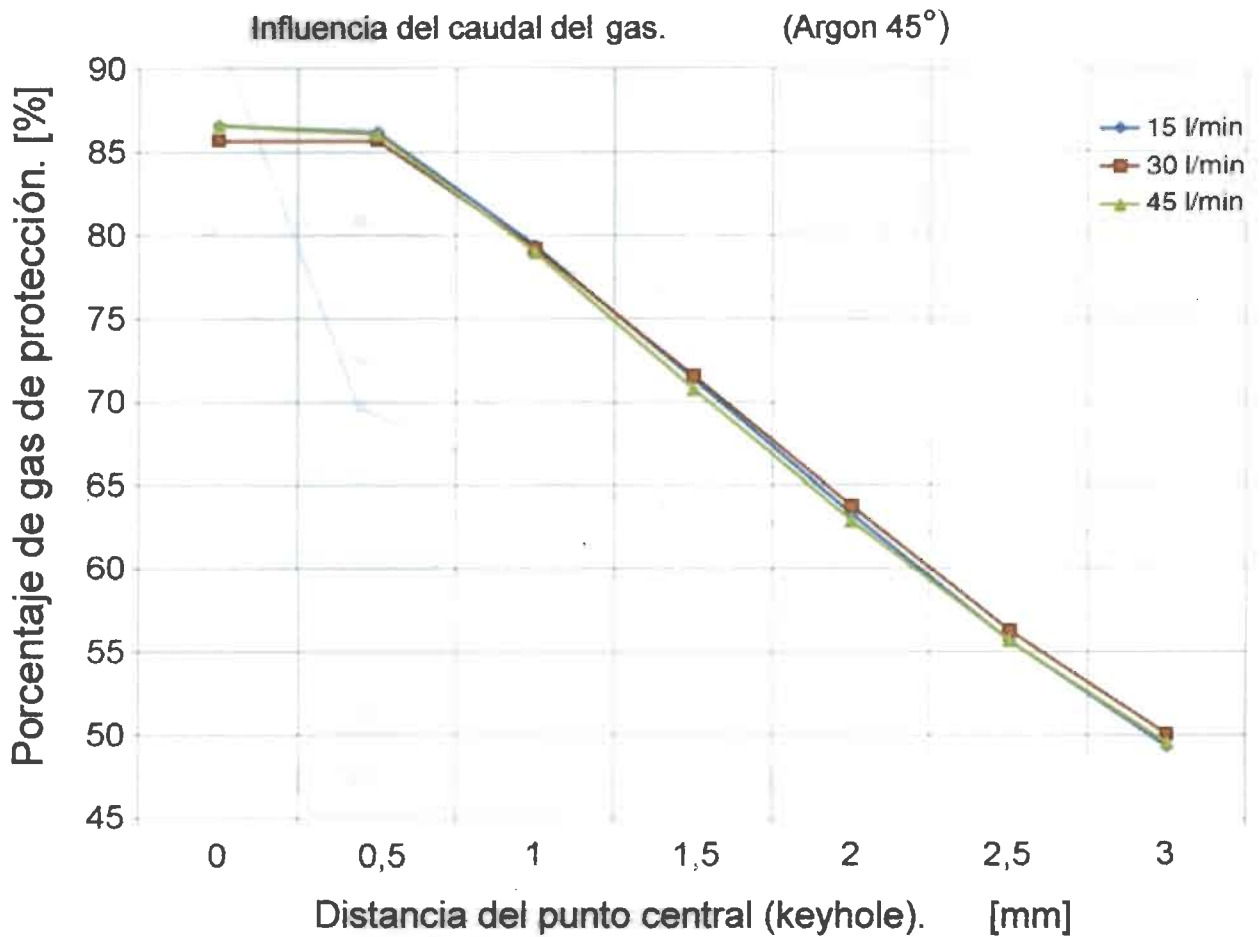


Figura 5.26.- Equipo láser CO₂ con una potencia de 6Kw.

Influencia del caudal del gas

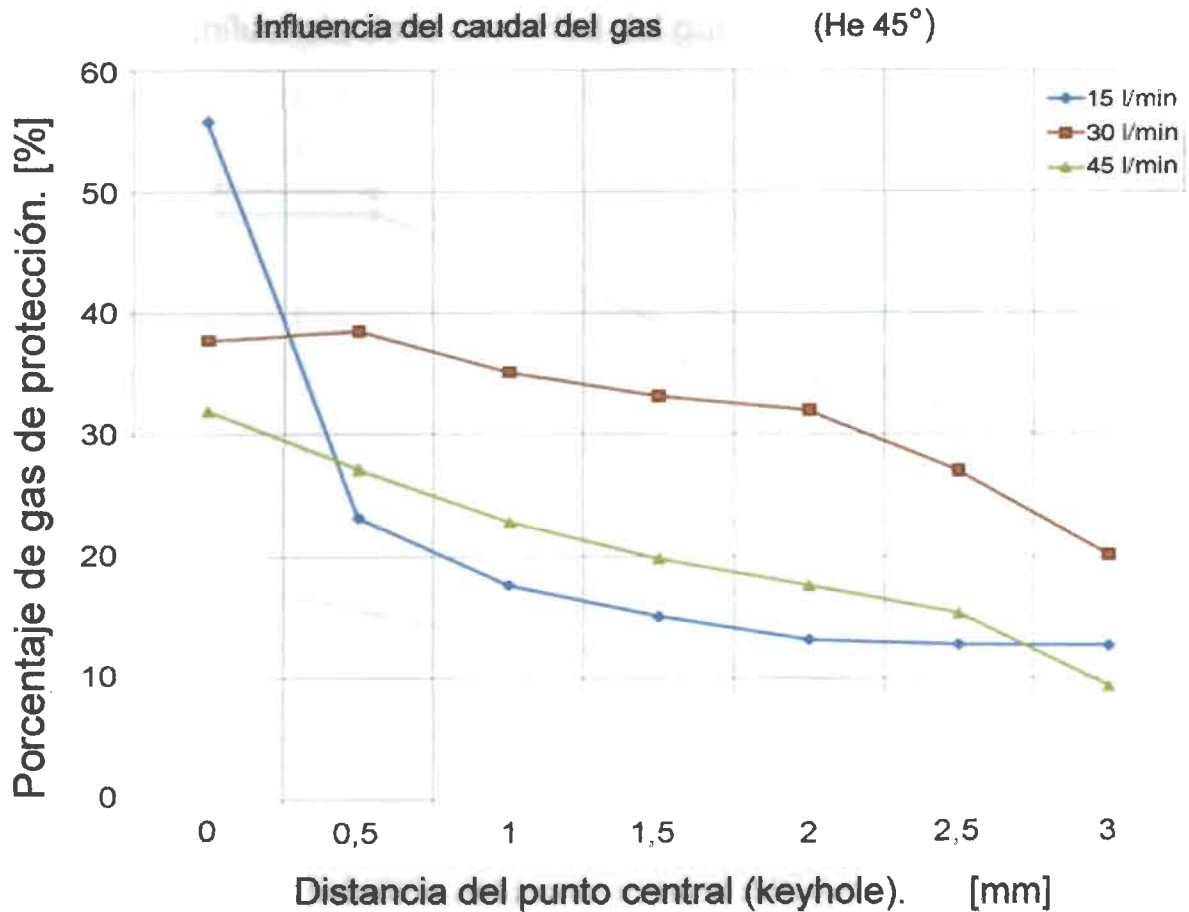
En la gráfica 7 se muestra la variación del caudal del gas protector con caudales de 15, 30 y 45L/min y con un ángulo de boquilla de 45 grados. Se ve que el porcentaje de gas protector a determinada distancia, es casi el mismo a los tres distintos caudales, esto se debe principalmente a que la densidad del

argón tiene mayor densidad que el aire lo cual contribuye a que este permanezca en contacto con el área que se desea proteger.



Gráfica 7.- Influencia del caudal del gas (argón).

En la gráfica 7 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 grados.

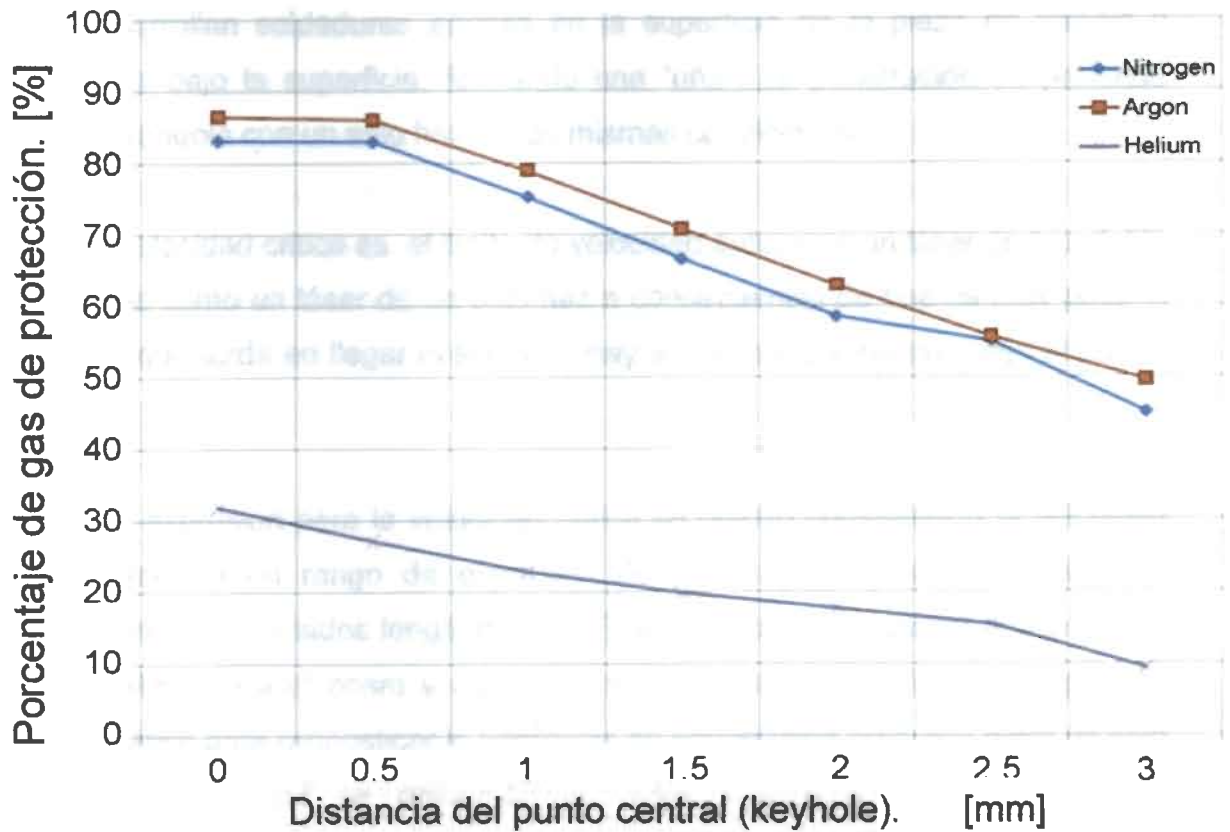


Gráfica 8.- Influencia del caudal del gas (helio).

Como se pudo ver en las graficas 7 y 8, 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 grados y el caudal del gas fue de 45L/min.

En la gráfica 9 se observa que una mayor densidad en el gas de protección provoca una mayor estabilidad y eficiencia de protección en el charco de soldadura.

Influencia de la densidad del gas. (45° 45L/min)



Gráfica 9.- Influencia de la densidad del gas de protección.

5.8.- SOLDADURA LÁSER CON DOBLE HAZ

5.8.1.- DESCRIPCIÓN.

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. [7]

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.

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.

6.8.2.- 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 como 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 haces de luz laser 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 5.27

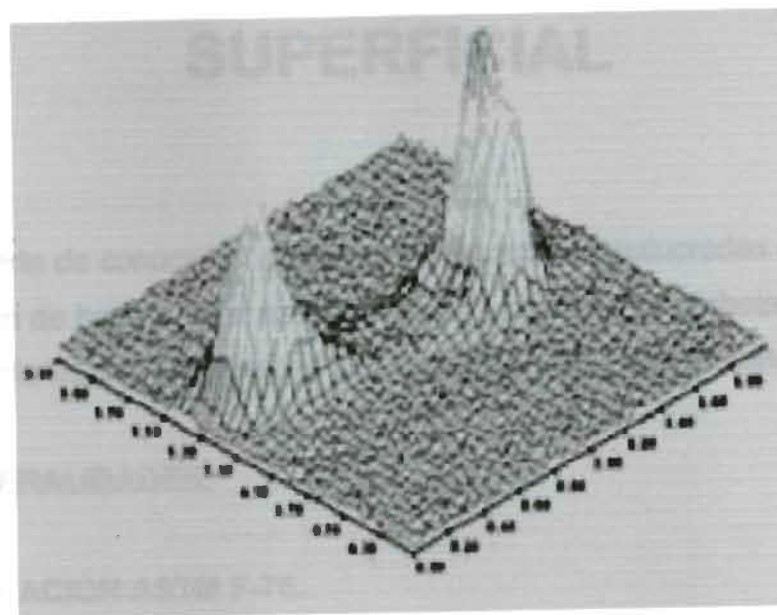


Figura 5.27.- Distribución de la densidad de potencia haz de láser doble.

6.

CASO DE ESTUDIO EXPERIMENTAL. DISEÑO DE UN TRATAMIENTO SUPERFICIAL

Como parte de conocer el efecto de las variables involucradas en el proceso de aplicación de haz de láser se llevo a cabo una serie de probetas, misma que fueron caracterizadas por técnicas Microestructurales y mecánicas.

6.1.- GENERALIDADES.

6.1.1.- ALEACION ASTM F-75.

Características Generales:

El material seleccionado fue una aleación ASTM F-75 de cromo-cobalto utilizada ampliamente en implantes ortopédicos, tales como reemplazo total de cadera o artroplastia de rodilla, así como en los rodamientos metal-metal en la artroplastia total de cadera. La característica de las aleaciones es que tienen una mediana resistencia y rigidez combinada con una alta resistencia a la corrosión y una muy buena biocompatibilidad.

Características principales del material:

- Buena compatibilidad biomédica.
- Alta resistencia al desgaste.
- Excelente resistencia a la corrosión.
- Buena maquinabilidad.
- Alta resistencia mecánica.

Aplicaciones:

1. Implantes ortopédicos de rodillas, cadera y femorales.
2. Prótesis.
3. Aplicaciones aeroespaciales [34].

Composición química.

Tabla5.- Composición química material ASTM F-75 [34].

	Material base balanceado.	Requerimiento ASTM Balanceado.
Cobalto, Co		
Cromo, Cr	28,5%	27-30%
Molibdeno, Mo	6%	5-7%
Carbon, C	0,3%	Max 0,35%
Hierro, Fe	0,2%	Max 0,75%
Nickel, Ni	0,25%	Max 0,5%
Manganeso, Mn	0,5%	Max 1%
Silicon, Si	0,7%	Max 1%
Nitrogeno, N	0,15%	Max 0,25%
Tungsteno, W	0,01%	Max 0,2%
Fosforo, P	0,01%	Max 0,02%
Azufre, S	0,005%	Max 0,01%
Aluminio, Al	0,05%	Max 0,1%
Titanio, Ti	0,01%	Max 0,1%

Figure 6.2.1.1. Chemical composition of titanium alloy Ti-6Al-4V.

Piezas para experimentación.

Toda la experimentación fue realizada en piezas en forma de anillo de material ASTM F-75 (Figura 6.1 y 6.2). En estas se aprecia las dimensiones y la geometría de los anillos del material.



Figura 6.1.- Fotografía de los anillos.

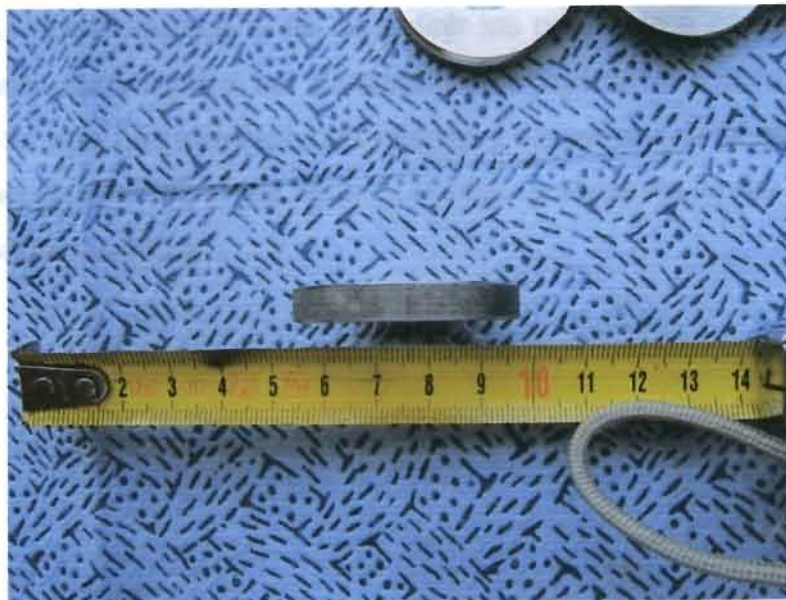


Figura 6.2.- Fotografía del espesor de los anillos.

Microestructura.

Las Figura 6.3 y 6.4 muestran las micrografías, de los anillos de material ASTM F-75, obtenidas en el microscopio óptico a 50 y 500X.

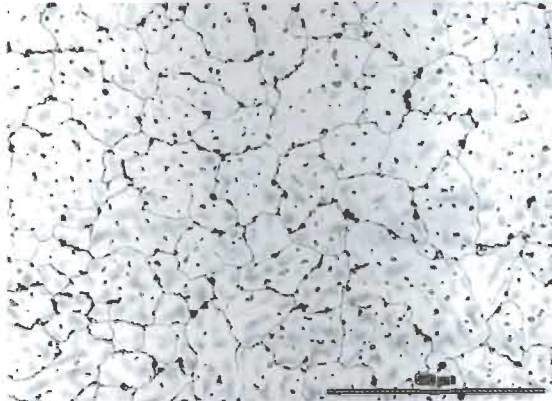


Figura 6.3.- Microestructura a 50x.

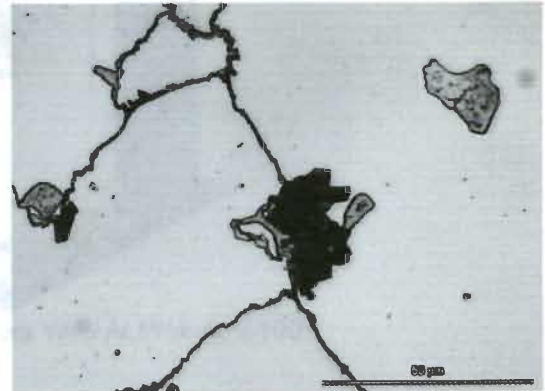


Figura 6.4.- Microestructura a 500x.

6.1.2.- EQUIPO DE SOLDADURA LÁSER ND-YAG.

Para llevar a cabo la aplicación del haz de láser se empleó el equipo ALPHA ALV 100, (Figura 6.5). En este equipo se realizaron 4 pruebas con diferentes condiciones, lo anterior con el fin de definir los parámetros convenientes para un tratamiento superficial y así posteriormente aplicar el tratamiento para la reparación de una pieza defectuosa interna y superficialmente. Así mismo se hicieron pruebas con diferentes tipos de configuraciones de juntas de soldadura a tope, traslape y costura.



Figura 6.5.- Equipo de soldadura YAG ALPHA ALV 100.

Información técnica.

Cristal de láser: Nd: YAG, 1064 nm.	Potencia Máxima promedio: 100W.
Potencia pico del pulso: 9Kw.	Duración de pulso: 0,5-20ms.
Frecuencia de pulso: 20Hz un solo pulso	Diámetro de spot: 0,2-2,0mm.
Sistema óptico: 15x de magnificación.	Peso: aprox. 200Kg.
Conexión eléctrica: 200 – 240 / 50 a 60Hz / 10A.	
Opcional: 115v / 60Hz /16A.	

6.2.- APLICACIÓN DE LA SOLDADURA.

En esta sección se exhiben los resultados arrojados después de realizar cuatro soldaduras con distintos parámetros, La Figura 6.6 muestra las características superficiales de los 4 cordones. La Figura 6.7 fue tomada después de un corte transversal a la pieza y montaje en una probeta metalografica, esta imagen muestra la geometría interna de los cordones de soldadura.

270		
310		
235		
200		
Tamaño - Parámetro	Corte Long	Probeta

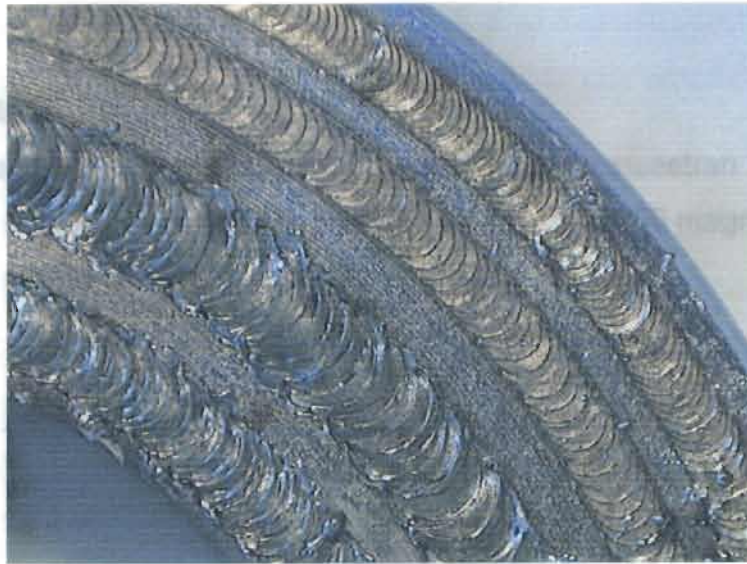


Figura 6.6.- Fotografía tomada en superficie de la pieza.

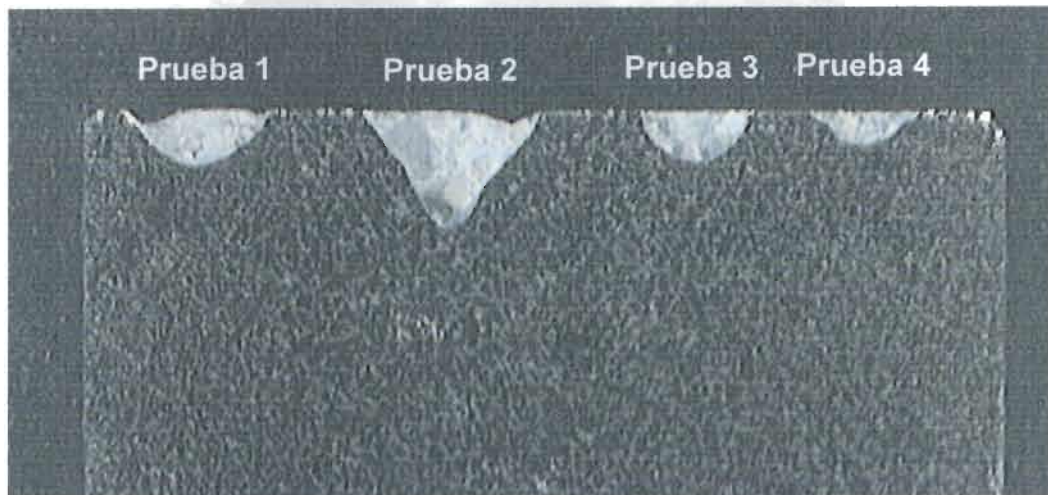


Figura 6.7.- Corte transversal de pruebas sometidas a análisis.

Los parámetros de cada una de las pruebas están exhibidos en la siguiente tabla (Tabla 6):

# de prueba	Voltaje (v)	Duración del pulso (ms)	Frecuencia (Hz)	Potencia (kW)
Prueba 1	270	52	42	29
Prueba 2	310	6	42	4
Prueba 3	235	5	5	2
Prueba 4	200	4	6	12

Tabla6.- Parámetros para cada una de las pruebas.

Prueba 1.

Microestructura

En las figuras siguientes (Figura 6.8 y Figura 6.9) se muestran fotografías tomadas a la microestructura en la prueba 1, la primera a 50 magnificaciones y la segunda a 500 magnificaciones.



Figura 6.8.- Microestructura de Prueba 1 a 50X.

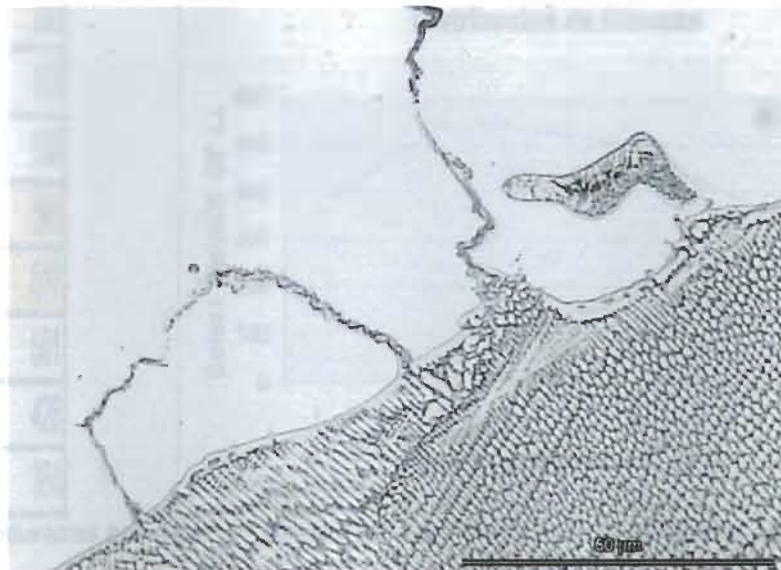


Figura 6.9.- Microestructura correspondiente a las condiciones 1 a 500X.

En la Figura 6.8 se observa casi por completo el material que fue fundido durante la exposición al haz de láser, el cual tiene las siguientes dimensiones:

Penetración= 0.550mm.

Ancho del cordón= 1.58mm.

Figura 6.8

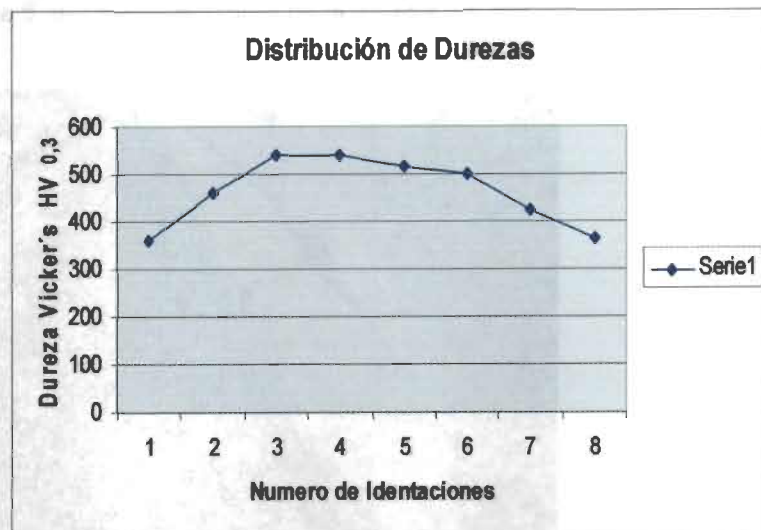
La Figura 6.9 muestra la región entre el material fundido, la zona afectada por el calor y el metal base a 500X. En esta figura se observa que la zona que se fundió a causa del efecto del haz de láser sufrió una recristalización, la cual originó un refinamiento de grano a debido a un enfriamiento muy rápido. Además se ve que la zona afectada por el calor es prácticamente inexistente, lo cual es una de las características del proceso de soldadura por rayo láser.

Microdureza

La gráfica 10 muestra la distribución de microdurezas. Las indentaciones fueron colocadas comenzando en el metal base, pasando por la zona fundida y terminando en el metal base. La Tabla7 expone los valores de microdureza en vickers. Las indentaciones fueron colocadas a una profundidad de 0.250mm.

1	360
2	462
3	540
4	541
5	517
6	501
7	426
8	364

Tabla7.- Microdurezas prueba1.



Gráfica10.- Distribución de microdurezas en prueba 1.

Figura 6.11

(En Hv con 0.3kg de carga).

Con los resultados obtenidos es fácil deducir que el efecto del haz de láser en este material ASTM F-75 es de elevar la dureza, a mayor grado en zonas cercanas al centro de la soldadura.

Resultados de prueba 2.

Microestructurales.

En las siguientes figuras (6.10 y 6.11) se muestran micrografías tomadas de la estructura de la muestra sometida a las condiciones 2 (Tabla 6).

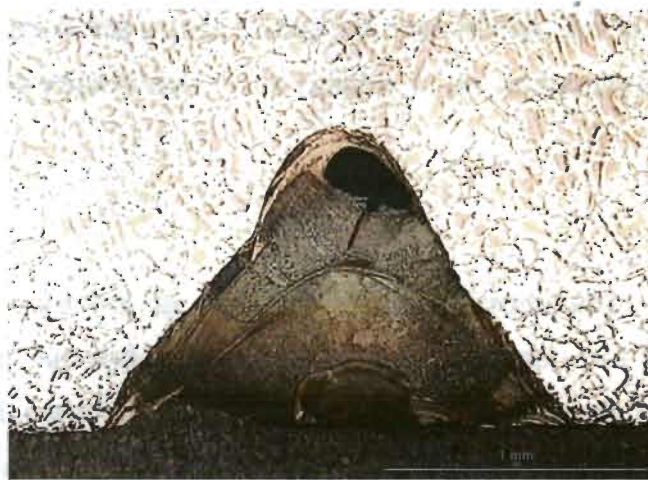


Figura 6.10.- Microestructura de la prueba 2 a 25x.

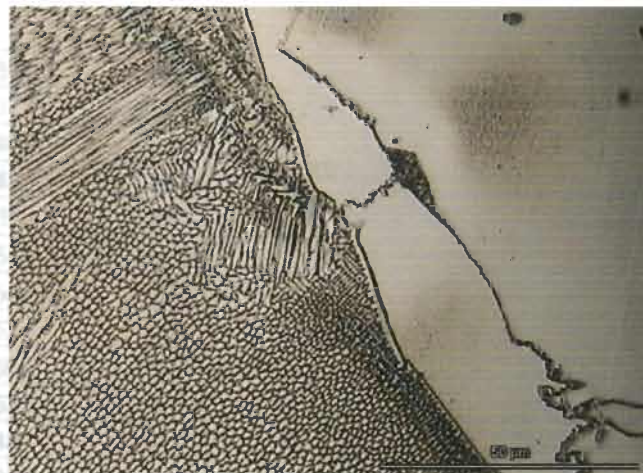


Figura 6.11.- Microestructura de la prueba 2 a 500x.

En la Figura 6.10 se observa toda la zona que fundió debido al efecto del haz de láser, la cual tiene las siguientes dimensiones:

Penetración= .1.66mm.

Ancho del cordón= 2.05mm.

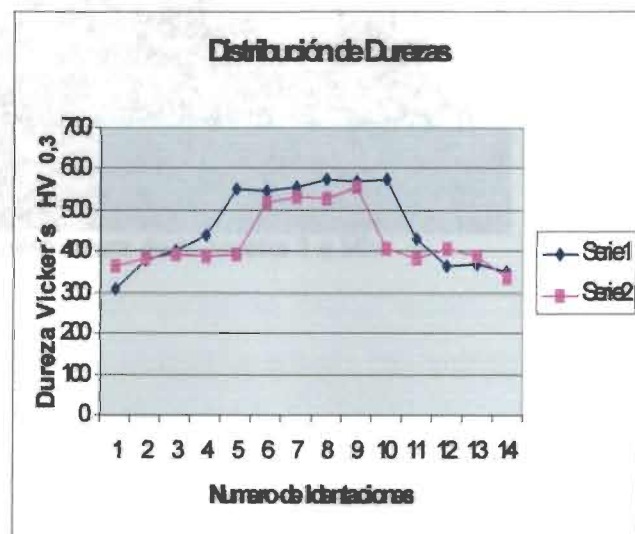
Con los parámetros utilizados en la prueba 2 creció la penetración del material, esto se debe principalmente a que se incrementó el voltaje (ver Figura 5.15) y por consecuencia la potencia del haz láser, además hubo un incremento en la duración del pulso lo cual también provoca una mayor fundición del material (ver Figura 5.16) y una soldadura mas ancha. En la Figura 6.11 se ve que ha ocurrido lo mismo que en la prueba 1, un refinamiento de grano y una ZAC muy estrecha.

Microdureza.

La gráfica11 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. La Tabla8 muestra los valores de microdureza en vickers. En este caso se colocaron dos líneas de indentaciones las cuales fueron ubicadas a una profundidad de .200 mm y .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

Tabla8.- Microdurezas prueba2.



Gráfica 11.- Distribución de microdurezas en prueba 2. (En Hv con 0.3kg de carga).

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.

Prueba 3.

Microestructura

Las siguientes micrografías (Figura 6.12 y 6.13) muestran la microestructura derivada del uso de los parámetros en la prueba 3 (ver Tabla6).



Figura 6.13.- Microestructura de la prueba 3 a 50x

zona fundida
el grano acuminado



Figura 6.14.- Microestructura de la prueba 3 a 200x

En la Figura 6.13 se observa toda la zona que fundió debido al efecto del haz de láser, la cual tiene las siguientes dimensiones:

Penetración= 0.490mm.

Ancho del cordón= 1.22mm.

Con la disminución en los parámetros con respecto a los utilizados en la prueba 2 se redujo la penetración del material, esto se debe principalmente a un menor voltaje (Figura 5.15) y por consecuencia la potencia del haz láser disminuye. Además hubo un decremento en la duración del pulso lo cual causa disminución del calor de entrada, el ancho y el volumen de la zona fundida en el cordón de soldadura.

La Figura 6.14 muestra la interfase entre el metal base, ZAC (casi inexistente) y zona fundida. Se observa el mismo efecto de recristalización y refinamiento de grano ocurridos en las pruebas 1 y 2.

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 12). Las indentaciones fueron colocadas a una profundidad de .250mm y los valores de cada una de ellas están expresados en la Tabla9.

1	377
2	406
3	543
4	606
5	577
6	568
7	459
8	310

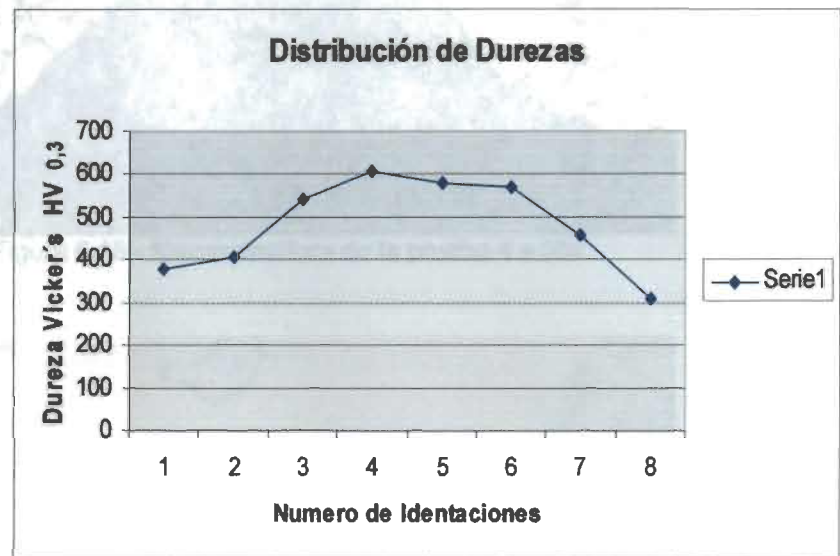


Tabla9.- Microdurezas prueba3. Gráfica 12.- Distribución de microdurezas en prueba 3. (En Hv con 0.3kg de carga).

Prueba 4

Microestructura

En las siguientes, figura 6.15 y 6.16, se observa la microestructura consecuente del uso de los parámetros de la prueba 4 (ver Tabla 6).



Figura 6.15.- Microestructura de la prueba 4 a 50x.

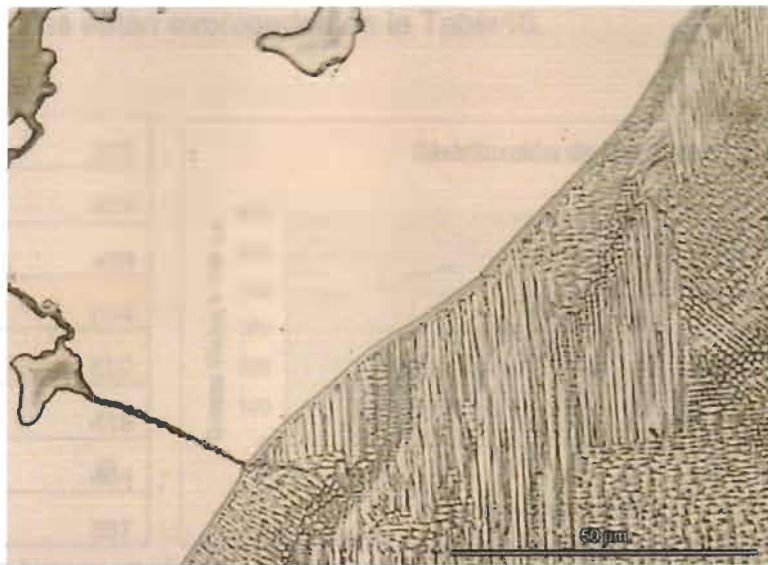


Figura 6.16.- Microestructura de la prueba 4 a 500x.

En la figura 6.15 se ve en su totalidad la zona fundida durante la soldadura
cuyas dimensiones son:

Penetración= 0.320mm.

Ancho del cordón= 1.13mm.

Los parámetros utilizados durante la prueba 4 han conseguido muy poca penetración en el material, debido a la baja en el voltaje y duración del pulso. El volumen y ancho de la zona fundida disminuyó debido a las mismas razones.

La región se ve muy similar en cada una de las pruebas realizadas con este equipo de soldadura láser, se observa claramente un refinamiento de grano consecuente de una recristalización a un enfriamiento muy brusco (Figura 6.16).

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 (gráfica 13). Las indentaciones fueron colocadas a una profundidad de 0.250mm y los valores de cada una de ellas están expresados en la Tabla 10.

1	373
2	427
3	459
4	504
5	507
6	418
7	404
8	387

Tabla 11.- Microdurezas prueba 4.



Gráfica 13.- Distribución de microdurezas en prueba 4. (En Hv con 0.3kg de carga).

6.3.- 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 6.17).



Figura 6.17.- Superficie después de la aplicación de el tratamiento superficial.

En la Figura 6.17 se 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: 260v

Duración del pulso: 4.2ms

Frecuencia: 6Hz

Potencia: 2.6KW

La figura 6.18 muestra una sección transversal de la zona interesada al tratamiento de la superficie mediante láser.

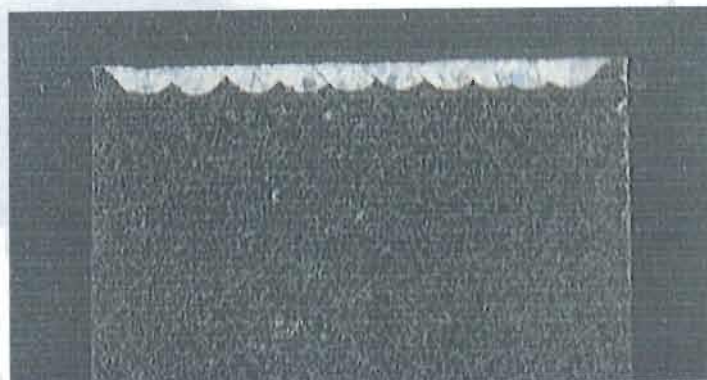


Figura 6.18. Sección trasversal del tratamiento superficial.

En la Figura 6.18 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 0.500mm, menor con respecto a la de la prueba 1 (ver Figura 6.8), ya que la diferencia de parámetros es relativamente poca entre la prueba 1 y el tratamiento superficial.

Microestructura.

La microestructura después del tratamiento superficial estuvo sometida a una velocidad de enfriamiento elevada, la cual es una de las características usuales en las soldaduras con rayo láser, el enfriamiento tan brusco causo una recristalización en la zona solidificada y además un refinamiento de grano.

En la siguiente figura se observa la diferencia de tamaño de grano entre la zona fundida y el metal base (Figura 6.19).



Figura 6.19.- Microestructura en interfase entre metal base, ZAC y zona fundida a 500x.

Se observa claramente que la franja de la zona afectada por el calor ZAC es muy pequeña lo cual es característico en procesos de soldadura por rayo láser.

7.

Conclusiones.

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 afecta a 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 potencia, para tener un control absoluto en el calor de entrada del proceso.

8.

Referencias

- 1) www.revista.robotiker.com/revista/articulo.do
- 2) www.servilaserplus.com/serv_teoria_pag03.html
- 3) Paolo Villoresi, Introducción a las aplicaciones del láser: interacción luz-materiales y su explotación industrial.
- 4) C. b. reed, k. natesan, z. xu, and d. l. smith, The effect of laser welding process parameters on the mechanical and microstructural properties of v-4cr-4ti structural materials
- 5) Gould, R. Gordon (1959). "The LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", in Franken, P.A. and Sands, R.H. (Eds
- 6) LaserReference.com. Retrieved on 2008-05-15.
- 7) David Brown Manufacturing Technologies Rofin-Baasel, 'The Bench', Magazine Fall Issue, 2003 Laser Welding Basic Primary Adjustable Welding Parameters.
- 8) M. Qian and J.N. DuPont Medical, Devices Montevideo, URUGUAY, optimización y monitoreo del proceso de soldadura láser de la envolvente de titanio de dispositivos médicos implantables.
- 9) Carl B. Miller, U.S. laser corporation. John F Ready, Industrial Applications of Lasers (New York City: Academic Press, 1997). Laser Welding article.
- 10) John F Ready (Orlando, FL: Laser Institute of America, Magnolia Publishing, 2001), LIA Handbook of Laser Materials Processing.
- 11) V.Aboites, Laseres, una introduccion..

- 12) www.fascination-of-light.net/campana/exibicion/el-laser/principio-basico-del-laser-3
- 13) R. K. Singh Raman and J. B. Gyanamoorthy: *J. Mater. Sci.*, 27 (1992), 3435.
- 14) S. David, J. Vitek and T. Hebble: *Weld. J.*, 66 (1987), No. 10, 289s
- 15) K. Nishimoto, *Weld. Int.*, 6 (1992), No. 11, 848.
- 16) R. K. Singh Raman, A. K. Khanna, B. K. Choudhary and J. B. Gyanamoorthy: *Mater. Sci. Eng.*, A148 (1991), 299.
- 17) V. Shida, N. Ohtsuka, J. Murayama and N. Fujikawa: Proc. JIMIS-3, High Temperature Corrosion, *Trans. Jpn. Inst. Met.*, 63 (1983), 631.
- 18) J. Foct. Ahendry, Institute of Metals & Science Francaise de Metallurgie and Held Liffle in France, The Institute of Metals London, (1988), 63.High Nitrogen Steels,
- 19) A. M. Meyer and M. du Toit: Welding Research Supplement, AWS & WRC, (1996), 185.
- 20) Munitz A, Cotler C, Stern A, Kohn G. Mechanical properties and microstructure of gas tungsten arc welded magnesium AZ91D plates. *Mater Sci Eng Abstr* 2001;302:68-73.
- 21) Chi CT, Chao CG, Liu TF, Lee CH. Aluminum element effect for electron beam welding of similar and dissimilar Magnesium-aluminum-zinc alloys. *Scr Mater* 2007;56:733-6
- 22) Sindo Kou. *Welding metallurgy*. (second edition). New Jersey: John Wiley & Sons; 2003.
- 23) Czerwinski F, The oxidation behaviour of an AZ91Dmagnesium alloy at high temperatures. *Acta Mater* 2002; 50:2639-54.
- 24) P. W. Fuerschbach and G. R Eisler. Effect of laser spot weld energy and duration on melting and absorption
- 25) BY J. XIE, *Weld Morphology and Thermal Modeling in Dual-Beam Laser Welding*
- 26) Quan, Z.H. Chen, X.S. Gong, Z.H. Yu, Effects of heat input on microstructure and tensile properties of laser welded magnesium alloy AZ31.
- 27) G. Tani, A. Ascari *, G. Campana, A. Fortunato A study on shielding gas contamination in laser welding of non-ferrous alloys.

- 28) D. Grevey, P. Sallamand, E. Cicala, S. Ignat, Opt. Laser Technol. 37 (8) (2005) 647–651.
- 29) A. Ancona, T. Sibillano, L. Tricarico, R. Spina, P.M. Lugara, G. Basile, S. Scchiavone, J. Mater. Process. Technol. 164–165 (2005) 971–977.
- 30) B.G. Chung, S. Rhee, C.H. Lee, Mater. Sci. Eng. A 272 (2) (1999) 357–362
- 31) G. Tani, G. Campana, A. Fortunato, A. Ascari, Appl. Surf. Sci. 253 (2007) 8050–8053.
- 32) G. Campana, A. Fortunato, M. Lollini, G. Tani, L. Tomesani, The role of assistant gas nozzle in laser cutting, in: Proceedings of the XVI International Conference AIV 2002, Catania, October 7–9, (2002), pp. 279–282.
- 33) Sisir Kumar SAMANTA, Swapan Kumar MITRA and Tapan Kumar PAL, Influence of Welding Speed on Microstructure and Oxidation Behaviour of Laser Welded Austenitic Stainless Steels,
- 34) Arcam ebm System. ASTM cobalt chrome alloy. Cad to a metal.

8.

LISTA DE FIGURAS

Figuras.

- Figura 5.1.-** Proceso de soldadura por rayo láser (LBW).
- Figura 5.2.-** Esquema de funcionamiento soldadura por rayo láser de estado sólido YAG
- Figura 5.3.-** Movimiento de los electrones al ser excitados
- Figura 5.4.-** Soldadura por rayo láser CO₂.
- Figura 5.5.-** Parámetros y variables importantes durante la aplicación de soldadura láser.
- Figura 5.6.-** Porosidad por evaporación.
- Figura 5.7.-** Falta de penetración en el material
- Figura 5.8.-** Salpicaduras en soldadura.
- Figura 5.9.-** Soldadura con falta de fusión en superficie.
- Figura 5.10.-** Agrietamiento longitudinal en soldadura.
- Figura 5.11.-** Socavamiento en una soldadura láser.
- Figura 5.12.-** Especímenes cortados de la placa de 6x6x6mm.
- Figura 5.13.-** Microestructura obtenida con microscopio electrónico de barrido (SEM) de 316L a una velocidad de (a) 11.66mm/seg. y (b) 25mm/seg.
- Figura 5.14.-** Microestructura obtenida con microscopio electrónico de barrido (SEM) de 316LN a una velocidad de (c) 15mm/seg. y (d) 16.66mm/seg.
- Figura 5.15.-** Efecto del voltaje en la soldadura láser.
- Figura 5.16.-** Efecto de la duración del pulso en la soldadura láser.
- Figura 5.17.-** Efecto del ancho de spot en la soldadura láser.

- Figura 5.18.-** Efecto de la variación de los 3 parámetros.
- Figura 5.19.-** Efecto de calor entrada a diferentes condiciones establecidas en la macroestructura de una aleación de magnesio. a) 19.2 J/mm, b) 21.6 J/mm, c) 24 J/mm, d) 24 J/mm, e) 27 J/mm, f) 30 J/mm, g) 32 J/mm, h) 36 J/mm y i) 40 J/mm.
- Figura 5.20.-** Micrografías de estructuras de la aleación de magnesio a diferentes calores de entrada: a) 19.2 , b) 21.6 , c) 24 , d) 24 , e) 27 , f) 30, g) 32 , h) 36 y i) 40 J/mm.
- Figura 5.21.-** Tamaño de la banda de granos columnares.
- Figura 5.22.-** Distribución de los precipitados.
- Figura 5.23.-** Penetración en función de Inclinación del plasma.
- Figura 5.24.-** Ángulo de boquilla de 0 grados.
- Figura 5.25.-** Ángulo de boquilla 60 grados.
- Figura 5.26.-** Equipo láser CO₂ con una potencia de 6Kw.
- Figura 5.27.-** Distribución de la densidad de poder haz de láser doble.
- Figura 6.1.-** Fotografía de los anillos.
- Figura 6.2.-** Fotografía del espesor de los anillos
- Figura 6.3.-** Microestructura a 50x.
- Figura 6.4.-** Microestructura a 500x.
- Figura 6.5.-** Equipo de soldadura YAG ALPHA ALV 100.
- Figura 6.6.-** Fotografía tomada en superficie de la pieza.
- Figura 6.7.-** Corte transversal de pruebas sometidas a análisis.
- Figura 6.8.-** Microestructura de Prueba 1 a 50X.
- Figura 6.9.-** Microestructura correspondiente a las condiciones 1 a 500X.
- Figura 6.10.-** Microestructura de la prueba 2 a 25x.
- Figura 6.11.-** Microestructura de la prueba 2 a 500x.
- Figura 6.13.-** Microestructura de la prueba 3 a 50x.
- Figura 6.14.-** Microestructura de la prueba 3 a 200x.
- Figura 6.15.-** Microestructura de la prueba 4 a 50x.
- Figura 6.16.-** Microestructura de la prueba 4 a 500x
- Figura 6.17.-** Superficie después de la aplicación de el tratamiento superficial.

Figura 6.18.- Características internas del tratamiento superficial.

Figura 6.19.- Microestructura en interfase entre metal base, ZAC y zona fundida a 500x.

LISTA: Distribución de

Tablas.

Tabla 1.- Composición química de dos tipos de acero inoxidable.

Tabla 2.- Parámetros empleados en el caso de estudio.

Tabla 3.- Parámetros empleados para análisis del calor de entrada.

Tabla 4.- Resultados de la prueba de tensión.

Tabla 5.- Composición química material ASTM.

Tabla 6.- Parámetros para cada una de las pruebas.

Tabla 7.- Microdurezas prueba1.

Tabla 8.- Microdurezas prueba2.

Tabla 9.- Microdurezas prueba3.

Gráficas.

Gráfica 1.- Porcentaje de ferrita con respecto a la velocidad de avance.

Gráfica 2.- Ganancia de masa de óxidos por área con respecto al incremento de la velocidad de avance.

Gráfica 3.- Espectro de EDX obtenido sobre la zona de la soldadura (a) 11.66 mm/seg y (b) 25 mm/seg.

Gráfica 4.- Gradiente de temperatura con respecto al crecimiento dendrítico.

Gráfica 5.- Intensidad de energía contra penetración.

Gráfica 6.- Influencia de la inclinación del ángulo de la boquilla.

Gráfica 7.- Influencia del caudal del gas (argón).

Gráfica 8.- Influencia del caudal del gas (helio).

Gráfica 9.- Influencia de la densidad del gas de protección.

Gráfica10.- Distribución de microdurezas en prueba 1 (en Hv con 0.3kg de carga).

Gráfica 11.- Distribución de microdurezas en prueba 2(en Hv con 0.3kg de carga).

Gráfica 12.- Distribución de microdurezas en prueba 3(en Hv con 0.3kg de carga).

Gráfica13.- Distribución de microdurezas en prueba 4(en Hv con 0.3kg de carga).