

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ESTUDIO DEL PROCESO DE SOLDADURA EN FRIO POR MICRO LASER
CLADDING APLICADO EN LA RECUPERACIÓN DE COMPONENTES EN
ACEROS GRADO HERRAMIENTA D2**

POR

ING. CHRISTIAN GERARDO GALINDO SAMANIEGO

MONOGRAFÍA

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

SALTILLO, COAHUILA. 24 DE JUNIO DE 2016

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ESTUDIO DEL PROCESO DE SOLDADURA EN FRIO POR MICRO LASER
CLADDING APLICADO EN LA RECUPERACIÓN DE COMPONENTES EN
ACEROS GRADO HERRAMIENTA D2**

POR

ING. CHRISTIAN GERARDO GALINDO SAMANIEGO

MONOGRAFÍA

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

SALTILLO, COAHUILA. 24 DE JUNIO DE 2016

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales
Gerencia de Desarrollo Humano**

División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía “ESTUDIO DEL PROCESO DE SOLDADURA EN FRIO POR MICRO LASER CLADDING APLICADO EN LA RECUPERACIÓN DE COMPONENTES EN ACEROS GRADO HERRAMIENTA D2”, realizada por el alumno (a) **CHRISTIAN GERARDO GALINDO SAMANIEGO**, con número de matrícula **15ES-204** sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial


Dra. Gladys Yerania Pérez Medina

Tutor Académico


M.C. Alvaro Aguirre Sánchez

Tutor en Planta


Dr. Felipe de Jesús García Vázquez

Asesor


Vo.Bo.


Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés

Coordinador de Posgrado

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales
Gerencia de Desarrollo Humano
División de Estudios de Posgrado

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de especialización del alumno **CHRISTIAN GERARDO GALINDO SAMANIEGO**, una vez leída y revisada la Monografía titulada “**ESTUDIO DEL PROCESO DE SOLDADURA EN FRIO POR MICRO LASER CLADDING APLICADO EN LA RECUPERACIÓN DE COMPONENTES EN ACEROS GRADO HERRAMIENTA D2**”, aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 24 días del mes de junio del año 2016.



Dr. Francisco Fernando Curiel López

Presidente



Dra. Rocío Saldaña Garcés

Secretario



Dra. Gladys Yerania Pérez Medina

Vocal

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer infinitamente a mi segunda alma mater, la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales a la cual no llegaría a terminar de agradecer por tantas enseñanzas, capacitación, experiencia y sobre todo por darme la oportunidad de conocer a personal de alto nivel tanto técnico como científico, ya que gracias esto he podido desarrollarme profesionalmente.

Gracias a todas la personas con las que conviví en cuestión tanto de trabajo, como de estudio, ya que no alcanzaría a nombrar a todas las excelentes personalidades que he conocido durante mi estancia en esta magnífica institución.

Gracias por hacerme portar con orgullo aquella camisa blanca con el símbolo de transferencia de tecnología, la recordare con cariño. A todos aquellos que me dieron la oportunidad de cursar la especialidad y confiaron en mí, al Dr. Carlos Vera Mendoza, Dr. Jorge Leobardo Acevedo Dávila, Dr. Fernando Macías López y Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés, gracias por todo su apoyo.

Además quisiera expresar mi gratitud a los miembros de mi comité tutorial, ya que gracias a ellos se logró consolidar este proyecto, la Dra. Gladys Yerania Pérez Medina, Dr. Felipe de Jesús García Vázquez, M.C. Álvaro Aguirre Sánchez, ya que sin su asesoría no hubiese podido estructurar esta monografía.

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a todas las personas que estuvieron siempre directa e indirectamente conmigo para realizarlo, ya que siempre sentí su apoyo cerca de mí, principalmente a Dios que me dio la sabiduría y perseverancia para concluir con éxito este desafío, a mis padres que siempre me apoyaron moralmente para desarrollar este proyecto, a mi novia que estuvo a mi lado en noches de desvelo por estudio, a mis hermanas para que lo tomen como un ideal y se formen con un nivel académico mayor al que hoy obtengo, a mis abuelos que siempre he tenido su mano firme durante mi camino y a los cuales admiro como pilares de la familia, en especial a mi acaecido abuelo el Profesor. Francisco Raúl Samaniego Rodríguez, ya que fue un pilar en el desarrollo profesional y académico de muchas generaciones. Me hubiera gustado mucho que viera al profesionalista que formó, por lo que esta monografía se lo dedico con gran amor y cariño, a él.

INDEX

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES	i
CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES	ii
Corporación Mexicana de Investigación en Materiales.....	iii
Corporación Mexicana de Investigación en Materiales.....	iv
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA	vi
SÍNTESIS	1
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 Antecedentes	2
1.2 Objetivo general	5
1.2.1 Objetivos Específicos.....	5
1.3 Justificación.....	6
1.4 Planteamiento del problema	6
1.5 Aportación tecnológica	7
1.6 Alcance	7
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	8
2.1 Clasificación de los aceros	8
2.2 Aceros grado herramienta	9
2.2.1 Clasificación de los aceros grado herramienta	10
2.2.2 Aceros grado herramienta AISI D.....	12
2.2.3 Composición química en aceros grado herramienta AISI D	13
2.2.4 Propiedades otorgadas por la composición química en aceros grado herramienta AISI D	13
2.2.5 Propiedades mecánicas del acero D2	14
2.2.6 Aplicaciones de los aceros D2 en la industria.....	16
2.3 Procesos de soldadura utilizados en los aceros D2	17
2.3.1 Proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW, Shielding Metal Arc Welding).....	18
2.3.2 Proceso de soldadura por arco eléctrico con gas tungsteno (GTAW, Gas Tungsten Arc Welding).....	19
2.3.3 Proceso de soldadura por arco sumergido (SAW, Sumerged Arc Welding)	20
2.3.4 Proceso de soldadura por láser (LW).....	21
2.3.4.1 Definición general	21

2.3.4.2 Principios del funcionamiento.....	22
2.3.4.3 Láser de estado sólido Nd:YAG	23
2.3.4.4 Ventajas del proceso láser	24
2.3.4.5 Limitaciones del proceso láser	24
2.3.4.6 Aplicaciones generales del proceso láser.....	25
2.3.5 Modos de aplicación láser para recubrimientos.....	26
• 2.3.5.1. Build Up	26
• 2.3.5.2 Buttering	26
• 2.3.5.3 Hard Facing.....	26
• 2.3.5.4 Cladding.....	26
2.3.6 Calidad de las uniones soldadas.....	29
CAPÍTULO 3. DISCUSIÓN Y REVISIÓN DE ARTÍCULOS DEL PROCESO CLADDING LASER EN ACEROS GRADO HERRAMIENTA	30
3.1 Elementos de aleación encontrados en recubrimientos.....	30
3.2 Variables esenciales en el proceso cladding.....	31
CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO	33
4.1 Metodología	33
4.2 Metal de aporte	35
4.2.1 Características químicas y mecánicas del material de aporte.....	35
4.3 Parámetros	37
4.4 Cálculo de calor de entrada.....	37
4.5 Inspección de calidad mediante ensayos no destructivos (NDT)	37
4.5.1 Inspección visual (VT).....	38
4.5.2 Líquidos penetrantes (PT).....	39
4.5.3 Partículas magnéticas (MT)	39
4.6 Perfil de dureza	40
4.7 Técnica de caracterización macroscópica.....	41
4.8 Técnica de caracterización microscópica.....	41
CAPÍTULO 5. RESULTADOS.....	42
Inspección visual (VT)	42
Líquidos penetrantes (PT)	43
Partículas magnéticas (MT).....	44
Caracterización Macroscópica.....	45
Tamaño de los cordones	45
Identificación de ZAC's, revelado de indicaciones y medición de dilución	45
Cordón 1	46

Cordón 2	47
Cordón 3	48
Cordón 4	49
Cordón 5	50
Caracterización microscópica y perfil de dureza vickers (HV).....	51
Cordón 1	52
Cordón 2	54
Cordón 3	56
Cordón 4	58
Cordón 5	60
CONCLUSIONES	62
BIBLIOGRAFÍA	65
ÍNDICE DE FIGURAS	67
ÍNDICE DE TABLAS	69
ÍNDICE DE ECUACIONES	70
ÍNDICE DE GRAFICAS	70
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO	71

SÍNTESIS

Esta monografía está basada en el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas que se obtienen durante la aplicación de soldadura, mediante laser cladding (LW, por sus siglas en ingles) en la recuperación de componentes sobre aceros herramentales; D2 como metal base y H13 como aporte, en el cual se busca la obtención de los parámetros óptimos para dicha aplicación.

Los resultados fueron obtenidos mediante ensayos no destructivos en los cuales fueron evaluados todos los cordones de soldadura, y solo el denominado como el cordón número 2 presentó una excelente apariencia y penetración; esto debido a los parámetros utilizados, con lo que se logró visualizar una soldadura con excelente refuerzo y dilución, además de presentar zonas afectadas por calor muy angostas.

Con esto se logrará establecer procedimientos para la aplicación de dichas soldaduras, procedimientos para la inspección y evaluación de las mismas, ya que no es un proceso convencional de soldadura, por lo que existe un amplio campo de estudio.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En la industria del conformado de metales como el estampado, laminado y prensado, en donde se procesan configuraciones y figuras complejas por corte, desgarre o arranque de viruta, se utilizan metales con propiedades distintas a otros convencionales tales como: alta resistencia a la fatiga, a la fractura, al esfuerzo, al impacto, a la corrosión y con una elevada dureza, sin llegar a reducir su resistencia, al cual le confiere que el componente jamás sea fracturado, rasgado o penetrado por su producto final, con esto se cerciora incrementar la vida remanente del mismo

Por lo general estos componentes de acero están sometidos a esfuerzos cortantes y cargas cíclicas constantemente los cuales tienen que soportar para realizar su operación y funcionalidad diaria. (1)

Por las mismas propiedades que tienen estos componentes, son extremadamente costosos y difíciles de remplazar, lo más conveniente en caso que llegase a sufrir algún agrietamiento, desgarre o desprendimiento superficial,

se recomienda una reparación in-situ del mismo. Esto sería el recurso más fácil, rápido y menos costoso en el cual se puede continuar con la funcionalidad del equipo. Ya que dependiendo del tipo de complejidad de la pieza a reparar es el tiempo que puede demorar su reparación.

Los componentes con las características antes mencionadas son empleados en algunos procesos de fabricación como: elaboración de aceros herramientales, corte, laminado, extruido, rolado, maquinado y forjado o en los que el metal a conformar se le aplica una presión entre dos moldes con una carga uniaxial progresiva y/o de percusión hasta lograr su morfología y acabado final, en los cuales se utilizan prensas hidráulicas de alto tonelaje, tal como se muestra en la Figura 1. 1. Prensa utilizada para el moldeo de piezas con una capacidad de presión de carga de 250 Toneladas uniaxiales. (2)



Figura 1. 1Prensa de 250 Ton de carga para conformado de piezas (Cortesía COMIMSA)

Los moldes, son matrices de acero grado herramienta, los cuales están compuestos por dos partes; la superior en la que se desliza a través de una guía y contiene la forma que se le dará a la figura y la inferior que esta fija, la cual hace la función de corte por prensado, o deformado por flexión.

Estos componentes de acero llamados D2 son utilizados en el conformado de metales debido a sus propiedades físicas, químicas y mecánicas que son exponencial y relativamente más costosos que un acero común, ya que el contenido de elementos de aleación y el proceso para la obtención del mismo es más complejo y los elementos no son convencionales, el cuidado al momento de la fabricación de este es mayor ya que se busca que tenga una formación de fases hipereutectoides y especialmente cuidado en los tratamientos térmicos posteriores para la obtención de sus propiedades mecánicas del material, incrementan el costo significativamente. En la Tabla 1. 1 se muestra una comparativa química con su respectiva dureza del acero grado herramienta D2 contra un acero al carbono convencional. (3)

Tabla 1. 1 Comparativa química y dureza entre un acero grado herramienta D2 y un acero convencional 1045 AISI/SAE (3)

Nomenclatura AISI/SAE	% e. p.									
	C	Mn Max.	Si Max.	Cr	Ni Max.	Mo	W	V Max.	S Max.	Dureza HV
Acero D2	1.4 - 1.6	0.6	0.6	11 - 13	0.3	0.7 - 1.2	-	1.1	0.04	674 - 772
Acero 1045	0.43 - 0.5	0.6 - 0.9	-	-	-	-	-	-	0.04	180

Como se observa en la Tabla 1. 1 existe una gran diferencia entre la composición química y dureza entre ambos materiales, lo cual traerá consigo, el incremento de sus propiedades, las cuales se deberán tomar en cuenta posteriormente para la soldabilidad de los componentes. Ya que las propiedades de la soldadura tendrán que ser similares tanto metalúrgicamente

como de unión, básicamente lo que se busca es encontrar el recubrimiento apropiado para estos tipos de aceros ya que son demasiado complejos en sus propiedades tanto físicas, químicas y mecánicas; cambiar un componente fatigado por servicio con las características mencionadas anteriormente, conlleva a un costo muy elevado, por lo que se recomienda recuperar componentes con recubrimientos de soldadura por láser.

1.2 Objetivo general

Recopilar y analizar información bibliográfica relacionada con la recuperación de componentes de acero grado herramienta D2 por efecto de recubrimientos por el proceso láser cladding con metal de aporte.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Revisión del estado del arte de los recubrimientos cladding por el proceso láser en aceros grado herramienta D2.
- Estudio monográfico de los metales de aporte adecuados para el proceso cladding en aceros herramientales D2.
- Identificar cuáles y cómo afectan los elementos de aleación en la soldadura superficial y qué propiedades le confiere.
- Identificar los parámetros utilizados por este proceso de soldadura para aplicar recubrimientos sin presentar indicaciones.
- Identificar las microestructuras y fases que se puedan llegar a formar durante la soldadura.
- Se experimentará con diversos parámetros para identificar con cuál de ellos se obtienen los mejores resultados.

1.3 Justificación

Se realizará esta monografía con el fin de comprender el funcionamiento de soldadura por láser en recubrimientos para aceros grado herramienta D2, el cual será de gran aporte tecnológico ya que se considera un proceso de soldadura no convencional por lo que se busca establecer parámetros adecuados para la soldadura de recubrimientos con metal de aporte en grados herramentales, ya que estos aceros son considerados relativamente difíciles de soldar por sus características químicas como el carbono equivalente, que permiten la formación de fases nocivas, por lo que sin los cuidados necesarios durante la soldadura se pueden presentar, analizando de esta manera las fases presentes, propiedades otorgadas al acero y los parámetros adecuados para la soldabilidad del mismo.

1.4 Planteamiento del problema

El proceso de manufactura de los componentes grado herramienta, específicamente el acero D2, como se ha mencionado anteriormente, no es un acero común, ya que para su fabricación se requieren múltiples cuidados, por lo que si un componente de alguna máquina llegase a fallar, resultaría mucho muy costoso remplazarlo por otro, por lo que se optó por remediar la falla del componente con un recubrimiento por láser que contenga las mismas características tanto metalúrgicas como las químicas, físicas y las mecánicas para remediar la falla del componente sin tener que remplazarlo por otro y así a su vez reduciendo los costos de éste.

1.5 Aportación tecnológica

Esta monografía determinará si el metal de aporte es el ideal para el metal base, e identificará los parámetros esenciales como potencia, pulso y velocidad de avance, en una sola pasada, con los cuales se podrán establecer los valores necesarios para una buena soldabilidad y dilución del material con el metal de aporte aplicado en aceros con alta dificultad para soldar, además se identificarán y analizarán las fases presentes en esta soldadura superficial por cladding para corroborar las propiedades otorgadas por este proceso no convencional.

1.6 Alcance

Esta monografía estudiará el comportamiento de los recubrimientos por láser cladding en aceros grado herramienta específicamente el D2 por parámetros establecidos y elementos de aleación encontrados en artículos y reportes científicos.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Clasificación de los aceros

Todos los materiales incluyendo a los aceros, deben tener una clasificación la cual les permite delimitarlos en un conjunto de elementos con características similares como se ve en la Figura 2. 1, la cual clasifica los metales ferrosos hasta llegar a los aceros grado herramienta y sus variantes. (3)

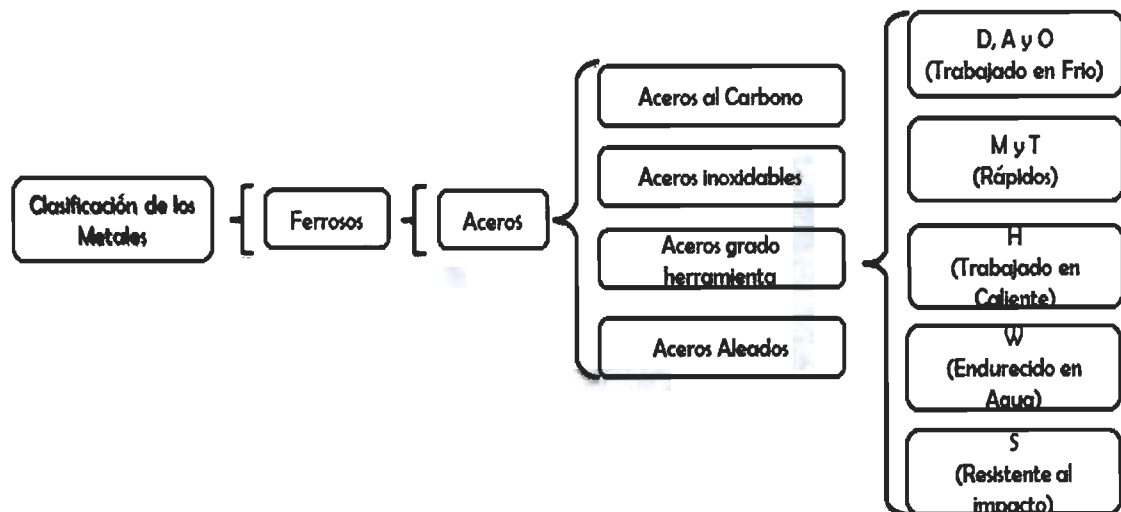


Figura 2. 1 Clasificación de los metales ferrosos (3)

2.2 Aceros grado herramienta

Este tipo de aceros se utiliza para la fabricación de herramientas para corte, formado, estampado y laminado, en el cual este material es parte de un componente o estructura adaptado para un uso bien definido y determinado. Muchos de estos aceros de aleación son también utilizados ampliamente para componentes de maquinaria y aplicaciones estructurales en los que deben realizar una acción en particular sin cambiar sus propiedades por acción de la temperatura, por ejemplo, resortes de alta temperatura, sujetadores de ultra alta resistencia y cojinetes para servicios de alta temperatura. Estos aceros deben proporcionar la capacidad de trabajar en condiciones de altas temperaturas resistiendo al ablandamiento. En el servicio, la mayoría de estos aceros son sometidos a altas cargas de tensión y compresión, aplicadas rápida y simultáneamente, a los cuales deben de soportar esta fatiga un número sin fin de veces sin sufrir desgaste y deformación evitando su fractura.

Estos aceros son principalmente fabricados en hornos de fundición eléctricos para obtener una composición precisa de elementos de aleación, obteniendo un metal limpio y refinado. Además contienen cantidades relativamente grandes de aleantes los cuales le confieren composición que le otorga elevada resistencia, algunos elementos presentes son: tungsteno, molibdeno, vanadio, manganeso y cromo, los que hacen posible cumplir con características antes mencionadas. Algunos de los elementos mencionados los contienen los buriles de desbaste como se observa en la Figura 2. 2 (4)

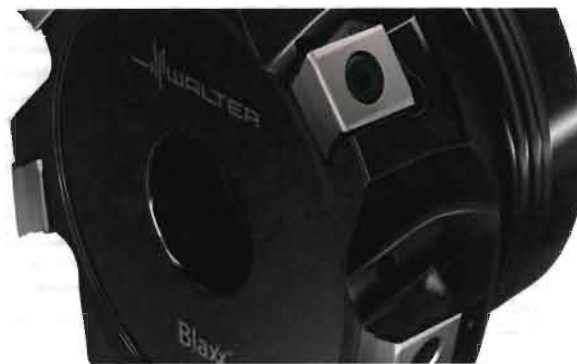


Figura 2. 2 Buril para arranque de viruta de carburo de tungsteno (5)

2.2.1 Clasificación de los aceros grado herramienta

Esta clasificación se toma entre las aleaciones ferrosas de las cuales el objeto de estudio son los de resistencia al desgaste como se muestra en la Figura 2. 3. Esta clasificación de aceros depende de las distintas características como composición, métodos de manufactura, acabado final, forma del producto, desoxidación, microestructura, tratamiento térmico, resistencia y calidad del producto. (3)

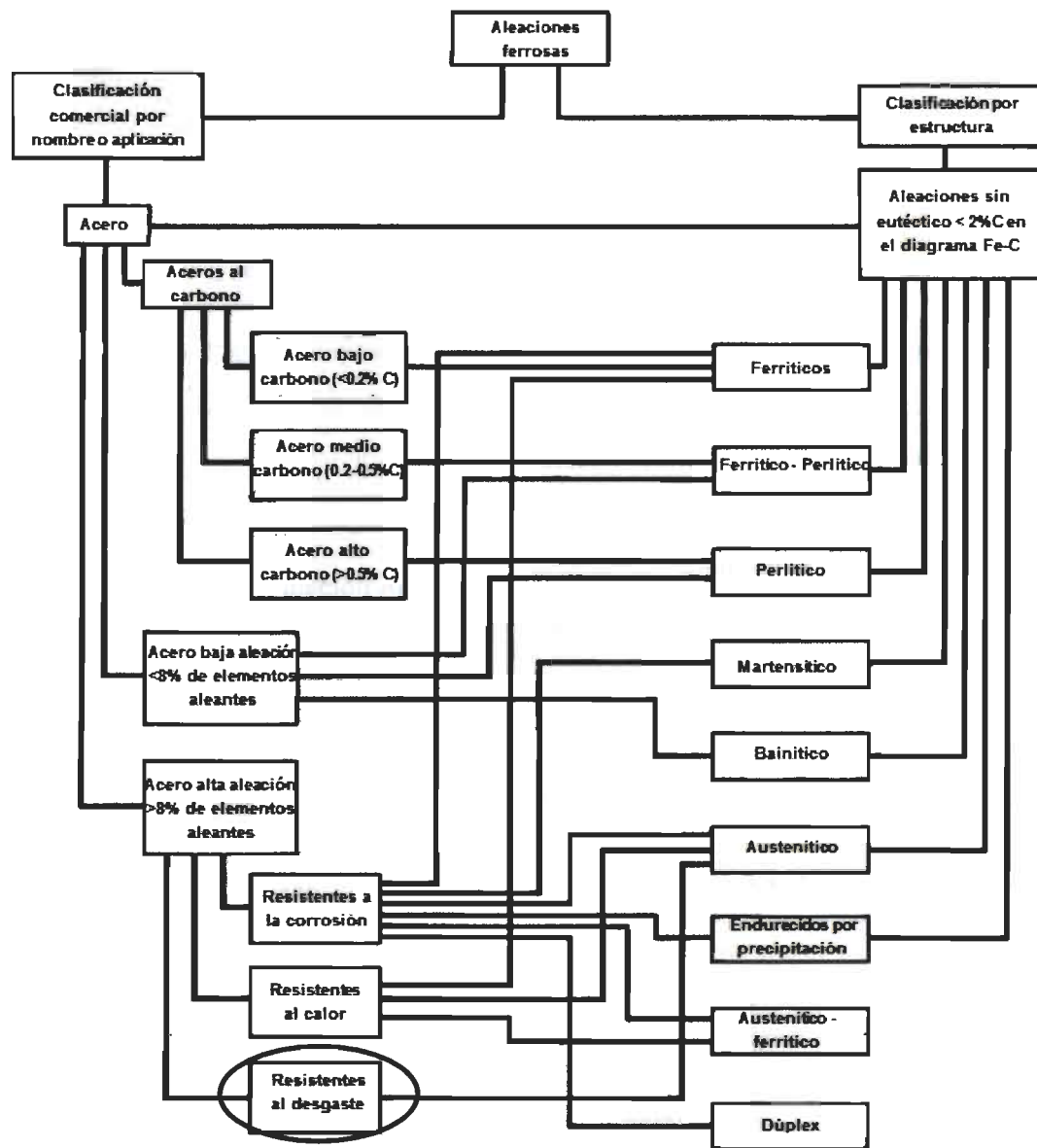


Figura 2. 3 Clasificación de los aceros aleados (3)

Como se aprecia en la Figura 2. 3 el acero en estudio contiene alta aleación, mayor del 8% en peso, por lo que en comparativa contra otros aceros estos hacen la diferencia en la resistencia al desgaste por sus elementos, el cual contiene una matriz martensítica con carburos, la cual otorga mayor resistencia y dureza.

Estos aceros se clasifican dentro un estándar estipulado por la Asociación Americana de Pruebas a Materiales, por sus siglas en inglés (ASTM), en la cual clasifica a los aceros resistentes al desgaste y los agrupan en:

- ASTM A600 Aceros rápidos T&M (Tungsteno y Molibdeno)
- ASTM A681 Acero para trabajo en frio, en caliente, resistentes al impacto y propósitos especiales (6)
- ASTM A686 Aceros endurecibles en agua

Estos grupos mencionados se subdividen por letras como se muestra en la Tabla 2. 1. Cada una de ellas representa a un acero, el cual contiene características distintas por su composición química, tratamiento y campo de aplicación. (3)

Tabla 2. 1 Clasificación AISI/ASTM y características principales del acero (3)

Clasificación AISI	Clasificación ASTM	Características
M	600	Aceros rápidos alto molibdeno
T	600	Aceros rápidos alto tungsteno
H	681	Acero para trabajo en caliente cromo - tungsteno
A	681	Acero para trabajo en frio, media aleación, endurecido al aire
D	681	Acero para trabajo en frio, alto cromo y alto carbono
O	681	Acero para trabajo en frio, endurecido en aceite
S	681	Aceros resistentes al impacto
L	681	Baja aleación, propósitos especiales
P	681	Baja aleación, acero de molde
W	686	Aceros endurecidos en agua

2.2.2 Aceros grado herramienta AISI D

Estos aceros son trabajados en frío y se caracterizan por contener alto porcentaje de cromo como elemento principal de aleación, además de un alto porcentaje de carbono, y dependiendo de otros elementos de aleación como molibdeno y manganeso, estos aceros se pueden endurecer al aire estableciendo un alto grado de estabilidad después de un tratamiento térmico, además de ser resistentes a la corrosión.

Así mismo, son identificados con la letra D mayúscula seguido de un número, (2 - 7 como se verá más adelante) el cual le confiere en este caso específico el porcentaje de carbono y otros elementos de aleación como el vanadio, tungsteno y cobalto, los cuales le otorgan propiedades mecánicas, químicas y físicas distintas. (3) (4). Ver Figura 2. 4 y Figura 2. 5, aceros herramientales.



Figura 2. 4 Maquinado de plantilla por CNC de un acero grado herramienta con el cual posteriormente se utilizara como plantilla (7)

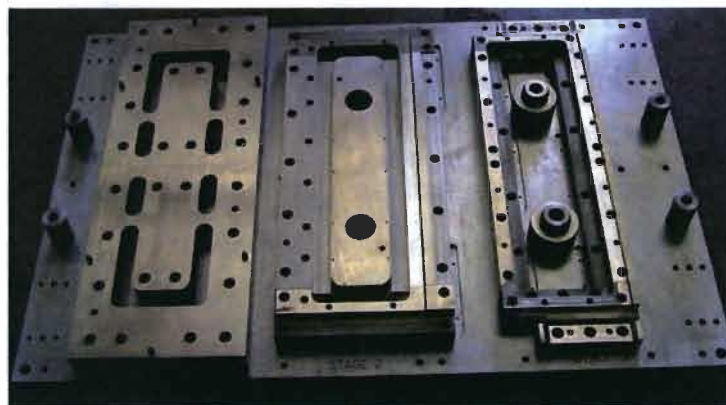


Figura 2. 5 Plantillas utilizadas para el conformado de otros aceros (7)

2.2.3 Composición química en aceros grado herramienta AISI D

Los diferentes tipos de aceros grado herramienta denominados D, contienen diferente composición química dependiendo del número siguiente a la letra como se muestra en la Tabla 2. 2.

Tabla 2. 2 Composiciones químicas de los aceros D (6) (3)

Nomenclatura AISI/SAE	% e.p.								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Co
		Max.	Max.		Max.		Max.	Max.	Max.
D2	1.4	0.6	0.6	11	0.3	0.70 – 1.20	-	1.1	-
	- 1.6			- 13					
D3	2	0.6	0.6	11	0.3	-	1	1	-
	- 2.35			- 13.5					
D4	2.05	0.6	0.6	11	0.3	0.70 – 1.20	-	1	-
	- 2.4			- 13					
D5	1.4	0.6	0.6	11	0.3	0.70 – 1.20	-	1	2.5
	- 1.6			- 13					- 3.5
D7	2.15	0.6	0.6	11	0.3	0.70 – 1.20	-	3.8	-
	- 2.5			- 13.5				- 4.4	

2.2.4 Propiedades otorgadas por la composición química en aceros grado herramienta AISI D

Como se mencionó anteriormente, cada uno de los elementos de aleación le otorga al acero ciertas propiedades, tal es el caso del carbono, el cual su contenido es el de mayor porcentaje y debido a esto le confiere alta dureza y con el manganeso se obtiene una alta templabilidad además de que funge como un desoxidante, el silicio incrementa la resistencia, el cromo además de incrementar la resistencia mecánica, eleva la resistencia a la oxidación, en cuanto al níquel incrementa el endurecimiento y mejora la tenacidad y la ductilidad, en el caso del molibdeno al igual que el níquel es un agente de alta templabilidad, además de formar carburos para incrementar el endurecimiento y resistencia a la temperatura, por último el vanadio incrementa el endurecimiento por la formación de carburos resistentes a altas temperaturas. (3)

2.2.5 Propiedades mecánicas del acero D2

Este acero tiene la particularidad de presentar una extrema dureza y resistencia a la tensión, ya que contiene altos elementos de aleación como níquel, cromo, vanadio, que le otorgan una extrema resistencia y dureza, además contiene alto porcentaje de molibdeno y manganeso, estos dos elementos le confieren una alta y fácil templabilidad al acero, como se demuestra en los artículos (8) (9) (10), en los que describe que este acero es templable en aire con una dureza mínima de 59 HRC como se muestra en la Tabla 2. 3. La cual hace alusión a los aceros aleados grado herramienta y los tratamientos térmicos, que se le aplicaron para llegar a la obtención de su dureza. (6).

Tabla 2. 3 Dureza obtenida por diferentes medios de tratamientos térmicos (6)

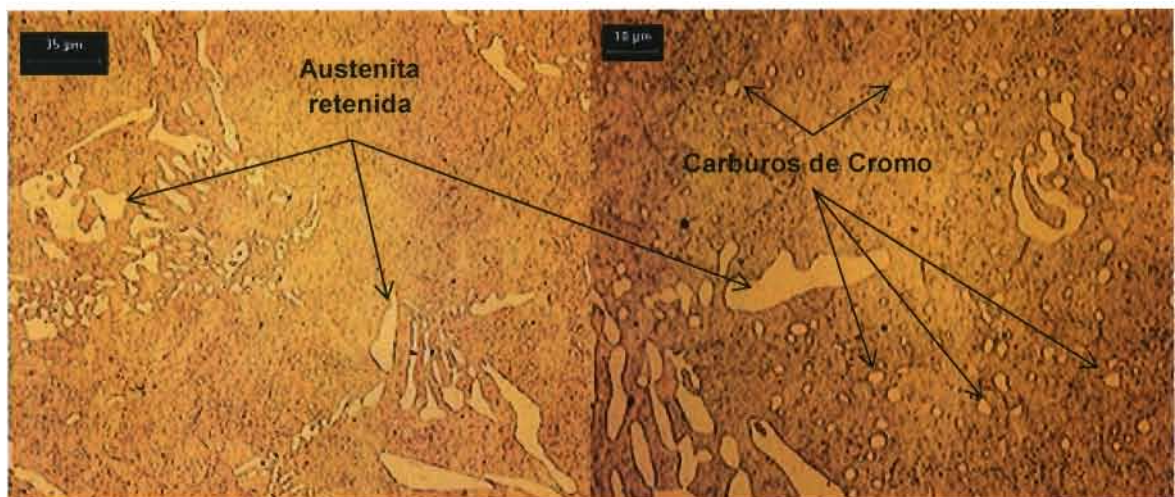
Tipo de Acero	Temperatura de precalentamiento °F (°C)	Temperatura Austempering °F (°C)		Tiempo de austenitización minutos	Medio de temple	Temperatura tempering °F (°C)	Dureza minima HRC
		Baño de sales	Atmósfera del horno				
D2	1500 (816)	1825 (996)	1850 (1010)	10 – 20	Aire	400 (204)	59

En cuanto a su resistencia, se puede corroborar técnicamente mediante métodos estándar en tablas, únicamente tomando su dureza en conversión con el estándar ASTM A370. Su resistencia aproximada a la tensión ronda los 2420 MPa, en la cual se representa con el máximo valor numérico, lo que significa que es indeterminada su resistencia a la tensión, para aceros más duros según el método estándar, ya que 59HRC es la máxima dureza representada en las tablas. Como se muestra en la Tabla 2. 4 (11)

Tabla 2. 4 Resistencia a la tensión por su dureza (11)

Escala Rockwell C Carga 150-Kgf Penetrador Diamante	Dureza Vickers	Dureza Brinell Carga 100-Kgf Bola 10mm	Dureza Knoop Carga 500-gf e inferior	Escala Rockwell A Carga 60-Kgf Penetrador Diamante	Dureza Superficial Rockwell			Esfuerzo aproximado a la tensión Ksi (MPa)
					Escala 15N 15-Kgf Penetrador Diamante	Escala 30N 30-Kgf Penetrador Diamante	Escala 45N 45-Kgf Penetrador Diamante	
59	674	634	710	80.7	89.9	76.6	65.5	351 (2420)

En cuanto a su microestructura se puede observar que presenta una matriz martensítica con carburos de cromo y molibdeno uniformemente distribuidos, esto debido a su tratamiento térmico de temple al aire, con presencia de austenita retenida, como se muestra en la Figura 2. 6, la cual le confiere propiedades de extrema dureza, la cual puede llegar a transformarse con cualquier esfuerzo mecánico a martensita. El ataque para revelar su microestructura fue Picral (Ácido pícrico 5ml, etanol 90ml, agua destilada 5ml) y HCl (Ácido clorhídrico) al 4% por un tiempo de inmersión de 5 segundos. (12)



Presencia de austenita retenida (fase blanca) con carburos $M_{23}C_7$ distribuidos uniformemente

Micrografía 200X

Micrografía 500X

Figura 2. 6 Metalografía de acero D2 atacada con Picral y HCL al 4% (12)

Realizando un resumen de las propiedades mecánicas comenzando con su dureza la cual se encuentra entre los 59 HRC por la presencia de los carburos de cromo ($M_{23}C_7$) y austenita retenida, se puede deducir que es un metal extremadamente duro, además de su propiedad de resistencia aproximada a la tensión que ronda los 2420MPa (351Ksi) (11), se deduce que su estructura interna puede soportar un gran esfuerzo a la tracción. Se encontró austenita retenida, martensita revenida y carburos de cromo ($M_{23}C_7$). Con esto se puede describir algunas de las características principales de estos aceros como: alta dureza, resistencia al desgaste, templabilidad, tenacidad, sensibilidad a la

formación de carburos y a la formación de grietas además de su soldabilidad y resistencia a la corrosión.

2.2.6 Aplicaciones de los aceros D2 en la industria

Por sus características tanto físicas, químicas y mecánicas este acero es puntual y estrictamente utilizado en la industria para el trabajo en frío con resistencia a la abrasión y a la deformación como: troquelado, rolado, matrices, cuchillas de cizalla, pernos, estampados y todos los elementos de corte por arranque de viruta como punzones, machuelos, repujado, roscado y embutido, todas estas funciones son para conformar otros aceros menos resistentes y así lograr su funcionabilidad. Como se muestra en la Figura 2. 7 y Figura 2. 8. (3)



Figura 2. 7 Roladora con rodillos de acero D2 para moldeo de tubería (13)



Figura 2. 8 Tubería con espesor de 127 mm, rolada por aceros D2 (Cortesía COMIMSA)

2.3 Procesos de soldadura utilizados en los aceros D2

Mientras exista la demanda de aplicación para aceros con alta resistencia, tendrá que existir un método de reparación, saneado y recuperación de componentes para este tipo de aceros mediante procesos convencionales y no convencionales de soldadura y otros aplicables tal como se muestra en la Figura 2. 9.



**Figura 2. 9 Saneado de componente metálico mediante el proceso convencional GTAW
(Cortesía COMIMSA)**

Los procesos convencionales de soldadura y recubrimientos cladding más utilizados en aceros herramientales comprenden: SMAW (Shielding Metal Arc Welding), GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) y SAW (Sumerged Arc Welding), dentro de los procesos no convencionales destaca el proceso láser LW (Laser Welding) que ha incrementado su uso y aplicación en la industria debido a su creciente demanda por las características intrínsecas en la soldabilidad y propiedades que solo este proceso otorga a los materiales. (14)

2.3.1 Proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW, Shielding Metal Arc Welding)

Utiliza el calor de un arco eléctrico entre un electrodo metálico revestido y el área de trabajo. La protección proviene de la descomposición del revestimiento de fundente del electrodo. El metal de relleno es suministrado por el núcleo de electrodo de alambre cubierto. Este proceso se muestra en la Figura 2. 10.

Es uno de los procesos más convencionales, práctico y relativamente sencillo de utilizar, por lo general es tan versátil que es utilizado en todos los tipos de reparaciones, saneado y recuperación de componentes. (14) (15)

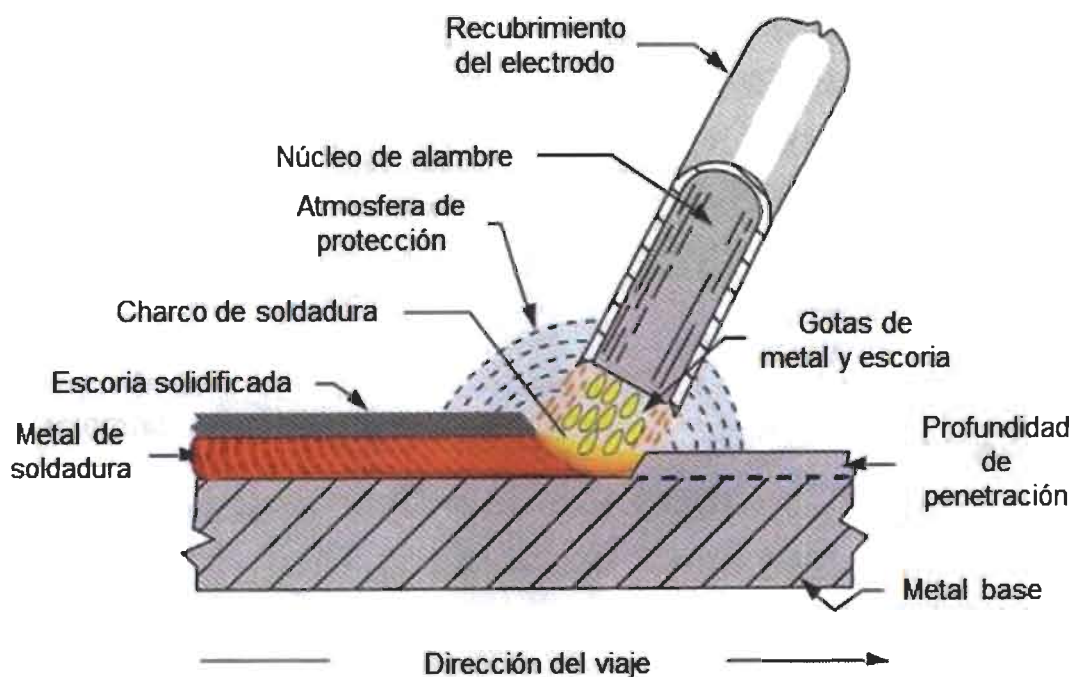


Figura 2. 10 Sistema de operación del proceso SMAW (14) (15)

2.3.2 Proceso de soldadura por arco eléctrico con gas tungsteno (GTAW, Gas Tungsten Arc Welding)

Utiliza un arco eléctrico entre un electrodo no consumible y la pieza de trabajo. La protección se obtiene de un gas inerte o mezcla de gases. El metal de aporte se puede añadir según sea necesario manualmente. La antorcha es por lo general refrigerada por agua, pero puede ser enfriada por aire para aplicaciones de baja corriente tal como se muestra en la Figura 2. 11.

Es uno de los procesos de soldadura con mayor dificultad, ya que se utilizan las dos manos, una para añadir el metal de aporte y otra para aplicar mediante la antorcha el arco eléctrico, además de un pedal para regular el voltaje aplicado a la pieza de trabajo, se requiere de habilidad y experiencia para el manejo y dominio de este equipo. (14) (15)

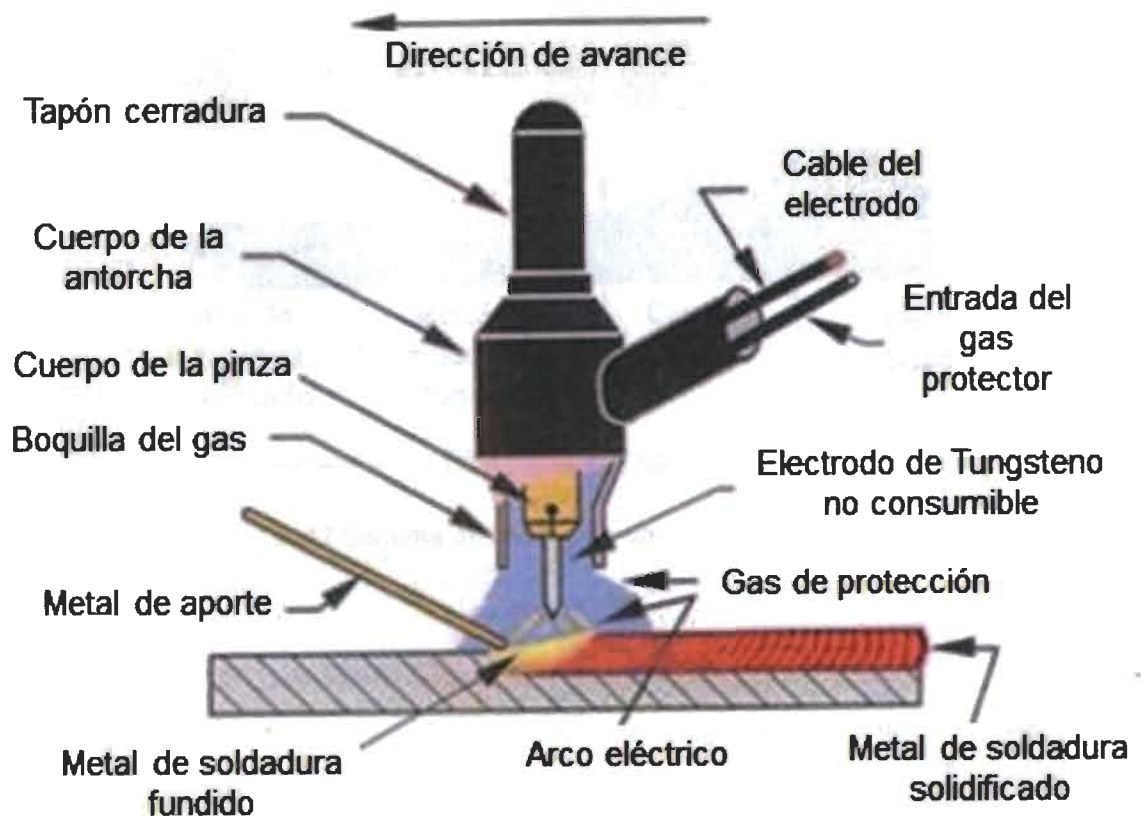


Figura 2. 11 Sistema de operación del proceso GTAW (14) (15)

2.3.3 Proceso de soldadura por arco sumergido (SAW, Submerged Arc Welding)

Se caracteriza por un electrodo de alambre sólido que ofrece un arco que está totalmente cubierto por una capa de fundente granular. A medida que la soldadura progresa, también lo hace el cordón de soldadura, deja una capa de escoria y encima de ella una cubierta de fundente. La escoria se descarta, y el fundente no utilizado se recicla. Este proceso por lo general es totalmente automatizado, y solo puede soldar en posición plana y horizontal, como se muestra en la Figura 2. 12. (14) (15)

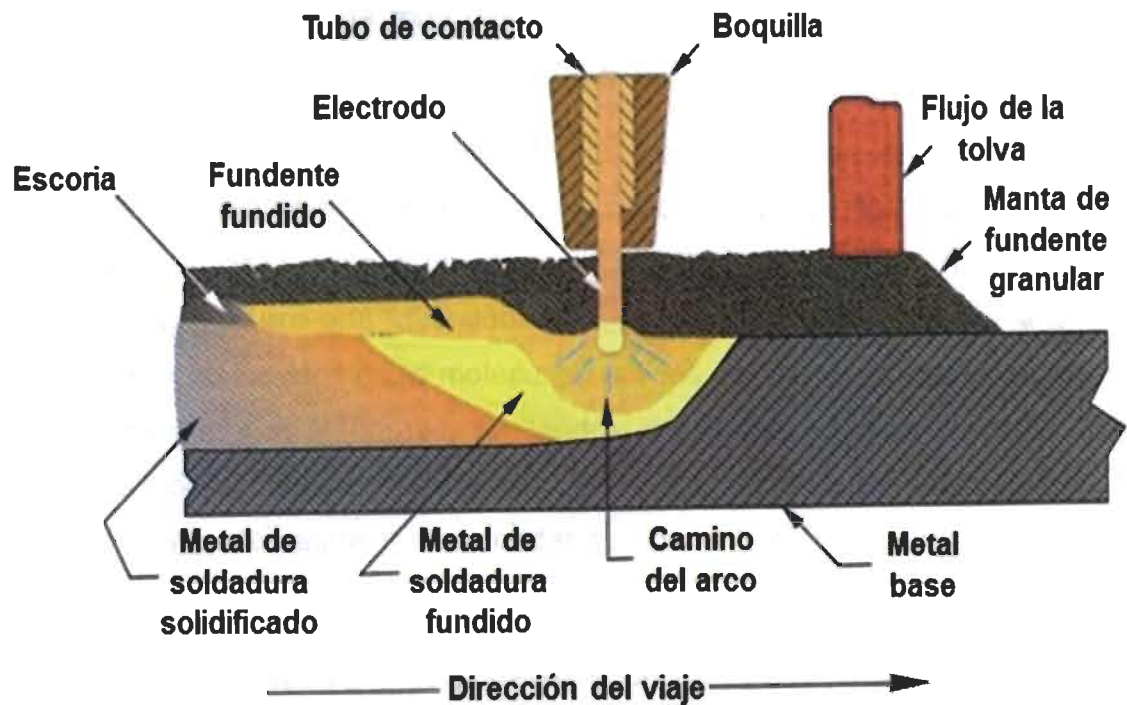


Figura 2. 12 Sistema de operación del proceso SAW (14) (15)

2.3.4 Proceso de soldadura por láser (LW)

2.3.4.1 Definición general

La palabra láser es un acrónimo de "amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación" (light amplification by stimulated emission of radiation).

Un láser es un dispositivo que produce un haz de luz coherente, ordenado y concentrado estimulando transiciones electrónicas o moleculares de los niveles de energía más bajos a los más altos. El término coherente significa que todas las ondas de luz se encuentran en una sola fase (monocromático).

En virtud de ser coherentes cualquier láser como de alta y baja potencia, tienen un ángulo de divergencia muy pequeño, lo que hace posible transportarlos a una distancia relativamente grande y concentrarlos de un solo grado.

En la práctica, un láser consiste en un medio colocado entre los espejos terminales de una cavidad de resonancia óptica. Cuando ese medio se "excita" por aplicación de energía a un filamento metálico de neodimio (Nd), hasta el punto en que ocurre una inversión de la polarización, condición en la que la mayor parte de los átomos (o moléculas) activos del medio alcanzan un estado energético superior al normal, se tendrá una fuente de luz coherente que entonces podrá reflejarse una y otra vez entre los espejos terminales de la cavidad, los cuales aumentan su poder de concentración, cuando existan más cristales alineados. (14) (15)

Un láser es un dispositivo de conversión de energía, que transforma de una fuente primaria (eléctrica, química, térmica, óptica o nuclear) en un haz de radiación electromagnética con una frecuencia específica.



Figura 2. 13 Proceso Laser (LBW) (14) (15)

2.3.4.2 Principios del funcionamiento

La soldadura con rayo láser (laser beam welding, LBW) como se muestra en la Figura 2. 13, es un proceso de unión por fusión que produce la coalescencia de materiales gracias al calor derivado de un haz concentrado de luz coherente monocromática que incide sobre la unión que se va a soldar, el rayo láser se dirige mediante elementos ópticos planos, como espejos, y luego se enfoca a un punto pequeño (para obtener una densidad de potencia elevada) en la pieza de trabajo empleando elementos de enfoque reflejantes o bien lentes. La soldadura con rayo láser es un proceso sin contacto, por lo que en este proceso no es necesario la aplicación de presión, como se observa en la Figura 2. 14. En general se emplea protección con gas inerte para evitar la oxidación del charco fundido, y en ocasiones puede no usarse metal de aporte, por lo que también se le denomina como autógeno a este proceso. (15) (14) (9)

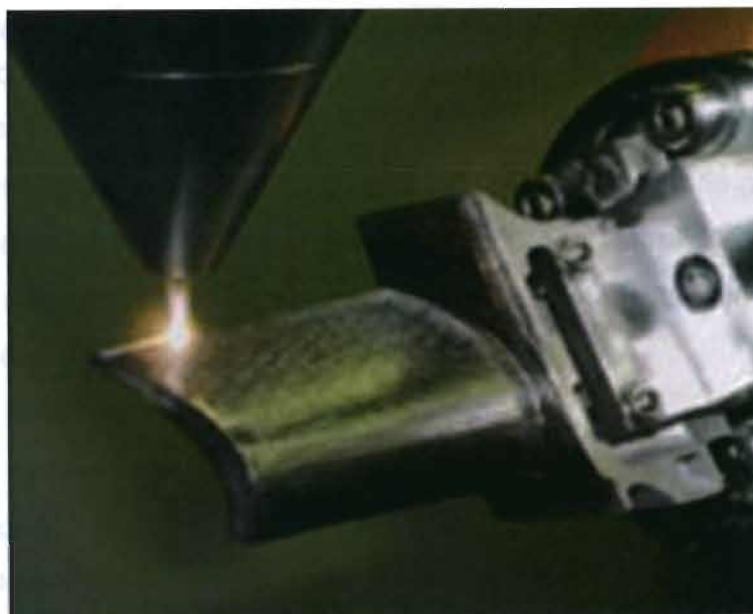


Figura 2. 14 Reparación superficial por láser cladding en alabe de turbina (16)

2.3.4.3 Láser de estado sólido Nd:YAG

Se emplea una varilla de vidrio o cristal con neodimio (Nd) como impureza o contaminante el cual mide alrededor de 150mm de largo por 9mm de diámetro, el cual se excita por medio de una lámpara de criptón o xenón, la capacidad de excitación para la salida del haz esta citada en la Tabla 2. 5.

Existen dos modos para la excitación de la varilla, el modo multi y el modo pulso, en donde el modo multi es un método en el cual se le aplica la fuente de potencia continua de la lámpara de neodimio, y el modo pulso se le aplica la fuente en pulsos controlados por milisegundos, los cuales el operador es el que controla la fuente directamente para el uso requerido de la potencia del láser.

Tabla 2. 5 Parámetros preestablecidos en la salida del láser modo pulso Nd:YAG

Diámetro del rayo.....	0.2 - 2 mm
Energía de salida.....	1mJ/pulso
Repetición.....	50 - 100kHz
Potencia media.....	10 - 100W
Potencia máxima.....	10 - 50kW

2.3.4.4 Ventajas del proceso láser

- Debido a su focalización de transferencia de energía, se minimiza la distorsión de la pieza de trabajo.
- Baja entrada de calor, por lo que reduce el crecimiento de grano
- Elimina casi por completo la Zona Afectada por Calor (ZAC)
- Llega a unir materiales con espesores de hasta 1 ¼ in (32 mm) en un solo paso de soldadura
- No es necesario utilizar material de aporte
- No es necesario la aplicación de presión
- El rayo láser se focaliza, y dirige fácilmente áreas en las cuales se tenga limitado el acceso, o esté muy estrecho el lugar de la unión
- Se pueden soldar materiales disimiles entre si
- Puede ser automatizado el proceso
- No le afectan los campos magnéticos
- La relación profundidad - ancho es de 10:1

2.3.4.5 Limitaciones del proceso láser

- La unión que será soldada deberá estar con extrema exactitud bajo el rayo y controlar su focalización
- Se requiere mantener unidas con presión las piezas o juntas que serán soldadas, ya que podrían separarse durante el proceso
- Se requiere que la unión a tope sea una ranura cuadrada
- Esta limitado a espesores mayores de 1 ¼ in (32 mm)
- Se dificulta la soldabilidad de materiales como el aluminio y cobre debido a su conductividad térmica
- Se puede generar porosidad por la rápida solidificación del proceso
- Con un láser de alta potencia, el desprendimiento de humo puede llegar a afectar al mismo del láser, concluyendo con un cordón lleno de defectos
- Equipo extremadamente caro

2.3.4.6 Aplicaciones generales del proceso láser

Este proceso puede unir casi cualquier metal, aun y cuando los materiales ferrosos tengan un contenido superior al 0.30%C, la transformación martensítica puede llegar a ser susceptible al agrietamiento, utilizando el modo pulso llega a minimizar casi por completo esta fase del material, aun y cuando esté tratado térmicamente la pieza a soldar. Este proceso debido a su focalización y su entrada de calor mínima, ayuda a no hacer cambios metalúrgicos en las piezas a unir, manteniendo las propiedades mecánicas sin cambio alguno lo que hace único y extraordinario este proceso.

A continuación en la Figura 2. 15, se muestra la secuencia de una reparación de un componente el cual perdió el recubrimiento por fatiga, y fue sometido a reparación por el proceso láser cladding.



Figura 2. 15 Reparación superficial por láser cladding en componente erosionado (16)

2.3.5 Modos de aplicación láser para recubrimientos

Las soldaduras para recubrimiento o de superficies como sus nombres lo indican, se definen como: una soldadura aplicada a una superficie para obtener propiedades físicas, químicas, mecánicas o simplemente dimensiones deseadas. Otros términos asociados con la aplicación de soldadura en la superficie son (14) (17):

- **2.3.5.1. Build Up.** Es una variación de superficies en las que se deposita metal de aporte para lograr un dimensionamiento requerido.
- **2.3.5.2 Buttering.** Es una variación en la que se deposita soldadura en una o más superficies para proporcionar una unión metalúrgicamente compatible con el metal base.
- **2.3.5.3 Hard Facing.** Es una variación de superficies en las que se aplica material de aporte para reducir el desgaste.
- **2.3.5.4 Cladding.** Es una variación de superficies en las que se aplica metal de aporte en la superficie del material, por lo general para mejorar la resistencia a la corrosión, al calor y a la fatiga.

En todos los casos mencionados anteriormente el común denominador es el recubrimiento para evitar la erosión y fatiga del metal base como se muestra en la Figura 2. 16.

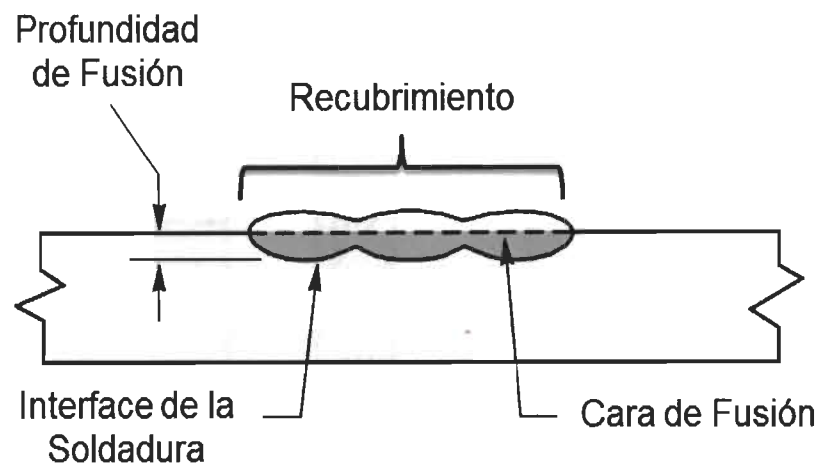


Figura 2. 16 Aplicación del recubrimiento a metal base. (17)

2.3.5.4.1 Técnica de aplicación del recubrimiento

Con el recubrimiento se busca cubrir cierta parte o toda la superficie del material sin dejar expuesto parte de este, los cordones se aplican seguidos unos de otros traslapándose con un máximo del 30% del ancho del cordón, con eso se asegura la máxima protección del metal de aporte como revestimiento. En la Figura 2. 17 se muestra una representación gráfica del recubrimiento superficial.

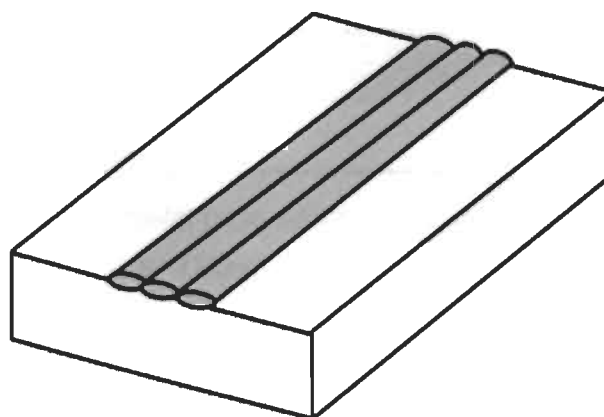


Figura 2. 17 Recubrimiento superficial Cladding (17)

Una parte importante de la aplicación del recubrimiento es el espesor del mismo, ya que puede variar según los requerimientos deseados, en este caso se representa en la Figura 2. 18 la simbología de la soldadura en la cual aplica el recubrimiento a toda la superficie del material, limitándose a 1/8" de espesor.

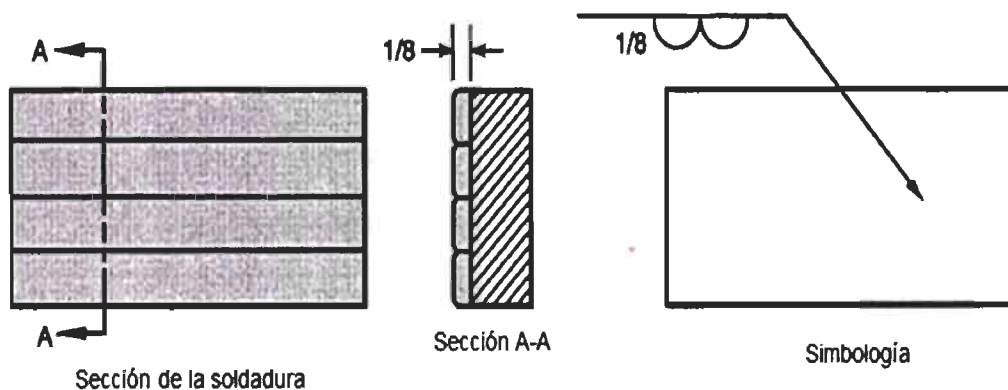
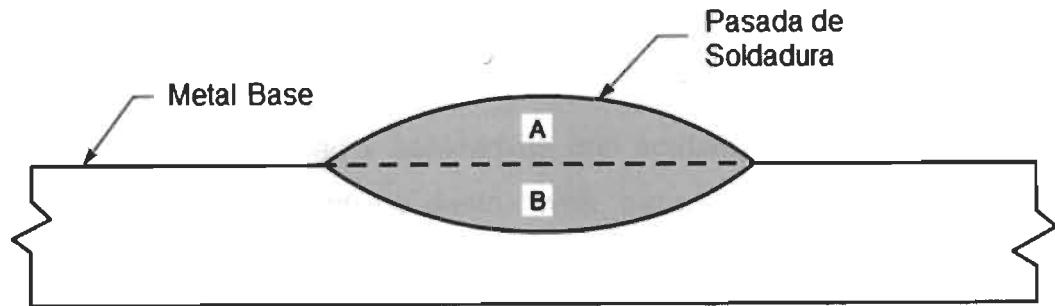


Figura 2. 18 Simbología de soldadura para recubrimiento superficial (17)

2.3.5.4.2 Cálculo de la dilución de la soldadura

Se describe como el cambio en la composición química del metal de aporte causado por la mezcla del metal base en el cordón de soldadura. Es medido por el porcentaje de metal de aporte o de soldadura sobre el cordón. En la Figura 2. 19 se representa la medición de la dilución. (17)



Calculo de la dilución del metal base sobre el área de la pasada en la soldadura

$$\% \text{ Dilución} = \frac{B}{A + B} \times 100$$

Figura 2. 19 Cálculo para el porcentaje de la dilución (17)

2.3.5.4.3 Calculo del calor de entrada

El cálculo de calor de entrada se define básicamente como la energía calorífica aplicada a la pieza durante la soldadura (17), el cual es representado con la siguiente fórmula en la

Ecuación 2. 1

$$HI = \frac{P}{V} (\eta)$$

Dónde:

P = Potencia

V = Velocidad de avance

η = Eficiencia de absorción térmica del material

Ecuación 2. 1 Cálculo de calor de entrada

El valor (n) está dado por el calor específico del acero D2, el cual corresponde a 16, este valor es adimensional.

2.3.6 Calidad de las uniones soldadas

Cuando se habla de calidad en uniones soldadas, es una herramienta principal utilizada para detectar indicaciones que posteriormente pudiesen llegar afectar la vida remanente de la unión, componente o estructura. La calidad de una soldadura es su fortaleza y la fortaleza del material alrededor de ella.

Para corroborar la calidad y sanidad de una soldadura se utilizan métodos y ensayos destructivos como no destructivos, para verificar que las soldaduras están libres de defectos, y que tienen niveles aceptables en sus propiedades físicas y mecánicas. Existen códigos y especificaciones de soldadura para guiar a los inspectores de soldadura para evaluar la calidad éstas.

A continuación en la Tabla 2. 6 se mencionan algunos de los métodos de prueba para corroborar sus propiedades.

Tabla 2. 6 Métodos de ensayos para corroborar la calidad de los materiales (14)

Ensayos	
Destructivos	No Destructivos
- Tensión	- Inspección Visual
- Doblez	- Líquidos Penetrantes
- Impacto	- Partículas Magnéticas
- Nick Break	- Radiografía Industrial
- Compresión	- Ultrasonido Industrial
- Microdureza	- Emisión Acústica
- DWTT	- Corrientes Eddy
- Dureza	
- Macroataque	
- Metalografía	

CAPÍTULO 3. DISCUSIÓN Y REVISIÓN DE ARTÍCULOS DEL PROCESO CLADDING LASER EN ACEROS GRADO HERRAMIENTA

En este capítulo se discutirán los artículos relacionados con el proceso de soldadura laser cladding, en los cuales se buscará información relevante, y datos técnicos en los cuales será basada la experimentación del mismo.

3.1 Elementos de aleación encontrados en recubrimientos

Algunos de los elementos más comúnmente encontrados en recubrimientos ya sea por cladding, buil up, buttering o hardface son por excelencia Ni-Cr-B-Si, ya que estos elementos pueden llegar fácilmente a la formación de fases secundarias cuando son unidos metalúrgicamente, las cuales proporcionan endurecimiento superficial resistencia, ya que cada elemento de aleación otorga diferentes propiedades como el níquel (Ni) que mejora en la tenacidad y la

ductilidad en el material pero en unión con el boro (B), da la formación de fases fragilizadoras como los intermetálicos y eutécticos. En el caso del cromo (Cr) incrementa la resistencia mecánica por formación de carburos y eleva la resistencia a la corrosión. Sin embargo, a temperaturas de 750 a 900°C forma una fase fragilizadora (fase sigma) ocasionando agrietamiento y fragilidad de la zona unida. En el caso del boro (B) incrementa la dureza superficial y la resistencia a la tenacidad, es comúnmente afín al cromo y níquel con lo que forma fácilmente boruros, y con cualquier elemento puede formar carburos de boro lo cual puede llegar a causar mucha fragilidad en esta fase presente. Por último el silicio (Si) incrementa la dureza dramáticamente. Estos elementos de aleación son añadidos a la superficie por el metal de aporte con el cual se está trabajando, estos elementos son similares a nuestro material base estudiado. (8) (18) (19) (20) (10) (21)

Retomando el tema anterior, dependiendo su composición química serán sus propiedades, con la característica especial del boro que es un formador fuerte de carburos, lo cual como se explicó, puede llegar a formar fases fragilizadoras debido a que los grados de alta aleación de estos elementos se caracterizan por numerosos precipitados de boruros de cromo, en una baja relación Si / B y sustancial Ni - Eutécticos B-Si, y los grados de baja aleación con muy pocos precipitados boruros de cromo, con una alta relación Si / B y cantidades limitadas de eutécticos interdendríticos. Los resultados confirmaron que la formación de fase de recubrimientos láser depositado Ni-Cr-B-Si, principalmente depende del contenido de Cr y su relación Si / B. (8) (18) (22)

3.2 Variables esenciales en el proceso cladding

En este proceso de soldadura no convencional para recubrimientos se utilizan diferentes variables las cuales se mencionarán a continuación. de acuerdo a los parámetros preestablecidos en el artículo científico publicado por Hemmati en 2013 (8) en el cual se tomó como referencia, uno de ellos es la velocidad de revestimiento que fue en un rango de entre 5 – 40 mm/s, el cual cubría de una

sola pasada un cordón de 10 mm de ancho con 33% de traslape, con una profundidad de penetración de 0.9-1.1 mm, con una aleación de Ni-Cr-B-Si, utilizando una varilla sólida como metal de aporte, en cuanto a la máquina de poder láser trabaja con un rango entre 800 – 1000 W, utilizando como gas de protección argón de alta pureza, para evitar el agrietamiento se precalentó el material hasta los 500°C y con esto están completas las variables de este artículo. (8)

En este otro proceso publicado por Gururaj Telasang y Jyotsna Dutta Majumdar en 2015 de cladding se utilizaron 6kW de poder de trabajo, con una atmósfera de gas de protección de argón de 1.5 bar de presión. Añadiendo el metal de aporte en polvo. Con una potencia de láser de 133J/mm², para penetrar alrededor de 1.2 mm de profundidad. (19)

Otro prueba realizada por Farahmand Parisa en 2013, usando un láser de 4100 W y 975 nm de longitud de onda. Incluye un alimentador de polvo, una unidad de control para regular la potencia de salida de polvo. Con una atmosfera de protección de argón. Con una velocidad de avance de 3 mm/s. (9)

CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO

Este caso de estudio se basa en el análisis experimental el cual se aplicó en un acero herramental una soldadura láser cladding con diversos parámetros propuestos para estudiar la dilución de la soldadura, la zona afectada por calor y sus cambios microestructurales los cuales serán otorgados por el metal de aporte el cual fue seleccionado con características similares tanto físicas, químicas y mecánicas al material base.

4.1 Metodología

Las actividades se realizaron de la siguiente manera, se obtuvieron el metal base y el material de aporte, posteriormente se realizó la aplicación del recubrimiento por medio del micro láser. Una vez aplicados los cordones, se le realizaron pruebas de calidad para corroborar su soldabilidad y apariencia mediante inspección visual, líquidos penetrantes y partículas magnéticas, después de la aplicación de inspección en calidad se llevó la muestra al laboratorio para analizarla macro y microestructuralmente, así como realizar el ensayo de perfil de microdureza y dilución.

Por último, en la Figura 4. 1 se muestra el diagrama de la metodología del trabajo realizado. Posteriormente se obtuvieron los resultados y conclusiones.

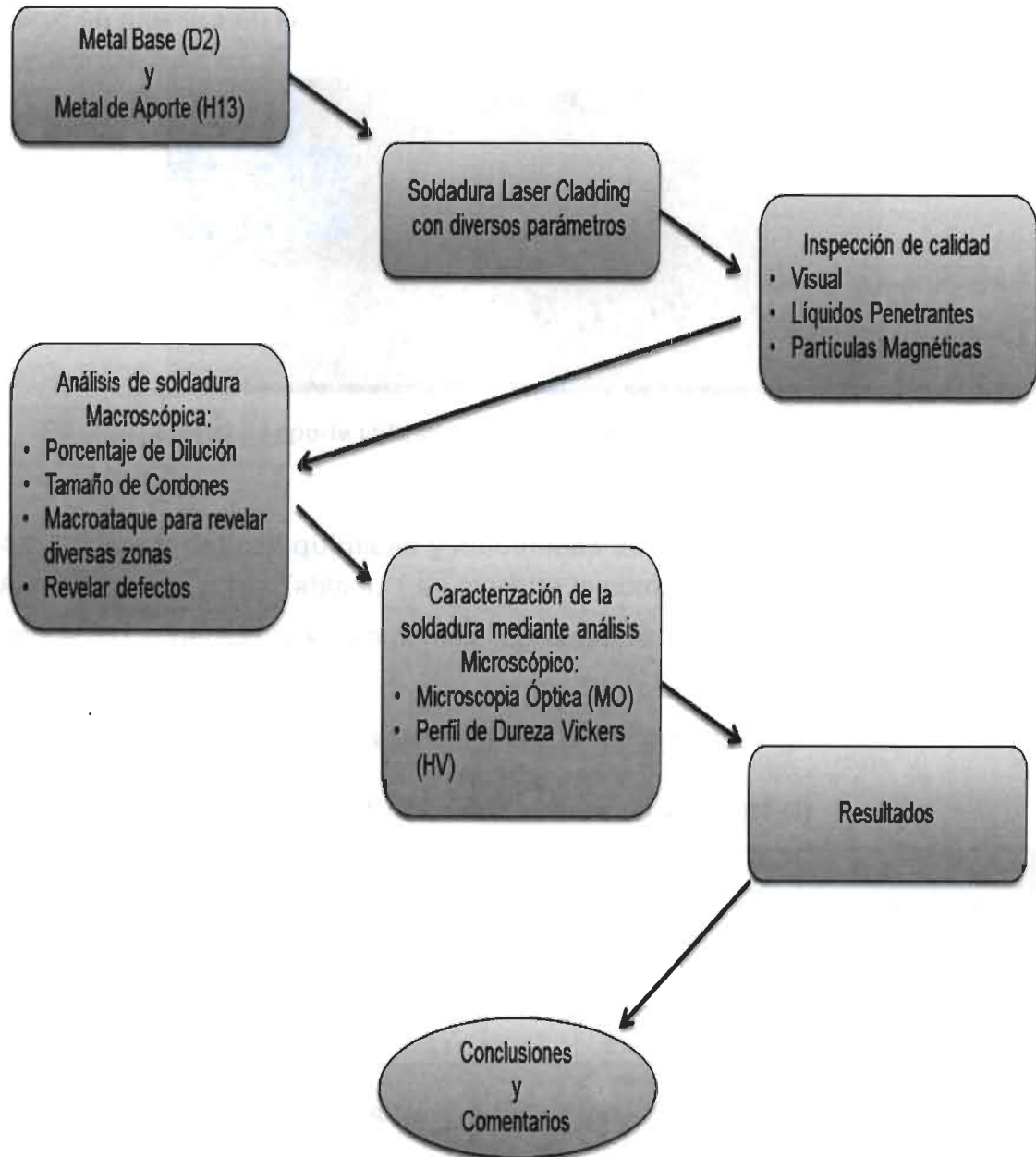


Figura 4. 1 Diagrama de la metodología usada para la experimentación

4.2 Metal de aporte

Acero herramental H13, en la que su configuración una es varilla con las siguientes características, un diámetro de 0.4mm y una longitud de 457.20mm, como se muestra en la Figura 4. 2.



Figura 4. 2 Metal de aporte utilizado para micro laser cladding (Cortesía COMIMSA)

4.2.1 Características químicas y mecánicas del material de aporte

A continuación en la Tabla 4. 1 se muestra la composición química del metal de aporte H13, debido a su porcentaje de carbono se aprecia que es un acero Hipoeutectoide, además con diversos porcentajes de elementos de aleación, los cuales son compatibles químicamente con el metal base propuesto. (3)

Tabla 4. 1 Composición química del acero H13 (3)

Nomenclatura AISI/SAE	% e.p.									
	C	Mn Max.	Si Max.	Cr	Ni Max.	Mo	W	V Max.	S Max.	Co Max.
H13	0.32	0.2	0.8	4.75	0.3	1.1	-	0.8	0.04	-
	-	-	-	-		-		-		
	0.45	0.5	1.2	5.5		1.75		1.2		

En cuanto a sus propiedades mecánicas se pueden observar en la Tabla 4. 2 y Tabla 4. 3, en donde la primera describe el proceso mediante el cual fue tratado térmicamente para la obtención del mismo, con el que se aprecia la dureza la cual ronda los 52 HRC, estos datos fueron obtenidos de la especificación estándar ASTM A 681 la cual hace alusión a los aceros aleados grado herramienta y los procesos de tratamientos que se le aplicaron para llegar a la obtención de su dureza. (6)

Tabla 4. 2 Dureza obtenida por diferentes medios de tratamientos térmicos (6)

Tipo de Acero	Temperatura de precalentamiento °F (°C)	Temperatura Austempering °F (°C)		Tiempo de austenitización minutos	Medio de temple	Temperatura tempering °F (°C)	Dureza minina HRC
		Baño de sales	Atmósfera del horno				
H13	1450 (788)	1825 (996)	1850 (1010)	5 - 15	Aire	1025 (552)	52

Para calcular el valor de su resistencia se puede corroborar al igual que el metal base técnicamente mediante métodos estándar en tablas, tomando como referencia su dureza en conversión con la estándar ASTM A370, que se muestra en la Tabla 4. 3 en la cual se aprecia su resistencia aproximada a la tensión la cual ronda los 1880 MPa. (12)

Tabla 4. 3 Resistencia a la tensión por su dureza (11)

Escala Rockwell C Carga 150-Kgf Penetrador Diamante	Dureza Vickers	Dureza Brinell Carga 100-Kgf Bola 10mm	Dureza Knoop Carga 500-gf e inferior	Escala Rockwell A Carga 60-Kgf Penetrador Diamante	Dureza Superficial Rockwell			Esfuerzo aproximado a la tensión Ksi (MPa)
					Escala 15N 15-Kgf Penetrador Diamante	Escala 30N 30-Kgf Penetrador Diamante	Escala 45N 45-Kgf Penetrador Diamante	
52	644	512	576	76.8	86.4	70.2	57.4	273 (1880)

4.3 Parámetros

Los parámetros utilizados para la experimentación mediante el láser cladding se muestran en la Tabla 4. 4 en donde solo se observa cambio en el parámetro de la potencia la cual se fue incrementando de 5 Watts a la vez, las demás variables permanecieron constantes.

Tabla 4. 4 Parámetros utilizados en la aplicación de cladding

Parametros	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Unidades
Potencia	73	78	83	88	93	Watts
Pulso	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	ms
Repeticion	5	5	5	5	5	Hz
Vel. avance	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	mm/s

4.4 Cálculo de calor de entrada

Se realizaron los cálculos correspondientes para cada prueba como lo mostró el punto 2.3.5.4.3, se muestra en la Tabla 4. 5 el valor obtenido por prueba realizada

Tabla 4. 5 Calor de entrada para cada prueba

Calor Entrada	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Unidades
$Hl = \frac{P}{V} (n)$	5840	6240	6640	7040	7740	J/mm

4.5 Inspección de calidad mediante ensayos no destructivos (NDT)

A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante las técnicas de aseguramiento de calidad, los cuales estos métodos proporcionan datos cualitativos de la superficie soldada por cladding.

4.5.1 Inspección visual (VT)

La inspección se realizó bajo los criterios del código estructural AWS D1.1/10. Como se representa en la Figura 4. 3, es una muestra de 32mm de ancho por 45mm de largo, en donde se observan 5 cordones de recubrimiento con soldadura micro láser, los cuales muestran distintas características físicas aparentes.

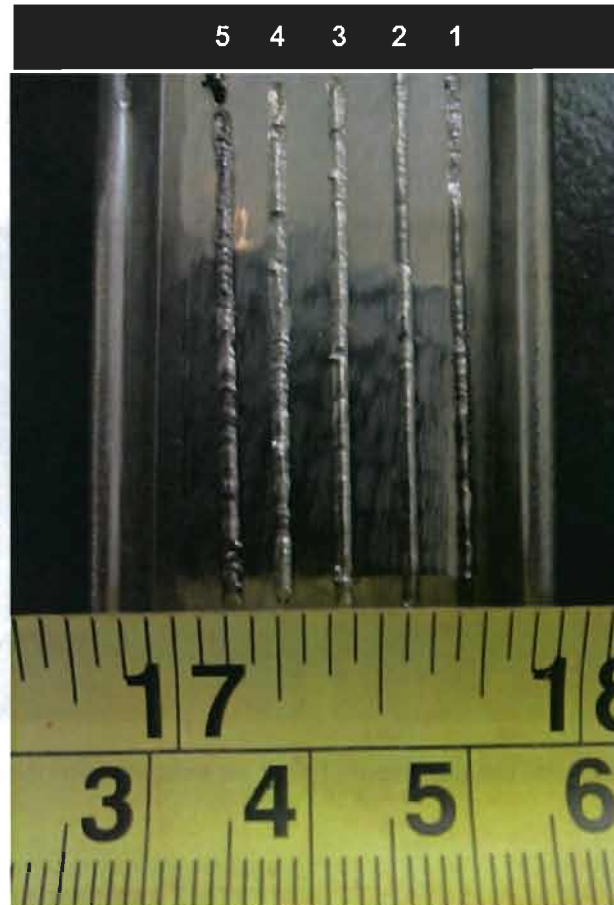


Figura 4. 3 Inspección visual a cordones de soldadura

En este caso debido al tamaño de los cordones, está limitado a realizar mediciones con los calibradores correspondientes, por lo que las medidas de altura del recubrimiento y la apariencia serán soportadas por el macroataque.

4.5.2 Líquidos penetrantes (PT)

La inspección se realizó bajo el estándar ASTM E165, y los criterios de aceptación fueron tomados del código estructural AWS D1.1/10. Se realizó la prueba mediante la aplicación de líquidos penetrantes fluorescentes (Tipo I) y Visibles (Tipo II) durante 5 minutos de penetración, los cuales fueron removidos con solvente mediante (Método C) remoción, aplicando un revelador no acuoso para Tipo I y Tipo II (Forma D y E) en la aplicación del revelador la cual duro aproximadamente 2 minutos el resultado para evaluar. Esto se puede observar en la Figura 4. 4.

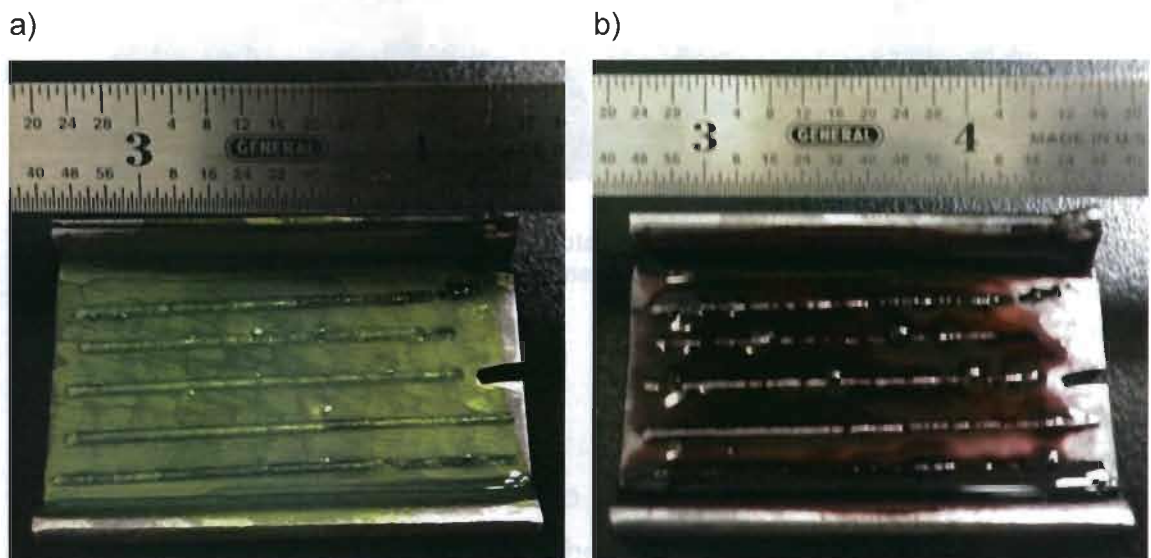


Figura 4. 4 Aplicación de Líquidos de Tipo I Fluorescentes (a), y de Tipo II Visibles (b)

4.5.3 Partículas magnéticas (MT)

La inspección se realizó bajo el estándar ASTM E709, y los criterios de aceptación fueron tomados del código estructural AWS D1.1/10. Se realizó la prueba mediante partículas magnéticas húmedas fluorescentes y partículas magnéticas secas visibles con ambas corrientes (AC/DC), como se muestra en la Figura 4. 5.



Figura 4. 5 Inspección mediante partículas magnéticas secas visibles con yugo electromagnético

4.6 Perfil de dureza

El ensayo de microdureza fue realizado conforme a lo establecido en la norma ASTM E384/08 (Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials). El equipo utilizado fue un TUKON 2500 con punta de diamante, la carga aplicada fue de 500 gf con una permanencia de 10 segundos con una distancia de separación de 0.3 mm por indentación en soldadura y 0.5 mm por indentación en la zona afectada por calor y metal base, estas indentaciones fueron realizadas en las tres zonas principales las cuales están representadas con una estrella en la Figura 4. 6 en donde se muestra la zona donde se realizó el perfil.

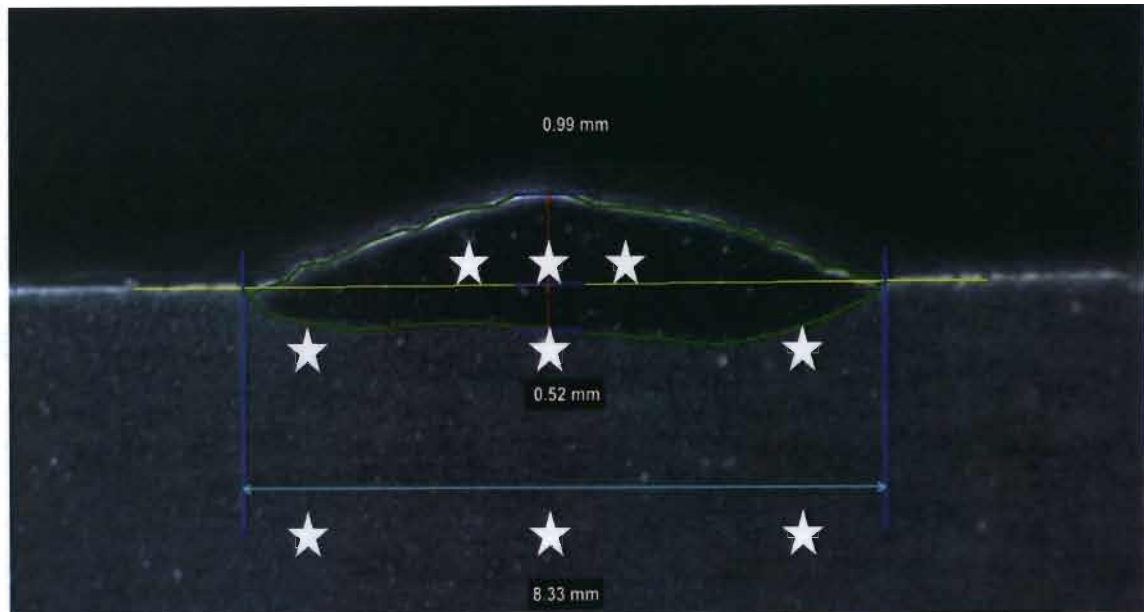


Figura 4. 6 Macro ataque relevando las zonas de las indentaciones realizadas por el perfil de dureza realizada con la metodología Vickers.

4.7 Técnica de caracterización macroscópica

El ensayo de macroataque se realizó bajo la norma ASTM E340/00 (Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys), en donde la muestra se cortó transversalmente para lograr la visualización del metal base y soldadura, se desbastó con lijas de diversos tamaños de grano (120 - 1200), de mayor a menor y se pulió hasta lograr un acabado espejo con ayuda de alúmina (Al_2O_3) y pasta de diamante de 1 micra, seguido de un ataque químico con Picral (ácido pícrico 5ml, etanol 90ml, agua destilada 5ml) y HCl (ácido clorhídrico) al 4% por un tiempo de inmersión de 25 segundos para delimitar las diversas áreas. Esto fue observando mediante un microscopio optimo olympus.

4.8 Técnica de caracterización microscópica

El análisis metalográfico se realizó de acuerdo a la norma ASTM E3 (Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens). Se realizó el mismo procedimiento por la macroscopía, solo que en este caso permaneció por 7 segundos de inmersión para revelar su microestructura y lograr visualizar las diversas fases presentes en la sección transversal de la unión de soldadura.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos durante las pruebas realizadas en el Capítulo 4. Caso de estudio.

Comenzando con la inspección de calidad se presentan los siguientes resultados:

Inspección visual (VT)

Se observan 5 cordones de recubrimiento con soldadura micro láser, los cuales muestran distintas características físicas aparentes. Comenzando por el cordón que muestra la mejor apariencia que es el designado como el número 2, seguido del número 3 exhibiendo una buena continuidad y traslape entre cada spot de soldadura mostrando textura lisa y tersa del mismo. Así mismo, el cordón con la apariencia deficiente es el número 5, mostrando discontinuidad y abultamientos sobre él, tal como se puede observar en la Figura 5. 1.

En cualquiera de los casos no se encontraron indicaciones relevantes, los cuales sean motivo de rechazo, este criterio será soportado y aplicado por el resultado del macro ataque.

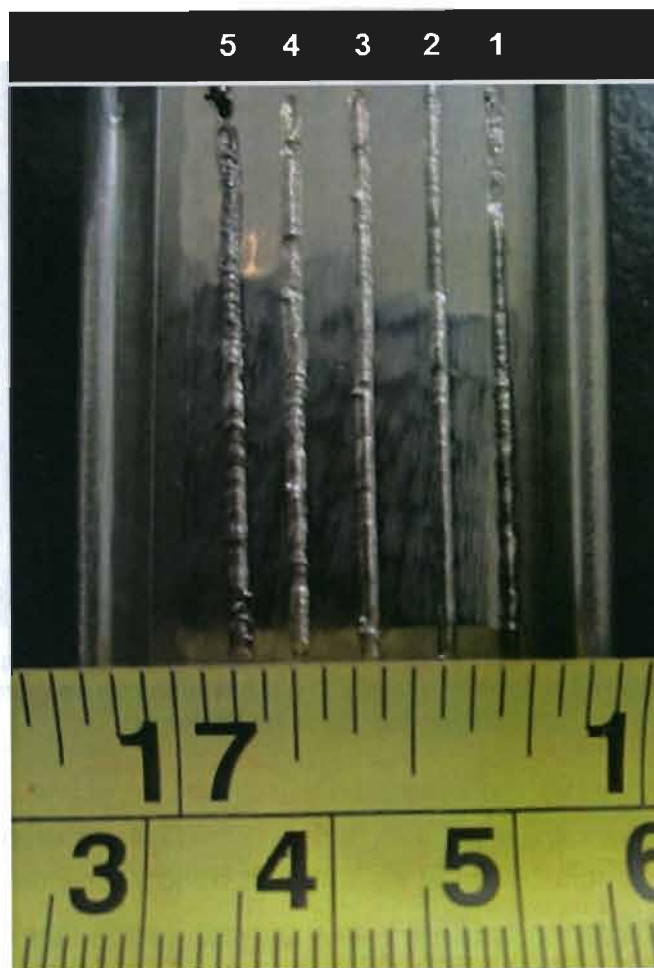


Figura 5. 1 Inspección Visual, en donde revela que el cordón con la mejor apariencia es el marcado con el número 2 y el de peor apariencia lo revela como el número 5.

Líquidos penetrantes (PT)

En esta técnica solo se encontraron indicaciones mediante líquidos fluorescentes, mientras que con líquidos visibles (rojos) apenas se revelaron algunas indicaciones ya que son demasiadas finas, esto se debe a la baja sensibilidad de los líquidos rojos comparados con los fluorescentes, con los cuales se encontraron indicaciones lineales en los pies de los cordones de soldadura, sin embargo, el cordón con la menor presencia de indicaciones es el número 2, así mismo, los cordones con mayor presencia de indicaciones lineales fueron los denominados con los números 1 y 5. Esto se puede observar en la Figura 5. 2

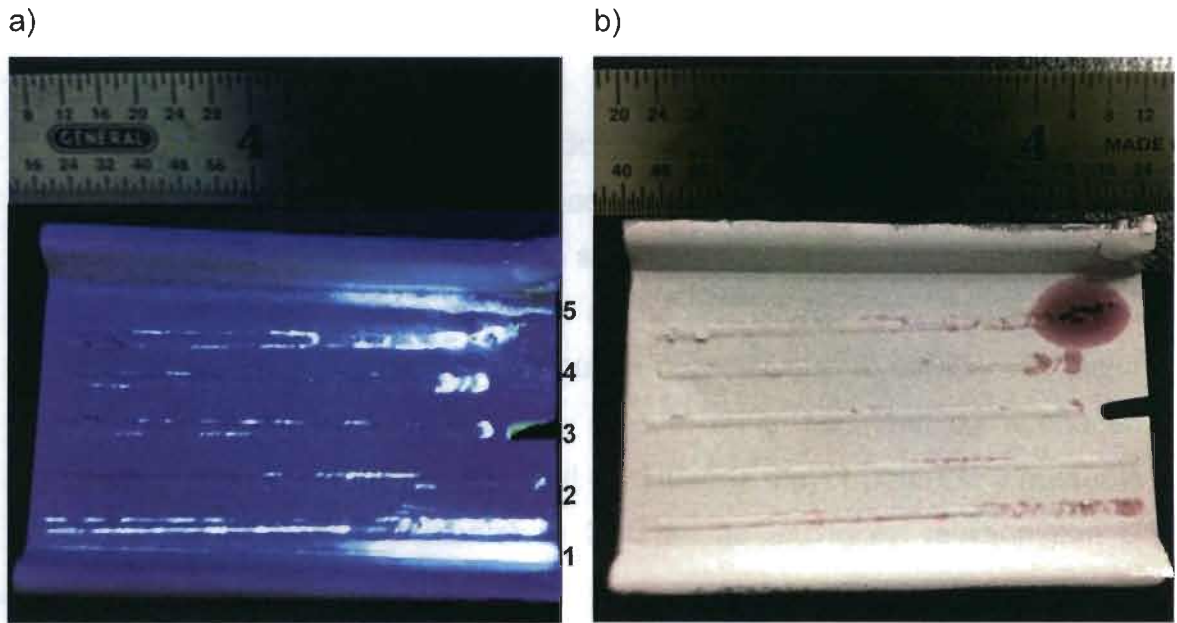


Figura 5. 2 Aplicación de líquidos de tipo I fluorescentes (a) donde se muestran indicaciones relevantes en los pies de la soldadura, y de tipo II visibles (b) donde no se muestran indicaciones relevantes.

Partículas magnéticas (MT)

En esta técnica no se encontró ninguna de las indicaciones reveladas por los ensayos anteriormente descritos; visuales y líquidos penetrantes. Solo revela la magnetización de la pieza sin localizar indicaciones. Esto se muestra en la Figura 5. 3

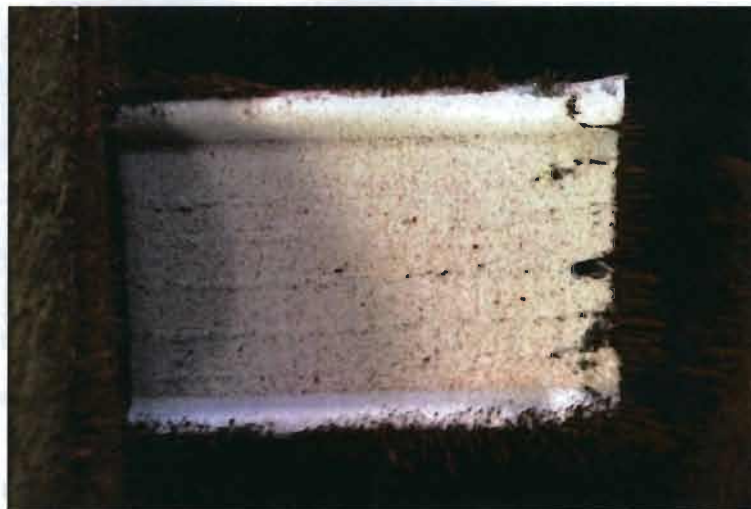


Figura 5. 3 Inspección mediante partículas magnéticas, en donde solo evidencia la magnetización de la pieza sin mostrar indicaciones

Caracterización Macroscópica

Tamaño de los cordones

A continuación se muestran los cordones de soldadura revelado a 0.67X aumentos. Imagen observada en un macroscopio óptico, en donde se muestra el ancho de cada cordón, con respecto a su potencia, la cual tiene una relación directa, entre mayor potencia, más ancho el cordón con presencia de discontinuidad. En la Figura 5. 4, se puede apreciar que el cordón con mejor textura y apariencia es el número 2, el cual tiene 1.07 mm de ancho en comparación con el cordón número 5 el cual tuvo la mayor potencia y presenta un ancho de 1.37mm, incrementando 0.30mm de ancho en relación con el cordón anterior.

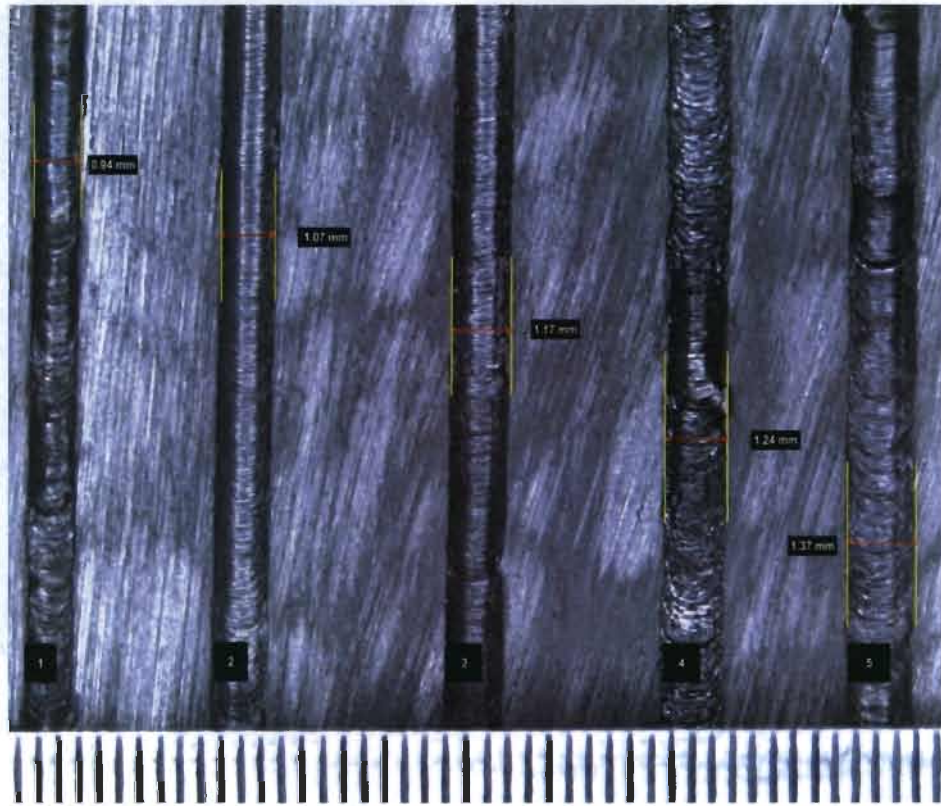


Figura 5. 4 Imagen macroscópica de los cordones inspeccionados, los cuales revelan el ancho de cada uno.

Identificación de ZAC's, revelado de indicaciones y medición de dilución

Se presentarán cada uno de los 5 cordones, en los cuales se obtuvieron los siguientes resultados.

Cordón 1

El ancho del cordón corresponde a 924.66 micras, similar al medido y mostrado por la Figura 5. 4. En este se observa la formación de grietas muy profundas y marcadas en el pie de la soldadura y un desalineamiento al nivel del metal base con respecto a la zona de fusión. Se puede apreciar también que no presenta una zona afectada por calor, con lo que solo se distingue la interface metal base y soldadura, aparentemente tiene un buen refuerzo como se observa en la Figura 5. 5. Por lo que en la Tabla 5. 1 se muestra el porcentaje de dilución y otros atributos obtenido por este cordón.

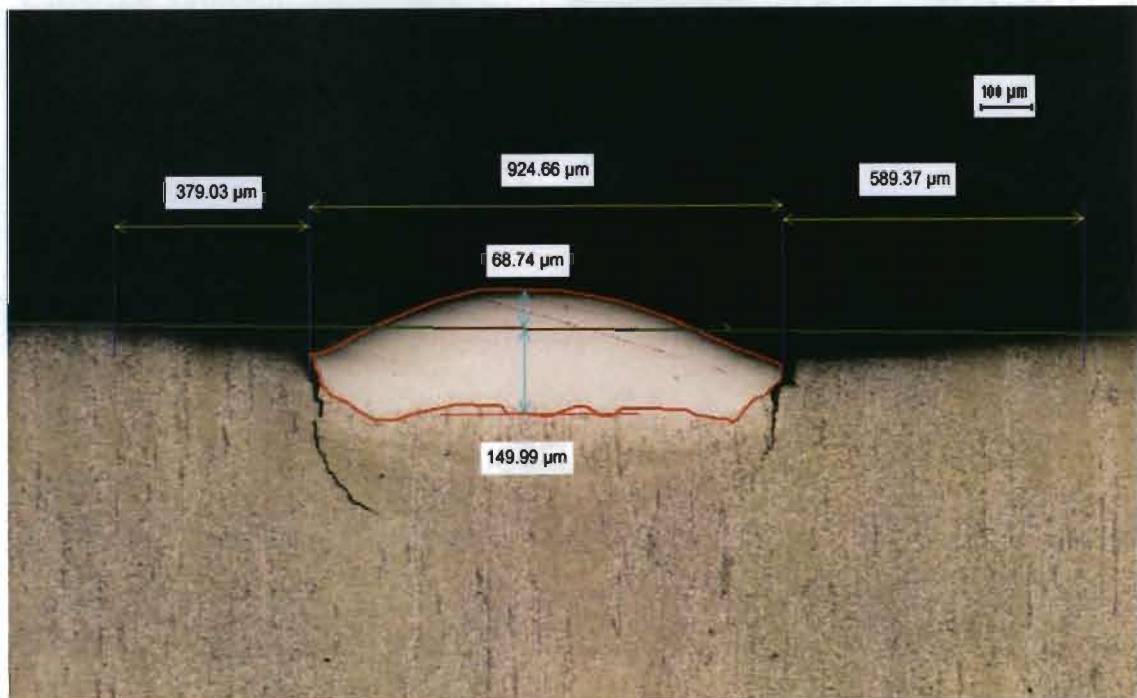


Figura 5. 5 Cordón de soldadura 1 visto a 5X

Tabla 5. 1 Atributos del Cordón 1

Porcentaje Dilución	ZAC	Indicaciones	Criterio
68%	No presenta	Desalineamiento y Grietas en los pies de la soldadura	Rechazo

Cordón 2

En este se muestra el ancho el cual corresponde a 1097.07 micras, similar al medido y mostrado por la Figura 5. 4. Se puede apreciar que no presenta zona afectada por calor, con lo que solo se distingue la interface metal base y soldadura. Se observa que tiene un excelente refuerzo de soldadura y también se puede encontrar micro porosidad la cual se estima <1 micra como se presenta en la Figura 5. 6. En la Tabla 5. 2 se mostrara el porcentaje de dilución y otros atributos obtenido por este cordón.

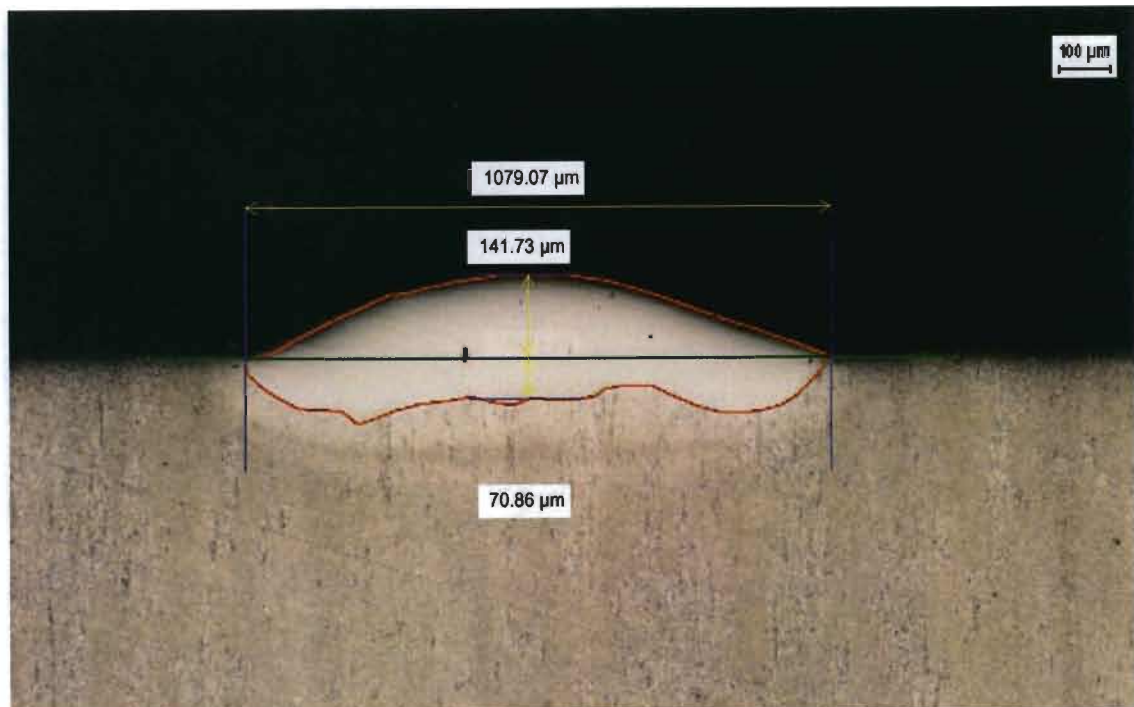


Figura 5. 6 Cordón de soldadura 2 visto a 5X

Tabla 5. 2 Atributos del Cordón 2

Porcentaje Dilución	ZAC	Indicaciones	Criterio
33%	No presenta	Micro porosidad	Aceptable

Cordón 3

En este se muestra el ancho el cual corresponde a 1137.08 micras, similar al medido y mostrado por la Figura 5. 4. Se puede apreciar que no presenta una zona afectada por calor, con lo que solo se distingue la interface metal base y soldadura, además de tener una excelente refuerzo de soldadura con presencia de micro grietas en los pies de la misma y micro porosidad la cual se estima <1 micra como se presenta en la Figura 5. 7. En la Tabla 5. 3 se muestra el porcentaje de dilución y otros atributos obtenido por este cordón.

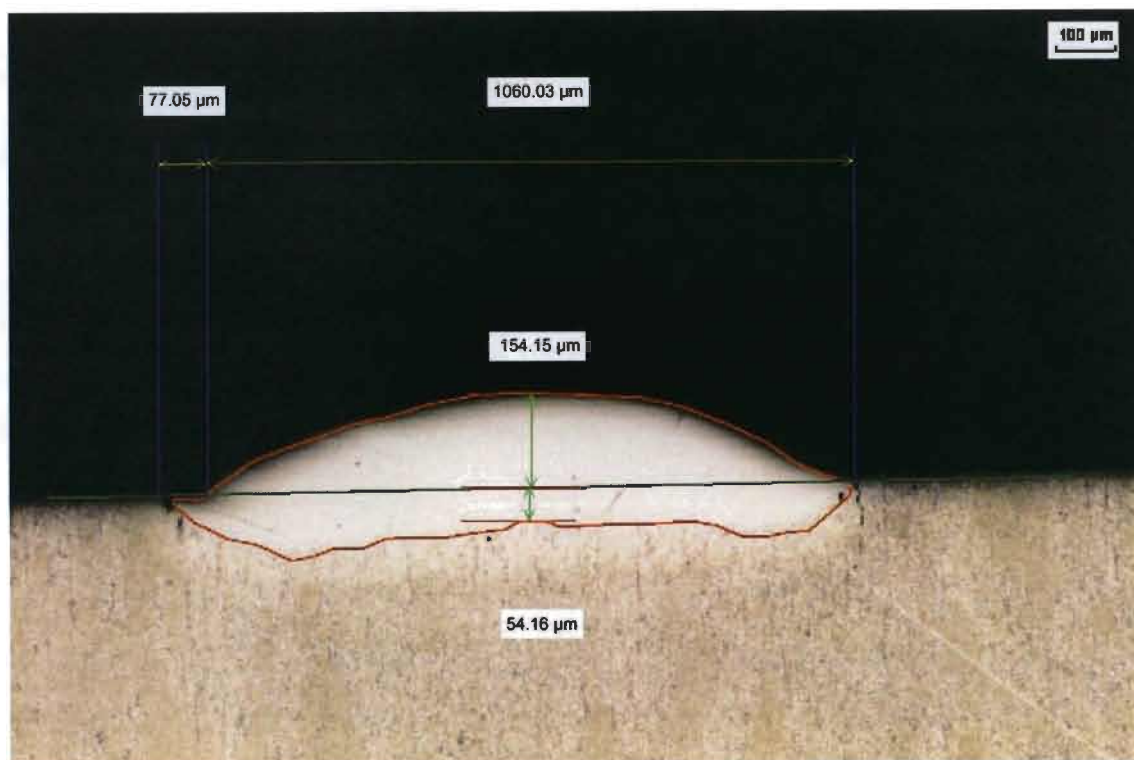


Figura 5. 7 Cordón de soldadura 3 visto a 5X

Tabla 5. 3 Atributos del Cordón 3

Porcentaje Dilución	ZAC	Indicaciones	Criterio
26%	No presenta	Micro porosidad y Gritas en los pies de soldadura	Rechazo

Cordón 4

En este se muestra el ancho el cual corresponde a 1295.21 micras, similar al medido y mostrado por la Figura 5. 4. Se puede apreciar que no presenta una zona afectada por calor, con lo que solo se distingue la interface metal base y soldadura, no presenta ninguna discontinuidad aparente, solo se aprecia que el refuerzo de soldadura es mínimo y la penetración es relativamente muy grande como se muestra en la Figura 5. 8 En la Tabla 5. 4 se muestra el porcentaje de dilución y otros atributos obtenido por este cordón.

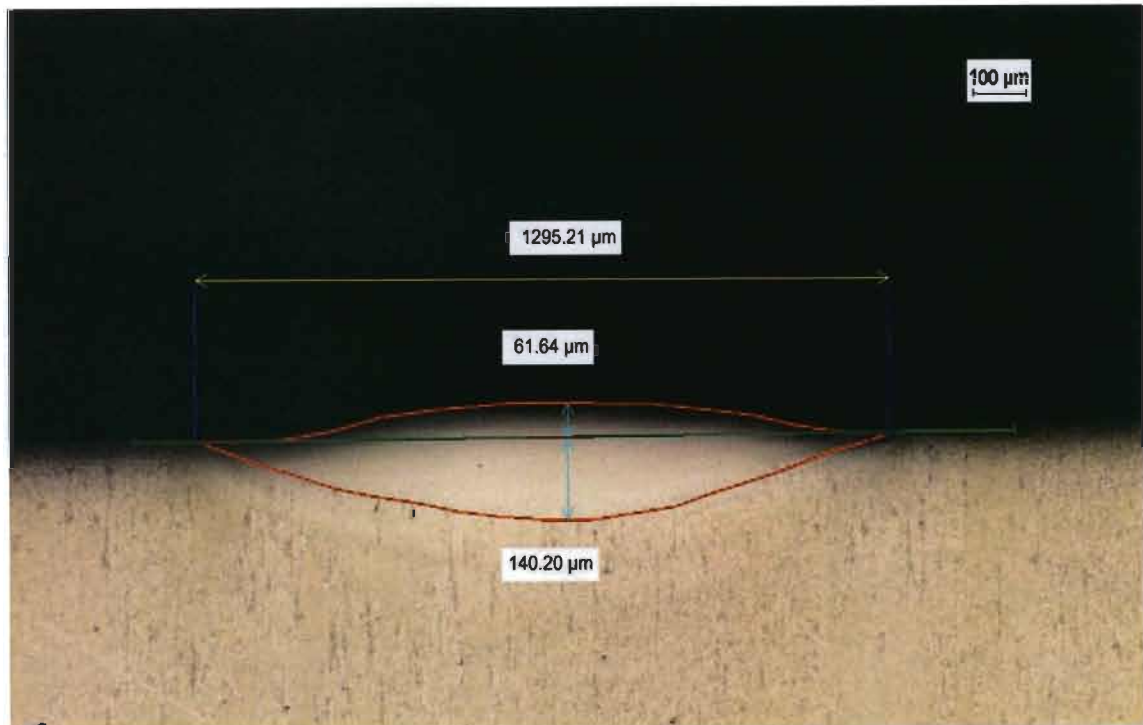


Figura 5. 8 Cordón de soldadura 4 visto a 5X

Tabla 5. 4 Atributos del Cordón 4

Porcentaje Dilución	ZAC	Indicaciones	Criterio
69%	No presenta	Bajo refuerzo	Aceptable

Cordón 5

En este se muestra el ancho el cual corresponde a 1294.59 micras, similar al medido y mostrado por la Figura 5. 4. Se puede apreciar que no presenta una zona afectada por calor, con lo que solo se distingue la interface metal base y soldadura, además de tener una excelente refuerzo de soldadura y dilución; cuenta con la presencia de una micro grieta en el pie derecho de la misma y micro porosidad la cual se estima <math>< 2</math> micras como se presenta en la Figura 5. 9 y en la Tabla 5. 5 se muestra el porcentaje de dilución y otros atributos obtenido por este cordón.

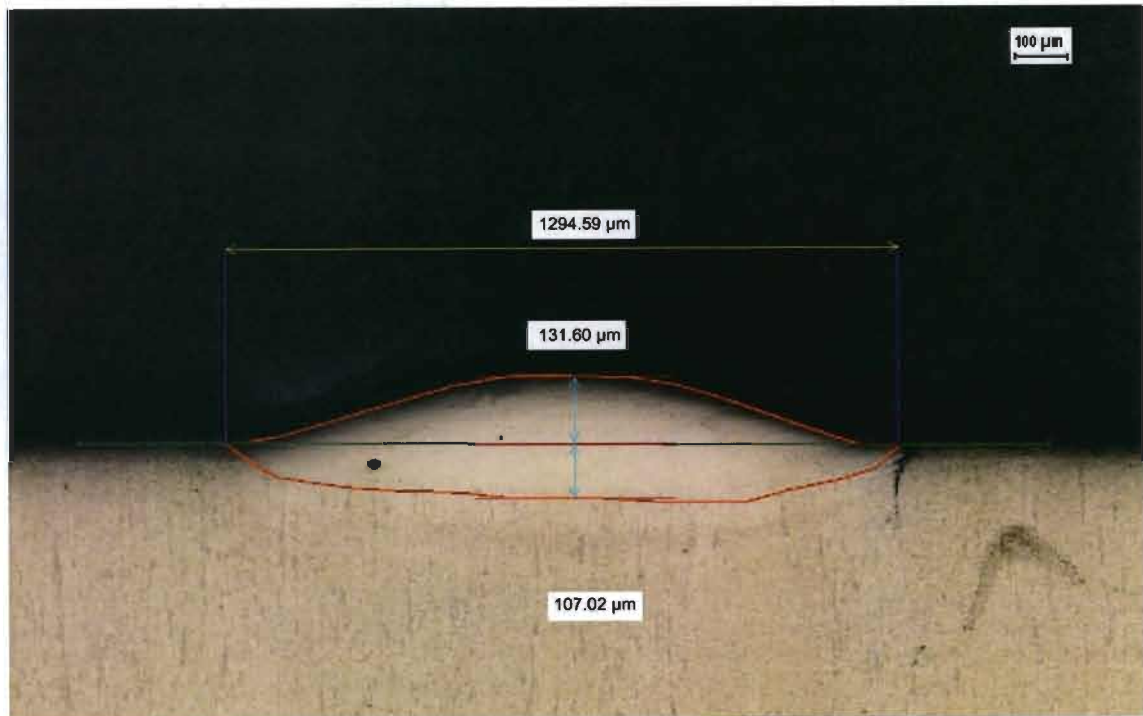


Figura 5. 9 Cordón de soldadura 5 visto a 5X

Tabla 5. 5 Atributos del Cordón 5

Porcentaje Dilución	ZAC	Indicaciones	Criterio
45%	No presenta	Micro porosidad y Gritas en los pies de soldadura	Rechazo

Caracterización microscópica y perfil de dureza vickers (HV)

A continuación se muestran los resultados de los cinco cordones de soldadura, incluyendo metal base y zonas afectadas por calor, por metalografías las cuales fueron obtenidas por el objetivo de 500X. El ataque para revelar su microestructura fue Picral (ácido pícrico 5ml, etanol 90ml, agua destilada 5ml) y HCl (ácido clorhídrico) al 4% por un tiempo de inmersión de 7 segundos. (12)

En caso para la microdureza la carga aplicada fue de 500gf con una permanencia de 10 segundos con una distancia de separación de 0.3 mm por indentación en soldadura y 0.5 mm por indentación en la zona afectada por calor y metal base, estas indentaciones fueron realizadas en las tres zonas principales para obtener resultados en caso de existir alguna variación en sus propiedades mecánicas ejercidas por la incidencia de temperatura al momento de soldar. No se tuvo la necesidad de colocar la pieza sobre baquelita para su manejabilidad.

Cordón 1

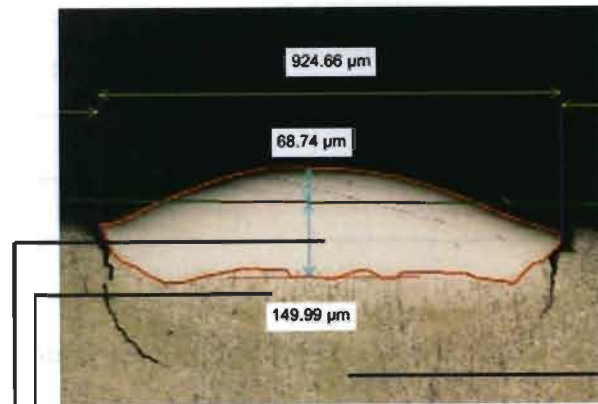


Figura 5. 10 Cordón de soldadura 1 visto a 5X

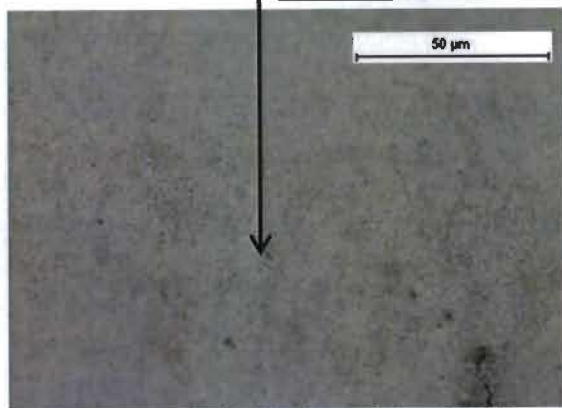


Figura 5. 11 Soldadura vista a 500X

Se observa una matriz completamente martensítica, además con la presencia de una micro grieta.

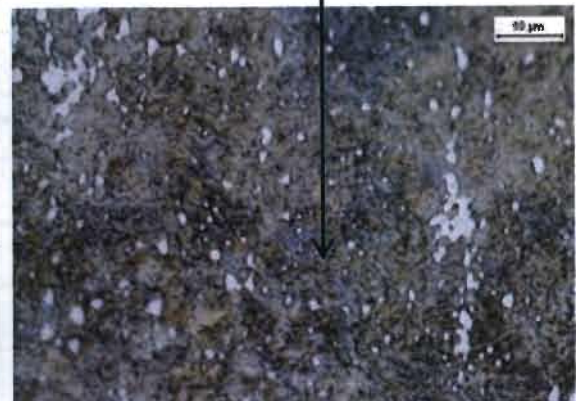


Figura 5. 12 ZAC vista a 1000X

Se observa el crecimiento y distribución uniforme de carburos de cromo $M_{23}C_7$, con presencia de austenita retenida en una matriz martensítica.

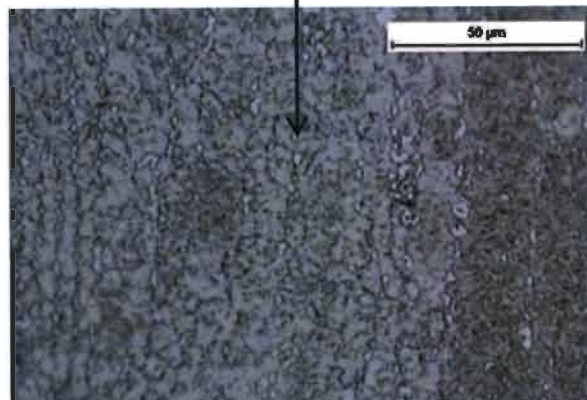


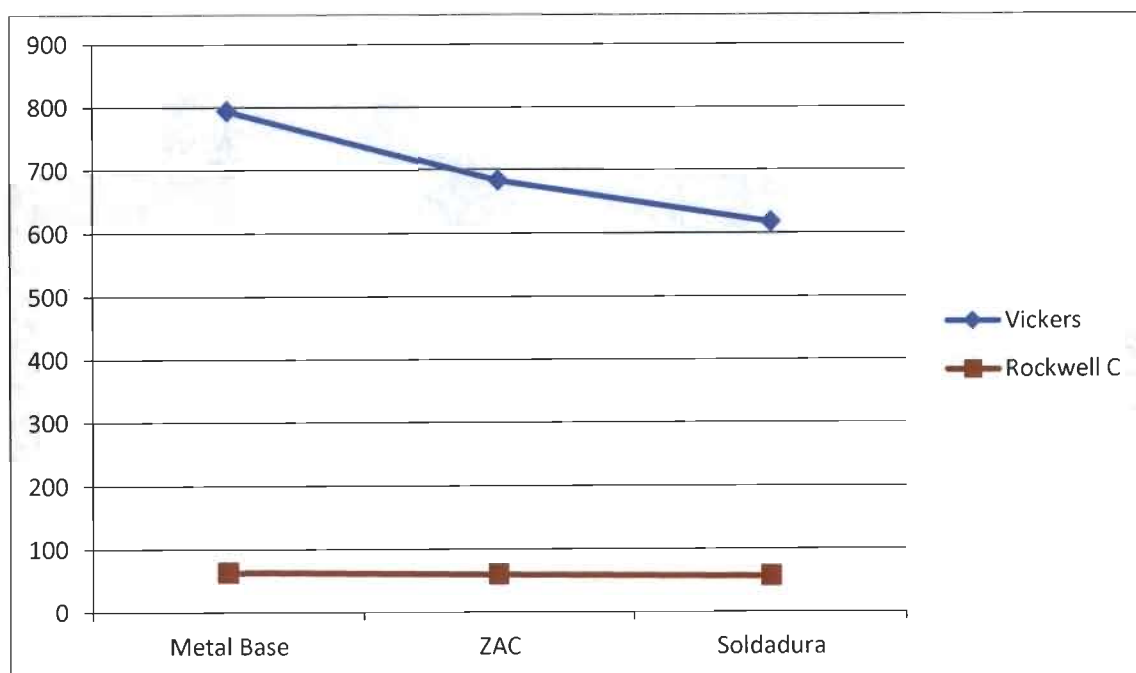
Figura 5. 13 Metal Base visto a 500X

Se observa una matriz martensítica, con gran presencia de austenita retenida y carburos de cromo $M_{23}C_7$ muy pequeños distribuidos uniformemente en la matriz.

Tabla 5. 6 Microdureza en Diversas Zonas Cordón 1

Dureza	Zona		
	Soldadura	Zona Afectada por calor (ZAC)	Metal Base
HV	617	683	793
HRC	56.2	59.4	63.8

Grafica 5. 1 Representación del comportamiento de la dureza del cordón 1 según el área analizada



Cordón 2

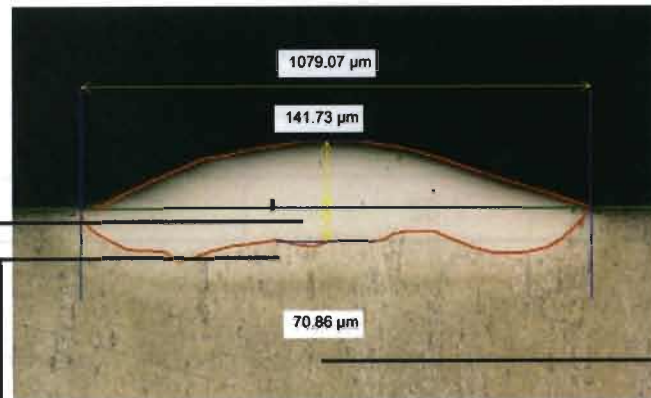


Figura 5. 14 Cordón de soldadura #2 visto a 5X

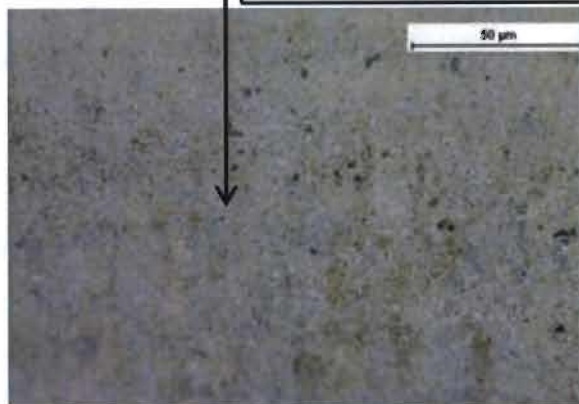


Figura 5. 15 Soldadura vista a 500X

Se observa una matriz completamente martensítica con presencia de micro porosidad.

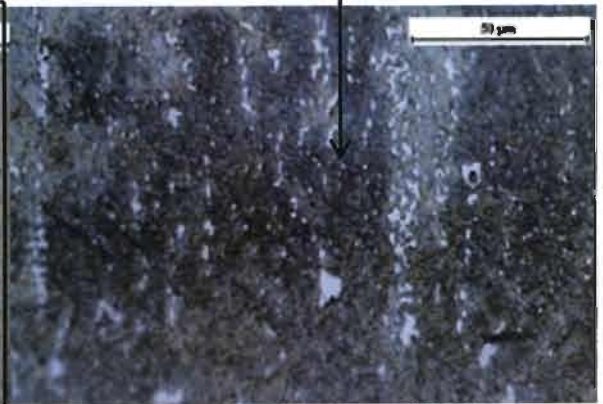


Figura 5. 16 ZAC vista a 1000X

Se observa el crecimiento y distribución uniforme de carburos de cromo M23C7, con presencia de austenita retenida en una matriz martensítica.

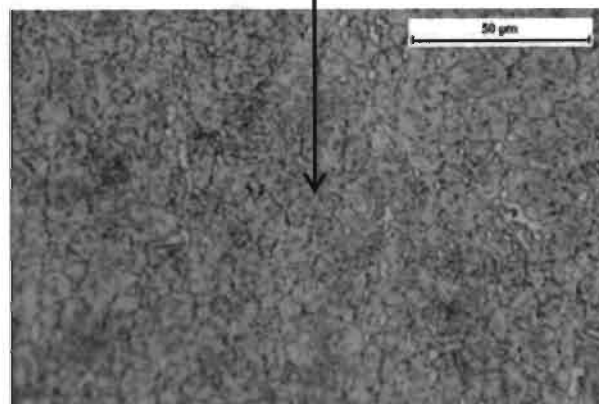


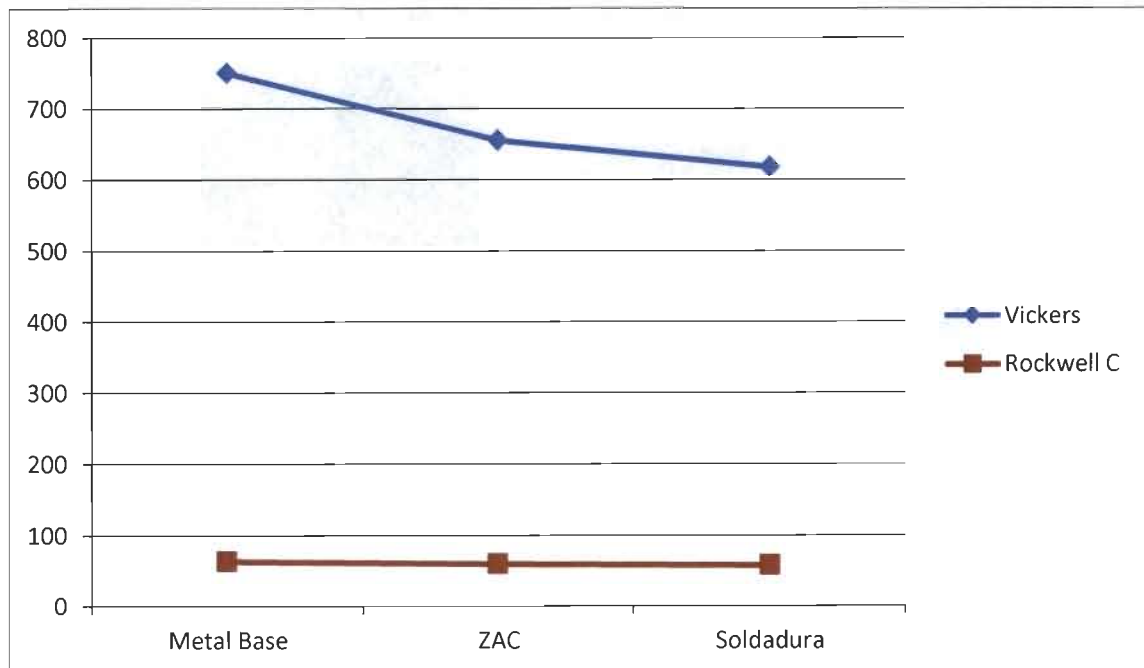
Figura 5. 17 Metal Base visto a 500X

Se observa una matriz martensítica, con gran presencia de austenita retenida y carburos de cromo M23C7 muy pequeños distribuidos uniformemente en la matriz.

Tabla 5. 7 Microdureza en Diversas Zonas Cordón 2

Dureza	Zona		
	Soldadura	Zona Afectada por calor (ZAC)	Metal Base
HV	618	655	749
HRC	56.3	58.1	62.1

Grafica 5. 2 Representación del comportamiento de la dureza del cordón 2 según el área analizada



Cordón 3

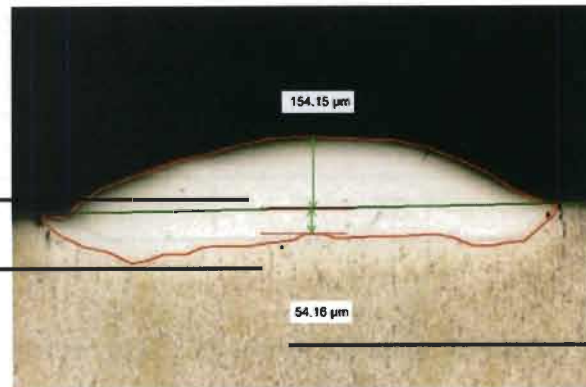


Figura 5. 18 Cordón de soldadura #3 visto a 5X

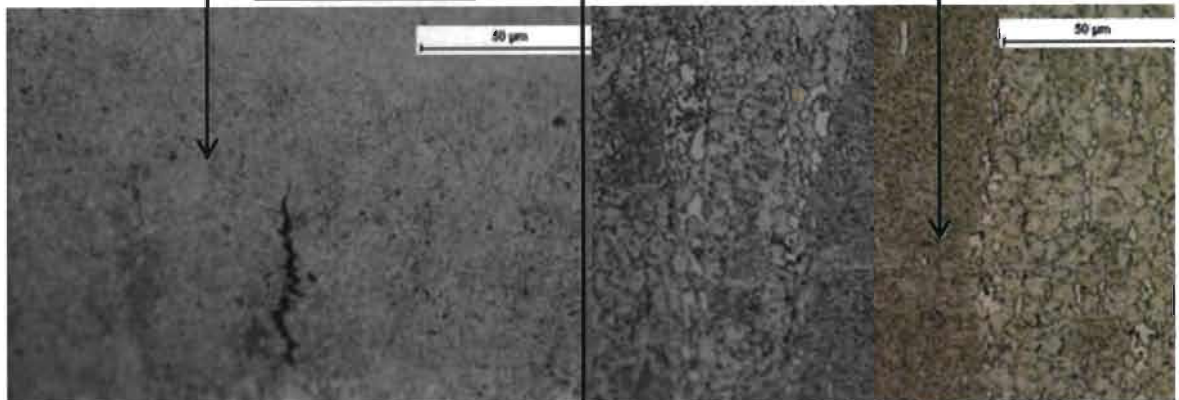


Figura 5. 19 Soldadura vista a 500X

Se observa una matriz completamente martensítica, además con la presencia de una micro grieta.

Figura 5. 20 ZAC vista a 1000X

Se observa el crecimiento y distribución uniforme de Carburos de cromo M₂₃C₇, con presencia de austenita retenida uniforme en patrones, en una matriz martensítica

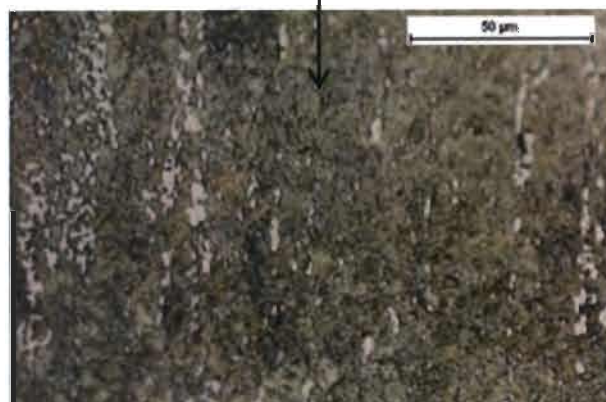


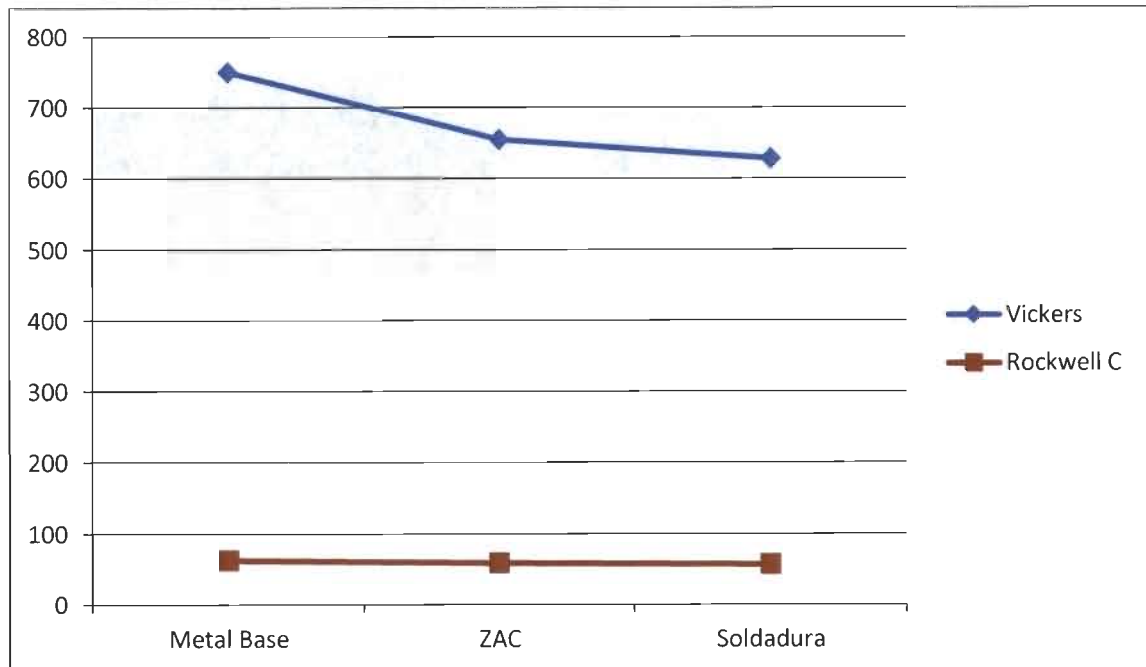
Figura 5. 21 Metal Base visto a 500X

Se observa una matriz martensítica, con gran presencia de austenita retenida y carburos de cromo M₂₃C₇ muy pequeños distribuidos uniformemente en la matriz.

Tabla 5. 8 Microdureza en Diversas Zonas Cordón 3

Dureza	Zona		
	Soldadura	Zona Afectada por calor (ZAC)	Metal Base
HV	629	655	749
HRC	56.8	58.1	62.1

Grafica 5. 3 Representación del comportamiento de la dureza del cordón 3 según el área analizada



Cordón 4

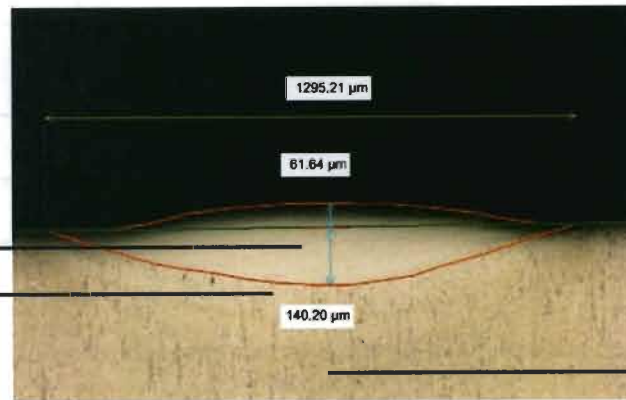


Figura 5. 22 Cordón de soldadura #4 visto a 5X

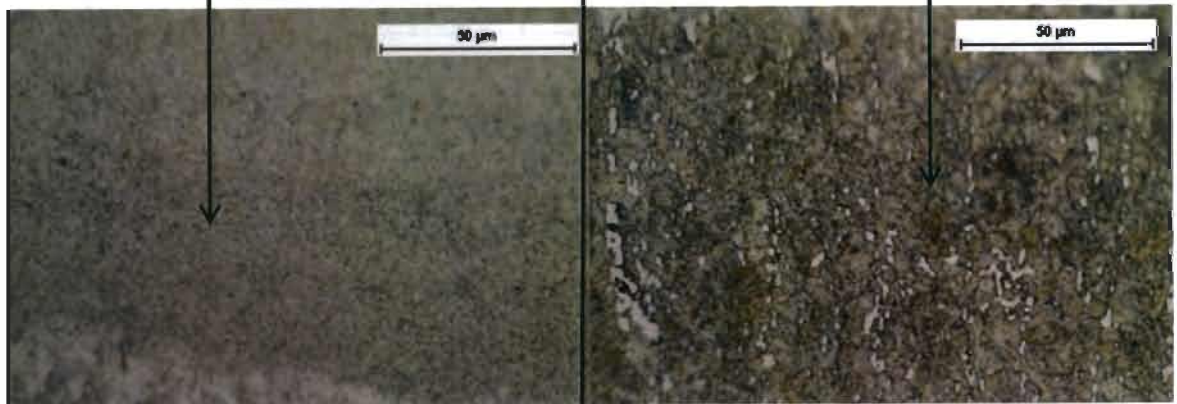


Figura 5. 23 Soldadura vista a 500X

Se observa una matriz completamente martensítica.

Figura 5. 24 ZAC vista a 1000X

Se observa el crecimiento y distribución uniforme de Carburos de cromo M₂₃C₇, con presencia de austenita retenida uniforme en patrones, en una matriz martensítica

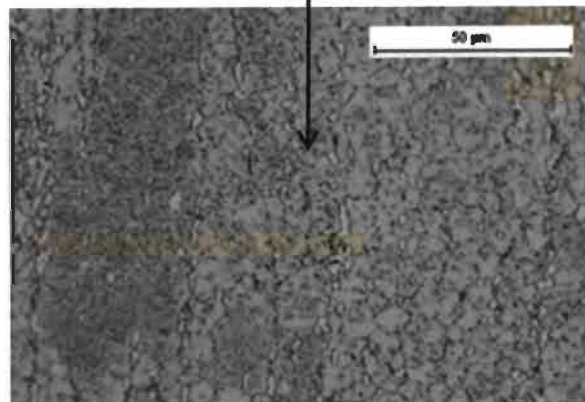


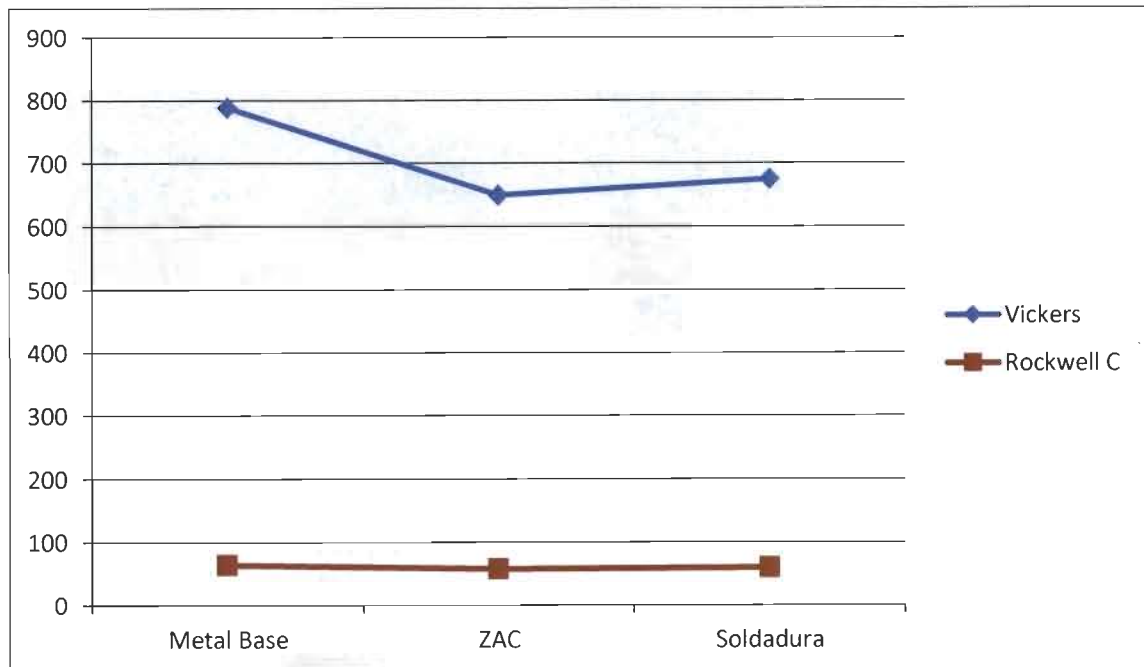
Figura 5. 25 Metal Base

Se observa una matriz martensítica, con gran presencia de austenita retenida y carburos de cromo M₂₃C₇ muy pequeños distribuidos uniformemente en la matriz.

Tabla 5. 9 Microdureza en Diversas Zonas Cordón 4

Dureza	Zona		
	Soldadura	Zona Afectada por calor (ZAC)	Metal Base
HV	675	650	788
HRC	59	57.9	63.6

Grafica 5. 4 Representación del comportamiento de la dureza del cordón 4 según el área analizada



Cordón 5

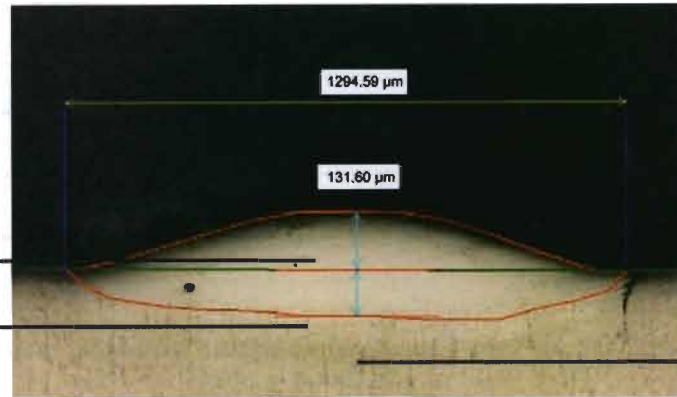


Figura 5. 26 Cordón de soldadura #5 visto a 5X

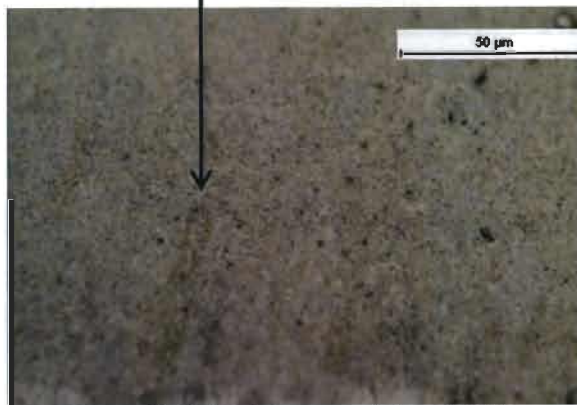


Figura 5. 27 Soldadura vista a 500X

Se observa una matriz completamente martensítica, además con la presencia de un micro poro y una micro grieta.

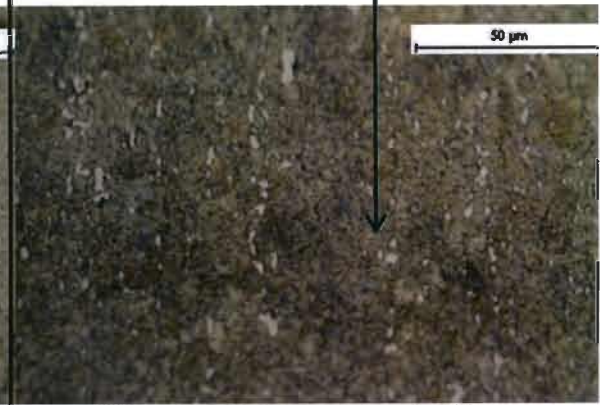


Figura 5. 28 ZAC vista a 1000X

Se observa el crecimiento y distribución uniforme de Carburos de cromo M23C7, con presencia de austenita retenida uniforme en patrones, en una matriz martensítica

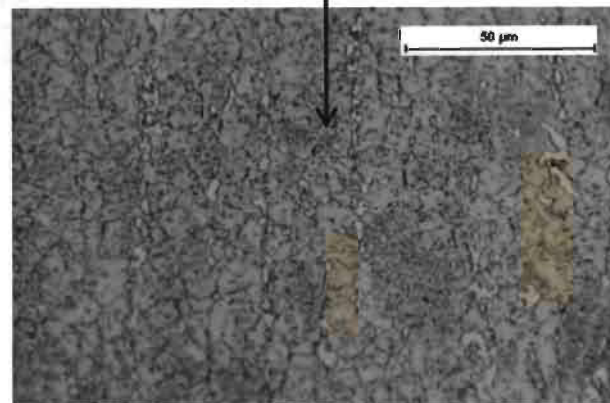


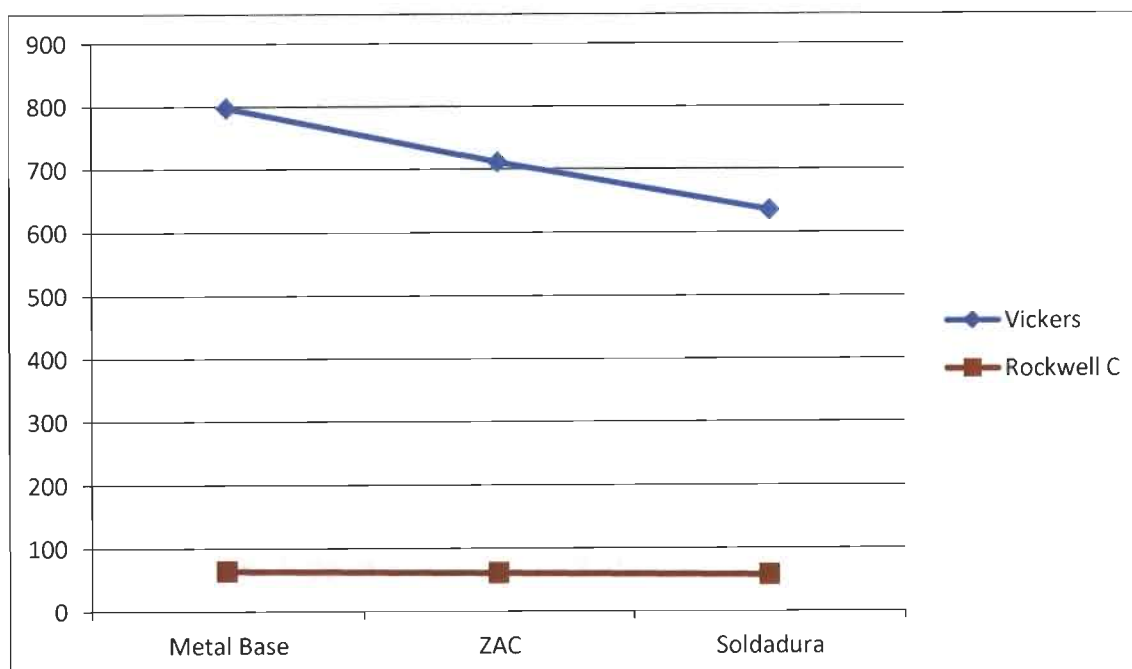
Figura 5. 29 Metal Base visto a 500X

Se observa una matriz martensítica, con gran presencia de austenita retenida y carburos de cromo M23C7 muy pequeños distribuidos uniformemente en la matriz.

Tabla 5. 10 Microdureza en Diversas Zonas Cordón 5

Dureza	Zona		
	Soldadura	Zona Afectada por calor (ZAC)	Metal Base
HV	636	711	798
HRC	57.1	60.6	63.9

Grafica 5. 5 Representación del comportamiento de la dureza del cordón 5 según el área analizada



CONCLUSIONES

Como se observa en los resultados, se ha llegado a la conclusión que el material soldado mediante láser cladding, se comportó como se esperaba tanto metalúrgica como mecánicamente.

Metalúrgicamente en cuanto a transformaciones de fase y crecimiento de carburos, si hubo precipitaron de carburos de cromo $M_{23}C_7$, en cuanto a la zona afectada por calor toda la austenita retenida del metal base, fue transformada a martensita con presencia de carburos mencionados anteriormente.

Mecánicamente la dureza no tuvo una variación significativa en la cual influya directamente sobre la resistencia a la tensión, compresión, fatiga y desgaste. Se corroboró mediante dureza Vickers (HV), la cual fue convertida a Rockwell C (HRC) y no hubo una variación significativa ya que los valores ronda entre 617-798 para vickers y de 56-63 para rockwell c; entre las tres zonas principales, las cuales fueron; metal base, zona afectada por calor y soldadura, por lo que se puede deducir que no hubo cambio alguno por acción de la temperatura, la variación de la dureza ronda el 12%

Se puede observar en los 5 cordones aplicados que es casi nula la zona afectada por calor, en el caso más extremo presentado una zona afectada por calor de 77micras de ancho, el cual se presenta en el cordón 3 como se muestra en la Figura 5. 7.

En general se puede concluir que a menor potencia aplicada, se observa una mejor apariencia, buena continuidad, el cordón de soldadura se hace más angosto y trae consigo mayor refuerzo, como se muestra en la Figura 5. 4

En el caso de cordón 1 se observa una buena apariencia, como se muestra en la Figura 5. 4, el cordón de soldadura se hace más angosto consigo se obtiene mayor refuerzo, pero ocurre una contracción por la solidificación instantánea del metal de aporte, sin fundir por completo el metal base, lo cual trae como consecuencia agrietamiento en los pies de la soldadura como se muestra en la Figura 5. 5. Se puede deducir que la soldadura no tiene buena penetración, por lo cual esta propensa al colapso, por lo que en este caso la soldadura es rechazada y los parámetros son descartados.

En el segundo caso para el cordón 2 se observa una excelente apariencia como se muestra en la Figura 5. 4, se incrementa un poco la potencia y el cordón incrementa el ancho, se obtiene una excelente relación entre penetración y refuerzo, los cuales están en niveles óptimos como se observa en la Figura 5. 6. Tiene una excelente acabado sin presencia de agrietamiento por contracción, por lo que en este caso la soldadura es aceptable y los parámetros son los correctos para continuar con futuras pruebas.

En el tercer caso el cordón 3 se aprecia el aumento en el ancho y disminuye un poco la penetración obteniendo una buena relación entre penetración y refuerzo de soldadura, pero con el aumento de la potencia ocasiona una micro grieta en el pie de la soldadura y otra muy cercana a esta en la misma zona por efecto de la contracción del metal de aporte. Goza de una buena apariencia Figura 5. 7, muy similar a la del cordón 2, pero con un mayor grado de discontinuidad como se muestra en la Figura 5. 4, por lo que en este caso queda rechazado el

cordón de soldadura por causa de la formación de la grieta en el pie, ya que puede llegar a colapsar en cualquier momento con este tipo de falla presente, por lo que no se recomienda utilizar estos parámetros para futuras pruebas.

En el cuarto caso para el cordón 4 con el aumento de la potencia se aprecia que aumenta el ancho del cordón Figura 5. 4, obteniendo una falta de continuidad en el mismo y consigo también aumenta drásticamente la penetración provocando un casi nulo refuerzo de soldadura como se aprecia en la Figura 5. 8, en este caso no existe presencia de la aparición de grietas en ninguna de las zonas, lo cual se puede deducir que este parámetro puede ser utilizado para futuras aplicaciones. Por lo que en este caso es aceptable el cordón de soldadura, la desventaja en este caso sería el refuerzo; que es lo que se busca en todos los casos, es demasiado pequeño, casi imperceptible hablando de 61.64 micras por lo que no contribuirá exitosamente para la aplicación que se busca en este caso.

En el quinto caso para el cordón 5 se aumenta al máximo la potencia del láser y se aprecia el aumento en el ancho del cordón mostrando una buena continuidad de soldadura Figura 5. 4, así mismo es este caso se denota la buena relación entre refuerzo – penetración (Figura 5. 9), aunado a esto se obtuvo una micro grieta en el pie de la soldadura y porosidad presente inmersa en la soldadura, por lo que en este caso queda rechazado el cordón de soldadura y los parámetros utilizados no son los deseables para futuras pruebas.

Específicamente se llegó a la conclusión que los parámetros propuestos para el cordón 2, son los más adecuados para futuras pruebas, incluso para la elaboración de procedimientos calificados de soldadura. Por lo que se puede llegar a la conclusión que este proceso de soldadura no afecta las propiedades de los materiales.

BIBLIOGRAFÍA

1. **CENTRO DE INGENIERIA Y DESARROLLO INDUSTRIAL (CIDESI).** *Tema I. Introducción al estampado de metales.* 2012.
2. —. *Tema III. Tipos de herramientas para el estampado.* s.l. : CIDESI, 2011.
3. **Aggen, G.** *ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys.* s.l. : ASM, 2005. págs. 1167-1189.
4. **Roberts, George.** *Tool Steels.* s.l. : ASM, 1998.
5. **fabricatin gand meta lworking.** <http://www.fabricatingandmetalworking.com/>. [En línea]
6. **ASTM Standards .** *ASTM A681 Standard Specification for Tool Steels Alloy.* s.l. : ASTM, 1999.
7. **mbmachining.**
<http://www.mbmachining.com.au/images/CaseStudies/ToolSteelMachiningL.jpg> . [En línea]
8. *Effects of the alloy composition on phase constitution and properties of laser deposited Ni-Cr-B-Si coatings.* **Hemmati, I.** s.l. : ELSEVIER, 2013.
9. *Investigation of Thermal Cycle and Hardness Distribution in the Laser Cladding of AISI H13 Tool Steel produced by a High Diode Laser.* **Farahmand, Parisa.** San Diego : Proceedings of the ASME 2013, 2013.
10. *Dilution effects in laser cladding of a Ni-Cr-B-Si hardfacing alloy.* **Hemmati, I. & Ocelik V.** Malta : s.n., 2012.
11. **ASTM Standar .** *ASTM A370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.* s.l. : ASTM.
12. **International, ASTM.** *ASTM E 407 Standard practice for microetching metals and alloys.* s.l. : ASTM International, 1999. 407.
13. **Pro acero S.A.** <http://proaceros.webnode.es/products/rolado-en-lamina-negra-aluminio-acero-inoxidable/>. [En línea]
14. **American Welding Society.** *WELDING INSPECTION TECHNOLOGY.* s.l. : AWS, 2000.
15. **KOU, SINDO.** *WELDING METALLURGY.* New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2003.
16. **INTERPRESAS.** <http://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/46758-Nueva-tecnologia-de-proteccion-para-la-industria-petroquimica-espanola-el-laser-cladding.html> . [En línea]
17. *AWS 3.0 Standard Welding Terms and Definitions.* **AWS.** LeJeune Road, Miami : An American National Standard, 2001, Vol. 12 th.

18. *Effecto of actual WC content on the reciprocation wear of a laser cladding Ni-Cr-B-Si alloy reinforced whit WC.* **M.R., Fernández.** Asturias : CrossMark, 2014.
19. *Microstructure and Mechanical Properties of Laser Clad and Post-Cladding Tempered AISI H13 Tool Steel.* **GURURAJ TELASANG, JYOTSNA DUTTA MAJUMDAR.** 2309, s.l. : The minerals, Metals & Materials Society and ASM International, 2015, Vol. 46A.
20. *Evolution of microestructure and properties in laser cladding of a Ni-Cr-B-Si hardfacing alloy.* **Ocelik, V. & Hemmati, I.** Malta : s.n., 2011.
21. *Electron Microscopy characterization of Ni-Cr-B-Si laser deposited coatings.* **Hemmati, I. & Ocelik, V.** Malta : s.n., 2013.
22. *Problemas en la reparacionpor laser cladding de superficies de acero AISI D2 tratado termicamente.* **Candel J.J., Amigo V.** 46, Madrid : s.n., 2010.
23. **ASTM Standar.** *Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness.* s.l. : ASTM, 2005.
24. **Manual de Soldadura AWS Tomo III Cap. 22. SOLDADURA CON RAYO LÁSER.** s.l. : AWS.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Prensa de 250 Ton de carga para conformado de piezas (Cortesía COMIMSA).....	3
Figura 2. 1 Clasificación de los metales ferrosos (3)	8
Figura 2. 2 Butil para arranque de viruta de carburo de tungsteno (5).....	9
Figura 2. 3 Clasificación de los aceros aleados (3)	10
Figura 2. 4 Maquinado de plantilla por CNC de un acero grado herramienta con el cual posteriormente se utilizada como plantilla (7)	12
Figura 2. 5 Plantillas utilizadas para el conformado de otros aceros (7)	12
Figura 2. 6 Metalografía de acero D2 atacada con Picral y HCL al 4% (12).....	15
Figura 2. 7 Roladora con rodillos de acero D2 para moldeado de tubería (13)	16
Figura 2. 8 Tubería con espesor de 127 mm, rodada por aceros D2 (Cortesía COMIMSA).....	16
Figura 2. 9 Saneado de componente metálico mediante el proceso convencional GTAW (Cortesía COMIMSA).....	17
Figura 2. 10 Sistema de operación del proceso SMAW (14) (15).....	18
Figura 2. 11 Sistema de operación del proceso GTAW (14) (15).....	19
Figura 2. 12 Sistema de operación del proceso SAW (14) (15).....	20
Figura 2. 13 Proceso Laser (LBW) (14) (15)	22
Figura 2. 14 Reparación superficial por láser cladding en alabe de turbina (16)	23
Figura 2. 15 Reparación superficial por láser cladding en componente erosionado (16).....	25
Figura 2. 16 Aplicación del recubrimiento a metal base. (17)	26
Figura 2. 17 Recubrimiento superficial Cladding (17).....	27
Figura 2. 18 Simbología de soldadura para recubrimiento superficial (17).....	27
Figura 2. 19 Cálculo para el porcentaje de la dilución (17).....	28
Figura 4. 1 Diagrama de la metodología usada para la experimentación.....	34
Figura 4. 2 Metal de aporte utilizado para micro laser cladding (Cortesía COMIMSA)	35
Figura 4. 3 Inspección visual a cordones de soldadura	38
Figura 4. 4 Aplicación de Líquidos de Tipo I Fluorescentes (a), y de Tipo II Visibles (b)	39
Figura 4. 5 Inspección mediante partículas magnéticas secas visibles con yugo electromagnético.....	40
Figura 4. 6 Macro ataque relevando las zonas de las indentaciones realizadas por el perfil de dureza realizada con la metodología Vickers.	41
Figura 5. 1 Inspección Visual, en donde revela que el cordón con la mejor apariencia es el marcado con el número 2 y el de peor apariencia lo revela como el número 5.	43
Figura 5. 2 Aplicación de líquidos de tipo I fluorescentes (a) donde se muestran indicaciones relevantes en los pies de la soldadura, y de tipo II visibles (b) donde no se muestran indicaciones relevantes.	44
Figura 5. 3 Inspección mediante partículas magnéticas, en donde solo evidencia la magnetización de la pieza sin mostrar indicaciones.....	44
Figura 5. 4 Imagen macroscópica de los cordones inspeccionados, los cuales revelan el ancho de cada uno.	45
Figura 5. 5 Cordón de soldadura 1 visto a 5X.....	46

Figura 5. 6 Cordón de soldadura 2 visto a 5X	47
Figura 5. 7 Cordón de soldadura 3 visto a 5X	48
Figura 5. 8 Cordón de soldadura 4 visto a 5X	49
Figura 5. 9 Cordón de soldadura 5 visto a 5X	50
Figura 5. 10 Cordón de soldadura 1 visto a 5X	52
Figura 5. 11 Soldadura vista a 500X	52
Figura 5. 12 ZAC vista a 1000X	52
Figura 5. 13 Metal Base visto a 500X	52
Figura 5. 14 Cordón de soldadura #2 visto a 5X	54
Figura 5. 15 Soldadura vista a 500X	54
Figura 5. 16 ZAC vista a 1000X	54
Figura 5. 17 Metal Base visto a 500X	54
Figura 5. 18 Cordón de soldadura #3 visto a 5X	56
Figura 5. 19 Soldadura vista a 500X	56
Figura 5. 20 ZAC vista a 1000X	56
Figura 5. 21 Metal Base visto a 500X	56
Figura 5. 22 Cordón de soldadura #4 visto a 5X	58
Figura 5. 23 Soldadura vista a 500X	58
Figura 5. 24 ZAC vista a 1000X	58
Figura 5. 25 Metal Base	58
Figura 5. 26 Cordón de soldadura #5 visto a 5X	60
Figura 5. 27 Soldadura vista a 500X	60
Figura 5. 28 ZAC vista a 1000X	60
Figura 5. 29 Metal Base visto a 500X	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Comparativa química y dureza entre un acero grado herramienta D2 y un acero convencional 1045 AISI/SAE (3).....	4
Tabla 2. 1 Clasificación AISI/ASTM y características principales del acero (3)	11
Tabla 2. 2 Composiciones químicas de los aceros D (6) (3).....	13
Tabla 2. 3 Dureza obtenida por diferentes medios de tratamientos térmicos (6).....	14
Tabla 2. 4 Resistencia a la tensión por su dureza (11).....	14
Tabla 2. 5 Parámetros preestablecidos en la salida del láser modo pulso Nd:YAG	23
Tabla 2. 6 Métodos de ensayos para corroborar la calidad de los materiales (14).....	29
Tabla 4. 1 Composición química del acero H13 (3).....	35
Tabla 4. 2 Dureza obtenida por diferentes medios de tratamientos térmicos (6).....	36
Tabla 4. 3 Resistencia a la tensión por su dureza (11).....	36
Tabla 4. 4 Parámetros utilizados en la aplicación de cladding.....	37
Tabla 4. 5 Calor de entrada para cada prueba.....	37
Tabla 5. 1 Atributos del Cordón 1	46
Tabla 5. 2 Atributos del Cordón 2	47
Tabla 5. 3 Atributos del Cordón 3	48
Tabla 5. 4 Atributos del Cordón 4	49
Tabla 5. 5 Atributos del Cordón 5	50
Tabla 5. 6 Microdureza en Diversas Zonas Cordón 1.....	53
Tabla 5. 7 Microdureza en Diversas Zonas Cordón 2.....	55
Tabla 5. 8 Microdureza en Diversas Zonas Cordón 3.....	57
Tabla 5. 9 Microdureza en Diversas Zonas Cordón 4.....	59
Tabla 5. 10 Microdureza en Diversas Zonas Cordón 5.....	61

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2. 1 Cálculo de calor de entrada.....	28
--	----

ÍNDICE DE GRAFICAS

Grafica 5. 1 Representación del comportamiento de la dureza del cordón 1 según el área analizada	53
Grafica 5. 2 Representación del comportamiento de la dureza del cordón 2 según el área analizada	55
Grafica 5. 3 Representación del comportamiento de la dureza del cordón 3 según el área analizada	57
Grafica 5. 4 Representación del comportamiento de la dureza del cordón 4 según el área analizada	59
Grafica 5. 5 Representación del comportamiento de la dureza del cordón 5 según el área analizada	61

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Christian Gerardo Galindo Samaniego nació en la ciudad de Saltillo, Coahuila el día 13 de enero de 1988.

Sus estudios de licenciatura fueron realizados en el Instituto Tecnológico de Saltillo donde egreso en el 2012 con el título como Ingeniero en Materiales con especialidad en materiales avanzados.

Su desarrollo profesional lo obtuvo durante un lapso de 4 años en la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, en donde estuvo como colaborador en los laboratorios de pruebas mecánicas destructivas, posteriormente fue cambiado a integridad mecánica región norte en donde fue desarrollado como inspector de ensayos no destructivos, por último fue adquirido por el departamento de capacitación en donde se formó como instructor en diversos cursos enfocado a la soldadura por la experiencia adquirida durante su estancia en otros departamentos.

Actualmente (2016), es el ingeniero en soldadura de la empresa TrinityRail en la cual se fabrican carros de ferrocarril.